

Texte

**01**  
**06**

ISSN  
0722-186X

## Langzeituntersuchungen zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes in der ungesättigten Bodenzone

Umwelt  
Bundes  
Amt 

Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 298 76 712/02  
UBA-FB 000874



## **Langzeituntersuchungen zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes in der ungesättigten Bodenzone**

von

**Dipl.-Geol. Klaudia Hettwer, Prof. Dr. Jürgen Warrelmann,  
Prof. Dr. Wolfgang Heyser**

Zentrum für Umweltforschung und Umweltechnologie,  
Universität Bremen

**Dipl.-Geol. Simone Gaab, Prof. Dr. Wilhelm Püttmann**  
Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

**Uwe Drewes**  
alphacon GmbH, Ganderkesee

**Dipl.-Geol. Dieter Vehlhaber**  
Büro für Umweltgeologie, Hude

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
<http://www.umweltbundesamt.de>  
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

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

Redaktion: Fachgebiet II 4.3 Barbara Kabardin  
Fachgebiet II 4.1 Konstantin Terytze

Dessau, Januar 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>Anhangsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>10</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>12</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>12</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Anlass</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 Ziel und Aufgabenstellung</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3 Beschreibung der Projektkonzeption</b> .....	<b>16</b>
1.3.1 Teilschritt 1 .....	17
1.3.2 Teilschritt 2 .....	17
<b>1.4 Aufbau des Berichtes</b> .....	<b>18</b>
<b>2 Teilschritt 1</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Allgemeiner Kriterien-/Parameterkatalog</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 Untersuchungsfläche</b> .....	<b>25</b>
2.2.1 Standortbeschreibung .....	25
2.2.2 Beschreibung des Testfeldes und der Vergleichsareale .....	26
<b>2.3 Untersuchungsprogramm am TL Schäferhof-Süd</b> .....	<b>27</b>
<b>3 Teilschritt 2</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1 Boden</b> .....	<b>31</b>
3.1.1 Untersuchungsmethoden .....	31
3.1.1.1 Probennahme .....	31
3.1.1.2 Analytik .....	32
3.1.1.3 Qualitätssicherung bei der Entnahme von Intervallproben .....	33
3.1.2 Ergebnisse .....	36
3.1.2.1 Bodenprofile.....	36
3.1.2.2 Schadstoffverteilung .....	37
3.1.2.3 Schadstoffabbau.....	45
3.1.2.4 MKW-Screening.....	57
3.1.2.5 Physiko-chemische und biologische Parameter .....	58
3.1.3 Interpretation der Ergebnisse .....	66

<b>3.2</b>	<b>Bodenluft</b> .....	<b>69</b>
3.2.1	Untersuchungsmethoden .....	69
	3.2.1.1 Einrichtung der Messstellen.....	69
	3.2.1.2 Probennahme und Analytik.....	69
3.2.2	Ergebnisse .....	70
	3.2.2.1 Reguläres Monitoring.....	70
	3.2.2.2 Zusätzliche Messkampagne .....	80
3.2.3	Interpretation der Ergebnisse .....	82
<b>3.3</b>	<b>Sickerwasser</b> .....	<b>84</b>
3.3.1	Untersuchungsmethoden .....	84
	3.3.1.1 Einbau der Messstellen.....	84
	3.3.1.2 Probennahme und Analytik.....	86
	3.3.1.3 Zusatzversuche zur Qualitätssicherung bei der Probennahme .....	88
3.3.2	Ergebnisse .....	92
3.3.3	Interpretation der Ergebnisse .....	101
<b>3.4</b>	<b>Grundwasser</b> .....	<b>104</b>
3.4.1	Untersuchungsmethoden und Analytik.....	104
	3.4.1.1 Einrichtung der Messstellen.....	104
	3.4.1.2 Probennahme und Analytik.....	105
3.4.2	Ergebnisse .....	106
	3.4.2.1 Hydraulik.....	106
	3.4.2.2 Räumliche Schadstoffverteilung .....	107
	3.4.2.3 Zeitliche Entwicklung der Schadstoffgehalte .....	112
	3.4.2.4 Hydrochemische Indikatoren für biologische Abbauvorgänge.....	116
	3.4.2.5 Metabolitenbildung.....	120
3.4.3	Interpretation der Ergebnisse .....	123
<b>3.5</b>	<b>Klimadaten und Bodentemperatur</b> .....	<b>124</b>
3.5.1	Datenaufnahme.....	124
3.5.2	Ergebnisse .....	124
	3.5.2.1 Klimadaten.....	124
	3.5.2.2 Bodentemperatur .....	127
3.5.3	Interpretation der Ergebnisse .....	128
<b>3.6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>130</b>
<b>4</b>	<b>Handlungsempfehlungen für das TL Schäferhof-Süd und weiterer Forschungsbedarf</b> .....	<b>136</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>140</b>
<b>5</b>	<b>Summary</b> .....	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>157</b>

# Anhangsverzeichnis

## Anhang 1 Karten und Pläne

- 1.1 Übersichtskarte Tanklager Schäferhof-Süd (Nienburg/ Weser)
- 1.2 Lageskizze: Bohrpunkte, Probennahmestellen und Messstellen

## Anhang 2 Boden

- 2.1 Übersichtstabelle der Analysenergebnisse in den Bohrarealen B1- B10
- 2.2 Analysenergebnisse der BTEX-Testsondierung (B11)
- 2.3 Interne und externe Qualitätssicherung bei der Start- und Abschlussbeprobung
- 2.4 Prüfungsvorschrift 'Bestimmung von Benzoesäure in Bodenproben' (Hausmethode Umweltschutz Nord/ alphacon)
- 2.5 Statistische Auswertung der Schadstoffgehalte

## Anhang 3 Bodenluft

- 3.1 Übersichtstabelle der Analysenergebnisse aus dem Bodenluft-Monitoring
- 3.2 Prognose der Sickerwasserkonzentrationen aus dem Bodenluft-Monitoring

## Anhang 4 Sickerwasser

- 4.1 Übersichtstabelle der Analysenergebnisse aus dem Sickerwasser-Monitoring
- 4.2 Zusatzversuch zur Wiederfindung leicht flüchtiger Schadstoffe im Sickerwasser

## Anhang 5 Grundwasser

- 5.1 Grundwasserstände am TL Schäferhof Süd
- 5.2 Analysendaten der Grundwasserproben
- 5.3 Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)
- 5.4 Prüfungsvorschrift: Bestimmung von Benzoesäure in Wasserproben (Hausmethode Umweltschutz Nord/ alphacon)
- 5.5 Analysenverfahren zur Bestimmung von Metaboliten (Hausverfahren Universität Frankfurt a.M.)
- 5.6 Analysenverfahren zur Bestimmung von niedermolekularen Aliphaten in Wasser (Hausverfahren Dr. Weßling Laboratorien GmbH Altenberge)

## Anhang 6 Klimadaten

- 6.1 Klimadaten Dez. '01 – Nov. '04
- 6.2 Bodentemperatur Dez. '01 – Nov. '04

# Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 2.1 Flussdiagramm für die Durchführung der Feldarbeiten im zweiten Teilschritt.....	30
Abb. 3.1: BTEX- und Alkylbenzolgehalte in den Einzelproben (EP) und Intervallproben (IP) (K3, K4: ungesättigte Bodenzone, K6: gesättigte Bodenzone).....	35
Abb. 3.2: MKW-, BTEX- und Alkylbenzol-Gehalte der Bohrareale B3 und B5 bei der Abschlussbeprobung in der ungesättigten Bodenzone (u: 0-4 m), dem Kapillarsaum (k: 4-6 m) und der gesättigten Bodenzone (g: 6-8 m).....	37
Abb. 3.3: MKW-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Startuntersuchung 2001.....	39
Abb. 3.4: MKW-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Abschlussuntersuchung 2004.....	40
Abb. 3.5: BTEX-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Startuntersuchung 2001.....	41
Abb. 3.6: BTEX-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Abschlussuntersuchung 2004.....	42
Abb. 3.7: Alkylbenzol-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Startuntersuchung 2001.....	43
Abb. 3.8: Alkylbenzol-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Abschlussuntersuchung 2004.....	44
Abb. 3.9: Ermittlung der Selbstreinigungsleistung mit Hilfe von Konfidenzintervallen.....	46
Abb. 3.10: 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der MKW-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone in den Bohrarealen B4, B5, B6 und B7.....	47
Abb. 3.11: 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der BTEX-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone in den Bohrarealen B4 und B5.....	48
Abb. 3.12: 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der Alkylbenzol-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone in den Bohrarealen B4, B5 und B7.....	48
Abb. 3.13: Boxplots der MKW-Gehalte in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, Vk: B9) sowie der gesamten Messwerte.....	49
Abb. 3.14: Boxplots der BTEX-Gehalte in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, Vk: B9) sowie der gesamten Messwerte.....	50
Abb. 3.15: Boxplots der Alkylbenzol-Gehalte in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, Vk: B9) sowie der gesamten Messwerte.....	51
Abb. 3.16: MKW-Gehalte pro Bohrmeter (Mittelwert der Probennahme) in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, kontaminiertes Vergleichsareal: B9).....	53
Abb. 3.17: BTEX-Gehalte pro Bohrmeter (Mittelwert der Probennahme) in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, kontaminiertes Vergleichsareal: B9).....	54
Abb. 3.18: Alkylbenzol-Gehalte pro Bohrmeter (Mittelwert der Probennahme) in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, kontaminiertes Vergleichsareal: B9).....	55
Abb. 3.19: GC/MS-Chromatogramm der Bodenprobe aus 2-3 m Tiefe (Testfeld, 2004).....	57
Abb. 3.20: GC/MS-Chromatogramm der Bodenprobe aus 4-6 m Tiefe (Testfeld, 2004).....	58
Abb. 3.21: TOC- und DOC-Gehalte (mg/kg) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).....	60
Abb. 3.22: Gesamtstickstoffgehalte (mg/kg) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).....	61
Abb. 3.23: Phosphatgehalte (mg/kg) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).....	61
Abb. 3.24: pH-Werte im Boden bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).....	62

Abb. 3.25: Boxplot-Diagramm der pH-Werte im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal bei der Start- und Abschlussbeprobung. ....	63
Abb. 3.26: Bodenatmung (mg CO <sub>2</sub> /24h*kg*TS) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004). ....	64
Abb. 3.27: Dehydrogenase-Aktivität (µg TPF/16h g TS) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).....	65
Abb. 3.28: Nitrifikation und Ammoniumverbrauch (mg N/kg TS) bei der Startbeprobung (2001). ....	66
Abb. 3.29: Sauerstoffgehalt (Vol.%) im Testfeld, kontaminierten Vergleichsareal und unkontaminierten Vergleichsareal. ....	71
Abb. 3.30: Kohlendioxidgehalt (Vol.%) im Testfeld, kontaminierten Vergleichsareal und unkontaminierten Vergleichsareal. ....	71
Abb. 3.31: Spektrum der n-Alkane im Testfeld. ....	72
Abb. 3.32: BTEX-Aromatenspektrum im Testfeld.....	73
Abb. 3.33: Alkylbenzol-Spektrum im Testfeld. ....	73
Abb. 3.34 Boxplot-Diagramme der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte (Vol.%) sowie der organischen Gesamtkohlenstoffgehalte, der n-Alkane, der BTEX-Gehalte und Alkylbenzolgehalte (mg/m <sup>3</sup> ) an den Bodenluftmessstellen. ....	74
Abb. 3.35: Gesamtkohlenstoffgehalt [mg/m <sup>3</sup> ], Sauerstoff-, Kohlendioxidgehalt [Vol. %] sowie Summe der n-Alkane, BTEX und Alkylbenzole [mg/m <sup>3</sup> ] im Testfeld (T).. ....	75
Abb. 3.36: Gesamtkohlenstoffgehalt [mg/m <sup>3</sup> ], Sauerstoff-, Kohlendioxidgehalt [Vol. %] sowie Summe der n-Alkane, BTEX und Alkylbenzole [mg/m <sup>3</sup> ] im kontaminierten Vergleichsareal (Vk). ....	76
Abb. 3.37: Gesamtkohlenstoffgehalt [mg/m <sup>3</sup> ], Sauerstoff-, Kohlendioxidgehalt [Vol. %] sowie Summe der n-Alkane, BTEX und Alkylbenzole [mg/m <sup>3</sup> ] im unkontaminierten Vergleichsareal (Vuk).. ....	77
Abb. 3.38: Boxplot-Diagramme des Sauerstoff- und Kohlendioxidgehaltes (Vol.%) an den Bodenluftmessstellen in den Jahren 2002, 2003 und 2004 .....	78
Abb. 3.39: Boxplot-Diagramme des organischen Gesamtkohlenstoffgehaltes und der n-Alkane (mg/m <sup>3</sup> ) im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal in den Jahren 2002, 2003 und 2004.....	79
Abb. 3.40: Bodenluftzusammensetzung im Testfeld von Mai bis Oktober 2003. ....	80
Abb. 3.41: Schadstoffgehalte im Testfeld von Mai bis Oktober 2003.....	81
Abb. 3.42: Wiederfindung von deuteriertem Toluol D8 im gesammelten Sickerwasser der Messstellen T-SW1_2 und T-SW2_2 (200 hPa) im Vergleich zur Kontrollprobe (ohne Unterdruck). ....	89
Abb. 3.43: Nitrat- und Sulfatgehalt (mg/l) zu Versuchsbeginn und nach 3 Wochen Standzeit. ....	91
Abb. 3.44: Leitfähigkeit (µS/cm) und pH-Wert zu Versuchsbeginn und nach 3 Wochen Standzeit.....	91
Abb. 3.45: Nitratgehalte (mg/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe. ....	94
Abb. 3.46: Boxplot-Diagramm der Nitrat- und Sulfatgehalte an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.....	94
Abb. 3.47: Sulfatgehalte (mg/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.....	95
Abb. 3.48: Leitfähigkeitswerte (µS/cm) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe. ....	96
Abb. 3.49: Hydrogenkarbonatgehalte (mmol/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe. ....	96



Abb. 3.50: Boxplot der Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und der Hydrogenkarbonatgehalte ( $\text{mmol}/\text{l}$ ) an den 2 m tiefen Messstellen.....	97
Abb. 3.51: pH-Werte an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.....	98
Abb. 3.52: Boxplot des pH-Wertes und der TOC-Gehalte ( $\text{mg}/\text{l}$ ) an den 2 m tiefen Messstellen. ....	98
Abb. 3.53: TOC-Gehalte ( $\text{mg}/\text{l}$ ) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe. ....	99
Abb. 3.54: Eisengehalte ( $\text{mg}/\text{l}$ ) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe. ....	100
Abb. 3.55: Boxplot der Sickerwassermenge zum Ende des Probennahme-Intervalles an den 2 m und 4 m tiefen Messstellen.....	101
Abb. 3.56: Übersichtskarte des Tanklagers „Schäferhof-Süd“ mit den Grundwassergleichen vom 12.03.2003 und den Grundwassermessstellen. ....	106
Abb. 3.57: Verlauf der Grundwasserganglinien in den Brunnen und flach verfilterten Multilevelmessstellen vom 07.01.2002 bis 31.08.2004.....	107
Abb. 3.58: Schematische Darstellung des geologischen Untergrundes entlang der Transekte.. ....	108
Abb. 3.59: Boxplot: BTEX-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen).....	109
Abb. 3.60: Konzentrationsverteilung der BTEX-Aromaten im Grundwasser am 2.12.2002.....	110
Abb. 3.61: Vergleich der Konzentrationsverteilung der BTEX-Aromaten in den Messstellen MP 4-flach, MP 5-flach, MP 5-tief und B 13.....	111
Abb. 3.62: Zeitlicher Verlauf der BTEX-Gehalte in den flach verfilterten Messstellen. ....	112
Abb. 3.63: Zeitlicher Verlauf der BTEX-Gehalte und des Grundwasserspiegels in den flach verfilterten GW.....	113
Abb. 3.64: Schematische Darstellung der Diagramme in Abb. 3.63. ....	115
Abb. 3.65: Boxplot: Fe(II)-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen).....	117
Abb. 3.66: Boxplot: Sauerstoff-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen).....	118
Abb. 3.67: Boxplot: Nitrat- und Sulfat-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen). ....	119
Abb. 3.68: Messstelle MP 2-flach. Bei steigenden BTEX-Konzentrationen ist deutlich eine Abnahme der Nitrat- und Sulfatkonzentrationen zu beobachten. ....	120
Abb. 3.69: Boxplot: Methan-Gehalte vom 03.06.2002 – 31.08.2004 (7 Messungen). ....	120
Abb. 3.70: Zuordnung von aromatischen Säuren als Metabolite korrespondierender aromatischer Ausgangsverbindungen.....	121
Abb. 3.71: Boxplot: Benzoesäuren (Summe der Einzelverbindungen) vom Juni 2002 – Juni 2004 (5 Messungen).....	122
Abb. 3.72: Monatliche Niederschlagsmenge (mm) am TL Schäferhof-Süd in den Jahren 2002, 2003 und 2004.....	127
Abb. 3.73: Temperaturprofil am TL Schäferhof-Süd im Dezember 2003, April 2004 und August 2004.....	128

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Bewertungskatalog der Parameter mit einem Einfluss auf natürliche Selbstreinigungsprozesse .....	23
Tab. 2.1:	Bewertungskatalog der Parameter mit einem Einfluss auf natürliche Selbstreinigungsprozesse (Fortsetzung).....	24
Tab. 2.2:	Schlüsselparameter zur Identifizierung natürlicher Selbstreinigungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone am Standort Tanklager Schäferhof-Süd.....	28
Tab. 3.1:	Verwendete Normen und Methoden für die Untersuchung von Bodenproben. ....	32
Tab. 3.2:	Zahl und Art der Probennahme bei der BTEX-Testsondierung. ....	34
Tab. 3.3:	Prozentualer Anteil der Mittel- und Medianwerte des jeweiligen Schadstoffes bei der Abschlussbeprobung 2004 gegenüber der Startbeprobung 2001. ....	45
Tab. 3.4:	Abbauraten 0. Ordnung und maximale Abbaukonstanten 1. Ordnung für BTEX, Alkylbenzole und MKW im Testfeld.....	56
Tab. 3.5	Verwendete Normen und Methoden für die Untersuchung von Bodenluftproben. ....	70
Tab. 3.6:	Gesamtkohlenstoffkonzentrationen, Summe der n-Alkane, BTEX und andere Alkylbenzole (mg/m <sup>3</sup> ) zwischen Januar 2001 und September 2004.....	72
Tab. 3.7:	Temperaturkorrigierte Henry-Konstanten ausgewählter Schadstoffe und aus den Bodenluftkonzentrationen (BL) resultierende Schadstoffbelastungen im Sickerwasser (SW).....	84
Tab. 3.8:	Vergleich der Eisen-, Mangan-, Chrom- und Nickelgehalte in der 'VK-SW_4' mit einem Edelstahl Typ 14404 und den anzunehmenden Gehalten im Sandboden.....	86
Tab. 3.9:	Verwendete Normen und Methoden für die Untersuchung von Sicker- und Grundwasserproben .....	87
Tab. 3.10:	Prioritätenliste der zu analysierenden Parameter im Sickerwasser. ....	88
Tab. 3.11:	Wiederfindung verschiedener physikalisch-chemischer Parameter der Proben T-SW2_2 und Vuk-Sw_2 nach 3 Wochen Standzeit unter Unterdruck sowie einer mit Nitrat angereicherten Kontrollprobe. ....	90
Tab. 3.12:	Ausbaudaten der Grundwassermessstellen.....	104
Tab. 3.13:	Reaktionsgleichungen des aeroben und anaeroben Abbaus von Benzol (gemäß WIEDEMEYER et al. 1995). ....	116
Tab. 3.14:	Monatsmittelwerte von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Luftdruck und Windgeschwindigkeit sowie der Monatsniederschlagsmenge am TL Schäferhof-Süd von Januar 2002 bis März 2004. ....	125

## Abkürzungsverzeichnis

ALA AG	Altlastenausschuss Arbeitsgruppe
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BTEX	(Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole)-Aromaten
d	Tag(e)
DIN	Deutsche Industrienorm
DN 100	Durchmesser Nennweite
DOC	Dissolved Organic Carbon
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EN	Euronorm
ENA	Enhanced Natural Attenuation
FID	Flame Ionisation Detector
GC	Gaschromatographie
GC-MS	Gaschromatographie- Massenspektrometer
GC-MSD	Gaschromatographie- Massenselektiver Detektor
GC-PID	Gaschromatographie- Photoionisationsdetektor
GWM	Grundwasser-Messstelle
h	Stunde(n)
HPLC	High Pressure Liquid Chromatography
ISO	International Standard Organization
k. A.	keine Angaben
LABO	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz (Baden-Württemberg)
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MNA	Monitored Natural Attenuation
ML	Multilevel
MP	Messpunkt
NA	Natural Attenuation
n.b.	nicht bestimmt
OFD	Oberfinanzdirektion
OS	Originalsubstanz
QS	Qualitätssicherung
ROK	Rohroberkante
SW	Sickerwasser
T	Testfeld
TL	Tanklager
TOC	Total Organic Carbon
TPF	Triphenyl-Formazan
TS	Trockensubstanz
u. GOK	unter Geländeoberkante
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vk	kontaminiertes Vergleichsareal
Vuk	unkontaminiertes Vergleichsareal

## Kurzfassung

Gegenstand des Forschungsprojektes waren die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der Wasser ungesättigten Bodenzone für die ausgewählten Schadstoffe MKW, BTEX und Alkylbenzole am Beispiel der ehemals militärisch genutzten Liegenschaft TL Schäferhof-Süd. Auf der Grundlage eines Kriterien- und Parameterkataloges wurden in einem Testfeld, einem gering kontaminierten und einem unkontaminierten Vergleichsareal Bodenuntersuchungen sowie über drei Jahre ein Bodenluft-, Sickerwasser- und Grundwasser-Monitoring durchgeführt und Klimadaten kontinuierlich aufgezeichnet. In den Bodenproben konnte partiell eine Schadstoffminderung nachgewiesen werden. Die Bodenluft- und Grundwasserdaten belegen den andauernden mikrobiellen Schadstoffabbau.

Der vorliegende Bericht umfasst die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus den Feldarbeiten sowie die Schlussfolgerungen für eine Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und –rückhaltes und der angewendeten Probennahme- und Analysemethoden. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für den Standort TL Schäferhof-Süd sowie weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Schlagwörter: Natürliche Selbstreinigungsprozesse; Schadstoffminderung; Abbau- und Rückhalteprozesse; ungesättigte Bodenzone; (Schlüssel-) Parameter; MKW; BTEX; Tanklager; militärisch genutzte Liegenschaften; Monitoring; Boden; Bodenluft; Sickerwasser; Grundwasser

## Abstract

The potentials and limitations of natural degradation and sorption processes of the contaminants petroleum hydrocarbons, BTEX and alkylbenzenes in the vadose zone were investigated during an research and development project considering the former military site Schäferhof-Süd as example. Based on identified criteria and parameters soil investigations and a monitoring of soil air, seepage water and ground water were carried out for three years in various experimental plots (contaminated testplot, low contaminated and an uncontaminated reference plot). Climate data were continuously registered. Soil samples showed a partial decrease of contaminations. Soil air and groundwater data indicated ongoing biodegradation processes.

The report comprises the results and interpretations of the field investigations as well as the conclusions for the assessment of natural attenuation and the evaluation of applied sampling and analytical methods. Finally, the possible option for action at the underground storage tank site Schäferhof-Süd and the requirement of research is pointed out.

Keywords: Natural Attenuation; natural degradation and sorption processes; unsaturated zone; vadose zone; (key-) parameters; petroleum hydrocarbons; BTEX; underground storage tank site (UST); military site; monitoring; soil; soil air; seepage water; ground water

## Vorwort

Im Auftrag des Umweltbundesamtes führten von Februar 2001 bis März 2005 das Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie (UFT) in Bremen, die Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main und die Firma Umweltschutz Nord GmbH in Ganderkesee (bis August 2003), die Firma alphacon GmbH in Ganderkesee (ab August 2003) und das Büro für Umweltgeologie in Hude die zweite Phase des Forschungsprojektes 'Langzeituntersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe am Beispiel kontaminierter militärischer Liegenschaften' (FKZ 298 76 712 / 02) am Standort des ehemaligen Tanklagers (TL) Schäferhof-Süd bei Nienburg/ Weser durch.

Das Forschungsprojekt wurde über die gesamte Laufzeit von einem fachlichen Projektbeirat bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern des Umweltbundesamtes (UBA), des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), der Oberfinanzdirektion Hannover (OFD), des Bundesamtes für Materialforschung und -prüfung (BAM), der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie der Wehrbereichsverwaltungen Nord und Ost der Bundeswehr begleitet. Von November 2001 bis Juni 2003 führte das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) auf dem Standort Tanklager Schäferhof Süd ein Ressortforschungsvorhaben im Grundwasser gesättigten Bereich durch („Praktische Anwendung eines risiko-orientierten Bewertungsansatzes bei Grundwasserschäden durch Mineralölprodukte“, BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG, 2003). Um die Aussagefähigkeit der Ergebnisse beider Projekte zu erhöhen, wurden Daten und Erkenntnisse ausgetauscht. Das BBR ermöglichte dankenswerter Weise die Nutzung seiner im Untersuchungsgebiet neu errichteten Grundwasser-Messstellengruppen im Rahmen dieses Forschungsprojektes.

# 1 Einleitung

## 1.1 Anlass

Zu Beginn der Neunzigerjahre nahmen militärisch genutzte Liegenschaften mit einer Gesamtfläche von etwa 1 Million ha ca. 2,8 % der Fläche der Bundesrepublik Deutschland ein (UMWELTBUNDESAMT 1999). Inzwischen dient ein großer Teil dieser Liegenschaften nicht mehr militärischen Zwecken. Derzeit ist durch weitere Standortschließungen bei der Bundeswehr ein Zuwachs solcher ungenutzten ehemals militärisch genutzten Liegenschaften zu verzeichnen. Eine zukünftige Verwertung ist insbesondere dann erschwert, wenn durch den früheren Militärbetrieb Verunreinigungen des Untergrundes mit Schadstoffen verursacht wurden. Je nach ehemaliger betrieblicher Nutzung liegen auf den Standorten nach wie vor punktuelle oder großflächige, diffuse Kontaminationen vor. Schadstoffverunreinigungen durch Mineralöl und Mineralölprodukte (wie z.B. Benzin oder Diesel-Kraftstoffe) kommen dabei wegen ihrer Verbreitung eine standortübergreifende Bedeutung zu.

Es entspricht dem Zweck des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBODSCHG 1998), wenn für eine nachhaltige Wiederherstellung von Bodenfunktionen neben technischen Sanierungsmaßnahmen auch natürliche Schadstoffminderungsprozesse als umwelt- und bodenschonende, kostengünstige (passive) Methode bewusst und kontrolliert genutzt werden. Im Hinblick auf eine künftige Verwertung kontaminierter, ehemals militärisch genutzter Liegenschaften und um die potenzielle Gefährdung, die von solchen Altstandorten für die Schutzgüter ausgeht, besser einschätzen zu können, ist es sinnvoll, die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes auf diesen Liegenschaften auszuloten. Die Untersuchung ehemals militärisch genutzter Liegenschaften hinsichtlich ihres natürlichen Abbau- und Rückhaltevermögens kann auch für zivile Altstandorte Beispielcharakter haben.

Zu natürlichen Abbauprozessen von Schadstoffen im Grundwasser liegt eine Vielzahl von Untersuchungen und Erkenntnissen insbesondere aus den USA vor, wo diese als 'Natural Attenuation' bezeichneten Prozesse bereits an zahlreichen Standorten als Alternative oder Ergänzung zu technischen Sanierungsmaßnahmen genutzt werden. Für den Umgang mit 'Natural Attenuation' gibt es mehrere Standards und Richtlinien (EPA 1999, ASTM 2004). Eine wichtige Voraussetzung ist der standortspezifische Nachweis sowie eine Überwachung und Quantifizierung der Prozesse, die in den technischen Protokollen von WIEDEMEIER et al. (1995, 1998) dargelegt werden.

In der Bundesrepublik Deutschland hat das HESSISCHE LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2004) eine 'Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA)' verfasst, die für die organischen Schadstoffgruppen MKW, BTEX, LCKW und PAK maßgebliche Parameter zur Beurteilung und Überwachung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse aufführt und wesentliche Kriterien für die behördliche Entscheidung benennt. Die Ergebnisse des Bayerischen Forschungsverbundvorhabens 'Nachhaltige Altlastenbewältigung unter Einbeziehungen des natürlichen Reinigungsvermögens' des Bayerischen Staatsministeriums für

Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) und des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW) (Laufzeit Juni 2001 bis Juni 2003) mündeten in einem Merkblatt des BAYERISCHEN LANDESAMTES FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2004). Weitere Forschungsprojekte werden im Rahmen des Förderschwerpunktes 'Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden' (KORA) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführt.

Die Wirkungsweise natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse in der Wasser ungesättigten Bodenzone ist dagegen noch wenig erforscht und die Kriterienfindung bzw. Bewertung dieser Prozesse wurde bislang kaum beachtet. Zwar beschreibt die EPA-Richtlinie (1999) sehr allgemein die Anforderungen an eine Standortcharakterisierung, aber ein konkretes Untersuchungskonzept fehlt. Auch in der nationalen und internationalen Fachliteratur wurden bislang keine verallgemeinerungsfähigen Untersuchungskonzepte für die ungesättigte Bodenzone unter Feldbedingungen publiziert. Der Kenntnisstand zu Abbau- und Rückhalteprozessen in ungesättigten Böden bezieht sich meist auf Labor- und kleinräumige Feldexperimente, deren Übertragbarkeit auf Freilandbedingungen nicht geklärt ist. Darüber hinaus sind viele Untersuchungen auf ein enges Schadstoffspektrum mit jeweils wenigen Einzelverbindungen beschränkt.

Aufgrund des erheblichen Forschungsbedarfs wurde ein Forschungsprojekt konzipiert und durchgeführt, bei dem der Nachweis und die Bewertung von natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen in der Wasser ungesättigten Bodenzone an einem kontaminierten Modellstandort über einen längeren Zeitraum und unter Feldbedingungen im Vordergrund stand.

## **1.2 Ziel und Aufgabenstellung**

Das Forschungsprojekt befasst sich mit der Untersuchung und Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse im Hinblick auf ihre gezielte, kontrollierte Nutzung zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen am Beispiel einer kontaminierten, ehemals militärisch genutzten Liegenschaft.

Auf der Grundlage einer Vorauswahl und Bewertung von insgesamt zehn verschiedenen Liegenschaften durch die BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE 1998) wurde das ehemalige Tanklager (TL) Schäferhof-Süd bei Nienburg/Weser als Modellstandort ausgewählt. Die am TL Schäferhof-Süd in der Wasser ungesättigten Bodenzone, im Kapillarsaum und in der Wasser gesättigten Bodenzone nachgewiesenen MKW und BTEX stellen ein auf militärisch und zivil genutzten Standorten verbreitetes Schadstoffspektrum dar, dem somit eine standortübergreifende Bedeutung zukommt.

Auf dem Modellstandort sollte im Bereich eines hoch kontaminierten Testfeldes (ehemalige Dieselabfüllstation) der Schadstoffabbau und -rückhalt in den Kompartimenten Boden, Bodenluft, Sickerwasser und Grundwasser über einen Zeitraum von drei Jahren verfolgt werden. Der Wasser gesättigten Bodenzone kam als potenziellem Austragspfad für die Schadstoffe eine wichtige Bedeutung zu. Als Vergleichsareale sollten eine geringer kontaminierte und eine unkontaminierte Kontrollfläche untersucht werden.

In einem ersten Schritt galt es, den Stand der nationalen und internationalen Forschung im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche zu ermitteln und darauf aufbauend zunächst einen allgemeinen, d.h. standortübergreifend gültigen Katalog von Parametern mit einem Einfluss auf natürliche Selbstreinigungsprozesse in der Wasser ungesättigten Bodenzone zu erstellen und diese Parameter im Hinblick auf ihre Relevanz zu bewerten. Unter Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten sollten in einem nächsten Schritt die relevanten Parameter zur Identifizierung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der Wasser ungesättigten Bodenzone am Modellstandort für die verschiedenen Kompartimente zusammengestellt, geeignete Methoden zu ihrem quantitativen Nachweis benannt und ein detailliertes Untersuchungskonzept ausgearbeitet werden.

Das Ziel des Forschungsprojektes bestand im Nachweis der Schadstoffminderung durch natürlichen Schadstoffabbau in der Wasser ungesättigten Bodenzone anhand der zuvor ausgewählten Schlüsselparameter. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Langzeituntersuchungen sollte eine Bewertung dieser Parameter im Hinblick auf ihre Eignung als Indikatoren für mikrobiologische Abbauprozesse vorgenommen werden.

Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes sollten dazu beitragen, zu einer fundierten Entscheidungshilfe für oder gegen eine gezielte, kontrollierte Nutzung standortspezifischer Abbau- und Rückhalteprozesse im Hinblick auf ihre gezielte, kontrollierte Nutzung zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen – als Ergänzung oder Alternative zu technischen Sanierungsmaßnahmen – zu gelangen. Unter der Voraussetzung, dass am Modellstandort eine natürliche Schadstoffminderung nachgewiesen werden kann, sollte eine Handlungsempfehlung ausgearbeitet werden, die eine geeignete Herangehensweise zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbau- und -rückhaltepotenzials in der Wasser ungesättigten Bodenzone benennt.

### **1.3 Beschreibung der Projektkonzeption**

Das Gesamtprojekt des Umweltforschungsplanes 1998 (FKZ 298 76 712) gliederte sich in zwei Phasen. Die im Jahr 2000 abgeschlossene Phase I beinhaltete die Grundlagenermittlung für die Nutzung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse in kontaminierten Böden und im Grundwasser sowie die Entwicklung eines Arbeitsprogramms für eine fiktive ehemals militärisch genutzte Liegenschaft. Dabei wurden die stoffspezifischen Eigenschaften der für kontaminierte militärische Liegenschaften typischen Schadstoffgruppen der Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Monoaromaten (BTEX) und halogenierten Kohlenwasserstoffe (HKW) in Datenprofilen zusammengefasst. Für die Quantifizierung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse wurden unterschiedliche Untersuchungsstrategien für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone konzipiert und Entscheidungsfaktoren für den Nachweis dieser Prozesse dargestellt. Die Ergebnisse der Phase I sind im Abschlussbericht (UMWELTBUNDESAMT 2000) ausführlich dargestellt.

In der von Februar 2001 bis März 2005 durchgeführten Phase II sollte ein auf den ausgewählten Standort TL Schäferhof-Süd zugeschnittenes Untersuchungsprogramm für den Nachweis natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse in der ausgearbeitet und in der Praxis umgesetzt werden. Vorrangig sollte für die ausgewählten Schadstoffgruppen MKW und



BTEX das Schadstoffminderungspotenzial in der ungesättigten Bodenzone am Beispiel des Modellstandortes ausgelotet und Kriterien, Parameter und Randbedingungen für die Beurteilung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse an anderen Standorten vorgeschlagen werden. Die Phase II des Forschungsprojektes wurde in zwei Teilschritte untergliedert.

### **1.3.1 Teilschritt 1**

Teilschritt 1 umfasste die vorbereitenden Arbeiten zur Durchführung des Projektes. Hierzu gehörte:

- die Erstellung eines Kriterien-/Parameterkataloges zur Identifizierung natürlicher Selbstreinigungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone, basierend auf einer Recherche der einschlägigen nationalen und internationalen Fachliteratur
- die Prüfung der vorliegenden Daten des Untersuchungsstandortes TL Schäferhof-Süd, insbesondere bezüglich der Belastungssituation mit den prioritären Schadstoffen MKW und BTEX
- die Ermittlung und Behebung von vorhabensrelevanten Kenntnislücken
- die nähere Eingrenzung eines Testfeldes im Bereich einer ehemaligen Dieselabfüllstation und die Identifizierung eines nördlich angrenzenden gering kontaminierten Vergleichsareals sowie eines unkontaminierten Vergleichsareals auf der Liegenschaft
- die Benennung von Schlüsselparametern für den Nachweis natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse am TL Schäferhof-Süd
- die Aufstellung eines detaillierten Untersuchungskonzeptes bestehend aus Probenahme- und Analysenplänen für die Untersuchungen in den Kompartimenten Boden, Bodenluft, Sickerwasser und Grundwasser unter Berücksichtigung von Maßnahmen der Qualitätssicherung für die einzelnen Verfahrensschritte und Methoden.

Im Ergebnis lag nach 6 Monaten ein detaillierter Ablauf- und Untersuchungsplan für den zweiten Teilschritt vor.

### **1.3.2 Teilschritt 2**

Teilschritt 2 umfasste die auf dem ersten Teilschritt aufbauenden Feldarbeiten zur Untersuchung standortspezifischer Abbau- und Rückhalteprozesse (Schadstoffentwicklung, Kriterien-/Parameter-Nachweis) sowie die Auswertung und Interpretation der Daten.

Zur Ermittlung des Schadstoffniveaus in der ungesättigten Bodenzone, im Kapillarsaum und in der gesättigten Bodenzone wurde zu Beginn der Untersuchungen eine Startbeprobung im Testfeld (8 Bohrareale) und an zwei Kontrollpunkten (geringer kontaminiertes Vergleichsareal und unkontaminiertes Vergleichsareal) durchgeführt. An jeweils einem Bohrpunkt im

Testfeld und in den Vergleichsarealen wurden zusätzlich weitere bodenphysikalische, physiko-chemische und biologische Parameter untersucht. Analog der Startbeprobung wurden nach einer Projektlaufzeit von drei Jahren erneut die Schadstoffkonzentrationen im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal sowie deren stofflichen Veränderungen ermittelt. Die umfangreichen Daten wurden statistisch ausgewertet und unter dem Aspekt der Schadstoffminderung durch biologischen Abbau, Auswaschung mit dem Sickerwasser und Verflüchtigung über die Bodenluft beurteilt.

Um den Austrag von Schadstoffen über die mobilen Medien Bodenluft, Sickerwasser und Grundwasser näher zu bestimmen und die Veränderung von Parametern, die zum Nachweis von natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse dienen, in diesen Medien zu verfolgen, wurden im Testfeld und in den Vergleichsarealen stationäre Bodenluft- und Sickerwassermessstellen eingerichtet sowie Grundwassermessstellen im An- und Abstrom des Testfeldes installiert. In einem vierteljährlichen Messzyklus wurden die Kompartimente Bodenluft und Grundwasser beprobt bzw. Vor-Ort-Messungen durchgeführt. Von jeweils März bis Dezember wurden monatlich die angefallenen Sickerwasserproben vom Standort abgeholt und nach einem Probennahme-Intervall von drei Monaten als Sammelprobe analysiert. Um die klimatischen Parameter kontinuierlich zu erfassen, wurde eine Wetterstation am Standort aufgestellt und Temperatursonden im Boden eingebaut. Die Daten wurden alle vier bis acht Wochen ausgelesen.

Die Monitoring-Daten vom TL Schäferhof-Süd wurden fortlaufend ausgewertet, so dass sowohl gewonnene Erkenntnisse als auch der weitere Forschungsbedarf zwischenzeitlich in die Projektkonzeption einfließen konnten. Dies führte unter anderem zur Aktualisierung von Analysenplänen sowie zu zusätzlich durchgeführten Messreihen, die weitere Erkenntnisse zu Probennahmestrategien und deren Bewertung im Hinblick auf den natürlichen Schadstoffabbau und -rückhalt von MKW und leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffen erbrachten.

Die theoretischen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und die Bewertung der praktischen Erfahrungen vom Modellstandort bildeten die Grundlage für den Entwurf einer Handlungsempfehlung, die die erforderlichen Randbedingungen und notwendigen Untersuchungsschritte für die Beurteilung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone darstellt.

## **1.4 Aufbau des Berichtes**

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die Zusammenfassung der im Laufe des Projektes durchgeführten Arbeiten und gewonnenen Erkenntnisse dar. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Ergebnisse des zweiten Teilschrittes. Der Teilschritt 1 wurde bereits ausführlich dokumentiert (UMWELTBUNDESAMT 2001, UMWELTBUNDESAMT 2004) und wird hier lediglich in einer Kurzfassung wiedergegeben.

Für den Teilschritt 2 werden - unterteilt nach den untersuchten Kompartimenten Boden, Bodenluft, Sickerwasser und Grundwasser - jeweils die Probennahme- und Analysemethoden benannt und unter Aspekten der Qualitätssicherung bewertet. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Untersuchungsschritte auf dem Modellstandort TL Schäferhof-Süd und

die Ergebnisse der Start- und Endbeprobung bzw. des Verlaufsmonitorings ausführlich dargestellt. Abschließend folgt die Interpretation der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Qualität und Plausibilität der Daten und im Hinblick auf das natürliche Schadstoffminderungspotenzial am Standort. Die aus dem Gesamtüberblick der verschiedenen Kompartimente resultierenden Erkenntnisse werden in den Schlussfolgerungen zusammengefasst und die sich daraus ergebenden weiteren Handlungsoptionen sowie der Forschungsbedarf aus Sicht der Forschungsnehmer aufgezeigt.

Der Anhang enthält eine Zusammenstellung der Einzelergebnisse sowie ergänzende Tabellen, Pläne und Anweisungen. Sämtliche während der Projektlaufzeit erstellten Zwischenberichte und Unterlagen (Schichtenverzeichnisse, Probennahmeprotokolle, Laborberichte etc.) können beim Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie (UFT), Bremen eingesehen werden. Auf Anfrage können Kopien der Dokumente kostenpflichtig bezogen werden.

Die im Forschungsprojekt erarbeitete 'Handlungsempfehlung zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes in der ungesättigten Bodenzone' wurde aus diesem Abschlussbericht ausgegliedert. Sie ist als separates Dokument auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes (<http://www.umweltbundesamt.de/altlast/web1/start.htm>) abrufbar.

## 2 Teilschritt 1

### 2.1 Allgemeiner Kriterien-/Parameterkatalog

Auf der Grundlage einer umfangreichen Literatur-Recherche wurde ein allgemeiner Kriterien- und Parameterkatalog zur Identifizierung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone erstellt und eine Bewertung der insgesamt 40 verschiedenen Parameter (Kontaminanten, hydrogeologische Parameter, Bodenparameter, physiko-chemische und biologische Parameter, Elektronenakzeptoren, Nährstoffe etc.) bezüglich ihrer grundlegenden Funktionen und ihrer Auswirkungen auf natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse vorgenommen. Die ausführliche, aktualisierte Literatur-Studie (UMWELT-BUNDESAMT 2004) ist auf den Internet-Seiten des Umweltbundesamtes verfügbar und in gedruckter Form in der Reihe TEXTE (Nr. 49/04) des Umweltbundesamtes erschienen.

Die Zusammenstellung des **Kriterien-/Parameter-Kataloges** basierte auf einer 2001 durchgeführten Recherche in der nationalen und internationalen Fachliteratur. Insgesamt wurden ca. 75 verschiedenen Datenbanken abgefragt. Die Suchstrategie basierte auf der Auswahl von Schlüsselbegriffen ('natural attenuation', 'bioremediation', 'biodegradation', etc.), die durch Kombination mit Zusatzstichworten ('unsaturated zone', 'vadose zone', 'TPH', 'petroleum', 'BTEX', etc.) eingeschränkt wurden. Die Auswertung der Literaturquellen und die Beurteilung der Einzelparameter erfolgten unter Berücksichtigung von Qualität und Umfang der Daten, Randbedingungen und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Im August 2004 wurde die Literaturrecherche durch erneute Abfrage kostenfreier Datenbanken aktualisiert.

Als Einflussparameter für den Schadstoffabbau und -rückhalt sind zunächst die **Kontaminanten** selbst zu betrachten (MKW, BTEX und andere Alkylbenzole, Metabolite, Begleitkontaminationen). Die Literaturrecherche zeigte, dass sich insbesondere Art, Konzentration und Zusammensetzung der Kontamination auf die Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone auswirkt.

Unter den **hydrogeologischen Parametern** sind die Sickerwasserrate und der Grundwasserflurabstand wichtige Einflussgrößen für den Transport und die Verteilung von Kontaminanten in der ungesättigten Bodenzone bzw. den Austrag der Schadstoffe ins Grundwasser. Korngrößenverteilung, Porenanteil, Durchlässigkeitsbeiwert und Wassergehalt sind die entscheidenden bodenphysikalischen Parameter, die die Mobilität und Verfügbarkeit von Kontaminanten und abbaustimulierenden Stoffen, wie z.B. Sauerstoff und Nährstoffe, beeinflussen. Der Anteil an Humus und Tonmineralen im Boden bestimmt den Grad der (reversiblen) Sorption von MKW/ BTEX und damit die Verweilzeit der Schadstoffe im Boden.

Die **physiko-chemischen Parameter** bestimmen das mikrobiologische Milieu und nehmen Einfluss auf Verteilung und Austrag der Kontaminationen im Boden. Sauerstoff und Nitrat sind die wichtigsten Elektronenakzeptoren beim Abbau von MKW und BTEX in der ungesättigten Bodenzone. Der Sauerstoff-Verbrauch und die daran gekoppelte Kohlendioxid-Produktion lassen Rückschlüsse auf den mikrobiellen Schadstoffabbau zu. Sauerstoffgehalte kleiner 1-5 Vol.-% in der Bodenluft können sich hemmend auf den Abbau auswirken. Bei

Sauerstoffdefizit und unter anaeroben Bedingungen wird Nitrat als alternativer Elektronenakzeptor für mikrobielle Abbauprozesse genutzt.

Unter den **Klima- und Milieufaktoren** wirken sich vor allem eine Steigerung der Temperatur, neutrale pH-Werte und eine ausreichende Nährstoffversorgung (Stickstoff, verfügbares Phosphat) im Boden positiv auf biologische Abbauraten von Schadstoffen aus. Organische Kohlenstoffverbindungen im Boden und Bodeneluat (gemessen als TOC und DOC) nehmen als Elektronendonatoren Einfluss auf den cometabolischen Abbau von Schadstoffen.

Die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Bodenproben über die 'Bodenatmung' stellt aufgrund des direkten Zusammenhanges mit Abbauprozessen von MKW und BTEX einen wichtigen **biologischen Parameter** dar. Als Indikator für die mikrobielle Aktivität im Boden kann auch die Dehydrogenase-Aktivität eingesetzt werden. Die Nitrifikation kann als sensibler Indikator für die Bodentoxizität herangezogen werden. Eine Messung der potenziellen Nitrifikation gibt in Kombination mit den Stickstoffgehalten im Boden wichtige Hinweise auf den Anteil nitrifizierender bzw. denitrifizierender Prozesse im Boden.

Zur Auswahl der **Schlüsselparameter** für natürliche Selbstreinigungsprozesse wurde ein Bewertungskatalog zusammengestellt (Tab. 2.1), der die prinzipielle Relevanz der jeweiligen Parameter (Voreinstufung) und die Ergebnisse der Literaturrecherche berücksichtigt. Mit den folgenden Erläuterungen sollen die Bewertungskriterien transparent gemacht werden. Die Einstufung der Parameter erfolgte unabhängig von individuell variierenden Standorteinflüssen und hat somit einen allgemeinen, das heißt standortübergreifenden Charakter.

### **Erläuterungen zum Bewertungskatalog**

Relevanz nach Voreinstufung: Bewertung der grundlegenden Eigenschaften und Auswirkungen eines Parameters unmittelbar auf natürliche Selbstreinigungsprozesse oder auf andere für natürliche Selbstreinigungsprozesse wichtige Parameter unter den für mitteleuropäische Verhältnisse relevanten Bedingungen.

So kann sich beispielsweise der Parameter 'Stickstoffquellen/Ammonium' auf den biologischen Schadstoffabbau auswirken, weil er in der Nährstoffversorgung der Böden und damit für das Bakterien-Wachstum eine sehr wichtige Rolle spielt. Andere Parameter wie z.B. 'Salinität' werden unter dem auf mitteleuropäische (Klima-)Verhältnisse bezogenen Bewertungsmaßstab als weniger relevant eingestuft, als dies in Regionen mit versalzten Böden der Fall wäre.

Relevanz nach Literaturrecherche: Bewertung der Literaturquellen aus der Literaturrecherche nach Datenlage, Aussagekraft für natürliche Selbstreinigungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Unter den genannten Kriterien wurden Aussagekraft und Reproduzierbarkeit stärker gewichtet als die Anzahl der veröffentlichten Untersuchungen zu dem jeweiligen Parameter.

Kompartiment/Matrix: Auflistung der für den jeweiligen Parameter zu berücksichtigenden Kompartimente 'Boden', 'Bodenluft', 'Sickerwasser', 'Grundwasser', 'Niederschlagswasser' und 'Luftatmosphäre'.

Relevanz für 'Natural Attenuation': Gesamtbewertung der jeweiligen Parameter nach Voreinstufung und Literaturrecherche.

Verschiedene Faktoren und Überlegungen sind in die Diskussion eingegangen, die nach Abwägung der Einflüsse auf natürliche Selbstreinigungsprozesse und der Betrachtung des Parameters im Gesamtzusammenhang zu der Bewertung geführt haben.

Bei der Übertragbarkeit des Kataloges auf konkrete Fälle ist die Relevanz der Parameter für natürliche Selbstreinigungsprozesse in Abhängigkeit vom Standort und vom vorliegenden Wissensstand, zum Beispiel aus bereits erfolgten Untersuchungen, gegebenenfalls anders einzustufen. Ebenso ist fachlich und technisch zu prüfen, welche der in der Liste genannten Kompartimente sich für die Bestimmung der jeweiligen Schlüsselparameter anbieten.







## 2.2 Untersuchungsfläche

### 2.2.1 Standortbeschreibung

Der Standort Tanklager Schäferhof wird durch die topografische Karte TK25, Blatt 3321 Nienburg/Weser abgedeckt und in seiner Lage durch die Gauß-Krüger-Koordinaten (Flächenmittelpunkt) bestimmt: R 35 12 125, H 58 30 625.

Der Standort liegt im Landkreis Nienburg/Weser ca. 2,5 km südwestlich der Stadt Nienburg. Er wird begrenzt durch die Bahnstrecke Minden-Nienburg im Südosten, die Weser im Westen und die Siedlung Schäferhof im Nordosten. Die Bundesstrasse B 215 trennt das Areal in einen Nordteil mit ca. 60 ha Fläche und einen ca. 27 ha großen Südteil (s. Anhang 1.1). Naturräumlich befindet sich der Standort innerhalb der Talniederung der Mittelweser.

Die Morphologie des Standortes wird größtenteils von einer flachen, aus Flugsanden gebildeten Anhöhe geprägt mit durchschnittlichen Geländehöhen von 30 bis 32 m NN. Eine grobe geologisch-hydrogeologische Charakterisierung kann wie folgt vorgenommen werden:

- Ablagerungen in Talniederung der Mittelweser
- Quartäre Sedimente bestehend aus holozänen Inlandsdünen, weichselzeitlicher Niederterrasse, saalezeitlichen Sedimenten auf tertiärer Basis
- Quartäre Sande bilden den oberen freien Grundwasserleiter mit 50 – 70 m Mächtigkeit
- Grundwasserflurabstand 4 – 17 m
- Grundwasserfließrichtung Nordwest in Richtung Weser; Durchlässigkeitsbeiwert  $1 \times 10^{-4}$  m/s

Die historische Entwicklung des Standortes lässt sich wie folgt beschreiben:

1935 – 1945	erbaut und als Treibstoffdepot betrieben durch die wirtschaftliche Forschungsgemeinschaft mbH (Wifo).
1944	Bombardierung durch die US Air Force
1945	Sprengungen durch die Deutsche Wehrmacht
1945 – 1976	Nutzung des Tanklagers durch britische Streitkräfte, Einstellung des Lagerbetriebes im Südteil
1976	Übernahme durch die Bundeswehr, Sanierung und Erneuerung des Geländes
1986	Erweiterung der Lagerkapazität des Nordteils von 49.500 m <sup>3</sup> auf 79.200 m <sup>3</sup>
bis 1990	Instandsetzung des gesamten Nordteils des Tanklagers in 2 Bauabschnitten
1990	Entfernung und Entsorgung der Mineralölprodukte aus zerstörten unterirdischen Pumpstationen und der Flugbenzinmischanlage

1990 – 1999	Boden- und Grundwasseruntersuchungen zur Charakterisierung der Belastungssituation durch tanklagertypische Schadstoffe
1995 – 2001	Rückbau der unterirdischen Tankanlagen, Rohrleitungen und Gebäude im Südteil

Im Rahmen der Boden- und Grundwasseruntersuchungen wurden auf dem Gelände des TL Schäferhof-Süd insbesondere im Südteil erhebliche Verunreinigungen vorrangig durch Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) und BTEX-Aromaten belegt. Betroffen sind die Wasser ungesättigte Bodenzone, der Kapillarsaum und die Grundwasser führenden Bodenschichten.

Es liegt umfangreiches Datenmaterial zur Belastungssituation der ungesättigten und gesättigten Bodenzone am Standort Schäferhof-Süd vor. Dazu haben zum einen Untersuchungen des Tanklagers, zum anderen Sondierungskampagnen des Amtes für Wehrgeologie sowie eine detaillierte Dokumentation von Rückbaumaßnahmen beigetragen.

Für den überwiegenden Südteil des Standortes Schäferhof inklusive des ausgewählten Testfeldes (ehemaliges Gebäude 49) war 2001 keine kurzfristige Nutzung geplant, so dass störende Einflüsse auf die Durchführung des Untersuchungsprogrammes nicht zu erwarten waren.

## 2.2.2 Beschreibung des Testfeldes und der Vergleichsareale

Auf dem Südteil des Tanklagers Schäferhof konnte als geeignetes **Testfeld** der Bereich des ehemaligen Gebäudes Nr. 49 identifiziert werden (s. Anhang 1.1). Bei dem Gebäude handelte es sich um eine Dieselabfüllstation mit Lagerschuppen, die durch die britischen Streitkräfte nach 1945 errichtet wurde. Vor 1990 erfolgte der Abbruch des Gebäudes bis zur Bodenplatte, die erst im Laufe des Rückbaus des Südteils 1995 abgebrochen wurde. Beim Rückbau wurde stark kontaminierter Boden auf einer Fläche von ca. 10 x 25 m ab einer Tiefe von 1,30 m angetroffen. Die ermittelten MKW-Gehalte lagen zwischen 87 und 5.450 mg/kg TS, die BTEX-Gehalte zwischen 1,5 und 109 mg/kg TS.

Nach Abbruch der Betonfläche im August 1995 wurde die Fläche planiert und mit einer wasserundurchlässigen Folie abgedeckt. Die seitlichen Schächte an der Betonfläche wurden in diesem Schritt noch nicht abgebrochen. Der Rückbau der Schächte erfolgte erst während einer Baumaßnahme im Winter 2001. Die Folie wurde im Januar 2001 nach Absprache mit den zuständigen Stellen entfernt, damit sich ein natürliches Bodenmilieu (Bodenfeuchte) einstellt.

Von den Forschungsnehmern durchgeführte Rammkernsondierungen im Bereich der Längsachse der ehemaligen Bodenplatte des Gebäudes 49 (Juni 1999) und an den Eckpunkten des geplanten Testfeldes (März 2001) zeigten vergleichbare Kontaminationsverteilungen (< 20 bis 9.200 mg MKW/kg TS). Störende Begleitkontaminationen (EOX, Schwermetalle, Phenole, PAK, PCB) wurden nicht nachgewiesen.

Parallel zur Eingrenzung des Testfeldes wurden ein unbelastetes sowie ein schwach belastetes Areal zur Durchführung von vergleichenden Untersuchungen festgelegt (s. Anhang 1.1). Die Voruntersuchungen zeigten, dass sich nördlich an das Testfeld ein gering belasteter Bereich anschließt. Zwei Rammkernsondierungen (März 2001) bestätigten die Eignung als Vergleichsfläche (**Vergleichsareal kontaminiert**). Die MKW-Gehalte (ISO TR 11046) der ungesättigten Bodenzone lagen hier unter 1000 mg/kg TS. Nordwestlich des Testfeldes wurde zeitgleich ein unbelasteter Bereich mit Hilfe einer Rammkernsondierung identifiziert (**Vergleichsareal unkontaminiert**) (s. Anhang 1.1). Die MKW-Konzentrationen (ISO TR 11046) lagen bis zum Grundwasseranschnitt unterhalb von 20 mg/kg TS.

Die aufgeschlossene Schichtenabfolge bestätigte die geologischen Verhältnisse, wie sie für den Standort und insbesondere das Testfeld anhand der vorangegangenen Untersuchungen erwartet wurden. In der ungesättigten Bodenzone stehen überwiegend Mittelsande mit Anteilen von Fein- und Grobsanden an. Außer den standortspezifischen Randbedingungen lagen keine detaillierten Angaben zu weiteren Kriterien und Parametern vor, die einen Einfluss auf die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse nehmen können.

Für die Wasser gesättigte Bodenzone im Untersuchungsgebiet ermöglichten die bereits zuvor erfolgten Beprobungen vorhandener Grundwassermessstellen (B 8, B 11, B 12, B 13) einen ersten Eindruck über die Kontaminationsverteilung. Die räumliche Eingrenzung der Schadstofffahne war auf der Basis der bestehenden Messstellen allerdings nicht durchführbar. Die im quartären Lockergesteinsaquifer von ca. 4 m u. GOK bis zur Endtiefe von maximal 12 m u. GOK durchgehend verfilterten Messstellen erlaubten lediglich eine über die gesamte Filterstrecke gemittelte Probennahme. Die physikalischen Eigenschaften der vorhandenen Schadstoffe, die als Mineralölkohlenwasserstoffe eine geringere Dichte als Wasser besitzen, ließen aber eine Kontamination der oberen Bereiche der Wasser gesättigten Zone erwarten. Nach dem damaligen Kenntnisstand war von einem Kontaminationsschwerpunkt (MKW, BTEX) im Testfeld im Bereich der Grundwasserschwankungszone zwischen 4,0 m und 6,0 m u. GOK und einer nach West-Nordwest gerichteten Grundwasserfließrichtung auszugehen. Die im Zeitraum von Januar 1999 bis März 2001 erhobenen Daten zeigten stark schwankende Schadstoffgehalte und Grundwasserstände an. Die im Juni 2000 und März 2001 von der Universität Frankfurt durchgeführten Untersuchungen des Grundwassers auf aromatische Säuren (Metabolite) belegten das generelle Vorhandensein von biologischen Abbauprozessen bei den aromatischen Kohlenwasserstoffen.

## 2.3 Untersuchungsprogramm am TL Schäferhof-Süd

Nach dem Bewertungskatalog der Parameter mit einem Einfluss auf natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse wurden unter Berücksichtigung standortspezifischer Kriterien die für das Untersuchungsgebiet TL Schäferhof-Süd relevanten Schlüsselparameter in den jeweiligen Kompartimenten zusammengestellt (Tab. 2.2).

**Tab. 2.2: Schlüsselparameter zur Identifizierung natürlicher Selbstreinigungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone am Standort Tanklager Schäferhof-Süd.**

	<b>Schlüsselparameter</b>	<b>Kompartimente</b>
Kontaminanten/ Metabolite	Kohlenwasserstoffe (KW)	B, SW, GW
	KW-Identifizierung	B
	n-Alkane	BL
	BTEX	B, BL, SW, GW
	Benzoessäure	B, SW, GW
Hydrogeologische Parameter	Grundwasserflurabstand	GW o. B
	Sickerwasserrate	NW (SW, GW)
Bodenkundliche Parameter	Bodenart/ Korngrößenverteilung	B
	Schichtaufbau, -mächtigkeit	B
	Porenanteil	B
	Durchlässigkeitsbeiwert	B
	Bodenfeuchte/Trockensubstanz	B
Physiko-chemische Parameter	Temperatur	B, L, GW
	Luftdruck	L
	Niederschlagsmenge	NW
	Leitfähigkeit	SW, GW
	pH-Wert	B, SW, GW
	Redoxpotenzial	SW, GW
	Sauerstoff	BL, GW
	Kohlendioxid	BL
	Nitrat	B, SW, GW
	Gesamtstickstoff/ Ammonium	B
	verfügbares Phosphat	B, SW, GW
	Eisen	B, SW, GW
	Sulfat	SW, GW
	TOC/ DOC	B, SW, GW
Karbonatgehalt, Säurekapazität	B, SW, GW	
Biologische Parameter	Bodenatmung	B
	Dehydrogenase- Aktivität	B
	Potenzielle Nitrifikation	B

\*B= Boden, BL= Bodenluft, GW= Grundwasser, NW= Niederschlagswasser, SW= Sickerwasser

Unter den Schlüsselparametern sind neben den Parametern mit 'hoher Relevanz' (vgl. Tab. 2.1) **weitere Parameter** mit 'mittlerer Relevanz' für natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse **aufgenommen** worden: Schichtmächtigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert, Niederschlagsmenge, Leitfähigkeit, Eisengehalt, Dehydrogenase-Aktivität und potenzielle Nitrifikation. Die genannten Parameter liefern Informationen, die durch andere Parameter nicht abgedeckt waren, aber für die Beurteilung des Bodengefüges und -milieus als bedeutend eingeschätzt wurden. Anstelle einer aufwendigen Untersuchung von Mikroorganismen (Bakterienzellzahlen) wurde die mikrobielle Biomasse über die Bodenatmung bestimmt. Für die Grundwasser- und Sickerwasserproben ist zusätzlich der Parameter Karbonathärte/Säurekapazität einbezogen worden, da er Informationen über das durch biologische Abbauprozesse gebildete Kohlendioxid im Wasser und die Pufferwirkung liefert.

**Andere Parameter** konnten wiederum aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen am Standort aus dem Katalog der Schlüsselparameter **ausgeschlossen** werden:

- Begleitkontaminationen liegen nach der Deklarationsanalytik (LAGA) nicht bzw. in zu vernachlässigenden Konzentrationen vor.
- Die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde aufgrund homogener Bodenverhältnisse in minimaler Anzahl durchgeführt.
- Das ungegliederte kompakte Gefüge der Böden am Standort (ohne Trennflächengefüge, d.h. keine Schicht-/Schiefer- oder Kluffflächen, keine Störungen) kann als Einflussfaktor außer Acht gelassen werden.
- Humusgehalt und Tonminerale werden nicht separat bestimmt, sondern aufgrund der überwiegend geringen Humus- und Tongehalte im Boden bei der Bestimmung der Bodenart bzw. Korngrößenfraktionierung mit angegeben.

Für die Untersuchungen in den Kompartimenten Boden, Bodenluft, Sickerwasser und Grundwasser sowie der klimatischen Parameter am Standort TL Schäferhof-Süd wurden detaillierte Probennahme- und Analysenpläne zusammengestellt. Die Beprobungspläne beinhalten gemäß der Arbeitshilfe zur Qualitätssicherung der Bund- Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO 2002) die Festlegung der Beprobungspunkte in den einzelnen Medien, die Lage der Probennahme-Punkte, die Proben-Bezeichnung und den Probennahme-Zeitpunkt. Die Analysenpläne geben eine Übersicht über die Anzahl der Analysen pro Parameter, die Probenvorbereitung und die verwendeten Methoden und Vorschriften.

Als allgemeine Maßnahmen zur **Qualitätssicherung bei der Probengewinnung** sind folgende qualitätssichernde Maßnahmen nach LABO (2002) zu beachten:

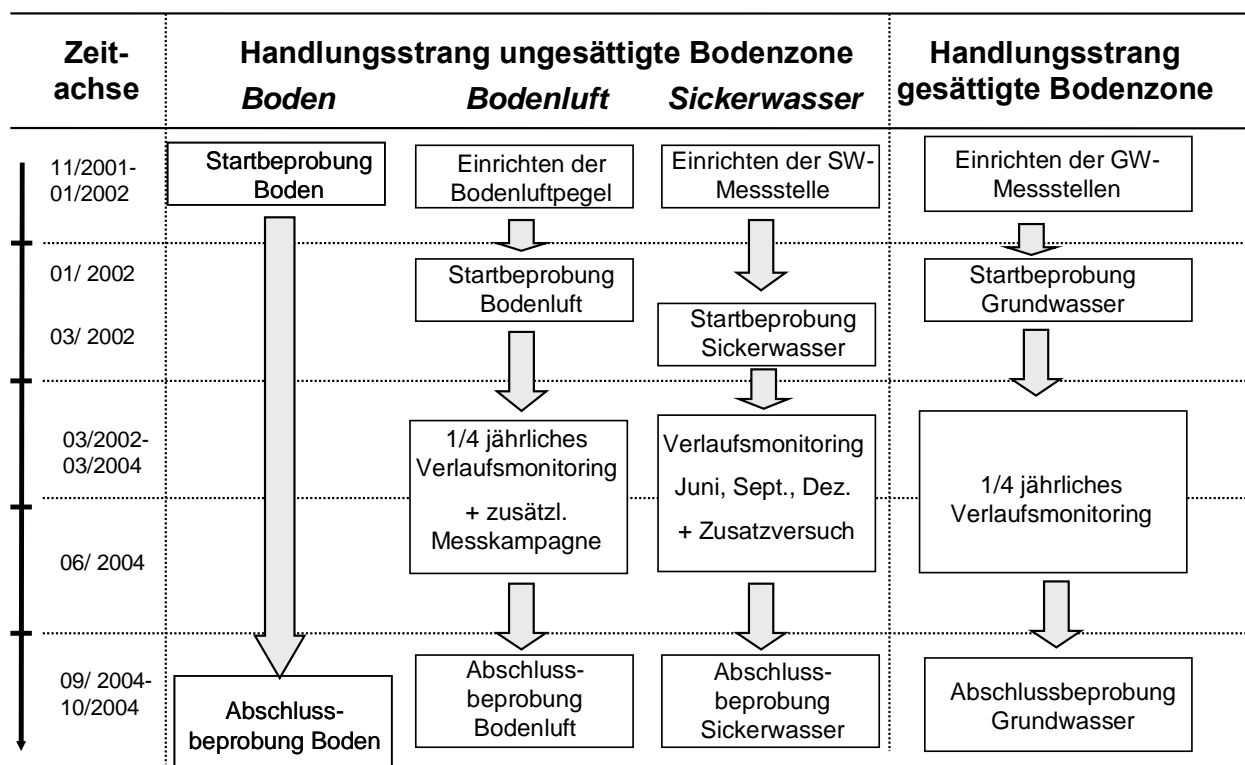
- Reinigungsvorschriften für das Probennahmegerät
- Qualitätssicherungsproben (Blindwerte, Doppelbestimmungen, etc.)
- Probenbeschriftung (vorbereitete Etiketten)
- Festlegung der zu füllenden Probennahmegefäße
- ggf. Vor-Ort-Aufbereitung und/oder Stabilisierung
- Lagerbedingungen der Proben bis zum Abtransport
- Festlegung der Lagerzeiten von der Probennahme bis zur Messung
- Transportbedingungen für die Proben
- Dokumentation der Probennahme

Als allgemeine Maßnahmen zur **Qualitätssicherung bei der Vor-Ort-Analytik und Laboranalytik** sind folgende qualitätssichernde Maßnahmen nach LABO (2002) zu beachten:

- Probeneingang (Zustand, Temperatur, Stabilisierung)
- Dokumentation der Probenvorbereitung
- Dokumentation der Abweichung von den Prüfvorschriften
- Überprüfung des Gerätes
- Ermittlung der Bestimmungsgrenze
- Kalibrierung
- Dokumentation der Messergebnisse
- Blindwertbestimmungen
- Doppelbestimmungen

Eine detaillierte Beschreibung der Probennahme und Analytik sowie spezieller Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei den verwendeten Methoden und Techniken erfolgt bei der Darstellung des zweiten Teilschrittes (Kap. 3).

Für den Ablauf der Untersuchungen im 2. Teilschritt wurde ein Flussdiagramm erstellt, das die wichtigsten Handlungsstränge und Arbeitspakete zeigt. Die im Laufe der Untersuchungen nochmals aktualisierte Version ist in Abb. 2.1 dargestellt.



**Abb. 2.1 Flussdiagramm für die Durchführung der Feldarbeiten im zweiten Teilschritt.**

## **3 Teilschritt 2**

### **3.1 Boden**

#### **3.1.1 Untersuchungsmethoden**

##### **3.1.1.1 Probennahme**

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte in zwei Feldkampagnen, einer Startbeprobung zwischen November 2001 und Januar 2002 und einer Endbeprobung im Oktober 2004. Um Störungen der natürlichen Selbstreinigungsprozesse zu vermeiden, wurde von einer Verlaufsbeobachtung abgesehen. Im Bereich des Testfeldes wurden 8 Bohrreale, in den Vergleichsarealen jeweils 1 Bohrreal mit einem Durchmesser von 1 m festgelegt (vgl. Anhang 1.2). Pro Bohrreal wurden jeweils zwei gegenüberliegende Einzelbohrungen zum Zeitpunkt der Start- und Endbeprobung durchgeführt. Die Bohrungen innerhalb der festgelegten Bohrreale sollten einerseits genügend Abstand aufweisen, um sich nicht gegenseitig zu beeinflussen. Andererseits sollten eine Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse der parallel entnommenen Proben sowie der Ergebnisse der Start- und Endbeprobung in einem Bohrreal gewährleistet sein.

Die Rammkernsondierungen (DN 100) wurden im Allgemeinen bis zu einer Tiefe von 6 m u. GOK abgeteuft. Bei der Abschlussbeprobung wurden in zwei Bohrreale im Testfeld Bodenproben bis 8 m u. GOK entnommen. Die zunächst geplante Abschlussbeprobung im unkontaminierten Vergleichsareal wurde nicht durchgeführt. Die Bohrlöcher wurden direkt nach den Bohrarbeiten mit Ton-Pellets verfüllt.

Zur Vermeidung von Sauerstoffzutritt und Ausgasungsverlusten leicht flüchtiger Substanzen wurden Schlauchkern-Bohrungen (DIN 4021) mit Kunststofflinern durchgeführt. Die Entnahme der Proben aus den Linern erfolgte gemäß LABO (2002; Teilthema 2.2: Gewinnung von Boden-, Bodenluft und Grundwasserproben) sowie den "Anforderungen an Probennahme, Probenvorbehandlung und chemische Untersuchungsmethoden auf Bundesliegenschaften" (BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG 2001 a). Das Öffnen der PE-Liner und die Probennahme für die Analytik wurden an der Untersuchungsstelle (Umweltschutz Nord/ alphacon) durchgeführt. Die Liner (Länge 1 m) wurden mittels einer Tischkreissäge an zwei gegenüberliegenden Stellen durch Längsschnitte bis auf eine verbleibende Wandstärke von ca. 1 mm eingeschnitten. Anschließend wurde mit Hilfe eines Messers die restliche Wandung zerschnitten und der Liner mit dünnen Edelstahlplatten in zwei Hälften geteilt. Von einer Bohrkernhälfte wurde unmittelbar nach dem Öffnen eine Intervallprobe (s. u.) genommen und durch mehrmaliges Schütteln (Dauer maximal 10 Sekunden) in einem 10 l-Eimer homogenisiert. Direkt im Anschluss erfolgte die Probeneinwaage für die Schadstoffanalytik. Die zweite Bohrkernhälfte diente zur Aufnahme der Schichtenverzeichnisse und Bohrprofile nach DIN 4022-1/ DIN 4023.

### 3.1.1.2 Analytik

Die Auswahl der **Analysemethoden** (vgl. Tab. 3.1) orientierte sich an den in der BBodSchV (1999) und von der BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG (2001 a) aufgeführten sowie in LABO (2002, bei der Startbeprobung LABO 2000-10) vorgeschlagenen Normen. Für die Bestimmung der Mineralölkohlenwasserstoffe wurde in Absprache mit dem Umweltbundesamt die DIN ISO 16703 (E 03.2002) als Methode der Wahl festgelegt. Bei der Startbeprobung wurde als Vergleichsmethode die ISO TR 11046 (06.1994) für eine Probe pro Bohrreal angewendet. Die Ergebnisse dieser Methode lagen bei Gehalten größer 1000 mg/kg etwa 20-30 % unter den nach DIN ISO 16703 bestimmten MKW-Gehalten, bei Gehalten kleiner 1.000 mg/kg sogar bis zu 70 % (Gehalte nahe der Bestimmungsgrenze wurden nicht berücksichtigt).

**Tab. 3.1: Verwendete Normen und Methoden für die Untersuchung von Bodenproben.**

Parameter	Methode	Bestimmungsgrenze
Kohlenwasserstoffe (KW)	DIN ISO 16703 und ISO TR 11046	100 mg/kg TS
KW-Identifizierung	Hausverfahren Umweltschutz Nord/ alphacon	
KW-Eluat	DIN 38414 -S4	0,1 mg/l
BTEX (Alkylbenzole)	DIN 38407- F9	100 µg/kg TS
Benzoessäure	Hausverfahren Umweltschutz Nord/ alphacon	0,4 mg/kg TS
Bodenart	DIN 4022-1/ 3, DIN 18196	
Korngrößenverteilung	DIN 18123	
Schlammkornanalyse	DIN 18123	
Schichtaufbau, -mächtigkeit	DIN 4022-1/3	
Porenanteil	DIN 19683 Bl. 13	
Durchlässigkeitsbeiwert	DVGW Merkl. W113	
Bodenfeuchte/ TS	DIN ISO 11465	
Temperatur	Messfühler	
pH-Wert	DIN ISO 10390	
Nitrat, Ammonium	DIN-38409-H28 / VD Lufa-Methodenb. Bd. 1	2 mg/kg TS (als N)
Gesamtstickstoff	DIN ISO 11261	50 mg/kg TS (als N)
verfügbares Phosphat	PMB(Blau-)Meth., VD Lufa-Methodenb. Bd. 1	30 mg/kg TS (als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Eisen	DIN EN ISO 11885	4 mg/kg TS
TOC/ DOC	DIN ISO 10694	4 mg/kg TS
Karbonatgehalt	DIN ISO 10694	10 mg/kg TS
Bodenatmung	DIN 19737	10 mg CO <sub>2</sub> /kg TS* d
Dehydrogenase- Aktivität	DIN 19733-1	0,004 TPF/g*TS*x16h
Potenzielle Nitrifikation	DIN ISO 14238	2,5 mg/kg TS



Da für die Analytik der Benzoesäure keine Prüfungsvorschrift nach DIN existiert, wurde durch Umweltschutz Nord eine Hausmethode (s. Anhang 2.4) entwickelt und an den Bodenproben vom TL Schäferhof-Süd getestet. Die Analytik ist bei einer Bestimmungsgrenze von 500 µg/kg TS problemlos mit HPLC durchzuführen.

Zur **internen Qualitätskontrolle** wurde bei der MKW-Analytik nach DIN ISO 16703 und bei der BTEX-Analytik nach DIN 38407- F9 eine Doppelbestimmung pro Bohrpunkt an den Proben aus 2-3 m Profiltiefe durchgeführt. Die Standardabweichungen der Proben vom Mittelwert lagen bei der Startbeprobung mit Ausnahme jeweils einer Probe für MKW < 10 %, für BTEX und Alkylbenzole < 25% (vgl. Anhang 2.3). Die bei der Abschlussuntersuchung durchgeführten Doppelbestimmungen ergaben für MKW, BTEX und Alkylbenzole (Summe der Aromaten) Standardabweichungen unter 5 % vom Mittelwert. Ausgehend von diesen Stichproben kann angenommen werden, dass die Intervallproben für die Analytik ausreichend homogenisiert wurden.

Für die **externe Qualitätskontrolle** wurden bei der Startbeprobung zusätzliche MKW- und BTEX- Analysen von jeder 10.-20. Probe, das heißt von einer Probe pro Bohrreal in einem unabhängigen Labor durchgeführt. Die Werte des Vergleichslabors lagen im Durchschnitt deutlich unter denen, die von Umweltschutz Nord (UN) ermittelt worden waren (20-93 % bzw. 125 % der MKW-Gehalte von UN), und damit die Abweichungen für die untersuchten Bodenproben nur zum Teil im tolerablen Bereich. Jedoch wurden bereits im 7. BAM-Ringversuch „Altlasten“ (BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG (2001 b) mit einem gut homogenisierten Referenzmaterial festgestellt, dass sich bei gaschromatographischen Verfahren bei MKW-Gehalten von 1000–2000 mg/kg TS Vergleichsstandardabweichungen zwischen 30 und 40 % ergeben.

### 3.1.1.3 Qualitätssicherung bei der Entnahme von Intervallproben

Zur Qualitätssicherung bei der Entnahme von Bodenproben mit leicht flüchtigen organischen Schadstoffen wurde im Juni 2002 eine weitere Rammkernsondierung (BTEX-Testsondierung) durchgeführt. Insbesondere ging es hierbei um die Vergleichbarkeit der Analysenergebnisse aus Intervallproben über die gesamte Länge eines Liners und aus Einzelproben auf die Gesamtlänge verteilt.

Mittels Liner-Bohrungen (DN 100) wurden an einem Bohrpunkt im Testfeld (s. Anhang 1.2) drei ungestörte Bodenproben aus 2-3 m und 3-4 m Tiefe (ungesättigte Bodenzone) und 5-6 m Tiefe (gesättigte Bodenzone) entnommen. Die Bohrkern wurden unmittelbar nach der Gewinnung bei gekühlter Lagerung in das Labor verbracht und nach der oben beschriebenen Methode aufgesägt.

Unmittelbar nach Öffnen des Liners wurden im Abstand von 10 cm 10 **Einzelproben** aus einer Hälfte entnommen, sofort in Headspace-Gläser abgefüllt, mit Methanol überschichtet und gasdicht verschlossen. Für die **Intervallprobe** wurde diese Linerhälfte danach in einen 10 l-Eimer überführt, mit einem Deckel verschlossen und zur Homogenisierung mehrmals geschüttelt (Dauer max. 10 Sekunden). Anschließend wurden aus dem Eimer 10 Einzelproben an verschiedenen Stellen entnommen, sofort in Headspace-Gläser abgefüllt, mit Methanol überschichtet und gasdicht verschlossen.

Gemäß LABO (2002) dürfen bei der Untersuchung auf leicht flüchtige organische Schadstoffe keine Mischproben hergestellt werden. Im Rahmen dieser gesonderten Untersuchung wurde diese Methode der Probenteilung bzw. -reduktion trotzdem angewandt, um Schadstoffverluste gegenüber Einzel- und Intervallproben zu quantifizieren. Die Herstellung der **Mischprobe** erfolgt mittels „Teilen durch Viertelung“ (gem. LABO 2002): Von der verbleibenden Probenmenge wurden 10 Einzelproben in Headspace-Gläser abgefüllt, mit Methanol überschichtet und gasdicht verschlossen. Diese Methode wurde an einem ausgewählten Liner durchgeführt (3-4 m Tiefe). Tab. 3.2 gibt eine Übersicht der Probenzahlen für die jeweiligen Probennahmemethoden.

**Tab. 3.2: Anzahl und Art der Probennahme bei der BTEX-Testsondierung.**

Verfahren	Anzahl untersuchter Liner	Anzahl Laborproben je Liner	Anzahl Laborproben gesamt
Einzelprobe	3 (Tiefe 2-3 m, 3-4 m, 5-6 m)	10	30
Intervallprobe	3 (Tiefe 2-3 m, 3-4 m, 5-6 m)	10	30
Mischprobe	1 (Tiefe 3-4 m)	10	10
			70 Proben gesamt

Die Analyseergebnisse der Einzel-, Intervall- und Mischproben wurden unter Angabe des jeweiligen Mittelwertes und der Standardabweichung tabellarisch zusammengestellt (Anhang 2.2). In Abb. 3.1 ist das jeweilige Schadstoffprofil der Einzelproben den Intervallproben gegenübergestellt.

Bei den Einzelproben liegt für BTEX und Alkylbenzole die Standardabweichung vom Mittelwert in der ungesättigten Bodenzone (K3, K4) bei ca. 50 %, in der gesättigten Bodenzone (K6) bei über 100 %. Die Intervallproben weisen Standardabweichungen von 6-17 % in der ungesättigten Bodenzone und von < 25 % in K6 auf. Bei der Mischprobe wurden 9 bzw. 14 % Standardabweichung berechnet.

Im Vergleich der Probennahme-Techniken liegt für BTEX und Alkylbenzole in allen drei Bohrkernen der Mittelwert der Einzelproben unter dem Mittelwert der Intervallproben (Ausnahme BTEX in K4). In der ungesättigten Bodenzone (K3, K4) machen diese Minderbefunde maximal 17 % des Mittelwertes aus, in der gesättigten Bodenzone dagegen 50 %.

In der an Bohrkern K4 zusätzlich angefertigten Mischprobe wurden dagegen nur 2 % der BTEX-Gehalte (meist unter der Bestimmungsgrenze) und 19 % der Alkylbenzolgehalte der Intervallprobe analysiert. Hier bestätigt sich, dass es bei Anfertigung einer Mischprobe zu extremen Verlusten leicht flüchtiger Verbindungen kommt (s. LABO 2002) und diese Art der Probennahme für die Beurteilung der Schadstoffkonzentrationen nicht geeignet ist.

Unter dem Aspekt der Qualitätssicherung hat sich mit der BTEX-Testsondierung gezeigt, dass bei Schlauchkernbohrungen die Entnahme von Intervallproben zu repräsentativen Ergebnissen der Gehalte leicht flüchtiger Verbindungen über die gesamte Länge eines Bohrkerns (in der Regel 1 m) führt. Bei den Einzelproben variieren die Schadstoffkonzentrationen selbst bei engmaschigen Beprobungsabschnitten von 10 cm Länge in extremem Maße. Insbesondere dann, wenn es aufgrund einer limitierter Probenanzahl zur

Entnahme von Einzelproben in größeren Abständen kommt, sind diese Daten nur bedingt aussagekräftig für das Bohrprofil. Eine wichtige Voraussetzung bei der Entnahme von Intervallproben sind allerdings die unverzügliche Homogenisierung der Proben nach dem Öffnen der Liner sowie die unmittelbare Probennahme.

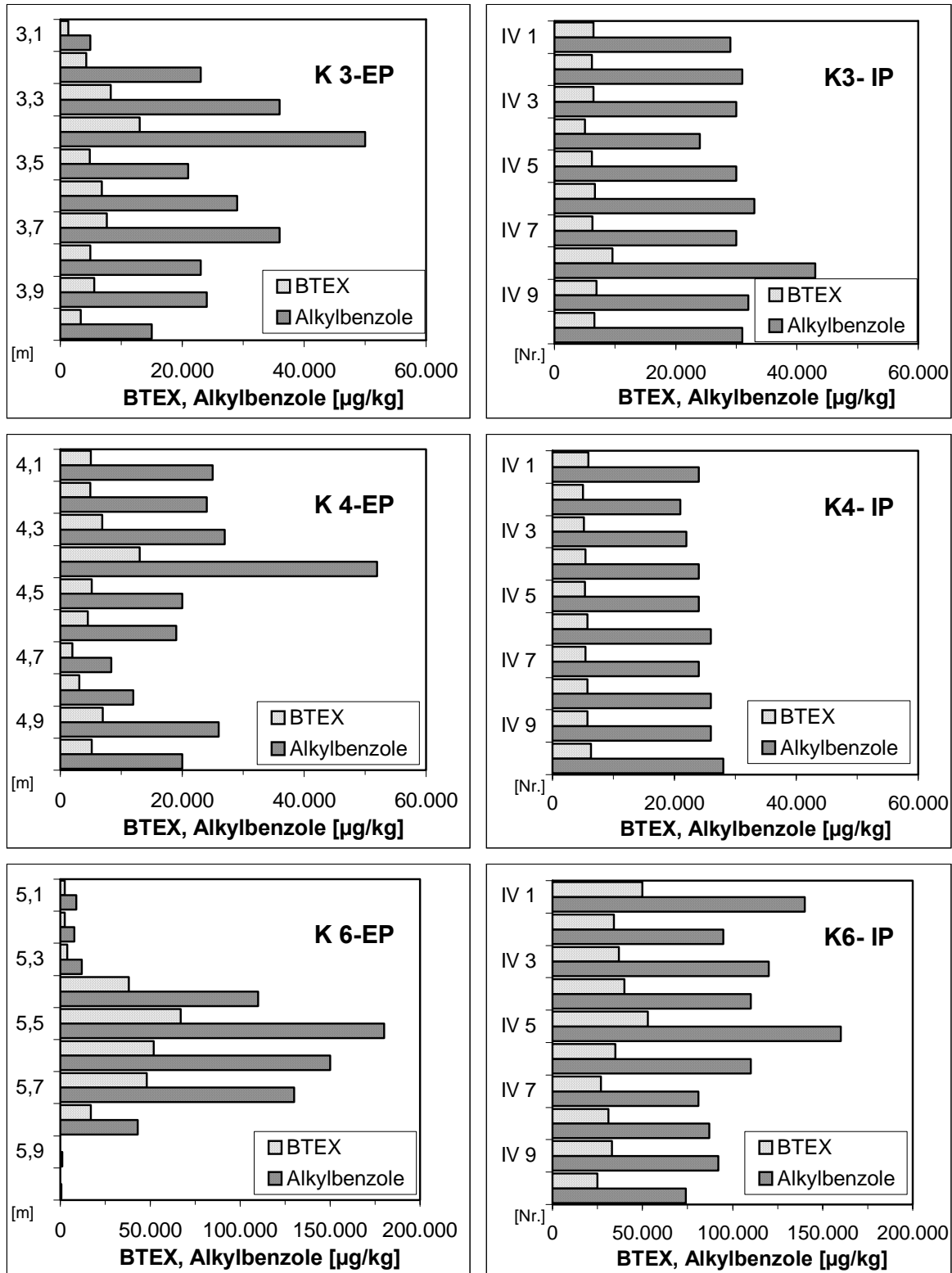


Abb. 3.1: BTEX- und Alkylbenzolgehalte in den Einzelproben (EP) und Intervallproben (IP) (K3, K4: ungesättigte Bodenzone, K6: gesättigte Bodenzone).

## 3.1.2 Ergebnisse

### 3.1.2.1 Bodenprofile

Im Testfeld und in den Vergleichsarealen lagen überwiegend Fein-, Mittel- und Grobsande in unterschiedlicher Verteilung und mit teilweise feinkiesigen Anteilen vor. Ab 6 m u. GOK (oberster Grundwasserleiter) nahmen mittelkiesige Anteile bzw. Mittelkieslagen zu. Schichtweise traten höher schluffige Anteile in den Sanden auf, reine Schlufflagen dagegen waren nur wenige cm mächtig. Gelegentlich wurden Tonlinsen (5 cm Schichtdicke) angetroffen. Kleinräumige Variationen in der Korngrößenverteilung waren teilweise bereits zwischen den vier Bohrungen eines Bohrareals festzustellen. Die obersten Bodenschichten (max. 0,3-1,0 m Tiefe) enthielten humose Beimengungen. Der Auffüllungskörper über den quartären Sanden erreichte im Testfeld und im nördlich angrenzenden Vergleichsareal eine Mächtigkeit von 0,3 m bis 1,20 m. Im unkontaminierten Vergleichsareal war aufgrund von Bauschuttresten bis in eine Tiefe von 2-4 m von aufgefülltem Bodenmaterial auszugehen.

Die bei der Aufnahme der Schichtenverzeichnisse durch Fingerprobe ermittelten Bodenarten wurden durch die Ergebnisse der Korngrößenanalysen nach DIN 18123, die an jeweils einem Bohrpunkt im Testfeld und in den Vergleichsarealen durchgeführt wurden, gestützt. Nach dem Untersuchungsbericht zu den bodenmechanischen Laboruntersuchungen an den Bohrpunkten T-B7/1, Vk-B9/2 und Vuk-B10/2 handelte es sich bei den Proben kornanalytisch um Fein- bis Grobsande (Korndurchmesser 0,06-2 mm). Im Testfeld lagen die Schlämmerkornanteile (Korndurchmesser < 0,06 mm) kleiner 1 Gew.%, in den Vergleichsarealen kleiner 4 Gew.%. Eine Ausnahme bildete lediglich der oberste Bohrmeter im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal (8 Gew.%).

Der Porenanteil in den Proben des Testfeldes variierte zwischen 27 Vol.% im obersten Bohrmeter und 33 Vol.% in 4-5 m Tiefe. Der unterste Bohrmeter konnte wegen erheblicher Schadstoffverunreinigung nicht untersucht werden. Im kontaminierten Vergleichsareal wurden vergleichbare Porenanteile (28-33 Vol.%) bestimmt. Im unkontaminierten Vergleichsareal lag der Porenanteil mit 29-39 Vol.% deutlich darüber.

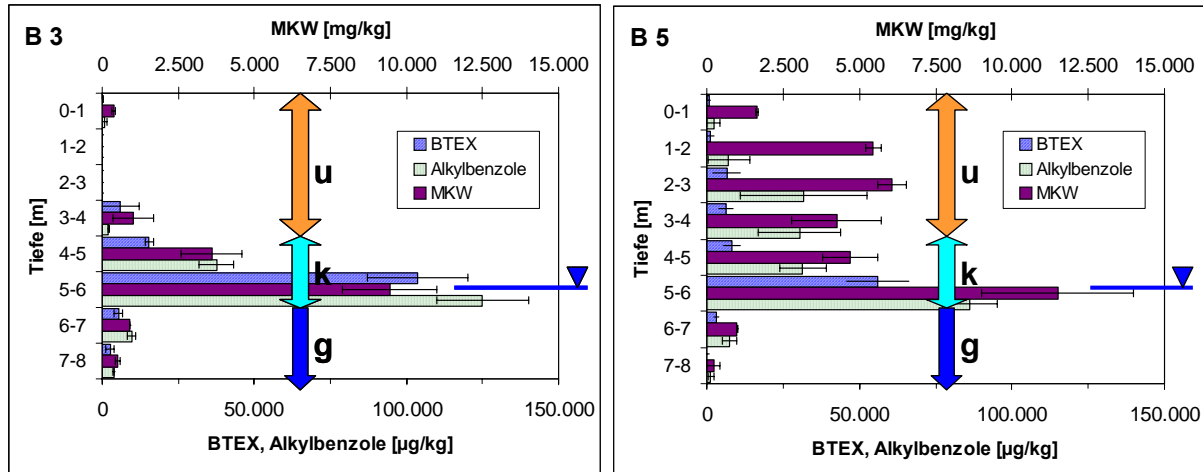
Der anhand der Körnungslinie abgeschätzte Durchlässigkeitsbeiwert lag mit wenigen Ausnahmen in der Größenordnung  $k_f = \sim 10^{-4}$ . Im obersten Bohrmeter des Testfeldes und kontaminierten Vergleichsareals wurden  $k_f$ -Werte von  $1-5 \cdot 10^{-5}$  m/s errechnet, wobei dieser Wert bei der Abschätzung nach *Hazen* (vgl. SCHULTZE & MUHS 1967) aufgrund des Schlämmerkornanteils in diesen Proben deutlich herabgesetzt sein kann. Im Testfeld wurde für die Probe aus 4-5 m Tiefe ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s bestimmt. Dieser Wert korrespondiert mit den in dieser Profiltiefe erhöhten Grobsand- und Feinkiesanteilen.

Aufgrund des langjährigen Grundwassermonitorings am TL Schäferhof-Süd durch die Bundeswehr und des vierteljährlichen Monitorings während der Projektlaufzeit ist bekannt, dass der Grundwasserspiegel in der Regel zwischen 4 und 6 m u. GOK schwankt. Um unabhängig vom Grundwasserstand eine einheitliche Bezeichnung zu verwenden, wird die Bodenzone in 4 bis 6 m Tiefe aufgrund des Einflusses des kapillaren Aufstiegs von Grundwasser im Folgenden durchgehend als Kapillarsaum bezeichnet, obwohl dieser Bereich zeitweise Wasser gesättigt als auch Wasser ungesättigt gewesen ist. Der für Sandböden angenommene kapillare Aufstieg wird mit ca. 30 cm angegeben (BOULDING & GINN 2004).

### 3.1.2.2 Schadstoffverteilung

Die Ergebnisse der Schadstoffanalytik im Testfeld und in den Vergleichsarealen wurden für die Start- und Abschlussbeprobung in der Übersichtstabelle (Anhang 2.1) zusammengefasst. Die Daten der MKW-, BTEX- und Alkylbenzolgehalte beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf die getrocknete Bodensubstanz (TS). Entsprechend dem Probenahmeplan stehen die Probenbezeichnungen für Ort der Probenahme (T = Testfeld, Vk = kontaminiertes Vergleichsareal, Vuk = unkontaminiertes Vergleichsareal), Bohrareal und Bohrpunkt (B1/1, B1/2 etc.) sowie für die Bohrkernaus den verschiedenen Tiefen (K1 = 0-1 m, K2 1-2 m etc.). Die Lage der Probenahmepunkte ist der beigefügten Lageskizze (Anhang 1.2) zu entnehmen.

Im Bereich der ehemaligen Dieselabfüllstation (Testfeld) lag horizontal und vertikal eine inhomogene Schadstoffverteilung im Boden vor (vgl. Abb. 3.3 bis Abb. 3.8). Innerhalb des Testfeldes wiesen die nördlicher gelegenen Bohrareale B1, B2 und B3 in der ungesättigten Bodenzone (0-4 m u. GOK) insgesamt geringere Schadstoffgehalte auf als die weiter südlich liegenden Bohrareale. Der Grundwasserstand zum Zeitpunkt der Start- und Abschlussbeprobung betrug ca. 5 m u. GOK. In der vertikalen Verteilung zeigt sich in allen Bohrarealen ein deutlicher Anstieg der Gehalte im Kapillarsaum bzw. der gesättigten Bodenzone (4-6 m u. GOK). Durch die in Bohrareal B3 und B5 durchgeführten zusätzlichen Probenahmen bis in 8 m u. GOK konnte die während der Projektlaufzeit entwickelte Hypothese, dass es in den Bodenzonen unterhalb von 6 m u. GOK zu einer Verringerung der Kontaminationen kommt, bestätigt werden (Abb. 3.2).



**Abb. 3.2: MKW-, BTEX- und Alkylbenzol-Gehalte der Bohrareale B3 und B5 bei der Abschlussbeprobung in der ungesättigten Bodenzone (u: 0-4 m), dem Kapillarsaum (k: 4-6 m) und der gesättigten Bodenzone (g: 6-8 m).**

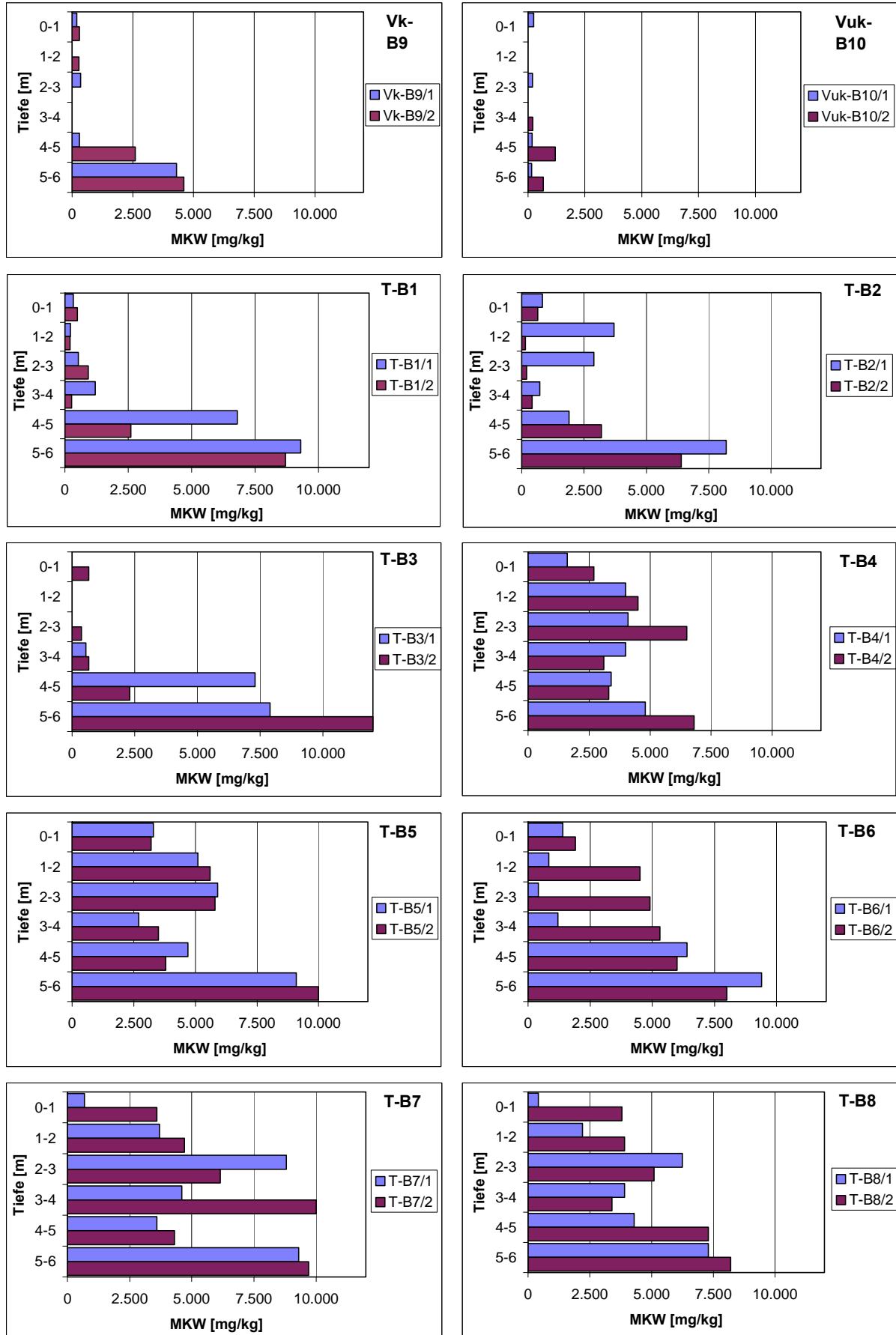
Die Abb. 3.3 und Abb. 3.4 zeigen die **MKW-Gehalte** der jeweils zwei Bohrungen in den acht Bohrarealen des Testfeldes und in den zwei Bohrarealen der Vergleichsareale in den Jahren 2001 und 2004. Bei der Start- und bei der Abschlussbeprobung wurden in der ungesättigten Bodenzone des Testfeldes MKW-Gehalte zwischen kleiner 100 mg/kg und maximal 10.000 mg/kg analysiert. Im Allgemeinen ist eine Konzentrationszunahme mit der Tiefe festzustellen, die insbesondere im Bereich des Kapillarsaumes bzw. der Wasser gesättigten

Bodenzone sprunghaft zunimmt (Gehalte bis 14.000 mg/kg). Das kontaminierte Vergleichsareal wies bei der Startbeprobung MKW-Konzentrationen in der ungesättigten Bodenzone von < 100 bis 380 mg/kg auf und ebenfalls einen Anstieg der MKW-Gehalte im Kapillarsaum auf maximal 4.600 mg/kg. Bei der Abschlussbeprobung konnten im kontaminierten Vergleichsareal in der ungesättigten Bodenzone keine MKW mehr nachgewiesen werden, im Kapillarsaum hingegen 3.000 bis 8.300 mg/kg. Im unkontaminierten Vergleichsareal wurden in der ungesättigten Bodenzone in einzelnen Proben 190-240 mg/kg MKW gemessen. Im Kapillarsaum lagen 160-1.200 mg/kg vor. Eine Abschlussbeprobung hat in diesem Bohrareal nicht stattgefunden.

Bei den leicht flüchtigen Verbindungen lagen 2001 im Testfeld die **BTEX-Gehalte** in der ungesättigten Bodenzone bei kleiner 100 µg/kg bis maximal 41.000 µg/kg und die **Alkylbenzol-Gehalte** bei maximal 76.000 µg/kg (Abb. 3.5, Abb. 3.7). Die Gehalte zum Zeitpunkt der Abschlussbeprobung erreichten noch maximal 14.000 µg/kg BTEX und 53.000 µg/kg Alkylbenzole, in vielen Proben konnten jedoch keine leicht flüchtigen Schadstoffe mehr nachgewiesen werden (Abb. 3.6, Abb. 3.8). Im Kapillarsaum waren bei der Start- bzw. Abschlussbeprobung bis zu 380.000 bzw. 450.000 µg/kg BTEX und 270.000 bzw. 200.000 µg/kg Alkylbenzole zu verzeichnen. Dabei fällt insbesondere das Bohrareal B1 mit überdurchschnittlich hohen Werten auf. In den beiden Vergleichsarealen wurden ausschließlich in der gesättigten Bodenzone BTEX- und Alkylbenzol-Kontaminationen (bis 52.000 bzw. 65.000 µg/kg) festgestellt. Metabolite wie die Benzoesäure (Teilabbauprodukt des Toluols) wurden weder im Testfeld (B7) noch im kontaminierten Vergleichsareal (B9) nachgewiesen.

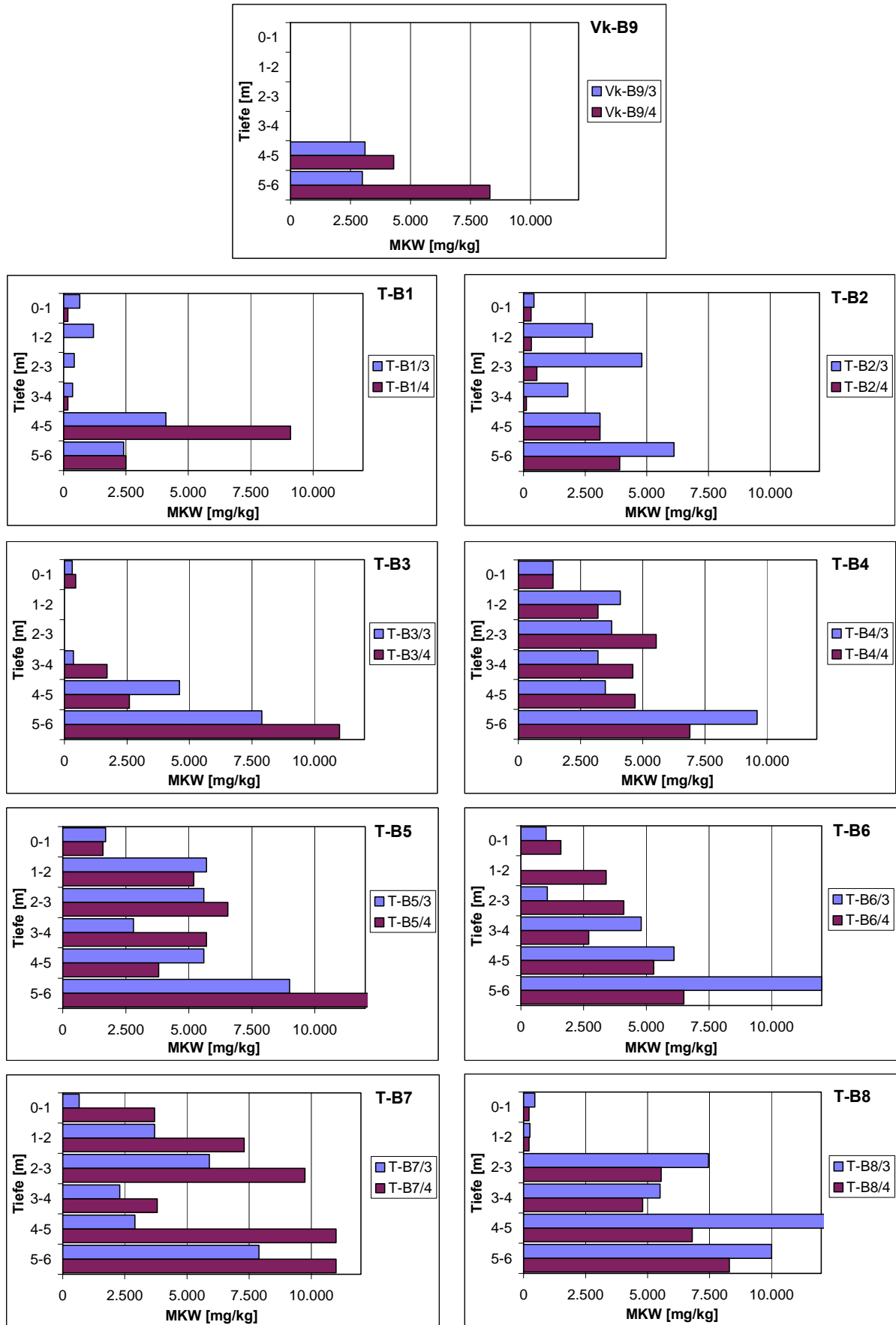
Innerhalb der jeweiligen Bohrareale variierten die MKW-Gehalte der Proben aus der gleichen Profiltiefe in unterschiedlich starkem Ausmaß. Bei der Startbeprobung zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der Schadstoffkonzentrationen innerhalb des Bohrareals B5 (Standardabweichungen vom Medianwert über alle Tiefen <18 %), wohingegen zum Beispiel die Bohrareale B2 und B6 extreme Schwankungsbreiten mit rein rechnerischen Standardabweichungen von über 100 % aufwiesen. Bei der Abschlussbeprobung wichen die MKW-Gehalte in B 1 (bis zu 80 %), B 2 (über 100 %), B 3 (bis zu 92 %), B6 (bis zu 85 %) und B 7 (bis zu 98 %) am stärksten vom Medianwert der beiden Bohrungen ab. In den Bohrarealen B 4 (bis zu 30 %), B5 und B8 (bis zu 50%) waren die MKW-Kontaminationen etwas homogener verteilt. Für die leicht flüchtigen Verbindungen konnte innerhalb der Bohrareale eine ähnlich inhomogene Verteilung festgestellt werden. Gehalte unter der Bestimmungsgrenze, die von statistischen Programmen bei der Medianberechnung gleich 0 gesetzt werden, wurden nicht berücksichtigt.

Aus der beschriebenen inhomogenen Schadstoffverteilung ergibt sich für die Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse die Problematik, eine Abnahme der Schadstoffkonzentrationen von möglichen Schwankungen der Messwerte innerhalb eines Bohrareals zu unterscheiden (s. Kap. 3.1.3).



(Bohrareale nach Lage im Testfeld ausgerichtet, Blattobersseite NNW)

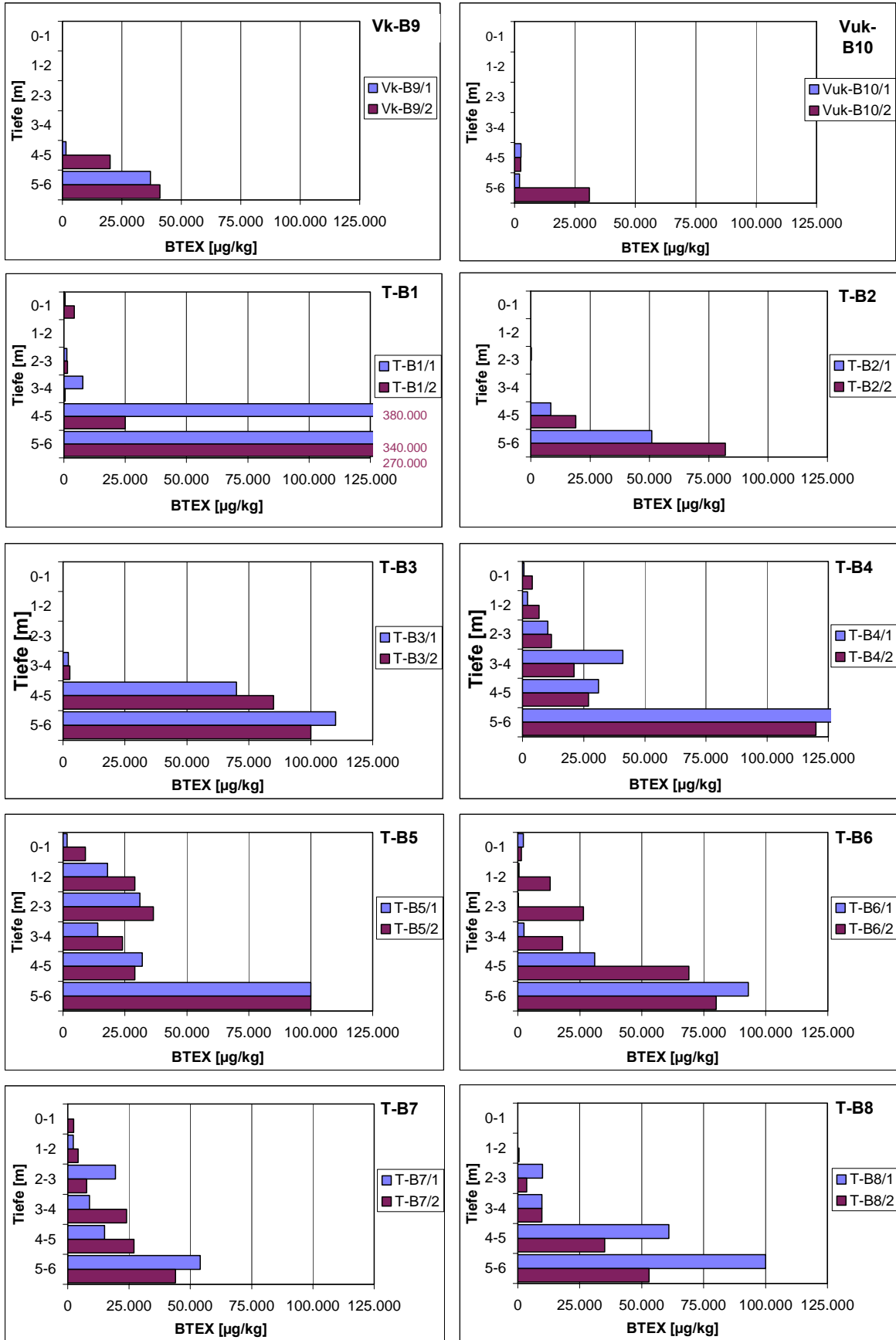
**Abb. 3.3: MKW-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Startuntersuchung 2001 (T = Testfeld, Vk = kont. Vergleichsareal, Vuk = unkont. Vergleichsareal)**



(Bohrreale nach Lage im Testfeld ausgerichtet, Blattoberseite NNW)

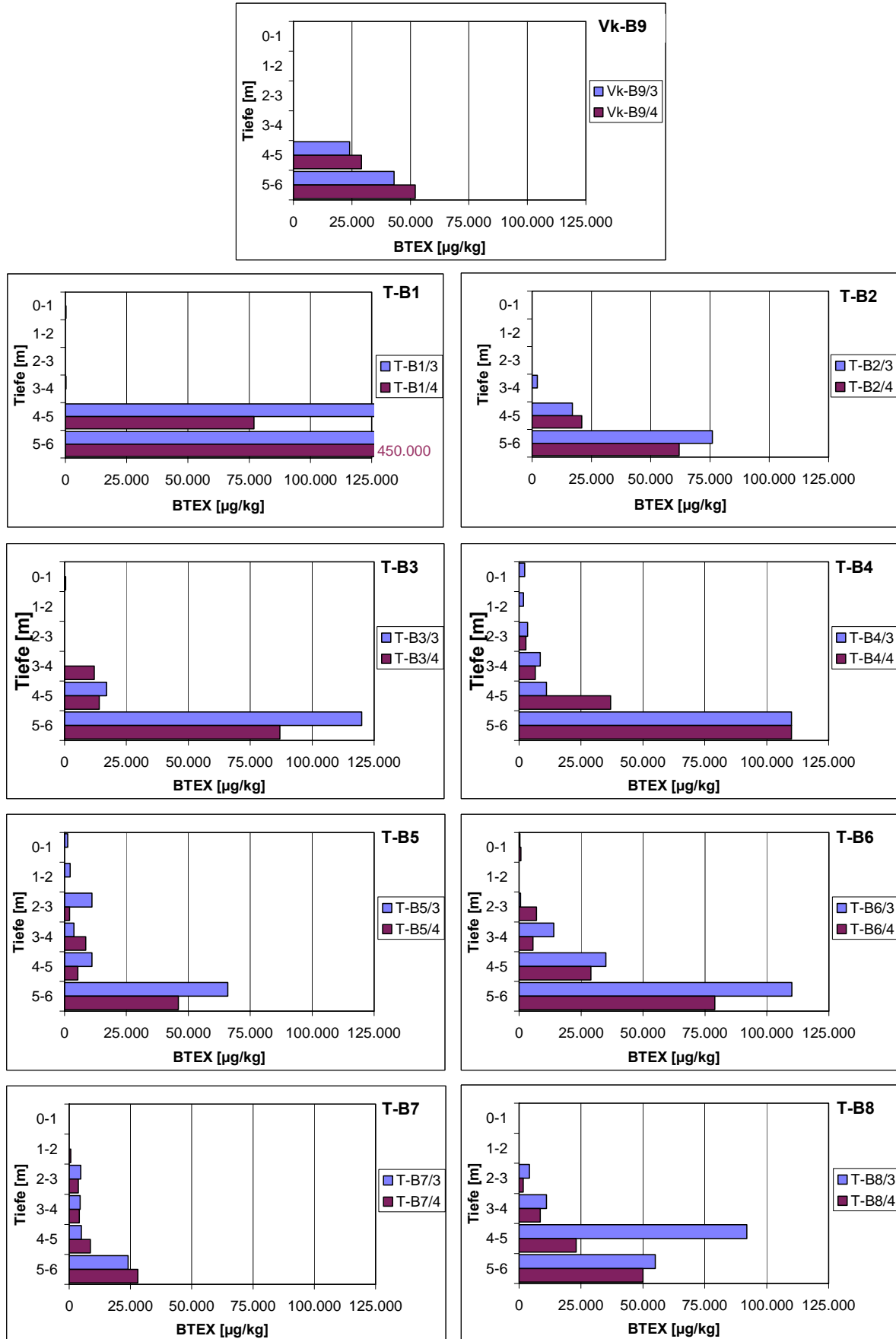
Abb. 3.4: MKW-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Abschlussuntersuchung 2004 (T = Testfeld, Vk = kont. Vergleichsareal)





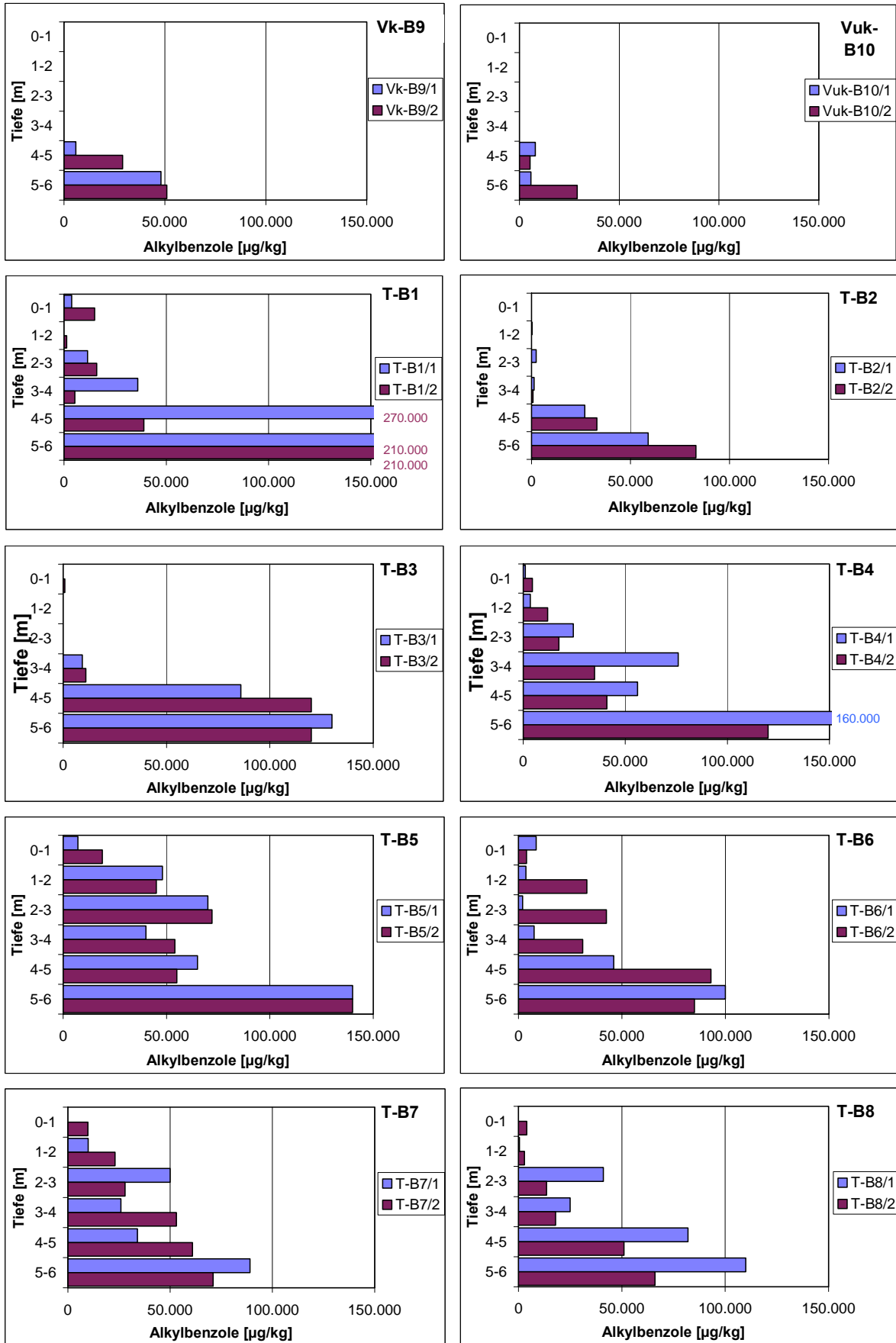
(Bohrareale nach Lage im Testfeld ausgerichtet, Blattobersseite NNW)

**Abb. 3.5: BTEX-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Startuntersuchung 2001 (T = Testfeld, Vk = kont. Vergleichsareal, Vuk = unkont. Vergleichsareal)**



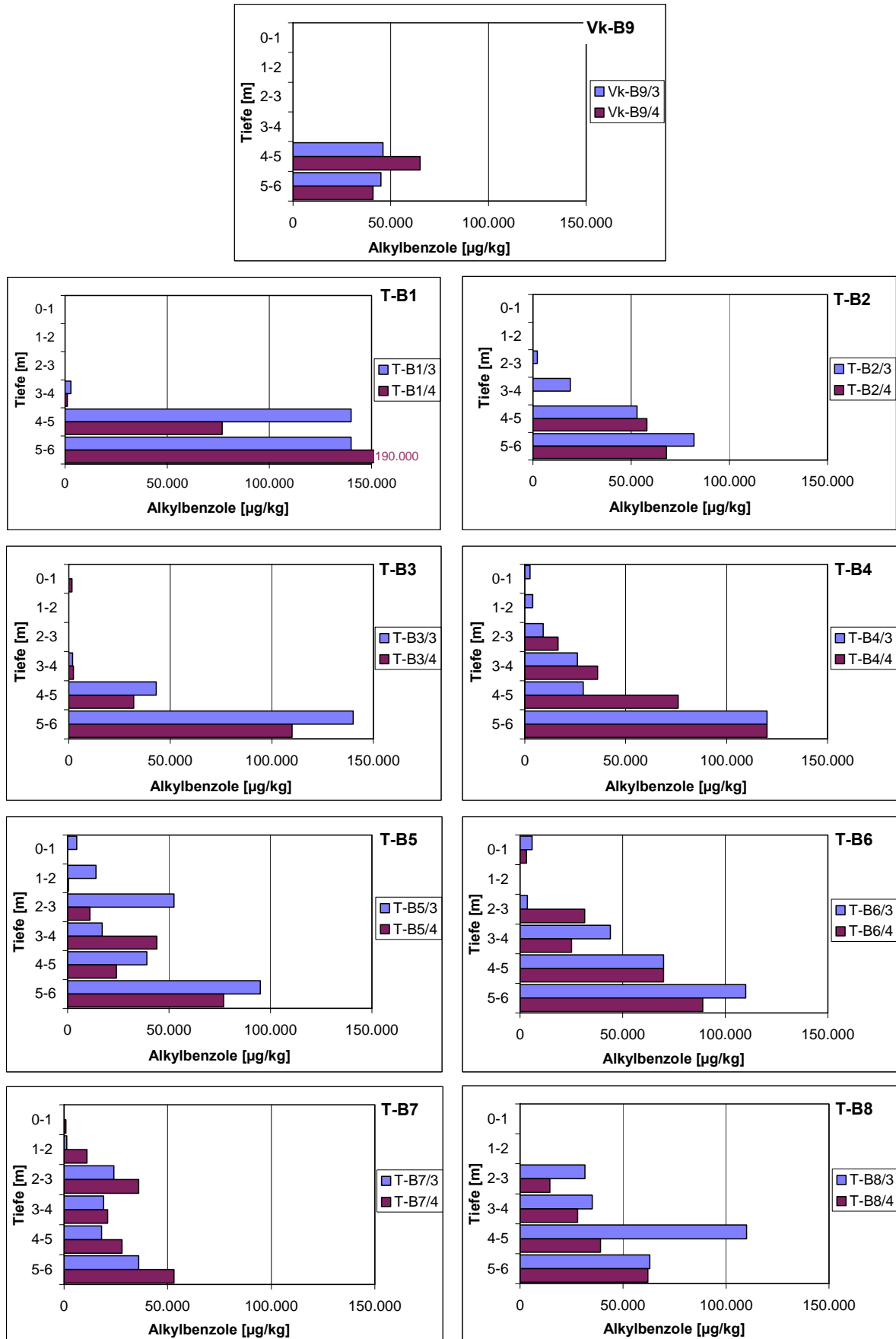
(Bohrreale nach Lage im Testfeld ausgerichtet, Blattobersseite NNW)

**Abb. 3.6: BTEX-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Abschlussuntersuchung 2004 (T = Testfeld, Vk = kont. Vergleichsareal)**



(Bohrareale nach Lage im Testfeld ausgerichtet, Blattoberrseite NNW)

Abb. 3.7: Alkylbenzol-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Startuntersuchung 2001 (T = Testfeld, Vk = kont. Vergleichsareal, Vuk = unkont. Vergleichsareal)



(Bohrreale nach Lage im Testfeld ausgerichtet, Blattoberseite NNW)

Abb. 3.8: Alkylbenzol-Gehalte der zwei Bohrpunkte pro Bohrareal bei der Abschlussuntersuchung 2004 (T = Testfeld, Vk = kont. Vergleichsareal)

### 3.1.2.3 Schadstoffabbau

Um den Schadstoffabbau während der Projektlaufzeit zu ermitteln, wurden die Daten aus der Abschlussbeprobung im Jahr 2004 mit den bei der Startbeprobung im Jahr 2001 ermittelten Daten verglichen. Hierzu wurden für die einzelnen Bohrareale die Mittel- und Medianwerte der Schadstoffgehalte gebildet (Anhang 2.5).

Bei der statistischen Auswertung der Schadstoffgehalte zeigte sich, dass die Profilbereiche der ungesättigten Bodenzone bis 4 m u. GOK (u) und der darunter liegende Kapillarsaum (k) getrennt zu betrachten sind. Bei einer weiteren, in diesem Fall meterweisen Differenzierung innerhalb des Bohrprofils ergäbe sich das Problem, dass damit nur noch zwei Werte pro Bohrmeter in die Auswertung einfließen würden. Um die Schadstoffabnahme zwischen den Borarealen vergleichen zu können, wurde der prozentuale Anteil bezogen auf den Ausgangswert 2001 berechnet (Tab. 3.3).

**Tab. 3.3: Prozentualer Anteil der Mittel- und Medianwerte des jeweiligen Schadstoffes bei der Abschlussbeprobung 2004 gegenüber der Startbeprobung 2001.**

Bohrareal	Bodenzone	Mittelwerte			Mediane		
		BTEX	Alkyl- benzole	MKW	BTEX	Alkyl- benzole	MKW
B1	0-4 m (u)	9,9	15,7	96,0	18,9	17,4	96,3
	4-6 m (k)	79,5	75,0	66,1	45,9	66,7	42,6
B2	0-4 m (u)	1023,3	886,1	116,0	1023,3	1029,9	69,3
	4-6 m (k)	109,7	129,2	82,2	118,6	137,0	72,9
B3	0-4 m (u)	380,4	27,5	125,2	297,6	20,7	66,9
	4-6 m (k)	65,2	71,3	88,5	56,2	63,8	82,2
B4	0-4 m (u)	34,5	62,0	89,2	36,1	62,0	86,9
	4-6 m (k)	87,0	91,5	135,0	97,4	111,4	141,5
B5	0-4 m (u)	23,6	40,4	99,3	14,3	26,9	125,6
	4-6 m (k)	49,2	58,8	117,4	43,2	56,6	105,8
B6	0-4 m (u)	58,4	114,3	104,3	133,2	192,5	163,6
	4-6 m (k)	92,7	104,6	100,3	76,5	89,3	87,5
B7	0-4 m (u)	29,9	56,6	87,9	50,6	73,1	80,6
	4-6 m (k)	46,9	52,9	121,9	46,1	48,5	139,0
B8	0-4 m (u)	132,2	182,1	84,4	178,2	220,4	68,3
	4-6 m (k)	88,4	88,7	140,6	92,1	84,5	125,3
B9	0-4 m (u)			100,0			100,0
	4-6 m (k)	148,7	147,2	158,5	126,3	118,2	107,2
Insgesamt	0-4 m (u)	83,1	82,2	102,3	82,1	86,3	85,2
	4-6 m (k)	80,3	83,4	108,7	83,2	86,9	95,3

\* Werte unter 80 % der Ausgangskonzentration sind grau unterlegt.

Das arithmetische Mittel errechnet sich aus der Summe aller Messwerte geteilt durch ihre Anzahl, während beim Median jeweils 50 % der Messwerte oberhalb und 50 % der Messwerte unterhalb des Wertes liegen (KÖHLER et al. 2002). Bei stark variierenden Schadstoffgehalten innerhalb der Bohrareale bieten beide Methoden Vor- und Nachteile. So können zum Beispiel einzelne besonders hohe Schadstoffgehalte den Mittelwert nach oben drücken, während sie beim Medianwert nicht so stark ins Gewicht fallen. In diesem Fall würde nach dem Mittelwert ein Bohrareal als insgesamt höher kontaminiert eingeschätzt werden, als es in Wirklichkeit ist. Andererseits kann in gleichem Beispiel der deutlich niedrigere Medianwert darüber hinwegtäuschen, dass einzelne hoch kontaminierte Bereiche in einem Bohrareal vorliegen.

In der tabellarischen Darstellung (Tab. 3.3) ist in der ungesättigten Bodenzone insbesondere in den Bohrarealen B1, B4, B5 und B7 eine Abnahme der mittleren und medianen BTEX-Gehalte und in den Bohrarealen B1, B3, B4, B5 und B7 der mittleren und medianen Alkylbenzolgehalte zu erkennen. Bei den MKW-Gehalten liegen die Median- und Mittelwerte der Abschlussbeprobung nur vereinzelt unter denen der Anfangsbeprobung. Die in der Tabelle aufgeführten Mittel- und Medianwerte über 100 % (Extrembeispiel Bohrareal B2), legen nahe, dass durch Inhomogenitäten innerhalb der Bohrareale die Schwankungsbreite der einzelnen Werte so hoch ist, dass sie einen potenziellen Schadstoffabbau überdeckt.

Eine Abnahme der Schadstoffkonzentrationen innerhalb eines Bohrareals ist statistisch also nur dann eindeutig nachzuweisen, wenn sich die Schadstoffminderung von möglichen Schwankungen der Messwerte aufgrund einer inhomogenen Schadstoffverteilung unterscheidet (UMWELTBUNDESAMT 2000). Eine signifikante Konzentrationsabnahme ist zum Beispiel gegeben, wenn die Werte der Abschlussbeprobung außerhalb eines festgelegten Konfidenzintervalles der Werte der Anfangsbeprobung liegen (vgl. Abb. 3.9). Das Konfidenzintervall entspricht dabei einem Vertrauensbereich, der mit vorgegebener Sicherheitswahrscheinlichkeit (i. A. 90-95 %) den wahren Wert enthält (KÖHLER et al. 2002). Die Voraussetzung für die Bildung von Konfidenzintervallen ist eine Normalverteilung der Werte (vgl. SOKAL & ROHLF 2003), die in den beprobten Bohrarealen nur zum Teil gegeben war.

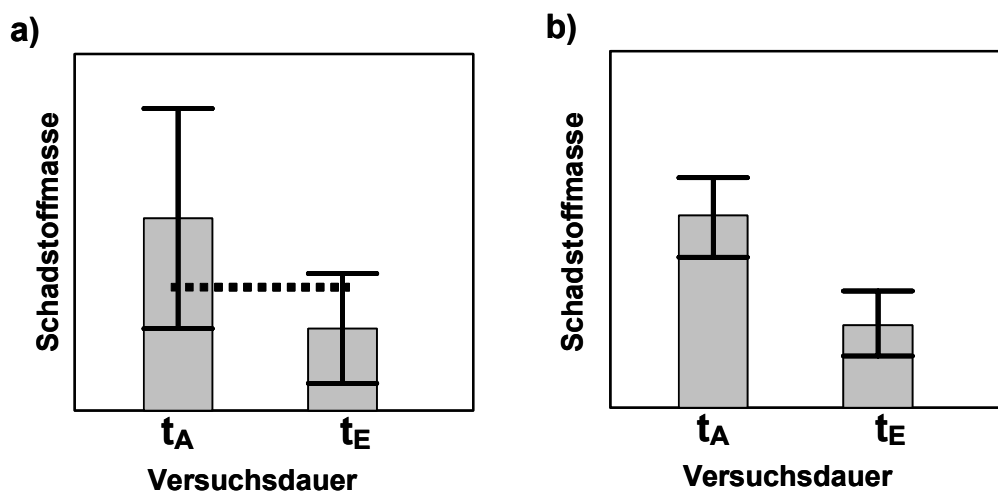
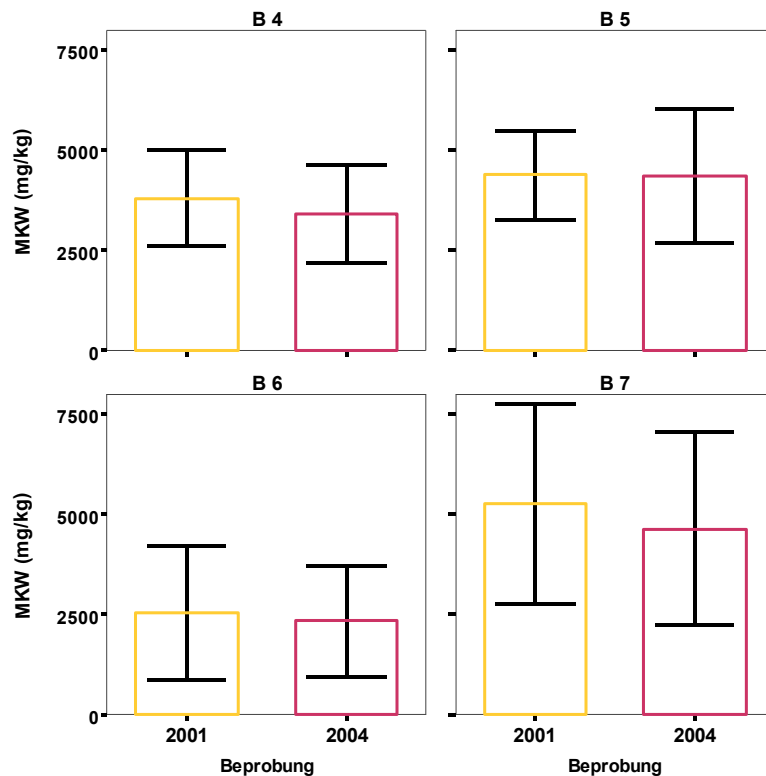


Abb. 3.9: Ermittlung der Selbstreinigungsleistung mit Hilfe von Konfidenzintervallen. Fallbeispiel a) keine signifikante Konzentrationsabnahme aufgrund sich überschneidender Konfidenzintervalle, Fallbeispiel b) signifikante Konzentrationsabnahme ( $t_A$ = Anfangsbeprobung,  $t_E$ = Endbeprobung); nach UMWELTBUNDESAMT (2000).

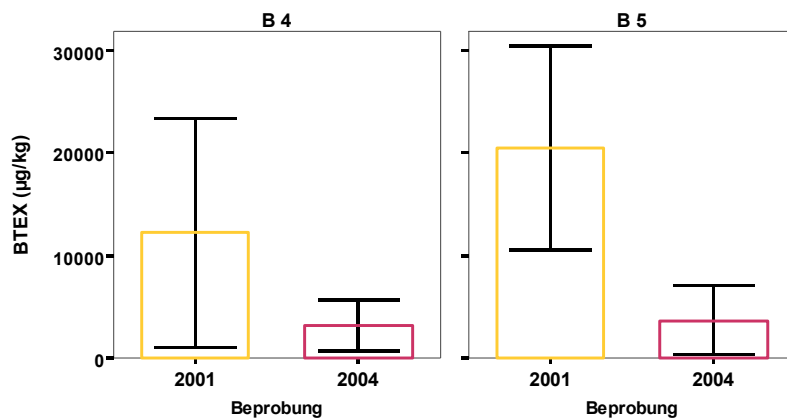
In Abb. 3.10 bis Abb. 3.12 sind für die verschiedenen Schadstoffe die 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der Start- und Abschlussbeprobung in den Bohrarenalen dargestellt, die zu beiden Zeitpunkten eine Normalverteilung der Proben in der ungesättigten Bodenzone aufwiesen. Die Normalverteilung wurde mit dem Statistik-Programm SPSS 11 nach dem *Shapiro-Wilk-Test* (vgl. BÜHL & ZÖFEL 2002) nachgewiesen. Da Gehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze zu verfälschten Mittelwerten bzw. Fehlerbalken führen können, wurden diese Werte für die Auswertung auf die nachweisbare Konzentrationsgrenze von 100 mg/kg MKW und 100 µg/kg BTEX und Alkylbenzole korrigiert.

Bei den MKW-Gehalten (Abb. 3.10) überlappen sich in den ausgewerteten Bohrarenalen B4, B5, B6 und B7 die Konfidenzintervalle der Beprobungen von 2001 und 2004. Damit kann nach dieser Auswertungsmethode keine eindeutige Schadstoffminderung während des Untersuchungszeitraumes belegt werden.



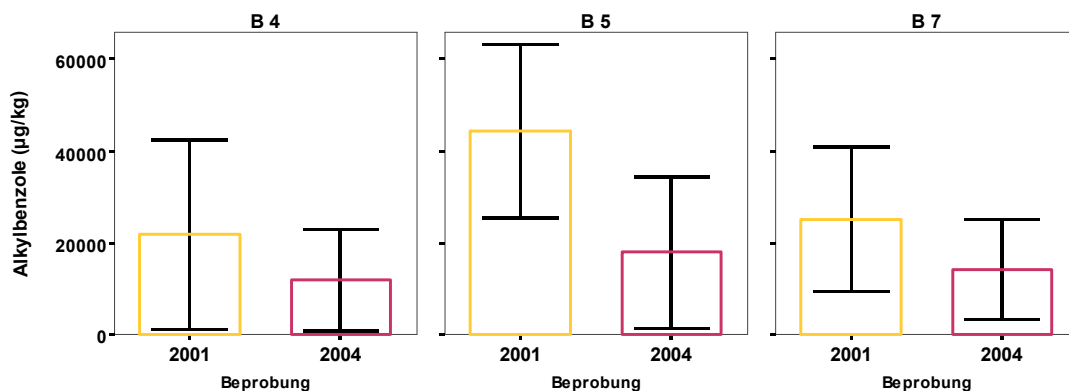
**Abb. 3.10: 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der MKW-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone in den Bohrarenalen B4, B5, B6 und B7.**

Für BTEX (Abb. 3.11) erfüllten lediglich die Bohrarenale B4 und B5 die Voraussetzung einer Normalverteilung zu beiden Probennahmezeitpunkten. Während in Bohrareal B4 zwar anhand der Balkenhöhe eine Schadstoffminderung abzulesen ist, die Konfidenzintervalle aufgrund der hohen Streuung in 2001 sich aber überschneiden, kann für das Bohrareal B5, das keine Überschneidung der Konfidenzintervalle aufweist, eine eindeutige Schadstoffabnahme während des Untersuchungszeitraumes belegt werden.



**Abb. 3.11: 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der BTEX-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone in den Bohrarealen B4 und B5.**

Die Mittelwerte der Alkylbenzol-Gehalte (Abb. 3.12) lagen in den normalverteilten Bohrarealen B4, B5 und B7 bei der Abschlussbeprobung zwar unter denen der Startbeprobung, jedoch überlappen sich auch hier die jeweiligen Konfidenzintervalle aufgrund der inhomogenen Schadstoffverteilung im Boden.



**Abb. 3.12: 95 %-Konfidenzintervalle der Mittelwerte der Alkylbenzol-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone in den Bohrarealen B4, B5 und B7.**

Um die Lage und Streuung der Messwerte innerhalb der Bohrareale genauer betrachten zu können, wurden die Daten zusätzlich in Box-Whisker-Plots aufgetragen. In den Boxplots wird die Häufigkeitsverteilung des jeweiligen Parameters mit Hilfe von Boxen und Fäden dargestellt. Jede Box ist gekennzeichnet durch den 25% (Q1)- und 75% (Q3)- Quartilwert sowie den mit einem Querbalken markierten Medianwert (Q2). Alle Werte, die weniger als die 1,5-fache Interquartildistanz (Q3-Q1) von der Box entfernt liegen, werden auf den Fäden dargestellt. Die übrigen Werte werden als Ausreißerwerte (°) oder Extremwerte (\*) angezeigt.

Auch bei dieser Darstellung (Abb. 3.13 - Abb. 3.15) zeigt sich das Problem, dass zwar eine unterschiedliche Lage der Boxen in Abhängigkeit vom Probennahmezeitpunkt zu erkennen



ist, aber gleichzeitig die starke Streuung keine eindeutige Aussage über das Ausmaß der Schadstoffminderung erlaubt.

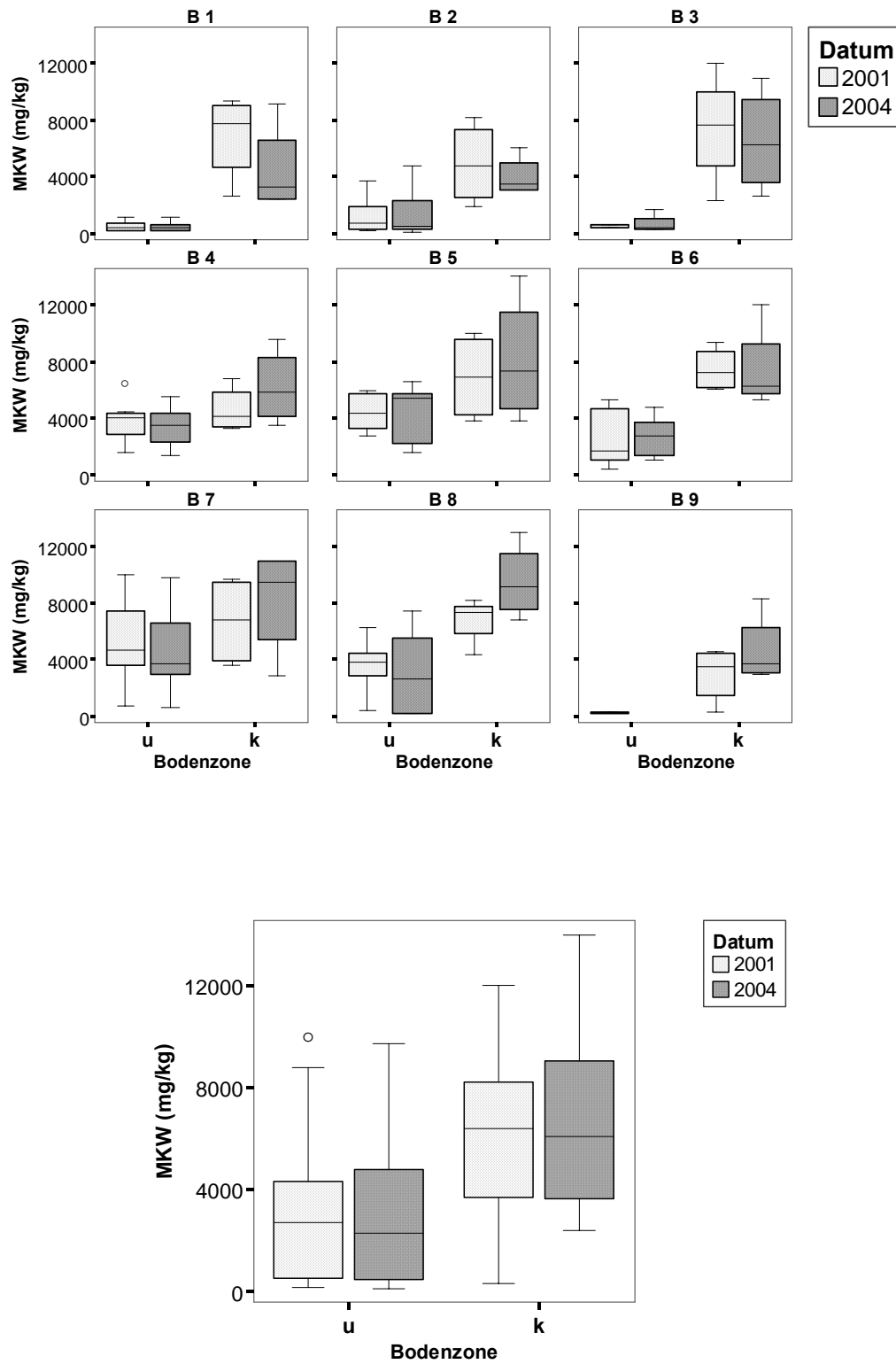


Abb. 3.13: Boxplots der MKW-Gehalte in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, Vk: B9) sowie der gesamten Messwerte (u= unges. Bodenzone , k = Kapillarzone).

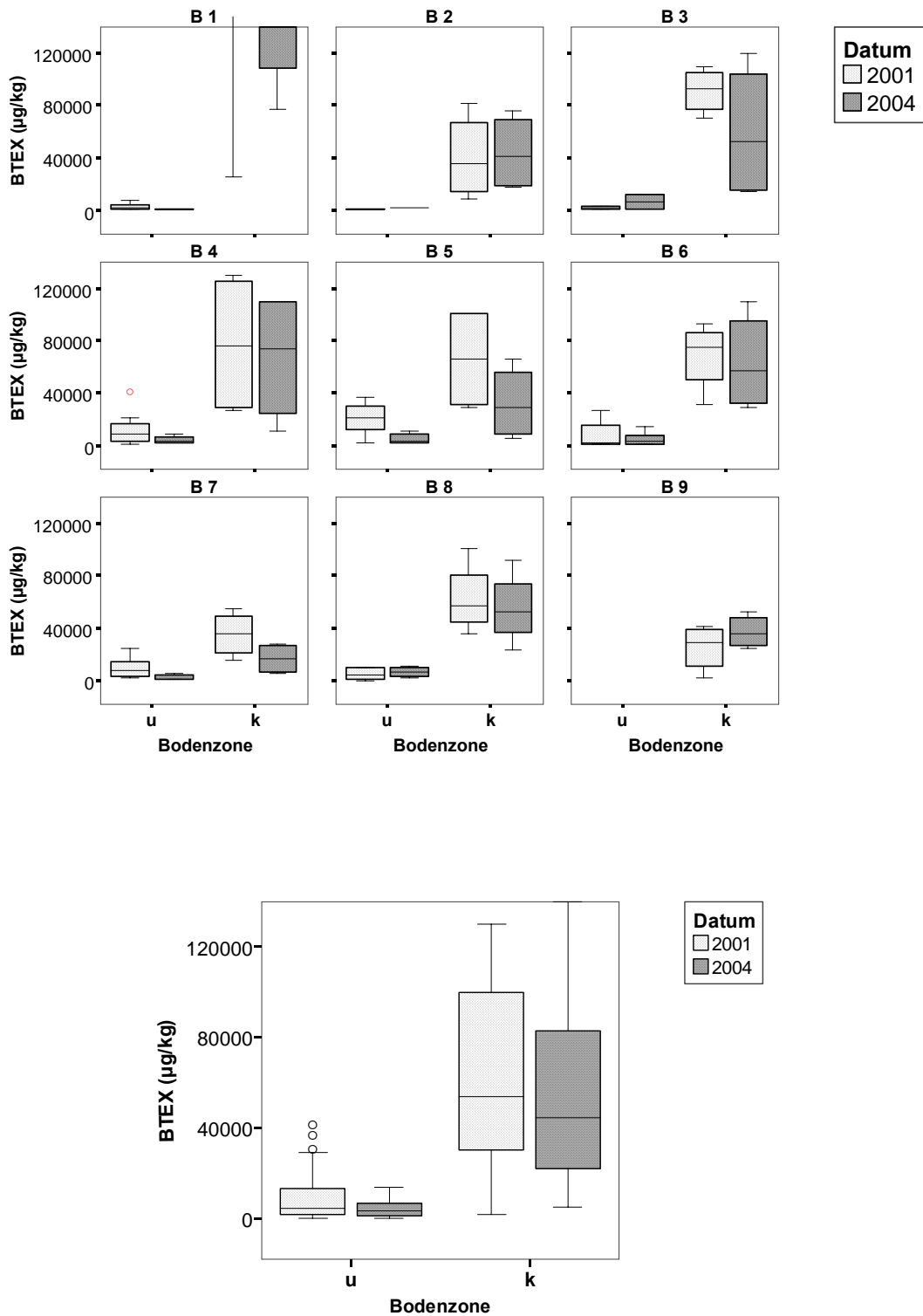


Abb. 3.14: Boxplots der BTEX-Gehalte in den verschiedenen Bohrarenalen (Testfeld: B1-B8, Vk: B9) sowie der gesamten Messwerte (u= unges. Bodenzone , k = Kapillarzone).

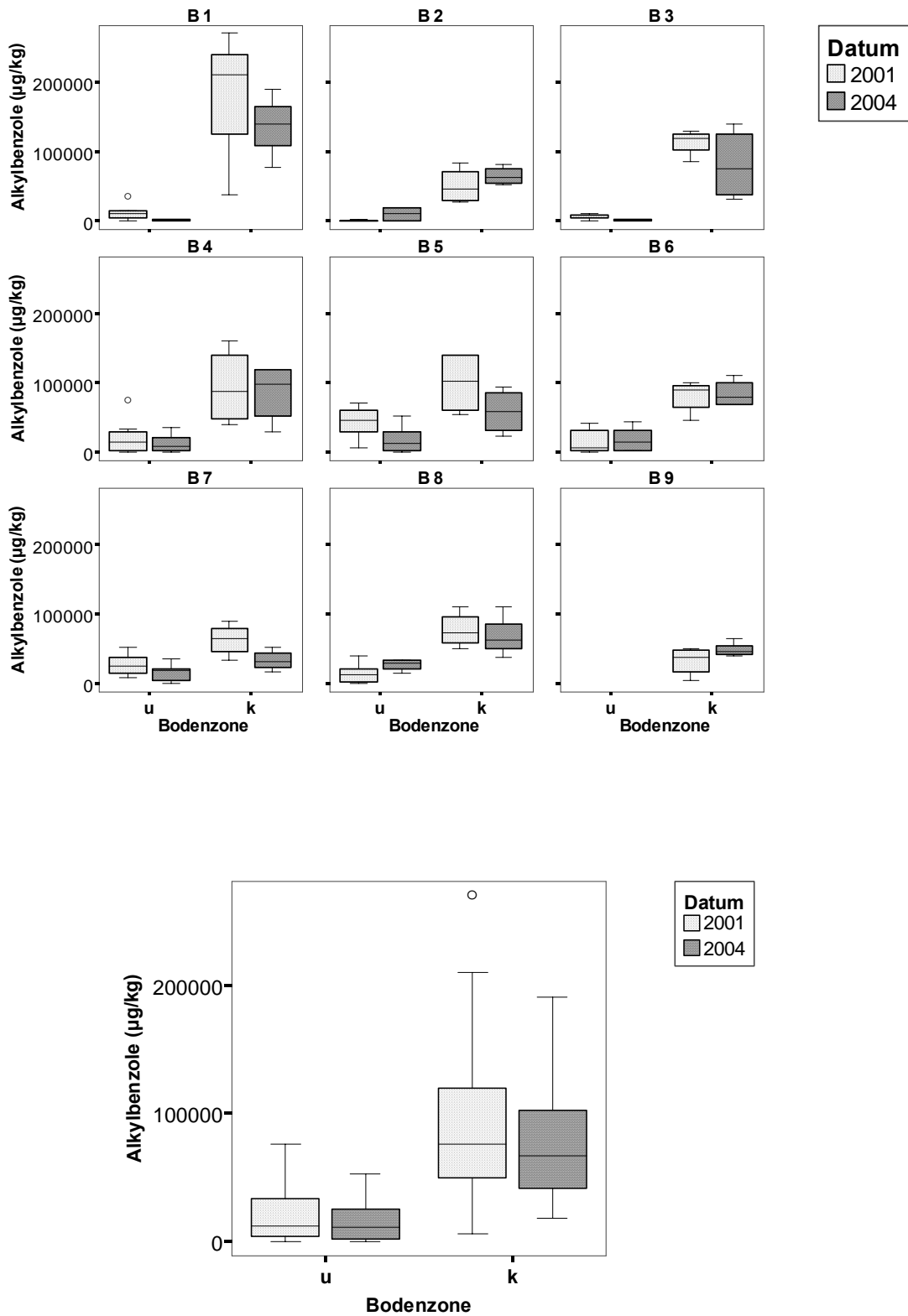


Abb. 3.15: Boxplots der Alkylbenzol-Gehalte in den verschiedenen Bohrerealen (Testfeld: B1-B8, Vk: B9) sowie der gesamten Messwerte (u= unges. Bodenzone, k = Kapillarzone).

Abschließend sollen potenzielle Prozesse der Schadstoffverlagerung und der Volatilisierung leicht flüchtiger Verbindungen anhand der Schadstoffprofile diskutiert werden. Die auf den nachfolgenden Seiten dargestellten Abb. 3.16 bis Abb. 3.18 zeigen die Mittelwerte der Schadstoffgehalte in den beiden Bohrpunkten der Bohrareale bei den Probennahmen in 2001 und 2004. Geringfügige Verschiebungen der Profile sind bei den MKW-Gehalten überwiegend auf die inhomogene vertikale Schadstoffverteilung innerhalb der Bohrareale zurückzuführen. Für BTEX und die Alkylbenzole zeigt sich in allen Bohrarealen eine Schadstoffabnahme insbesondere in den oberen zwei Metern der ungesättigten Bodenzone, die wahrscheinlich sowohl auf mikrobielle Abbauprozesse als auch auf die Volatilisierung sehr leicht flüchtiger und die Auswaschung leicht löslicher Bestandteile in tiefere Bodenschichten zurückgeführt werden kann.

Die verschiedenen Auswertungsmethoden weisen darauf hin, dass es innerhalb von drei Jahren insbesondere bei den leicht flüchtigen Schadstoffen partiell zu einer Schadstoffabnahme gekommen ist. Eine statistisch gesicherte Quantifizierung kann aufgrund der inhomogenen Schadstoffverteilung aber nicht vorgenommen werden.

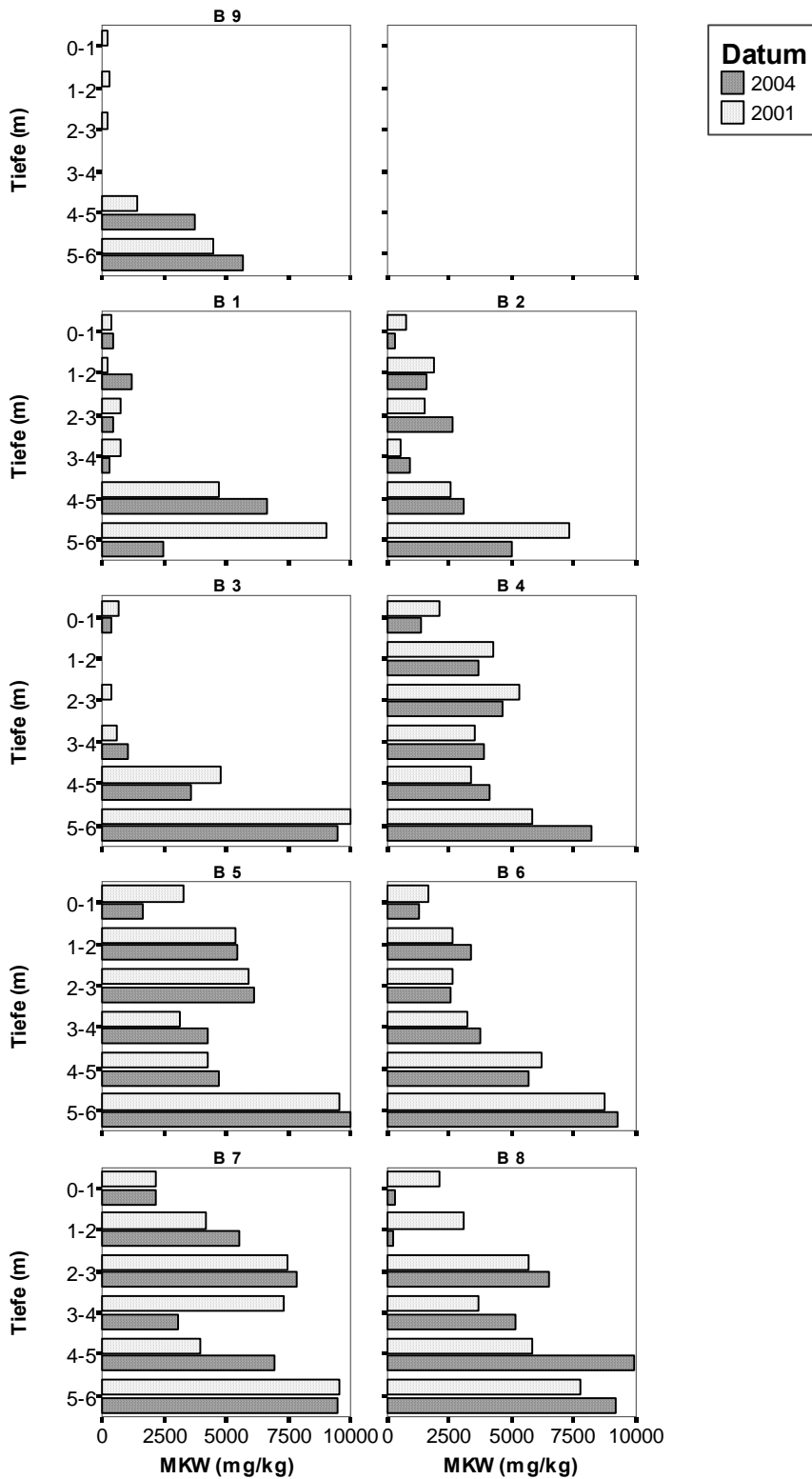


Abb. 3.16: MKW-Gehalte pro Bohrmeter (Mittelwert der Probennahme) in den verschiedenen Bohrerealen (Testfeld: B1-B8, kontaminiertes Vergleichsareal: B9).

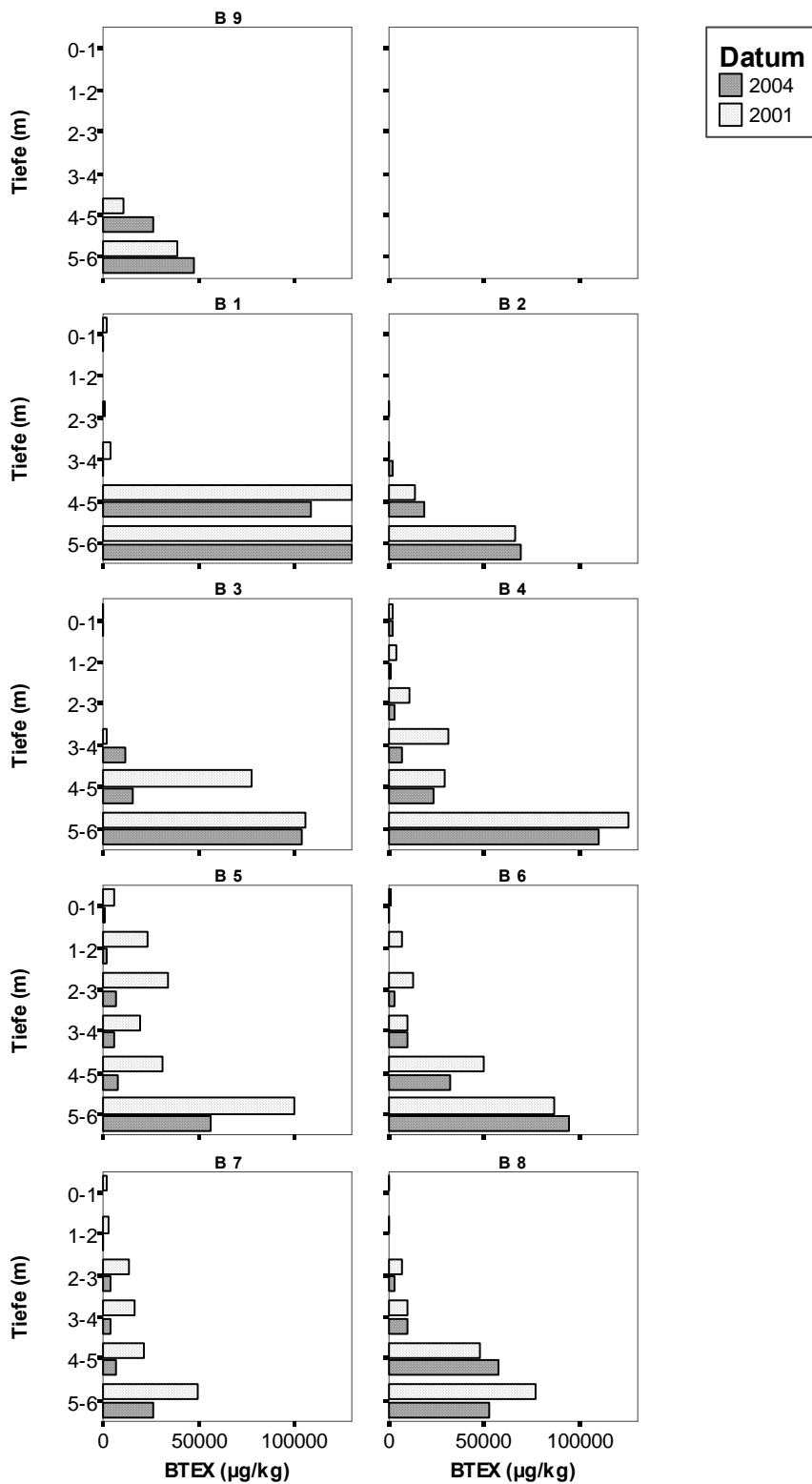


Abb. 3.17: BTEX-Gehalte pro Bohrmeter (Mittelwert der Probennahme) in den verschiedenen Bohrarealen (Testfeld: B1-B8, kontaminiertes Vergleichsareal: B9).

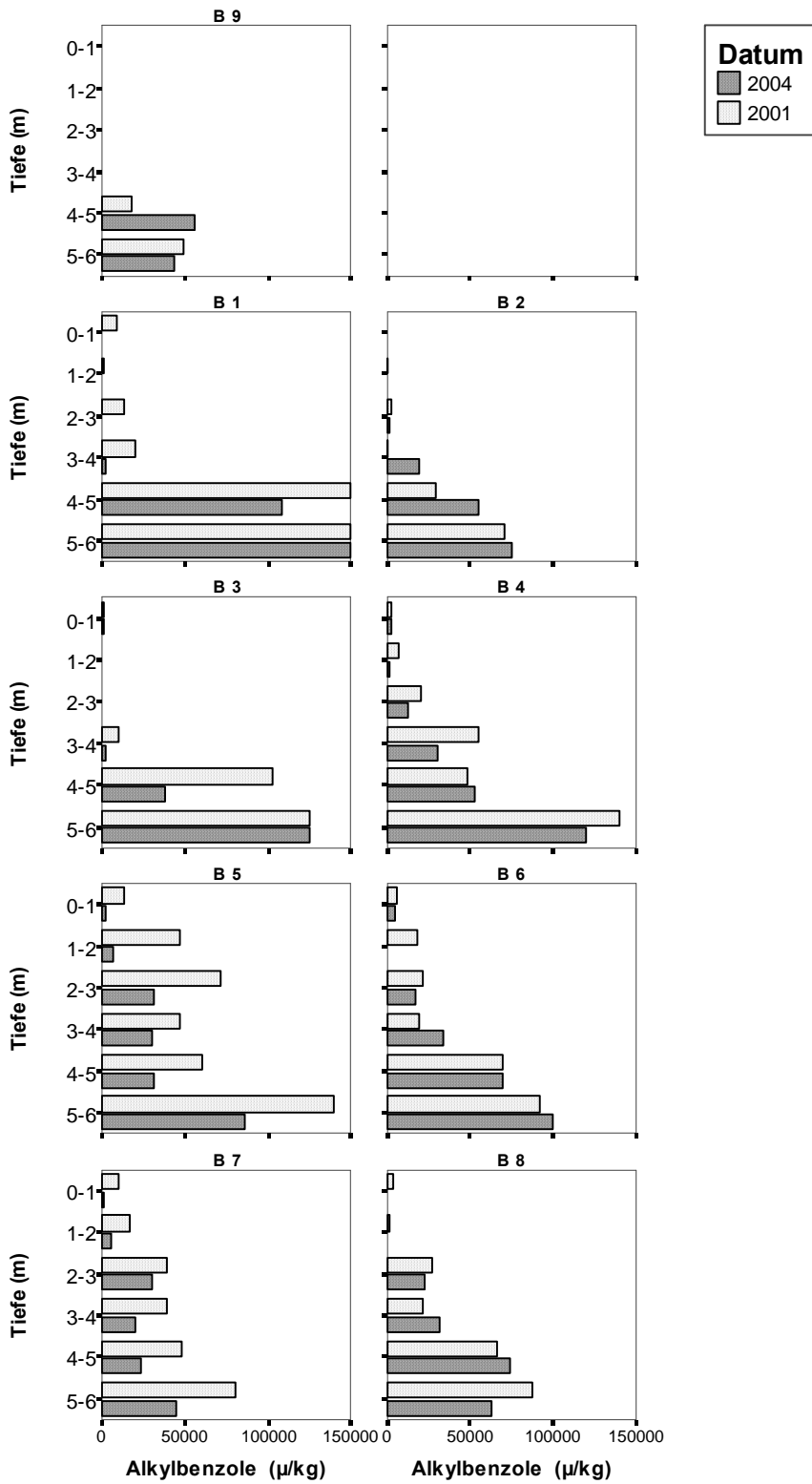


Abb. 3.18: Alkybenzol-Gehalte pro Bohrmeter (Mittelwert der Probennahme) in den verschiedenen Bohrrealeen (Testfeld: B1-B8, kontaminiertes Vergleichsareal: B9).

Zur Beurteilung des Schadstoffabbaus werden häufig theoretische Reaktionskinetiken 0. Ordnung bzw. 1. Ordnung (HÖPER & WILKE 2004) berechnet. Die Abbauraten 0. Ordnung nimmt einen über die Zeit konstanten, linearen Schadstoffabbau an. Bei Reaktionskinetiken 1. Ordnung wird der Abbau neben dem Faktor Zeit von der verbleibenden Substratkonzentration bestimmt.

0. Ordnung:  $C_t = C_0 - b \cdot t$

1. Ordnung:  $C_t = C_0 \cdot e^{-k \cdot t}$

$C_t$  = Konzentration zum Zeitpunkt  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

$C_0$  = Anfangskonzentration zum Zeitpunkt  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

$t$  = Zeit seit Versuchsbeginn (Tage)

$b$  = Abbauraten 0. Ordnung ( $\mu\text{g kg}^{-1} \text{Tag}^{-1}$ )

$k$  = Abbaukonstante 1. Ordnung ( $\text{Tag}^{-1}$ )

Für die Bohrareale, in denen die Medianwerte und die Mittelwerte der Abschlussbeprobung unter denen der Anfangsbeprobung lagen, wurden die beiden Reaktionskinetiken für BTEX, Alkylbenzole und MKW berechnet (Tab. 3.4).

**Tab. 3.4: Abbauraten 0. Ordnung und maximale Abbaukonstanten 1. Ordnung für BTEX, Alkylbenzole und MKW im Testfeld. Berechnung auf Grundlage der Medianwerte und einer Zeitspanne von 1040 Tagen.**

	<b>Bodenzone (u. GOK)</b>	<b>Bohrareale</b>	<b>Abbauraten 0. Ordnung</b>	<b>Max. Abbau- konstanten 1. Ordnung (<math>\text{d}^{-1}</math>)</b>
<b>BTEX</b>	0-4 m	B1, B4, B5, B6, B7	1-17 $\mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{d}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	5-6 m	B1, B3, B4, B5, B6, B7, B8	2-160 $\mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{d}$	$8 \cdot 10^{-4}$
<b>Alkylbenzole</b>	0-4 m	B1, B3, B4, B5, B7	5-33 $\mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{d}$	$6 \cdot 10^{-4}$
	5-6 m	B1, B3, B5, B6, B7, B8	9-67 $\mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{d}$	$17 \cdot 10^{-4}$
<b>MKW</b>	0-4 m	B1, B 2, B3, B4, B7, B8	0,01-1,2 $\text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$	$4 \cdot 10^{-4}$
	5-6 m	B3, B6	0,9-1,3 $\text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Berechnete Abbaukinetiken spiegeln allerdings nicht zwangsläufig den biologischen Abbauprozess wider und müssen kritisch betrachtet werden (BOSSERT & COMPEAU 1995). Sie dienen in der Regel der Beschreibung von Experimenten im Labormaßstab, bei denen Einflussfaktoren wie Löslichkeit und Transport der Kontaminanten kontrollierbar sind. Für Feldversuche muss berücksichtigt werden, dass der Teil der Schadstoffminderung, der auf Volatilisierung und Austrag mit dem Sickerwasser zurückgeht, mit in die berechnete Abbauraten einfließt.

Die am TL Schäferhof-Süd bestimmten Abbaukonstanten liegen zum Teil deutlich unter den Werten, die in den in der Literaturrecherche ausgewerteten Veröffentlichungen (UMWELT-



BUNDESAMT 2004) angegeben werden. Zum Beispiel bestimmten ONG et al. (1994) Abbauraten aus in-situ Respirationstests von 0,5-27 mg TPH/kg\*d und HINCHEE & ONG (1992) von 0,4-1 mg/kg\*d. BOSSERT & COMPEAU (1995) listen für Feldversuche mit Dieselmotoren Abbauraten von 10 mg/kg d und Abbaukonstanten von 0,018 d<sup>-1</sup> (nach TROY et al. 1993) auf. Bei den leicht flüchtigen Schadstoffen liegen nur wenige Vergleichswerte vor. ALLEN-KING et al. (1996) erreichten auf einem Versuchsfeld einen Toluolabbau von 33-56 mg/kg\*d, wobei die hohen Abbauraten sicherlich in der Höhe der Ausgangskonzentration im Boden begründet liegt.

### 3.1.2.4 MKW-Screening

An einem Bohrpunkt im Testfeld (T-B7) und an einem Bohrpunkt im kontaminierten Vergleichsareal (Vk-B9) wurde zusätzlich zum MKW-Summenparameter in jedem Bohrmeter eine Identifizierung der einzelnen Kohlenwasserstoffverbindungen durchgeführt.

Zum Zeitpunkt der Startbeprobung 2001 lagen in der ungesättigten Bodenzone des Testfeldes n-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>10</sub> bis maximal C<sub>18</sub> (0-1 m), C<sub>26</sub> (1-3 m) und C<sub>19</sub> (3-4 m) sowie iso-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub> (Norpristan und Pristan) und C<sub>16</sub> (Phytan) vor. Die angegebene Zahl der C-Atome der iso-Alkane beschreibt die längste zusammenhängende Kohlenstoffkette im Molekül. Bei der Abschlussbeprobung 2004 konnten im gleichen Bohrereale in 0-1 m Tiefe keine signifikanten MKW-Gehalte, in 1-3 m Tiefe n-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>10</sub> bis C<sub>26</sub> sowie die genannten iso-Alkane (vgl. Abb. 3.19) und in 3-4 m Tiefe lediglich iso-Alkane detektiert werden.

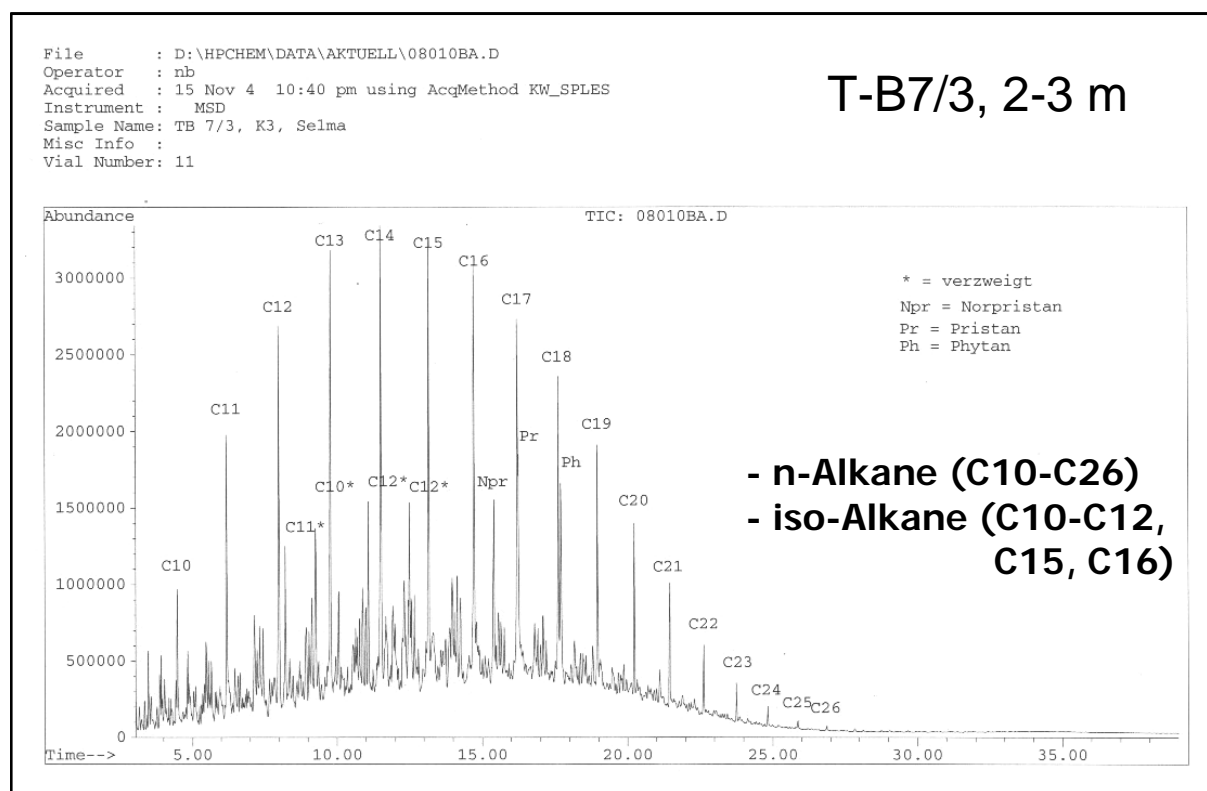


Abb. 3.19: GC/MS-Chromatogramm der Bodenprobe aus 2-3 m Tiefe (Testfeld, 2004).

In den Bodenproben des Kapillarsaums bzw. der gesättigten Bodenzone (4-6 m) wurden zu beiden Beprobungsterminen keine n-Alkane sondern lediglich iso-Alkane mit einer Kettenlänge von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub> (Norpristan und Pristan) und C<sub>16</sub> (Phytan) sowie Benzol- und Naphtalin-Derivate identifiziert (vgl. Abb. 3.20). Darüber hinaus konnten in den Proben aus 3-6 m u. GOK neben diversen mono-, di- und trimethylierten Naphtalinen auch Benzolderivate sowie bei der Startbeprobung vereinzelt Ölsäureamide nachgewiesen werden.

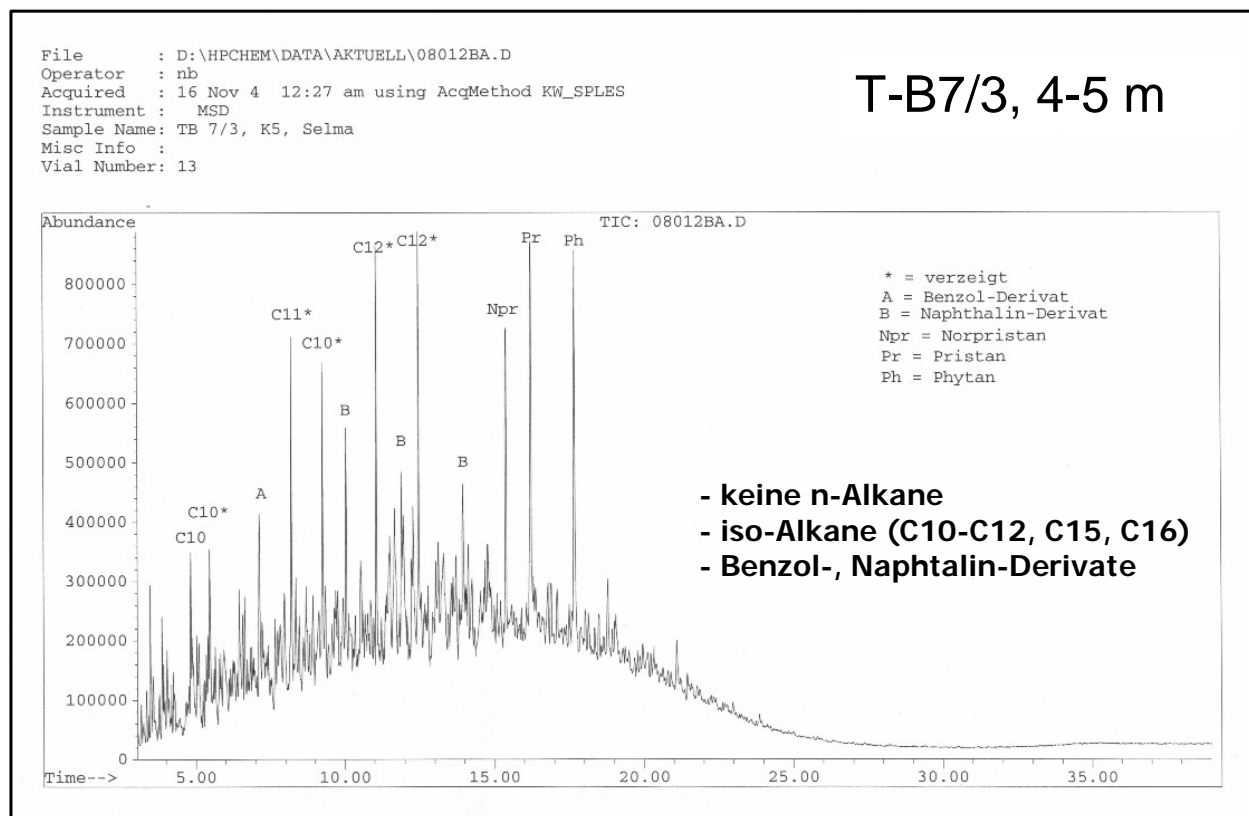


Abb. 3.20: GC/MS-Chromatogramm der Bodenprobe aus 4-6 m Tiefe (Testfeld, 2004).

Im kontaminierten Vergleichsareal konnte bei der Startbeprobung in 0-2 m, 3-4 m und 4-5 m u. GOK lediglich ein C<sub>12</sub>-Alkan identifiziert werden. In 2-3 m u. GOK waren n-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>12</sub> bis C<sub>13</sub> sowie iso-Alkane von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub> und C<sub>15</sub> (Pristan) vorhanden. In 5-6 m u. GOK lagen n-Alkane mit C<sub>10</sub> bis C<sub>25</sub> sowie iso-Alkane von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub> (Norpristan und Pristan) und C<sub>16</sub> (Phytan) vor. In allen Proben trat Ölsäureamid sowie in den Proben der gesättigten Bodenzone elementarer Schwefel (natürlicher Mineralölbestandteil) auf. Auf die Quelle des Ölsäureamids gibt es bislang keine Hinweise. Bei der Abschlussbeprobung fehlten bis in 4 m Bodentiefe jegliche Kohlenwasserstoffkontaminationen. Im Kapillarsaum hingegen wurden ebenfalls iso-Alkane von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub> und C<sub>16</sub> detektiert.

### 3.1.2.5 Physiko-chemische und biologische Parameter

An den Bohrpunkten T-B7 (Testfeld) und Vk-B 9 (kontaminiertes Vergleichsareal) wurden neben den Kontaminanten bodenkundliche, physiko-chemische und biologische Parameter bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Übersichtstabelle (Anhang 2.1) zusammengestellt.

## **Bodenfeuchte**

Generell begünstigen hohe Wassergehalte unterhalb der Sättigungsgrenze die mikrobielle Aktivität, das Optimum liegt zumeist bei 50-60 % der maximalen Wasserhaltekapazität ( $WHK_{max}$ ) (u.a. GELLER 2001, KONING et al. 2000, NEALE et al. 2000). In den Bodenproben der ungesättigten Bodenzone wurde im Allgemeinen eine Bodenfeuchte von 2 bis 8 % des Gesamtgewichtes (92-98 % Trockensubstanz) ermittelt. Nach projektbegleitenden Versuchen mit Proben vom Testfeldrand liegt die maximale Wasserhaltekapazität in 1-2 m Bodentiefe bei 15-16 % des Trockengewichtes ( $WHK_{50\%} = 7,5-8 \%$ ). Daraus kann geschlossen werden, dass der mikrobiologische Abbau am TL Schäferhof-Süd bei steigender Bodenfeuchte, zum Beispiel nach Niederschlagsereignissen, wahrscheinlich höher war als in klimatisch trockenen Zeiten.

## **Organischer Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC/DOC)**

Mit dem TOC- (total organic carbon) und DOC- (dissolved organic carbon) Gehalt wird der gesamte organische Kohlenstoffanteil im Boden, das heißt sowohl der natürlichen organischen Substanzen als auch der organischen Schadstoffe erfasst.

Die TOC-Gehalte im Testfeld und in den Vergleichsarealen lagen im obersten Bohrmeter bei 3.400-4.700 mg/kg. Im Testfeld nahmen die TOC-Gehalte (mit Ausnahme der Abschlussbeprobung in 2-3 m u. GOK) bis in 5 m Tiefe ab und stiegen dann in der Wasser gesättigten Bodenzone wieder deutlich an (4.600/ 6.700 mg/kg). Im kontaminierten Vergleichsareal gingen die Werte bis auf 100-200 mg/kg zurück, bevor in der Wasser gesättigten Bodenzone wieder knapp 2.000/ 3.000 mg/kg TOC erreicht wurden.

Oberflächennah resultieren die TOC-Konzentrationen vor allem aus den humosen Anteilen im Oberboden, was sich anhand der sprunghaften Abnahme der TOC-Gehalte in den Vergleichsarealen ab 1 m Bodentiefe deutlich zeigt. In größeren Tiefen dagegen korrelieren die Ergebnisse mit den unterschiedlichen Schadstoffgehalten im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal. Im unkontaminierten Vergleichsareal wirkten sich die höheren Humusanteile im Boden aus. Der TOC-Gehalt im Testfeld war sowohl in der ungesättigten Bodenzone als auch in der Kapillarzone bei der Abschlussbeprobung 2004 höher als bei der Startbeprobung 2001. Da hingegen die Schadstoffgehalte im Bohrpunkt T-B7/3 (2004) unter denen des Bohrpunktes T-B7/1 (2001) liegen, muss dieses Ergebnis auf Inhomogenitäten im Boden zurückgeführt werden.

Bei den DOC-Gehalten im Bodeneluat zeigt sich im Testfeld ein dem TOC-Gehalt ähnliches Verteilungsmuster. Im kontaminierten Vergleichsareal liegen in Relation zum Testfeld höhere Anteile leicht löslicher organischer Substanzen vor (DOC:TOC-Verhältnis). Insbesondere der oberste Bohrmeter sticht durch einen DOC-Gehalt von 17 mg/l im Eluat heraus. Im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal fallen die im Kapillarsaum etwa viermal höheren Gehalte bei der Beprobung im Jahr 2004 gegenüber der Bestimmung im Jahr 2001 auf. Die Ursache für diese hohen Werte ist ungeklärt.

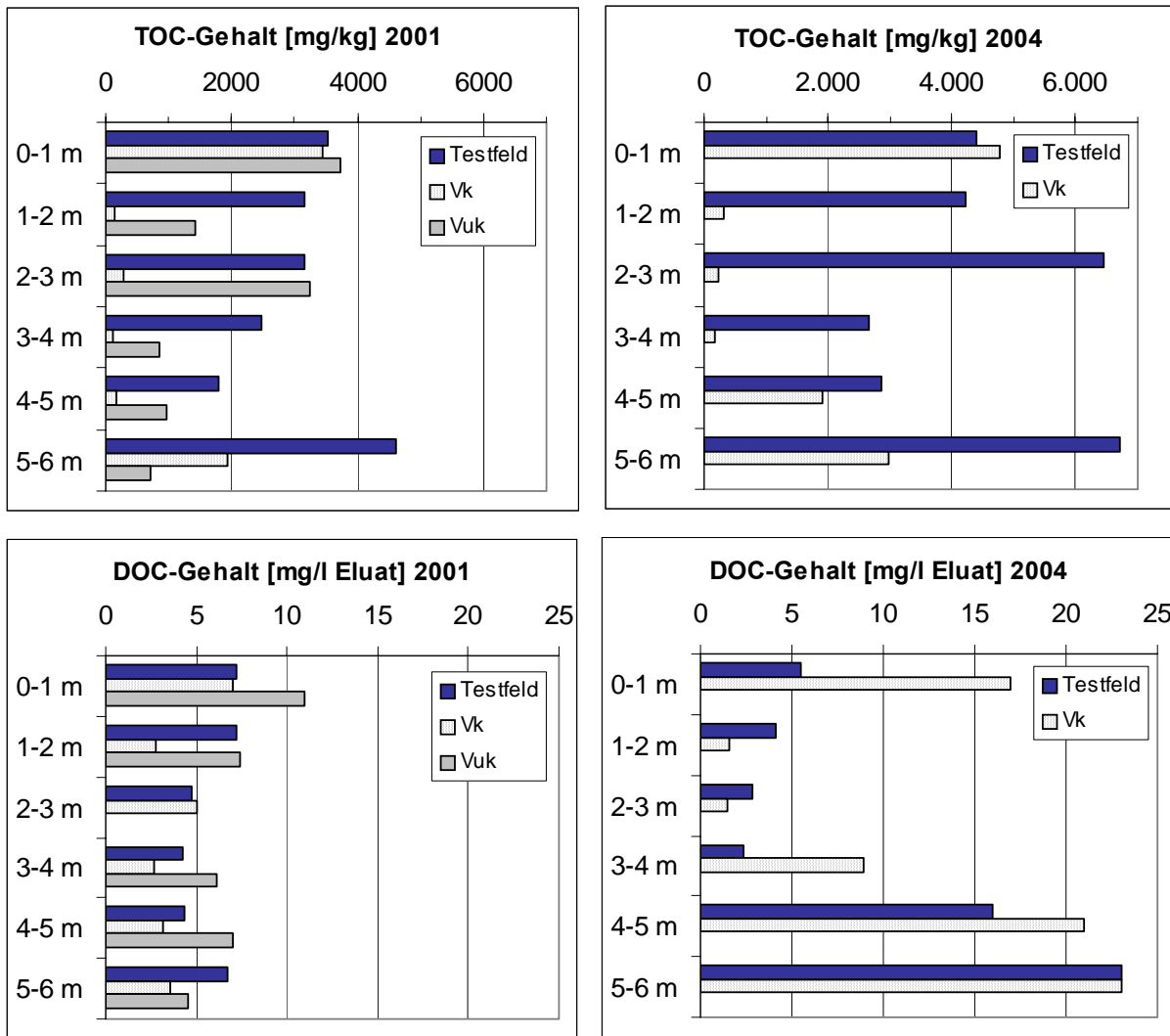
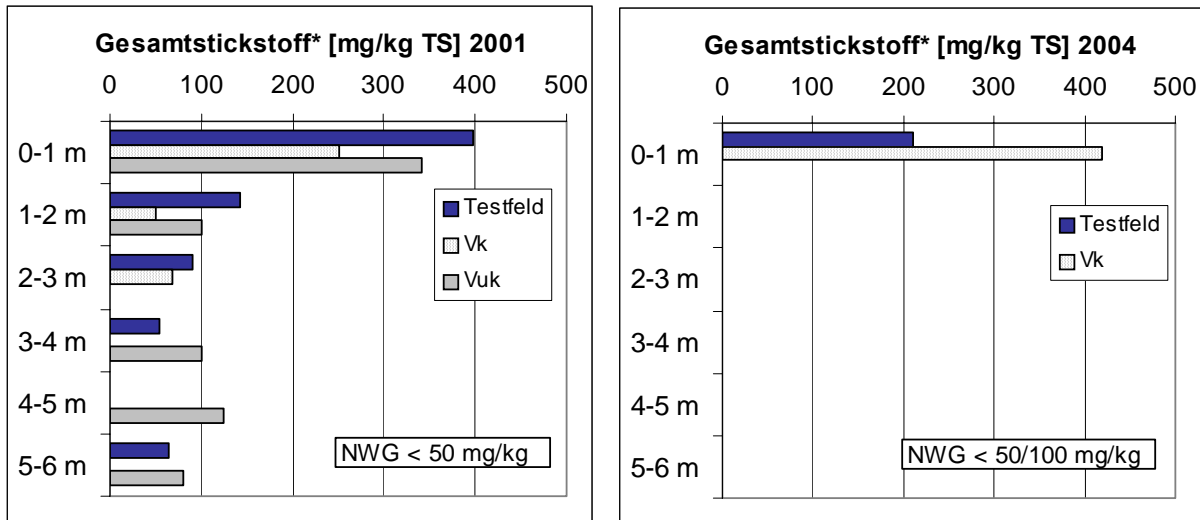


Abb. 3.21: TOC- und DOC-Gehalte (mg/kg) bei der Start- (2001) und Abschlussbeobachtung (2004).

### Nährstoffgehalte

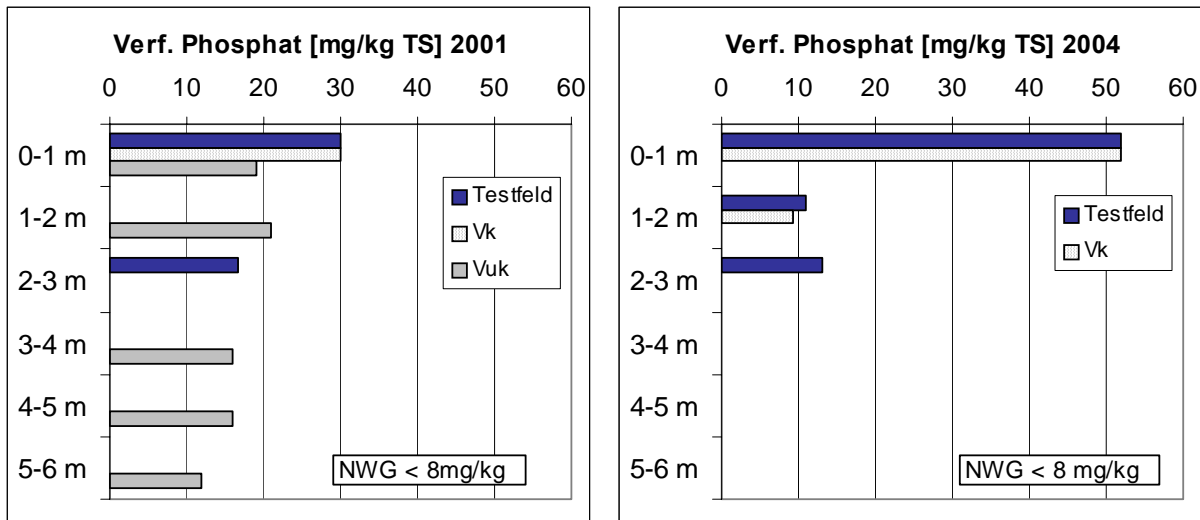
Um die Nährstoffsituation im Boden zu klären, wurden der Gesamtstickstoff, der verfügbare Nitrat- und Ammoniumstickstoff und das verfügbare Phosphat im Bodeneluat bestimmt. Des Weiteren kann die Zehrung von Nitrat durch den unter Sauerstoffmangel einsetzenden Verbrauch als alternativer Elektronenakzeptor ein wichtiges Anzeichen für biologische Abbauprozesse darstellen (GELLER 2001)

In den oberflächennahen Proben (0-1 m u. GOK) lag der Gesamtstickstoffgehalt zum Zeitpunkt der Startbeobachtung bei 400 mg/kg (Testfeld), 250 mg/kg (kontaminiertes Vergleichsareal) und 340 mg/kg (unkontaminiertes Vergleichsareal). In allen drei Bohrprofilen ist ab 1 m Tiefe eine deutliche Abnahme der Stickstoffgehalte unter 100 mg/kg zu verzeichnen (Abb. 3.22). Bei der Abschlussbeobachtung wurden im obersten Profilmeter Gesamtstickstoffgehalte in ähnlicher Größenordnung (210 und 420 mg/kg) bestimmt. In 1-2 m Bodentiefe lagen die Werte bereits unter 50 mg/kg. Für die Proben aus 2-6 m Tiefe betrug die Bestimmungsgrenze der Gesamtstickstoffgehalte 100 mg/kg TS (Bestimmungsgrenze 2001 < 50 mg/kg). Ammonium- und Nitrat-Stickstoff wurde generell nicht nachgewiesen werden.



**Abb. 3.22: Gesamtstickstoffgehalte (mg/kg) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).**

Für die Phosphat-Gehalte zeigt sich ein ähnliches Bild. Bis 1 m u. GOK wurden im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal bei der Startbeprobung jeweils 30 mg/kg und bei der Abschlussbeprobung 52 mg/kg gemessen. Unterhalb von 2 bzw. 3 m Bodentiefe konnten keine nennenswerten Phosphatgehalte bestimmt werden. Im unkontaminierten Vergleichsareal lagen bei der Startbeprobung durchgängig Phosphat-Gehalte zwischen 10 und 20 mg/kg vor.



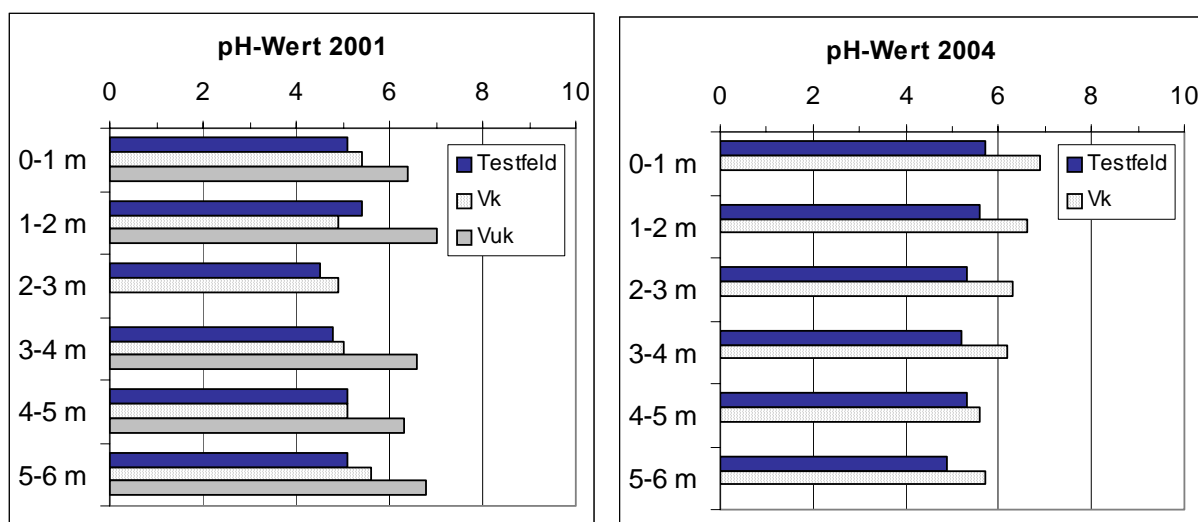
**Abb. 3.23: Phosphatgehalte (mg/kg) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).**

Die Ergebnisse zeigten sich die insgesamt schlechte Nährstoffversorgung der Böden im Bereich des Testfeldes und der Vergleichsareale. Zwischen den beiden Probenahmen hat sich diesbezüglich auch keine relevante Veränderung vollzogen. In der obersten Bodenschicht zeigt sich der Einfluss der Vegetation auf die Nährstoffgehalte. Ideale Nährstoffverhältnisse liegen bei C:N:P von mindestens 100:10:2 (ALEF 1994, GELLER 2001). Am TL Schäferhof-Süd wurde bei der Startbeprobung in 2-3 m Bodentiefe (Testfeld) lediglich ein C:N:P-Verhältnis von 100:3:0,5 erreicht.

## pH-Wert

Der pH-Wert stellt einen wichtigen Indikator für die Milieubedingungen im Boden und damit für die Stoffwechselgeschwindigkeit und den Abbau von Kohlenwasserstoffen dar. Neutrale bis schwach alkalische pH-Bedingungen und eine hohe Pufferkapazität wirken sich vorteilhaft auf den mikrobiellen Abbau von MKW aus. Saure pH-Werte führen dagegen zu eingeschränkter Aktivität der Mikroorganismen.

Im Testfeld lag der pH-Wert bei der Startbeprobung 2001 zwischen 4,5 und 5,4 und bei der Abschlussbeprobung 2004 zwischen 4,9 und 5,7. Im kontaminierten Vergleichsareal lag er 2001 zwischen 4,9 und 5,6 und 2004 zwischen 5,6 und 6,9 (Abb. 3.24). Im unkontaminierten Vergleichsareal wurde bei der Startbeprobung ein pH-Wert von 6,3-7,0 im Bodeneluat gemessen. Eine Korrelation der pH-Wert-Schwankungen mit der Bodentiefe konnte nicht festgestellt werden.

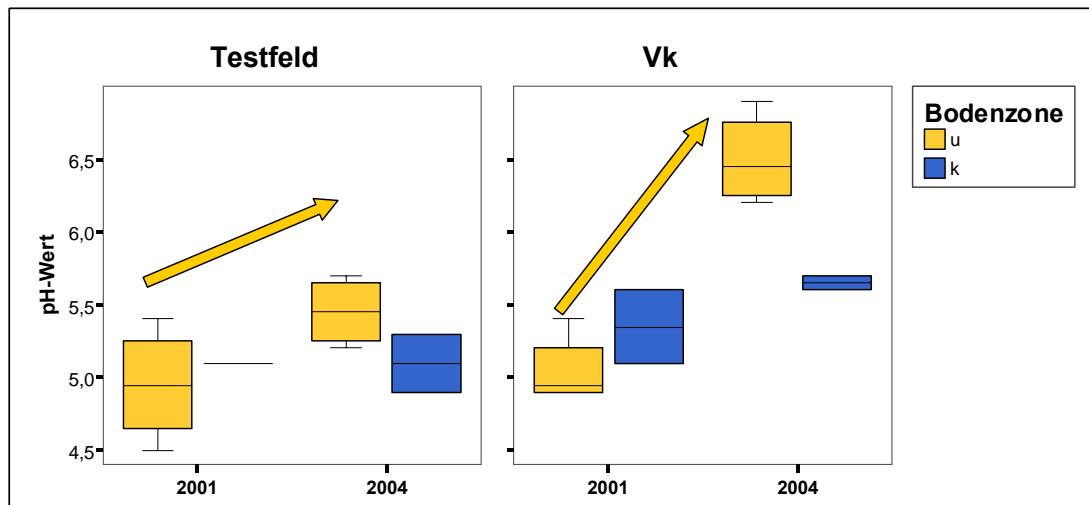


**Abb. 3.24: pH-Werte im Boden bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).**

Die pH-Werte in der ungesättigten Bodenzone sind damit während der dreijährigen Projektlaufzeit im Testfeld durchschnittlich um 0,5 und im kontaminierten Vergleichsareal um 1,5 pH-Einheiten angestiegen (Abb. 3.25). Unter Berücksichtigung der logarithmischen Funktion des pH-Wertes ( $\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$ ) können sich derartige Unterschiede erheblich auf das mikrobielle Milieu auswirken. Es ist anzunehmen, dass sich nach dem Entfernen der Folienabdeckung im Bereich der rückgebauten Dieselabfüllstation (Januar 2001) durch Eindringen von Niederschlagswasser nach und nach Veränderungen im Bodenmilieu eingestellt haben, die unter anderem zu einer pH-Erhöhung durch Aktivierung des Bodenpuffers führten. Zeitgleich ist im kontaminierten Vergleichsareal die Kohlendioxidproduktion aus biologischen Abbauprozessen, eine wichtige Quelle für die Bodenacidität, zurückgegangen (vgl. Kap. 3.2.2). Für den mikrobiellen Schadstoffabbau im Testfeld würde sich eine weitere Erhöhung des pH-Wertes im Boden positiv auswirken.

Um die potenzielle Pufferung des Bodens durch die Karbonatanteile der Boden-Matrix abzuschätzen, wurden an ausgewählten Proben Karbonatbestimmungen durchgeführt. Die bei der Abschlussbeprobung in 1-2 m, 3-4 m und 5-6 m u. GOK bestimmten Karbonatgehalte liegen im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal unter der Bestimmungsgrenze von

10 mg/kg (nach DIN ISO 10694). Im Auffüllungskörper des unkontaminierten Vergleichsareals wurden bei der Startbeprobung geringe Karbonatkonzentrationen (0,1 %  $\text{CaCO}_3$  nach DIN 10693) gemessen.



**Abb. 3.25: Boxplot-Diagramm der pH-Werte im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal bei der Start- und Abschlussbeprobung.** Die ungesättigte Bodenzone (u) und der Kapillarsaum (K) sind getrennt dargestellt.

## Eisengehalt

Eisen- und Aluminiumhydrate können die Sorptionseigenschaften eines Bodens wesentlich verändern. Unter anaeroben Bedingungen können Eisenoxide als Elektronenakzeptor beim mikrobiellen Schadstoffabbau fungieren. Zur Abschätzung des Eisengehaltes im Boden wurde dieser Parameter im Testfeld und aufgrund der im Projektverlauf aufgetretenen Probleme mit der starken Verockerung der Sickerwassermessstellen bei der Abschlussbeprobung im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal bestimmt.

Die Eisengehalte im Testfeld lagen über das gesamte Bodenprofil bei 1.500 bis 3.500 mg/kg, im kontaminierten Vergleichsareal bei 1.300 bis 3.300 mg/kg. Die höchsten Konzentrationen wurden oberflächennah und in 2-3 m Tiefe beobachtet. Die Ergebnisse stützen die Beobachtungen aus der Bodenansprache: insgesamt leicht rostrot gefärbte Böden mit Einschaltungen von eisenreicheren, stärker gefärbten Lagen oder Linsen (ungesättigte Bodenzone).

Läge das gesamte Eisen als Eisen(III)-Oxid vor, ergäben sich im Testfeld (Bohrareal B7)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalte von 0,2-0,5 %. Zum Vergleich gibt SCHEFFER (2002) den durchschnittlichen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalt eines Flugsandes mit 0,2 % an. Insgesamt beträgt der Eisenoxidgehalt von Böden häufig zwischen 0,2 und 5 %. Damit liegt am TL Schäferhof-Süd ein schwach eisenhaltiger Boden vor.

## Bodenatmung

Die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse mittels der Bodenatmung stellt aufgrund des direkten Zusammenhangs mit biologischen Abbauprozessen einen wichtigen Parameter dar.

Insgesamt wurden im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal für Sandböden nicht ungewöhnlich geringe basale Bodenatmungsraten gemessen (Abb. 3.26). Die Bodenatmung im Testfeld war zum Zeitpunkt der Abschlussbeprobung gegenüber der Startbeprobung unverändert niedrig (2001: 13-62 mg CO<sub>2</sub>/ 24h kg TS, 2004: 12-54 mg CO<sub>2</sub>/24h kg TS), obwohl aufgrund der zu erwartenden mikrobiellen Abbauprozesse von einer Zunahme der Bodenatmungsraten auszugehen war. Im kontaminierten Vergleichsareal dagegen stiegen die Bodenatmungsraten innerhalb von drei Jahren um das zwei- bis dreifache (2001: <10-22 mg CO<sub>2</sub>/24h kg TS, 2004: 19-77 mg CO<sub>2</sub>/ 24h kg TS). Im Profil nehmen die Werte unterhalb von 1 m Bodentiefe stark ab.

Im unkontaminierten Vergleichsareal lagen bei der Startbeprobung die Bodenatmungsraten gegenüber dem Testfeld um ein mehrfaches höher (40-900 mg CO<sub>2</sub>/24h kg TS). Aufgrund abiotischer Kohlendioxidbildung können hohe Karbonatanteile in Bodenproben zu einer "Verfälschung" der Messergebnisse führen. Bei Karbonatgehalten im unkontaminierten Vergleichsareal von lediglich ca. 0,1 % CaCO<sub>3</sub> lassen sich die auffälligen Unterschiede in der Bodenatmung jedoch nicht ausschließlich über die abiotische Kohlendioxidbildung erklären.

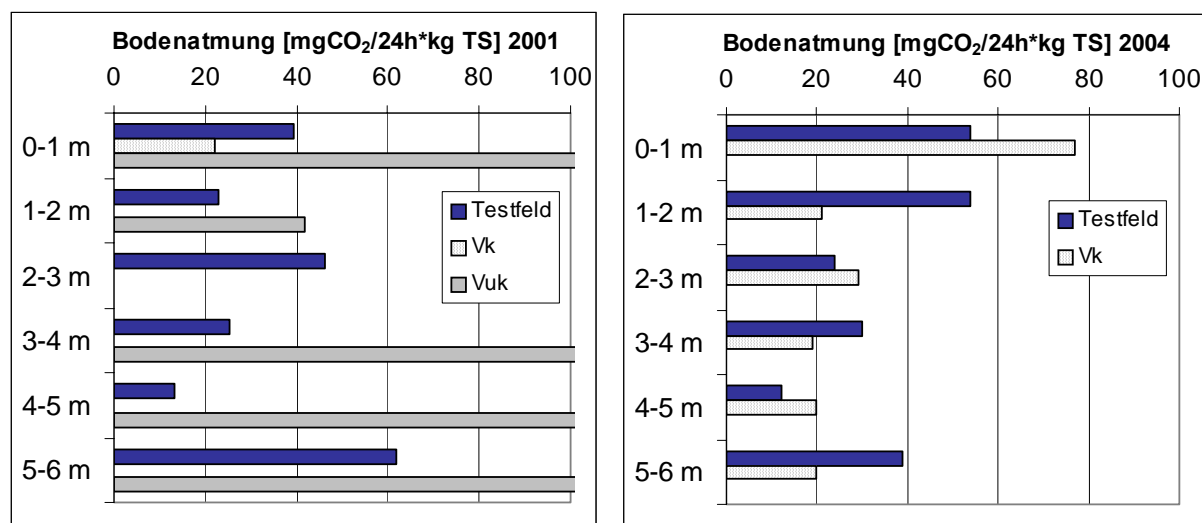


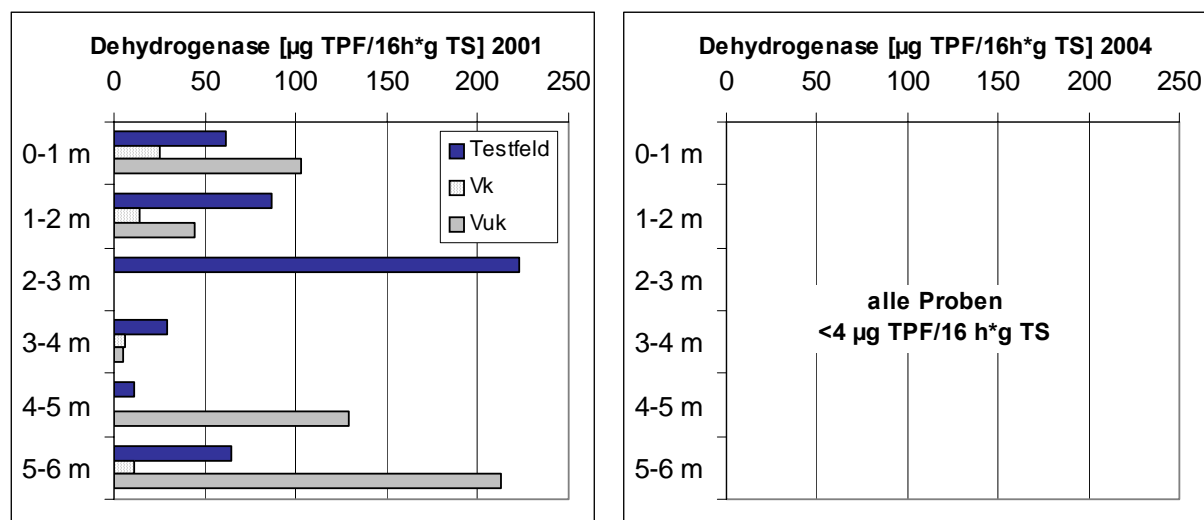
Abb. 3.26: Bodenatmung (mg CO<sub>2</sub>/24h\*kg\*TS) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).

## Dehydrogenase-Aktivität

Die Dehydrogenase-Aktivität gilt ebenfalls als Maß für die mikrobielle Aktivität eines Bodens. Die im Forschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse lassen jedoch diesbezüglich keine Schlussfolgerungen zu. Es ist zu berücksichtigen, dass Dehydrogenase-Aktivitätstests häufig nicht oder schlecht reproduzierbare Ergebnisse liefern (J. WARRELMANN, pers. Mitteilung 2004).



Bei der Startbeprobung wurde im Testfeld eine Dehydrogenase-Aktivität von 10 bis 223  $\mu\text{g TPF}/16\text{h}^*\text{g TS}$  gemessen. In der ungesättigten Bodenzone tritt die höchste Dehydrogenase-Aktivität in den Bereichen der höchsten Schadstoffkonzentrationen (2-3 m: 8.800 mg/kg) auf. Es zeigt sich keine Korrelation mit der Bodenatmung. Im kontaminierten Vergleichsareal wurden bei der Startbeprobung < 4 bis 26  $\mu\text{g TPF}/16\text{h}^*\text{g TS}$  und im unkontaminierten Vergleichsareal 5 bis 213  $\mu\text{g TPF}/16\text{h}^*\text{g TS}$  (besonders hohe Werte im Kapillarsaum) gemessen. Bei der Abschlussbeprobung hingegen lag die Dehydrogenase-Aktivität in allen Proben unter der Bestimmungsgrenze.



**Abb. 3.27: Dehydrogenase-Aktivität ( $\mu\text{g TPF}/16\text{h g TS}$ ) bei der Start- (2001) und Abschlussbeprobung (2004).**

### Potenzielle Nitrifikation

Um Hinweise über die Anteile nitrifizierender und denitrifizierender Prozesse im Boden zu erhalten, wurde zusätzlich zu den Nitratgehalten die potenzielle Nitrifikation unter Zugabe von Ammonium-Stickstoff innerhalb von vier Wochen beobachtet. Weiterhin stellt die Nitrifikation einen schadstoffsensitiven Indikator dar.

In Abb. 3.28 wurden für die Böden der Startbeprobung die Nitrat-/Nitrit-Bildung und der gleichzeitige Ammonium-Verbrauch am Ende der vierwöchigen Testdauer gegenübergestellt. Ein zur Kontrolle getesteter unkontaminierter Boden zeigte die fast vollständige Umsetzung von Ammonium (52 mg N/ kg TS) zu Nitrat- bzw. Nitritstickstoff (46 mg N/kg TS).

Im Testfeld lag bei der Startbeprobung keine messbare Nitrifizierung vor, im kontaminierten Vergleichsareal nur bis in 1 m Tiefe (29 mg N/kg TS). Im unkontaminierten Vergleichsareal nahm die Nitrat-/Nitrit-Bildung von oberflächennah 84 mg N/ kg TS auf Gehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze in 5-6 m Tiefe ab. Nitrat-/Nitrit-Bildung und Ammonium-Verbrauch waren miteinander korreliert. Die gegenüber dem unkontaminierten Vergleichsareal und dem Vergleichsboden niedrigen Nitrifikationsraten im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal sind mit der Anwesenheit der Schadstoffe zu erklären.

Bei der Abschlussbeprobung konnte im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal bis in 4 m Tiefe zwar ein Ammoniumverbrauch von bis zu 32 mg N/kg TS festgestellt werden, die zu erwartende gleichzeitige Nitrifikation blieb jedoch aus. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass beim Aufbau von Biomasse (z.B. durch Schadstoffabbau) nicht zwangsläufig eine Nitratbildung erfolgt, sondern Ammonium auch in Form von Aminosäuren direkt in die Zellsubstanz eingebaut werden kann (SITTE et al. 1998).

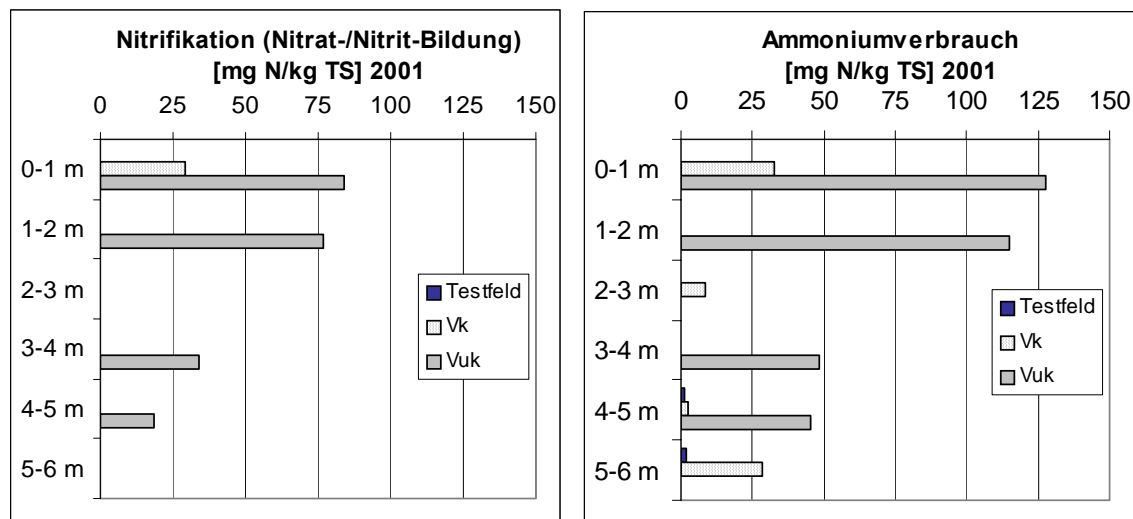


Abb. 3.28: Nitrifikation und Ammoniumverbrauch (mg N/kg TS) bei der Startbeprobung (2001).

### 3.1.3 Interpretation der Ergebnisse

#### Testfeld und Vergleichsareale

Im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal liegt bis in die gesättigte Bodenzone ein Sandboden mit leicht feinkiesigen Anteilen und gelegentlichen Einschaltungen von Schlufflagen und Tonlinsen vor. Der beim Gebäuderückbau ausgehobene Bodenbereich war bis in maximal 1,20 m Tiefe durch Bodenmaterial aufgefüllt worden. Im unkontaminierten Vergleichsareal wurde ein Auffüllungskörper bis in 4 m u. GOK angetroffen.

Nach dem Untersuchungskonzept war vorgesehen, die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen in dem hoch kontaminierten Testfeld mit einem leicht kontaminierten Vergleichsareal und einem unkontaminierten Vergleichsareal in Bezug zu setzen. Bei der Betrachtung der physiko-chemischen und biologischen Parameter im unkontaminierten Vergleichsareal fallen unabhängig von den Schadstoffkonzentrationen die starken Unterschiede gegenüber dem Testfeld und dem kontaminierten Vergleichsareal auf. Dafür verantwortlich ist wahrscheinlich der bis in ca. 4 m Tiefe reichende Auffüllungskörper in diesem Bereich. Aufgrund der Voruntersuchungen am TL Schäferhof-Süd im Februar und März 2001 wurde als unkontaminiertes Vergleichsareal ein Bereich 60 m westlich des Testfeldes ausgewählt, der aufgrund des Bodenprofils und der Abwesenheit von Schadstoffen bis in 5 m u. GOK für die weiteren Untersuchungen geeignet schien. Bei der Startbeprobung Ende 2001 musste das Bohrareal für das unkontaminierte Vergleichsareal um einige Meter weiter nach Westen verlegt werden, da der Bohrpunkt der Voruntersuchungen durch die damaligen Bauarbeiten am

Standort (Verfüllung von Baugruben rückgebauter Tankanlagen) beeinträchtigt worden war. Das aufgenommene Bodenprofil und die analytischen Untersuchungen des versetzten Bohrareals Vk-B10 haben gezeigt, dass das unkontaminierte Vergleichsareal zwar weiterhin den gesetzten Anforderungen bezüglich der Schadstoffkonzentrationen genügte, eine Vergleichbarkeit insbesondere der Bodenparameter und physiko-chemischen Parameter mit dem Testfeld und dem kontaminierten Vergleichsareal aufgrund des Auffüllungskörpers im Bereich des Bohrareals (bis in 4 m u. GOK) aber kaum gegeben ist. Aus diesem Grund wurde bei der Abschlussuntersuchung auf weitere Bohrungen im unkontaminierten Vergleichsareal verzichtet. Die Interpretation der Daten aus den Bodenuntersuchungen stützt sich deshalb überwiegend auf die Ergebnisse aus den Proben des Testfeldes und des kontaminierten Vergleichsareals.

### **Schadstoffverteilung und Schadstoffabbau**

Im Testfeld liegen über das gesamte Bodenprofil hohe Schadstoffkonzentrationen (MKW, BTEX, Alkylbenzole) mit einem Maximum im Kapillarsaum und in der gesättigten Bodenzone (4-6 m Tiefe) vor. Lateral ist der südliche Bereich der ehemaligen Dieselabfüllstation am stärksten kontaminiert. Wie sich aus den Bodenuntersuchungen innerhalb anderer Forschungsprojekte ergeben hat, setzt sich der Kontaminationsschwerpunkt auch außerhalb des Testfeldes in Richtung Süden und Westen fort.

Das Spektrum der im Testfeld nachgewiesenen MKW-Verbindungen entspricht mit Kettenlängen der n-Alkane von C<sub>9</sub> bis maximal C<sub>26</sub> einer Verteilung, die beispielsweise auch ASHLEY et al. (1994) in einem verwitterten Diesel-Schaden nachgewiesen haben. Zwischen den Probennahmeterminen hat sich im Chromatogramm keine Verschiebung des MKW-Spektrums gezeigt, wie sie durch den verstärkten Abbau bestimmter kurz- oder langkettiger Aliphate erfolgen kann. Im Kapillarsaum fällt im Spektrum die Abwesenheit von n-Alkanen auf, wohingegen iso-Alkane in gleicher Verteilung wie in der ungesättigten Bodenzone auftreten. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass im Wasser gesättigten Bodenbereich eine mikrobielle Schadstoffminderung stattfindet bzw. stattgefunden hat, die zum Abbau von n-Alkanen unabhängig von deren Kettenlänge geführt hat. Dass zeitgleich keine verzweigten Verbindungen abgebaut wurden, spricht dafür, dass in der gesättigten Bodenzone zumindest zeitweise anaerobe Milieubedingungen vorlagen. Unter anaeroben Bedingungen beobachteten auch TOWNSEND et al. (2003) den selektiven Abbau von n-Alkanen in einem Rohöl. Während ein breites Spektrum von mittel bis langkettigen n-Alkanen innerhalb von 14 Monaten stark abgebaut wurde, konnte für die verzweigten Isoprenoide Pristan und Phytan, die unter aeroben Bedingungen als abbaubar gelten (FRITSCHKE et al. 1998), keine Biodegradation nachgewiesen werden.

In der dreijährigen Projektlaufzeit ist es partiell zu einer Schadstoffabnahme insbesondere der leicht flüchtigen Verbindungen gekommen. Im gesamten Testfeld haben die BTEX- und Alkylbenzolgehalte in den oberen zwei bis drei Metern deutlich abgenommen. Im Kapillarsaum hingegen sind Schadstoffkonzentrationen unverändert hoch. Der mikrobielle Abbau von BTEX, Alkylbenzolen und kurzkettigen n-Alkanen (bis C<sub>10</sub>) im Boden wird durch die Bodenluftdaten belegt (s. Kap. 3.2.2). Aufgrund der inhomogenen Verteilung der Kontaminanten im Boden kann die Schadstoffminderung aber nicht über die gesamte Fläche des Testfeldes nachgewiesen werden. Zu welchen Anteilen die Schadstoffminderung durch

mikrobiellen Abbau oder auch durch Verflüchtigung und Auswaschung erfolgte, ist mit den vorliegenden Felddaten nicht zu bilanzieren.

Für die MKW-Gehalte im Boden konnte keine statistisch gesicherte Schadstoffminderung belegt werden. Aufgrund der Abnahme der n-Alkane in der Bodenluft zwischen 2002 und 2004 (vgl. Kap. 3.1.3) kann aber auf einen mikrobiellen Abbau von MKW-Verbindungen und eine Verflüchtigung kurzkettiger Alkane geschlossen werden. Die Abbauraten reichten aufgrund der inhomogenen Schadstoffverteilung jedoch nicht aus, um die Schadstoffminderung anhand der Bodendaten zu belegen.

Im kontaminierten Vergleichsareal wurden zu Projektende in der ungesättigten Bodenzone keine MKW-Kontaminanten mehr nachgewiesen, im Kapillarsaum hingegen war eine Anreicherung zu verzeichnen. Im kontaminierten Vergleichsareal und insbesondere in den Bohrarealen B1 und B2 des Testfeldes fällt die Diskrepanz zwischen den geringen MKW-Gehalten in der ungesättigten Bodenzone und den sehr hohen Gehalten in der gesättigten Bodenzone auf. Als Eintragsquelle kommen daher nicht nur Kontaminationsherde in der ungesättigten Bodenzone in Frage, sondern auch der Grundwasserpfad. Die genannten Bohrareale liegen in der Schadstofffahne, die sich vom Testfeld in Grundwasserabstromrichtung ausbreitet.

Das Beispiel des kontaminierten Vergleichsareals hat gezeigt, dass bei geringen Schadstoffkonzentrationen in der ungesättigten Bodenzone (< 100 bis 400 mg/kg) in drei Jahren eine vollständige Abnahme der Schadstoffkonzentrationen stattfindet. Dieser Befund wird auch durch die Bodenluftdaten belegt, so dass nicht davon auszugehen ist, dass das Ergebnis lediglich auf Inhomogenitäten im Boden und zufällige schadstofffreie Bohrpunkte zurückzuführen ist.

### **Schlüsselparameter**

Im Hinblick auf die Beurteilung des natürlichen Abbau- und Rückhaltepotenzials bestätigte sich die Eignung der physiko-chemischen Schlüsselparameter, die im Untersuchungskonzept für den Standort TL Schäferhof-Süd festgelegt worden waren. Für die Einschätzung der Milieubedingungen waren vor allem der pH-Wert, der Karbonatgehalt (Pufferkapazität) und die Nährstoffverteilung im Boden von großer Bedeutung. Aufgrund des geringen Humusanteiles in den Böden des Testfeldes und des kontaminierten Vergleichsareals erwies sich der TOC-Gehalt und damit die potenzielle Schadstoffsorption an organischen Bodenpartikeln am Modellstandort als weniger relevant.

Unter den biologischen Parametern erwies sich für den Standort lediglich die Bodenatmung als geeigneter Anzeiger der mikrobiellen Aktivität. Die Ergebnisse der Dehydrogenase-Aktivität ließen hingegen keine Schlussfolgerungen zu. Die kostenintensive Bestimmung der potenziellen Nitrifikation stand nicht im Verhältnis zu den erlangten Ergebnissen.

Das Porenvolumen im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal beträgt 27-33 Vol.% des Gesamtbodenvolumens und liegt damit unter den für Sandböden angenommenen Porositäten (vgl. SCHEFFER 2002). Durch Stauchungseffekte bei der Probennahme ist nicht auszuschließen, dass das Porenvolumen gegenüber dem ursprünglichen Bodenkörper geringfügig reduziert ist. Da in den Poren sowohl Lösungsvorgänge als auch der biologische Abbau an der Grenzfläche von Wasser- und Ölphase stattfinden, können die natürlichen

Abbauprozesse bei einem geringen Porenvolumen eingeschränkt sein. In Böden mit geringen Porendurchmessern kann auch durch Einschluss der Kohlenwasserstoffe in den Poren deren Bioverfügbarkeit stark herabgesetzt werden (HUESEMANN 1997). Sie werden dann als Restkontaminationen im Boden festgelegt. Für die Böden am TL Schäferhof-Süd ist damit auf der einen Seite eine verringerte Mobilität der Schadstoffe anzunehmen, auf der anderen Seite aber auch eine eingeschränkte Verteilung und Verfügbarkeit abbaustimulierender Stoffe wie z.B. von Sauerstoff oder Nährstoffen.

Im Ergebnis der umfangreichen Untersuchungen der verschiedenen bodenphysikalischen, physiko-chemischen und biologischen Parameter scheint der am Modellstandort vorliegende Sandboden aufgrund seiner Nährstoffarmut, des niedrigen pH-Wertes im Boden und seiner insgesamt geringen mikrobiellen Aktivität (Bodenatmung) nur bedingt für eine gezielte Nutzung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse geeignet zu sein. Eine weitere Verschiebung des pH-Wertes ins neutrale Milieu, wie sie während der Projektlaufzeit beobachtet wurde (im Testfeld von pH 4,5-5,4 auf pH 4,9-5,7, im kontaminierten Vergleichsareal von pH 4,9-5,6 auf pH 5,6-6,9), könnte sich aber positiv auf den mikrobiellen Schadstoffabbau im Testfeld auswirken. Optimale pH-Werte liegen für die meisten schadstoffabbauenden Bakterien zwischen pH 6,5 und 7,5 (GELLER 2001).

## **3.2 Bodenluft**

### **3.2.1 Untersuchungsmethoden**

#### **3.2.1.1 Einrichtung der Messstellen**

Für die Entnahme der Bodenluftproben wurden im Oktober und Dezember 2001 drei stationäre Entnahmestellen mit ausgebautem Pegel in 4 m u. GOK (Testfeld, kontaminiertes Vergleichsareal) bzw. 3,5 m u. GOK (unkontaminiertes Vergleichsareal) errichtet (s. Lageskizze, Anhang 1.2). Der Ausbau der Messstellen erfolgte gemäß VDI-Richtlinie 3865.

Um die Schadstoffsituation am Punkt des Messstellenausbaus abzuschätzen, wurden im Testfeld eine zuvor an gleicher Stelle abgeteufte Rammkernsondierung und im kontaminierten Vergleichsareal der Bodenaushub (Schneckenbohrung) in 3-4 m Tiefe analysiert. Die MKW-Konzentrationen an der Bodenluftmessstelle im Testfeld lagen abgesehen von geringeren Kontaminationen bis in 0,8 m Tiefe (750 mg/kg TS) bei 2.800- 5.500 mg/kg TS. BTEX (1.000-2.300 µg/kg OS) und Alkylbenzole (1.600-3.900 µg/kg OS) wurden erst ab 1,6 m u. GOK detektiert. Im kontaminierten Vergleichsareal wurden MKW-Konzentrationen von 300 mg/kg TS bestimmt.

#### **3.2.1.2 Probennahme und Analytik**

An den Bodenluftpegeln wurde zwischen Januar 2002 und September 2004 ein vierteljährliches Monitoring durchgeführt. Die Probennahme erfolgte gemäß LABO (2002) und wurde anhand von Probennahmeprotokollen dokumentiert. Mit Ausnahme des für März 2003 vorgesehenen Probennahmetermins, der wegen des hohen Grundwasserstandes und

des damit verbundenen Wassereintritts in den verfilterten Bereich des Bodenluftpegels bis Ende Mai 2003 verschoben werden musste, lagen die Abstände zwischen den Messungen nicht mehr als 3 Monate  $\pm$  2 Wochen auseinander. Für den 22. Mai 2003 liegen aufgrund technischer Probleme keine Werte für den Gesamtkohlenstoffgehalt vor. Im Sommer 2003 wurde zur Qualitätssicherung der Daten eine zusätzliche Beprobungskampagne mit Messterminen im Abstand von zwei Wochen durchgeführt (Kap. 3.2.2.2).

Für die Analytik wurden anhand der VDI-Richtlinie 'VDI 3865 Blatt 2 und 3' Vor-Ort-Messungen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Methan in der Bodenluft mittels tragbarem GC-PID durchgeführt (s. Tab. 3.5). Die Messung von BTEX, Alkylbenzolen und n-Alkanen erfolgte im Labor mittels GC/MSD. Diese Messmethode bietet durch die Selektivität des MSD (Massenselektiver Detektor) den Vorteil der sicheren Identifikation der einzelnen Parameter, die bei der Vor-Ort-Messung mittels tragbarem GC mit PID-Detektor so nicht gewährleistet wäre. Wie sich aus Voruntersuchungen im Testfeld ergeben hatte, zeigen die Bodenluftproben komplexe Chromatogramme auf Grund der zahlreichen verzweigten i-Alkane in der Bodenluft. Für die Messung werden Originalluftproben verwendet, da eine Anreicherung der Bodenluft an Aktivkohle aufgrund der höheren Zahl an Bearbeitungsschritten fehlerträchtiger als eine Beprobung über Gassammler (Headspaceflaschen 10 ml Volumen) ist (vgl. BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG 2001 a). In diesem Zusammenhang sollte auch auf eine Beprobung der Bodenluftpegel bei Außentemperaturen unter 5°C verzichtet werden, da bei niedrigen Temperaturen mit einer Kondensation der Substanzen an den Probennahmegeräten gerechnet werden muss (LFU BADEN WÜRTEMBERG 2001). Um aussagekräftige Daten zur Schadstoffsituation auch in den geringer kontaminierten Arealen zu erhalten, wurde neben der Bestimmung von MKW, BTEX und Alkylbenzolen der Parameter 'Gesamtkohlenstoff' in der Bodenluft ermittelt. Die Messung erfolgte vor Ort über GC-FID. Ein genormtes Verfahren liegt nicht vor.

**Tab. 3.5 Verwendete Normen und Methoden für die Untersuchung von Bodenluftproben.**

<b>Parameter</b>	<b>Methode</b>	<b>Bestimmungsgrenze</b>
n-Alkane	VDI 3865 Blatt 2 und 3	1 mg/m <sup>3</sup>
BTEX	VDI 3865 Blatt 2/3	0,1 mg/m <sup>3</sup>
Gesamtkohlenstoff	VDI 3481 Blatt 1	1 mg/m <sup>3</sup>
Sauerstoff	VDI 3865 Blatt 2	0,1 Vol.%
Kohlendioxid	VDI 3865 Blatt 2	0,1 Vol.%
Methan	VDI 3865 Blatt 2	0,1 Vol.%

## **3.2.2 Ergebnisse**

### **3.2.2.1 Reguläres Monitoring**

Am Standort TL Schäferhof-Süd konnten durch das Monitoring deutliche Unterschiede zwischen den Bodenluftdaten im Testfeld und in den Vergleichsarealen festgestellt werden. Des Weiteren konnte eine Abhängigkeit der mikrobiellen Aktivität von der Bodentemperatur

und den Schadstoffkonzentrationen im Boden nachgewiesen werden. Anhand dieser Aspekte werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Eine vollständige Zusammenstellung der Bodenluftdaten ist der Tabelle in Anhang 3.1 zu entnehmen.

Die Bodenatmung am Standort kann über die **Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte** in der Bodenluft verfolgt werden. Da im Bereich des Testfeldes und des kontaminierten Vergleichsareals überwiegend humusarme und karbonatfreie Böden vorliegen, ist die Bodenatmung vor allem durch den Anteil an mikrobiell abbaubaren Schadstoffen geprägt. Im Testfeld wurde zwischen März 2002 und September 2004 eine Bodenluftzusammensetzung von < 0,1 bis 3,9 Vol.% Sauerstoff (an den meisten Messterminen jedoch < 0,5 Vol.%), 7,8 bis 18,8 Vol.% Kohlendioxid und < 0,1 bis 0,3 Vol.% Methan gemessen (vgl. Abb. 3.29 und Abb. 3.30).

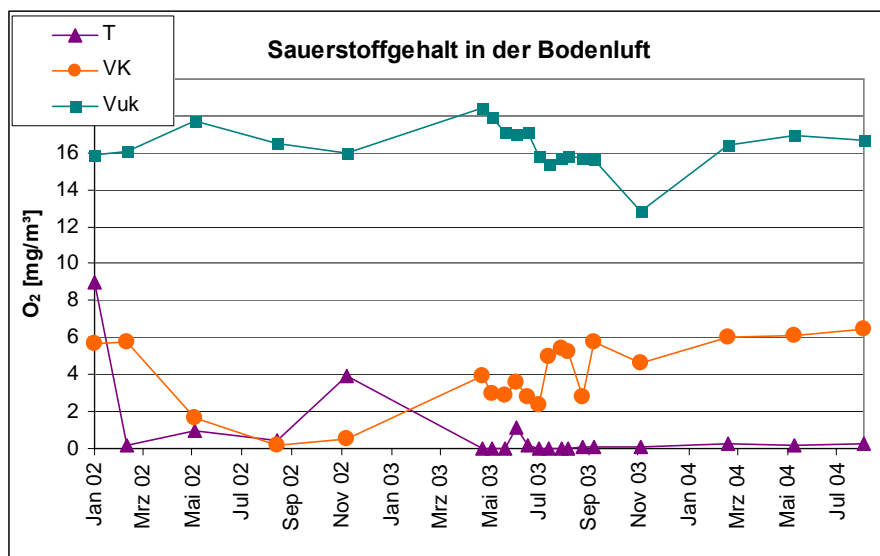


Abb. 3.29: Sauerstoffgehalt (Vol.%) im Testfeld, kontaminierten Vergleichsareal und unkontaminierten Vergleichsareal.

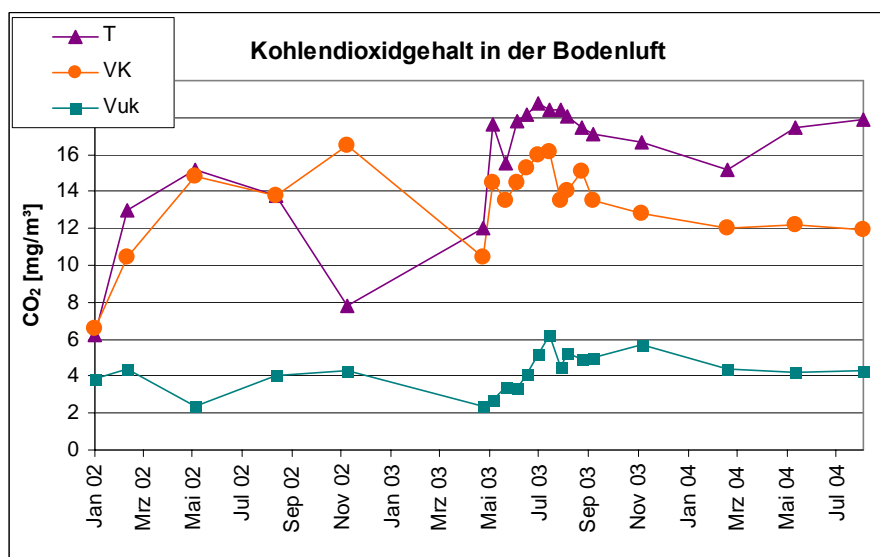


Abb. 3.30: Kohlendioxidgehalt (Vol.%) im Testfeld, kontaminierten Vergleichsareal und unkontaminierten Vergleichsareal.

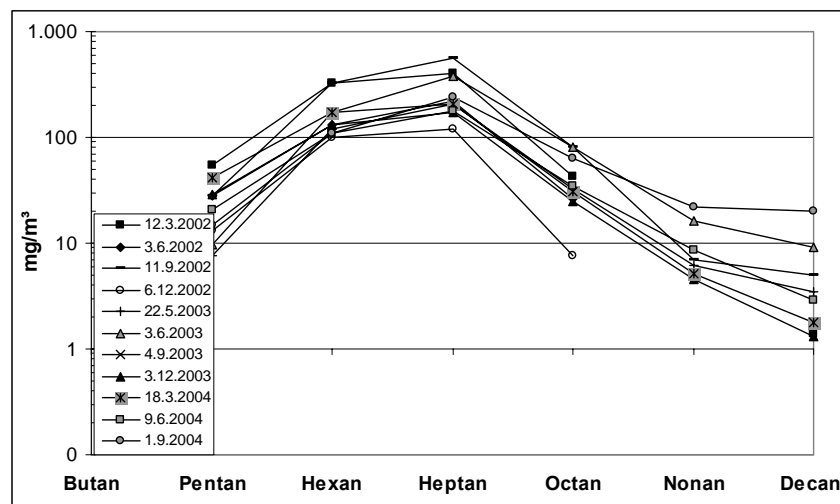
Im kontaminierten Vergleichsareal lagen die Sauerstoffgehalte im Allgemeinen deutlich über (0,2 bis 6,5 Vol.%) und die Kohlendioxidgehalte etwas unter den Werten des Testfeldes (6,6 bis 16,5 Vol.%). Methan konnte nicht nachgewiesen werden. Für das unkontaminierte Vergleichsareal ergibt sich nahezu ein spiegelbildlicher Verlauf der Kurven für den Sauerstoffgehalt (12,8-18,4 Vol.%) und den Kohlendioxidgehalt (2,3-6,2 Vol.%) in der Bodenluft.

Die Messung des Gesamtkohlenstoffes in der Bodenluft sowie von n-Alkanen, BTEX und Alkylbenzolen zeigte ebenfalls deutliche **Konzentrationsunterschiede**: Testfeld > leicht kontaminiertes Vergleichsareal > unkontaminiertes Vergleichsareal. Dieses Ergebnis korreliert mit den unterschiedlichen Schadstoff-Konzentrationen an den Pegelausbaupunkten bzw. nahe gelegenen Bohrarealen. In Tab. 3.6 wurden für die drei Bodenluftpegel die Gesamtkohlenstoffkonzentrationen sowie die n-Alkane, BTEX und andere Alkylbenzole als Summenparameter zusammengestellt.

**Tab. 3.6: Gesamtkohlenstoffkonzentrationen, Summe der n-Alkane, BTEX und andere Alkylbenzole (mg/m<sup>3</sup>) zwischen Januar 2001 und September 2004.**

	<b>C-Gesamt</b> (mg/m <sup>3</sup> )	<b>n-Alkane</b> (mg/m <sup>3</sup> )	<b>BTEX</b> (mg/m <sup>3</sup> )	<b>Alkylbenzole</b> (mg/m <sup>3</sup> )
<b>Testfeld</b>	4.300 - 14.000	240 - 1.000	18 - 370	4 - 130
<b>kontaminiertes Vergleichsareal</b>	3 – 1.500	< 1 - 18	< 0,1 - 12	< 0,1- 9
<b>unkontaminiertes Vergleichsareal</b>	< 0,1 – 17	< 1 - 6	< 0,1 - 2	< 0,1- 1,5

Unter den **n-Alkanen** sind im Testfeld Hexan und Heptan die Hauptkomponenten, Butan konnte nicht nachgewiesen werden (Abb. 3.31). Bei den **BTEX**-Komponenten lag über den gesamten Messzeitraum ein gleich bleibendes Muster der Aromatenverteilung vor (Abb. 3.32). Ethylbenzol und m/p-Xylol waren generell am stärksten vertreten, Benzol dagegen aufgrund der Alterung der Kontamination bereits stark abgereichert. Das Spektrum der Alkylbenzole wird durch Pseudocumol und Mesitylen dominiert. (Abb. 3.33)



**Abb. 3.31: Spektrum der n-Alkane im Testfeld.**



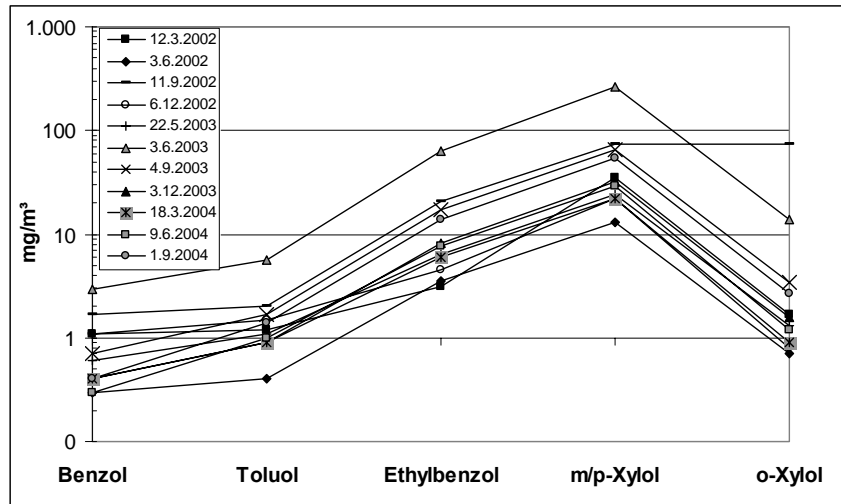


Abb. 3.32: BTEX-Aromatenspektrum im Testfeld.

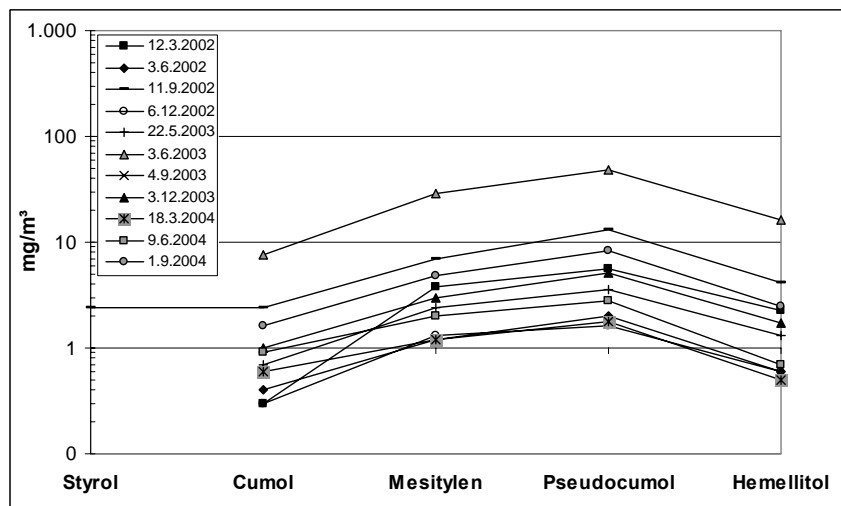
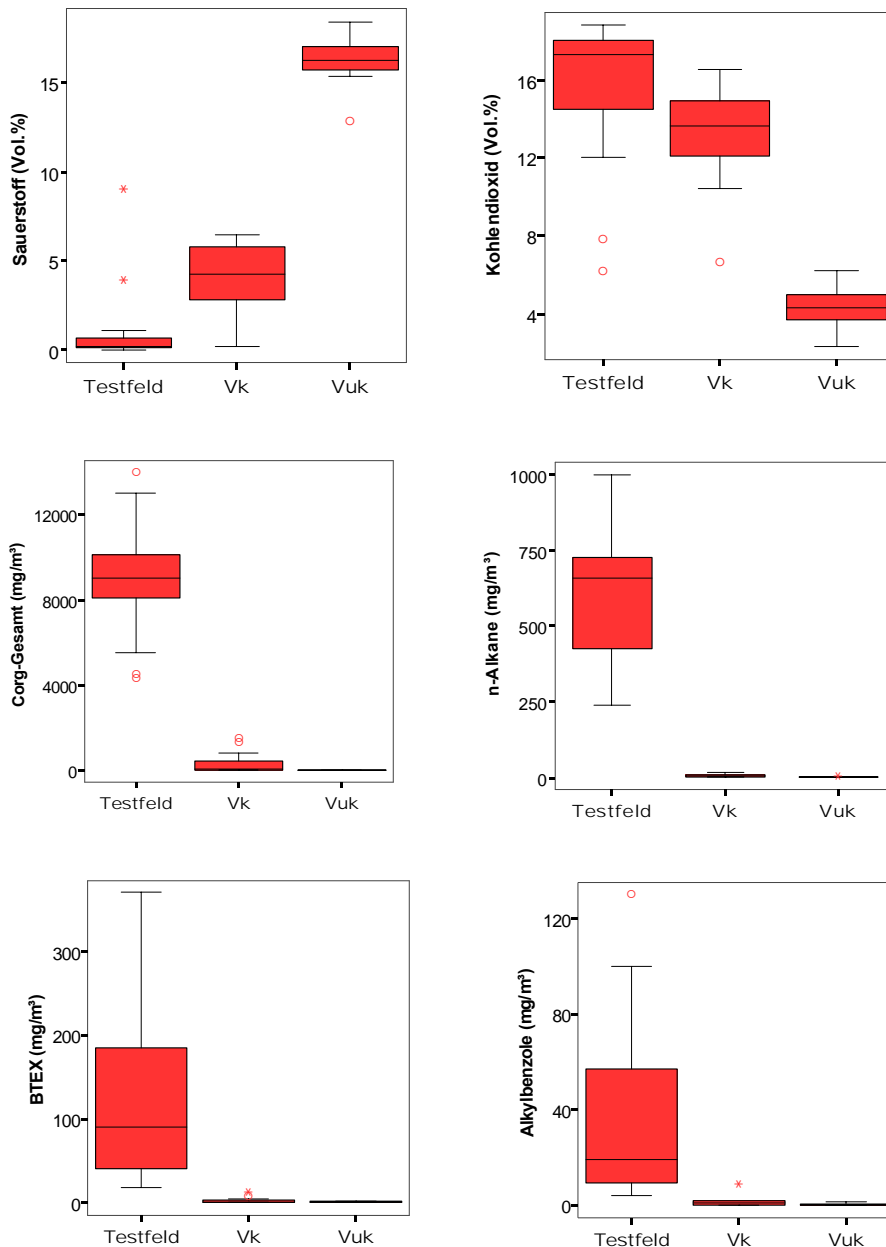


Abb. 3.33: Alkylbenzol-Spektrum im Testfeld.

Die oben bereits beschriebenen Unterschiede zwischen den drei Messstellen werden bei der Betrachtung der Bodenluftzusammensetzung und der Schadstoffkonzentrationen im Boxplot-Diagramm (Abb. 3.34) noch deutlicher. Das Niveau der **Sauerstoff**gehalte liegt im Testfeld deutlich unter dem der Vergleichsareale und das der **Kohlendioxid**gehalte sowie der Schadstoffkonzentrationen deutlich über dem der Vergleichsareale. Bei den BTEX- und Alkylbenzol-Gehalten zeigt sich allerdings auch die hohe Schwankungsbreite der Messergebnisse im Testfeld.

Die Schwankungsbreite der Messwerte der Bodenluftzusammensetzung resultiert aus den je nach Probennahme-Intervall jahreszeitlich veränderten Bedingungen des Bodenmilieus (Bodentemperatur, Niederschlagsmenge) und der Intensität des mikrobiologische Schadstoffabbaus.

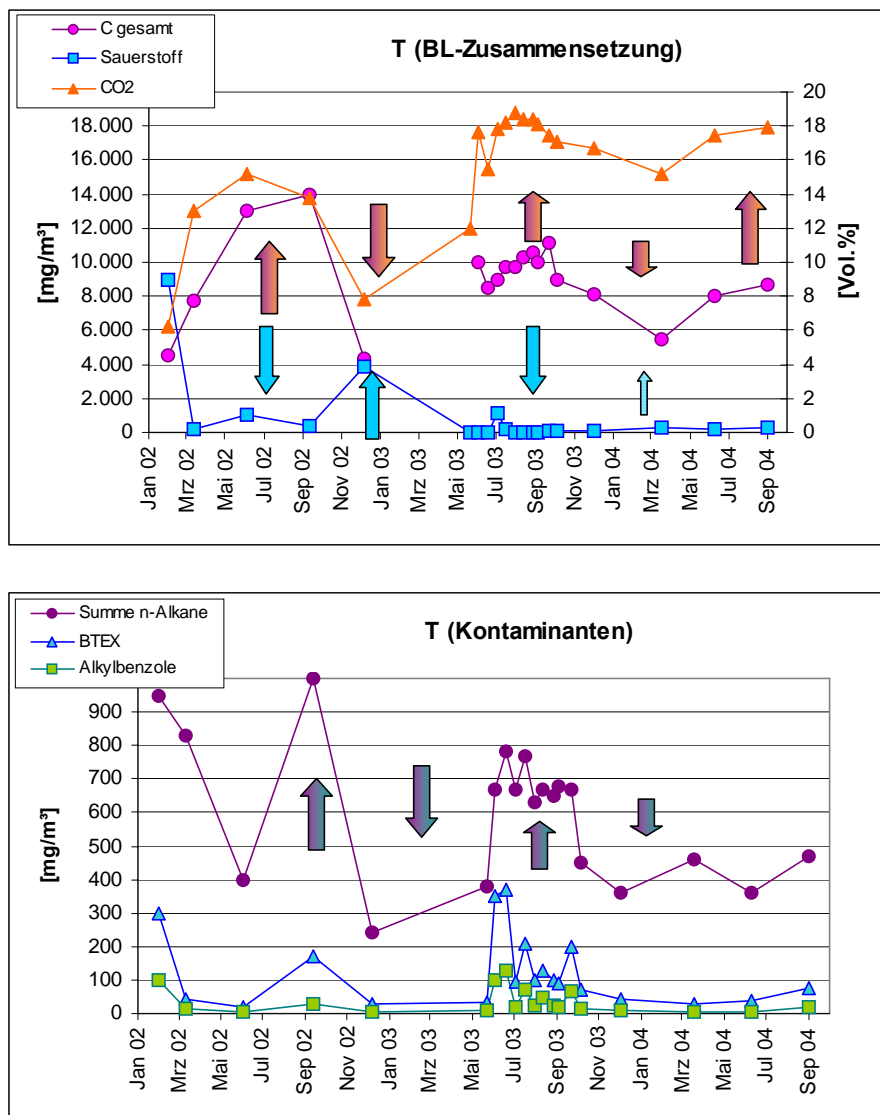


**Abb. 3.34** Boxplot-Diagramme der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte (Vol.%) sowie der organischen Gesamtkohlenstoffgehalte, der n-Alkane, der BTEX-Gehalte und Alkylbenzolgehalte (mg/m<sup>3</sup>) an den Bodenluftmessstellen. (Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze werden in den Plots nicht berücksichtigt.)

### Jahreszeiteffekt

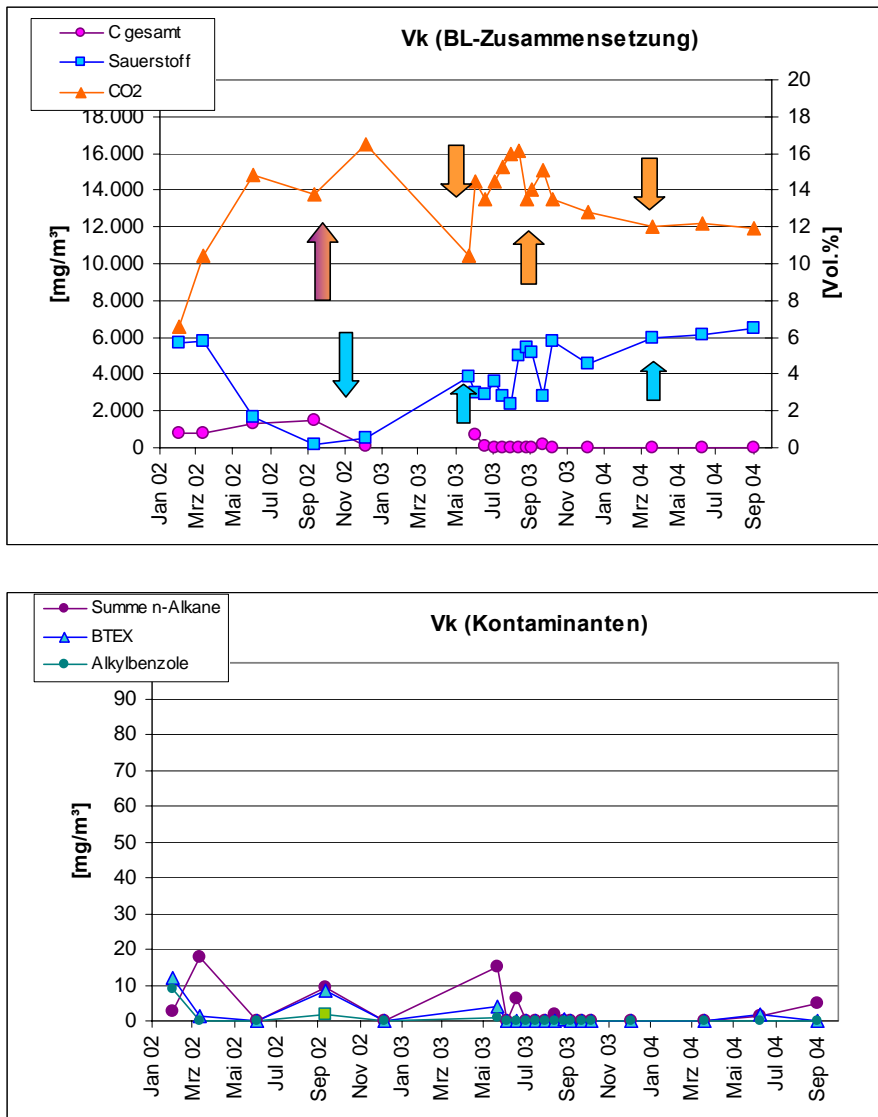
Im Testfeld wurden in den Sommermonaten jeweils ansteigende Kohlendioxid- und Gesamtkohlenstoffgehalte beobachtet, die im Winter deutlich absinken (Abb. 3.30, Abb. 3.35). Die Sauerstoffgehalte zeigten einen gegenläufigen Verlauf: sinkende Gehalte (bis unter 0,1 Vol.%) im Sommer, steigende Gehalte im Winter (Abb. 3.29, Abb. 3.35). Die im Sommer 2003 und 2004 gegenüber dem Jahr 2002 deutlich höheren Kohlendioxid- und niedrigeren Sauerstoffanteile in der Bodenluft verweisen auf eine verstärkte Bodenatmung, die bei den Messungen im Dezember 2003 und März 2004 trotz abnehmender

Bodentemperatur nicht auf das Niveau der "Wintermessungen" im Januar 2002 bzw. Dezember 2002 zurückgegangen ist. Es ist demnach davon auszugehen, dass sich während des fast dreijährigen Monitorings das mikrobielle Milieu im Boden im Hinblick auf den Schadstoffabbau deutlich verbessert hat, so dass auch in den kälteren Monaten ein Schadstoffabbau stattfindet.



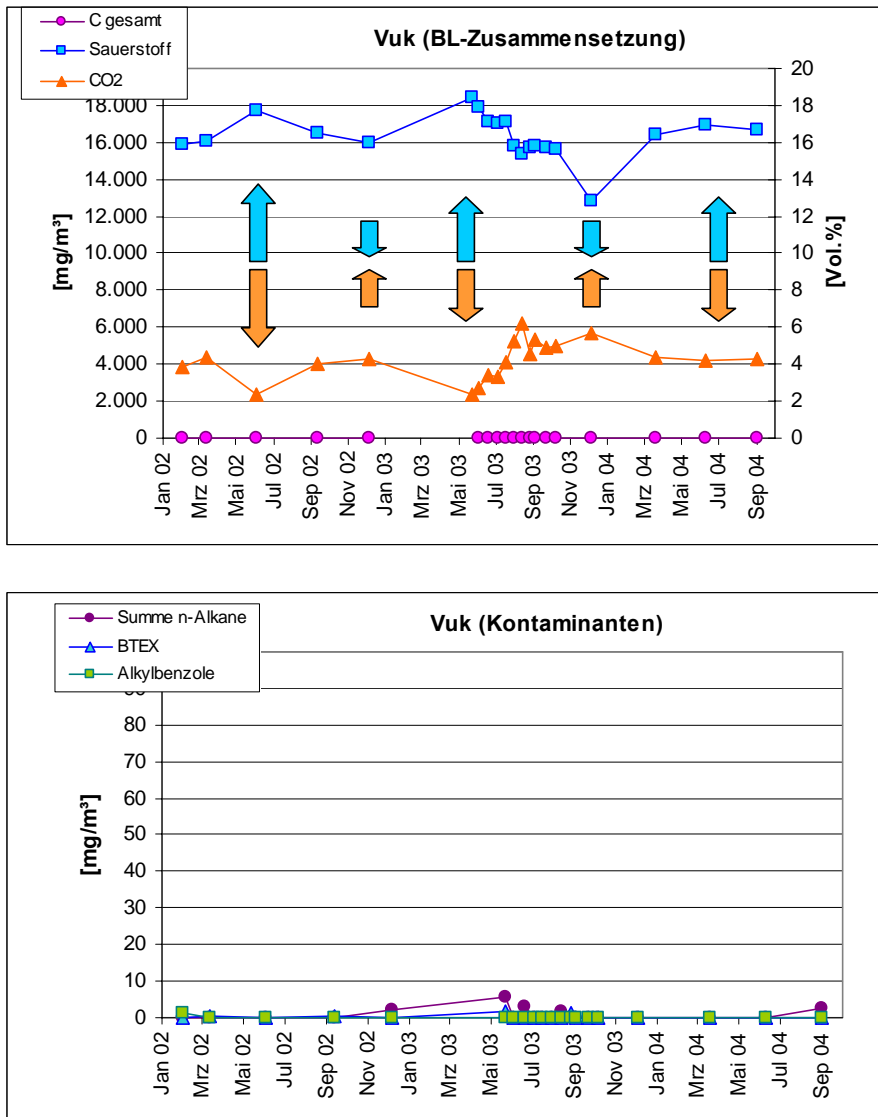
**Abb. 3.35: Gesamtkohlenstoffgehalt [mg/m³], Sauerstoff-, Kohlendioxidgehalt [Vol. %] sowie Summe der n-Alkane, BTEX und Alkylbenzole [mg/m³] im Testfeld (T). Skalierung bei den Kontaminanten 0-1.000 mg/m³.**

Im kontaminierten Vergleichsareal können diese jahreszeitlichen Effekte nur im Jahr 2002 nachvollzogen werden. Seit September 2002 zeigt der Sauerstoffgehalt hier einen ansteigenden Trend, während die Schadstoffgehalte mit Ausnahme weniger Messungen abgenommen haben (Abb. 3.36). Es liegt nahe, dass die Sauerstoffzehrung zurückgeht, da nach und nach geringere Schadstoffmengen zum Abbau zur Verfügung stehen, und damit der im Sommer 2002 noch stärker ausgeprägte Jahreszeiteffekt überdeckt wird. Die vergleichsweise höheren Gehalte an Kontaminanten bei den Messungen im Mai 2003 sind wahrscheinlich auf kontaminiertes Grundwasser zurückzuführen, das bis kurz zuvor in den Bodenluftpegeln stand.



**Abb. 3.36: Gesamtkohlenstoffgehalt [mg/m³], Sauerstoff-, Kohlendioxidgehalt [Vol. %] sowie Summe der n-Alkane, BTEX und Alkylbenzole [mg/m³] im kontaminierten Vergleichsareal (Vk). Skalierung bei den Kontaminanten 0-100 mg/m³.**

Im unkontaminierten Vergleichsareal haben sich relativ stabile Sauerstoffgehalte (ca. 16-18 Vol.%, Ausnahme Dez. 2003) etabliert. Die Kohlendioxidgehalte liegen bei 2-6 Vol.%. Die Ursachen der Schwankungen sind unklar. Schadstoffe sind kaum nachweisbar. Einzelne leicht erhöhte Messwerte (Frühjahr 2003) stehen in Zusammenhang mit dem Eindringen kontaminierten Grundwassers in die Pegel.



**Abb. 3.37: Gesamtkohlenstoffgehalt [mg/m³], Sauerstoff-, Kohlendioxidgehalt [Vol. %] sowie Summe der n-Alkane, BTEX und Alkylbenzole [mg/m³] im unkontaminierten Vergleichsareal (Vuk). Skalierung bei den Kontaminanten 0-100 mg/m³.**

Die in der Bodenluft beobachteten Trends zeigen, dass es in den stark kontaminierten Böden (Testfeld) mit zunehmender Bodentemperatur zu einer verstärkten Bodenatmung gegenüber geringer kontaminierten Bereichen (Vergleichsareale) kommt, die in Zusammenhang mit dem mikrobiellen Schadstoffabbau gesehen werden muss. Gleichzeitig kann sich unter höheren Temperaturen der Effekt einer verstärkten Schadstofffreisetzung (Volatilisierung) einstellen.

### Schadstoff-Abbau

Um beurteilen zu können, ob, trotz der eben beschriebenen jahreszeitlichen Messwert-schwankungen, aus den Bodenluftdaten Trends bezüglich der natürlichen Schadstoff-minderung abzulesen sind, ist es sinnvoll die Ergebnisse in jährliche Monitoringzyklen aufzuteilen.

Werden die Ergebnisse jeweils für die Jahre 2002, 2003 und 2004 in einzelnen Boxen dargestellt (vgl. Abb. 3.38, Abb. 3.39), fällt bei den Sauerstoffgehalten im Testfeld eine starke Abnahme in den ersten beiden Jahren auf. Aufgrund der Abdeckung des Testfeldes bis kurz vor Projektbeginn (Gebäude bis 1995, danach durch Folie bis Ende 2000 abgedeckt) setzten die mikrobiologischen Abbauprozesse vermutlich langsam ein und führten erst 2003 zu einer fast vollständigen Sauerstoffzehrung im Boden. Kohlendioxid als Endprodukt des mikrobiellen Kohlenwasserstoffabbaus nimmt im Gegenzug stark zu. Die im Jahr 2003 unproportional erhöhten Kohlendioxidgehalte an allen drei Messstellen resultieren daraus, dass die nach dem Probenahmeplan Anfang März durchgeführte Messung bis Ende Mai 2003 verschoben werden musste. Zu diesem Zeitpunkt ist bereits von erhöhten Kohlendioxidgehalten aus den im Sommer zunehmenden mikrobiellen Abbauprozessen auszugehen (s.o.). Gleichzeitig fließen durch die gesonderte Beprobungskampagne im Sommer 2003 mehr Messwerte in die Auswertung ein. Bei den Schadstoffparametern, dem organischen Gesamtkohlenstoff und der Summe der n-Alkane, zeigt sich im Testfeld insgesamt eine Reduzierung der Gehalte gegenüber 2002 (s. Abb. 3.39).

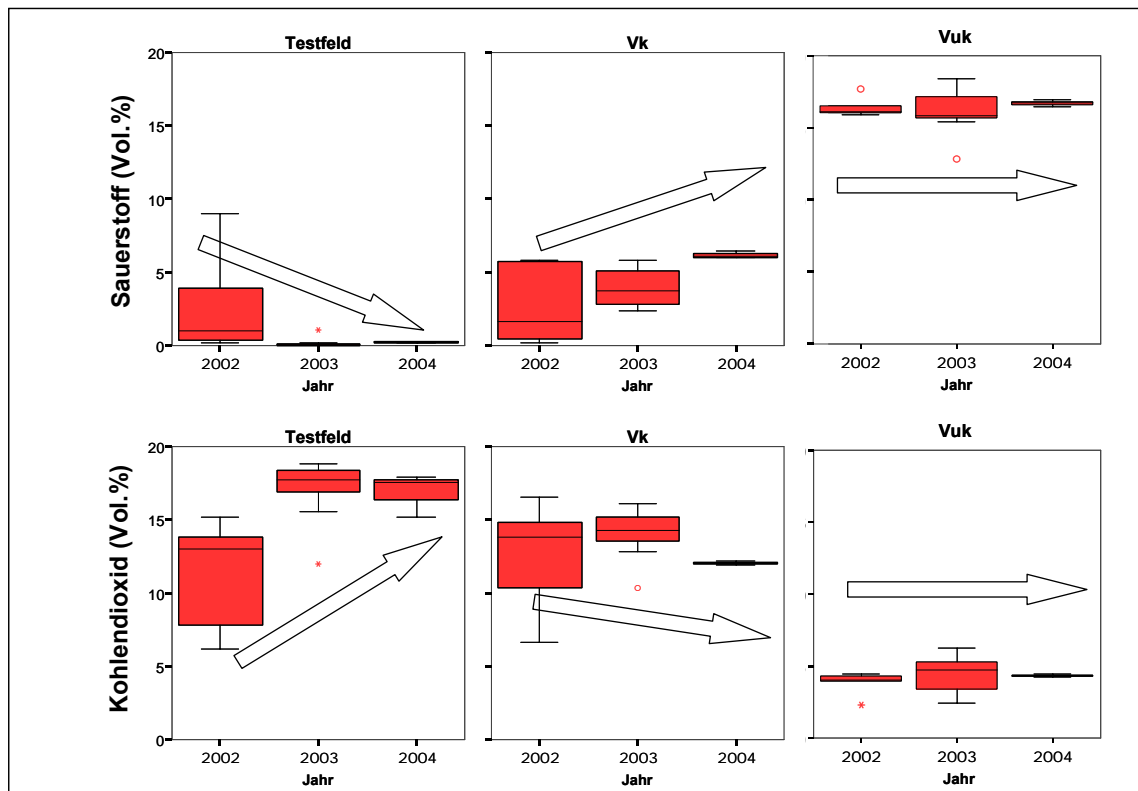
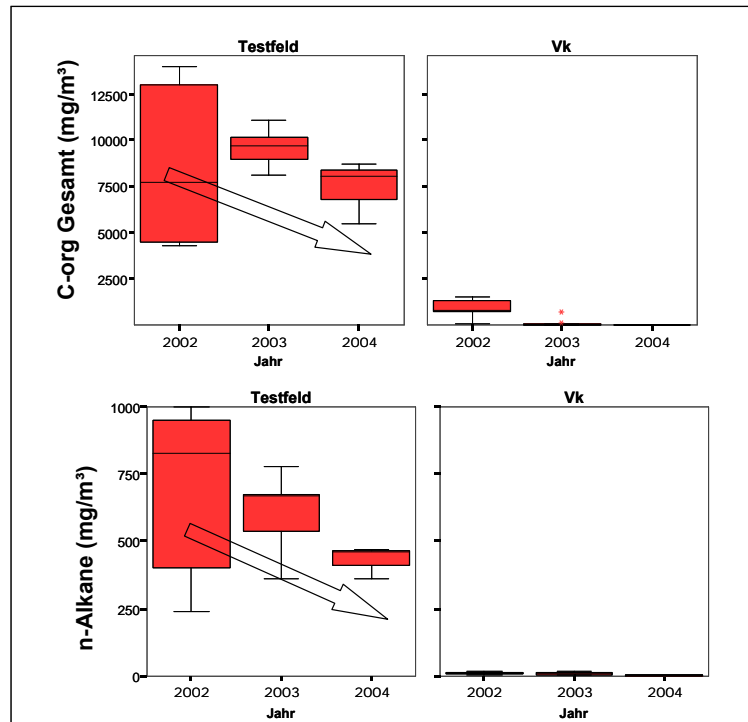


Abb. 3.38: Boxplot-Diagramme des Sauerstoff- und Kohlendioxidgehaltes (Vol.%) an den Bodenluftmessstellen in den Jahren 2002, 2003 und 2004 (Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze werden in den Plots nicht berücksichtigt).



**Abb. 3.39: Boxplot-Diagramme des organischen Gesamtkohlenstoffgehaltes und der n-Alkane (mg/m<sup>3</sup>) im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal in den Jahren 2002, 2003 und 2004.** Das unkontaminierte Vergleichsareal wurde aufgrund der geringen Schadstoffgehalte nicht dargestellt.

Im kontaminierten Vergleichsareal nimmt der Sauerstoffgehalt (vgl. Abb. 3.38) im Laufe der drei Jahre zu, während parallel die Schadstoffgehalte abnehmen. Es liegt nahe, dass die Sauerstoffzehrung zurückgeht, da hier geringere Schadstoffmengen für den Abbau zur Verfügung stehen. Diese Ergebnisse werden durch die Bodenanalytik gestützt. Bei der Abschlussbeprobung lagen die MKW-Gehalte bis in 4 m Profiltiefe unter 100 mg/kg TS, die BTEX- und Alkylbenzole-Gehalte unter 100 µg/kg TS.

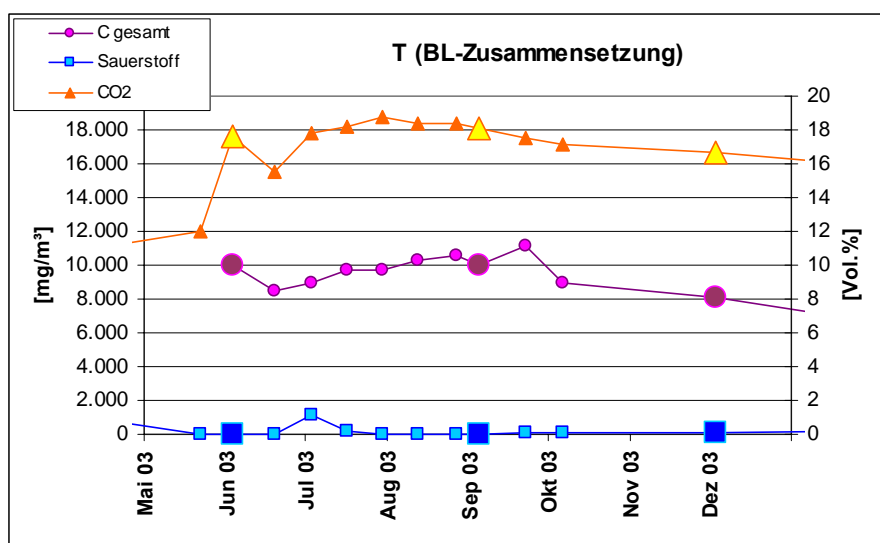
Im unkontaminierten Vergleichsareal konnten innerhalb der drei Jahre keine größeren Schwankungen der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte (Abb. 3.38) beobachtet werden. Die Messwerte für die leicht flüchtigen Schadstoffe in der Bodenluft befanden sich während des gesamten Zeitraums erwartungsgemäß nur knapp über oder unter der Bestimmungsgrenze.

Die statistische Auswertung aller Messwerte in einer Korrelationsmatrix bestätigt, dass die Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte signifikant negativ miteinander korreliert sind ( $R = -0,944$ ). Gegenüber dem organischen Gesamtkohlenstoffgehalt und den n-Alkan-Gehalten weisen die Kohlendioxidgehalte eine mittlere positive Korrelation ( $R = 0,609$  bzw.  $R = 0,564$ ) und die Sauerstoffgehalte eine mittlere negative Korrelation ( $R = -0,596$  bzw.  $R = -0,556$ ) auf.

### 3.2.2.2 Zusätzliche Messkampagne

Vom 22 Mai 2003 bis 6. Oktober 2003 wurden zweiwöchentlich die im Analysenplan vorgesehenen Parameter zuzüglich des Methangehaltes an allen drei Bodenluftpegeln bestimmt sowie ein GC-MS-Screening im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal durchgeführt. Ziel der Messkampagne war es die potenzielle Varianz der Messparameter durch äußere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Temperatur und Bodenfeuchte, zu ermitteln und die Messwertschwankungen innerhalb eines Monitoring-Intervalls mit den Messwerten zum Zeitpunkt der vierteljährlichen Termine zu vergleichen.

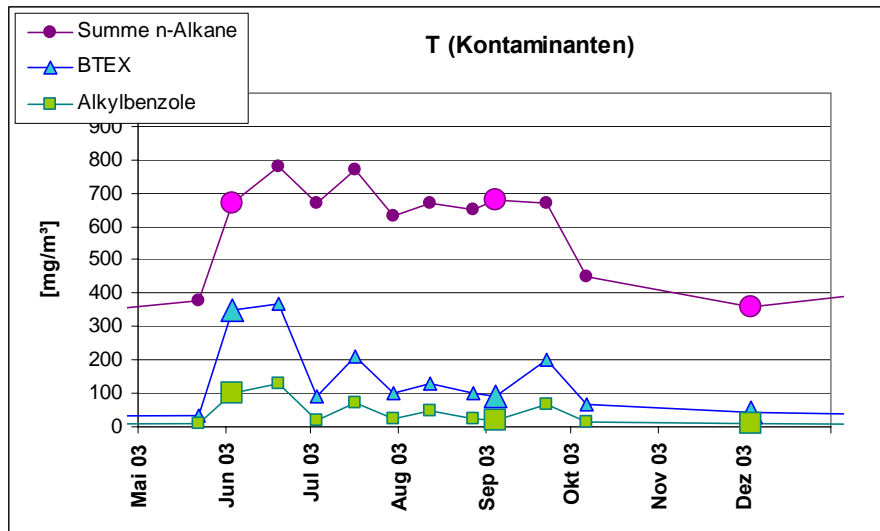
Die durch die Messkampagne festgestellten Trends sollen im Folgenden am Beispiel des Testfeldes dargestellt werden, sind aber in gleicher Weise auch für die Vergleichsareale nachvollziehbar. Im Testfeld lagen die Sauerstoffkonzentrationen im betrachteten Messzeitraum (Mai-Oktober 2003) meist an der Bestimmungsgrenze von 0,1 Vol.%, lediglich am 03.07.03 wurden 1,1 Vol.% Sauerstoff bestimmt (vgl. Abb. 3.40). Die Kohlendioxidgehalte stiegen von Mai bis Juli 2003 von 12 Vol.% auf 18,8 Vol.%, danach erfolgte ein langsames Absinken der Werte. Der organische Gesamtkohlenstoffgehalt betrug zwischen 8.500 und 11.000 mg/m<sup>3</sup>. Methan wurde in Konzentration von < 0,1 bis 0,3 mg/m<sup>3</sup> gemessen.



**Abb. 3.40: Bodenluftzusammensetzung im Testfeld von Mai bis Oktober 2003. Die regulären Messtermine sind durch überdimensionierte Symbole gekennzeichnet.**

Bei den Schadstoffen konnte von Mai bis Juni 2003 ein deutlicher Anstieg und zwischen den Messterminen von Ende September bis Anfang Oktober ein Absinken der Gehalte beobachtet werden (Abb. 3.41). Von Juni bis September 2003 variierte die Summe der n-Alkane nur geringfügig (630-780 mg/m<sup>3</sup>). Die Gehalte von BTEX und sonstigen Alkylbenzolen zeigen dagegen eine größere Schwankungsbreite. Insbesondere an den zwei Probennahmetermi- nen im Juni lagen die Messwerte deutlich höher als bei den folgenden Messungen. Der vorherige Eintritt des stark mit BTEX und Alkylbenzolen kontaminierten Grundwassers (Kap. 3.4.2.2) in die Bodenluftpegel ist wahrscheinlich die Ursache dieser punktuell erhöhten Werte.





**Abb. 3.41: Schadstoffgehalte im Testfeld von Mai bis Oktober 2003. Die regulären Messtermine sind durch überdimensionierte Symbole gekennzeichnet.**

Das GC-MS-Screening ergab zwischen den Messterminen leichte Schwankungen in den Kettenlängen der n-Alkane ( $C_5$  bis  $C_{10}$ ) und iso-Alkane ( $C_4$  bis  $C_8$ ) sowie bei den detektierten cyclischen Verbindungen.

Über den Zeitraum des umfangreich beprobten Monitoring-Intervalls von Juni bis September 2003 betrachtet waren die Messwerte für den organischen Gesamtkohlenstoffgehalt und die Summe der n-Alkane insbesondere im Testfeld relativ konstant. Der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt unterliegt kleineren Schwankungen zwischen den Messterminen. Beim Abgleich dieser Schwankungen mit den jeweiligen Klimadaten (Lufttemperaturen, Niederschlagsmenge, Luftdruck) am Tag der Messung, dem Vortag und der Vorwoche konnte keine direkte Korrelation festgestellt werden. Eine von den äußeren Bedingungen am Messtag abhängige Variabilität der Ergebnisse kann, bei Lufttemperaturen über  $5^{\circ}\text{C}$  (VDI 3865), insbesondere für die Parameter Kohlendioxid, C-Gesamt und n-Alkane als sehr gering eingestuft werden. Unter Berücksichtigung der vierteljährlich erhobenen Daten wirken sich vielmehr die jahreszeitenbedingten Veränderungen des Bodenmilieus auf die mikrobielle Aktivität und die Freisetzung von Schadstoffen in die Bodenluft und somit auf die Gehalte am Messtag aus.

Nach dem in der zusätzlichen Messkampagne gewonnenen Kenntnisstand sind die im Projektverlauf regulär nur vierteljährlich durchgeführten Messungen der Bodenluftmessungen trotz des großen zeitlichen Beprobungsabstandes geeignet, um Trends im Hinblick auf natürliche Abbauprozesse erkennen zu lassen. Ein noch größerer Beprobungsabstand hingegen würde zu deutlichen Lücken führen.

### 3.2.3 Interpretation der Ergebnisse

Die während des Bodenluftmonitorings am TL Schäferhof-Süd aufgenommenen Daten spiegeln die Schadstoffverteilung und die mikrobiellen Abbauprozesse im Boden wider. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass zwischen Testfeld und Vergleichsarealen deutliche Unterschiede in der Bodenluftzusammensetzung und in den Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft vorliegen. Ursächlich hierfür ist vor allem der Schadstoffgehalt im Boden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in karbonatarmen Böden sowohl die Sauerstoff- als auch die Kohlendioxidgehalte wichtige Anzeiger für natürliche Selbstreinigungsprozesse im Boden sind. Der Sauerstoffverbrauch und die Kohlendioxidproduktion sind zusammen mit den Schadstoffkonzentrationen als Indikatoren für mikrobielle Abbauprozesse in der Wasser ungesättigten Bodenzone geeignet. Eine alleinige Messung der Bodenatmung oder der Schadstoffkonzentrationen ist hingegen nicht ausreichend, um die ablaufenden Prozesse korrekt zu erfassen. So wurde am Beispiel des TL Schäferhof-Süds im Testfeld eine Abnahme der Schadstoffgehalte bei fast vollständiger Sauerstoffzehrung festgestellt. Das heißt, dass aufgrund des noch vorhandenen Schadstoffreservoirs im Boden kontinuierlich Sauerstoff als Elektronenakzeptor für den mikrobiellen Abbau verbraucht wird. Im kontaminierten Vergleichsareal wurde ebenfalls eine Abnahme der Schadstoffgehalte in der Bodenluft (bis unter die Nachweisgrenzen) gemessen, allerdings bei gleichzeitiger Sauerstoffzunahme. Hier zeigt sich, dass die Sauerstoffzehrung aufgrund geringerer zur Verfügung stehender Schadstoffmengen langsam abnimmt.

Obwohl das unkontaminierte Vergleichsareal aufgrund des Auffüllungskörpers andere Bodeneigenschaften als das Testfeld und das kontaminierte Vergleichsareal aufweist, hat die Bodenluftuntersuchung an diesem Pegel verdeutlicht, dass ohne den Einfluss mikrobieller Abbauprozesse über den hier untersuchten Zeitraum von drei Jahren relativ konstante Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte zu erwarten sind.

Veränderungen des Bodenmilieus wie zum Beispiel Schwankungen der Bodentemperatur oder der Bodenfeuchte wirken sich auf die mikrobielle Aktivität und die Freisetzung der Schadstoffe aus. Diese hier als Jahreszeiteffekt benannte Einflussgröße spielt vor allem in stärker kontaminierten Böden eine wichtige Rolle. Für das Testfeld zeigen die Bodenluftdaten erhöhte Abbauraten in den Sommermonaten, mit daraus resultierenden geringeren Sauerstoff- und erhöhten Kohlendioxidgehalten sowie einem hohen organischen Gesamtkohlenstoffgehalt aus den flüchtigen Abbauprodukten. Anhand der Vergleichsareale wird deutlich, dass je geringer die Schadstoffgehalte im Boden sind, desto weniger sich die jahreszeitlichen Effekte in humusarmen Böden auf die Bodenluftzusammensetzung auswirken. Das Phänomen, dass sich die jahreszeitlichen Einflüsse der Bodentemperatur insbesondere in hoch kontaminierten Bereichen auf die Kohlendioxidproduktion auswirken, beobachteten auch EISWIRTH et al. (1998) bei Bodenluftuntersuchungen über BTEX-kontaminiertem Grundwasser. Bei den Untersuchungen wurde ebenfalls festgestellt, dass sich die Höhe der organischen Schadstoffgehalte im Grundwasser zwar in den Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalten, aber nicht eindeutig in den BTEX-Gehalten in der Bodenluft widerspiegelte.

Unabhängig von gerätetechnischen Nachweisgrenzen für die jeweiligen Schadstoffkonzentrationen der einzelnen Parameter scheint es darüber hinaus sinnvoll Messbereiche zu ermitteln, innerhalb derer eine Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf biologische Abbauprozesse in der Bodenluft sinnvoll ist. Für das Monitoring der Bodenluft am TL Schäferhof-Süd kann aufgrund der Ergebnisse im kontaminierten Vergleichsareal festgestellt werden, dass bei Gehalten unterhalb von 100 mg/m<sup>3</sup> organischen Gesamtkohlenstoffs, 10 mg/m<sup>3</sup> n-Alkanen und 1 mg/m<sup>3</sup> BTEX und Alkylbenzolen die Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte nicht mehr durch den mit steigender Bodentemperatur zunehmenden mikrobiellen Schadstoffabbau und durch die Schadstofffreisetzung beeinflusst werden.

BTEX-Konzentrationen in der Bodenluft können nach LFU BADEN WÜRTTEMBERG (1998) bei einer angenommenen Verdünnung in der Atmosphäre von 1:1.000 bis zu Orientierungswerten von 1 mg/m<sup>3</sup> Benzol, 900 mg/m<sup>3</sup> Toluol und 600 mg/m<sup>3</sup> Xylol/ Ethylbenzol als tolerierbar (Schutzgut Mensch) eingestuft werden. Diese Konzentrationen wurden am TL Schäferhof-Süd bei keiner Messung erreicht.

Aus den Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft können mit Hilfe der empirischen Henry-Konstante (Luft-Wasser-Verteilungskoeffizient) auch Ableitungen für die Konzentrationen im Sickerwasser, und damit das Schutzgut Grundwasser, getroffen werden (GRATHWOHL 2000). Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass sich aufgrund des hohen Diffusionskoeffizienten leicht flüchtiger Schadstoffe zwischen dem Sicker- bzw. Kapillarwasser und der Bodenluft ein lokales Gleichgewicht einstellt. Die Henry-Konstante (H) lässt sich durch den Quotienten aus dem Partialdruck des Schadstoffes in Luft und dessen Wasserlöslichkeit beschreiben (LFU BADEN WÜRTTEMBERG 1994):

$$H = C_g \cdot C_w^{-1}; \quad C_g = \text{Stoffkonzentration in der Gasphase, } C_w = \text{Stoffkonzentration in Wasser}$$

In Tab. 3.7 sind die temperaturkorrigierten Henry-Konstanten ausgewählter Schadstoffe und die daraus resultierenden Schadstoffbelastungen im Sickerwasser bei einer Bodenluftkonzentrationen von je 10 mg/m<sup>3</sup> angegeben (REISINGER & GRATHWOHL 1996). Die angenommene Temperatur von 10°C liegt knapp unter dem Jahresdurchschnitt der Bodentemperaturen (11-12°C) am TL Schäferhof-Süd (vgl. Kap. 3.5.2.2). Aus den mittleren Bodenluftkonzentrationen der Messstelle im Testfeld wurde für die leicht flüchtigen Schadstoffe eine Prognose der Sickerwasserkonzentrationen für das TL Schäferhof-Süd durchgeführt (Anhang 3.2), die in Tab. 3.7 exemplarisch für den Zeitraum von Juni bis Dezember 2003 dargestellt ist.

Die nach dieser Methode berechneten BTEX-Konzentrationen im Sickerwasser (2002: 1.021 µg/l, 2003: 1.460 µg/l, 2004: 428 µg/l) entsprechen in der Größenordnung den Ergebnissen der Grundwasseruntersuchungen an der Testfeldmessstelle MP2-f (50-1300 µg/l). Für die n-Alkane liegen keine Vergleichswerte vor. Dieses Ergebnis zeigt auf der einen Seite, dass die Qualität der Bodenluftuntersuchungen am TL Schäferhof-Süd für eine Abschätzung des quantitativen Austrages leicht flüchtiger Schadstoffe mit dem Sickerwasser ausreichend war und auf der anderen Seite, dass die Bodenluftuntersuchungen nicht nur Rückschlüsse auf die Schadstoffgehalte im Boden, sondern auch auf die Größenordnung der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser im direkten Abstrom des Testfeldes erlauben.

**Tab. 3.7: Temperaturkorrigierte Henry-Konstanten ausgewählter Schadstoffe und aus den Bodenluftkonzentrationen (BL) resultierende Schadstoffbelastungen im Sickerwasser (SW).**

Schadstoff	H [-] bei 10°C	SW-Konz. bei 10 mg/m <sup>3</sup> in der BL [µg/l]	Mittlere BL-Konz. 2003 [mg/m <sup>3</sup> ]	SW-Konz. im Testfeld 2003 [µg/l]
n-Hexan	39,8	0,251	153	4
n-Heptan	39,4	0,254	305	8
n-Octan	56,2	0,178	58	1
Benzol	0,114	87,9	1	11
Toluol	0,126	79,2	3	22
Ethylbenzol	0,146	68,5	30	206
m/p-Xylol	0,106	94,6	120	1.135
o-Xylol	0,089	113	8	86
<b>Summe BTEX</b>				<b>1.460</b>

Das Bodenluft-Monitoring am TL Schäferhof-Süd war prinzipiell geeignet, den mikrobiellen Schadstoffabbau im Boden nachzuweisen. Eine Quantifizierung von Abbauraten im Boden ist auf Grundlage der ermittelten Daten allerdings nicht möglich. Hierfür müssten spezielle in-situ-Respirationstests durchgeführt werden. An einem Standort wie dem TL Schäferhof-Süd hat sich ein Bodenluft-Monitoring über mehrere Jahreszyklen als unerlässlich erwiesen, um repräsentative Aussagen zur Einflussnahme von Jahreszeiteffekten auf den natürlichen Schadstoffabbau und -rückhalt zu treffen und die Bodenluftdaten gegen Fehlinterpretationen abzusichern.

### 3.3 Sickerwasser

#### 3.3.1 Untersuchungsmethoden

##### 3.3.1.1 Einbau der Messstellen

Zur Erfassung der Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser wurden im Dezember 2001 im Testfeld zwei Sickerwassermessstellen und in den Vergleichsarealen jeweils eine Messstelle eingerichtet (Lageskizze, s. Anhang 1.2). An den Messstellen im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal wurden hierfür Edelstahl-Edelstahlsaugkerzen in ca. 2 und 3,5 m, im unkontaminierten Vergleichsareal zunächst nur in 3,5 m u. GOK eingebaut. Edelstahl-saugkerzen sollten im Vergleich zu anderen zur Verfügung stehenden Materialien sehr geringe Schadstoffsorptionen am Kerzenmaterial aufweisen. Um Sickerwasser aus einer möglichst ungestörten Bodenzone zu erhalten, wurde die durch einen Kunststoffschaff verlängerte Kerze in einem Winkel von ca. 30° gegenüber dem Lot in den Boden eingesetzt.

Da für den Ausbau der Messstellen kein genormtes Verfahren zur Verfügung stand, wird die von der Fa. UP GmbH, Ibbenbüren angewendete Methode im Folgenden näher beschrieben. Die Bohrlöcher ( $\varnothing$  50 mm) wurden durch Rammkernsondierung unter Zuhilfenahme einer Führungsschiene (30°-Winkel zum Lot) vorbereitet und, um Nachfall zu verhindern, mit einem Hüllrohr ( $\varnothing$  50 mm) abgestützt. Trotz der Verwendung der Führungsschiene variierten die Einbauwinkel und damit letztlich die anhand der Schaftlängen berechneten Einbautiefen in gewissem Maße. Nach den Erkenntnissen aus dem Einbau verschiedener Saugkerzen während der Vorversuchsphase wurde besonderes Augenmerk darauf gelegt, den Übergangsbereich von der Saugkerze zum Boden durch eine "Ummantelung" mit Quarzmehl zu optimieren. Für den Einsatz der Saugkerzenspitze wurden die tiefsten 10 cm mit reduziertem Durchmesser vorgebohrt und die Saugkerze in der vorgesehenen Tiefe zunächst locker eingesetzt. Die "Quarzmehlpackung" wurde mit Druckluft durch einen Schlauch direkt an der Saugkerze in das Bohrloch eingepresst. Vor dem Ziehen des Hüllrohres und dem endgültigen Verfüllen erfolgte eine Kontrolle der Saugkerzen auf ihre Funktionstüchtigkeit (Ansaugen des Einschlämmwassers). Danach wurde das Bohrloch mit Bohrgut verfüllt und dabei oberhalb der Saugkerzenspitze und an der Geländeoberkante eine Tonabdichtung eingebaut, um ein direktes Abfließen von Niederschlagswasser am Schaft der Kerze zu verhindern.

Die Saugkerzen ( $\varnothing$  20 mm, Länge des porösen Körpers 63 mm) wurden über Teflonschläuche mit jeweils einer kunststoffummantelten Schottflasche verbunden, die in einem Schutzrohr im Boden eingegraben wurde. Die Teflonschläuche und die PA-Verbindungsschläuche zur Vakuumpumpe wurden durch Wellschläuche gegen Nager geschützt. Über eine Vakuum-Regel­einheit wurde für die unterschiedlichen Beprobungshorizonte (2/4 m u. GOK) ein kontinuierlicher Unterdruck von 200 bzw. 350 hPa angelegt. Eine erste Probennahme sollte frühestens 4 Wochen nach Einbau erfolgen (DVWK 1990).

Für die Messstelle Vuk-Sw\_4 stellte sich heraus, dass der Grundwasserflurabstand in diesem Bereich des Standortes teilweise bei weniger als 4 m liegt und damit bei einer Einbautiefe von 3,8 m u. GOK neben Sickerwasser auch Grundwasser angesaugt wurde. Zusammen mit der Messstelle T-SW2\_2, die im Vergleich zu anderen Messstellen nur geringe Sickerwassermengen lieferte, wurde die Saugkerze im unkontaminierten Vergleichsareal im Mai 2002 in ca. 1,70 m u. GOK neu eingebaut.

Beim weiteren Betrieb der Saugkerzenanlage traten verschiedene technische Schwierigkeiten auf, durch die die Gewinnung von Sickerwasser an einigen Messstellen über zumeist mehrere Monate unterbrochen war. Bei der Erneuerung der Messstellen T-SW1\_2, T-SW1\_4, T-SW2\_4 und Vuk-SW\_4 zeigten sich an den ausgebauten Saugkerzen rostrote Beläge im Edelstahlkörper und in den Teflonschläuchen. Da die Schläuche zum Teil mit Sickerwasser gefüllt waren, ist davon auszugehen, dass nicht ein mangelnder Bodenkontakt der Saugkerze, sondern die beschriebene Verockerung die Funktionstüchtigkeit der Messstellen eingeschränkt hat. Um ein erneutes Verstopfen der Teflonschläuche ( $\varnothing$  3,1 mm, innen 1 mm) zu vermeiden, wurde das Schlauchmaterial im Schaft durch Schläuche mit einem größeren Innendurchmesser ( $\varnothing$  6 mm, innen 4 mm) ersetzt.

Um zu klären, ob die rostroten Ausfällungen in den Teflonschläuchen aus der Bodenlösung stammen oder es sich um Korrosion des Saugkerzenmaterials handelt, wurde eine Probe entnommen und auf einige charakteristische Elemente (Fe, Mn, Cr, Ni) analysiert. Der für die

Saugkerzen verwendete Edelstahl 'Typ 1.4404' weist im Allgemeinen eine gute Beständigkeit gegen oxidierende Säuren auf (STALATUBE 2002). Allerdings können Schweißverbindungen und Oberflächenbehandlung bei der Verarbeitung des Edelstahls unter Umständen die Korrosionsbeständigkeit beeinflussen. Nach Angaben des Saugkerzenherstellers (mdl. Mitteilung Fr. Schweighöfer/ UP GmbH, 2003) ist beim gegebenen Einsatz und den vorliegenden pH-Bedingungen im Boden allerdings nicht von einer Korrosion auszugehen.

Der Vergleich der Eisen-, Mangan-, Chrom- und Nickelgehalte in der Feststoffprobe aus der Saugkerze VK-SW\_4 mit den Elementgehalten im Edelstahl Typ 14404 und den anzunehmenden Gehalten im Sandboden. (s. Tab. 3.8) zeigt, dass die Ausfällungen nur zu einem sehr geringen Anteil aus dem Edelstahl der Saugkerze stammen können. Zwar sind die Gehalte von Chrom und Nickel gegenüber einem durchschnittlichen Sandboden leicht erhöht, aber sie liegen deutlich unter denen im Edelstahl.

**Tab. 3.8: Vergleich der Eisen-, Mangan-, Chrom- und Nickelgehalte in der 'VK-SW\_4' mit einem Edelstahl Typ 14404 und den anzunehmenden Gehalten im Sandboden.**

	<b>Feststoffprobe VK-SW_4</b>	<b>Edelstahl Typ 14404 *<sup>2</sup></b>	<b>anzunehmende Gehalte im Boden *<sup>1</sup></b>
<b>Fe [mg/kg]</b>	400.000	k.A.	1.500 – 3.500
<b>Mn [mg/kg]</b>	1.000	< 20.000	40 - 1.000
<b>Cr [mg/kg]</b>	300	160.000 - 180.000	5 - 100
<b>Ni [mg/kg]</b>	100	100.000 - 130.000	3 - 50

\*<sup>1</sup> Fe-Gehalte nach Analyseergebnissen vom TL Schäferhof-Süd, Bohrpunkt T-B7 (04.12.01); Mn-, Cr-, Ni-Gehalte nach SCHEFFER (2002)

\*<sup>2</sup> nach DIN EN 10088-2 (Entwurf 2001-12), Angabe entnommen STALATUBE (2002)

Es ist vielmehr davon auszugehen, dass es im Übergang vom Boden zur Saugkerze zu einer (teilweisen) Ausfällung der Bodenlösung, insbesondere des gelösten Eisens als Eisenhydroxid, kommt. Die sehr niedrigen Gehalte gelösten Eisens im Sickerwasser bestätigen diese Vermutung (vgl. Kap.3.3.2).

### **3.3.1.2 Probennahme und Analytik**

Die kontinuierlich gezogenen Sickerwasserproben werden in einer Sammelflasche an der Bodenoberfläche aufgefangen. Nach einem Zeitraum von maximal vier Wochen wurden die Sickerwasserproben entnommen und bis zur Analytik der Mischprobe eines Probennahmeintervalls von drei Monaten eingefroren. Bei Anlagerung von Eisenhydroxiden in den Sammelflaschen wurden diese ausgetauscht und gereinigt, um Adsorptionen an den Belägen zu vermeiden. Aufgrund fragwürdiger Messergebnisse insbesondere für die leicht flüchtigen Schadstoffe wurden zwei zusätzliche Kurzzeitversuche zur Prüfung der Qualitätssicherung bei der Sickerwasserprobennahme mittels Saugkerzen durchgeführt (vgl. Kap. 3.3.1.3).

Wegen der im Sandboden in trockenen Monaten zu erwartenden geringen Sickerwassermenge wurde eine Auswahl der prioritär zu messenden Parameter getroffen. In der Regel konnten in drei Probennahme-Intervallen pro Jahr zumindest geringe Mengen Sickerwasser gewonnen werden. In den Wintermonaten wurden die oberirdischen Teile der Saugkerzenanlage abgebaut, um Materialschäden durch kurzfristiges Einfrieren des Wassers in den Schläuchen und Flaschen zu vermeiden. Der finanzielle Aufwand für die Beheizung der Saugkerzenanlage, hier insbesondere die Verlegung eines Stromanschlusses, stand nicht im Verhältnis zu der zu gewinnenden Sickerwasserprobe.

Die Analytik der Sickerwasserproben erfolgte gemäß den in Tab. 3.9 aufgeführten Normen und Methoden. Das Hausverfahren für die Bestimmung von Benzoesäure in Wasserproben ist in der Prüfungsvorschrift beschrieben (Anhang 5.4).

**Tab. 3.9: Verwendete Normen und Methoden für die Untersuchung von Sicker- und Grundwasserproben**

Parameter	Methode	Bestimmungsgrenze
Kohlenwasserstoffe (KW)	DIN EN ISO 9377-2	0,1 mg/l
BTEX	DIN 38407 -F9	1 µg/l
Benzoesäure	Hausverfahren Umweltschutz Nord/ alphacon	0,01 mg/l
Temperatur	DIN 38404-C4	
Leitfähigkeit	DIN EN 27 888	
pH-Wert	DIN 38404- C5	
Redoxpotenzial	DIN 38404- C6	
Sauerstoff	DIN EN 25814	
Nitrat	DIN EN ISO 10304-1/2	1 mg/l
verfügbares Phosphat	DIN EN ISO 10304-1/2	1 mg/l
Eisen	DIN EN ISO 11885	0,02 mg/l
Sulfat	DIN EN ISO 10304-1/2	1 mg/l
TOC/ DOC	DIN EN 1484	1 mg/l
Säurekapazität/Karbonathärte	DIN 38409- H7/DIN 38405-D8	

Für die Wasseranalytik gilt, dass ausreichend Probenmaterial zur Verfügung stehen muss, da ansonsten die Analyse aller Parameter mit sinnvollen Bestimmungsgrenzen nicht möglich ist. Für den Fall, dass in niederschlagsarmen Perioden nur ungenügende Sickerwassermengen für den im Analysenplan festgelegten Analysenumfang gewonnen würden, galt zunächst eine Prioritätenliste der zu analysierenden Parameter (s. Tab. 3.10). Aufgrund der Erkenntnisse aus den Zusatzversuchen wurde der Analysenplan ab März 2004 auf die Parameter pH-Wert, Leitfähigkeit, TOC/DOC, Eisen, Phosphat, Nitrat und Säurekapazität reduziert.

**Tab. 3.10: Prioritätenliste der zu analysierenden Parameter im Sickerwasser.**

<b>Parameter</b>	<b>mindestens benötigte Menge</b>
BTEX/ Alkylbenzole	2 ml
MKW (GC)	1000/500 ml (NWG < 0,1/ < 0,2 mg/l)
pH, Leitfähigkeit	50 ml
TOC/DOC	20 ml
Eisen	20 ml
Phosphat, Nitrat	20 ml
Säurekapazität, Karbonathärte	100 ml
Benzoessäure	1000 ml

### **3.3.1.3 Zusatzversuche zur Qualitätssicherung bei der Probennahme**

#### **Wiederfindung leicht flüchtiger Schadstoffe im Sickerwasser**

Aufgrund der Analysenergebnisse bis Juni 2003 bestanden erhebliche Zweifel an der Eignung der Saugkerzen zur Bestimmung von leicht flüchtigen Schadstoffen im Sickerwasser am TL Schäferhof-Süd. Trotz den hohen Schadstoffgehalten in der ungesättigten Bodenzone des Testfeldes und den im Grundwasser nachgewiesenen BTEX-Konzentrationen wurden in den entnommenen Sickerwasserproben durchgehend sehr geringe Gehalte von MKW, BTEX und anderen Alkylbenzolen gemessen. Zum Teil waren keine Schadstoffe nachweisbar. Es lag die Vermutung nahe, dass die Standzeit der Wasserproben in den Sammelflaschen zu einer Abnahme der ursprünglich im Sickerwasser vorhandenen Schadstoffgehalte, insbesondere von BTEX, führt.

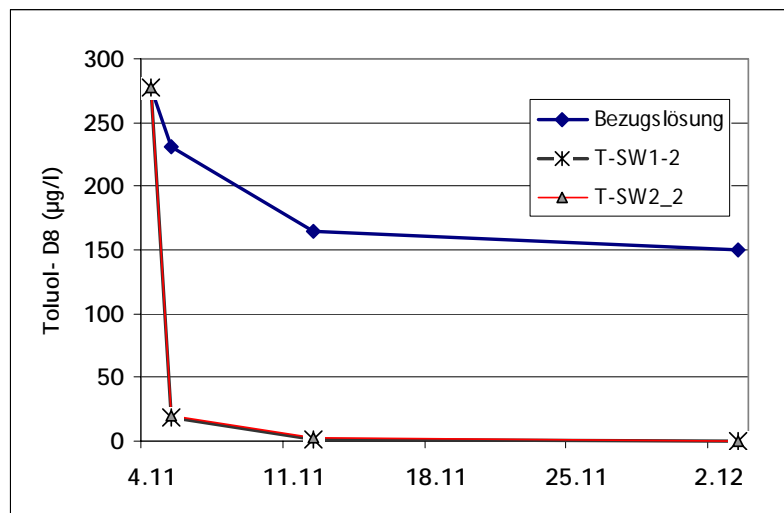
Um die Ursache der niedrigen BTEX-Gehalte zu klären bzw. geeignete Zeiträume für die Sickerwassergewinnung zu ermitteln, in denen noch kein Schadstoffverlust zu verzeichnen ist, wurde in der Zeit vom 4. November bis 3. Dezember 2003 ein Zusatzversuch am TL Schäferhof-Süd durchgeführt. Zu Versuchsbeginn wurde an allen sieben Sickerwassermessstellen den angeschlossenen Sammelflaschen eine wässrige Stammlösung mit deuteriertem Toluol zugesetzt, das analytisch analog der verwendeten BTEX-Methode (DIN 38407-F9) mit entsprechend angepasstem Massenspektrometer-Programm (M/Z 98) bestimmt werden kann. An den 2 m tiefen Messstellen im Testfeld wurden nach einem Tag und nach einer Woche zusätzliche Probennahmen durchgeführt. Mit der regulären Probennahme am 3. Dezember 2003, also einen Monat nach Versuchsbeginn, wurde der Versuch beendet und an allen Messstellen vorhandene Wasserproben entnommen. Um mögliche Abbaueffekte oder sonstige Reaktionen des Bezugsstandards zu dokumentieren, wurde eine weitere Flasche als Kontrollprobe am Standort aufbewahrt.

Die Messergebnisse bestätigten die Annahme, dass es allein durch die Probennahmetechnik zu erheblichen Minderbefunden leicht flüchtiger Schadstoffe kommt. Die Wiederfindungsrate des eingesetzten internen Toluol-Standards lag im durchgeführten Versuch bereits nach einem Tag unter 10 % (s. Tab. 1, Anhang 4.2). Nach einer Woche bzw. einem Monat sank



die Wiederfindungsrate des Standards im Sickerwasser unter 1 % (s. Tab. 1 und 2, Anhang 4.2). In der Kontrollprobe betrug die Wiederfindungsrate nach einem Tag 83 %, nach einer Woche 59 % und nach einem Monat noch 54 % des Anfangswertes (s. Tab. 3, Anhang 4.2).

Der Vergleich der Abnahme des Toluolgehaltes in den unter Unterdruck stehenden Sammelflaschen mit der unter Normaldruck zeitgleich am Standort verbliebenen Bezugslösung belegte, dass der überwiegende Anteil der Schadstoffverluste auf die Probennahmetechnik zurückzuführen ist (Abb. 3.42). Die abnehmende Wiederfindungsrate im Kontrollversuch verdeutlicht zum einen die Verflüchtigung der aromatischen Kohlenwasserstoffe bei der Entnahme der Proben aus den Flaschen und zum anderen die kontinuierlichen Abbauprozesse im aufgefangenen Sickerwasser während der Standzeit. Mit der eingesetzten Methodik kann allerdings nicht zwischen beiden Effekten differenziert werden. Es ist zu erwarten, dass sich Verflüchtigung und Abbau bei höheren Lufttemperaturen während der Sommermonate deutlich verstärken.



**Abb. 3.42: Wiederfindung von deuteriertem Toluol D8 im gesammelten Sickerwasser der Messstellen T-SW1\_2 und T-SW2\_2 (200 hPa) im Vergleich zur Kontrollprobe (ohne Unterdruck).**

Unter Berücksichtigung der aus dem durchgeführten Versuch gewonnenen Erkenntnisse mussten die bis dahin erzielten Analyseergebnisse für BTEX und andere Alkylbenzole in den Sickerwasserproben neu bewertet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der für Toluol exemplarisch durchgeführte Versuch sich größtenteils auf die anderen leicht flüchtigen Schadstoffe übertragen lässt. Damit bietet die angewendete Probennahmetechnik bei den geringen Sickerwassermengen am Standort nicht die geeigneten Voraussetzungen, BTEX und andere Alkylbenzole im Sickerwasser zu bestimmen und über diese Parameter die natürlichen Abbauprozesse im Boden bzw. den Schadstoffaustrag ins Grundwasser zu dokumentieren. Daher wurden bei den Probennahmeterminen im Jahr 2004 die Parameter BTEX und Alkylbenzole aus dem Analysenplan gestrichen.

## Beeinflussung von pH-Wert, Leitfähigkeit, Nitrat- und Sulfatgehalten durch die Proben- nahmetechnik

Um abzuschätzen, in welchem Ausmaß die Messwerte der sonstigen im Analysenplan vorgesehenen physikalisch-chemischen Parameter durch die Probennahmetechnik beeinflusst werden, wurde im Mai 2004 ein weiterer Zusatzversuch für die Parameter Nitrat, Sulfat, Leitfähigkeit und pH-Wert durchgeführt.

Für den Versuchsstart wurden am 12. Mai 2004 an allen Messstellen die bis dahin angefallenen Sickerwasserproben aus den Sammelflaschen herausgenommen. Nach einer Woche, am 19. Mai 2004, wurden die Sammelflaschen der Messstellen T-SW-2\_2 und Vuk-Sw\_2 ausgebaut und jeweils eine Probe für die Laboranalytik entnommen. Anschließend wurden die Flaschen direkt, das heißt ohne Anschluss an die Saugkerze, an die Vakuumpumpe (Unterdruck 200 hPa) angeschlossen. Dadurch sollte verhindert werden, dass während der Versuchszeit Sickerwasser in die Flaschen nachfließen kann und damit zwischen einer Messwertveränderung durch Standzeit bzw. Unterdruck und der Nachlieferung von Sickerwasser mit undefinierten Gehalten der zu untersuchenden Parameter nicht mehr unterschieden werden kann. Die Saugkerzen der beiden Messstellen (T-SW-2\_2, Vuk-Sw\_2) wurden während der Versuchszeit mit Reserveflaschen verbunden und die Proben zum regulären Monitoring-Termin im Juni 2004 entnommen.

Um den Einfluss der Standzeit auf mögliche Abbaueffekte oder sonstige Reaktionen am Beispiel eines physiko-chemischen Parameters zu dokumentieren, wurden zusätzlich 500 ml der am 12. Mai 2004 an der Messstelle Vuk-SW\_2 entnommenen Probe mit 50 mg/l Nitrat-Stickstoff versetzt und als Kontrollprobe in der Holzkiste der Saugkerzenanlage im Testfeld während der Versuchsdauer aufbewahrt. Mit der regulären Probennahme am 9. Juni 2004 wurde der Versuch beendet und eine abschließende Analytik der Proben durchgeführt.

Die Ergebnisse der analytischen Untersuchung der Sickerwasserproben und der Kontrollprobe zu Versuchsbeginn und nach drei Wochen Standzeit sind in Tab. 3.11 zusammengefasst.

**Tab. 3.11: Veränderung verschiedener physikalisch-chemischer Parameter in den Proben T-SW2\_2 und Vuk-Sw\_2 nach 3 Wochen Standzeit unter Unterdruck sowie in einer mit Nitrat angereicherten Kontrollprobe.**

Proben-Bez.		T-SW2-2		VK-SW-2		VK-SW_2 (Vorlage für Kontrolle)	Kontrolle: Vorlage aus VK-SW_2 vom 12.05.04 + NO <sub>3</sub> -N (50 mg/L)	
		Unterdruck 19.5.2004	Unterdruck 9.6.2004	Unterdruck 19.5.2004	Unterdruck 9.6.2004	Unterdruck 12.5.2004	Kontrolle 19.5.2004	Kontrolle 9.6.2004
Bedingungen								
Probennahme								
Nitrat	mg/l	6,6	9,8	5,4	8,8	9,7	60	58,5
Sulfat	mg/l	9	14	31	47	31	36	55
Leitfähigkeit	µS/cm	141	152	179	184	196	308	300
pH-Wert	-	6,5	6,8	6,7	7,1	6,4	6,4	7,0
Sickerwassermenge	ml	100	100	150	150	1.000	500	500

Für die Nitratgehalte (Abb. 3.43) zeigt sich, dass es bei den Proben des Testfeldes und des kontaminierten Vergleichsareals zu einer Anreicherung um 3-4 mg/l (Bestimmungsgrenze:

0,5 mg/l) kommt. Bezogen auf den Ausgangswert stellt dies zwar eine Erhöhung der Gehalte um 49 % bzw. 63 % dar, es ist aber davon auszugehen, dass sich diese Steigerung bei höheren Gehalten relativiert. Ein Grund für die ansteigenden Nitratgehalte könnte die zweistufige Umwandlung von Ammonium über Nitrit zu Nitrat (Nitrifikation) sein. Bei der Kontrollprobe ergeben sich nahezu identische Gehalte zwischen den Probennahmeterminen.

Für die Sulfatgehalte (Abb. 3.43) ergibt sich ein deutlicher Anstieg sowohl in den unter Unterdruck verbliebenen Proben als auch in der Kontrolle um 6-16 mg/l (T-SW2\_2: 56 %, Vk-SW\_2: 51 %, Kontrolle: 53 % höher als der Ausgangswert).

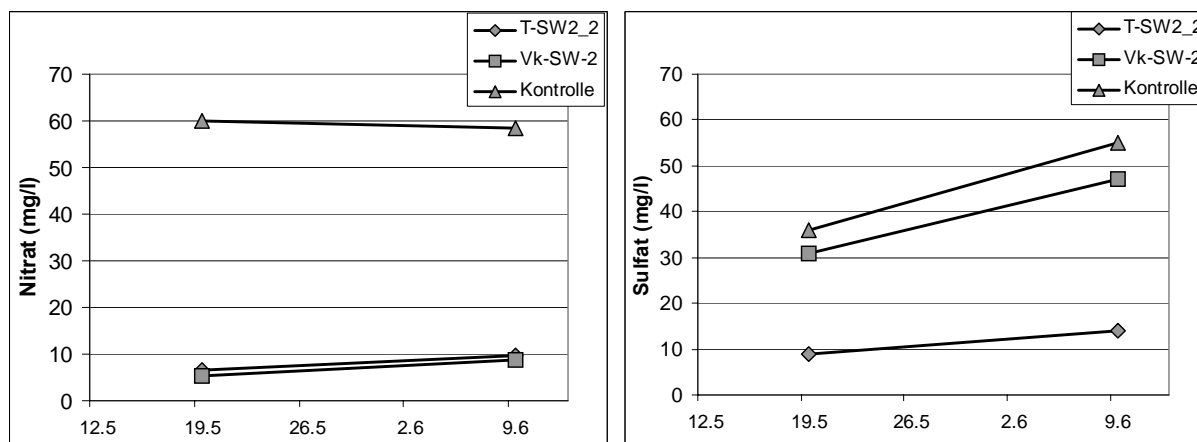


Abb. 3.43: Nitrat- und Sulfatgehalt (mg/l) zu Versuchsbeginn und nach 3 Wochen Standzeit.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 3.44) ist nur in den Proben T-SW2\_2 und Vk-SW\_2 ein Anstieg des Messwertes von 2 % bzw. 10 % zu verzeichnen. In der Kontrollprobe nimmt die Leitfähigkeit leicht ab. Der pH-Wert (Abb. 3.44) steigt in allen Proben um 0,2-0,6 pH-Einheiten an. Es ist anzunehmen, dass Ausgasungsprozesse von im Sickerwasser gelöstem Kohlendioxid zu der Verschiebung des Kohlensäuregleichgewichts und damit zu einem pH-Anstieg während der Versuchsdauer geführt haben.

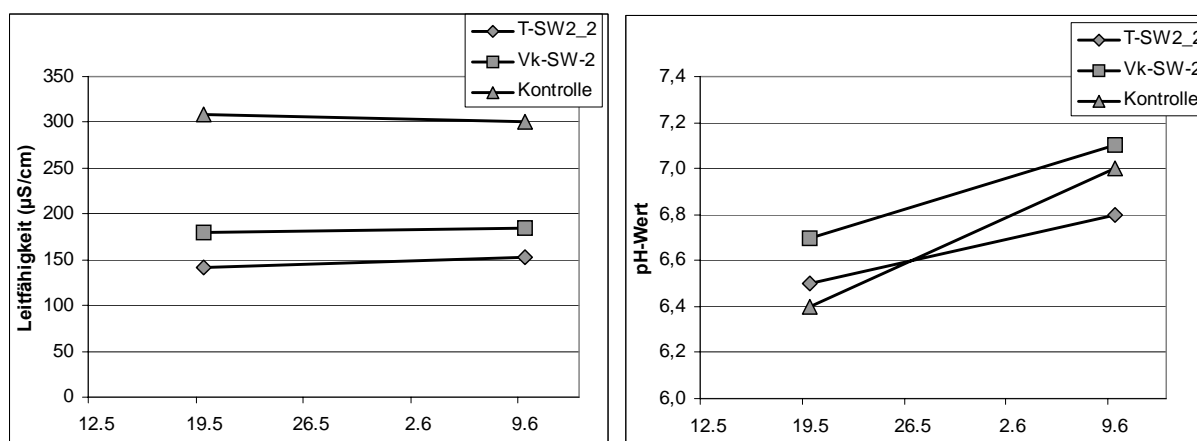


Abb. 3.44: Leitfähigkeit (µS/cm) und pH-Wert zu Versuchsbeginn und nach 3 Wochen Standzeit.

Mit dem zusätzlich durchgeführten Versuch hat sich gezeigt, dass es während eines Probennahme-Intervalles von 4 Wochen auch bei den physiko-chemischen Parametern zu

einer Veränderung der Messergebnisse sowohl durch die Standzeit als auch durch den an den Sammelflaschen angelegten Unterdruck kommt. Für den Parameter Leitfähigkeit sind die festgestellten Schwankungen nahezu zu vernachlässigen. Für die Parameter Nitrat, Sulfat und pH-Wert gaben die Ergebnisse erste Hinweise auf das Ausmaß dieser Veränderungen. Eine generelle quantitative Beurteilung dieser Effekte konnte allerdings anhand dieses einmalig durchgeführten Versuches nicht getroffen werden.

Der Einsatz von Edelstahlsaugkerzen am TL Schäferhof-Süd war damit für das Monitoring der Parameter Nitrat, Sulfat, Leitfähigkeit, Sauerstoff, pH-Wert und Säurekapazität bedingt geeignet.

### 3.3.2 Ergebnisse

Aufgrund der unter Kap. 3.3.1 beschriebenen technischen Probleme beim Betrieb der Sickerwassermessstellen und aufgrund geringer Sickerwassermengen liegen für viele Probennahme-Intervalle keine oder nur unvollständige Analysenergebnisse vor. Insbesondere bei den 4 m tiefen Messstellen ist die Datenlage sehr lückenhaft, so dass bei der Beschreibung der einzelnen Messparameter überwiegend die Ergebnisse der Messstellen in 2 m Tiefe diskutiert werden. Eine (statistische) Auswertung der Messwerte der 4 m tiefen Messstellen wurde aufgrund der geringen Datenmenge nicht vorgenommen. Frostbedingt liegen aus den Wintermonaten Dezember bis März keine Daten vor, so dass maximal drei Probennahme-Intervalle pro Jahr erreicht werden konnten. Die Ergebnisse des Monitorings sind in Anhang 4.1 tabellarisch zusammengestellt.

Die im Sickerwasser gemessenen **MKW**-Konzentrationen lagen bis September 2003 zumeist unter der Bestimmungsgrenze von 0,1 mg/l. Wegen der konstant niedrigen Gehalte wurde bei den Probennahmen im Jahr 2004 auf die weitere Bestimmung verzichtet. Aufgrund der im Bodeneluat (T-B7) gemessenen MKW-Konzentrationen bis 0,5 mg/l (0-4 m u. GOK) und der im Grundwasser (MP2) bestimmten Gehalte von 0,3-1,2 mg/l war von deutlich höheren Konzentrationen auch im Sickerwasser auszugehen.

Zusätzlich zur potenziellen Adsorption an der inneren Oberfläche der Saugkerzen ist davon auszugehen, dass sich die für Toluol nachgewiesenen Effekte (Kapitel 0) anteilig auch auf die Wiederfindungsrate der aliphatischen Kohlenwasserstoffe, insbesondere die flüchtigen Anteile, auswirkten und zu Minderbefunden führten. Nach den im durchgeführten Zusatzversuch gewonnenen Erkenntnissen können die zunächst an den Sickerwassermessstellen aufgenommenen Daten für **BTEX** und andere **Alkylbenzole** nicht bewertet werden. Die im Jahr 2002 aufgenommenen **Benzoessäure**-Gehalte lagen generell unter der 0,01 mg/l, weshalb im April 2003 beschlossen wurde, diesen Parameter aus dem Analysenplan zu streichen.

Zu dem Schluss, dass sich Saugkerzen nicht für die Gewinnung MKW-kontaminierter Sickerwässer eignen, kommen auch GIESE et al. (2003) in ihrer Untersuchung über die Nutzbarkeit von Saugkerzen für die Bewertung verschiedener Kontaminationssituationen im Altlastenbereich. Sie wiesen für MKW-Sickerwässer (C<sub>10</sub>- C<sub>25</sub>) erhebliche Stoffverluste durch Filtration und Adsorption beim Einsatz von Glassaugkerzen und in Filtrationstests (0,45µm-

CN-Filter) nach. Die Porung der am TL Schäferhof-Süd eingesetzten Edelstahlsaugkerzen ist vergleichbar (ca. 0,5 µm). KALBE et al. (2003) wiesen durch Adsorptions-/Desorptionsuntersuchungen mit einem Mitteldestillat ebenfalls starke Minderbefunde beim Einsatz von Keramik-, Glas und Edelstahlsaugkerzen nach.

Bei den Messdaten des Sickerwassers sind die Unterschiede zwischen den Messstellen im Testfeld und in den Vergleichsarealen zwar nicht so deutlich ausgeprägt wie bei den Bodenluftpegeln, aber für einzelne **physiko-chemische Parameter** lassen sich durchaus Trends bezüglich des mikrobiellen Schadstoffabbaus und gewisse Jahreszeiteffekte ablesen.

**Phosphat** wurde lediglich zu Beginn des Sickerwasser-Monitorings untersucht. Da über vier Messintervalle an allen Messstellen kein Phosphat nachgewiesen wurden, ist der Parameter aus dem Analysenplan herausgenommen worden.

Für den Parameter **Nitrat** zeigen sich ein Unterschiede bei den Messstellen im Testfeld und in den Vergleichsarealen sowie zwischen den Probennahme-Intervallen im Winter und Sommer (s. Abb. 3.45). Selbst unter Berücksichtigung einer durch die Standzeit und den Unterdruck hervorgerufenen Verschiebung der Messwerte, wie sie im dargestellten Zusatzversuch aufgetreten ist, sind diese Trends deutlich sichtbar. In den Vergleichsarealen liegen an den 2 m tiefen Messstellen Nitratgehalte von 10-130 mg/l vor. Im Testfeld konnte an der Messstelle T-SW1\_2 über den gesamten Monitoring-Zeitraum kein Nitrat im Sickerwasser nachgewiesen werden. An der im nördlichen Teil des Testfeldes liegenden Messstelle T-SW2\_2 sind seit Juni 2003 die Gehalte deutlich angestiegen (5-60 mg/l). An allen 4 m tiefen Messstellen ist kein Nitrat nachweisbar. Bei der Betrachtung der Messwerte im Boxplot-Diagramm (s. Abb. 3.46), das heißt ohne die zeitliche Auflösung und die starke Schwankungsbreite zu berücksichtigen, werden die Unterschiede zwischen den Messstellen im Testfeld und in den Vergleichsarealen noch deutlicher: Mit abnehmender Schadstoffkonzentration im Boden steigen die Nitratgehalte im Sickerwasser.

Die Nitratgehalte im Sickerwasser stehen offensichtlich in Zusammenhang mit dem Verbrauch von Nitrat als alternativem Elektronenakzeptor beim mikrobiellen Abbau der organischen Schadstoffe. Generell ist von einer Nitratbildung durch mikrobielle Nitrifikation im gut durchlüfteten Oberboden mit anschließender Auswaschung des leicht löslichen Nitrats und dem Eintrag in tiefer liegende Schichten auszugehen. Die Gesamtstickstoffgehalte in der obersten Bodenschicht lagen nach den Ergebnissen bei der Startuntersuchung im Herbst 2001 im Testfeld bei 400 mg/kg, im kontaminierten Vergleichsareal bei 250 mg/kg und im unkontaminierten Vergleichsareal bei 340 mg/kg. Bei der Endbeprobung 2004 wurden Gehalte in ähnlicher Höhe festgestellt (Testfeld bei 210 mg/kg, kontaminiertes Vergleichsareal: 400 mg/kg). Während im kontaminierten und unkontaminierten Vergleichsareal wegen der geringen Schadstoffkonzentrationen in 2 m Tiefe keine bzw. keine vollständige Nitratzehrung erfolgte, reichten im Testfeld die Schadstoffkonzentrationen in dieser Tiefe (MKW 0-2 m u. GOK: < 100-7.300 mg/kg) aus, um Nitrat soweit zu zehren, dass die Konzentration im Sickerwasser unter der Bestimmungsgrenze lag. An der etwas nördlicher liegenden Messstelle T-SW-2\_2 findet wahrscheinlich aufgrund zurückgehender Schadstoffkonzentrationen im Boden seit Sommer 2003 keine vollständige Nitratzehrung bei der mikrobiellen Umsetzung mehr statt.

Die oberflächige Nitratbildung erfolgt zumeist durch Umsetzung abgestorbener Pflanzenreste am Ende der Vegetationsperiode (SCHEFFER 2002) und unterliegt damit jahreszeitlichen Schwankungen, die sich nachfolgend auch auf die Nitratgehalte im Sickerwasser auswirken. Insbesondere in den Vergleichsarealen zeigt sich in 2 m Tiefe ein deutlicher Anstieg der Nitratgehalte zwischen den September- und Dezember-Messungen, während sie in den Sommermonaten wieder deutlich absinken.

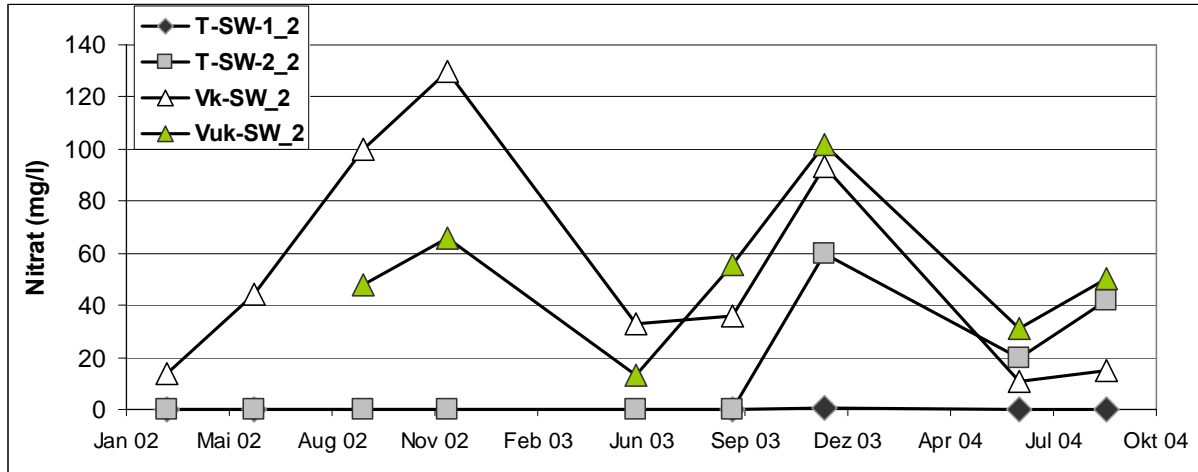


Abb. 3.45: Nitratgehalte (mg/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.

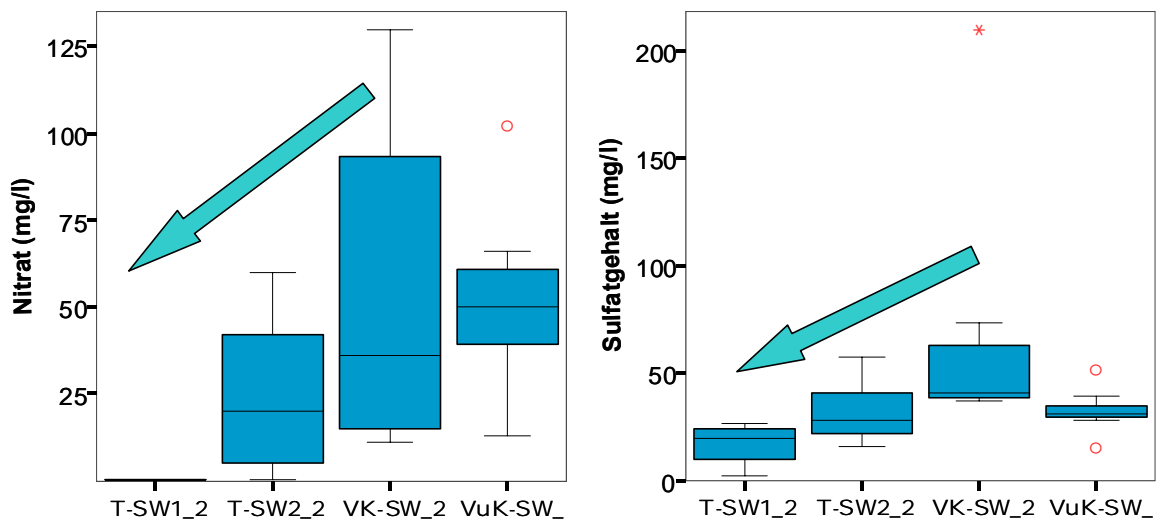


Abb. 3.46: Boxplot-Diagramm der Nitrat- und Sulfatgehalte an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.

Bei den **Sulfat**gehalten lassen sich in den Zeitreihen (s. Abb. 3.47) kaum Unterschiede zwischen den Messstellen erkennen. Im Testfeld wurden in den 2 m tiefen Messstellen 2-58 mg/l, im kontaminierten Vergleichsareal 37-73 mg/l (sowie einmalig 210 mg/l) und unkontaminierten Vergleichsareal 15-52 mg/l Sulfat gemessen. Bei den angegebenen

Werten muss unabhängig von den Schadstoffkonzentrationen aufgrund der Proben- nahmetechnik von leichten Überbefunden ausgegangen werden (vgl. Kap. 3.3.1.3). Der hauptsächliche Anteil des Sulfats im Sickerwasser ist sehr wahrscheinlich auf die Lösung sulfathaltiger Minerale im Boden zurückzuführen. Wie inhomogen diese Lösungsprozesse am Standort sind und damit zu unterschiedlich hohen Sulfatgehalten im Sickerwasser führen können, ist nicht abzuschätzen.

Unter Betrachtung der gesamten Messwerte im Boxplot-Diagramm (s. Abb. 3.46) fällt allerdings auf, dass die Median- und Interquartilwerte (Ausreißerwert der Messung am 02.12.02 wurde ausgeschlossen) im kontaminierten Vergleichsareal über denen der Mess- stellen T-SW2\_2 und T-SW1\_2 im Testfeld lagen. Eine Reduzierung der Sulfatgehalte an Messstellen, die im Bereich hoher Schadstoffkonzentrationen im Boden liegen, legt nahe, dass mikrobiologische Abbauprozesse unter Nutzung von Sulfat als alternativem Elektronen- akzeptor zu den Unterschieden zwischen den Messstellen beitragen. Sulfatreduktion findet ausschließlich unter streng anaeroben Bedingungen statt, von denen in der ungesättigten Bodenzone in zwei Meter Bodentiefe nicht unbedingt auszugehen ist. Allerdings geben die in der Bodenluft gemessenen Methangehalte im Testfeld von 0,2-0,3 Vol.% einen Hinweis darauf, dass sich zumindest teilweise anaerobe Milieubedingungen einstellen.

Einen Anstieg der Sulfatgehalte im Sickerwasser bringen CAPUANO & JOHNSON (1996) mit der Oxidation schwefelhaltiger Verbindungen aus den Mineralölkontaminationen in Ver- bindung. Diese Oxidation würde dementsprechend so lange ein aerobes Milieu herrscht Sulfat nachliefern. Ob am TL Schäferhof-Süd die Schwefelgehalte der Kontaminationen ausreichend waren, um nach Oxidation potenziell einen Einfluss auf die analysierten Sulfat- gehalte genommen zu haben, konnte nicht geklärt werden.

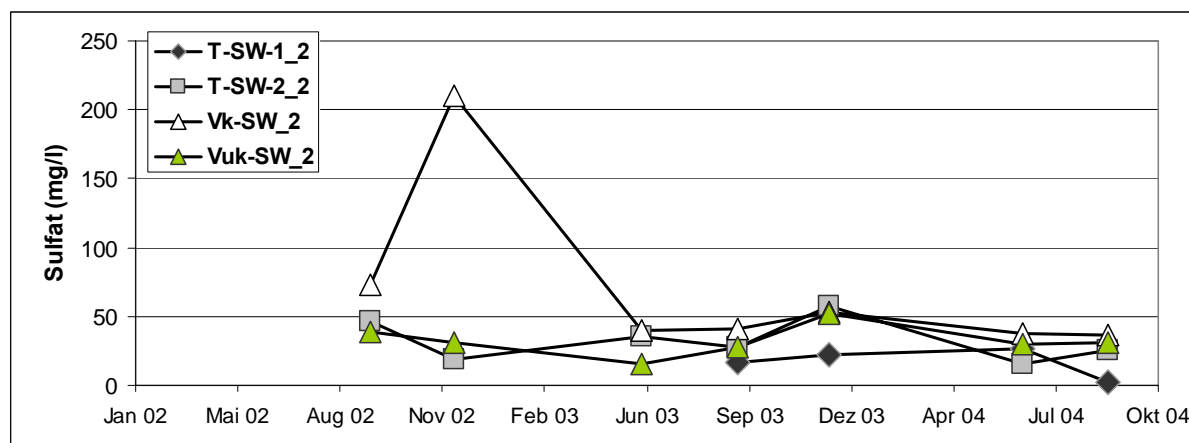


Abb. 3.47: Sulfatgehalte (mg/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.

Die elektrische **Leitfähigkeit** ergibt sich aus der Summe der im Wasser gelösten Ionen und wird am Standort somit stark durch die Gehalte von Hydrogenkarbonat, Nitrat und Sulfat beeinflusst. An der Testfeldmessstelle T-SW1\_2 sind die Leitfähigkeitswerte während des Monitorings von 815 auf 320  $\mu\text{S}/\text{cm}$  gefallen (vgl. Abb. 3.48). Die Leitfähigkeitswerte der weiteren Messstellen im Testfeld lagen zwischen 180 und 480  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (nur T-SW2\_2 dargestellt), im kontaminierten Vergleichsareal mit Ausnahme der Messung im Dezember 2002 (730  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) bei vergleichbaren Werten von 216 bis 430  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Der Auffüllungskörper

im Bereich des unkontaminierten Vergleichsareals führt hier zu mehrfach höheren Werten (790-1360  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Die Leitfähigkeitsmessung im Sickerwasser ist kaum beeinflusst durch Probennahmetechnik.

Aufgrund häufig zu geringer Sickerwassermengen konnten die Messreihen der **Hydrogenkarbonat**gehalte (Säurekapazität) zum Teil nur lückenhaft aufgenommen werden. Im Testfeld sind die Hydrogenkarbonatgehalte an der Messstelle T-SW1\_2 von März 2002 bis September 2004 von 6,5 auf 3,3 mmol/l gefallen (Abb. 3.49). An der Testfeldmessstelle T-SW2\_2 und im kontaminierten Vergleichsareal liegen schwankende Gehalte zwischen 0,5 und 2,1 mmol/l vor. Im unkontaminierten Vergleichsareal wurden analog der Leitfähigkeit mehrfach höhere Leitfähigkeitswerte bestimmt (7,6-13,5 mmol/l). Die Auswirkungen der Probennahmetechnik wurden für den Parameter Hydrogenkarbonat nicht getestet. Aufgrund einer anzunehmenden Verschiebung des Kohlensäuregleichgewichts in der Sickerwasserprobe ist jedoch eine Einflussnahme der Standzeit auf die Messwerte anzunehmen.

Über den Messzeitraum gesehen schwanken die Leitfähigkeitswerte und die Hydrogenkarbonatgehalte an allen Messstellen in mehr oder weniger starkem Maße (Abb. 3.48, Abb. 3.49). Ein jahreszeitlicher Trend ist nicht zu erkennen. Die Leitfähigkeit und die Hydrogenkarbonatgehalte sind signifikant positiv miteinander korreliert ( $R=0,995$ ).

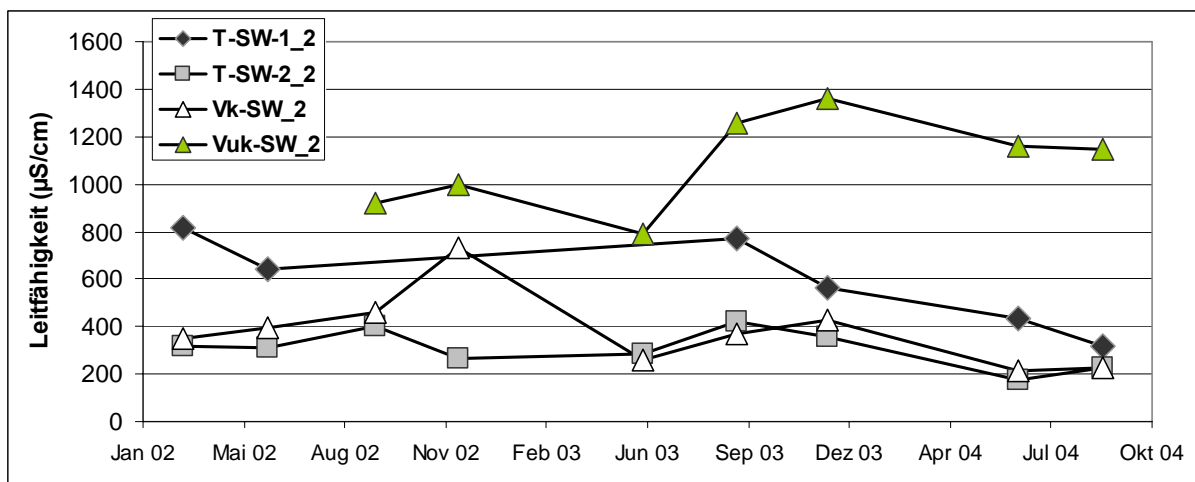


Abb. 3.48: Leitfähigkeitswerte ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.

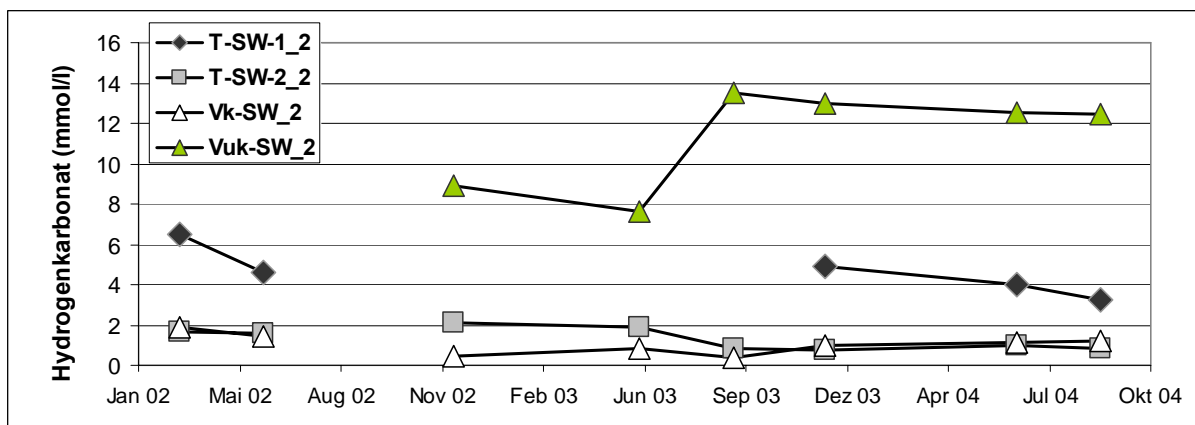
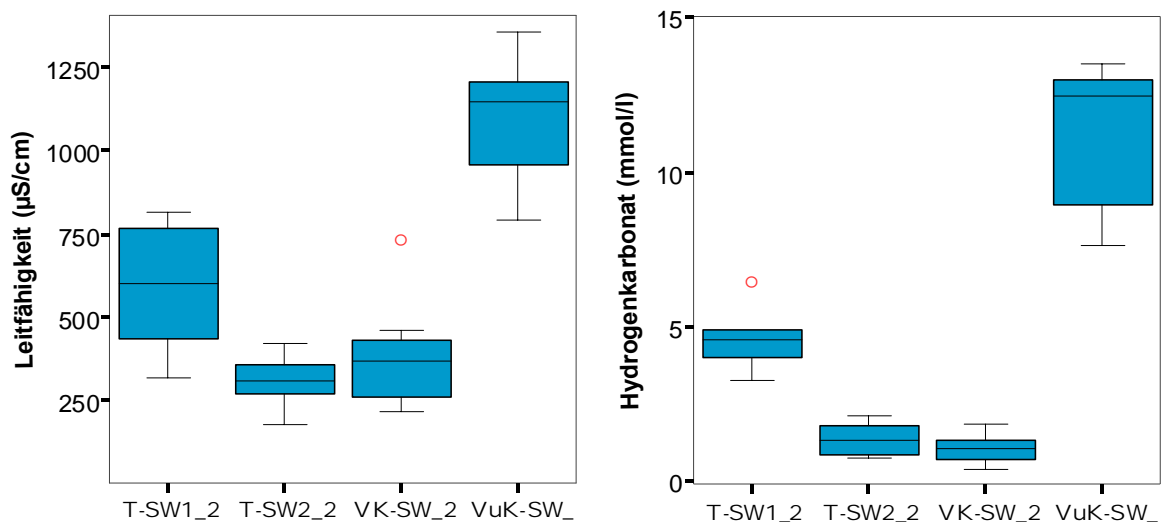


Abb. 3.49: Hydrogenkarbonatgehalte (mmol/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.



Im Boxplot-Diagramm (Abb. 3.50) zeigt sich, dass das Sickerwasser im unkontaminierten Vergleichsareal aufgrund des Auffüllungsbereiches deutlich mineralisierter ist als im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal. An der Messstelle T-SW1\_2 liegen die Messwerte von Hydrogenkarbonat und Leitfähigkeit über denen von T-SW2\_2 und V<sub>k</sub>-SW\_2. Erhöhte Hydrogenkarbonatgehalte können einen Hinweis auf mikrobielle Abbauprozesse geben, da das beim Abbau gebildete Kohlendioxid zu einer Aufhärtung von Sicker- und Grundwasser führen kann. Gleichzeitig muss allerdings die abiotische Kohlendioxidproduktion in karbonathaltigen Böden berücksichtigt werden. Am TL Schäferhof-Süd liegen im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal insgesamt sehr geringe Karbonatanteile im Boden (< 10 mg/kg) vor, im unkontaminierten Vergleichsareal lassen sich die deutlich höheren Hydrogenkarbonatgehalte im Sickerwasser durch den Karbonatanteil im Boden (1.000 mg/kg CaCO<sub>3</sub>) erklären (vgl. Kap.3.1.2.5). Da der geogene Hintergrund im Bereich des Testfeldes und des kontaminierten Vergleichsareals nahezu karbonatfrei ist, könnten die Unterschiede zwischen den Messstellen in den unterschiedlich hohen Schadstoffgehalten im Boden und damit einer differentiellen Kohlendioxidproduktion aus potenziellen Abbauprozessen liegen.



**Abb. 3.50: Boxplot der Leitfähigkeit (µS/cm) und der Hydrogenkarbonatgehalte (mmol/l) an den 2 m tiefen Messstellen.**

Die **pH-Werte** der Sickerwasserproben (vgl. Abb. 3.51) lagen im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal meist im neutralen bis leicht basischen Milieu (6,5-7,5), das optimale Voraussetzungen für den Schadstoffabbau bietet. Da im Bereich des Testfeldes karbonatarmer Sandböden anstehen, muss allerdings von einem originär deutlich tieferen pH-Wert des Sickerwassers im Boden ausgegangen werden. Dies zeigen auch die pH-Werte im Bodeneluat, die zum Zeitpunkt der Abschlussuntersuchung immer noch etwa 1-2 pH-Einheiten (Testfeld 4,9-5,7) darunter lagen. Eine Erklärung hierfür bietet die Standzeit des Sickerwassers in den Sammelflaschen (vgl. Kap. 3.3.1.3). Es ist anzunehmen, dass Ausgasungsprozesse von gelöstem Kohlendioxid während der Verweildauer des angesaugten Wassers bis zur Probennahme unter beständigem Unterdruck zu einer pH-

Erhöhung im Wasser führte. Damit könnte es zu einer Verschiebung des pH-Wertes des ursprünglich sauren Sickerwassers im Boden zu einem neutralen pH-Wert in den gemessenen Proben gekommen sein. Von einer generellen Anreicherung des Sickerwassers mit Kohlendioxid kann aufgrund der hohen Kohlendioxidgehalte in der Bodenluft ausgegangen werden. Im kontaminierten Vergleichsareal machen sich aufgrund der geringeren Kohlendioxidproduktion die Auswirkungen auf die pH-Verschiebung im Sickerwasser nicht so stark bemerkbar wie an den Messstellen im Testfeld (vgl. Abb. 3.52). Das unkontaminierte Vergleichsareal weist gegenüber dem Testfeld und dem kontaminierten Vergleichsareal insgesamt höhere pH-Werte auf (7,5-8), die aus den Karbonatanteilen im Auffüllungskörper resultieren. Der pH-Wert unterliegt an allen Messstellen Schwankungen, die wahrscheinlich nicht in Zusammenhang mit den Schadstoffgehalten im Boden stehen, sondern auch hier vielmehr von der Verweilzeit des Sickerwassers in den Sammelflaschen bis zur Probennahme abhängen (vgl. Kap. 3.3.1.3).

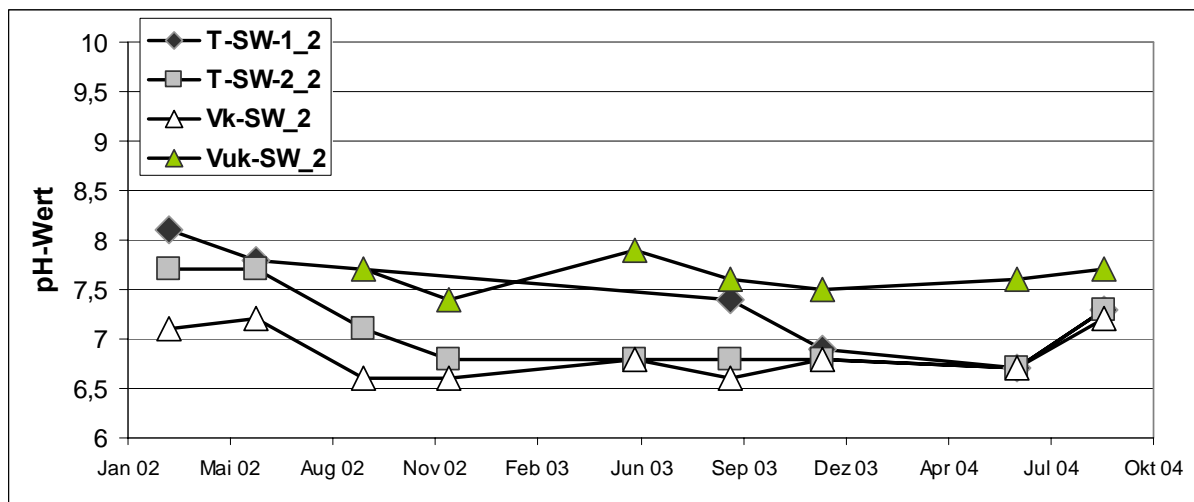


Abb. 3.51: pH-Werte an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.

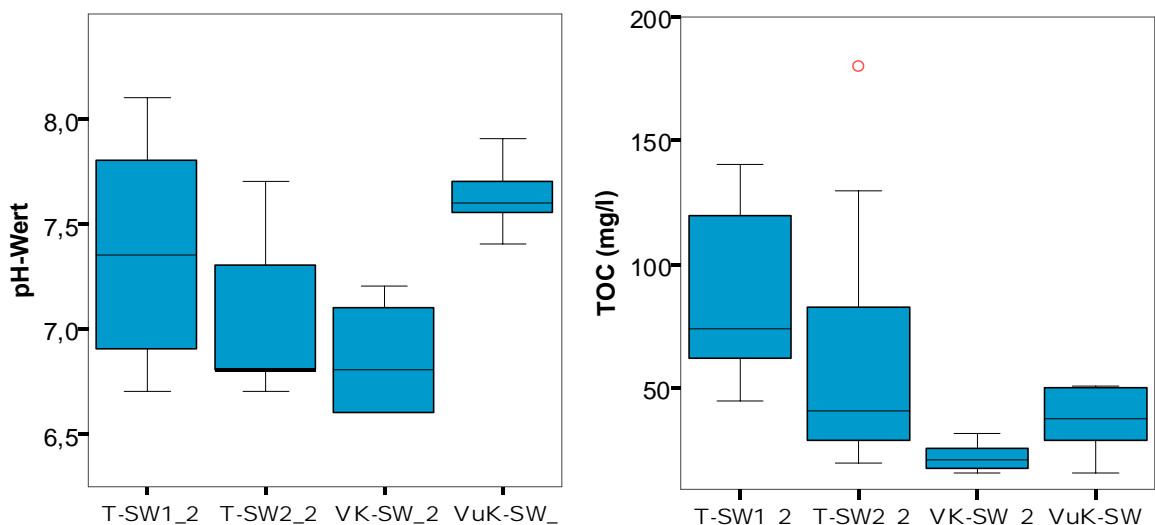
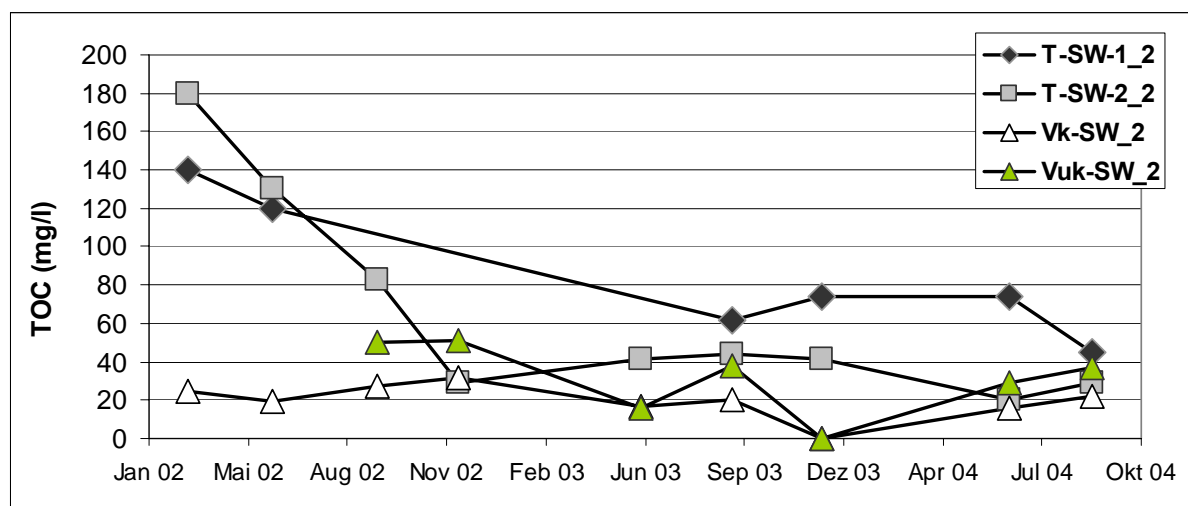


Abb. 3.52: Boxplot des pH-Wertes und der TOC-Gehalte (mg/l) an den 2 m tiefen Messstellen.

Beim im Sickerwasser gemessenen organischen **Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC – Total Organic Carbon, DOC – Dissolved Organic Carbon)** ist im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal wiederum die Abhängigkeit der Gehalte von der Schadstoffkontamination im Boden erkennbar (Abb. 3.52). Der TOC setzt sich zusammen aus den natürlichen organischen Verbindungen (Humusanteil) und den organischen Schadstoffverbindungen. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Bodenart und der fehlenden bis geringen Kontamination im unkontaminierten Vergleichsareal ist anzunehmen, dass dort der TOC-Gehalt im Sickerwasser hauptsächlich aus dem Humusanteil im Boden resultiert. In den humusarmen Böden des Testfeldes und des kontaminierten Vergleichsareals dagegen ist als TOC-Quelle von den Schadstoffen im Boden auszugehen.

Im Testfeld war insbesondere im Jahr 2002 eine starke Abnahme der Gehalte an allen Messstellen zu verzeichnen (Abb. 3.53). Im Frühjahr 2002 wurden noch TOC-Gehalte von 140-180 mg/l im Sickerwasser analysiert, im Frühjahr 2003 weniger als die Hälfte und im Herbst 2004 nur noch 30-45 mg/l. Im kontaminierten Vergleichsareal schwankten die Gehalte an den verschiedenen Messterminen zwischen 16 und 32 mg/l, im unkontaminierten Vergleichsareal zwischen 15 und 52 mg/l. An allen Messstellen lag der gemessene Kohlenstoffgehalt komplett in gelöster Form vor, was sich in DOC-Gehalten der filtrierten Proben in Höhe des TOC-Gehaltes in den unfiltrierten Proben ausdrückte.

Wie stark die TOC-Gehalte im Sickerwasser durch Adsorptionsprozesse am Saugkerzenmaterial beeinflusst sind, wurde im Projektverlauf nicht geklärt. Dass die bei GIESE et al. (2003) beschriebenen Filtrations- und Adsorptionseffekte sich auch auf die TOC-Gehalte im Sickerwasser auswirken, ist nicht auszuschließen. Die TOC-Abnahme im Sickerwasser könnte demnach auch als zunehmender Stoffverlust durch eine mit der Zeit verstärkte Adsorption an der Saugkerze interpretiert werden.

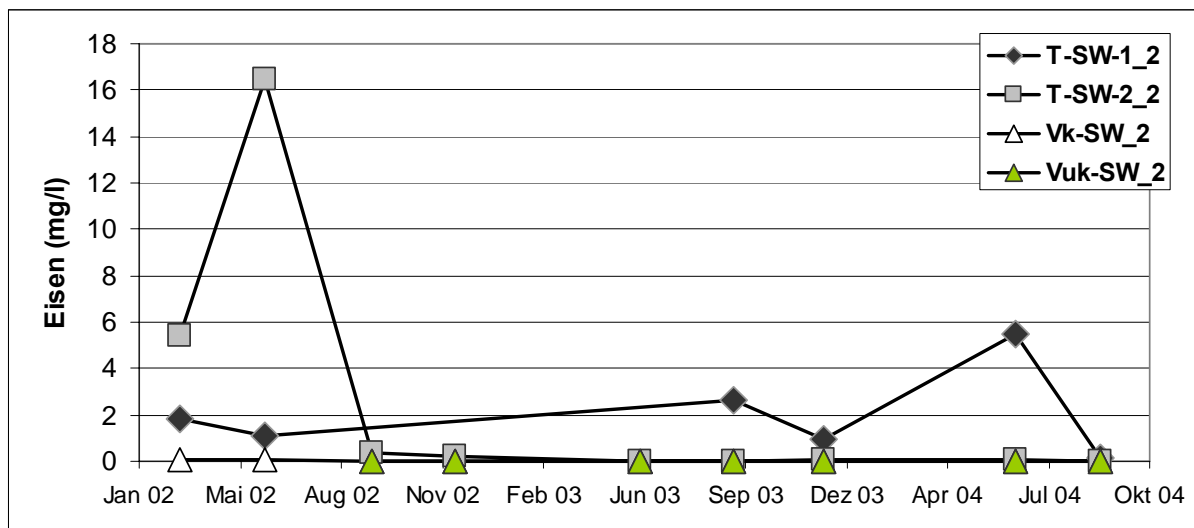


**Abb. 3.53: TOC-Gehalte (mg/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.**

Die im Sickerwasser gemessenen **Eisengehalte** sind insgesamt gering. An der Testfeldmessstelle T-SW1\_2 wurden variierende Gehalte zwischen 0,1 und 5,5 mg/l gemessen (Abb. 3.54). An der Messstelle T-SW2 wurden im Frühjahr und Sommer 2002 in 2 und 4 m Tiefe noch 5,5 bzw. 16,5 mg/l gemessen, dann sanken die Werte im September

bzw. Dezember 2002 schlagartig unter 0,1 mg/l. In den Vergleichsarealen lagen die Konzentrationen zumeist unter der Bestimmungsgrenze.

Die niedrigen Gehalte gelösten Eisens im Sickerwasser lassen sich auf die Ausfällungen von Eisenhydroxiden in den Schläuchen und in den Saugkerzen zurückführen (vgl. Kap. 3.3.1.1). Die bei der Probennahme im Dezember 2003 zusätzlich durchgeführte Eisen(II)-Bestimmung zeigte an der Messstelle T-SW1\_2 im Testfeld, dass den überwiegenden Anteil des Eisengehaltes das zweiwertige Eisen ausmacht. Das heißt, dass das dreiwertige, oxidierte Eisen fast vollständig ausgefällt wurde und nur der reduzierte zweiwertige Anteil in Lösung verblieben ist. An den weiteren beprobten Messstellen lagen die Messwerte unter der Bestimmungsgrenze. Ob die Unterschiede zwischen der Messstelle im stark kontaminierten Bereich des Testfeldes und den anderen Messstellen lediglich auf variierende Eisengehalte im Boden oder auf eine erhöhte Eisen(II)-Freisetzung im Zuge von Reduktionsprozessen beim biologischen Schadstoffabbau basieren, konnte nicht geklärt werden.



**Abb. 3.54: Eisengehalte (mg/l) an den Sickerwassermessstellen in 2 m Tiefe.**

Die an den Messstellen gesammelte **Sickerwassermenge** war weder mit der Niederschlagsmenge im Probennahme-Intervall noch zeitlich versetzt mit dieser korrelierbar. Nach HLUG (2001) kann die Sickerwassermenge einem starken kleinräumigem Wechsel und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sein. Neben dem Parameter Niederschlagsmenge wirkten sich Einflussgrößen wie die Wasserspeicherung im Boden, die Evapotranspiration des Bewuchses auf dem Testfeld und den Vergleichsarealen (Gräser, krautartige Pflanzen) und der oberflächige Abfluss auf die Sickerwassermenge aus. In der Regel ist die Versickerung zwischen Dezember und Mai am höchsten und zwischen Juli und September am geringsten (SCHEFFER 2002).

Die am TL Schäferhof-Süd in den verschiedenen Messstellen festgestellten Sickerwassermengen spiegelten diesen Jahresverlauf wahrscheinlich auch aufgrund der extremen Unterschiede in den Niederschlagsmengen in den Jahren 2002 und 2003 (vgl. Kap. 3.5) so nicht wider. Die zum Ende der Probennahme-Intervalle über drei Monate gesammelten Sickerwassermengen waren in den 2 m tiefen Messstellen tendenziell im Juni und September am höchsten (s. Abb. 3.55). Die Streuung der Sickerwassermenge an den

verschiedenen Messstellen zeigt sich in 2 m Tiefe insbesondere im September, in 4 m Tiefe im Juni, wobei lediglich die Probenmenge am Ende des dreimonatigen Probennahme-Intervalles in die Auswertung eingeflossen ist. Nach der vierwöchigen Sammelphase variierten die Probenmengen deutlich stärker. Im unkontaminierten Vergleichsareal lag die Versickerung aufgrund des größeren Porenvolumens im Auffüllungskörper deutlich höher als im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal.

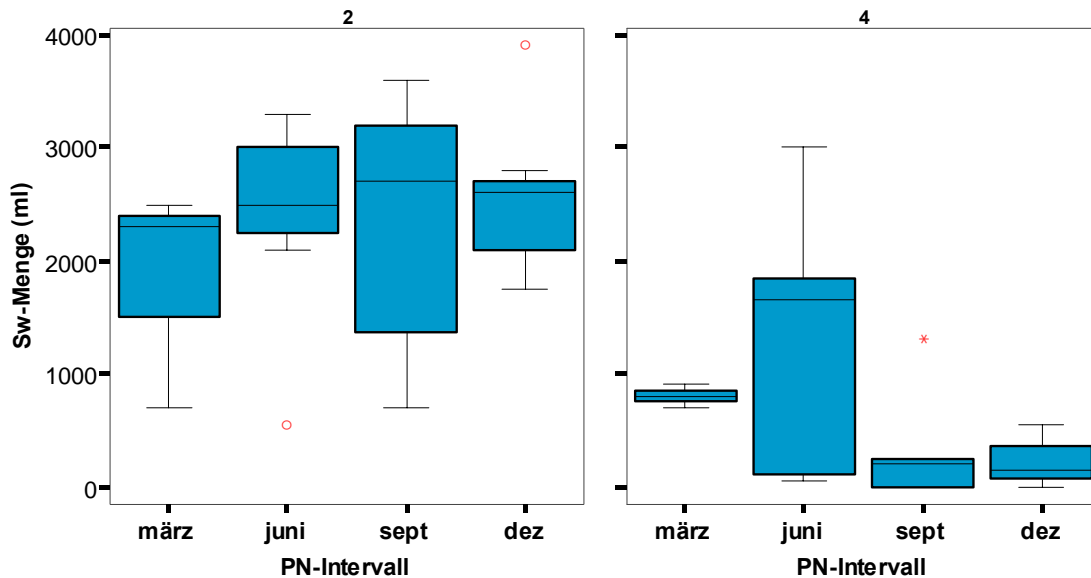


Abb. 3.55: Boxplot der Sickerwassermenge zum Ende des Probennahme-Intervalles an den 2 m und 4 m tiefen Messstellen.

### 3.3.3 Interpretation der Ergebnisse

Die BBodSchV (1999, § 4, Abs.3) empfiehlt für die Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser eine Sickerwasserprognose durchzuführen und darüber zu einer Abschätzung der Stoffkonzentrationen und Frachten im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (Übergang ungesättigte Bodenzone - gesättigte Bodenzone) zu gelangen. Als Methoden für eine Abschätzung stehen Rückschlüsse aus Grundwasseruntersuchungen, in-situ-Verfahren (Saugkerzen, Direct-Push-Verfahren, Bodenluftuntersuchungen) und Bodenuntersuchungen (Eluate, Extraktionen, Säulenversuche) zur Verfügung (LABO 2003, HLOG 2001, UNTERARBEITSGRUPPE (UAG) "SICKERWASSER" DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE 2001).

Um Sickerwasser aus einem ungestörten, nicht durch die Probenaufbereitung beeinflussten Boden zu gewinnen, fiel im Forschungsprojekt die Entscheidung, für in-situ Untersuchungen Edelstahlsaugkerzen zu verwenden. Das Kerzenmaterial sollte nach dem damaligen Forschungsstand für die Bestimmung organischer Schadstoffe im Sickerwasser geeignet

sein. Um die inhomogene Schadstoffsituation im Boden zu berücksichtigen, wurden allein im Testfeld vier Edelstahlsaugkerzen in zwei verschiedenen Tiefen eingebaut.

Den Vorteilen dieser Probengewinnung, wie der direkte Bezug der Ergebnisse auf die am Standort vorherrschenden Feldbedingungen und auf die jahreszeitlichen Einflussfaktoren, standen in der praktischen Umsetzung am TL Schäferhof-Süd verschiedene Nachteile entgegen:

- Die Sickerwassermengen waren aufgrund technischer Probleme, mangelnden Niederschlägen oder lang anhaltender Frostphasen oft nicht ausreichend für die Probengewinnung und die analytische Bestimmung der vorher im Analysenplan festgelegten Parameter.
- Durch Ablagerungen von Eisenhydroxiden in den Saugkerzen und Schläuchen konnte an einigen Messstellen (bis zum erneuten Einbau) kein Sickerwasser gewonnen werden. Die Eisenhydroxidbeläge erhöhten mit großer Wahrscheinlichkeit die Sorption organischer Schadstoffe am verwendeten Material.
- Die Probennahme mittels Saugkerzen eignete sich nicht für die Ermittlung der Schadstoffgehalte im Sickerwasser (vgl. GIESE et al. 2003). Die gemessenen MKW-Konzentrationen entsprachen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht denen des Sickerwassers im Boden (Sorption, Verflüchtigung, Abbau während der Standzeiten). Die für die MKW-Analytik benötigte Probenmenge (500-1000 ml) erforderte auf Grund geringer Sickerwassermengen lange Probennahmezeiträume.
- Der Austrag leicht flüchtiger (leicht löslicher) Schadstoffe mit dem Sickerwasser konnte aufgrund der geringen Wiederfindungsraten für leicht flüchtige Schadstoffe in den Probensammelgefäßen nicht beurteilt werden (Verflüchtigung durch Unterdruck und Probennahme, Schadstoffabbau während der Standzeiten).
- Die Probennahmetechnik führte zu Messunsicherheiten bei der Analyse von MKW und insbesondere leicht flüchtigen Schadstoffen.
- Die Milieubedingungen des Sickerwassers wurden durch die Probennahme so verändert, dass empfindliche Parameter, wie zum Beispiel der pH-Wert (vgl. LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG 2004), starken Messwertverschiebungen ausgesetzt waren und nur geringe Rückschlüsse auf die originären Milieubedingungen zuließen.
- Die lückenhaften Datenreihen, insbesondere bei den 4 m tiefen Messstellen, erschwerten eine Beurteilung der vorliegenden Ergebnisse sowohl in Bezug auf deren normale Messwertschwankung als auch in Bezug auf die Einflussnahme der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone.
- Für die Gewinnung des Sickerwassers mittels Saugkerzen war ein hoher technischer und personeller Arbeitsaufwand für die Einrichtung der Messstellen und die monatliche Probennahme erforderlich, der nicht im Verhältnis zu den gewonnenen Ergebnissen stand.

Nach den aufgeführten Einschränkungen waren die Parameter MKW, BTEX, Alkylbenzole und Benzoessäure für die Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse über ein Sickerwasser-Monitoring ungeeignet. Für die Abschätzung der MKW-Gehalte im Sickerwasser bietet sich daher an, auf die Analysenergebnisse von Bodeneluat, wie sie bei der Start- und Abschlussuntersuchung im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal durchgeführt wurden, und auf die Gehalte im Grundwasser zurückzugreifen. Zu beachten ist, dass aufgrund des hohen Wasser-zu-Boden-Verhältnisses bei der Eluat-Herstellung die

gelösten organischen Schadstoffgehalte deutlich über denen bei normalen Feldbedingungen liegen können.

Im so genannten "worst-case", bei dem das im Eluat gemessene Maximum von 0,5 mg/l MKW angenommen wird, ergäbe sich bei einer Grundwasserneubildungsrate von 350 mm/a (entsprechend  $350 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ) demnach ein maximaler MKW-Eintrag ins Grundwasser von  $175 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ . Die Eluatwerte des gealterten Schadensherdes im Testfeld liegen deutlich unter der von GELLER (2001) angegebenen Gesamtwasserlöslichkeit von Mitteldestillaten wie Dieselöle und Heizöle (5-20 mg/l).

BTEX und Alkylbenzole weisen eine höhere Löslichkeit als die langkettigen Aliphate eines Dieselkraftstoffes auf. Der Eintrag ins Grundwasser ist allerdings durch die Sättigungskonzentration im Sickerwasser limitiert. Die Berechnung der Konzentrationen leicht flüchtiger Schadstoffe im Sickerwasser über die Gehalte in der Bodenluft wurde bereits ausführlich in Kapitel 3.2.3 dargestellt. Die nach dieser Methode berechneten BTEX-Konzentrationen im Sickerwasser lagen zwischen 400 und 1.500  $\mu\text{g/l}$ . Hieraus ergibt sich bei gleicher Grundwasserneubildungsrate von  $350 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$  eine BTEX-Fracht von 150.000 bis 500.000  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$  (Anhang 3.2).

Für die sonstigen im Sickerwasser bestimmten Parameter müssen bei der Beurteilung potenzielle Messwertveränderungen durch die Probennahmetechnik berücksichtigt werden und eine Prüfung der Plausibilität der Daten erfolgen. Trotz dieser Einschränkungen in der Datenqualität konnten Messwertunterschiede zwischen Testfeld und kontaminiertem Vergleichsareal beobachtet werden, die sich auf die Höhe der Schadstoffkonzentrationen im Boden zurückführen lassen. Im unkontaminierten Vergleichsareal nahm der aufgefüllte Boden entscheidenden Einfluss auf die Messdaten.

Als Schlüsselparameter für natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse bestätigten sich die Nitrat- und Sulfatgehalte sowie der pH-Wert und die Hydrogenkarbonatgehalte. Die Nitratgehalte im Sickerwasser und - in Abhängigkeit vom Redoxmilieu - auch die Sulfatgehalte sind durch die Höhe der Schadstoffkonzentrationen im Boden beeinflusst und lassen insbesondere im Vergleich unterschiedlich stark kontaminierter Böden qualitative Rückschlüsse auf den mikrobiellen Abbau in der ungesättigten Bodenzone zu. Die Messung des pH-Wertes stellt eine entscheidende Voraussetzung zur Beurteilung der Milieubedingungen im Sickerwasser bzw. in der ungesättigten Bodenzone dar. Aufgrund der durch die Probennahmetechnik bedingten potenziellen Messwertverschiebungen können die pH-Werte im Sickerwasser allerdings zu Fehleinschätzungen führen, so dass eine zusätzliche Bestimmung des pH-Wertes im Bodeneluat für die Beurteilung der Milieubedingungen unerlässlich ist.

Das Sickerwasser-Monitoring mittels Saugkerzen hat am TL Schäferhof-Süd keine ausreichende Datenlage für die Beurteilung der natürlichen Abbauprozesse in der ungesättigten Bodenzone erbracht. An anderen Standorten, die aufgrund des Bodentyps oder der Niederschlagsmenge erwarten lassen, dass eine Sickerwassergewinnung in ausreichendem Maß erfolgt, ist abzuwägen, ob der aufwändige Betrieb von Saugkerzen in Relation zur Qualität der Messergebnisse steht, die gewonnen werden sollen.

## 3.4 Grundwasser

### 3.4.1 Untersuchungsmethoden und Analytik

#### 3.4.1.1 Einrichtung der Messstellen

Im November 2001 wurden am Standort TL Schäferhof-Süd zusätzlich zu den vier bereits bestehenden von 4 bis max. 12 m u. GOK durchgehend verfilterten Grundwassermessstellen B 8, B 11, B 12 und B 13 vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung für sein Ressortforschungsvorhaben die Grundwassermessstellengruppen MP 1 bis MP 5 (1 im Anstrom, 1 im Testfeld, 3 im Abstrom des Testfeldes) eingerichtet (s. Anhang 1.1). Für jede Messstellengruppe wurden zwei Einzelbohrungen bis in 7 m bzw. 10 m u. GOK abgeteuft und die Messstellen mit Filterstrecken in 4-7 m bzw. 9-10 m Tiefe ausgebaut. Die Ausbaudaten der einzelnen Messstellen sind in Tab. 3.12 dargestellt.

Tab. 3.12: Ausbaudaten der Grundwassermessstellen.

Messstelle	Lokalität der GWM vs. Eintragsherd	GOK (m NN)	ROK (m NN)	Bohrteufe (m)	Filterstrecke (m)
B 8	mittlerer Abstrom		29,15	12	4-12
B 11	weiter Abstrom		29,7	10	4-10
B 12	weiter Abstrom		29,84	10	4-10
B 13	weiter Abstrom		29,55	10	4-10
MP 1 flach	Anstrom	29,00	29,5	7	4-7
MP 1 tief				10	9-10
MP 2 flach	Testfeld (Haupteintragsherd)	28,59	29,09	7	4-7
MP 2 tief				10	9-10
MP 3 flach	naher Abstrom	28,21	28,71	7	4-7
MP 3 tief				10	9-10
MP 4 flach	naher Abstrom	58,22	28,72	7	4-7
MP 4 tief				10	9-10
MP 5 flach	weiter Abstrom	27,59	28,09	7	4-7
MP 5 tief				10	9-10

Die Einrichtung der Grundwassermessstellen (GWM) trägt dem am Standort vorhandenen Schadstoffspektrum Rechnung. Die im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Kontaminanten MKW und BTEX weisen eine geringere Dichte als Wasser auf, wodurch von einem Aufschwimmen auf der Grundwasseroberfläche bzw. von einem Lösen in den oberen Bereichen des Grundwasserraumes ausgegangen werden kann. Durch das Einrichten von Messstellengruppen mit zwei versetzt eingebauten Filterstrecken ist eine Untersuchung der vertikalen Schadstoffverteilungen im Grundwasser möglich. Die obere Filterstrecke von



4 m u. GOK bis 7 m u. GOK macht Probennahmen bei unterschiedlichen GW-Ständen (ca. 4,5 m u. GOK bis 5,5 m u. GOK im Untersuchungsgebiet) möglich. Die untere Filterstrecke von 9 m u. GOK bis 10 m u. GOK dagegen erlaubt Untersuchungen der Schadstoff-Beeinflussung der tieferen Kompartimente des Grundwassers. Um die qualitativen Anforderungen bei den hydrochemischen Untersuchungen zu erfüllen, wurden Zweier-Messstellengruppen mit jeweils getrennten Bohrungen angelegt. Die Messstellengruppen sind entlang der zum Projektbeginn bestimmten zentralen Strömungslinie der Schadstofffahne angeordnet (vgl. Abb. 3.56).

### **3.4.1.2 Probennahme und Analytik**

Im Zeitraum von Januar 2002 bis August 2004 wurden an den GWM des TL Schäferhof-Süd regelmäßig Abstichmessungen durchgeführt und Grundwasserproben entnommen. Diese wurden auf physikochemische Parameter, hydrochemische Hauptinhaltsstoffe, Schadstoffgehalte und deren Abbauprodukte untersucht. Der Hauptteil der Analytik erfolgte gemäß der in Tab. 3.9 (Kap. 3.3.1.2) aufgeführte Normen und Methoden. Da für die Analytik der Metabolite keine Prüfungsvorschrift nach DIN existiert, wurde die Analytik an der Universität Frankfurt a.M. gemäß dem Hausverfahren, welches in Anhang 5.5 dokumentiert ist, durchgeführt. Weiterhin wurden die Methanproben durch die Dr. Weßling Laboratorien GmbH in Altenberge nach deren Hausmethode (Anhang 5.6) untersucht.

Insgesamt wurden neun GWM untersucht, wobei vier Messstellen durchgehend verfilterte Brunnen (B) darstellen und es sich bei den anderen fünf um Messstellengruppen (MP) handelt. Von Januar 2002 bis Dezember 2002 fand die Beprobung aller Messstellen statt, wobei die Brunnen im Halbjahresturnus und die Messstellengruppen vierteljährlich untersucht wurden. Ab März 2003 wurden gemäß dem Untersuchungskonzept nur noch die Messstellengruppen MP 1-5 regelmäßig beprobt. Im Juni 2003 wurden einmalig zusätzliche Proben an den Messstellen B 8 und B 13 entnommen, wobei durch das gleichzeitige Pumpen in zwei (den Filterstrecken der MP-Messstellen angepassten) Tiefen versucht wurde, horizontierte Proben zu entnehmen. Da jedoch zwischen den einzelnen Filterlagen der Messstellengruppen keine Sperrschichten eingeschaltet sind, ist eine horizontierte Probennahme in den durchgehend verfilterten Messstellen nicht möglich.

Als Probennahmegerät wurde in allen GWM eine Tauchpumpe der Firma GRUNDFOS (Typ: MP 1) eingesetzt. Diese wird mit Hilfe von 2 m langen PVC-Aufsatzrohren in Tiefen von 6,5 m (flach verfilterte Messstelle) und 9,5 m (tief verfilterte Messstelle) in die Messstelle eingeführt. Die Probennahme erfolgt nach LABO (2002) bei konstanten Messwerten der Leitparameter Temperatur ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ), pH-Wert ( $\pm 0,1$ ), Leitfähigkeit ( $\pm 10\%$ ) und Sauerstoffgehalt ( $\pm 0,2\text{ mg/l}$ ) über eine Messzeit von 10 Minuten. Die Förderdauer vor der Probennahme betrug jeweils ca. 20 Minuten. In dieser Zeit wird ungefähr das 3-fache Wasservolumen im Filterbereich der Messstelle ausgetauscht und das geförderte Wasser entspricht dem des umgebenden Grundwasserkörpers. Das abgepumpte Wasser wurde in ausreichender Entfernung zur Messstelle in den Unterstrom abgeleitet.

Für die Bestimmung der Hauptelemente und der Kontaminanten wurde jeweils ein Liter in Braunglasflaschen abgefüllt. Weiterhin wurde für die Bestimmung der Metabolite, welche halbjährlich an der Universität Frankfurt a.M. untersucht wurden, ein Liter Probe pro Messstelle entnommen. Zur Bestimmung der Methangehalte (ebenfalls halbjährlich) wurden 20 ml

blasenfrei in Headspace-Gefäße abgefüllt und luftdicht verschlossen. Die entnommenen Wasserproben wurden gekühlt (4°C), lichtgeschützt gelagert und umgehend ins Labor zur Analyse gebracht, wo sie innerhalb einer Woche bearbeitet wurden. Zur Dokumentation der Probennahme wurden ausführliche Probennahmeprotokolle erstellt.

### 3.4.2 Ergebnisse

#### 3.4.2.1 Hydraulik

Die Grundwasserstände wurden an den von ca. 4,0 m u. GOK bis zur Endtiefe von maximal 12 m u. GOK durchgehend verfilterten Messstellen B 8, B 11, B 12 und B 13 gemessen. An den Messstellengruppen MP 1-5 (flach: 4-7 m u. GOK, tief: 9-10 m u. GOK) sind die Grundwasserstände der flachen Filterniveaus angegeben.

Die Grundwasserfließrichtung im Untersuchungsgebiet ist zum Vorfluter Weser nach Westen gerichtet. Die Abb. 3.56 zeigt eine Übersicht des TL Schäferhof-Süd mit den Grundwassermessstellen und den Grundwassergleichen vom März 2003.

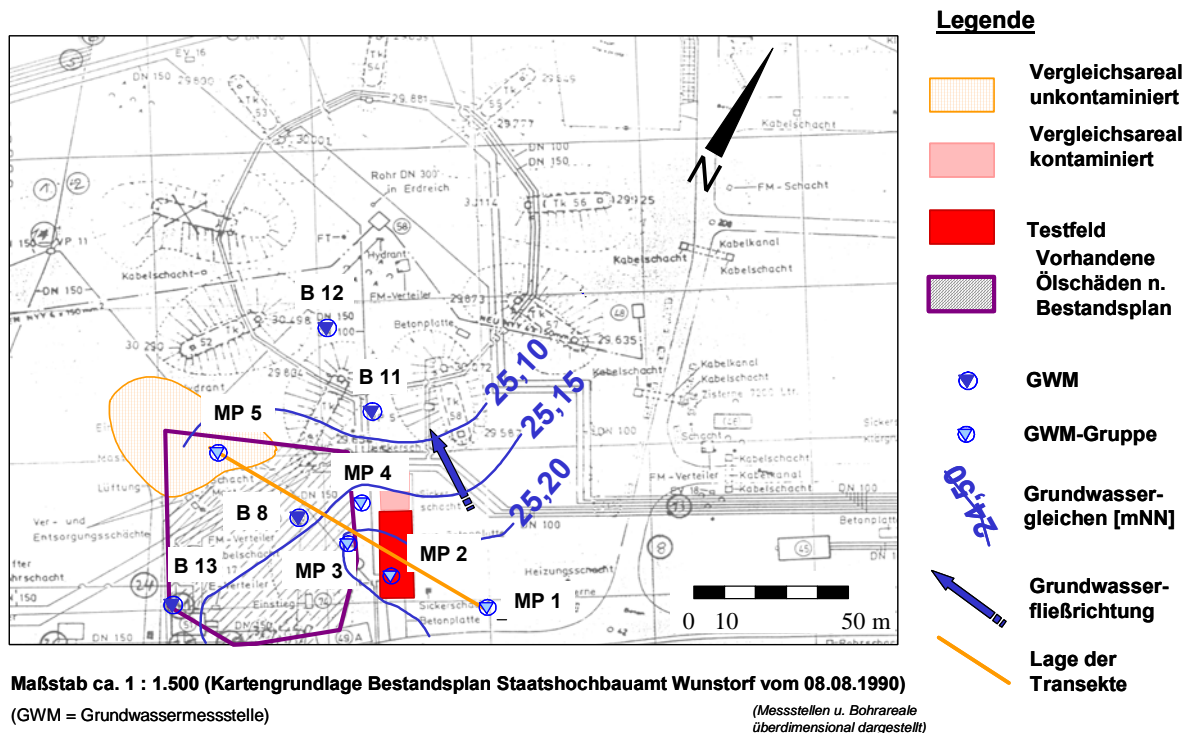


Abb. 3.56: Übersichtskarte des Tanklagers „Schäferhof-Süd“ mit den Grundwassergleichen vom 12.03.2003 und den Grundwassermessstellen.

Die Ganglinien der Grundwasserstände, welche in den einzelnen Messstellen gemessen wurden, verlaufen über den gesamten Beobachtungszeitraum synchron zueinander (vgl. Abb. 3.57). Die Ganglinien zeigen in allen drei Jahren den typischen sinusartigen Jahresverlauf mit Maxima jeweils im Frühjahr, in denen die Grundwasserreservoirs aufgefüllt werden,

und mit Minima jeweils in den Herbst- und Wintermonaten, welche häufig durch vorangegangene regenarme Sommermonate bedingt sind, an.

Der Grundwasserspiegel erreichte im März 2003 mit Werten bei 25 m ü.NN seinen Höchststand seit Messbeginn. Durch die extrem geringen Niederschlagsmengen im folgenden Sommerhalbjahr (vgl. Kap. 3.5.2.1) sank der Grundwasserspiegel bis zum Dezember 2003 kontinuierlich bis auf Werte unter 23,5 m ü.NN, welche den niedrigsten Stand im Beobachtungszeitraum anzeigen (siehe Anhang 5.1). Im Jahr 2004 konnte ein Wiederanstieg des Grundwasserspiegels beobachtet werden, jedoch blieb der Grundwasserstand mit Werten bei 24 m ü.NN deutlich unter dem Niveau von 2002 (Werte bei 24,8 m ü.NN).

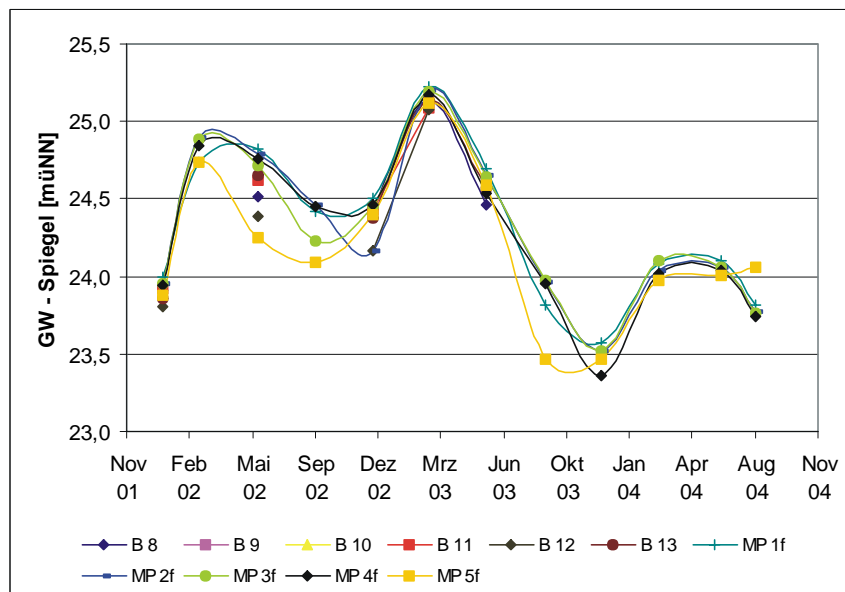
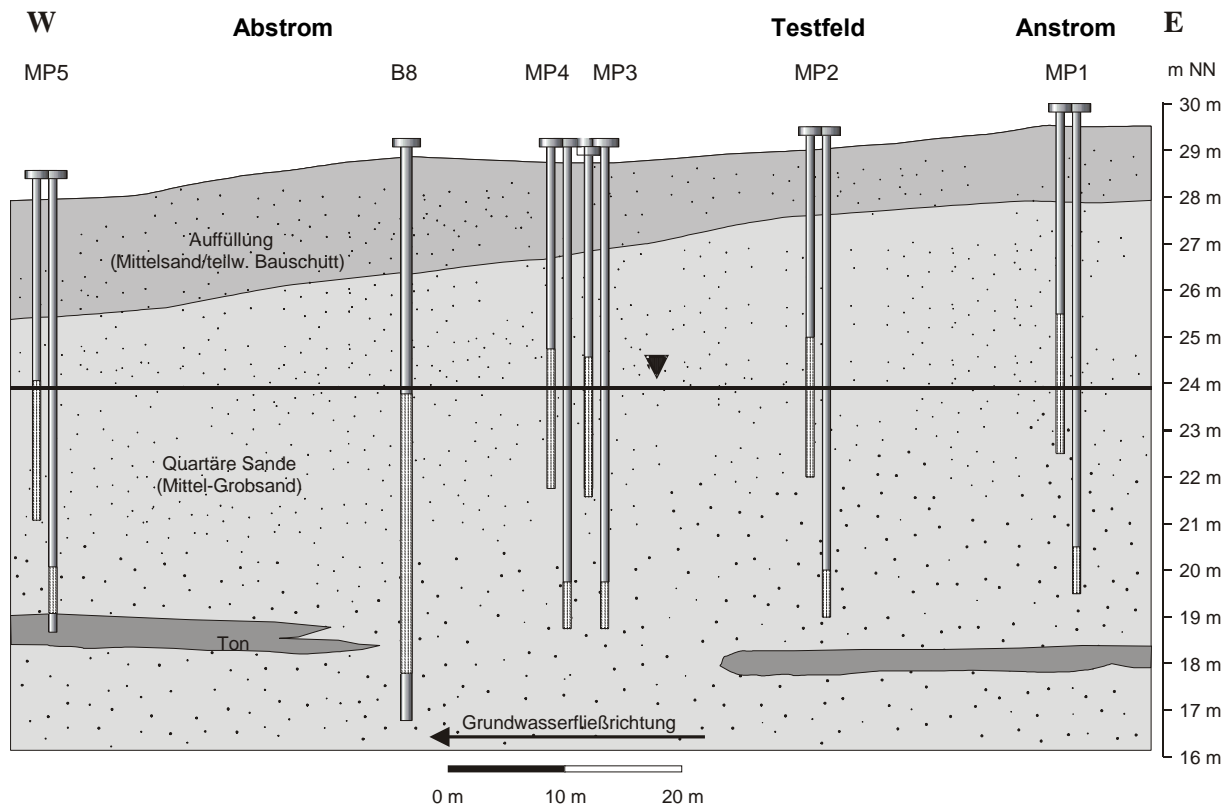


Abb. 3.57: Verlauf der Grundwasserganglinien in den Brunnen und flach verfilterten Multi-levelmessstellen vom 07.01.2002 bis 31.08.2004.

### 3.4.2.2 Räumliche Schadstoffverteilung

Die Messstellengruppen MP 1-5 sind entlang einer Transekte abgeteuft (vgl. Abb. 3.56), welche in Richtung der Grundwasserfließrichtung verläuft. Abb. 3.58 zeigt einen schematischen Querschnitt des geologischen Untergrundes im Untersuchungsgebiet. Die Abbildung lässt einen ungespannten homogenen Grundwasserleiter erkennen, welcher aus quartären Sanden aufgebaut ist. Die oberen Meter werden durch Auffüllmaterial und Bauschutt bestimmt. In ca. 10 m Tiefe treten vereinzelt Tonlinsen auf.



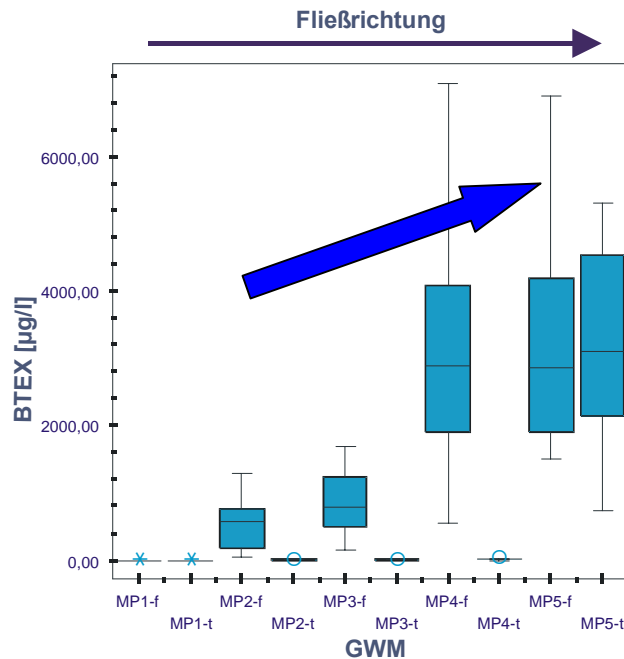
**Abb. 3.58: Schematische Darstellung des geologischen Untergrundes entlang der Transekte. Die Messstellen sind vergrößert dargestellt. Die Filterstrecken und der Grundwasserstand (Juni 2004) sind eingezeichnet.**

Im Folgenden werden die Analysenergebnisse der chemischen Parameter in den einzelnen Messstellen unter Verwendung von Boxplots dargestellt. Diese Darstellungsweise ermöglicht es, die Schwankungsbreite bezüglich der Konzentration der einzelnen chemischen Inhaltsstoffe und deren räumliche Änderung entlang der Grundwasserfließrichtung zu erkennen. Die zeitliche Entwicklung kann hiermit zwar nicht aufgeschlüsselt werden, jedoch sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Messstellen leichter zu erkennen. Für die Darstellung der Daten in Boxplots werden nur die Messstellengruppen berücksichtigt, da die Datenmengen der durchgehend verfilterten GWM (B) zu gering sind ( $n < 5$ ).

In den Boxplots wird die Häufigkeitsverteilung des jeweiligen Parameters mit Hilfe von Boxen und Fäden dargestellt. Jede Box ist gekennzeichnet durch den Medianwert (Querbalken) (Q2), den 25% (Q1)- und 75% (Q3)- Quartilwert (=Box). Alle Werte, die weniger als die 1,5-fache Interquartildistanz (Q3-Q1) außerhalb der Box liegen, werden auf den Fäden dargestellt. Die übrigen Werte werden als Ausreißerwerte (o) oder Extremwerte (\*) angezeigt.

Das untersuchte Schadstoffspektrum umfasst BTEX und MKW. Im Folgenden werden nur die BTEX-Konzentrationen dargestellt und diskutiert. Die MKW-Konzentrationen lagen im Grundwasser entweder in vernachlässigbar geringen Konzentrationen oder mit Werten unterhalb der Bestimmungsgrenze vor und werden deshalb nicht berücksichtigt. Die Analyseergebnisse für den gesamten Monitoringzeitraum sind im Anhang 5.2 angefügt.

In der Abb. 3.59 sind die BTEX-Gehalte dargestellt. In den flach verfilterten Messstellen ist in Fließrichtung durchgehend ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu erkennen. Das Grundwasser aus den tieferen Filterstrecken ist weitgehend unbelastet von BTEX. Eine Ausnahme stellt die Messstelle MP 5 mit höheren BTEX-Gehalten in der tieferen Filterstrecke dar.



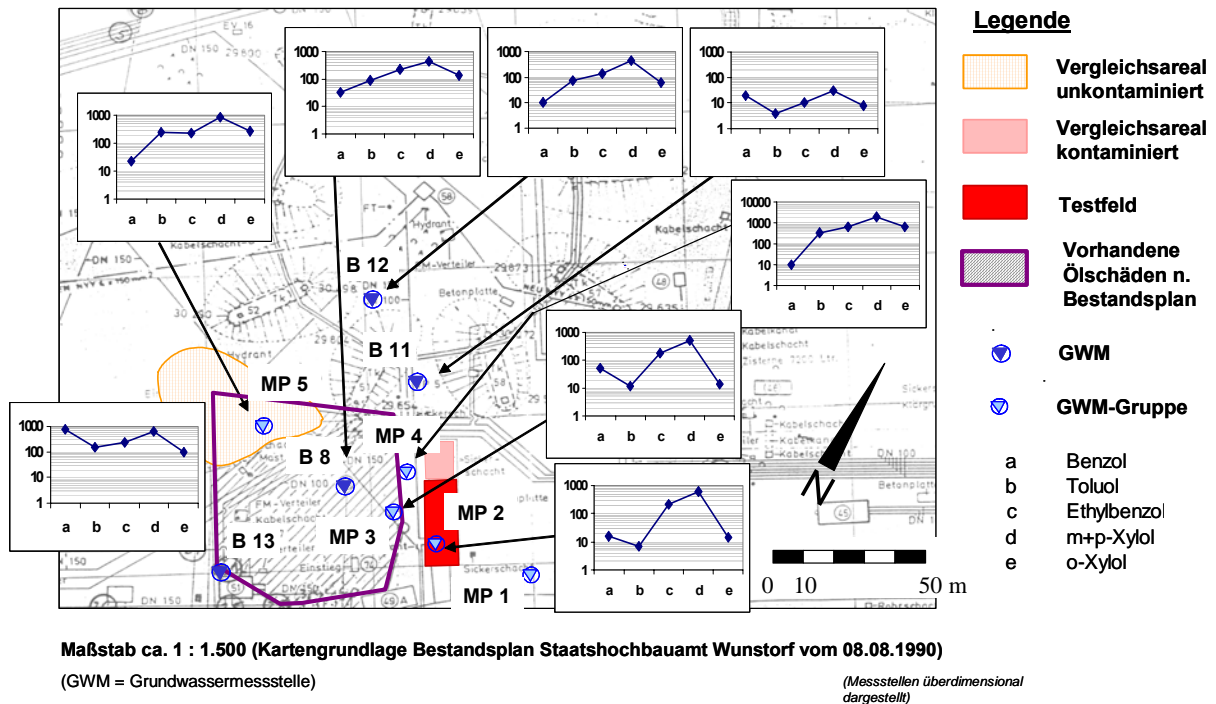
**Abb. 3.59: Boxplot: BTEX-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen). In den flach verfilterten GWM steigen die Schadstoffkonzentrationen in Fließrichtung durchgehend an. Mit Ausnahme der Messstelle MP5-t sind die tief verfilterten GWM schadstofffrei.**

Eine Konzentrationszunahme in Fließrichtung ist unter der Annahme, dass das Testfeld (MP 2) den Haupteintragsherd darstellt, zunächst ungewöhnlich. Wenn auf dem untersuchten Gelände keine weiteren nennenswerten Kontaminationen in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone vorliegen würden, wären die höchsten Schadstoffkonzentrationen an der GWM MP 2 zu erwarten und in Fließrichtung sollte eine Konzentrationsabnahme zu beobachten sein (WIEDEMEIER et al., 1999).

Die hohen BTEX-Gehalte in den GWM MP 5-f und MP 5-t, welche mit 6900 µg/l im flach verfilterten Bereich (Juni 2004) und 5300 µg/l im tief verfilterten Bereich im März 2004 ihr Maximum erreichten, zeigen weiterhin, dass mit der Messstellenanordnung die Schadstofffahne nur zu einem Teil erfasst wird. Die hohen Schadstoffkonzentrationen in der tief verfilterten MP 5 sprechen für eine weitere Schadstoffquelle in der gesättigten Bodenzone.

Die Abb. 3.60 zeigt die Konzentrationsverteilung der einzelnen BTEX-Aromaten an den jeweiligen Messstellen. Beim Vergleich der relativen Konzentrationen einzelner Aromatenspezies wird deutlich, dass sich bei einigen Messstellen Unterschiede in den Konzentrationsverteilungen ergeben. Besonders deutlich ist der Unterschied bei einem Vergleich der Verteilungen an B 13 und MP 4. An der GWM B 13 sind die als besser abbaubar bekannten Substanzen Benzol (a), Toluol (b) und o-Xylol (e) in relativ hohen Konzentrationen vertreten, während in MP 4 die schlechter biologisch abbaubaren Substanzen Ethylbenzol (c) und m/p-

Xylol (d) dominieren. Daraus lässt sich folgern, dass im westlichen Abstrombereich bei B 13 eine „jüngere“ Kontamination vorliegt.

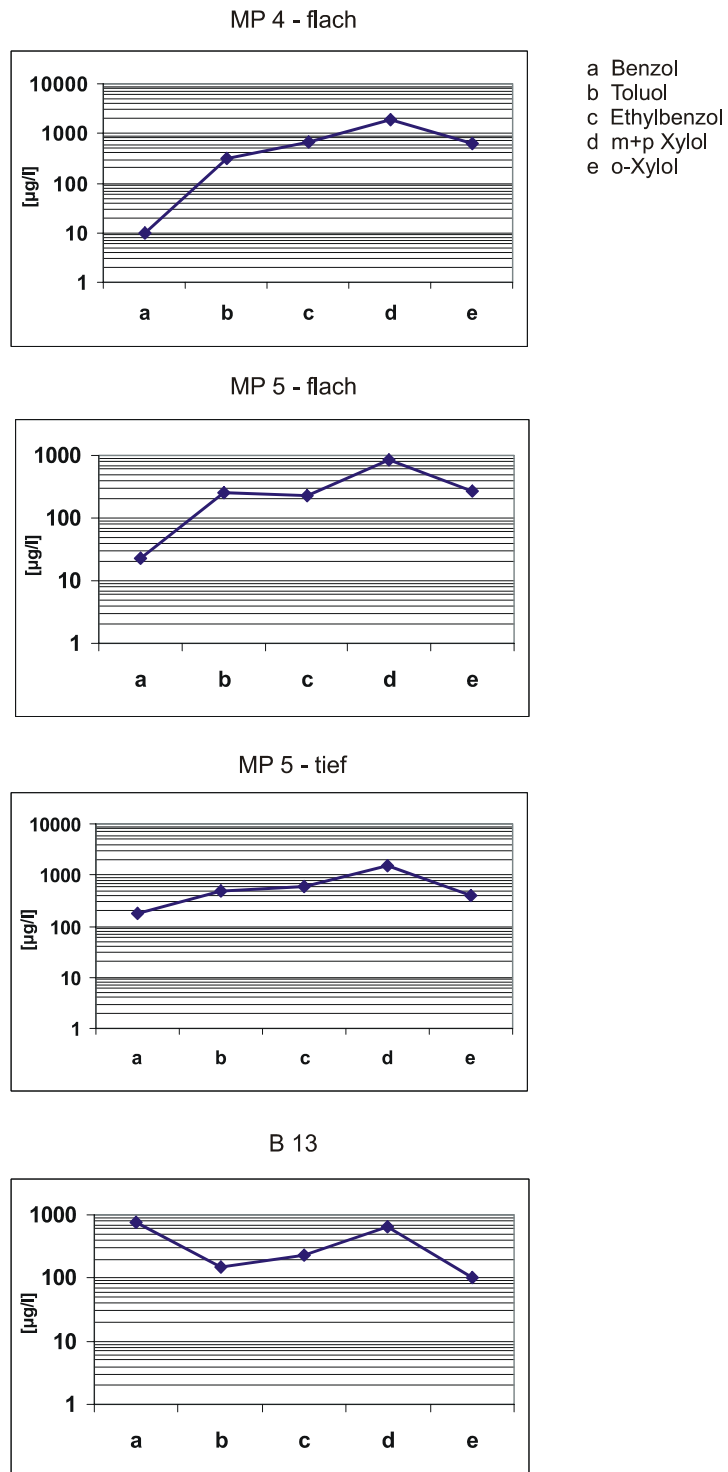


**Abb. 3.60: Konzentrationsverteilung der BTEX-Aromaten im Grundwasser am 2.12.2002; die Konzentrationen sind in [µg/l] angegeben**

Um dies näher zu erläutern, werden in Abb. 3.61 die Konzentrationsverteilungen der einzelnen BTEX-Aromaten an den Messstellen MP 4-flach, MP 5-flach, MP 5-tief und B 13 miteinander verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass die Konzentrationsverteilung in MP 5-flach mehr der Verteilung in B 13 als der Verteilung in MP 4 ähnelt, mit Ausnahme des Stoffes Benzol. Das Muster der Aromatenzusammensetzung bei MP 5-tief liegt zwischen den Konzentrationsverteilungen von MP 5-flach und B 13. Da MP 5 abstromig von MP 4 positioniert ist, sollte man davon ausgehen, dass auf der Fließstrecke Benzol, Toluol und o-Xylol abgebaut werden. Tatsächlich ist eine relative Zunahme dieser Bestandteile gegenüber m/p-Xylol und Ethylbenzol beim Vergleich von MP 5-tief mit MP 4 zu beobachten. Aus diesem Befund lässt sich ableiten, dass zwischen MP 4 und MP 5 eine zusätzliche Schadensquelle vorliegen muss, die eine „jüngere“ Kontamination repräsentiert. Dies zeigt, dass im Bereich von B 13/MP 5 bislang noch unzureichend erfasste Grundwasserverunreinigungen vorliegen, deren Quelle wahrscheinlich eher in der gesättigten als in der ungesättigten Bodenzone zu suchen ist. Ein oberflächennaher Eintragungsschwerpunkt konnte bisher nicht ermittelt werden.

Es besteht die Möglichkeit, dass ausgehend vom Haupteintragsbereich „Testfeld“ die Kontamination ehemals durch Migration einer Schadstoffphase nach Westen im Kapillarsaum entlang des Grundwassergefälles entstand. Nach WIEDEMAYER et al. (1999) findet innerhalb einer Schadstoffphase kein biologischer Abbau statt. Folglich tritt keine Abnahme der Konzentration von bestimmten Schadstoffkomponenten auf. Weiterhin ist auch denkbar, dass oberflächennahe Schadstoffeinträge im Bereich der kartierten Ölschäden (s. Anhang 1.2) im

Rahmen der Erkundungsmaßnahmen nicht lokalisiert werden konnten. In diesem Fall würde ein vom Bereich „Testfeld“ unabhängiger Eintrag vorliegen.



**Abb. 3.61: Vergleich der Konzentrationsverteilung der BTEX-Aromaten in den Messstellen MP 4-flach, MP 5-flach, MP 5-tief und B 13. Diese zeigen an, dass zwischen MP 4 und B 13 eine jüngere Kontamination als im Bereich des Testfeldes vorliegt, da die Konzentration von Benzol in MP 5-tief und B 13 höher ist als in MP 4-flach.**

### 3.4.2.3 Zeitliche Entwicklung der Schadstoffgehalte

Die Messstellengruppen MP 1-5 wurden im Zeitraum Januar 2002 – August 2004 im vierteljährlichen und die Messstellen B 8 und B 13 von Januar 2002 – Juni 2003 im halbjährlichen Zyklus beprobt. Aus den daraus entstandenen Datenreihen lassen sich Rückschlüsse auf die zeitliche Entwicklung der Schadstoffgehalte ziehen.

Das Grundwasser an der Messstelle im Anstrom (MP 1) ist im gesamten Monitoringzeitraum (Januar 2002 – August 2004) frei von Schadstoffen. Die BTEX-Gehalte in allen anderen Messstellen sind, mit Ausnahme der Messstelle B 13, zum Juni 2003 insgesamt kontinuierlich angestiegen (Abb. 3.62). Der stärkste Anstieg innerhalb eines Messintervalls ist in MP 4-flach zu erkennen (von 2.700 µg/l im März 2003 auf 7.100 µg/l im Juni 2003), in den anderen Messstellen haben sich die Gehalte vom März 2003 zum Juni 2003 ca. verdoppelt. Im September stiegen die Schadstoffgehalte im Bereich des Testfeldes (MP 2-flach) weiter an, während sie in den übrigen Messstellen sanken bzw. stagnierten. Erst mit der Dezemberbeprobung 2003 waren in allen Messstellen wieder sinkende Schadstoffgehalte zu beobachten. In der ersten Jahreshälfte 2004 stiegen die Konzentrationen erneut an.

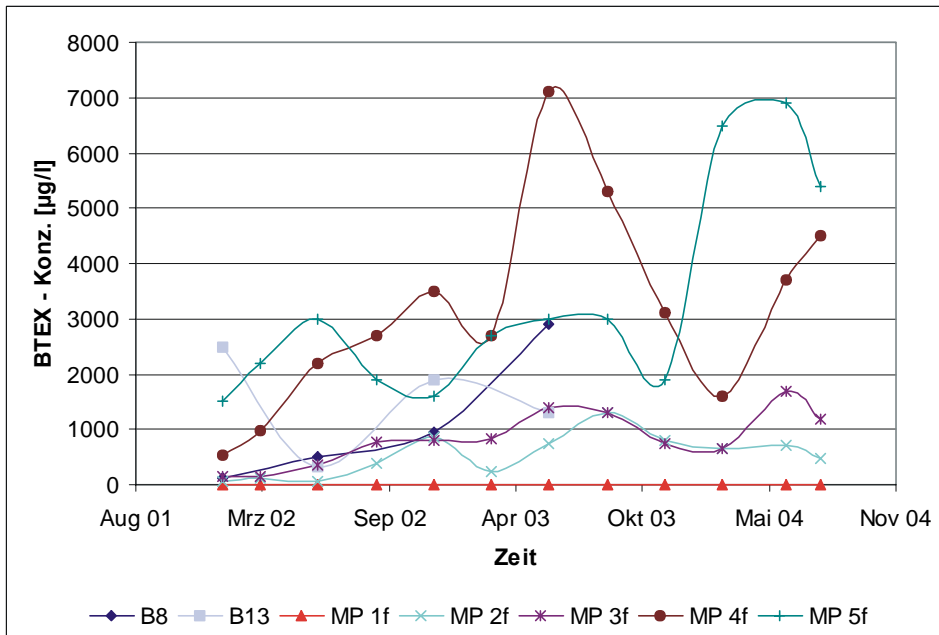


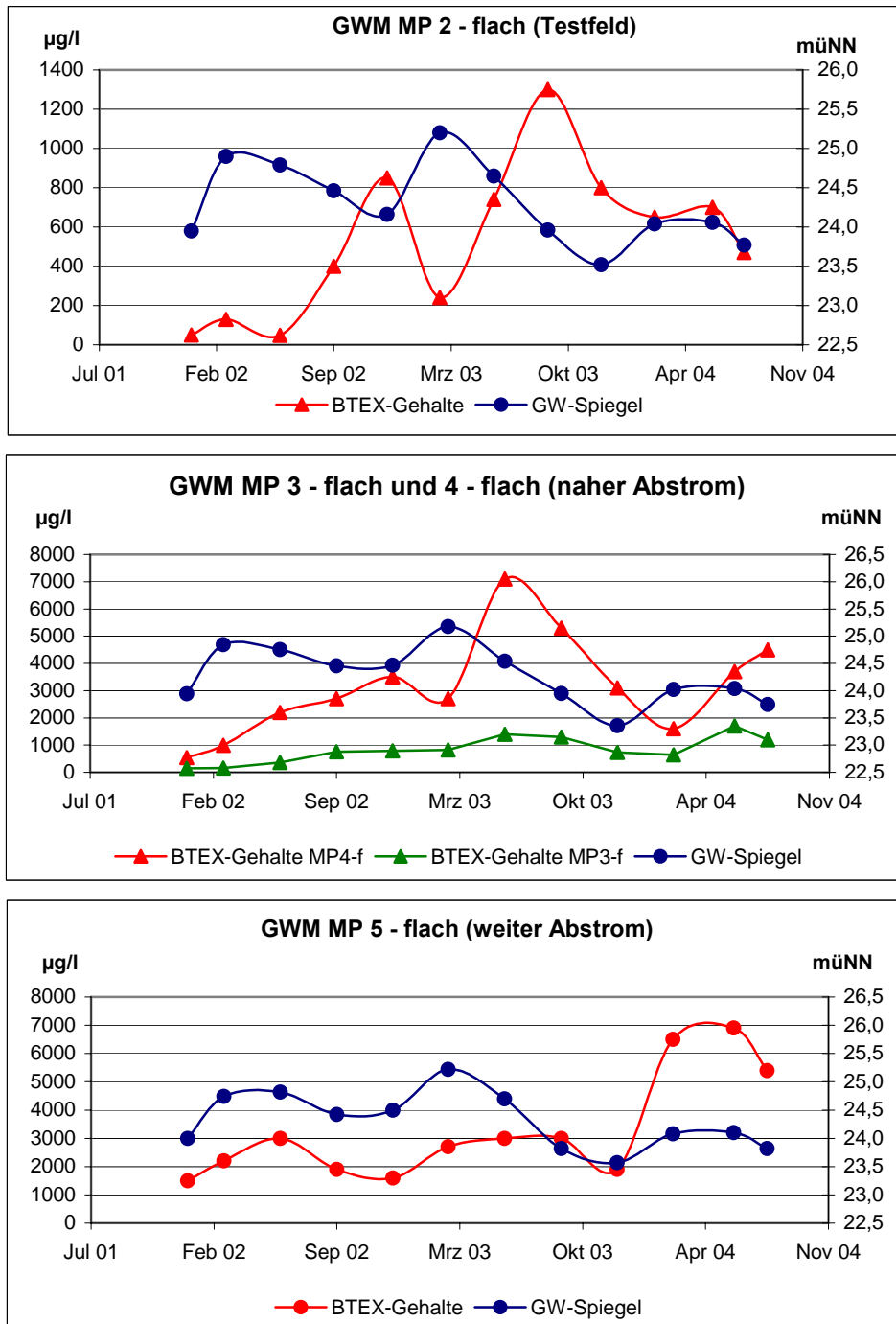
Abb. 3.62: Zeitlicher Verlauf der BTEX-Gehalte in den flach verfilterten Messstellen.

Die Abb. 3.62 zeigt, dass die Ganglinien der BTEX-Konzentrationen an den einzelnen Messpunkten nicht synchron verlaufen. Auch ein zeitlicher Versatz in Fließrichtung ist bei dieser Form der Darstellung nur schwer erkennbar.

In Abb. 3.63 sind die Konzentrationskurven für die einzelnen Messstellen gegen den Grundwasserstand dargestellt. Diese Diagramme zeigen folgendes Muster: In MP 2-flach verlaufen die beiden Kurven fast über den gesamten Beobachtungszeitraum gegenläufig zueinander. An den Messstellen MP 3-flach und MP 4-flach dagegen verlaufen die Ganglinien ab Dezember 2002 mit einem zeitlichen Versatz von ca. 3-4 Monaten parallel zueinander. Dieser Versatz vermindert sich in der MP 5-flach weitgehend, und die Ganglinien zeigen einen



nahezu parallelen Verlauf. Aus diesem Verlauf der Konzentrationskurven lässt sich eine direkte Abhängigkeit vom Grundwasserstand am Standort ableiten.



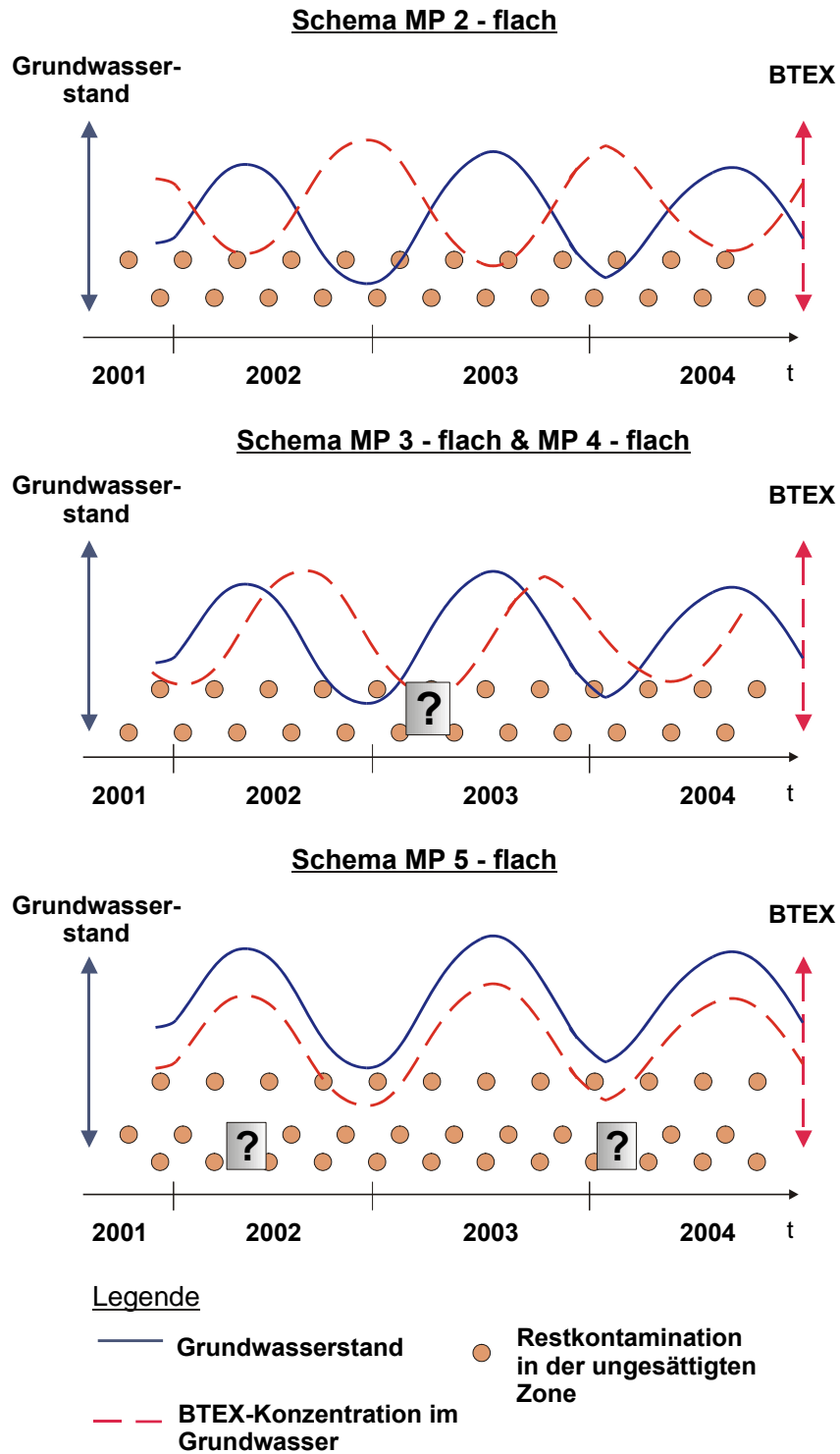
**Abb. 3.63: Zeitlicher Verlauf der BTEX-Gehalte und des Grundwasserspiegels in den flach verfilterten GWM.**

Dies soll anhand von vereinfachten Schemata verdeutlicht werden. Die Abb. 3.64 stellt im Folgenden den Inhalt der Diagramme der Abb. 3.63 schematisch im Zusammenhang mit den Restkontaminationen in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone für die einzelnen Messpunkte dar. Im Bereich des Testfeldes liegen hauptsächlich im Grundwasserschwan-

kungsbereich noch erhebliche Mengen an BTEX und MKW vor (vgl. Kap. 3.1.2.2). Wie am Beispiel der GWM MP 2 - flach verdeutlicht ist, sinken die BTEX-Konzentrationen bei steigendem Grundwasserspiegel infolge von Verdünnungsprozessen. Das anströmende Grundwasser im Bereich der MP 2 ist unbelastet und löst im Bereich des Testfeldes BTEX und MKW aus dem kontaminierten Boden. Wie die Bodenproben an den Bohrungen im Testfeld bei der Abschlussbeprobung (vgl. Kap. 3.1.2.2, Abb. 3.2) zeigen, sind die Schadstoffkonzentrationen in 4-6 m Tiefe am höchsten. Der Grundwasserschwankungsbereich im Monitoringzeitraum liegt zwischen 3,5 m und 5 m u. GOK. Sinkt der Grundwasserstand stark ab, findet eine Konzentrationserhöhung im Grundwasser statt, da in diesem Fall die Bodenzone mit der höchsten Schadstoffbelastung durchströmt wird. Dadurch bedingt bilden sich in den Sommermonaten am Schadensherd Wellen mit erhöhten BTEX-Gehalten aus.

Wie die Diagramme in Abb. 3.63 zeigen, liegen die BTEX-Konzentrationen im Grundwasser des Testfeldes in der Größenordnung von 800 µg/l. Diese nehmen in Fließrichtung nicht ab, sondern steigen an der Messstelle MP 4-flach auf bis zu 7.000 µg/l an. Dies bedeutet, dass im Abstrom der Messstelle MP 2 weitere Lösungsprozesse ablaufen.

Man kann davon ausgehen, dass sich in den Sommermonaten die erhöhten Schadstoffkonzentrationen, welche an MP 2 beobachtet werden, in Fließrichtung fortbewegen. Doch auf dem Fließweg kommt es zu einer Addition und Überlagerung von weiteren Kontaminationen, welche im Bereich der kartierten Ölschäden vorliegen müssen. Durch Dispersion und biologischen Abbau flacht mit zunehmender Entfernung vom Schadensherd die Schwankungsbreite der Schadstoffkonzentration ab und die Amplituden verlaufen zeitlich versetzt parallel zum Grundwasserstand (vgl. Abb. 3.64 Schema MP 3 – flach und MP 4 – flach). Etwa nach neun Monaten verlaufen die Schadstoffkonzentrationen und die Ganglinien des Grundwassers synchron (Schema MP 5-flach). Die erhöhten Konzentrationen im Juni 2003 an den Messstellen MP 3-flach (1.400 µg/l) und MP 4-flach (7.100 µg/l) sind mit den Konzentrationen im März 2003 an der Messstelle MP 5-flach (6.500 µg/l) korrelierbar. Der räumliche Abstand zwischen MP 4 und MP 5 beträgt 40 m. Nach diesen Angaben ergibt sich eine Fließgeschwindigkeit von ca. 4,5 m pro Monat.



**Abb. 3.64:** Schematische Darstellung der Diagramme in Abb. 3.63.

Im Testfeld erreichen die Konzentrationen im Boden in der ungesättigten Zone Werte von bis zu 10.000 mg/kg MKW und 140.000 µg/kg BTEX. Die Konzentrationen im abstromigen Bereich sind dagegen unbekannt. Im Bereich MP 5 wurden in der ungesättigten Zone Konzentrationen von bis zu 1.000 mg/kg MKW und 10.000 µg/kg BTEX gemessen. Die Konzentrationen unterhalb von 6 m u. GOK sind unbekannt.

### 3.4.2.4 Hydrochemische Indikatoren für biologische Abbauvorgänge

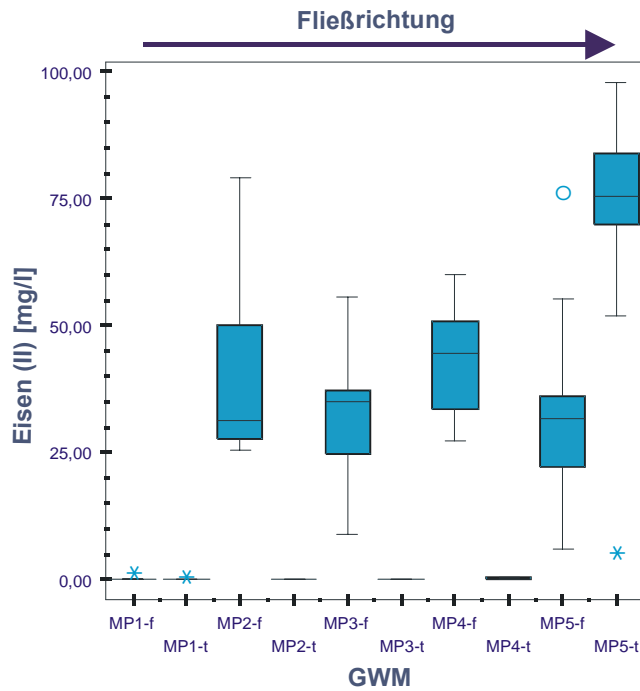
Redoxsensitive Parameter wie Eisen(II), Sauerstoff, Sulfat und Nitrat sind Indikatoren für biologische Abbauvorgänge im Grundwasser. Mikroorganismen bauen organische Moleküle wie z.B. BTEX ab und decken damit ihren Bedarf an Kohlenstoff und Energie (SCHLEGEL 1992, WIEDEMEYER et al. 1995, WIEDEMEYER et al. 1999). Über enzymatisch katalysierte Redoxreaktionen werden in den oxidativen Reaktionen Elektronen freigesetzt, welche durch Elektronenakzeptoren wieder aufgenommen werden. In der aeroben Respiration ist diese „Senke“ molekularer Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Bei Fehlen von O<sub>2</sub> können weitere Stoffe als anaerobe Elektronenakzeptoren in folgender Reihenfolge fungieren: Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Eisen(III) (Fe<sup>3+</sup>), Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) (STUMM & MORGAN 1970). Die Energieausbeuten und Redoxpotenziale nehmen von NO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu CO<sub>2</sub> ab. In Tab. 3.13 sind die Reaktionsgleichungen des vollständigen aeroben und anaeroben Abbaus von Benzol zu CO<sub>2</sub> beispielhaft aufgeführt.

**Tab. 3.13: Reaktionsgleichungen des aeroben und anaeroben Abbaus von Benzol (gemäß WIEDEMEYER et al. 1995).**

Aerober Abbau	$C_6H_6 + 7,5 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 3 H_2O$
Nitrat-Reduktion	$C_6H_6 + 6 NO_3^- + 6 H^+ \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 3 N_2$
Eisen-Reduktion	$C_6H_6 + 30 Fe(OH)_3 + 60 H^+ \rightarrow 6 CO_2 + 30 Fe^{2+} + 78 H_2O$
Sulfat-Reduktion	$C_6H_6 + 3,75 SO_4^{2-} + 7,5 H^+ \rightarrow 6 CO_2 + 3,75 H_2S + 3 H_2O$
Methanogenese	$C_6H_6 + 4,5 H_2O \rightarrow 2,25 CO_2 + 3,75 CH_4$

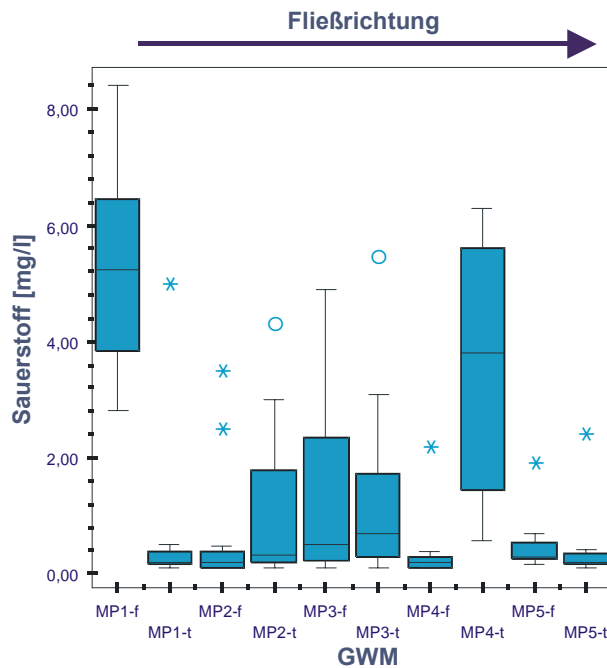
Die genannten Indikatoren zeigen charakteristische Erhöhungen oder Erniedrigungen in kontaminierten Messstellen gegenüber der schadstofffreien Messstelle MP 1 im Anstrom des Testfeldes. Dies ist im Folgenden zunächst anhand des Fe(II) erläutert (Abb. 3.65). In den Boxplots werden die Analysenergebnisse vom Januar 2002 bis September 2004 dargestellt, um die Gesamthäufigkeitsverteilung und Varianz der Parameter über den Beobachtungszeitraum aufzuzeigen.

Die Verteilung von Fe(II) zeigt entlang der Fahnen transekte in Abstromrichtung in den flach verfilterten Messstellen einen kontinuierlichen Anstieg der Konzentrationen von im Mittel 0,15 mg/l in MP 1-f auf 42,9 mg/l in MP 4-f. Die ansteigenden Eisen(II)-Gehalte korrelieren mit den in Fließrichtung ebenfalls ansteigenden Schadstoffgehalten. Durch zunehmende Substratgehalte wird der biologische Abbau stärker angeregt, wodurch eine verstärkte Eisenreduktion stattfindet. In der Grundwassermessstelle MP 5-t liegen höhere BTEX-Konzentrationen vor als in MP 5-f, was sich auch in den erhöhten Fe(II)-Gehalten widerspiegelt.



**Abb. 3.65: Boxplot: Fe(II)-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen). In den flach verfilterten GWM steigen die Eisen(II)-Konzentrationen in Fließrichtung leicht an, während in den tief verfilterten GWM die Konzentrationen unter 0,1 mg/l liegen. Die Messstellengruppe MP5 bildet im flachen und tiefen Bereich eine Ausnahme, hier sind die Fe(II)-Gehalte in der MP 5-t höher als in MP 5-f.**

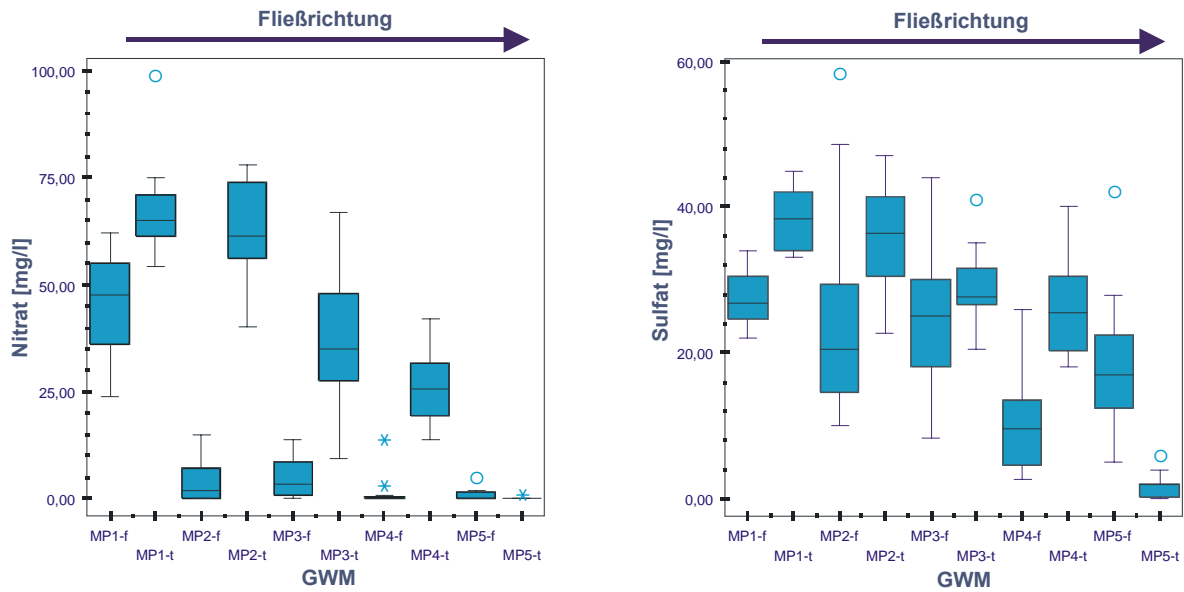
Bei dem gelösten Sauerstoff ist in Abb. 3.66 keine durchgehende Sauerstoffzehrung bei hohen BTEX-Konzentrationen in den GWM zu erkennen. Die Messstellengruppen zeigen erwartungsgemäß in den tiefen Filterstrecken im Mittel geringe Sauerstoffgehalte, welche bei 1 mg/l liegen. Eine Ausnahme ist die MP 4-t, welche im Mittel 3,5 mg/l aufweist. Auffällig ist die große Varianz der Messwerte. Erstaunlich ist allerdings, dass in den stärker kontaminierten oberen Bereichen des Grundwasserleiters trotz erhöhter Schadstoffgehalte der Sauerstoff nicht vollständig gezehrt wird. In MP 3-f wurden im Mittel Werte von 1,2 mg/l und als Maximalwert 4,9 mg/l im Dez. 2002 gemessen, während die GWM MP 4-f Gehalte von 0,4 mg/l im Mittel aufweist.



**Abb. 3.66: Boxplot: Sauerstoff-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen). Mit Ausnahme der schadstofffreien GWM MP 1-f sind die Gehalte in allen Messstellen niedrig, jedoch ist keine durchgehende Sauerstoffzehrung in den flachen Bereichen zu erkennen. Die vergleichsweise hohen Sauerstoffkonzentrationen in MP 4-t sind ungeklärt.**

Die Nitratgehalte zeigen dagegen das erwartete Verteilungsmuster im Bereich der flachen Filterstrecken (Abb. 3.67). Während in der unbelasteten Messstelle im Anstrom Gehalte von 45,4 mg/l im Mittel auftreten, sind in der GWM MP 2-f nur noch Gehalte von 4,5 mg/l messbar. Diese sinken in Abstromrichtung weiter auf 1,5 mg/l (Mittelwert) in MP 4-flach. Eine Tendenz zu sinkenden Nitratgehalten bei steigenden BTEX-Gehalten ist in Abstromrichtung und besonders an der GWM MP 5 erkennbar.

Die Sulfatverteilung (Abb. 3.67) lässt ebenso wie die Nitratverteilung die Wirksamkeit von biologischen Abbauprozessen erkennen, wenn der Trend auch nicht ganz so deutlich erkennbar ist. In allen Proben aus den tiefen Filterstrecken (mit Ausnahme der MP 5) sind die Sulfatgehalte vergleichbar mit den Gehalten im Anstrom (37,1 mg/l im Mittel). In MP 2-f und MP 3-f sind die Sulfatgehalte nur geringfügig niedriger als im Anstrom. Eine starke Zehrung tritt erst im Bereich der MP 4-f und insbesondere an der Messstelle MP 5-t ein.



**Abb. 3.67: Boxplot: Nitrat- und Sulfat-Gehalte vom 07.01.2002 – 31.08.2004 (12 Messungen). In den flach verfilterten GWM wird Nitrat in Fließrichtung sehr schnell gezehrt, während in den tief verfilterten GWM die Konzentrationen eher erhöht sind. Die Messstellengruppe MP 5 bildet auch hier im flachen und tiefen Bereich eine Ausnahme. Auch die Sulfat-Gehalte sinken im Bereich der flachen Filterstrecken in Fließrichtung.**

Abb. 3.68 zeigt beispielhaft für die Messstelle MP 2-f die Entwicklung der Nitrat-, Sulfat- und BTEX-Gehalte in Abhängigkeit von der Zeit. Deutlich ist eine steigende Nitratzehrung bei steigenden BTEX-Konzentrationen erkennbar. Bei BTEX-Konzentrationen von 400 µg/l gehen die Nitratgehalte gegen Null. Bei den Sulfatgehalten ist deutlich eine gegenläufige Entwicklung zu den Schadstoffgehalten zu erkennen. Steigende BTEX-Gehalte bewirken sinkende Sulfatkonzentrationen und bei sinkenden BTEX-Gehalten steigen die Konzentrationen wieder an.

In Abb. 3.69 sind die Messergebnisse der Methanuntersuchungen dargestellt. In den Messstellen im Anstrom und in den tiefen Bereichen des Grundwasserleiters war bisher bei allen Messungen kein Methan messbar (Ausnahme MP 5-t). Doch in den flachen Bereichen steigen die Konzentrationen in Fließrichtung teilweise sehr stark an. So weist MP 3-f im Mittel Methangehalte von 5.543 µg/l und MP 4-f 8.571 µg/l (Mittelwert) auf. Diese GWM weisen neben MP 5-t auch die höchsten Aromatengehalte auf. Die hohen Methangehalte in der GWM MP 3-f stehen im Widerspruch zu den teilweise hohen Sauerstoffkonzentrationen. Da steigende Methangehalte mit steigenden Aromatengehalten einhergehen, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass Methanogenese am Aromatenabbau erheblich beteiligt ist.

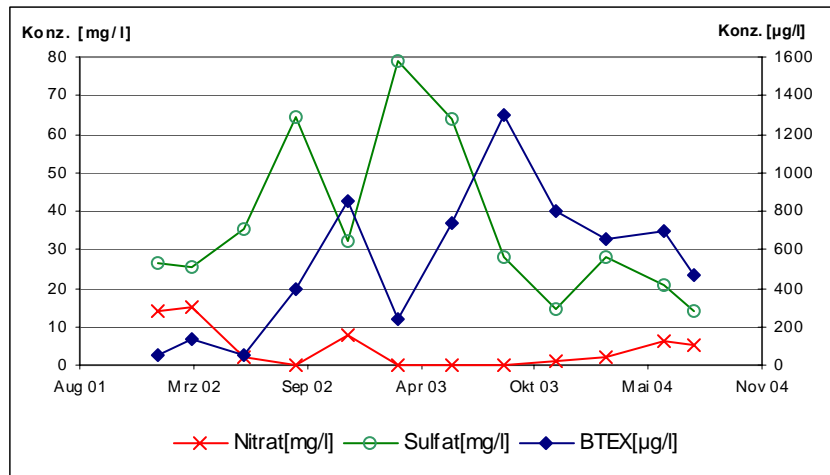


Abb. 3.68: Messstelle MP 2-flach. Bei steigenden BTEX-Konzentrationen ist deutlich eine Abnahme der Nitrat- und Sulfatkonzentrationen zu beobachten.

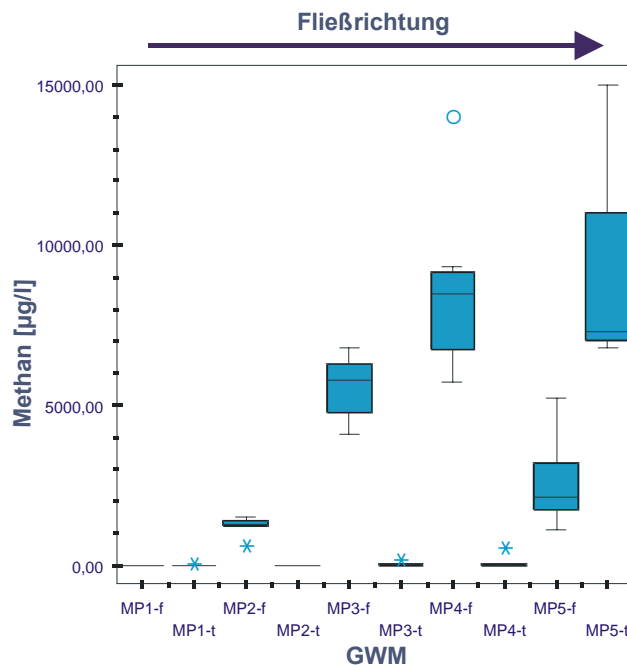


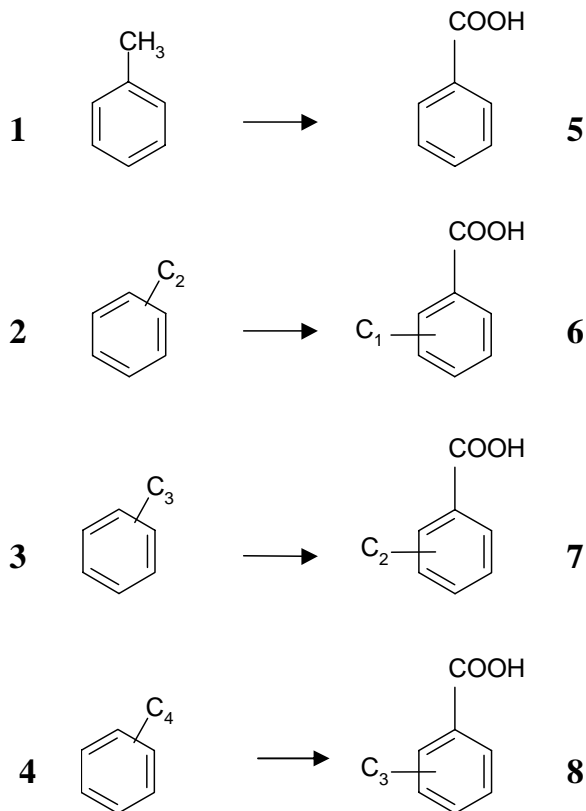
Abb. 3.69: Boxplot: Methan-Gehalte vom 03.06.2002 – 31.08.2004 (7 Messungen). Messstellen im Anstrom und in tiefen Bereichen des Grundwasserleiters enthalten kein Methan (Ausnahme MP 5-t). In den flachen Bereichen treten teilweise hohe Methan-Konzentrationen auf, welche eng an die Aromatengehalte gekoppelt sind.

### 3.4.2.5 Metabolitenbildung

Die an den Messstellen durchgeführten Untersuchungen auf aromatische Säuren (Metabolite) belegen das generelle Vorhandensein von biologischen Abbauprozessen bei den aromatischen Kohlenwasserstoffen. Bei den nachgewiesenen Einzelverbindungen handelt es sich um aromatische Säuren, die strukturell mit den jeweiligen aromatischen Schadstoffen (Ausgangsverbindungen) korrespondieren (siehe Abb. 3.70). Die Benzoesäure (Nr. 5) geht aus dem Toluol (Nr. 1) hervor (BIEGERT et al., 1996). Darüber hinaus wird Benzoesäure aber auch durch biologische Prozesse in Böden gebildet. Benzoesäure allein ist also kein geeigneter Parameter zum Monitoring von Abbauprozessen an aromatischen Kohlenwasser-



stoffen. Alkylierte Benzoesäuren lassen dagegen auf den Abbau anthropogen eingetragener Schadstoffe (Vergaserkraftstoff, Kerosin) schließen. Die C<sub>1</sub>-Benzoesäuren (Nr. 6) entstehen aus den C<sub>2</sub>-Benzolen (Isomere des Xylols sowie Ethylbenzol; Nr. 2) und die C<sub>2</sub>-Benzoesäuren (Nr. 7) aus den C<sub>3</sub>-Benzolen (Isomere des Trimethylbenzols, Isomere des Propylbenzols; Nr. 3). Die C<sub>3</sub>-Benzoesäuren (Nr. 8) entstehen aus den C<sub>4</sub>-Benzolen (z.B. Isomere des Tetramethylbenzols, Isomere des Butylbenzols; Nr. 4). Neben der Oxidation von Methylgruppen können die Säuren auch durch Einbau von CO<sub>2</sub> in die Aromatenstrukturen gebildet werden, wie am Beispiel von Naphthalin gezeigt wurde (MECKENSTOCK et al. 2000).



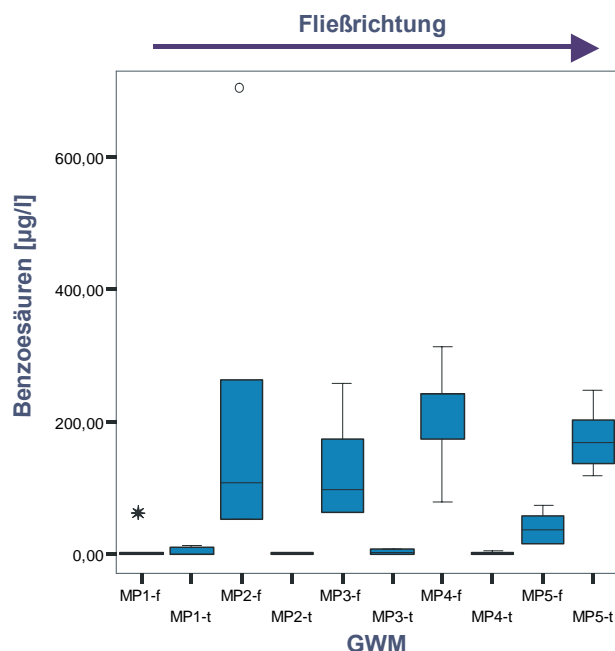
**Abb. 3.70: Zuordnung von aromatischen Säuren als Metabolite korrespondierender aromatischer Ausgangsverbindungen.**

Der Nachweis dieser Verbindungen stellt daher einen direkten Beweis für den zur Zeit der Probenahme aktiven Bioabbau von Bestandteilen der Vergaserkraftstoffe und des Kerosins dar. Darüber hinaus wurden Fettsäuren gemessen. Diese stellen Zellwandbestandteile von Mikroorganismen dar und sind in allen Pflanzen enthalten. Erhöhte Gehalte von Tetradecansäure, Hexadecansäure und Octadecansäure im Grundwasser können bei einem gleichmäßigen Bewuchs eines Geländes auf eine erhöhte Präsenz von bakterieller Biomasse hinweisen.

Ab Juni 2002 wurde, entsprechend dem Untersuchungsprogramm, das Grundwasser halbjährlich auf aromatische Säuren (Metabolite) und Fettsäuren untersucht. Im Monitoringzeitraum wurden 5 Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Quantifizierung der organischen Säuren in den Wasserextrakten sind im Anhang 5.3 zusammenfassend dargestellt. Diese zeigen, dass die Schwankungsbreite bei den Fettsäuren im Allgemeinen gering ist. Zwischen Wasserproben aus der flachen und tiefen Verfilterung der Messstellen sind keine

gravierenden Unterschiede erkennbar. In den Proben aus den flachen Filterstrecken sind die Konzentrationen jeweils nur leicht erhöht. Eine Ausnahme bildet die enorm hohe Konzentration der Fettsäuren in MP 1-flach im Dezember 2002 mit 237 µg/l. Dieser Wert ist um den Faktor 10 erhöht im Vergleich zu den übrigen GWM. Hierbei handelt es sich um die einzige Messstelle in einem bewaldeten Teil des Geländes, in dem keine Kontamination festgestellt werden konnte (Anstrom). Die Fettsäuren können hier nicht von Bakterien abstammen, welche Kohlenwasserstoffe abbauen. Der Ursprung der Fettsäuren muss entweder im Bewuchs selbst liegen oder aber in den Bodenbakterien, die den pflanzlichen Dendrit zersetzen. Derart hohe Konzentrationen an Fettsäuren wurden bei vorherigen und folgenden Beprobungen nicht festgestellt. Zum Juni 2003 sanken die Gehalte an Fettsäuren in dieser Messstelle deutlich ab (9 µg/l). Möglicherweise liegt hier ein jahreszeitlicher Effekt vor (Ende der Vegetationsperiode). Das Ergebnis zeigt, dass eine Nutzung der Fettsäuren als Indikator für die Intensität des Bioabbaus nur bei sehr homogenen Randbedingungen in Betracht gezogen werden kann.

Die Konzentrationen der gemessenen Benzooesäuren sind im Anhang 5.3 aufgelistet und in Abb. 3.71 dargestellt. In den tief verfilterten Messstellen sowie im Anstrom wurden nur sehr geringe Konzentrationen von Benzooesäuren (max. 55,05 µg/l) und deren Isomere gemessen. Deren Herkunft kann auf den Abbau natürlich vorhandener organischer Substanz im Boden zurückgeführt werden. Die Konzentrationen der Benzooesäuren in den kontaminierten GWM sind deutlich erhöht. Ein auffällig hoher Wert wurde an der Messstelle MP 2-f im Juni 2003 gemessen. Der Wert stieg von 161 µg/l (Dez. 2002) auf 700 µg/l an. Zu diesem Zeitpunkt wurden ebenfalls stark erhöhte BTEX-Gehalte gemessen. Doch in den übrigen flach verfilterten Messstellen war dieser Anstieg nicht zu beobachten, dort sanken sogar die Konzentrationen von z.B. 311 µg/l auf 240 µg/l in MP 4f.



**Abb. 3.71: Boxplot: Benzooesäuren (Summe der Einzelverbindungen) vom Juni 2002 – Juni 2004 (5 Messungen). Messstellen im Anstrom und in tiefen Bereichen des Grundwasserleiters zeigen nur geringe Gehalte an Abbauprodukten, welche natürliche Hintergrundkonzentrationen darstellen. In den flachen Bereichen treten besonders im Bereich der GWM MP 2 und MP 4 erhöhte Konzentrationen auf, welche mit den erhöhten Substratgehalten korrelieren.**

### 3.4.3 Interpretation der Ergebnisse

Die Grundwasseruntersuchungen am Standort wurden durchgeführt, um die hydrogeochemischen Anstromverhältnisse und den Schadstoffaustrag aus der wasserungesättigten Bodenzone zu ermitteln. Sie ermöglichen weiterhin Aussagen über die Schadstoffverteilung und die zeitliche Entwicklung der Schadstoffgehalte im wassergesättigten Bodenbereich.

Die Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser in Fließrichtung lassen deutlich erkennen, dass mit der Messstellenanordnung nur ein Teil der Schadstofffahne erfasst wird. Die Betrachtung der Schadstoffkonzentrationen und der relativen Verteilung der benzoiden Aromaten (BTEX) an den einzelnen Messpunkten hat ergeben, dass auf dem TL Schäferhof-Süd Eintragsquellen unterschiedlichen Alters vorliegen und dass das Testfeld nicht den alleinigen Eintragsherd für BTEX in das Grundwasser repräsentiert. Weitere kleinere Quellen im Bereich 'kartierte Ölschäden' und eine größere Eintragsquelle in unmittelbarer Nähe zur Messstelle MP 5 sind aufgrund der Datenlage anzunehmen. Dieser Sachverhalt erschwert die Möglichkeit, Aussagen über die Geometrie und Dynamik der Schadstofffahne zu treffen.

Die Schadstoffe werden einerseits durch das Sickerwasser und andererseits durch Lösungsprozesse infolge von Schwankungen des Grundwasserspiegels in den Grundwasserleiter eingetragen. Während des Monitoringzeitraumes wurden erhebliche Schwankungen des Grundwasserstandes (23,4 m ü. NN bis 25,2 m ü. NN) festgestellt. Die Schadstoffgehalte im Boden sind im Bereich des Kapillarsaumes am höchsten, weshalb die Konzentration leicht löslicher Kontaminanten (BTEX) im Grundwasser erheblich durch Schwankungen des Grundwasserspiegels beeinflusst wird. Im Verlauf der dreijährigen Beprobung ist tendenziell ein Anstieg der BTEX-Gehalte im Grundwasser erkennbar. Gleichzeitig zeigen Schlüsselparameter wie Eisen(II), Nitrat, Sulfat, Methan und die Metaboliten deutlich einen mikrobiellen Abbau der BTEX-Aromaten über den gesamten Zeitraum in allen Messstellen an, in denen eine Kontamination nachgewiesen wurde. Die Abwesenheit von Sauerstoff und die Zehrung anderer Elektronenakzeptoren in den meisten Grundwassermessstellen ist ein Hinweis darauf, dass mikrobielle Abbauprozesse primär unter anaeroben Milieubedingungen ablaufen. Benzoessäuren, welche sich bei der Oxidation von Alkylbenzolen bilden, sind als Anzeiger für biologischen Abbau im Grundwasser gut geeignet. Als Zwischenprodukte eignen sie sich jedoch nicht für eine Bilanzierung der Prozesse.

Im Boden konnten Abbauraten für Kohlenwasserstoffe bestimmt werden, dies ist im Grundwasser aus folgenden Gründen nicht möglich:

- (1) Die Eintragsquellen im Abstrom des Testfeldes sind nicht vollständig bekannt.
- (2) Durch das bestehende Messstellennetz wird die Schadstofffahne nur zu einem Teil erfasst. Es können keine Aussagen über ihre Geometrie und Dynamik getroffen werden.
- (3) Die Ganglinien der BTEX-Konzentrationen in den einzelnen GWM zeigen an, dass die Lösungsprozesse und der Eintrag an Kontaminanten in das Grundwasser deutlich höher sind als der mikrobielle Abbau innerhalb des Untersuchungsgebietes.

## **3.5 Klimadaten und Bodentemperatur**

### **3.5.1 Datenaufnahme**

Eine Wetterstation mit Datenerfassungsanlage (H.I.M., Agrar-Wetterstation eco) wurde auf dem Standort TL Schäferhof-Süd installiert und von Ende November 2001 bis November 2004 kontinuierlich betrieben. Die Station zeichnete stündlich Messdaten der Niederschlagsmenge, des Luftdrucks, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung auf. Die Messdaten wurden im Abstand von vier bis acht Wochen auf einen Laptop übertragen und weiter ausgewertet. Dabei wurden die Tages-, Monats- und Jahresmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Feuchte, des Luftdrucks und der Windgeschwindigkeit sowie die Tages-, Monats- und Jahressummen der Niederschlagsmenge gebildet.

Durch technische Ausfälle (defekter Akku, Programmfehler) entstandene Datenlücken wurden mit Messwerten vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Station Hannover Langenhagen (Nr. 10338) ausgeglichen. Die Klimadaten dieser dem Standort am nächsten gelegenen Wetterstation des DWD waren grundsätzlich auf das Klima vor Ort übertragbar. Ein Vergleich der dort angegebenen Messdaten mit denen, die am TL Schäferhof-Süd ermittelt worden waren, zeigte insbesondere bei der Lufttemperatur eine gute Übereinstimmung der Daten. Geringfügige Abweichungen sind wahrscheinlich auf die exponierte Lage der Wetterstation am TL Schäferhof-Süd zurückzuführen. Die nur spärlich bewachsene Freifläche wird insbesondere im Sommer durch die erhöhte Sonneneinstrahlung tagsüber stark aufgeheizt. Die Tagesniederschlagsmengen zwischen den Wetterstationen variierten aufgrund von regionalen Schauerereignissen stärker. Auf die Summe der Niederschlagsmengen pro Jahr bezogen, führten diese Effekte allerdings im Jahr 2002 nur zu einer Differenz von 5 % und im Jahr 2003 zu keinen Unterschieden gegenüber der Station Hannover Langenhagen.

Zur Bestimmung der Bodentemperatur wurden im unkontaminierten Vergleichsareal vier Messfühler in verschiedenen Tiefen (0,5 m, 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m) eingesetzt und an einen Daten-Logger (Testo, testostor 171) angeschlossen. Die Temperaturmessung erfolgte täglich um 18.00 Uhr. Die Messdaten wurden zusammen mit denen der Wetterstation ausgelesen. Vom 08.12.02 bis zum 18.06.03 entstand eine größere Datenlücke, da der Daten-Logger wegen eines technischen Defektes und langwierigen Reparaturzeiten nicht einsatzfähig war.

### **3.5.2 Ergebnisse**

#### **3.5.2.1 Klimadaten**

Die am Standort TL Schäferhof-Süd aufgenommenen Daten der Lufttemperatur, der relativen Feuchte, des Luftdrucks, der Windgeschwindigkeit und der Niederschlagsmenge sind als Tagesmittelwerte bzw. -summen in der Übersichtsgrafik (Anhang 6.1) dargestellt. Tab. 3.14 zeigt die Monats- und Jahresmittelwerte von Januar 2002 bis Dezember 2004.

**Tab. 3.14: Monatsmittelwerte von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Luftdruck und Windgeschwindigkeit sowie der monatlichen Niederschlagsmenge am TL Schäferhof-Süd von Januar 2002 bis März 2004.**

Datum	Lufttemp. [°C]	rel. Luftfeuchte [%]	Luftdruck [hPa]	Niederschlag [mm] * <sup>2</sup>	Windgeschw. [m/s]
Jan. 2002	3,7	89,6	915,5	47,9	1,7
Feb. 2002	4,7	83,0	k.A.	115,3	2,1
März. 2002	6,7	90,7	999,9	27,6	1,5
April 2002	8,9	87,4	1008,6	55,6	1,0
Mai 2002	13,6	75,6	1012,9	59,7	0,9
Juni 2002	17,1	76,1	1010,6	71,9	1,2
Juli 2002	19,0	79,4	1012,3	124,0	1,1
Aug. 2002 * <sup>1</sup>	19,7	80,3	1009,0	43,9	0,7
Sept. 2002	14,4	81,5	1008,7	17,4	0,8
Okt. 2002	8,1	86,6	1003,1	105,9	1,4
Nov. 2002	5,1	95,2	1003,6	83,1	1,2
Dez. 2002	-1,1	90,0	1015,9	46,0	1,4
<b>Jahresmittel 2002</b>	<b>9,9</b>	<b>84,6</b>	<b>1000,0</b>	<b>798,3</b>	<b>1,2</b>
Jan. 2003	0,9	91,6	1009,9	75,6	1,5
Feb. 2003 * <sup>1</sup>	-0,9	84,7	995,5	18,2	1,6
März 2003 * <sup>1</sup>	5,4	79,4	1001,1	22,9	0,9
April 2003	9,2	64,7	1011,4	38,3	1,6
Mai 2003	14,3	74,3	1010,8	30,7	1,1
Juni 2003	19,0	68,9	1008,4	35,6	1,0
Juli 2003	19,8	72,0	1007,0	81,2	1,0
Aug. 2003 * <sup>1</sup>	20,5	63,2	1007,5	23,9	0,8
Sept. 2003	14,4	78,5	998,3	41,4	0,7
Okt. 2003	5,7	88,9	964,6	42,8	0,8
Nov. 2003	7,1	90,9	1008,8	28,6	1,3
Dez. 2003	2,6	91,4	1011,4	59,0	1,3
<b>Jahresmittel 2003</b>	<b>9,8</b>	<b>79,1</b>	<b>1002,9</b>	<b>498,2</b>	<b>1,1</b>
Jan. 2004	1,5	91,0	1003,2	86,2	1,3
Feb. 2004	3,7	86,3	1008,9	66,6	1,3
März 2004	4,9	80,5	1010,7	40,2	1,5
April 2004	10,1	74,1	989,6	46,9	1,2
Mai 2004	12,0	78,9	992,6	55,8	0,8
Juni 04	15,7	77,9	998,4	79,1	1,0
Juli 04	16,9	81,4	990,3	102,5	0,8
August 04	19,4	75,6	1000,0	64,1	1,1
September 04	14,8	79,0	1001,3	53,8	1,1
Oktober 04	10,4	85,6	979,7	68,6	1,2
November 04 * <sup>1</sup>	5,2	91,2	1012,2	73,1	
Dezember 04 * <sup>1</sup>	3,0	89,1	1010,4	34,9	
<b>Jahresmittel 2004</b>	<b>9,8</b>	<b>82,5</b>	<b>999,8</b>	<b>771,8</b>	<b>1,1</b>

\*<sup>1</sup> Datenlücken vom 24.07.02-31.08.03, 17.02.03 bis 11.03.03 und vom 04.08.03 bis 19.08.03 sowie die fehlende Datenaufzeichnung im November und Dezember 2004 wurden durch Messwerte des Deutschen Wetterdienstes, Station Hannover Langenhagen ersetzt.

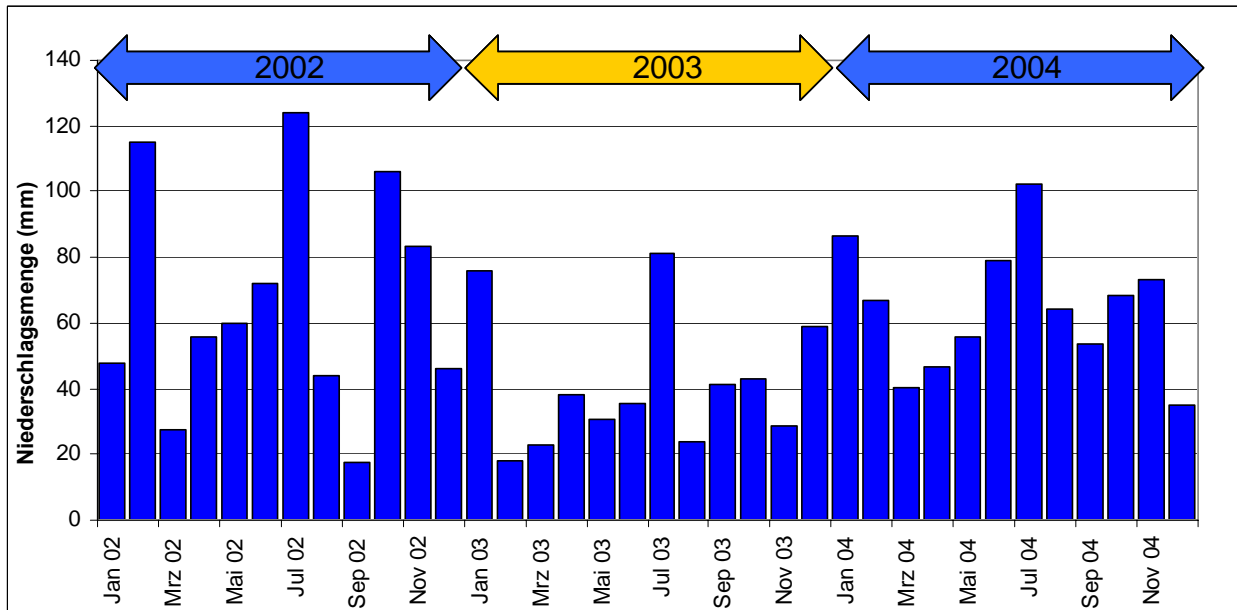
\*<sup>2</sup> Niederschlagsmenge: > 70 mm/ Monat, < 50 mm/ Monat

Die Lufttemperatur unterlag starken jahreszeitlichen Schwankungen mit in der Regel höchsten Tagesmittelwerten im Juli und August und niedrigsten im Dezember und Januar. Der kälteste Tag war am 9. Januar 2003 mit einem gemessenen Tiefstwert von  $-15,8^{\circ}\text{C}$  und einem Durchschnittswert von  $-12,2^{\circ}\text{C}$ . Der wärmste Tag war am 18. August 2003 mit durchschnittlich  $28,3^{\circ}\text{C}$  (Wert des DWD). Der gemessene Höchstwert am TL Schäferhof-Süd lag am 18. Juni 2002 bei  $35,5^{\circ}\text{C}$ .

Die relative Luftfeuchtigkeit am Standort variierte zwischen 40 und 100 %. Über den jährlichen Messzeitraum betrachtet, ist die Luftfeuchtigkeit sinuskurvenähnlich verteilt mit Maximalwerten im Dezember und Minimalwerten zwischen Juni und August. Der Luftdruck schwankte in den Wintermonaten 2001/2002 zwischen 800 und 1000 hPa, ab März 2002 lag er relativ konstant bei ca. 1000 hPa (920-1030 hPa). Lediglich an einzelnen Terminen fiel der Luftdruck schlagartig auf 800-900 hPa ab und nur im Juli 2002 wurde einmalig ein Luftdruck größer 1100 hPa erreicht. Die Tagesniederschläge lagen im Allgemeinen bei maximal  $18\text{ l/m}^2$ ; selten wurden Spitzenwerte von 20 bis  $32\text{ l/m}^2$  gemessen. Die mittlere monatliche Windgeschwindigkeit erreichte 0,7 bis 2 m/s. Die Messung ergab vereinzelte Spitzengeschwindigkeiten von 6 m/s (April 2003). Da es sich allerdings um sehr kurzfristige Ereignisse handelt, ist bei diesen Windstärken trotz fehlendem bzw. spärlichem Bewuchs auf dem Testfeld und den Vergleichsarealen nicht von einer nennenswerten Materialverfrachtung aus der obersten Bodenschicht auszugehen.

Ein Vergleich der Messdaten in den jeweiligen Kalendermonaten der Jahre 2002, 2003 und 2004 sowie die extrem unterschiedlichen Jahresniederschlagsmengen belegen die starken Klimaschwankungen während der Projektlaufzeit (vgl. Tab. 3.14). Die mittleren monatlichen Lufttemperaturen lagen von Dezember 2002 bis Februar 2003 deutlich unter denen der Wintermonate im Jahr 2001/2002 und 2003/2004. Trotz der an einzelnen Tagen überdurchschnittlich hohen Lufttemperaturen des heißen Sommers 2003 lag der monatliche Durchschnitt nur knapp über dem der Jahre 2002 und 2004. Im Jahresmittel betragen die Lufttemperaturen konstante  $9,8\text{-}9,9^{\circ}\text{C}$ .

Die Summe der Niederschläge lag mit 498 mm im Jahr 2003 mehr als ein Drittel unter der der Jahre 2002 (798 mm) und 2004 (772 mm). Verantwortlich für die hohe Niederschlagssumme im Jahr 2002 waren die regenreichen Monate Februar, Juli und Oktober mit Niederschlagsmengen von 106 bis 124 mm (s. Abb. 3.72). Dem entgegen erreichte im Jahr 2003 lediglich der Monat Juli Spitzenwerte von 81 mm Niederschlag. Das Jahr 2003 war durch starke Trockenheit und hohe Lufttemperaturen in den Sommer- und Herbstmonaten geprägt. Niederschläge traten häufig als kurzzeitige Schauerereignisse mit Wassermengen von bis zu 15 mm pro Stunde auf. Der ausgetrocknete Boden ist in diesem Fall nur bedingt in der Lage das Regenwasser aufzunehmen, so dass ein erhöhter Anteil oberflächlich abfließt und die Grundwasserneubildungsrate (vgl. Kap. 3.4) durch die geringen Mengen an Sickerwasser zurückgeht. Im Jahr 2004 wurden über das Jahr verteilt insgesamt wieder höhere Niederschlagsmengen verzeichnet.



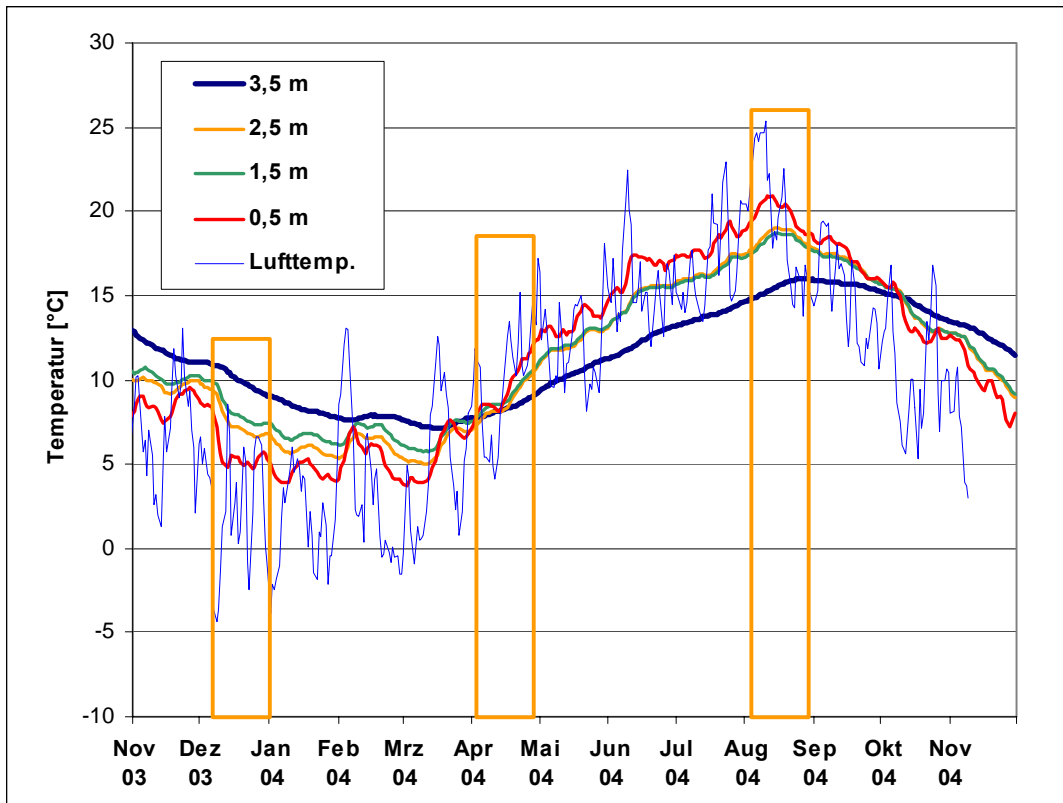
**Abb. 3.72: Monatliche Niederschlagsmenge (mm) am TL Schäferhof-Süd in den Jahren 2002, 2003 und 2004.**

### 3.5.2.2 Bodentemperatur

Anhang 6.2 zeigt die Bodentemperatur in den verschiedenen Tiefen im Vergleich mit der Lufttemperatur von Dezember 2001 bis Dezember 2004. Insgesamt weisen die Werte nur geringe Schwankungen zwischen den Tagesmessdaten auf, jahreszeitliche Temperaturveränderungen wirken sich dagegen kontinuierlich auf die Temperaturkurve des Bodens aus.

Für die Winter- und Sommermonate zeigen sich in den gemessenen Tiefen (0,5 m, 1,5 m, 2,5 m, 2,5 m u. GOK) zwei unterschiedliche Temperaturprofile, die jeweils im Frühjahr (April) und Herbst (September-Oktober) einem Wechsel unterliegen. Während die Bodentemperatur im Winter mit der Bodentiefe zunimmt, nimmt sie im Sommer tendenziell mit der Tiefe ab (s. Abb. 3.73).

Die Bodentemperatur in 0,5 m Tiefe ist stark durch die Lufttemperatur beeinflusst und reichte seit Messbeginn von 2°C im Januar 2002 bis maximal 23°C im August 2003. Durch den heißen Sommer 2003 lagen die mittleren monatlichen Bodentemperaturen in 0,5 m und 1,5 m u. GOK ca. 2 °C über den Werten im Sommer 2002 und 2004. In der tiefsten Messstelle in 3,5 m u. GOK spielte vor allem der Einfluss der Grundwassertemperatur und der Wärmespeicherung des Bodens eine Rolle. Der Temperaturbereich lag in der gesamten Messperiode bei 7-18 °C. Die Temperaturmessung der beiden dazwischen liegenden Sonden in 1,5 m und 2,5 m Bodentiefe wird anteilig von den genannten Effekten bestimmt. Der Temperaturbereich lag sich zwischen 3-4 und 21 C.



**Abb. 3.73: Temperaturprofil am TL Schäferhof-Süd im Dezember 2003, April 2004 und August 2004.**

Nach den Messdaten am TL Schäferhof-Süd variierten je nach Jahreszeit die Bodentemperaturen in den verschiedenen Tiefen in großem Maße. Daraus ergab sich ein unterschiedlich starker Einfluss auf die mikrobiellen Abbauprozesse im Boden. Im Jahresdurchschnitt lagen aber die Temperaturen an allen Sonden unabhängig von der Tiefe und den zwischenzeitlichen Schwankungen bei 11-12°C (Mittelwerte 2002 und 2004).

### 3.5.3 Interpretation der Ergebnisse

Über einen Messzeitraum von drei Jahren zeigte sich, welchen starken Schwankungen die Klimaparameter, insbesondere die Niederschlagsmenge und die Luft- bzw. Bodentemperatur, unterliegen. In Abhängigkeit von den Niederschlägen und der anfallenden Sickerwassermenge variierte die Bodenfeuchte, die Einfluss auf die Mobilität und Bioverfügbarkeit von Sauerstoff, Nährstoffen und Schadstoffen nimmt. Gleichzeitig sind die Sickerwassermenge und damit die Grundwasserneubildungsrate entscheidend für den Schadstoffaustrag ins Grundwasser. Die Bodentemperatur wird durch die allgemeine Klimasituation am Standort beeinflusst. Hohe Lufttemperaturen während der Sommermonate tragen maßgeblich zu höheren mikrobiellen Abbauraten bei. Dieser Zusammenhang zeigte sich vor allem bei der Auswertung der Bodenluftmessungen. Aus den Bodenluftmessungen kann auch abgeleitet werden, dass selbst bei niedrigen Bodentemperaturen, wie sie in den Wintermonaten vorlagen, der biologische Schadstoffabbau nicht vollständig gehemmt ist.



Die Niederschlagsmenge und die Lufttemperatur sind damit die Schlüsselparameter unter den Klimaparametern. Der Luftdruck kann sich auf die Bodenluftmessungen auswirken, so dass keine Messungen unter extremen Luftdruckbedingungen erfolgen sollten. Liegt der Bodenluftpegel im Bereich hoher Schadstoffbelastungen, sind die Auswirkungen von Luftdruckschwankungen zumeist von untergeordneter Bedeutung, da ständig hohe Konzentrationen der zu messenden Gase produziert werden (LEWITZ 2004). Dies bestätigte sich bei den im Forschungsprojekt durchgeführten Messungen, bei denen keine Korrelation zwischen dem Luftdruck am Tag der Messung und den Bodenluftparametern nachgewiesen wurde. Prinzipiell besteht aber ein Zusammenhang zwischen dem Luftdruck und der Volatilisierungsrate leicht flüchtiger Verbindungen.

Der Einfluss der weiteren gemessenen Klimaparameter war am TL Schäferhof-Süd von untergeordneter Bedeutung. Unter extremen Klimasituationen muss die Einflussnahme zum Beispiel der Luftfeuchtigkeit oder der Windgeschwindigkeit gegebenenfalls anders eingeschätzt werden. LEWITZ (2004) empfiehlt zur umfassenden Dokumentation bei der Bodenluftbeprobung eine Angabe der Windstärke und Windrichtung.

Der Betrieb einer eigenen Wetterstation und die Datenauswertung ist sehr arbeitsaufwändig, so dass, wenn auf vergleichbare Daten nächstgelegener Wetterstationen, zum Beispiel des Deutschen Wetterdienstes (DWD), zurückgegriffen werden kann, die Übertragbarkeit dieser Wetterdaten auf den Standort im Allgemeinen gegeben und die potenzielle Abweichung tolerierbar ist.

Die Bodentemperaturen können aus diesen Wetterdaten allerdings nur grob abgeschätzt werden, da je nach Standortlage, Bodenart und Grundwasserflurabstand die oberflächige Aufheizung, die Wärmespeicherung und der Einfluss der Wassertemperatur variieren können.

### 3.6 Schlussfolgerungen

Am **Standort TL Schäferhof-Süd** liegt im abgesteckten Testfeld eine erhebliche Kontamination der ungesättigten und gesättigten Bodenzone mit MKW, BTEX und anderen Alkylbenzolen vor. Das Spektrum der MKW-Verbindungen belegt, dass es sich um einen bereits leicht verwitterten Diesel-Schaden handelt, der aus der bis 1976 andauernden Nutzung des Bereiches als Dieselabfüllstation resultiert.

Die inhomogene **Schadstoffverteilung** im Boden erwies sich als entscheidender Faktor für die Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse am TL Schäferhof-Süd. Für die **Mineralölkohlenwasserstoffe** konnte im Testfeld anhand der Bodendaten keine statistisch gesicherte Schadstoffminderung belegt werden, da die Spannbreite der Schadstoffkonzentrationen der innerhalb eines Bohrareals zu vergleichenden Bohrpunkte größer war als die Schadstoffminderung durch mikrobiellen Abbau, Verflüchtigung oder Auswaschung. Die über drei Jahre aufgenommenen Bodenluftdaten belegen aber, dass im Testfeld über den gesamten Zeitraum des Forschungsprojektes mikrobielle Abbauprozesse stattgefunden haben. Die hohe Kohlendioxidproduktion in der Bodenluft bei gleichzeitiger fast vollständiger Sauerstoffzehrung sind eindeutige Anzeiger für die mikrobielle Aktivität im Boden, die sich bei dem vorliegenden humusarmen und nahezu karbonatfreien Sandboden nur durch den Schadstoffabbau erklären lässt. Die Abnahme des organischen Gesamtkohlenstoffes und der n-Alkane in der Bodenluft während der Projektlaufzeit ist ein weiterer Hinweis auf den Abbau von MKW-Verbindungen in der ungesättigten Bodenzone. In den deutlich geringer belasteten Böden des kontaminierten Vergleichsareals verringerten sich die zu Projektbeginn in der ungesättigten Bodenzone vorhandenen Schadstoffe (< 400 mg/kg MKW) innerhalb von drei Jahren auf Gehalte unter der Bestimmungsgrenze.

Welche Verbindungen innerhalb des **MKW-Spektrums** mikrobiell abgebaut wurden, hing vom Wassergehalt und der Sauerstoffverfügbarkeit innerhalb der verschiedenen Boden-zonen ab. Während in der ungesättigten Bodenzone n-Alkane und iso-Alkane nachgewiesen wurden, wiesen der Kapillarsaum und die gesättigte Bodenzone ausschließlich iso-Alkane verschiedenster Kettenlänge, dagegen aber keine n-Alkane auf. Dieser Befund legt einen selektiven Abbau von n-Alkanen unter den anaeroben Bedingungen des hoch kontaminierten Kapillarsaumes und der darunter liegenden Bodenzone nahe.

Deutlicher wird die Schadstoffminderung im Boden anhand der leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffe. Die **BTEX- und Alkylbenzol-Gehalte** sind in den obersten 2 bis 3 Metern der ungesättigten Bodenzone zwischen der Start- und der Abschlussbeprobung deutlich gesunken. Im Kapillarsaum hingegen sind die Schadstoffkonzentrationen unverändert hoch. Verantwortlich für die Schadstoffminderung sind verschiedene Prozesse: Verflüchtigung, Verlagerung und Auswaschung mit dem Sickerwasser sowie mikrobieller Abbau. Durch die gegenüber den Aliphaten höhere Löslichkeit und verstärkte Ausgasung werden die Monoaromaten relativ schnell im Bodenprofil verlagert. Gleichzeitig weisen sie durch ihre Löslichkeit aber eine höhere Bioverfügbarkeit im Abbauprozess auf. Der Schadstoffrückgang kann für die leicht flüchtigen Verbindungen insbesondere bei der Betrachtung des Tiefenprofils gezeigt werden. Der statistisch gesicherte Nachweis der Schadstoffminderung innerhalb der ungesättigten Bodenzone wird allerdings auch hier durch die inhomogene Verteilung der Kontaminanten im Boden eingeschränkt. Für BTEX und andere Alkylbenzole,

die generell als gut abbaubar gelten, ist aufgrund der jetzigen Datenlage mit einer weiteren Konzentrationsabnahme am TL Schäferhof-Süd zu rechnen.

Um die **Schadstoffminderung** abzuschätzen, wurden für einzelne Bohrareale Abbauraten und –konstanten für die ungesättigte Bodenzone errechnet. Diese können allerdings stark von den "realen" Abbauraten im Boden abweichen, da bei den Feldversuchen zum einen die Anteile des mikrobiellen Abbaus nicht von denen der Verflüchtigung und der Auswaschung differenziert werden konnten und zum anderen innerhalb der Bohrareale die Mittelwerte als Berechnungsgrundlage dienten, die aufgrund der Inhomogenität der Schadstoffverteilung aus stark streuenden Einzelwerten bestimmt wurden.

Unter der Annahme eines optimalen MKW-Abbaus mit der maximalen errechneten Abbaukonstante von  $k=4 \cdot 10^{-4} \text{d}^{-1}$  lässt sich für die Dekontamination des Testfeldes bis zu einem Schadstoffgehalt von 500 mg/kg MKW (LAGA Z 1.2) ein Zeitraum von mindestens 15 Jahren abschätzen. Da der Schadstoffabbau innerhalb des Untersuchungszeitraumes von drei Jahren in vielen Bohrarealen aber deutlich geringer war, muss insgesamt von einem erheblich längeren Zeitraum als 15 Jahre ausgegangen werden. Als problematisch müssen in der ungesättigten Bodenzone vor allem die sehr hohen MKW-Kontaminationen im südlichen Bereich der ehemaligen Dieselabfällstation (bis zu 10.000 mg/kg) eingeschätzt werden, bei denen Hemmeffekte aufgrund der Schadstoffhöhe nicht auszuschließen sind.

Die umfangreichen Untersuchungen der verschiedenen **bodenphysikalischen, physikochemischen und biologischen Parameter** weisen darauf hin, dass der am Standort vorliegende Sandboden aufgrund seiner Nährstoffarmut, des niedrigen pH-Wertes im Boden und seiner insgesamt geringen mikrobiellen Aktivität (Bodenatmung) derzeit nur bedingt für eine gezielte Nutzung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse zur Wiederherstellung der Bodenfunktionen geeignet ist. Durch das Gebäudefundament und nach dem Gebäuderückbau 1995 durch eine Folienabdeckung war der Wasserhaushalt im Testfeld bis zum Jahr 2000 nur durch den lateralen Eintrag von Sickerwasser geprägt. Es hat sich gezeigt, dass damit zwar einerseits bis zu Projektbeginn der Austrag größerer Schadstoffmengen aus der ungesättigten Bodenzone verhindert wurde, sich aber andererseits erst während der Projektlaufzeit ein natürliches Bodenmilieu aufgrund des eindringenden Niederschlagswassers und der damit ansteigenden Bodenfeuchte einstellte. Durch die allmähliche Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen wurde im kontaminierten Vergleichsareal in der ungesättigten Bodenzone ein Anstieg des **pH-Wertes** von durchschnittlich 5,1 auf 6,5 und im Testfeld von 5,0 auf 5,5 beobachtet. Sollte sich der Trend ansteigender pH-Werte im Testfeld weiter fortsetzen, wäre eine der Voraussetzungen für einen zukünftig verstärkten mikrobiellen Abbau gegeben.

Ein gutes **Nährstoffangebot** bewirkt im Allgemeinen eine Anregung der mikrobiellen Aktivität im Boden (vgl. UMWELTBUNDESAMT 2004). Das natürliche Nährstoffreservoir am TL Schäferhof-Süd ist aber stark limitiert, so dass lediglich durch eine artifizielle Anhebung des Stickstoff- und Phosphat-Angebotes diese Ausgangssituation verändert werden könnte (s. Kap. 4). Ergebnisse aus projektbegleitenden Labor- und Technikumsversuchen mit Bodenproben vom TL Schäferhof-Süd bestätigen einen erhöhten MKW-Abbau bei Zugabe von Nitrat- bzw. Ammoniumstickstoff und Phosphat.

Demnach kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Verbesserung des Bodenmilieus, durch neutrale pH-Werte im Boden, eine ausreichende Nährstoffversorgung und Bodenfeuchte am TL Schäferhof-Süd deutlich höhere Abbauraten erreicht werden könnten, als im Verlauf des Forschungsprojektes nachgewiesen werden konnten.

Für die gezielte Nutzung natürlicher Abbauprozesse bei der Altlastensanierung besitzt der mikrobielle Schadstoffumsatz als irreversibler Dekontaminationsprozess die entscheidende Bedeutung. Inwieweit jedoch eine Schadstoffminderung infolge der **Auswaschung** mit dem Sickerwasser oder der Ausgasung leicht flüchtiger Schadstoffe an der Bodenoberfläche zur Erreichung von Sanierungszielen hingenommen werden kann, sollte von den zuständigen Behörden unter Berücksichtigung der Nutzung des Standortes und des Gefahrenpotenzials für relevante Schutzgüter sorgfältig geprüft werden. Nach einer Abschätzung des HESSISCHEN LANDESAMTES FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2001) kann die Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone für das Grundwasser am TL Schäferhof-Süd als mittelmäßig eingestuft werden. Am Standort hat sich aber andererseits gezeigt, dass ein wesentlicher Teil des mikrobiellen Abbaus von BTEX und Alkylbenzolen erst im Grundwasser stattfindet. Der Austrag von löslichen Verbindungen mit dem Sickerwasser und der anschließende biologische Abbau von Kohlenwasserstoffen im Grundwasser ist damit ein wichtiger Bestandteil des natürlichen Schadstoffabbaus am TL Schäferhof-Süd.

Die Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen haben gezeigt, dass die Interpretation der Analysendaten nur dann plausible Schlussfolgerungen erlaubt, wenn man die zeitliche und räumliche Variation der **Schadstoffgehalte im Grundwasser mit den jeweiligen Grundwasserständen** korreliert. Dabei zeigt sich, dass die im Untersuchungszeitraum festgestellten Grundwasserschwankungen mit einer Varianz von bis zu 1,7 m einen erheblichen Einfluss auf die Schadstoffgehalte im Grundwasser nehmen. Zunächst war die Interpretation dadurch erschwert, dass die Korrelation räumlich nicht einheitlich ist. An der Messstelle im Schadenszentrum verhalten sich die BTEX-Gehalte im Grundwasser gegenläufig zum Grundwasserstand, das heißt bei steigendem Grundwasserstand sinken die BTEX-Gehalte, während sie bei sinkendem Grundwasserstand wieder ansteigen. Eine schlüssige Interpretation dieses Befundes ist nur möglich in Verbindung mit den Ergebnissen den Bodenuntersuchungen. Diese haben gezeigt, dass das Maximum der Bodenkontamination in ca. 5 m Tiefe im Kapillarsaum liegt. Bei niedrigen Grundwasserständen befindet sich diese Bodenkontamination gerade noch im gesättigten Bereich, während bei hohen Grundwasserständen auch der darüber liegende geringer kontaminierte Bereich von Grundwasser durchströmt wird. Bei hohen Grundwasserständen werden folglich die aus dem Boden in Lösung gegangenen Schadstoffe (BTEX) stärker verdünnt, als dies bei niedrigen Grundwasserständen möglich ist. Der gegensinnige Verlauf von Grundwasserstand und Schadstoffkonzentration im Schadenszentrum bleibt allerdings in der Abstromfahne nicht erhalten. In etwa 70 m Entfernung vom Schadenszentrum ist bereits eine gleichsinnige zeitliche Varianz der Schadstoffkonzentration und des Grundwasserstandes erkennbar. Eine mögliche Erklärung für diesen Befund besteht darin, dass sich im Schadenszentrum bei niedrigen Grundwasserständen Schadstoffmaxima ausbilden, die sich dann in Richtung Vorfluter (Weser) ausbreiten. Die Amplitude dieser Maxima schwächt sich durch Dispersion und biologischen Abbau der Aromaten allerdings ab. Es ist zu erwarten, dass nach einer bestimmten Fließstrecke die zeitlichen Konzentrationsschwankungen der BTEX-Aromaten deutlich abnehmen werden, sofern im Abstrom keine neuen Schadstoffeinträge hinzu-

kommen. Dies kann allerdings zurzeit analytisch nicht belegt werden, da geeignete Messstellen im weiteren Abstrom fehlen.

Aus den Grundwasseruntersuchungen ergibt sich, dass zwar biologische Abbauprozesse eindeutig nachweisbar, aber eine Bestimmung der Abbauraten zur Erstellung von Prognosen bezüglich der erforderlichen Zeit bis zur Erreichung eines Zielwertes aufgrund der Datenlage nicht zuverlässig durchführbar ist. Der Einfluss der Grundwasserschwankungen auf die Schadstoffkonzentrationen ist wesentlich stärker als der Einfluss von biologischen Abbauprozessen, so dass eine Bestimmung von Abbauraten nicht möglich ist. Da in den verfügbaren Modellen zur Bestimmung von Abbauraten (z.B. Bioscreen- Natural Attenuation Decision Support System) Grundwasserschwankungen nicht als relevante Parameter eingearbeitet sind, ist der Einsatz dieser Modelle im vorliegenden Fall nicht sinnvoll. Da jedoch in diesem Forschungsprojekt der Schwerpunkt auf die Untersuchung der ungesättigten Bodenzone gelegt wurde und die Grundwasseruntersuchungen nur ergänzend betrachtet wurden, sind die gewonnenen Erkenntnisse zufrieden stellend.

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung des natürlichen Schadstoffabbaus am TL Schäferhof-Süd anhand ausgewählter **Kriterien und Parameter**. Gleichzeitig sollten die zur Probennahme und zum quantitativen Nachweis der ausgewählten Parameter verwendeten Methoden auf ihre Eignung zur Beurteilung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone geprüft werden. Nachfolgend sind die aus dem Forschungsprojekt gewonnenen Erfahrungen bezüglich der untersuchten Kompartimente zusammengefasst. Die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf Liegenschaften mit anderen Standortgegebenheiten bedarf gegebenenfalls einer Prüfung.

**Bodenuntersuchungen** im Hinblick auf die Schadstoffgehalte und deren räumliche Verteilung sowie auf einige physiko-chemische Parameter bilden die Basis für die Einschätzung des natürlichen Abbau- und Rückhaltepotenzials an einem Standort. Dabei kann in Abhängigkeit von der Schadstoffverteilung die Lokation der Beprobungspunkte, deren Anzahl und Abstand entscheidend für die spätere Bewertungsgrundlage und den Nachweis der Schadstoffminderung sein. Bei älteren Schadstoffquellen zeigt ein MKW-Screening das vorliegende Spektrum der Verbindungen an. Neben der Schadstoffanalytik können Untersuchungen des Bodenmilieus (pH-Wert, Karbonatgehalt, Nährstoffgehalt, Bodenatmung) bereits zu einem möglichst frühen Zeitpunkt wichtige Hinweise auf das Abbaupotenzial geben. Unter Berücksichtigung qualitätssichernder Maßnahmen können für MKW und leicht flüchtige Kohlenwasserstoffe Linerbeprobungen und anstelle von Einzelproben die Entnahme von Intervallproben über den gesamten Bohrkern bzw. bei stark inhomogenem Bodenprofil schichtweise empfohlen werden.

Ein **Bodenluft-Monitoring** bietet die Möglichkeit, unabhängig von der Entnahme von Bodenproben zu einer zwischenzeitlichen Einschätzung der mikrobiellen Abbauprozesse zu gelangen. Da die Bodenatmung je nach Bodenart variiert, ist neben der Einrichtung von stationären Bodenluftpegeln im Schadensherd ein Kontrollpegel in unkontaminierten Bereichen sinnvoll. Die Untersuchungen selbst lassen sich mit wenig Aufwand und Kosten durchzuführen. Die regelmäßige Vor-Ort-Messung der Bodenluftzusammensetzung (Sauerstoff, Kohlendioxid, Methan, organischer Gesamtkohlenstoff) und die Schadstoffanalytik (n-Alkane, BTEX, andere Aromaten) bilden zusammen genommen wichtige Indikatoren für die Beurteilung des mikrobiellen Abbaus. Die Erfassung der Schadenssituation und -entwicklung an

einem Standort setzt zyklische Messungen zwingend voraus. Der zeitliche Abstand zwischen den Beprobungen sollte sich an den standortbedingten Gegebenheiten, insbesondere den Einflussfaktoren auf die Bodenluftzusammensetzung und die Schadstoffentwicklung orientieren, jedoch ein Intervall von 3 Monaten nicht überschreiten. Aufgrund jahreszeitlich bedingter Schwankungen der Bodenluftzusammensetzung ist ein Monitoring über mindestens ein Jahr empfehlenswert. Die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt haben gezeigt, dass Bodenluftmessungen nicht nur den Status quo einer Schadenssituation erfassen, sondern Prognosen über die weitere Entwicklung von Abbauprozessen zulassen.

Bedingt durch den Gasaustausch im Boden spiegelt die Bodenluftmessung nicht nur die punktuelle Situation am Messpegel wider, sondern stellt eine integrative Methode für seine Umgebung dar. Bodenluftuntersuchungen eignen sich zur Einschätzung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone. Aus den Konzentrationen der leicht flüchtigen Schadstoffe in der Bodenluft kann zudem der potenzielle Austrag mit dem Sickerwasser prognostiziert werden.

Die Gewinnung von **Sickerwasser** mittels Saugkerzen ist nach derzeitigem Stand eine der wenigen Methoden, die eine Probenahme in-situ, das heißt aus dem ungestörten Bodenkörper und nicht aus durch die Probenaufbereitung beeinflusstem Boden, ermöglicht. Da sie andererseits nur punktbezogene Ergebnisse liefert, müssen nach Möglichkeit mehrere Messstellen in einer Beprobungstiefe eingesetzt werden. Für die Bestimmung der Parameter MKW, BTEX, Alkylbenzole und Benzoesäure sind Saugkerzen aufgrund der potenziellen Sorption am verwendeten Material bzw. der Ausgasung leicht flüchtiger Schadstoffe jedoch ungeeignet (vgl. KALBE et al. 2003, GIESE et al. 2003, LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG 2004). Zur Abschätzung von MKW-Gehalten im Sickerwasser bietet sich an, auf die Schadstoffgehalte in Bodeneluat und im Grundwasser zurückzugreifen. Der bei der Sickerwassergewinnung angelegte Unterdruck und die im Allgemeinen langen Probensammelzeiten bewirken auch Veränderungen der allgemeinen Bodenwasserbeschaffenheit (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG 2004). Die Messergebnisse physikochemischer Parameter (pH-Wert, Leitfähigkeit, Nährstoffe, Eisen, Sulfat etc.) müssen vor diesem Hintergrund kritisch betrachtet werden. Wenn aufgrund des Bodentyps oder der Niederschlagsmenge von ausreichenden Sickerwassermengen ausgegangen werden kann, ist abzuwägen, ob die zu erwartenden Ergebnisse im Verhältnis zum hohen Aufwand bei der praktischen Umsetzung eines Sickerwasser-Monitorings stehen. Die Sickerwassergewinnung mittels Saugkerzen kann bei der Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in jedem Fall nur als unterstützende Maßnahme angesehen werden.

Um den Schadstoffaustrag aus der Wasser ungesättigten Bodenzone und den weiteren mikrobiellen Schadstoffabbau in der gesättigten Bodenzone beurteilen zu können, ist ein **Grundwasser-Monitoring** unerlässlich. Für die Entnahme von Grundwasserproben liegen langjährige Erfahrungen aus der Altlastenpraxis vor. Bei MKW-, BTEX- und Alkylbenzol-Kontaminationen ist die Anzahl und Lage der Grundwassermessstellen im Abstrom der Schadensquelle, ihr Ausbau und der zeitliche Beprobungsabstand von entscheidender Bedeutung für die Eingrenzung der Schadstofffahne und die Beurteilung der Einflussnahme mikrobiologischer Abbauprozesse auf die Messparameter. Es hat sich gezeigt, dass es zur Beurteilung des biologischen Abbaus unerlässlich ist, die Schwankungen der Grundwasserstände in Verbindung mit der zeitlichen Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser zu betrachten. Lösungsprozesse und der Eintrag an Kontaminanten in das

Grundwasser können gegenüber dem biologischen Abbau überwiegen, was eine Einschätzung von Abbauraten bzw. quantitative Aussagen erschwert.

Das am Standort vorherrschende **Klima**, insbesondere die Niederschlagsmenge und die Lufttemperatur, nimmt starken Einfluss auf die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse. Verlässliche Klimadaten sind daher eine wichtige Voraussetzung für die Einordnung der im Boden, in der Bodenluft, im Sickerwasser und im Grundwasser gewonnenen Ergebnisse. Der Betrieb einer eigenen Wetterstation und die Datenauswertung sind für den Routinebetrieb allerdings sehr arbeitsaufwändig. Die Internetseite des Deutschen Wetterdienstes ([http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe\\_tageswerte.htm](http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe_tageswerte.htm)) bietet die Klimadaten vieler verlässlicher Wetterstationen in Deutschland, so dass in vielen Fällen auf die Daten einer nahe gelegenen und den Standortgegebenheiten entsprechenden Wetterstation zurückgegriffen werden kann.

Im Verlauf des Forschungsprojektes wurde durch die umfangreiche Bodenbeprobung und das vierteljährliche Monitoring der Bodenluft, des Sickerwassers und des Grundwassers eine große Datenmenge aufgenommen. Aus den Untersuchungen der verschiedenen Kompartimente konnten Tendenzen für den mikrobiellen Schadstoffabbau am TL Schäferhof-Süd ermittelt werden. Trotzdem musste von den Forschungsnehmern festgestellt werden, dass für die Feldversuche eine Laufzeit von drei Jahren nicht ausreichend war, um eine abschließende Beurteilung treffen zu können. Nicht zuletzt fehlen für eine qualitative Einschätzung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone weitere Referenzprojekte, die einen Vergleich der Feldergebnisse und eine Diskussion über die ablaufenden Prozesse ermöglichen.

## 4 Handlungsempfehlungen für das TL Schäferhof-Süd und weiterer Forschungsbedarf

Aus den derzeit vorliegenden Erkenntnissen ergeben sich verschiedene Handlungsoptionen und Konzepte für eine potenzielle zukünftige Nutzung der Liegenschaft beziehungsweise des untersuchten Testfeldes, die hier unabhängig von den Kosten, ihrer Umsetzbarkeit und einem möglicherweise kurzfristigen Nutzungsplan für das TL Schäferhof-Süd vorgestellt werden.

Mit dem Forschungsprojekt wurden umfangreiche Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen, die zum Verständnis der **natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse** am Modellstandort TL Schäferhof-Süd und für vergleichbare Fallgestaltungen beigetragen haben. Wie bereits dargestellt (vgl. Kap. 3.6) muss unter derzeitigen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse am Standort für sich genommen nicht ausreichen, um kurzfristig eine Dekontamination hoch kontaminierter Bodenbereiche wie die der ehemaligen Dieselabfüllstation zu erreichen. In wie fern sich zukünftige Veränderungen im Bodenmilieu (insbesondere eine pH-Erhöhung) so positiv auf den mikrobiellen Schadstoffabbau auswirken, dass der natürliche Abbau und Rückhalt von MKW, BTEX und Alkylbenzolen als eine Handlungsoption zur Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen und damit als Voraussetzung für eine künftige Verwertung des Standortes gesehen werden kann, müsste anhand weiterer Untersuchungen zum Beispiel an den bestehenden Bodenluft- und Grundwasserpegeln abgeschätzt werden.

Sollte auch zukünftig ein regelmäßiges **Grundwassermonitoring** durchgeführt werden, wird empfohlen, die Beprobung auf die neu eingerichteten Grundwassermessstellen MP 1-5 auszuweiten und zusätzliche hydrochemische Parameter, die Hinweise auf mikrobielle Abbauprozesse im Grundwasser liefern können, in den Analysenplan aufzunehmen. An der Messstelle MP 5 hat sich gezeigt, dass neben dem Testfeld weitere Schadensquellen Einfluss auf die Kontamination des Grundwassers am TL Schäferhof-Süd nehmen. Um die von diesen Schadensherden ausgehende Gefährdung des Grundwassers abschätzen zu können, wäre eine weitergehende Prospektion des Geländes erforderlich.

Ein kontrollierter natürlicher Schadstoffabbau und –rückhalt bildet demnach nur dann eine Alternative zu aktiven Sanierungsmaßnahmen, so lange keine Nutzungsänderung des Standortes vorgesehen ist. Als einfachste **ex-situ Sanierungsmaßnahme** käme zunächst das Auskoffern hoch kontaminierter Bodenbereiche, wie stellenweise bereits beim Rückbau der Gebäude und Tankanlagen auf dem Standort geschehen, in Frage. Das Grundwasser im Abstrom der ehemaligen Dieselabfüllstation ist stark mit BTEX und anderen Alkylbenzolen kontaminiert. Durch Entfernen der Schadensquelle in der ungesättigten Bodenzone würde der derzeitige Eintrag in das Grundwasser gestoppt und eine Dekontamination des Grundwassers durch mikrobielle Abbauprozesse erfolgen. Hierzu wäre ein **Bodenaustausch** erforderlich, der die gesamte Fläche des ehemaligen Gebäudeumrisses und der angrenzenden Bereiche bis in eine Aushubtiefe von mindestens 6 m u. GOK umfasst.

Wie in Kap. 3.6 erläutert, ist davon auszugehen, dass am Standort weitere unbekannte Schadensherde vorliegen, die zu einer Grundwasserverunreinigung führen. Punktuelle



Maßnahmen im Bereich der ehemaligen Dieselabfüllstation wären demnach nur im Rahmen eines Sanierungs- und Nutzungskonzeptes für größere Bereiche des Standortes sinnvoll. In Teilbereichen des Standortes mit geringeren Schadstoffkonzentrationen im Boden (vgl. kontaminiertes Vergleichsareal) sind keine aktiven Maßnahmen erforderlich, da mit einem natürlichen Schadstoffabbau gerechnet werden kann.

Als die natürlichen Abbauprozesse unterstützende **in-situ-Maßnahmen** können für die ungesättigte Bodenzone Infiltrations- und Belüftungsverfahren und oberflächennah die Phytoremediation genutzt werden. Bei **Infiltrationsverfahren** werden über Verrieselung, Lanzen und Pegel Additive (Nährstoffe, Co-substrate, Elektronenakzeptoren, Puffer-substanzen) in den Boden eingebracht, die geeignet sind, den biologischen Abbau zu stimulieren oder den Schadstoffabbau limitierende Faktoren aufzuheben (WARRELMANN 2001).

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Ergebnisse zum natürlichen Schadstoffabbau am TL Schäferhof-Süd wäre in erster Linie eine Verbesserung der **Nährstoffversorgung** und des pH-Wertes im Boden anzustreben. Die Verteilung von Nährstoffen im Boden stellt aufgrund ihrer hohen Löslichkeit in der Regel kein Problem dar. Vielmehr ist bei Anhebung des C:N:P-Verhältnisses - bis auf den Schadstoffgehalten im Testfeld angemessene Stickstoff- und Phosphorgehalte - darauf zu achten, dass eine schädliche Verunreinigung des abstromigen Grundwassers durch den Austrag nicht vollständig gezehrten Nitrats, Ammoniums oder Phosphats ausgeschlossen wird. Unter Sauerstoffmangel kommt Nitrat neben der Funktion als Nährstoff gleichzeitig die Rolle als alternativer Elektronenakzeptor zu. Im sauerstoffarmen Grundwasser könnte eingetragenes Nitrat demnach auch zum mikrobiellen Schadstoffabbau beitragen. Für die Düngung des Bodens schlägt LFU BADEN WÜRTEMBERG (1991) für oberflächennahe Schadstoffverunreinigungen bis in ca. 2 m u. GOK eine Zugabe von Nährsalzen an der Bodenoberfläche, darunter den Einbau eines Infiltrationssystems vor.

Im Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie wurden mit Bodenproben, die am Rand des Testfeldes entnommen wurden, verschiedene Versuche zur Nährstoff-Optimierung durchgeführt. In Batchtests mit homogenisierten Bodenproben konnte bei Einstellen eines C:N:P-Verhältnisses von 100:5:2 unter aeroben Bedingungen ein bis zu 60 % höherer MKW-Abbau als in der undotierten Kontrollprobe erreicht werden. Auch in Säulenversuchen (Säulenlänge 50 cm, Ø 5 cm) mit homogenisiertem Boden wurde bei Zugabe von Nitrat, Ammonium und Phosphat mit dem Sickerwasser ein deutlich höherer MKW-Abbau im Boden gegenüber der Kontrollprobe festgestellt. Da Nitrat- und Ammonium nicht vollständig gezehrt wurden, wurden allerdings Nitrat (> 50 mg/l) und Ammonium (> 5 mg/l) mit dem Sickerwasser ausgetragen. Technikumsexperimente, bei denen ungestörte Bodenprofile aus 2-3 m u. GOK mit Niederschlagswasser oder einer Nitratlösung berieselt wurden, bestätigen das Problem des potenziellen Stickstoffaustrages. Die Einflussnahme der Nitratzugabe auf den Abbau von MKW in den Bodensäulen (Säulenlänge 100 cm, Ø 10 cm) ist zwar anzunehmen, aber aufgrund der sehr inhomogenen Schadstoffverteilung in dem ein Meter langen Bodenkörper nach bisheriger Auswertung nicht quantifizierbar.

Ein weiterer die natürlichen Abbauprozesse am TL Schäferhof-Süd limitierender Faktor ist der **pH-Wert**. Die Kalkung von Böden ist eine weit verbreitete Maßnahme in der Land- und Forstwirtschaft. Die Wirkung auf den pH-Wert im Boden beschränkt sich jedoch meist auf die oberste Bodenschicht. Die erste Neutralisationsstufe des Calciumkarbonats läuft nur in unmittelbarer Nähe des Kalkornes ab und wirkt somit nicht in der Tiefe (SCHEFFER 2002).

Gelöstes Hydrogenkarbonat kann mit dem Sickerwasser zwar in tiefere Bodenschichten gelangen, führt im Boden aber nur zu einer pH-Erhöhung bis maximal pH 5. In den vom Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie durchgeführten Technikumsversuchen mit ungestörten Bodensäulen vom TL Schäferhof-Süd bestätigt sich die Problematik einer aktiven pH-Optimierung. Trotz Zugabe von Calciumkarbonat an der Säulenoberfläche und der kontinuierlichen Zugabe einer Calciumhydroxid-Lösung konnte der pH-Wert nur bis in maximal 30 cm Tiefe deutlich angehoben werden. Für die Praxis lässt sich daraus schließen, dass eine Anhebung des pH-Wertes am TL Schäferhof-Süd durch aktive Maßnahmen bis in größeren Bodentiefen nicht umsetzbar wäre.

Bei der Mineralisierung von MKW dominiert der aerobe Abbau mit Sauerstoff als Elektronenakzeptor aufgrund seiner höheren Umsatzrate gegenüber anaeroben Abbauprozessen (GELLER 2001). Die Bodenluftuntersuchungen am TL Schäferhof-Süd gaben Hinweise darauf, dass im Testfeld teilweise anaerobe Bedingungen vorliegen. Belüftungsverfahren (Bioventing), die Zugabe von gelöstem **Sauerstoff** oder so genannten Oxygen Release Compounds (ORC®), die durch Zerfall zu einer Freisetzung von Sauerstoff führen (WARRELMANN 2001), könnten weitere Möglichkeiten der aktiven Stimulation der natürlichen Abbauprozesse sein.

Als weitere unterstützende Maßnahme kommt die gezielte Bepflanzung der kontaminierten Flächen am Standort in Frage. Bei der so genannten **Phytoremediation** werden höhere, schnell wachsende Pflanzen (Bäume, Sträucher, Gräser, krautige Pflanzen) zur Dekontamination oberflächennaher Bodenverunreinigungen eingesetzt (WARRELMANN 2001). Bei organischen Schadstoffen steht der Effekt der Rhizosphären-Degradation im Bereich der Wurzelzone für den Schadstoffabbau im Vordergrund. Die mikrobiellen Abbauprozesse werden dabei entweder durch die in den Wurzelexudaten vorhandenen Enzyme oder durch vergesellschaftete Bodenbakterien, Bodenpilze oder Mykorrhiza-Pilze angeregt. Gleichzeitig nehmen Bepflanzungen Einfluss auf den Wasserhaushalt im Boden und damit auf die Schadstoffausbreitung und -verteilung mit dem Sickerwasser. Durch den Anstieg organischer Substanzen im Boden ist zusätzlich von einer verstärkten Sorption der Schadstoffe an Humusbestandteilen auszugehen. Für die leicht flüchtigen Schadstoffe kann durch eine Bepflanzung im Allgemeinen die Verflüchtigung in die Atmosphäre eingeschränkt werden. Es ist anzunehmen, dass dieser positive Effekt gegenüber einer nicht auszuschließenden Emission von leicht flüchtigen Schadstoffen über die Transpirationsprozesse der Pflanze (Phytovolatilisation) überwiegt (vgl. BAEDER-BEDERSKI et al. 1999).

Im Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie hat in Laborversuchen mit kontaminierten Böden der Einsatz mykorrhizierter Kiefern entscheidend zum mikrobiellen Abbau von MKW beigetragen (EGGERSTEDT-LEHMANN 2005). Kiefern bilden neben krautartigen Pflanzen den überwiegenden Bestand an Pionier-Gehölzen am TL Schäferhof-Süd. Da bisher nur geringe Erfahrungen über den Einsatz von Pflanzen zur Dekontamination MKW- und BTEX-belasteter Standorte bestehen, bieten sich die Testflächen des TL Schäferhof-Süd aufgrund der guten Datenlage (Schadstoffverteilung, Bodeneigenschaften, physiko-chemische und biologische Parameter) für zukünftige Forschungsprojekte an.

Die in diesem Forschungsprojekt durchgeführte Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass für das Verständnis der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone nach wie vor erheblicher **Forschungsbedarf** besteht. Insbesondere im Feldmaßstab gibt es bislang wenige Referenzprojekte, um die am TL Schäferhof-Süd beobachteten Prozesse und die daraus abgeleiteten Interpretationen abzusichern. Für die gezielte Nutzung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der Sanierungspraxis wäre ihre Beurteilung für weitere Bodentypen und unter anderen Milieubedingungen und hydrogeologischen Bedingungen von großem Interesse.

Am TL Schäferhof-Süd hat sich weiterhin gezeigt, wie wichtig die gleichzeitige Betrachtung aller beteiligten Kompartimente ist, um die in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone ablaufenden Prozesse beurteilen zu können. Bislang findet eine solche übergreifende Betrachtung der ungesättigten und gesättigten Bodenzone wenig Eingang in die Fachdiskussionen über natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse. Sowohl bei zukünftigen Forschungsprojekten als auch in der Praxis sollte stärker berücksichtigt werden, dass nur die **eng vernetzte Untersuchung der Wasser gesättigten und der Wasser ungesättigten Bodenzone** eine fundierte Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse an einem Standort ermöglicht.

## 5 Zusammenfassung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes führten von Februar 2001 bis März 2005 das Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie (UFT) der Universität Bremen, die Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt a.M. und die Firma Umweltschutz Nord in Ganderkesee (bis August 2003) bzw. die Firma alphacon in Ganderkesee (ab August 2003) die zweite Phase des Forschungsprojektes mit dem Arbeitstitel 'Langzeituntersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe am Beispiel kontaminierter militärischer Liegenschaften' (FKZ 298 76 712 / 02) am Standort Tanklager (TL) Schäferhof-Süd bei Nienburg/ Weser durch.

Zu Beginn der Neunzigerjahre nahmen militärisch genutzte Liegenschaften mit einer Gesamtfläche von etwa 1 Million ha ca. 2,8 % der Fläche der Bundesrepublik Deutschland ein. Seither wurde etwa die Hälfte dieser Flächen freigezogen. Auf dem Gebiet des heutigen Landes Brandenburg (230.000 ha) wurden 1989 etwa 8 % der Fläche militärisch in Anspruch genommen, wovon mittlerweile sogar 87% (200.000 ha, d.h. fast 7 % der Landesfläche) nicht mehr militärischen Zwecken dienen und einer zivilen Folgenutzung zugeführt werden können. Je nach ehemaliger betrieblicher Nutzung liegen auf den Standorten nach wie vor punktuelle oder großflächige, diffuse Kontaminationen vor. Schadstoffverunreinigungen durch Mineralölprodukte (wie z.B. Diesel-Kraftstoffe) kommt dabei wegen ihrer Verbreitung auch auf zivilen Altstandorten eine standortübergreifende Bedeutung zu. Im Hinblick auf eine künftige Verwertung kontaminierter, ehemals militärisch genutzter Liegenschaften und um die potenzielle Gefährdung, die von solchen Altstandorten für die Schutzgüter ausgeht, besser einschätzen zu können, ist es sinnvoll, die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes auf diesen Liegenschaften auszuloten. Zwar wurden in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen zu natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen in der gesättigten Bodenzone durchgeführt, die Wirkungsweise dieser Prozesse in der ungesättigten Bodenzone ist bislang jedoch noch wenig erforscht.

Das Ziel des Forschungsprojektes bestand im Nachweis der Schadstoffminderung durch natürlichen Schadstoffabbau in der Wasser ungesättigten Bodenzone anhand der zuvor ausgewählten Schlüsselparameter. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Langzeituntersuchungen sollte eine Bewertung dieser Parameter im Hinblick auf ihre Eignung als Indikatoren für mikrobiologische Abbauprozesse vorgenommen werden.

Das Forschungsprojekt wurde in zwei Teilschritte untergliedert. Zum Teilschritt 1 gehörte sowohl die Erstellung eines Kriterien- und Parameterkataloges für natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse in der Wasser ungesättigten Bodenzone auf der Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche als auch die Ermittlung und Behebung von Kenntnisdefiziten zum ausgewählten Standort und die Auswahl geeigneter Probennahme- und Analysemethoden. Auf dem Gelände des TL Schäferhof-Süd wurden ein geeignetes Testfeld, ein gering kontaminiertes und ein unkontaminiertes Vergleichsareals identifiziert. Der **Kriterien- und Parameterkatalog** zur Beurteilung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone umfasste eine Bewertung von insgesamt 40 ausgewählten Parametern (Kontaminanten, hydrogeologische Parameter, Bodenparameter, physiko-chemische und biologische Parameter) im Hinblick auf ihre grundlegenden

Funktionen und ihre Auswirkungen auf natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse. Aus dem Bewertungskatalog wurden unter Berücksichtigung standortspezifischer Kriterien die für das Untersuchungsgebiet TL Schäferhof-Süd relevanten Parameter (Schlüsselparameter) ausgewählt und detaillierte Probennahme- und Analysenpläne für die Kompartimente Boden, Bodenluft, Sickerwasser und Grundwasser zusammengestellt. Teilschritt 2 umfasste die praktische Durchführung der Untersuchungen sowie die Auswertung und Interpretation der Daten.

Auf dem seit 1976 ungenutzten **Standort TL Schäferhof-Süd** wurden der Bereich einer rückgebauten Dieselabfüllstation mit Lagerschuppen als Testfeld sowie nördlich angrenzend ein kontaminiertes Vergleichsareal und ca. 60 m nordwestlich des Testfeldes ein unkontaminiertes Vergleichsareal identifiziert.

Die Entnahme der **Bodenproben** erfolgte in zwei Feldkampagnen, einer Startbeprobung zwischen November 2001 und Januar 2002 und einer Endbeprobung im Oktober 2004. Im Testfeld wurden acht Bohrareale, in den Vergleichsarealen jeweils ein Bohreal mit einem Durchmesser von 1 m festgelegt. Pro Bohreal wurden jeweils zwei gegenüberliegende Einzelbohrungen (Linerbohrung, DN 100) bis zu einer Tiefe von 6 m u. GOK (in einigen Fällen bis 8 m u. GOK) abgeteuft. Die Auswahl der angewendeten Analysemethoden orientierte sich an den in der BBodSchV (1999) und von der BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (2001 a) aufgeführten sowie in LABO (2002, bei der Startbeprobung LABO 2000-10) vorgeschlagenen Normen. Zur **Qualitätssicherung** wurden interne und externe Vergleichsanalysen durchgeführt sowie die Eignung der Probennahmethode für Bodenproben mit leicht flüchtigen organischen Schadstoffen in einem gesonderten Versuch nachgewiesen. Die Entnahme von Intervallproben über die gesamte Länge eines Bohrkerns (in der Regel 1 m) führte zu repräsentativen Ergebnissen der BTEX-Gehalte im Bodenprofil, wohingegen Einzelproben mit stark variierenden Schadstoffkonzentrationen sich als weniger aussagekräftig für einen Bohrkern erwiesen.

Die **Bodenprofile** im Testfeld und in den Vergleichsarealen waren überwiegend durch Fein-, Mittel- und Grobsande in unterschiedlicher Verteilung mit teilweise feinkiesigen und schluffigen Anteilen charakterisiert (Korndurchmesser 0,06-2 mm). Der Porenanteil variierte im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal zwischen 27 Vol.% und 33 Vol.%. Der anhand der Korngrößenanalyse abgeschätzte Durchlässigkeitsbeiwert lag in der Größenordnung  $k_f = \sim 10^{-4}$  m/s. Der aus dem Gebäuderückbau resultierende Auffüllungskörper über den quartären Sanden erreichte im Testfeld und im nördlich angrenzenden Vergleichsareal eine Mächtigkeit von 0,3 -1,2 m, im unkontaminierten Vergleichsareal von 2-4 m.

Im Testfeld wurde eine horizontal und vertikal stark inhomogene **Schadstoffverteilung** im Boden nachgewiesen. Über das gesamte Bodenprofil sind hohe Schadstoffkonzentrationen (MKW, BTEX, Alkylbenzole) mit einem Maximum im Kapillarsaum bzw. der gesättigten Bodenzone (4-6 m Tiefe) verbreitet. Unterhalb von 6 m u. GOK liegen geringere Schadstoffkonzentrationen vor. Der Grundwasserstand zum Zeitpunkt der Start- und Abschlussbeprobung lag bei ca. 5 m u. GOK. Lateral ist der südliche Bereich der ehemaligen Dieselabfüllstation am stärksten kontaminiert.

Bei der Startbeprobung 2001 wurden im Testfeld in der Wasser ungesättigten Bodenzone **MKW**-Gehalte zwischen Werten kleiner 100 mg/kg und maximal 10.000 mg/kg, **BTEX**-

Gehalte von kleiner 100 µg/kg bis maximal 41.000 µg/kg und **Alkylbenzol**-Gehalte bis maximal 76.000 µg/kg analysiert. Bei der Abschlussbeprobung 2004 waren die MKW-Gehalte unverändert hoch, die BTEX- und Alkylbenzolgehalte erreichten noch maximal 14.000 µg/kg bzw. 53.000 µg/kg. Das kontaminierte Vergleichsareal wies bei der Startbeprobung MKW-Gehalte in der ungesättigten Bodenzone von < 100 bis 380 mg/kg und bis zu 4.600 mg/kg im Kapillarsaum auf. Bei der Abschlussbeprobung konnten in der ungesättigten Bodenzone keine MKW mehr nachgewiesen werden, im Kapillarsaum hingegen 3.000 bis 8.300 mg/kg. Im unkontaminierten Vergleichsareal wurden in der ungesättigten Bodenzone in einzelnen Proben geringe MKW-Gehalte (190-240 mg/kg) gemessen, im Kapillarsaum lagen 160-1.200 mg/kg vor. In beiden Vergleichsarealen wurden BTEX (bis 52.000 µg/kg) und Alkylbenzole (bis 65.000 µg/kg) ausschließlich in der gesättigten Bodenzone festgestellt. BTEX und Alkylbenzole werden aufgrund ihrer höheren Löslichkeit und verstärkten Ausgasung relativ schnell im Bodenprofil verlagert. Gleichzeitig weisen sie durch ihre Löslichkeit aber eine höhere Bioverfügbarkeit im Abbauprozess auf.

Eine Abnahme der Schadstoffkonzentrationen innerhalb eines Bohrareals lässt sich statistisch nur dann eindeutig nachweisen, wenn sich die **Schadstoffminderung** von der inhomogenen Verteilung der Kontaminanten im Boden unterscheidet. In der dreijährigen Projektlaufzeit ist es im Testfeld in der ungesättigten Bodenzone partiell zu einer Schadstoffabnahme insbesondere der leicht flüchtigen Verbindungen gekommen. Im Kapillarsaum hingegen sind die Schadstoffkonzentrationen unverändert hoch. Aufgrund der inhomogenen Verteilung der Kontaminanten im Boden wurde die Schadstoffminderung nicht über die gesamte Fläche des Testfeldes nachgewiesen. Der mikrobielle Abbau von BTEX, Alkylbenzolen und kurzkettigen n-Alkanen (bis C<sub>10</sub>) im Boden wird aber durch die Bodenluftdaten belegt. Für einige ausgewählte Bohrareale wurden anhand der Bodendaten Abbauraten berechnet, die in der ungesättigten Bodenzone bei 0,01-1,2 mg\*kg<sup>-1</sup>\*d<sup>-1</sup> MKW, 1-17 µg\*kg<sup>-1</sup>\*d<sup>-1</sup> BTEX und 5-33 µg\*kg<sup>-1</sup>\*d<sup>-1</sup> Alkylbenzole betragen. In den deutlich geringer belasteten Böden des kontaminierten Vergleichsareals verringerten sich die Schadstoffe bis unter die Bestimmungsgrenze.

In einem **MKW-Screening** wurden im Testfeld zu beiden Beprobungsterminen in der ungesättigten Bodenzone (0-4 m) n-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>10</sub> bis maximal C<sub>26</sub> und iso-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub> (Norpristan und Pristan) und C<sub>16</sub> (Phytan) detektiert. Das Spektrum der nachgewiesenen MKW-Verbindungen entspricht in der Verteilung einem verwitterten Diesel-Schaden. Im kontaminierten Vergleichsareal waren n-Alkane mit Kettenlängen von C<sub>12</sub> bis C<sub>13</sub> sowie iso-Alkane von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub> und C<sub>15</sub> (Pristan) vorhanden. In den Bodenproben des Kapillarsaums bzw. der gesättigten Bodenzone (4-6 m) konnten keine n-Alkane sondern lediglich iso-Alkane mit einer Kettenlänge von C<sub>10</sub> bis C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub> und C<sub>16</sub> identifiziert werden. Dieser Befund legt einen selektiven Abbau von n-Alkanen unter den anaeroben Bedingungen des hoch kontaminierten Kapillarsaumes und der darunter liegenden Bodenzone nahe.

An jeweils einem Bohrpunkt im Testfeld und in den Vergleichsarealen wurden neben den Schadstoffen andere **physiko-chemische** und **biologische Parameter** bestimmt. Das aufgenommene Bodenprofil und die analytischen Untersuchungen des unkontaminierten Vergleichsareals haben gezeigt, dass es zwar den gesetzten Anforderungen bezüglich der Schadstoffkonzentrationen genügt, dass eine Vergleichbarkeit insbesondere der Bodenparameter und physiko-chemischen Parameter mit dem Testfeld und dem kontaminierten

Vergleichsareal aufgrund des Auffüllungskörpers im Bereich des Bohrareals (bis in 4 m u. GOK) aber nicht gegeben war.

Die ermittelten **TOC-Gehalte** resultieren oberflächennah vor allem aus den humosen Anteilen im Oberboden, in größeren Tiefen dagegen korrelieren die Ergebnisse mit den unterschiedlichen Schadstoffgehalten. Die **Nährstoffgehalte** sind ebenfalls an die oberste Bodenschicht gebunden. Ab 1 m Tiefe sind Gesamtstickstoff und Phosphat fast vollständig gezehrt. Der **pH-Wert** stellt einen wichtigen Indikator für die Milieubedingungen im Boden und damit für die mikrobielle Stoffwechselaktivität und den Abbau von Kohlenwasserstoffen dar. Im Testfeld lag der pH-Wert bei der Startbeprobung (2001) zwischen 4,5 und 5,4 und bei der Abschlussbeprobung (2004) zwischen 4,9 und 5,7. Im kontaminierten Vergleichsareal lag er 2001 zwischen 4,9 und 5,6 und 2004 zwischen 5,6 und 6,9. Die **Eisengehalte** im Boden betragen 1.300 bis 3.500 mg/kg.

Die mikrobielle Biomasse (Nachweis der **Bodenatmung**) stellt aufgrund des direkten Zusammenhangs mit biologischen Abbauprozessen einen wichtigen biologischen Parameter dar. Insgesamt wurden im Testfeld und im kontaminierten Vergleichsareal geringe basale Bodenatmungsraten (<100 mg CO<sub>2</sub>/24h kg TS) gemessen. Während sich die Bodenatmungsraten im Testfeld im Untersuchungszeitraum kaum verändert haben, sind sie im kontaminierten Vergleichsareal um das zwei- bis dreifache gestiegen. Die **Dehydrogenase-Aktivität** gilt ebenfalls als Maß für die mikrobielle Aktivität eines Bodens. Die im Forschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse lassen jedoch diesbezüglich keine Schlussfolgerungen zu, da die Werte bei der Abschlussbeprobung unter der Bestimmungsgrenze lagen. Die **potenzielle Nitrifikation** stellt einen schadstoffsensitiven Indikator dar, war allerdings im Testfeld und kontaminierten Vergleichsareal nicht nachweisbar.

Zwischen Januar 2002 und September 2004 wurde auf dem TL Schäferhof-Süd ein Monitoring der Bodenluft, des Sickerwassers und des Grundwassers durchgeführt. Für die Entnahme von **Bodenluftproben** wurden im Testfeld, im kontaminierten Vergleichsareal und im unkontaminierten Vergleichsareal drei stationäre Entnahmestellen mit ausgebautem Pegel in 3,5-4 m u. GOK errichtet und im Abstand von drei Monaten die Bodenluftzusammensetzung (Sauerstoff, Kohlendioxid, Methan, organischer Gesamtkohlenstoff) und die Schadstoffgehalte (n-Alkane, BTEX, andere Aromaten) bestimmt. Die aufgenommenen Daten spiegeln die Schadstoffverteilung und die mikrobiellen Abbauprozesse im Boden wider. Im Testfeld ist die hohe **Kohlendioxidproduktion** in der Bodenluft (8-19 Vol.%) bei gleichzeitiger fast vollständiger **Sauerstoffzehrung** (< 0,1 bis 3,9 Vol.%) ein eindeutiger Anzeiger für die mikrobielle Aktivität. Im kontaminierten Vergleichsareal lagen die Sauerstoffgehalte (0,2 bis 6,5 Vol.%) über und die Kohlendioxidgehalte unter den Werten des Testfeldes (6,6 bis 16,5 Vol.%). Für das unkontaminierte Vergleichsareal ergaben sich nahezu spiegelbildliche Sauerstoff- (12,8-18,4 Vol.%) und Kohlendioxidgehalte (2,3-6,2 Vol.%) in der Bodenluft. Die gemessenen Kohlenwasserstoffe in der Bodenluft korrelieren mit den Schadstoffgehalten an den Pegelausbaupunkten.

Veränderungen des Bodenmilieus wie zum Beispiel Schwankungen der Bodentemperatur oder der Bodenfeuchte wirken sich auf die mikrobielle Aktivität und die Freisetzung der Schadstoffe aus. Diese hier als **Jahreszeiteffekt** benannte Einflussgröße spielt vor allem

in stärker kontaminierten Böden eine wichtige Rolle. Für das Testfeld zeigen die Bodenluftdaten erhöhte Abbauraten in den Sommermonaten, mit daraus resultierenden geringeren Sauerstoff- und erhöhten Kohlendioxidgehalten sowie einem hohen organischen Gesamtkohlenstoffgehalt aus den flüchtigen Abbauprodukten. Anhand der Vergleichsareale wird deutlich, dass je geringer die Schadstoffgehalte im Boden sind, desto weniger sich die jahreszeitlichen Effekte auf die Bodenluftzusammensetzung auswirken.

Um die potenzielle **Varianz der Messparameter** innerhalb eines Monitoring-Intervalls durch äußere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Temperatur und Bodenfeuchte, zu ermitteln, wurde von Mai bis Oktober 2003 zweiwöchentlich eine Bodenluftmessung durchgeführt. Danach lässt sich folgern, dass Bodenluftmessungen im Abstand von drei Monaten trotz des weiten zeitlichen Beprobungsabstandes geeignet sind, um Trends im Hinblick auf natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse erkennen zu lassen. Ein größerer Beprobungsabstand hingegen würde zu deutlichen Lücken führen.

Innerhalb des Untersuchungszeitraumes wurde im Testfeld eine Abnahme der Schadstoffgehalte in der Bodenluft bei fast vollständiger Sauerstoffzehrung festgestellt. Aufgrund des noch vorhandenen Schadstoffreservoirs im Boden wurde kontinuierlich Sauerstoff als Elektronenakzeptor für den **mikrobiellen Abbau** verbraucht. Im kontaminierten Vergleichsareal dagegen wurde eine Abnahme der Schadstoffgehalte bei gleichzeitiger Sauerstoffzunahme gemessen. Aufgrund der zurückgehenden Schadstoffmengen nimmt hier die Sauerstoffzehrung langsam ab. Der Sauerstoffverbrauch und die Kohlendioxidproduktion sind zusammen mit den Schadstoffkonzentrationen als Indikatoren für mikrobielle Abbauprozesse geeignet. Eine alleinige Messung der Bodenatmung oder der Schadstoffkonzentrationen ist hingegen nicht ausreichend, um die ablaufenden Prozesse korrekt zu erfassen. Das unkontaminierte Vergleichsareal hat verdeutlicht, dass ohne den Einfluss mikrobieller Abbauprozesse über den Zeitraum von drei Jahren relativ konstante Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte vorliegen.

Aus den Schadstoffgehalten in der Bodenluft wurden über den Luft-Wasser-Verteilungskoeffizienten (Henry-Konstante) die potenziellen Konzentrationen im Sickerwasser berechnet. Die berechneten BTEX-Konzentrationen entsprechen in der Größenordnung den Ergebnissen der Grundwasseruntersuchungen an der Testfeldmessstelle.

Zur Erfassung der Schadstoffkonzentrationen im **Sickerwasser** wurden im Testfeld zwei Sickerwassermessstellen und in den Vergleichsarealen jeweils eine Messstelle eingerichtet. Insgesamt sieben Edelstahlaugkerzen wurden in 2 bzw. 3,5 m Tiefe eingebaut und für die unterschiedlichen Beprobungshorizonte ein kontinuierlicher Unterdruck von 200 bzw. 350 hPa angelegt. Nach einem Zeitraum von vier Wochen wurden die Sickerwasserproben entnommen und schließlich als Mischprobe eines Probennahme-Intervalls von drei Monaten auf die Schadstoffkonzentrationen und verschiedene hydrochemische Parameter untersucht. Die Probengewinnung und Analytik war aufgrund geringer Sickerwassermengen und durch Messstellenausfall aufgrund kontinuierlicher Verockerung stark eingeschränkt.

Zur **Qualitätssicherung** bei der Probennahme wurden zwei zusätzliche Versuche durchgeführt. Infolge von Verflüchtigung durch den angelegten Unterdruck und bei der Probennahme



sowie infolge mikrobieller Abbauprozesse während der Standzeiten kam es erwartungsgemäß zu erheblichen Minderbefunden bei den leicht flüchtigen Schadstoffen. Die Wiederfindungsrate eines eingesetzten internen Toluol-Standards lag bereits nach einem Tag unter 10 %. Die hydrochemischen Parameter Nitrat, Sulfat, pH-Wert und Säurekapazität wurden ebenfalls durch die Standzeit in den Sammelflaschen beeinflusst und ließen damit nur wenige Rückschlüsse auf die originären Milieubedingungen zu.

Trotz der Einschränkungen in der Datenqualität konnten Messwertunterschiede zwischen Testfeld und kontaminiertem Vergleichsareal beobachtet werden, die sich auf die Höhe der Schadstoffkonzentrationen im Boden zurückführen lassen. Im unkontaminierten Vergleichsareal nahm die Bodenauffüllung entscheidenden Einfluss auf die Messdaten. Die **Nitrat-** und **Sulfatgehalte** im Sickerwasser standen offensichtlich in Zusammenhang mit deren Verbrauch als alternative Elektronenakzeptoren beim mikrobiellen Abbau der Kohlenwasserstoffe. Während im kontaminierten Vergleichsareal wegen der geringen Schadstoffkonzentrationen in 2 m Tiefe keine bzw. keine vollständige Nitratzehrung erfolgte, reichten im Testfeld die Schadstoffkonzentrationen in dieser Tiefe aus, um Nitrat bis auf Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze zu zehren. Ebenso konnte eine Abnahme der Sulfatgehalte mit zunehmenden Schadstoffkonzentrationen beobachtet werden. Durch die Ausgasung von Kohlendioxid während der Verweilzeit des Sickerwassers in den Sammelflaschen lagen die gemessenen **pH-Werte** und **Hydrogenkarbonatgehalte** über den im Bodeneluat bestimmten Werten.

Trotz dieser Befunde erbrachte das Sickerwasser-Monitoring am TL Schäferhof-Süd keine ausreichende Datenlage für die Beurteilung der natürlichen Abbauprozesse. Für die Abschätzung der Schadstoffgehalte im Sickerwasser bietet sich an, auf die Analyseergebnisse der Bodeneluate, der Bodenluftmessung und auf die Schadstoffgehalte im Grundwasser zurückzugreifen.

Das **Grundwassermonitoring** wurde an insgesamt neun Grundwassermessstellen auf dem TL Schäferhof-Süd durchgeführt. Vier der Messstellen wurden schon 1999 eingerichtet und sind von 4 m u. GOK bis max. 12 m u. GOK durchgehend verfiltert. Die anderen fünf Messstellen bilden jeweils eine Zweier-Messstellengruppe, bei der eine flach verfilterte GWM (4-7 m u. GOK) und eine tief verfilterte GWM (7-10 m u. GOK) nebeneinander in getrennten Bohrungen abgeteuft wurden. Diese Messstellen wurden Ende 2001 eingerichtet und ab Januar 2002 in das vierteljährliche Monitoringprogramm, welches Abstichmessungen, Bestimmung der **physiko-chemische Parameter**, der **hydrochemischen Hauptinhaltsstoffe** und der **Schadstoffgehalte** sowie deren **Abbauprodukte** des Grundwassers beinhaltet, aufgenommen.

In der Auswertung und Interpretation wurden hauptsächlich die erhaltenen Daten der Messstellengruppen verwendet, da die Untersuchungen an den durchgehend verfilterten GWM im Dezember 2002 beendet wurden. Die Messstellengruppen sind so über das untersuchte Gelände in Form einer Transekte verteilt, dass Anstrom, Haupteintragsherd (Testfeld) und Abstrom in Grundwasserfließrichtung erfasst werden. Das untersuchte Schadstoffspektrum umfasste MKW und BTEX, wobei MKW in allen Messstellen während des Beobachtungs-

zeitraumes nur in vernachlässigbaren Konzentrationen oder unterhalb der Bestimmungsgrenze vorlag. Daher konzentrierten sich die Auswertungen auf die BTEX-Gehalte.

Die GWM im Anstrom war über den gesamten Monitoringzeitraum schadstofffrei und fungierte als Referenz für die anderen Messstellengruppen. Räumlich ist in den oberen Schichten des Grundwassers in Fließrichtung ein BTEX-Anstieg zu beobachten. In den tief verfilterten Messstellen wurden, mit Ausnahme der Messstelle MP 5 im Abstrom, keine Schadstoffe nachgewiesen. Die höchsten BTEX-Konzentrationen wurden an der GWM MP 5-flach mit 6.900 µg/l gemessen. Die Konzentrationsprofile zeigen an, dass mit dem bestehenden Messstellenaufbau die Abstromfahne nur zu einem Teil erfasst wird und weitere Eintragsquellen für BTEX auf dem Gelände vorliegen müssen, was den Konzentrationsanstieg in Fließrichtung erklärt. Die Auswertung von BTEX-Aromatenspektren an den einzelnen Messpunkten zeigt unterschiedliche Muster in den Konzentrationen der einzelnen Komponenten an. Die als leichter abbaubar bekannten Substanzen Benzol, Toluol und o-Xylol sind im weiter entfernten Abstrom des Testfeldes stärker vertreten als im mittleren Bereich des Untersuchungsgebietes. An dieser Stelle dominieren Substanzen wie Ethylbenzol und m/p-Xylol, welche als schwerer abbaubar gelten. Dies lässt vermuten, dass auf dem TL Schäferhof-Süd im Bereich 'kartierte Ölschäden' mindestens eine jüngere Kontamination zusätzlich zum Haupteintragsherd im Testfeld vorliegt.

Im Untersuchungszeitraum traten starke **Grundwasserschwankungen** von bis zu 1,7 m auf, welche erheblichen Einfluss auf die Schadstoffgehalte im Grundwasser nehmen. Die Ganglinien des Grundwasserstandes und der BTEX-Konzentrationen zeigen über das Untersuchungsgebiet einen unterschiedlichen Kurvenverlauf. An der Messstelle im Schadenszentrum verhalten sich die BTEX-Gehalte im Grundwasser gegenläufig zum Grundwasserstand; das heißt bei steigendem Grundwasserstand sinken die BTEX-Gehalte, während sie bei sinkendem Grundwasserstand wieder ansteigen. Ergebnisse aus der Bodenanalytik haben gezeigt, dass das Maximum der Bodenkontamination im Kapillarsaum liegt. Bei niedrigen Grundwasserständen befindet sich die hohe Bodenkontamination gerade noch im gesättigten Bereich, während bei hohen Grundwasserständen auch der darüber liegende geringer kontaminierte Bereich von Grundwasser durchströmt wird. Bei hohen Grundwasserständen werden folglich die aus der Bodenkontamination in Lösung gegangenen Schadstoffe (BTEX) stärker verdünnt als dies bei niedrigen Grundwasserständen möglich ist. Der gegensinnige Verlauf von Grundwasserstand und Schadstoffkonzentration im Schadenszentrum bleibt allerdings in der Abstromfahne nicht erhalten. In etwa 70 m Entfernung vom Schadenszentrum ist bereits eine gleichsinnige zeitliche Varianz der Schadstoffkonzentration und des Grundwasserstandes erkennbar. Eine mögliche Erklärung für diesen Befund besteht darin, dass sich im Schadenszentrum bei niedrigen Grundwasserständen Schadstoffmaxima ausbilden, die sich dann in Richtung Vorfluter (Weser) ausbreiten. Die Amplitude dieser Maxima schwächt sich durch Dispersion und biologischen Abbau der Aromaten allerdings ab.

**Redoxsensitive Parameter** wie Eisen(II), Sauerstoff, Sulfat und Nitrat fungieren als Indikatoren für biologische Abbauvorgänge im Grundwasser. Die Anreicherung von Eisen(II) in Fließrichtung korreliert mit den steigenden Substratgehalten. Gleichzeitig ist in allen kontaminierten Messstellen eine starke Sauerstoff- und Nitratzehrung zu beobachten. Auch die intensive Sulfatreduktion lässt die Wirksamkeit von biologischen Abbauprozessen erkennen, wenn auch nicht mit so deutlichem Trend. Mit Konzentrationen von 5.543 µg/l und 8.571 µg/l

(Mittelwerte) im Abstrom weisen die Methangehalte auf mikrobiellen Aromatenabbau primär unter **anaeroben Milieubedingungen** hin.

Anhand von alkylierten Benzoessäuren lässt sich deutlich ein **biologischer Abbau** im Grundwasser nachweisen. Die Messstellen im Anstrom und in den tiefen Bereichen des Grundwasserleiters zeigen nur geringe Gehalte an Abbauprodukten, welche natürliche Hintergrundkonzentrationen darstellen. Jedoch in den flachen Bereichen treten besonders im Bereich des Testfeldes und im nahen Abstrombereich erhöhte Konzentrationen auf, welche mit den erhöhten Substratgehalten korrelieren. Metabolite konnten im gesamten Monitoringzeitraum in den kontaminierten GWM nachgewiesen werden.

Bedingt durch die Problematik, dass auf dem TL Schäferhof-Süd Schadstoffquellen vorliegen, welche nicht hinreichend bekannt sind, und dass mit dem bestehenden Messstellennetz die Abstromfahne nicht vollständig erfasst werden kann, ist eine Bilanz der Abbauraten im Grundwasser nicht möglich.

Zur Erfassung der **Klimasituation** am TL Schäferhof-Süd wurden eine Wetterstation mit Datenerfassungsanlage installiert und stündlich Messdaten der Niederschlagsmenge, des Luftdrucks, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung aufgezeichnet. Zur Bestimmung der Bodentemperatur wurden im unkontaminierten Vergleichsareal vier Messfühler in verschiedenen Tiefen (0,5 m, 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m) eingesetzt und eine tägliche Temperaturmessung eingestellt.

Über den Messzeitraum zeigten sich starke Klimaschwankungen und extrem unterschiedliche **Jahresniederschlagsmengen**. Die Jahresniederschlagsmenge im Jahr 2003 lag mit 498 mm mehr als ein Drittel unter der der Jahre 2002 (798 mm) und 2004 (772 mm). In Abhängigkeit von den Niederschlägen und der anfallenden Sickerwassermenge variierte somit die Bodenfeuchte, die Einfluss auf die Mobilität und Bioverfügbarkeit von Sauerstoff, Nährstoffen und Schadstoffen nimmt. Die **Lufttemperatur** unterlag den für diese Breitengrade üblichen jahreszeitlichen und tageszeitlichen Schwankungen. Die **Bodentemperatur** in 0,5 m Tiefe ist stark durch die Lufttemperatur beeinflusst und reichte seit Messbeginn von 2°C bis maximal 23°. In der tiefsten Messstelle in 3,5 m u. GOK spielte vor allem der Einfluss der Grundwassertemperatur und der Wärmespeicherung im Boden eine Rolle (7-18 °C). Die Temperaturmessung der beiden dazwischen liegenden Sonden in 1,5 m und 2,5 m Bodentiefe wurde anteilig von den genannten Effekten bestimmt. Nach den Ergebnissen der Bodenluftmessungen tragen hohe Lufttemperaturen während der Sommermonate maßgeblich zu höheren mikrobiellen Abbauraten bei.

Die Niederschlagsmenge und die Lufttemperatur waren die prioritären Parameter unter den Klimafaktoren. Verlässliche Klimadaten sind eine wichtige Voraussetzung für die Einordnung der im Boden, in der Bodenluft, im Sickerwasser und im Grundwasser gewonnenen Ergebnisse. Der Betrieb einer eigenen Wetterstation und die Datenauswertung sind für den Routinebetrieb allerdings sehr arbeitsaufwändig.

Aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes kann die **Schlussfolgerung** gezogen werden, dass der Schadstoffverteilung, dem Bodenmilieu und der Sickerwassermenge für die Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone eine Schlüsselfunktion zukommen. Für die Mineralölkohlenwasserstoffe konnte anhand der Bodendaten statistisch keine Schadstoffminderung belegt werden, da die Spannbreite der Schadstoffkonzentrationen innerhalb eines Bohrreals größer war als die Schadstoffminderung durch mikrobiellen Abbau, Verflüchtigung oder Auswaschung. Durch die ermittelten Bodenluftdaten konnte trotzdem belegt werden, dass über den gesamten Zeitraum des Forschungsprojektes mikrobielle Abbauprozesse stattgefunden haben.

Die umfangreichen Untersuchungen der verschiedenen bodenphysikalischen, physiko-chemischen und biologischen Parameter zeigen, dass der am Standort vorliegende Sandboden aufgrund seiner Nährstoffarmut und seines niedrigen pH-Wertes eine geringe mikrobielle Aktivität (Bodenatmung) und damit nur ein geringes natürliches Abbaupotenzial aufweist. Durch eine weitere Verschiebung des pH-Wertes ins neutrale Milieu, wie sie während der Projektlaufzeit beobachtet wurde, wäre eine der Voraussetzungen für einen zukünftig verstärkten mikrobiellen Schadstoffabbau im Testfeld gegeben. Da das natürliche Nährstoffreservoir am TL Schäferhof-Süd allerdings stark limitiert ist, kann eine Veränderung der Nährstoffsituation lediglich durch Zugabe entsprechender Additive erreicht werden.

Neben dem Nachweis der natürlichen Schadstoffminderung am TL Schäferhof-Süd bestand eine weitere Aufgabenstellung des Forschungsprojektes, die ausgewählten Kriterien und Parameter sowie die Methoden der Probenahme und Analytik auf ihre **Eignung** zur Beurteilung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone zu prüfen. **Untersuchungen des Bodens** im Hinblick auf Schadstoffgehalte und deren räumlichen Verteilung sowie einige physiko-chemische Parameter bilden die Basis für die Einschätzung des natürlichen Abbau- und Rückhaltepotenzials in der ungesättigten Bodenzone eines Standortes. Ein **Bodenluft-Monitoring** bietet die Möglichkeit, unabhängig von der Entnahme von Bodenproben zu einer zwischenzeitlichen Einschätzung der mikrobiellen Abbauprozesse zu gelangen. Die regelmäßige Vor-Ort-Messung der Bodenluftzusammensetzung und die Schadstoffanalytik bilden zusammen gemessen wichtige Indikatoren für die Beurteilung des natürlichen Abbaus. Die **Sickerwasserbeprobung** mittels Saugkerzen kann bei der Beurteilung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse nur als unterstützende Maßnahme angesehen werden. Um den Schadstoffaustrag aus dem Boden und den weiteren mikrobiellen Schadstoffabbau in der gesättigten Bodenzone beurteilen zu können, ist ein **Grundwasser-Monitoring** unerlässlich. Das am Standort vorherrschende **Klima**, insbesondere die Niederschlagsmenge und die Lufttemperatur, nimmt starken Einfluss auf die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse. Neben dem Betrieb einer eigenen Wetterstation kann auf die Klimadaten vergleichbarer Standorte zurückgegriffen werden.

Aus dem Forschungsprojekt ergeben sich verschiedene **Handlungsoptionen** und Konzepte für eine potenzielle zukünftige Nutzung der Liegenschaft. Unter derzeitigen Bedingungen muss davon ausgegangen werden, dass die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse am TL Schäferhof-Süd nicht ausreichen, um kurzfristig eine Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen und eine Dekontamination des Untergrundes, insbesondere in den hoch belasteten Bereichen, zu erreichen. Als unterstützende Maßnahmen bieten sich die oberflächennahe Applikation, gegebenenfalls auch die Infiltration von **Nährstoffen** (Stickstoff,

Phosphat) zur Aufhebung des Nährstoffdefizites am Standort an. Eine Anhebung der Sauerstoffgehalte im Testfeld könnte mittels Belüftungsverfahren oder durch oberflächennahe Zugabe von gelöstem **Sauerstoff** erreicht werden.

Als weitere unterstützende Maßnahme kommt die gezielte Bepflanzung der kontaminierten Flächen am Standort in Frage, um das Remediationspotenzial der pflanzlichen Rhizosphäre zu nutzen. Da bisher nur wenig Erfahrungen zum **Einsatz von Pflanzen** zur Dekontamination MKW- und BTEX-belasteter Standorte bestehen, bieten sich die im Forschungsprojekt untersuchten Testflächen des TL Schäferhof-Süds aufgrund der guten Datenlage (Schadstoffverteilung, Bodeneigenschaften, physiko-chemische und biologische Parameter) für zukünftige Forschungsprojekte an.

Die Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes sollen in eine '**Handlungsempfehlung** zur Beurteilung des natürlichen Schadstoffabbaus und -rückhaltes in der ungesättigten Bodenzone' des Umweltbundesamtes einfließen. Nach wie vor besteht jedoch erheblicher **Forschungsbedarf**, um die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse in der ungesättigten Bodenzone besser einschätzen zu können. Insbesondere im Feldmaßstab gibt es bislang wenige Referenzprojekte, die eine Beurteilung der Abbau- und Rückhalteprozesse für andere Bodentypen, Milieubedingungen und hydrogeologische Bedingungen ermöglichen.

## 5 Summary

The second phase of the R&D-project 'Long-term Investigations of Natural Degradation and Sorption Processes of Selected Contaminants at Contaminated Military Sites' (FKZ 298 76 712 / 02) was carried out from February 2001 to March 2005 on behalf of the *Umweltbundesamt*. The potential and limitations of 'Natural Attenuation' (NA) in the vadose zone as a remediation strategy were investigated by the Center for Environmental Research and Technology (UFT)/ University of Bremen in cooperation with the Department of Mineralogy/ J.-W. Goethe University Frankfurt, *Umweltschutz Nord/ Ganderkesee* (until august 2003) and *alphacon/ Ganderkesee* (by august 2003) at the former underground storage tank site (UST) Schäferhof-Süd near Nienburg/Weser.

At the beginnings of the nineties, **military sites** covered 2,8 % (about 1 million ha) of the territory of the Federal Republic of Germany. Depending on the former use of the military sites, they show selective or wide diffuse contaminations. Contaminations of petroleum hydrocarbons (e.g. diesel fuels) also play an important role for civil sites showing similar contamination patterns. With respect to the potential risk of these contaminated sites it is reasonable to investigate the potential and limitations of natural degradation and sorption as a remediation strategy. In recent years numerous studies on natural attenuation in the saturated zone were carried out. But little is known about the effectiveness of degradation and sorption processes in the unsaturated zone.

Due to lacking standard field scale methods or monitoring programmes for NA-processes in the unsaturated soil zone, the first step of the project was an extensive screening of literature to identify criteria and parameters for the detection of natural degradation and sorption

processes of petroleum hydrocarbons. Detailed information on the specifics of the site, on sampling methods and on analyzing methods were collected. An appropriate test plot, a lower contaminated area and an uncontaminated area were identified on the model site, Schäferhof-Süd. The ascertained **criteria and indicators for biodegradation** processes comprised 40 different parameters (contaminants, hydrogeological parameters, soil parameters, physico-chemical parameters and biological parameters). The parameters were evaluated for their basic functions and their effects on natural degradation and sorption processes. Considering specific properties of the model site, key parameters were selected for monitoring the compartments soil, soil air, seepage water and groundwater. In step two, an investigation programme was realized at the model site and the evaluated data were analysed and interpreted.

The area of a former filling station and a storehouse of diesel fuels, unused since 1976, was selected as an appropriate test plot at the **UST Schäferhof-Süd**. A lower contaminated area north of the test plot and an uncontaminated area about 60 m north-west of the test plot served as reference plots.

The investigation programme comprised two series of drillings, an initial series between November 2001 and January 2002 and a final series in October 2004. **Soil samples** were taken in eight drilling areas at the test plot and one drilling area at each reference plot. Two opposite drillings (liner, DN 100) per drilling area (diameter 1 m) were sunk to a depth of 6 m (in some cases up to 8 m). Basic requirements on sampling and analysis during the investigations are laid down in BBodSchV (1999) and LABO (2002). Contamination analysis was independently repeated by internal and external investigations to **assure quality of results**. The quality of sampling methods for volatile organic substances (VOC) in soil was assured in an additional test drilling. The sampling of a single probe over the range of a whole drilling core (length normally 1 m) showed representative results for BTEX in the soil profile, whereas several samples at selected parts of the drilling core were not representative for soil profiles with varying concentrations of contaminants.

The **soil profiles** of all plots were composed primarily of media grany sands with varying fractions of fine or coarse sand and silt (grain size 0,06-2 mm). The porosity in the test plot and contaminated reference plot varied between 27 Vol.% und 33 Vol.%. The water permeability estimated from grain size distribution was about the dimension of  $k_f = \sim 10^{-4}$ . The back fillings varied in their depth between 0,3 to 1,2 m for the deconstructed buildings in the test plot and contaminated reference plot and between 2 to 4 m on the uncontaminated reference plot.

Data analysis revealed an inhomogeneous **distribution of contaminants** in the vertical and horizontal expansion of the test plot. Soil profiles were characterized by high TPH-, BTEX- and alkyl benzene concentrations with a maximum in the capillary fringe and the saturated zone (4-6 m depth). Lower concentrations were observed below 6 m depth. At both drilling series the water table was about 5 m below surface. The southern area of the former filling station is contaminated strongest.

At the beginning of the project in 2001 soil samples of the vadose zone contained TPH lower than 100 mg/kg to 10.000 mg/kg, **BTEX** lower than 100 µg/kg to 41.000 µg/kg and **alkyl benzenes** up to 76.000 µg/kg. Three years later the TPH-concentrations were unaltered,

BTEX and alky benzenes showed maximal concentrations of 14.000 µg/kg and 53.000 µg/kg. In 2001 the contaminated reference plot contained TPH concentrations of < 100-380 mg/kg in the vadose zone and a maximum of 4.600 mg/kg in the capillary fringe. At the end of the field investigations in 2004 there could not detected any contaminations in the vadose zone, but still detected 3.000-8.300 mg/kg TPH in the capillary fringe. In the uncontaminated reference plot some soil samples contained TPH (unsaturated zone 190-240 mg/kg, saturated zone: 160-1.200 mg/kg). In both reference plots BTEX (max. 52.000 µg/kg) and alkyl benzenes (max. 65.000 µg/kg) were only detected in the saturated zone. Due to their high solubility and volatility BTEX and alkyl benzenes could be displaced in the soil profile easily, but at the same time these physical-chemical properties enhance bioavailability in biodegradation processes.

The **decrease of contaminant concentrations** by natural attenuation has to be differentiated from the inhomogeneous distribution of contaminants by statistical testing. During the project the volatile organic compounds were depleted in the vadose zone, while in the capillary fringe the concentrations were at the same level. The inhomogeneous distribution of contaminants in the soil profiles made it difficult to quantify the decrease of contamination over the whole area of the test plot. But the results of the soil air monitoring indicated a microbial degradation of BTEX, alkyl benzenes and short-chained n-alkenes. Calculated degradation rates for some drilling areas were about 0,01-1,2 mg\*kg<sup>-1</sup>\*d<sup>-1</sup> TPH, 1-17 µg\*kg<sup>-1</sup>\*d<sup>-1</sup> BTEX and 5-33 µg\*kg<sup>-1</sup>\*d<sup>-1</sup> alkyl benzenes. In the lower contaminated reference plot no TPH could be recorded to a depth of 4 m at the end of the project.

The hydrocarbon identification by **GC-MS-screening** reveals n-alkanes with carbon numbers of C<sub>10</sub> to maximal C<sub>26</sub> as well as iso-alkanes with carbon numbers of C<sub>10</sub> to C<sub>12</sub> and C<sub>15</sub> (norpristane, pristane) to C<sub>16</sub> (phytane) in the test plot (0-4 m). The hydrocarbon distribution corresponds to comparable aged diesel fuel contaminations. The contaminated reference plot featured n-alkanes with carbon numbers of C<sub>12</sub> to C<sub>13</sub> and iso-alkanes with carbon numbers of C<sub>10</sub> to C<sub>12</sub> and C<sub>15</sub> (Pristan). No n-alkanes, only iso-alkanes (C<sub>10</sub>, C<sub>11</sub>, C<sub>12</sub>, C<sub>15</sub>, C<sub>16</sub>) were identified in the saturated soil zone (4-6 m). These results can be interpreted as a selective biodegradation of n-alkanes under the anaerobic conditions of the capillary fringe and the saturated zone.

**Physico-chemical** and **biological parameters** were analyzed at one drilling area per test plot and reference plots. Based on this analytical data it was obvious that it is not possible to compare the back fillings of the uncontaminated reference plot (up to 4 m depth) with the soil profile at the test plot and contaminated reference plot.

The **TOC-content** is related to the humus layer (up to 1 m depth) and the hydrocarbon concentrations (1-6 m depth). **Nutrients** were analyzed mainly in the top layer; below 1 m depth nitrogen and phosphate were predominantly absent. In 2001 the **soil pH** varied between pH 4,5 und pH 5,4 at the test plot and pH 4,9 and 5,6 in the contaminated reference plot. In 2004 we detected an increase of soil pH in the test plot (pH 4,9-5,7) and the contaminated reference plot (pH 5,6-6,9). **Iron** (1.300 to 3.500 mg/kg) was found in the soil profile.

Because of its correlation with biodegradation processes **soil respiration** is the most important biological parameter. Basal soil respiration rates were very low (<100 mg CO<sub>2</sub>

/24h kg TS) in the test plot and the contaminated reference plot. Between 2001 and 2004 there was no change observed in the test plot, but an increase of doubling or tripling the respiration rates in the contaminated reference plot. The **dehydrogenase-activity** can indicate the biodegradation of organic substances. Because of a dehydrogenase-activity under detection limit in 2004, the results from the model site did not permit any conclusions. The **potential nitrification** is considered to be a sensitive indicator for soil toxicity, but it was not detected in the test plot and contaminated reference plot.

At the UST Schäferhof-Süd the mobile media soil air, seepage water and ground water were monitored during January 2002 and September 2004. For extracting **soil air** three stationary vapour wells (3,5-4 m depth) were installed in the test and reference plots. Soil air composition (oxygen, carbon dioxide, methane, total carbon) and contaminant concentrations (n-alkanes, BTEX and alkyl benzenes) were measured in a three month frequency. The results were correlated with contamination concentrations and microbial activity in the soil. Elevated **carbon dioxide** (8-19 Vol.%) and depleted **oxygen concentrations** (< 0,1-3,9 Vol.%) in soil air indicated biodegradation processes in the soil. In the contaminated reference plot the carbon dioxide concentrations (6,6 bis 16,5 Vol.%) were slightly below and the oxygen concentrations (0,2 bis 6,5 Vol.%) above the concentrations in the test plot. In the uncontaminated reference plot a reverse situation of oxygen (12,8-18,4 Vol.%) and carbon dioxide (2,3-6,2 Vol.%) in soil air was observed. Hydrocarbon concentrations in the soil air were correlated with the contamination in soil at the different vapour wells.

Microbial activity and volatilization of contaminants were influenced by changes of environmental conditions (soil temperature or water content). The intensity of the influence by **seasonal effects** depended on the contaminant concentrations in soil. In the test plot high biodegradation rates were observed by the decrease of oxygen and the simultaneous increase of carbon dioxide and contaminant concentrations during the summer. In the reference plots seasonal effects had less influence on biodegradation.

From May to October 2003 soil air was sampled in two week intervals to identify the **variety of the analyzed parameters** during the applied monitoring interval. Monitoring soil air in a three month frequency is appropriate to detect natural degradation and sorption processes, whereas longer monitoring intervals would result in data gaps.

Between 2001 and 2004 an increase of the respiration rate beside a parallel decrease of volatile contaminants in the soil air was observed in the test plot. A reverse effect was observed in the lower contaminated reference plot and no effect was detected in the uncontaminated reference plot. These results indicate a stimulated microbial activity due to the contamination at the test plot, and, respectively, slowed down microbial activity in the lower contaminated reference plot due to the depletion of contaminants. Oxygen consumption and carbon dioxide production are appropriate indicators for **detecting natural attenuation** processes, but a specific interpretation requires a simultaneous measuring of contaminant concentrations in soil air.

Via contaminant concentrations in soil air the potential release of BTEX by the seepage water could be estimated by the air-water-distribution coefficient (Henry's law constants).



Calculated BTEX concentrations in the seepage water were in the same order as the concentrations analysed at the ground water well located in the test plot.

For monitoring contaminant concentrations and other hydro chemical parameters in the **seepage water** two measuring points were installed in the test plot and one measuring point in each reference plot. Seven suction cups have been installed in 2 and 3,5 m depth and a continuous vacuum of 200 and 350 hPa was set. Water samples were taken after a four week period and analysed for contaminations and different hydro chemical parameters in a three month interval. Restricted water availability and suction cup failure by iron-hydroxide precipitation limited water sampling and the analysing scope.

**Quality assurance** in sampling seepage water by suction cups was checked by two extra tests. As expected, the continuous vacuum and the microbial degradation during the sampling interval caused a high loss of volatile contaminants. The retrieval of an internal toluene standard was less than 10 % after one day. The hydro chemical parameters nitrate sulphate, pH, and alkalinity were also affected by the sampling period. For these reasons only a few conclusions in respect to the original soil settings could be drawn.

Despite of these limits on data quality, varieties of the hydro chemicals in the seepage water were related to different contamination levels in the soil (test plot, contaminated reference plot). In the uncontaminated reference plot, back fillings had an significant effect in the analysis. **Nitrate** and **sulphate** were obviously used as alternative electron acceptor in biodegradation processes. In the lower contaminated reference plot microbial degradation was not high enough that all available nitrate and sulphate in 2 m depth could have been consumed. In the test plot nitrate was totally consumed and sulphate was greatly depleted. Due to the loss of carbon dioxide **pH** and **alkalinity** in the seepage water were higher than in soil eluates.

In spite of these results, monitoring the seepage water by suction cups did not contribute to the assessment of the natural degradation and sorption processes at the UST Schäferhof-Süd. To estimate contaminant concentrations in the seepage water one should use soil eluates or soil air and ground water monitoring methods.

To **monitor the groundwater contamination** in the TL Schäferhof Süd nine wells were sampled. Four of these wells already drilled in 1999 und were screened from 4 m below ground surface (bgs) to max. 12 m bgs. The other monitoring wells were drilled at the end of 2001 as double level monitoring wells with one well screening from 4 to 7 m bgs (upper section) and one well screening from 7 to 10 m bgs (lower section). Since January 2002 the ground water is analyzed four times a year. The analyses include the determination of **physico-chemical parameters**, **hydrochemical parameters**, the concentration of **pollutants (BTEX, MKW)**, and the concentration of the **metabolites** present in the groundwater. The double level monitoring wells were positioned in the area in order to cover the upstream, the source area and the downstream of the source of contamination.

For the monitoring of the groundwater pollution mainly the data from the later mentioned double level monitoring wells were used. The four wells screened from 4 to 12 m bgs were only sampled till December 2002. With respect to the analyzed pollutants (MKW and BTEX) the concentration of MKW was often below detection limit during the present study. Therefore, the data evaluation is largely based on the concentration of BTEX detected in the monitoring wells.

The groundwater sample collected in the well located upstream from the source of contamination was free of any contaminants and thus was used as reference for the other localities. In flow direction of the groundwater an increase of pollutant concentrations is observed in the upper screened wells. For the lower screened wells, except of MP5, no pollutants could be detected. The highest concentrations of BTEX was measured in groundwater samples from well MP 5-flach with up to 6.900 µg/l. The distribution of contaminants shows that the available wells cover only a part of the BTEX plume and that further sources of BTEX are present in the area. This is supported by the observed increase of contaminant concentrations in flow direction. The evaluation of the BTEX distribution profiles at individual sample localities provides variations of relative concentrations of the compounds. Benzene, toluene and o-xylene, which are known to be readily biodegradable, are enriched in the groundwater downstream of the area in comparison to the centre area of the plume. At this site contaminants like ethyl benzene and m/p-xylene are dominant, which are known to be persistent. Thus, in addition to the contamination originating from the mayor source area, a further contamination source must be present in the downstream area with mapped oil spills in the subsurface.

During this study annual **changes in the groundwater level** occurred with a variation of up to 1,7 m. These changes strongly influenced the concentration of contaminants in the ground water of study area. The variations of the ground water level and of the BTEX concentrations show different relative distributions. In the centre of the contamination source the variations in the BTEX concentrations are negatively correlated to the variations in the groundwater level; i.e. with increasing groundwater level the BTEX concentration decreases and vice versa. Results from the soil studies show that a maximum of contamination is present in the capillary fringe. Thus, at a low groundwater level, the contamination is within the saturated area, whereas during a high groundwater level also lower contaminated soil above the contamination is influenced by the groundwater. Therefore, the dissolved contaminants are more diluted during high groundwater levels compared to low levels of the groundwater. This negative correlation of the groundwater table and BTEX-concentration in the centre of the area is not observable for the whole plume. Already at a distance of 70 m from the pollution source area, a positive correlation between the BTEX-concentration and the groundwater table is recognized. A possible explanation for this is the formation of maxima of dissolved contaminants in the centre of contamination during low groundwater levels, which then are transported in the direction of the receiving stream. The amplitudes of these maxima are diminished by dispersion and by biological degradation of the aromatic hydrocarbons.

**Redox sensitive parameters** like ferrous iron, oxygen, sulphate and nitrate are used as indicators for biological degradation processes in the groundwater. Enrichment of Fe(II) downstream from the source of contamination correlates with increasing BTEX-concentrations in the groundwater. Simultaneously, in the water from all contaminated wells a strong decrease of oxygen and nitrate is observed. Additionally, sulphate reduction

indicates the effectiveness of biological degradation of hydrocarbons. Methane concentrations of 5.543 µg/l and 8.571 µg/l (mean) downstream from the contaminant source indicate primarily **anaerobic microbial degradation** of hydrocarbons.

The presence of **alkylated aromatic acids** in the ground water can be regarded as a direct proof for the biological degradation aromatic hydrocarbons. In the upstream well and in the deep sections of the double level monitoring wells only minor content of degradation products could be observed. On the other hand, in the upper levels of the monitoring wells, especially in the vicinity of the source area (Testfeld), and in the downstream area higher concentrations of aromatic acids are observed. This correlates with increased availability of aromatic hydrocarbons for metabolite formation. The metabolites were detected during the whole duration of the monitoring in the groundwater.

In the sub-surfaces of TL Schäferhof-Süd some sources of contaminants have not been detected so far and the contaminant plume is not fully covered by the existing grid of monitoring wells. For this reason, the determination of degradation rates of hydrocarbons in the groundwater is not possible so far.

For monitoring **climatic parameters** a meteorological station was set up at the UST Schäferhof-Süd. A data logger recorded hourly rainwater quantity, air temperature, atmospheric pressure, humidity and wind force. Soil air temperature was measured daily by sensors installed in the uncontaminated reference plot at different soil depth (0,5 m, 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m).

During the course of the project climatic parameters, especially **annual rainfall**, varied extremely. The annual rain fall in 2003 (498 mm) was only about two third of the annual rainfall in 2002 (798 mm) and 2004 (772 mm). Soil moisture, and thus transport and bioavailability of oxygen, nitrate, and contaminants, depended on the average rainfall and the quantity of resulting seepage water. **Air temperature** was affected by typical seasonal and daily variation. **Soil temperature** at the sensor in 0,5 m depth (2-23°C) was influenced predominantly by the air temperature. At 3,5 m depth, ground water temperature and temperature storage capacity affected the soil temperature (7-18 C). Soil temperature at 1,5 m and 2,5 m depth was partly affected from the above mentioned effects. According to the soil air data, high soil temperatures controlled high biodegradation rates during the summer month.

Among climatic factors, rain water quantity and air temperature were the key parameters for the assessment of natural attenuation. To relate the climatic parameters to the measured soil, soil air, seepage water and ground water data required a high quality. Though, operating an own meteorological station is very labour intensive for the routine.

The results of the project showed in **conclusion** that the site specific distribution of contaminants, soil settings and water supply play a key role for the assessment of natural degradation and sorption processes. The inhomogeneous distribution of contaminants in the soil profiles made it difficult to quantify the decrease of contamination caused by microbial

degradation, volatilization or leaching. But the soil air monitoring documented biodegradation processes over the whole research period.

The investigation of soil parameters, physical-chemical and biological parameters indicated that the natural attenuation capacity at UST Schäferhof-Süd is limited by a lack of nutrients, a low pH of the sandy soil and a low microbial activity (soil respiration). Related to the research results, a further increase of soil pH is expected and would be one of the necessary conditions for higher biodegradation rates in the future. Natural limitations at the UST Schäferhof-Süd demanded artificial additives.

Beside the detection of natural attenuation at the model site, the research project ought to proof the selected criteria and parameter, and the sampling and analytical methods for their appropriateness for a general assessment of biodegradation processes in the vadose zone. To provide a basis for the evaluation of natural degradation and sorption processes in the vadose zone, **soil samples** have to be analysed for contaminant concentration and distribution and some physical-chemical parameters. A regular **soil air monitoring** for oxygen, carbon dioxide and contaminants provides the opportunity for interim evaluations of biodegradation processes without taking soil samples. A **monitoring of seepage water** via suction cups can merely be seen as a complementary measure for the assessment of the natural degradation and sorption processes. However, a **ground water monitoring** is essential to evaluate the microbial degradation in the saturated soil zone and also allows an estimation of the leaching of the contaminant with the seepage water. **Climatic factors** such as rainfall and air temperature affects natural degradation and sorption processes. Data from meteorological stations nearby would be adequate for climate information at the contaminated site.

Finally, suggestions for possible **options for action** at the underground storage tank site Schäferhof-Süd are made. At the moment natural degradation and sorption is insufficient as a remediation strategy. A strategy, which would enhance natural attenuation, could be the surface application or infiltration of **nutrients** (nitrate, phosphate). Because of the low **oxygen content** in the soil air bioventing methods or surface application of dissolved oxygen could be reasonable in the test plot.

Another enhanced natural attenuation strategy could be to use the remediation potential of the rhizosphere by putting out specific plants at the contaminated areas of the UST Schäferhof-Süd. Little is known about **phytoremediation** potential on petroleum hydrocarbon contaminated soils. Because of existing data (contaminant distribution, soil settings, physico-chemical and biological parameters) the model site Schäferhof-Süd is suitable for further research.

The research and development project is intended to contribute to an **aid to decision-making** of the Umweltbundesamt, regarding whether natural degradation and sorption processes can be used for remediation purposes of petroleum hydrocarbons and BTEX in the vadose zone. To evaluate natural degradation and sorption processes in the vadose zone **further research** is required. In particular, only a few field scale reference projects allow an evaluation of natural attenuation processes on contaminated sites differing in soil types, soil settings or hydro geological parameters.

## 6 Literaturverzeichnis

- ALEF, K. (1994): Biologische Bodensanierung. VCH, Weinheim. 269 S.
- ALLEN-KING, R.M., GILHAM, R.W., BARKER, J.F. & SUDICKY, E.A. (1996): Fate of dissolved toluene during steady infiltration through unsaturated soil: II. Biotransformation under nutrient-limited conditions. *J. Environm. Qual.* **25**: 287-295.
- ASHLEY, R.P., LERNER, D.N. & LLOYD, J.W. (1994) Distribution and degradation of diesel oil in the unsaturated zone following an oil spill on a chalk aquifer. *J. Hydrol.* **159** (1-4): 43-59.
- ASTM (2004): Standard Guide for Remediation of Ground Water by natural Attenuation at Petroleum Release Sites. E-1943-98. West Conshocken, Pennsylvania.
- BAEDER-BEDERSKI, O., KUSCHK, P. & STOTTMEISTER, U. (1999): Phytovolatilization of organic contaminants. In: HEIDEN, S., ERB, R., WARRELMANN, J. & DIERSTEIN, R.: *Biotechnologie im Umweltschutz. Bioremediation: Entwicklungsstand-Anwendungen-Perspektiven. Initiativen zum Umweltschutz* **12**: 175-183.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2004): Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenveränderungen – Natural Attenuation. Merkblatt Nr. 3.8/3 vom 5.11.2004, München, 17 S.
- BBODSCHG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998, BGBl. I, 502-510
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999 (BGBl I S. 1554).
- BIEGERT T., FUCHS G. & HEIDER J. (1996): Evidence that anaerobic oxidation of toluene in the denitrifying bacterium *Thauera aromatica* is initiated by formation of benzylsuccinate from toluene and fumarate. *Eur. J. Biochem.* **238**: 661-668.
- BOSSERT, I. D. & COMPEAU, G. (1995): Cleanup of petroleum hydrocarbon contamination in soil. In: Young, L. Y. & Cerniglia, C. E. (eds.): *Microbial transformation and degradation of toxic organic chemicals*, Wiley-Liss, New York: 77-125.
- BOULDING, J. R. & GINN, J. S. (2004): Practical handbook of soil, vadose zone and ground-water contamination - Assessment, prevention and remediation, Lewis Publishers, Boca Raton: 691 S.
- BÜHL, A. & ZÖFEL, P. (2002): SPSS 11 Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows, 8. Aufl., Pearson Studium, München, 757 S.
- BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (2003): Praktische Anwendung eines risiko-orientierten Bewertungsansatzes bei Grundwasserschäden durch Mineralölprodukte. Endbericht zum Forschungsprojekt (Kenn-Nummer: Z6-4.4-01.120), vorgelegt von PÜTTMANN, W., Frankfurt, 65 S.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (1998): Auswahl aus geologischer Sicht geeigneter Liegenschaften zu den "Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe (MKW, BTEX und LHKW) am Beispiel militärischer Altlasten". Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, Arch.-Nr. 117891, 50 S.

- BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG (2001 a): Anforderungen an Probennahme, Probenvorbereitung und chemische Untersuchungsmethoden auf Bundesliegenschaften (Auf der Grundlage der Verwaltungsvereinbarung zwischen der Oberfinanzdirektion (OFD) Hannover und der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) vom 05.09.1995; Neufassung: 17.05.02; aktualisierte Fassung: Februar 2001). Amts- und Mitteilungsblatt der BAM, Sonderheft 2/2001, Berlin, 42 S., [www.bam.de/service/publikationen/probennahme/probennahme.pdf](http://www.bam.de/service/publikationen/probennahme/probennahme.pdf).
- BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (2001 b): Ringversuchsauswertung 7. BAM-Ringversuch "Altlasten". Organochlorpestizide, Polyzyklische Aromaten, Mineralölkohlenwasserstoffe, Schwermetalle und Cyanide in Boden (Dezember 2001). Berlin, 41 S.
- CAPUANO, R. M. & JOHNSON, M.A. (1996): Geochemical reactions during biodegradation/ vapor-extraction remediation of petroleum contamination in the vadose zone. *Ground Water* **34** (1): 31-40.
- DIN 18123: 04.1983. Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 12 S.
- DIN 18196: 10.1988. Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN 19683-13: 03.1997. Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 13: Bestimmung des Substanzanteils, Porenanteils und der Porenziffer. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN 19733-1: 07.1998. Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität in Böden. Teil 1: Verfahren mit TTC. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 4 S.
- DIN 19737: 04.2001. Bodenbeschaffenheit – Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 14 S.
- DIN 38404-C 4: 12.1976. Teil 4: Bestimmung der Temperatur (C 4). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 3 S.
- DIN 38404-C 5: 01.1984. Teil 5: Bestimmung des pH-Wertes (C 5). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 7 S.
- DIN 38404-C 6: 05.1984. Teil 6: Bestimmung der Redox-Spannung (C 6). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 8 S.
- DIN 38405-D 8: 1971. Teil 8: Die Berechnung des gelösten Kohlendioxids (der freien Kohlensäure), des Carbonat- und Hydrogencarbonat-Ions. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 11 S.
- DIN 38407-F 9: 05.1991. Teil 9: Bestimmung von Benzol und einigen Derivaten mittels Gaschromatographie (F 9). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 36 S.
- DIN 38409-H 28: 04.1992. Bestimmung von gebundenem Stickstoff. Verfahren nach Reduktion mit Devardascher Legierung und katalytischem Aufschluß (H 28). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 10 S.
- DIN 38409-H 7: 05.1979. Teil 7: Bestimmung der Säure- und Basekapazität (H 7). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 10 S.
- DIN 38414-S 4: 10.1984. Schlamm und Sediment – Teil 4: Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 10 S.
- DIN 4021: 10.1990. Baugrund; Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN 4022-1: 09.1987. Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernteten Proben im Boden und im Fels. Deutsches Institut für Normung, Berlin.

- DIN 4023: 03.1984. Baugrund- und Wasserbohrungen; Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 10088-2: E 2001-12. Nichtrostende Stähle - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung und für das Bauwesen; Deutsche Fassung prEN 10088-2:2001, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 1189: 12.1996. Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Phosphor – Photometrisches Verfahren mittels Ammoniummolybdat. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 25 S.
- DIN EN 1484: 08.1997. Wasseranalytik – Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 14 S.
- DIN EN 25814: 11.1992. Wasserbeschaffenheit – Bestimmung des gelösten Sauerstoffs – Elektrochemisches Verfahren. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 12 S.
- DIN EN 27888: 11.1993. Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 15 S.
- DIN EN ISO 10304- 1: 04.1995. Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie – Teil 1: Verfahren für gering belastete Wässer. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 25 S.
- DIN EN ISO 10304- 2: 11.1996. Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der gelösten Anionen mittels Ionenchromatographie - Teil 2: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Nitrat, Nitrit, Orthophosphat und Sulfat in Abwasser (ISO 10304-2:1995). Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN ISO 11885: 04.1998. Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von 33 Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 23 S.
- DIN EN ISO 9377-2: 07.2001. Wasserbeschaffenheit – Bestimmung des Kohlenwasserstoff-Index. Teil 2: Verfahren nach Lösemittelextraktion und Gaschromatographie. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 22 S.
- DIN ISO 10390: 05.1997. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Wertes. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 5 S.
- DIN ISO 10693: 05.1995: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes (Volumetrisches Verfahren). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 6 S.
- DIN ISO 10694: 08.1996. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 5 S.
- DIN ISO 11261: 05.1997. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von Gesamt-Stickstoff. Modifiziertes Kjeldahl-Verfahren. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 4 S.
- DIN ISO 11465: 12.1996. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 4 S.
- DIN ISO 14238:1999-10. Bodenbeschaffenheit - Biologische Verfahren - Bestimmung der Stickstoffmineralisierung und -nitrifizierung in Böden und der Einflüsse von Chemikalien auf diese Prozesse. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN ISO 16703: E 03.2002. Bodenbeschaffenheit - Gaschromatographische Bestimmung des Gehaltes an Mineralölkohlenwasserstoffen (ISO/DIS 16703:2001). Deutsches Institut für Normung, Berlin. 20 S.
- DVGW (1983): DEUTSCHER VERBAND FÜR GAS- UND WASSERWIRTSCHAFT: Ermittlung, Darstellung und Auswertung der Korngrößenverteilung wasserleitender Lockergesteine für geohydrologische Untersuchungen und für den Bau von Brunnen. DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W113, Frankfurt/M.17 S.

- DVWK (1990): DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU: Gewinnung von Bodenwasser mit Hilfe der Saugkerzenmethode. Merkblätter zur Wasserwirtschaft **217**, Bonn. 12 S.
- DWD (2005): Ausgabe der Klimadaten: Tageswerte.  
[http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe\\_tageswerte.htm](http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe_tageswerte.htm)
- EGGERSTEDT-LEHMANN, F. (2005) Einsatz von mykorrhizierten Pflanzen in der Phytoremediation und ihr Einfluss auf Selbstreinigungsprozesse (Enhanced Natural Attenuation) in MKW-belasteten Böden. Dissertation Universität Bremen, Bremen.
- EISWIRTH, M., HÖTZL, H., REICHERT, B., & WEBER, K. (1998): Grundwasser- und Bodenluftuntersuchungen im Testfeld Süd. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 4/98 , 151-158.
- EPA (1999): Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. Final OSWER Directive 9200.4-17P. 32 p.
- FRITSCH, W. (1998): Umwelt-Mikrobiologie - Grundlagen und Anwendungen, Fischer, Jena: 252 S.
- GELLER, A. (2001): Grundlagen der biologischen Bodensanierung. Leitfaden - Biologische Verfahren zur Bodensanierung, Umweltbundesamt (Hrsg.) im Auftrag des BMBF, Berlin, S. 5-272.
- GIESE R., SWABODA D. & SCHMALZ L. (2003): Überwachung der Migration von PAK und MKW in der ungesättigten Bodenzone mit Saugkerzen. In: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.): Münchener Beiträge zur Sickerwasserprognose - Forschung und Praxis. München, Oldenbourg Industrieverlag München, Bd. 56, S. 213-224.
- GRATHWOHL, P. (2000): Gefahrenbeurteilung "Grundwasser" bei kontaminierten Böden/Materialien/Altlasten: Methoden zur Sickerwasserprognose. Boden- und Altlastensymposium, Berlin-Schöneberg, 23./24.05.2000, Berlin, 41.S.
- HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2001): Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfad des Boden-Grundwasser - Sickerwasserprognose. Handbuch Altlasten 3 (3), HLUG Wiesbaden: 80 S.
- HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2004): Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA). Handbuch Altlasten, Band 8, Teil 1, HLUG, Wiesbaden.
- HINCHEE, R.E. & ONG, S.K. (1992): A rapid in situ respiration test for measuring aerobic biodegradation rates of hydrocarbons in soil. J. Air Wast Manage. Assoc. **42**: 1305-1312.
- HÖPER, H. & WILKE, B. M. (2004): Bewertung der Biodegradation im Rahmen der Sickerwasserprognose zur Verlagerung organischer Schadstoffe. altlasten spektrum 2/2004, 69-77.
- HUESEMANN, M. H. (1997): Incomplete hydrocarbon biodegradation in contaminated soils: Limitations in bioavailability or inherent recalcitrance? Bioremediation J. **1**: 27-39.
- ISO TR 11046: 06.1994. Soil quality – Determination of mineral oil content – Method by infrared spectrometry and gas chromatographic method.
- KALBE, U., ECKHARDT, J., BERGER, W., CHRISTOPH, G., & KOLEPKI, M. (2003): Probleme bei Bodenwasseruntersuchungen mit organischen Schadstoffen. Mitt.Dt.Bodenkd.Ges. **102**, 91-92.
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G. & VOLESKE, P. (2002): Biostatistik. 3. Aufl., Springer, Berlin, 301 S.
- KONING, M., SCHOLZ, J., HUPE, K., SCHWEDES, J. & STEGMANN, R. (2000): Einfluss des Sauerstoffgehaltes auf die Umsetzung von MKW im Boden. TerraTech **9** (1):64-67.
- LABO (2000-10): Arbeitshilfen zur Qualitätssicherung in der Altlastenbehandlung (Abschluss der Phase 2/3: Stand Juli 2000; berichtigte Fassung Oktober 2000). Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) - Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss "Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung"



- LABO (2002): Arbeitshilfe Qualitätssicherung. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) - Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss "Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung", 471 S.
- LABO (2003): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) - Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss "Sickerwasserprognose", 65 S.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (2004): Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg – Nationale und internationale Sachstandsrecherche. Fachinformation des Landesumweltamtes (Internetpräsentation) Nr. 4, 100 S.  
[http://www.mlur.brandenburg.de/cms/media.php/2334/labo\\_nr4.pdf](http://www.mlur.brandenburg.de/cms/media.php/2334/labo_nr4.pdf)
- LEWITZ, H. (2004): Bodenluftbeprobung: Ausbreitungsmechanismen gasförmiger Stoffe im Boden. *TerraTech* **13**(3-4): 14- 16.
- LFU BADEN WÜRTEMBERG (1991): Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung. Bearb.: GELLER, A. & BRAUCH, W., Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. Materialien zur Altlastenbearbeitung **7**. 233 S.
- LFU BADEN WÜRTEMBERG (1994): Kompendium Stoffdatenblätter. Landesanstalt für Umweltschutz Baden Würtemberg Altlasten-Fachinformationen im World-Wide Web.  
<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/alfaweb/index.html>
- LFU BADEN WÜRTEMBERG (1998): Hinweise zur Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen, Stand: April 1998, Landesanstalt für Umweltschutz Baden Würtemberg, Altlasten-Fachinformationen im World-Wide Web.  
<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/alfaweb/index.html>
- LFU BADEN WÜRTEMBERG (2001): Handlungsempfehlung - Entnahme von Bodenluftproben. Karlsruhe, 17 S.. ([www.uvm.baden-wuerttemberg.de/alfaweb/berichte/aug32/aug32.html](http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/alfaweb/berichte/aug32/aug32.html))
- MECKENSTOCK R.U., ANNWEILER E., MICHAELIS W. RICHNOW H.H. & SCHINK B. (2000): Anaerobic naphthalene degradation by sulphate-reducing enrichment cultures. *App. Environ. Microbiol.* **66**: 2743-2747.
- NEALE, N., HUGHES, J.B. & WARD, C.H. (2000): Impacts of unsaturated zone properties on oxygen transport and aquifer reaeration. *Groundwater* **38** (5): 784-794.
- ONG, S.K., LEESON, A., HINCHEE, R.E., KITTEL, C.M., SAYLES, G.D. & MILLER, R.N. (1994): Cold climate applications of bioventing. In: HINCHEE, R.E.(ed.): *Hydrocarbon bioremediation*. *Bioremediation* **2** (2): 444-453.
- REISINGER, C. & GRATHWOHL, P. (1996): Formulierung einer Verfahrensempfehlung zur Bestimmung der Emission leichtflüchtiger organischer Schadstoffe (LCKW, BTEX etc.) aus kontaminierten Böden (Berechnungsverfahren und Methoden). Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geologisches Institut, Lehrstuhl für Angewandte Geologie Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, 89 S.
- SCHAEFFER, F. (2002): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl. Enke, Stuttgart. 593 S.
- SCHLEGEL, H.G. (1992): *Allgemeine Mikrobiologie*.-634 S.; Georg Thieme Verlag (Stuttgart, New York)
- SCHULTZE, E. & MUHS, H. (1967): *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten*. 2. Aufl., Springer, Berlin, 722 S.
- SITTE, P.; ZIEGLER, H.; EHRENDORFER, F. & BRESINSKY, A. (1998): *Strasburger Lehrbuch der Botanik*. 34. Aufl., Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-Jena, Lübeck-Ulm, 1007 S.
- SOKAL, R.R. & ROHLF, F.J. (2003): *Biometry – The principles and practice of statistics in biological research*. 3. Aufl., 8. Druckausgabe, W.H. Freeman and Company, New York, 887 S.

- STALATUBE (2002): Rostfreier Edelstahl für Konstruktionen - Material-Info (6/2002). Informationen über die Materialien der Quadrat- und Rechteckrohre von Stalatube, 8 S.  
([http://www.stalatube.com/de/pdf/material\\_info.pdf](http://www.stalatube.com/de/pdf/material_info.pdf))
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. (1970): Aquatic Chemistry. –583 S.; New York (Wiley Interscience).
- TOWNSEND, G.T., PRINCE, R.C. & SUFLITA, J.M. (2003): Anaerobic oxidation of Crude oil hydrocarbons by the resident microorganisms of a contaminated anoxic aquifer. Environ. Sci. Technol., **37** (5): 213-315.
- TROY, M.A., BERRY, S.W. & JERGER, D.E. (1993): Biological land treatment of diesel fuel-contaminated soil: Emergency response through closure. In: Flathman, P.E., Jerger, D.E. & Exner, H.H. (ed.): Bioremediation Field Experience. Lewis Publishing, S. 145-160.
- UMWELTBUNDESAMT (1999): Entscheidungsgrundlagen für Sicherungs- und Sanierungskonzepte für militärische Tanklager, Band 1. Durchführende Institution: ALSTOM Environmental Consult GmbH, Stuttgart (Agel, A. & Löbel, E.), Forschungsbericht FKZ 297 34 831, 81 S., Anh.
- UMWELTBUNDESAMT (2000): Langzeituntersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe am Beispiel kontaminierter militärischer Liegenschaften. Durchführende Institutionen: Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie Bremen (Meyerdierks, D., Warrelmann, J., Heyser, W.), Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt a. M. (Püttmann, W. & Martus, P.), Umweltschutz Nord GmbH & Co., Ganderkesee (Vehlhaber, D & Walter, U.), Forschungsbericht, FKZ 298 76 712/01, 223 S., Anl.
- UMWELTBUNDESAMT (2001): Langzeituntersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe am Beispiel kontaminierter militärischer Liegenschaften – Teilschritt 1, gekürzter Bericht, Dezember 2001. Durchführende Institutionen: Zentrum für Umweltforschung und –technologie, Universität Bremen (Hettwer, K., Warrelmann, J. & Heyser, W.), Umweltschutz Nord GmbH & Co., Ganderkesee (Walter, U. & Vehlhaber, D.), Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt a.M. (Püttmann, W. & Martus, P.), Forschungsbericht, FKZ 298 76 712/02, 113 S., Anh.  
<http://www.umweltbundesamt.de/altlast/web1/berichte/selma/selma.htm>
- UMWELTBUNDESAMT (2004): Langzeituntersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher Selbstreinigungsprozesse für ausgewählte Schadstoffe am Beispiel kontaminierter militärischer Liegenschaften - Literaturstudie (Teilschritt 1). Durchführende Institutionen: Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie, Universität Bremen (Hettwer, K., Warrelmann, J. & Heyser, W.), Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt a.M. (Martus, P., Gaab, S. & Püttmann, W.), alphacon GmbH, Ganderkesee (Drewes, U.), Syncom, Ganderkesee (Walter U.), Büro für Umweltgeologie, Hude (Vehlhaber, D.), Forschungsbericht 298 76 712/02, UBA-FB 000287, TEXTE 49/04, Berlin, 106 S., 31 S. Anh., ISSN 0722-186X., <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2818.pdf>
- UNTERARBEITSGRUPPE (UAG) "SICKERWASSER" DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE (2001): Handlungsempfehlungen zur Sickerwasserprognose für die Bewertung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser - Grundzüge. Z. angew. Geol. **47**, 138-145.
- VD LUFA METHODENBUCH BAND I: 1991. Bestimmung des löslichen mineralischen Stickstoffs. 20 S.
- VD LUFA METHODENBUCH BAND I: 1991. Bestimmung von Phosphor und Kalium im Doppellaktat(DL)-Auszug. 12 S.
- VDI 3481: 08.1975 (03.2004 ersatzlos zurückgezogen): Messung gasförmiger Emissionen; Messen der Kohlenwasserstoff-Konzentration; Flammen-Ionisations-Detektor (FID) - Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI 3865: 01.1998. Messen organischer Bodenverunreinigungen - Blatt 2: Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. 57 S.
- VDI 3865: 10.1992: Messen organischer Bodenverunreinigungen - Blatt 1: Messen leichtflüchtiger halogenierter Kohlenwasserstoffe; Messplanung für Bodenluft-Untersuchungsverfahren. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. 8 S.

VDI 3865: E 11.1996. Messen organischer Bodenverunreinigungen – Blatt 3: Gaschromatographische Bestimmung von niedrigsiedenden organischen Verbindungen in Bodenluft nach Anreicherung an Aktivkohle oder XAD-4 und Desorption mit organischem Lösungsmittel. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. 16 S.

WARRELMANN (2001): Biologische Sanierungsverfahren. In: Leitfaden - Biologische Verfahren zur Bodensanierung, Umweltbundesamt (Hrsg.) im Auftrag des BMBF, Berlin, S. 273-315.

WIEDEMEIER, T.H.; SWANSON, M.A.; MOUTOUX, D.E.; GORDON, E.K.; WILSON, J.T.; WILSON, B.H.; KAMPBELL, D.H. HAAS, P.E.; MILLER, R.N.; HANSEN, J.E.; CHAPPELLE, F.H. (1998): Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater. National Risk Management Research Laboratory, EPA, Cincinnati, Ohio. EPA/600/R-98/128.

WIEDEMEIER, T.H.; WILSON, J.T.; KAMPBELL, D.H.; MILLER, R.N.; HANSEN, J.E. (1995): Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater. U.S. Air Force Center for Environmental Excellence, San Antonio, TX. Vol. I + II.

WIEDEMAYER, T.H., RIFAI, H.S., NEWELL, C.J. & WILSON, J.T. (1999): Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface. – 617 S.; (John Wiley & Sons)

# Anhang

## Anhang 1 Karten und Pläne

- 1.1 Übersichtskarte Tanklager Schäferhof-Süd (Nienburg/ Weser)
- 1.2 Lageskizze: Bohrpunkte, Probennahmestellen und Messstellen

## Anhang 2 Boden

- 2.1 Übersichtstabelle der Analysenergebnisse in den Bohrrealen B1- B10
- 2.2 Analysenergebnisse der BTEX-Testsondierung (B11)
- 2.3 Interne und externe Qualitätssicherung bei der Start- und Abschlussbeprobung
- 2.4 Prüfungsvorschrift 'Bestimmung von Benzoesäure in Bodenproben' (Hausmethode Umweltschutz Nord/ alphacon)
- 2.5 Statistische Auswertung der Schadstoffgehalte

## Anhang 3 Bodenluft

- 3.1 Übersichtstabelle der Analysenergebnisse aus dem Bodenluft-Monitoring
- 3.2 Prognose der Sickerwasserkonzentrationen aus dem Bodenluft-Monitoring

## Anhang 4 Sickerwasser

- 4.1 Übersichtstabelle der Analysenergebnisse aus dem Sickerwasser-Monitoring
- 4.2 Zusatzversuch zur Wiederfindung leicht flüchtiger Schadstoffe im Sickerwasser

## Anhang 5 Grundwasser

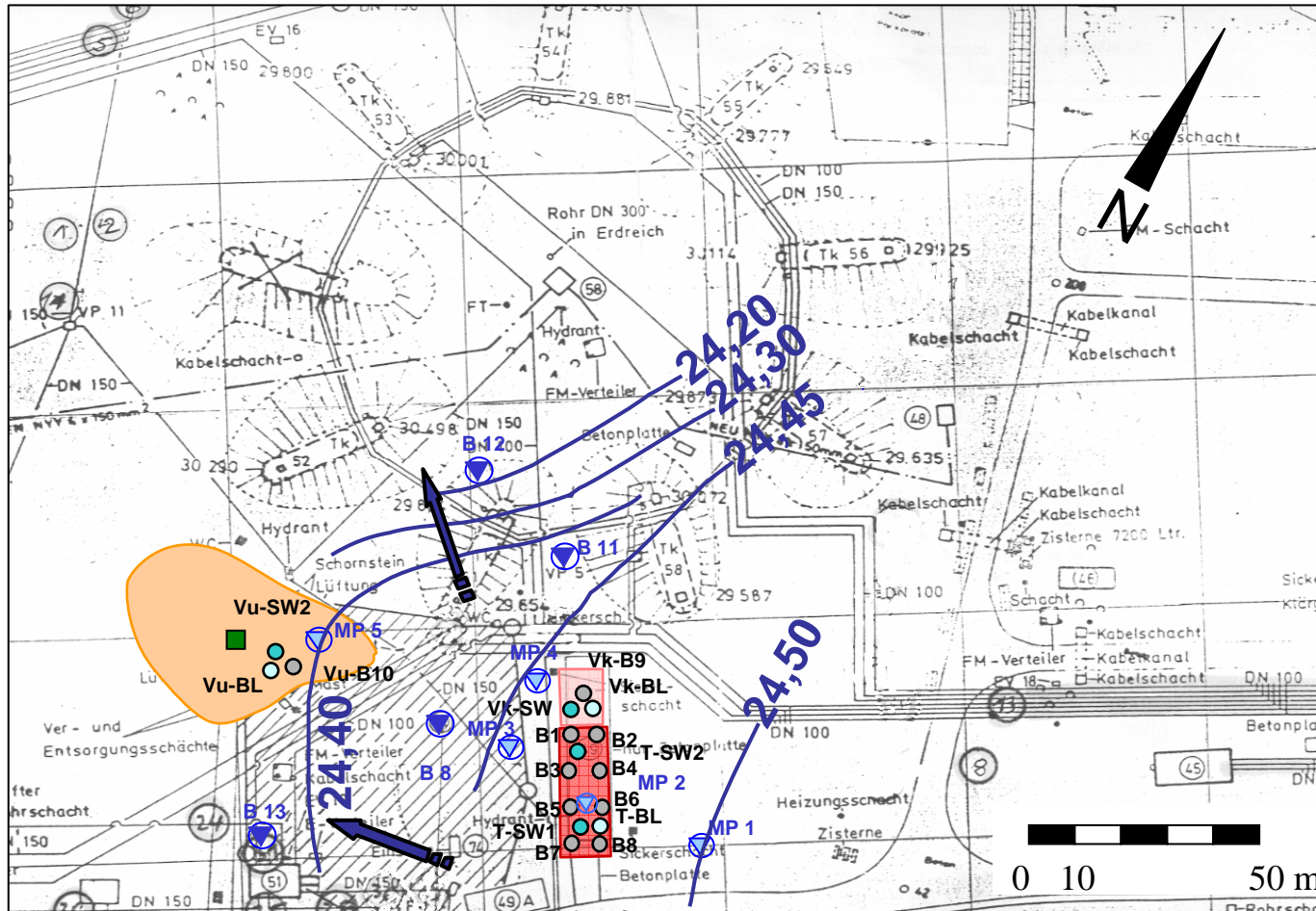
- 5.1 Grundwasserstände am TL Schäferhof Süd
- 5.2 Analysendaten der Grundwasserproben
- 5.3 Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)
- 5.4 Prüfungsvorschrift: Bestimmung von Benzoesäure in Wasserproben (Hausmethode Umweltschutz Nord/ alphacon)
- 5.5 Analysenverfahren zur Bestimmung von Metaboliten (Hausverfahren Universität Frankfurt a.M.)
- 5.6 Analysenverfahren zur Bestimmung von niedermolekularen Aliphaten in Wasser (Hausverfahren Dr. Weißling Laboratorien GmbH Altenberge)

## Anhang 6 Klimadaten


- 6.1 Klimadaten Dez. '01 – Nov. '04
- 6.2 Bodentemperatur Dez. '01 – Nov. '04

# Anhang 1.1






## Übersichtskarte Tanklager Schäferhof- Süd (Nienburg/Weser)



### Legende

-  Vergleichsareal unkontaminiert
-  Vergleichsareal kontaminiert
-  Testfeld
-  Vorhandene Ölschäden n. Bestandsplan
-  GWM
-  GW-Gleichen vom 02.12.01

### Teilschritt 2

-  Bohrareal
-  GWM
-  BLM
-  SWM
-  Meteorol.-M.

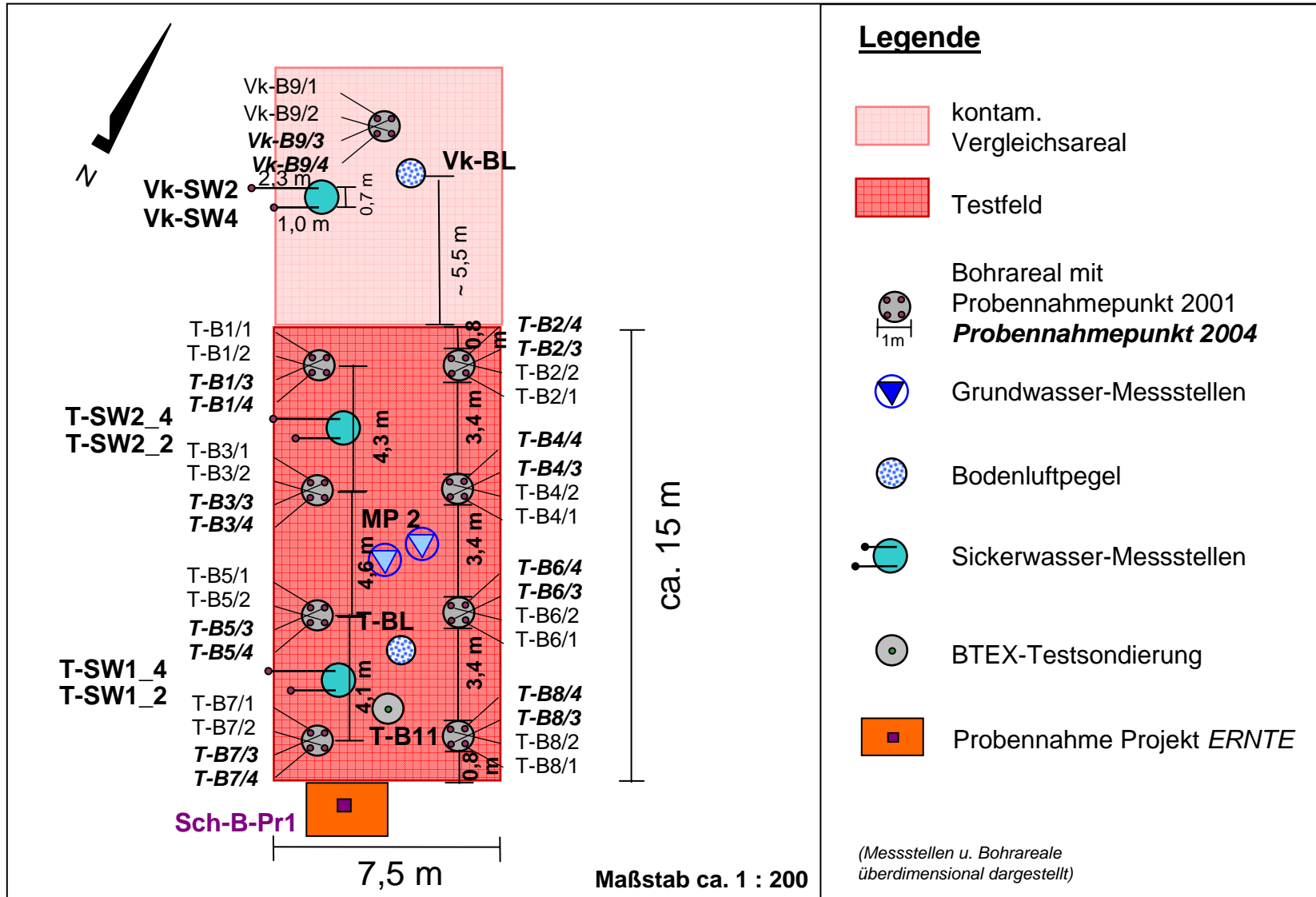
Maßstab ca. 1 : 1.500 (Kartengrundlage Bestandsplan Staatshochbauamt Wunstorf vom 08.08.1990)

(GWM = Grundwassermessstellengruppe, SWM = Sickerwassermessstellengruppe, BL = Bodenluftmessstelle)

(Messstellen u. Bohrareale überdimensional dargestellt)

## Anhang 1.2

### Lageskizze: Bohrpunkte, Probennahmestellen und Messstellen (Testfeld, kontaminiertes Vergleichsareal)



## Anhang 2.1

### Übersichtstabelle der Analyseergebnisse in den Bohrarealen B1- B10

#### Bezeichnung der Probennahmepunkte

	<b>Startbeprobung 2001</b>	<b>Anzahl der Bohr- kerne (K)</b>	<b>Abschluss- beprobung 2004</b>	<b>Anzahl der Bohr- kerne (K)</b>
<b>Testfeld</b>	T-B1/1, T-B1/2	6	T-B1/3, T-B1/4	6
	T-B2/1, T-B2/2	6	T-B2/3, T-B2/4	6
	T-B3/1, T-B3/2	6	T-B3/3, T-B3/4	8
	T-B4/1, T-B4/2	6	T-B4/3, T-B4/4	6
	T-B5/1, T-B5/2	6	T-B5/3, T-B5/4	8
	T-B6/1, T-B6/2	6	T-B6/3, T-B6/4	6
	T-B7/1, T-B7/2	6	T-B7/3, T-B7/4	6
	T-B8/1, T-B8/2	6	T-B8/3, T-B8/4	6
<b>kontaminiertes Vergleichsareal</b>	Vk-B9/1, Vk-B9/2	6	Vk-B9/3, Vk-B9/4	6
<b>unkontaminiertes Vergleichsareal</b>	Vuk-B10/1, Vuk-B10/2	6	keine Beprobung	-

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 1/1, K1	T-B 1/1, K2	T-B 1/1, K3	T-B 1/1, K3	T-B 1/1, K4	T-B 1/1, K5	T-B 1/1, K6
Probenahme		06.12.2001	06.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 378	DU 379	DU 409	DU 409Doppel	DU 410	DU 411	DU 412
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	3.600	2.300
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	19.000	42.000
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	230	230	1.300	70.000	59.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	280	< 100	990	990	6.200	220.000	180.000
o-Xylole	µg/kg TS	150	< 100	< 100	< 100	160	70.000	59.000
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	430		1.200	1.200	7.700	380.000	340.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.900	1.600
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	170	180	840	20.000	18.000
Mesitylen	µg/kg TS	1.100	< 100	2.900	3.200	8.900	69.000	55.000
Pseudocumol	µg/kg TS	2.000	< 100	5.700	6.300	19.000	130.000	100.000
Hemellitol	µg/kg TS	720	< 100	2.500	2.800	7.300	46.000	34.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	3800		11.000	12.000	36.000	270.000	210.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	330	220	520	550	1.200	6.800	9.300
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	230	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	93,8	95,8	97,0	97,3	97,1	93,4	90,4

Proben-Bez.		T-B 1/2, K1	T-B 1/2, K2	T-B 1/2, K3	T-B 1/2, K3	T-B 1/2, K4	T-B 1/2, K5	T-B 1/2, K6
Probenahme		06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 372	DU 373	DU 374	DU 374Doppel	DU 375	DU 376	DU 377
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.400
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	6.300
Ethylbenzol	µg/kg TS	230	< 100	220	290	< 100	4.300	52.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	3.000	< 100	1.000	1.400	500	20.000	170.000
o-Xylole	µg/kg TS	950	< 100	< 100	110	< 100	400	39.000
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	4.200		1.200	1.800	500	25.000	270.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.100
Cumol	µg/kg TS	300	< 100	180	220	< 100	1.900	16.000
Mesitylen	µg/kg TS	4.200	370	3.900	4.500	1.300	9.600	54.000
Pseudocumol	µg/kg TS	7.600	590	7.400	8.500	2.800	20.000	100.000
Hemellitol	µg/kg TS	2.800	300	3.200	3.700	1.200	7.000	35.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	15.000	1.300	15.000	17.000	5.300	39.000	210.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	490	210	960	880	260	2.600	8.700
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			270				
Trockensubstanz	%	91,7	95,6	96,5	96,4	95,8	94,8	88,7





## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 3/1, K1	T-B 3/1, K2	T-B 3/1, K3	T-B 3/1, K3	T-B 3/1, K4	T-B 3/1, K5	T-B 3/1, K6
Probenahme		06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001	06.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 366	DU 367	DU 368	DU 368Doppel	DU 369	DU 370	DU 371
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	270
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	120	280
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	380	13.000	23.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	1.700	56.000	90.000
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	560	1.200
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS					2.100	70.000	110.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	250	4.500	8.200
Mesitylen	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	2.100	20.000	32.000
Pseudocumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	5.000	45.000	68.000
Hemellitol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	1.800	16.000	25.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS					9.200	86.000	130.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	550	7.300	7.900
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			16				
Trockensubstanz	%	90,6	94,9	94,8	93,8	95,3	92,9	87,5

Proben-Bez.		T-B 3/2, K1	T-B 3/2, K2	T-B 3/2, K3	T-B 3/2, K3	T-B 3/2, K4	T-B 3/2, K5	T-B 3/2, K6
Probenahme		05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	06.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 288	DU 289	DU 290	DU 290Doppel	DU 291	DU 292	DU 365
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	190
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	110	220
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	490	16.000	20.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	130	< 100	< 100	< 100	2.200	68.000	81.000
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	760	1.000
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	130				2.700	85.000	100.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	310	5.900	6.500
Mesitylen	µg/kg TS	260	< 100	< 100	< 100	2.500	28.000	27.000
Pseudocumol	µg/kg TS	420	< 100	< 100	< 100	6.000	62.000	60.000
Hemellitol	µg/kg TS	180	< 100	< 100	< 100	2.200	24.000	23.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	860				11.000	120.000	120.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	670	< 100	< 100	370	660	2.300	12.000
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			34				
Trockensubstanz	%	91,9	95,3	92,5	93,4	96,2	95,2	89,9

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 4/1, K1	T-B 4/1, K2	T-B 4/1, K3	T-B 4/1, K3	T-B 4/1, K4	T-B 4/1, K5	T-B 4/1, K6
Probenahme		07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 413	DU 414	DU 415	DU 415Doppel	DU 416	DU 417	DU 418
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	150
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	1.400	1.000	6.200	5.700	26.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	440	1.400	9.800	7.100	34.000	25.000	100.000
o-Xylole	µg/kg TS	160	550	770	570	850	730	3.200
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	600	2.000	12.000	8.700	41.000	31.000	130.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	700	500	3500	3.000	11.000
Mesitylen	µg/kg TS	270	1.400	8.600	6.500	20.000	14.000	40.000
Pseudocumol	µg/kg TS	520	1.100	13.000	9.600	38.000	29.000	79.000
Hemellitol	µg/kg TS	240	860	5.700	4.400	14.000	10.000	28.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	1.000	3.400	28.000	21.000	76.000	56.000	160.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.600	4.000	3.900	4.300	4.000	3.400	4.800
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			2.600				
Trockensubstanz	%	91,7	96,0	95,2	94,7	96,4	94,3	91,6

Proben-Bez.		T-B 4/2, K1	T-B 4/2, K2	T-B 4/2, K3	T-B 4/2, K3	T-B 4/2, K4	T-B 4/2, K5	T-B 4/2, K6
Probenahme		07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 419	DU 420	DU 421	DU 421Doppel	DU 422	DU 423	DU 424
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	130
Ethylbenzol	µg/kg TS	130	< 100	1.100	680	3.000	4.900	26.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	2.900	4.800	12.000	6.900	18.000	22.000	95.000
o-Xylole	µg/kg TS	1.000	1.900	1.800	1.000	370	570	2.400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	4.000	6.700	15.000	8.600	21.000	27.000	120.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	280	160	1600	2.000	8.200
Mesitylen	µg/kg TS	1.300	4.300	8.600	4.400	8.700	9.900	29.000
Pseudocumol	µg/kg TS	2.100	5.400	9.400	5.100	18.000	21.000	59.000
Hemellitol	µg/kg TS	1.100	2.600	4.800	2.800	6.200	8.200	21.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	4.500	12.000	23.000	12.000	35.000	41.000	120.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	2.700	4.500	6.500	6.500	3.100	3.300	6.800
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			5.200				
Trockensubstanz	%	92,1	96,5	96,2	96,4	97,1	95,2	91,7

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 5/1, K1	T-B 5/1, K2	T-B 5/1, K3	T-B 5/1, K3	T-B 5/1, K4	T-B 5/1, K5	T-B 5/1, K6
Probenahme		05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 293	DU 294	DU 295	DU 295Doppel	DU 296	DU 297	DU 298
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	300
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	190
Ethylbenzol	µg/kg TS	290	2.300	4.100	5.400	2.800	6.000	19.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	1.200	12.000	19.000	27.000	11.000	26.000	79.000
o-Xylole	µg/kg TS	240	3.900	2.500	3.900	300	410	1.100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	1.700	18.000	26.000	36.000	14.000	32.000	100.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	120	120	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	140	1.300	2.500	1.800	1300	2.300	7.100
Mesitylen	µg/kg TS	1.500	11.000	18.000	13.000	8.700	14.000	33.000
Pseudocumol	µg/kg TS	3.700	26.000	44.000	32.000	22.000	36.000	74.000
Hemellitol	µg/kg TS	1.800	10.000	16.000	12.000	7.900	13.000	29.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	7.100	48.000	81.000	59.000	40.000	65.000	140.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	3.300	5.100	6.100	5.700	2.700	4.700	9.100
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			4.500				
Trockensubstanz	%	91,1	95,8	93,8	93,9	95,9	94,6	90,0

Proben-Bez.		T-B 5/2, K1	T-B 5/2, K2	T-B 5/2, K3	T-B 5/2, K3	T-B 5/2, K4	T-B 5/2, K5	T-B 5/2, K6
Probenahme		04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 277	DU 278	DU 279	DU 279Doppel	DU 285	DU 286	DU 287
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	240
Toluol	µg/kg TS	< 100	110	< 100	< 100	< 100	< 100	240
Ethylbenzol	µg/kg TS	1.200	3.700	6.400	4.300	4.000	5.000	20.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	5.800	19.000	32.000	22.000	20.000	23.000	79.000
o-Xylole	µg/kg TS	2.000	6.200	4.400	3.300	290	620	1.400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	9.000	29.000	43.000	30.000	24.000	29.000	100.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	180	130	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	470	1.400	2.700	1.900	1700	2.000	7.200
Mesitylen	µg/kg TS	4.500	10.000	19.000	14.000	12.000	12.000	32.000
Pseudocumol	µg/kg TS	10.000	24.000	43.000	33.000	29.000	30.000	73.000
Hemellitol	µg/kg TS	4.300	9.700	17.000	13.000	11.000	11.000	28.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	19.000	45.000	82.000	62.000	54.000	55.000	140.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	3.200	5.600	6.000	5.600	3.500	3.800	10.000
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			4.300				
Trockensubstanz	%	92,2	95,1	94,8	94,5	96,3	95,4	92,1

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 6/1, K1	T-B 6/1, K2	T-B 6/1, K3	T-B 6/1, K3	T-B 6/1, K4	T-B 6/1, K5	T-B 6/1, K6
Probenahme		03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 231	DU 232	DU 233	DU 233Doppel	DU 234	DU 235	DU 236*
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	110
Ethylbenzol	µg/kg TS	280	< 100	< 100	< 100	430	5.800	19.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	1.700	500	270	200	2.100	25.000	73.000
o-Xylole	µg/kg TS	260	< 100	< 100	< 100	< 100	340	1.100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	2.200	500	270	200	2.500	31.000	93.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	170	< 100	< 100	< 100	230	2.100	5.900
Mesitylen	µg/kg TS	2.400	900	550	380	1.700	11.000	24.000
Pseudocumol	µg/kg TS	4.000	1.900	1.200	830	4.000	24.000	51.000
Hemellitol	µg/kg TS	1.900	810	530	360	1.600	9.000	19.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	8.500	3.600	2.300	1.600	7.500	46.000	100.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.400	830	450	370	1.200	6.400	9.400
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			220				
Trockensubstanz	%	92,2	95,9	93,0	93,9	95,8	94,1	88,1

Proben-Bez.		T-B 6/2, K1	T-B 6/2, K2	T-B 6/2, K3	T-B 6/2, K3	T-B 6/2, K4	T-B 6/2, K5	T-B 6/2, K6
Probenahme		03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	04.12.2001	04.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 237	DU 238	DU 239	DU 239Doppel	DU 240	DU 263	DU 264
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	110	120
Ethylbenzol	µg/kg TS	200	1.700	3.000	5.100	2.900	13.000	16.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	980	10.000	16.000	26.000	15.000	55.000	63.000
o-Xylole	µg/kg TS	240	1.700	1.200	2.100	350	820	1.100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	1.400	13.000	20.000	33.000	18.000	69.000	80.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	850	2.100	1.200	1200	4.500	4.800
Mesitylen	µg/kg TS	940	8.100	13.000	7.800	7.300	22.000	20.000
Pseudocumol	µg/kg TS	2.000	17.000	27.000	17.000	16.000	48.000	44.000
Hemellitol	µg/kg TS	830	7.100	11.000	6.400	6.100	18.000	16.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	3.800	33.000	53.000	32.000	31.000	93.000	85.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.900	4.500	5.200	4.600	5.300	6.000	8.000
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			3.700				
Trockensubstanz	%	91,2	96,0	94,9	95,2	95,5	94,6	89,1

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 7/1, K1	T-B 7/1, K2	T-B 7/1, K3	T-B 7/1, K3	T-B 7/1, K4	T-B 7/1, K5	T-B 7/1, K6
Probenahme		04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 265	DU 266	DU 267	DU 267 Doppel	DU 268	DU 269	DU 270
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	440	3.400	3.000	1.600	2.500	9.700
m/p-Xylole	µg/kg TS	< 100	1.400	14.000	12.000	6.800	12.000	43.000
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	470	3.300	2.900	460	320	1.100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS		2.300	21.000	18.000	8.900	15.000	54.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	210	1.600	1300	770	1.200	3.700
Mesitylen	µg/kg TS	< 100	2.500	12.000	11.000	5.600	7.400	19.000
Pseudocumol	µg/kg TS	< 100	5.500	29.000	24.000	14.000	18.000	47.000
Hemellitol	µg/kg TS	< 100	2.200	11.000	9.300	5.300	7.000	19.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS		10.000	54.000	46.000	26.000	34.000	89.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	680	3.700	8.700	8.900	4.600	3.600	9.300
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			3.500				
Trockensubstanz	%	91,4	93,4	92,5	92,5	94,0	94,0	88,4
Benzoessäure	mg/kg TS	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
pH-Wert	-	5,1	5,4	4,5		4,8	5,1	5,1
Gesamt-Stickstoff	mg/kg TS	398	142	90,7		54,5	< 50	64,8
Verf. Ammonium-Stickstoff	mg/kg TS	< 2,0	< 2,0	< 2,0		< 2,0	2,0	< 2,0
Verf. Nitrat-Stickstoff	mg/kg TS	< 2,0	2,91	2,6		2,1	< 2,0	< 2,0
Verf. Phosphat-P	mg/kg TS	30	< 8,0	16,7		< 8,0	< 8,0	< 8,0
Bodenatmung	mgCO <sub>2</sub> /24h kg TS	39,4	22,8	46,1		25,5	13,4	61,7
Dehydrogenase	µg TPF/16h g TS	61,7	86,2	223,0		29,4	10,7	64,4
Nitrifikation: Nitrat/ Nitrit-Bildung	mg N/ kg TS	< 2,5	< 2,5	< 2,5		< 2,5	< 2,5	< 2,5
Nitrifikation: Ammonium-Verbrauch	mg N/ kg TS	-20	-1,7	-10,5		-8,7	1,3	1,9
TOC	mg/kg TS	3.530	3.150	3.160		2.480	1.780	4.610
DOC im S4-Eluat	mg/l	7,2	7,2	4,7		4,2	4,3	6,7
Karbonat	mg/kg TS							
Eisen	mg/kg TS	3.420	2.420	3.380	3.390	1.840	1.780	2.400
Kohlenwasserstoffindex im S4-Eluat	mg/l	< 0,1	< 0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,7
MKW > C40 im S4-Eluat	mg/l							
Korngrößenverteilung	mm	0,06-8	0,06-8	0,06-16		0,06-8	0,06-16	0,06-16
Porenanteil	Vol. %	27,1	26,8	31,6		33,9	33,1	n.b.
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	1*10 <sup>-5</sup>	3*10 <sup>-4</sup>	6*10 <sup>-4</sup>		2*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-4</sup>

Proben-Bez.		T-B 7/2, K1	T-B 7/2, K2	T-B 7/2, K3	T-B 7/2, K3	T-B 7/2, K4	T-B 7/2, K5	T-B 7/2, K6
Probenahme		04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001	04.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DU 271	DU 272	DU 273	DU 273Doppel	DU 274	DU 275	DU 276
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Ethylbenzol	µg/kg TS	290	770	1.300	1.400	4.300	4.900	8.200
m/p-Xylole	µg/kg TS	1.500	3.000	5.000	5.200	18.000	22.000	35.000
o-Xylole	µg/kg TS	650	430	1.200	1.300	1.200	550	1.200
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	2.400	4.200	7.500	7.900	24.000	27.000	44.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	150	380	650	670	1800	2.200	3.000
Mesitylen	µg/kg TS	2.300	5.400	6.400	6.600	12.000	13.000	15.000
Pseudocumol	µg/kg TS	5.100	12.000	15.000	15.000	28.000	33.000	38.000
Hemellitol	µg/kg TS	2.200	5.000	5.900	6.100	11.000	13.000	15.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	9.800	23.000	28.000	28.000	53.000	61.000	71.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	3.600	4.700	6.000	6.300	10.000	4.300	9.700
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			4.400				
Trockensubstanz	%	92,1	94,6	94,4	94,9	94,2	94,4	89,3

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		T-B 8/1, K1	T-B 8/1, K2	T-B 8/1, K2	T-B 8/1, K2	T-B 8/1, K3	T-B 8/1, K3	T-B 8/1, K4	T-B 8/1, K5	T-B 8/1, K6
Probenahme		30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001	30.11.2001
Entnahmetiefe		0,00-1,00 m	1,00-1,20 m	1,20-1,70 m	1,70-2,00 m	2,00-3,00 m	2,00-3,00 m	3,00-4,00 m	4,00-5,00 m	5,00-6,00m
Labor-Nummer		DU 178	DU 179	DU 180	DU 181	DU 182	DU182Doppel	DU 183	DU 184	DU 185
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	180	520
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	1.900	1.800	2200	12.000	18.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	140	8.100	7.800	7.300	45.000	74.000
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	290	300	150	3.800	9.900
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS				140	10.000	9.900	9.700	61.000	100.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	120	300
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	660	650	670	3.300	5.300
Mesitylen	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	340	7.600	7.900	4.400	17.000	24.000
Pseudocumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	330	22.000	22.000	14.000	44.000	59.000
Hemellitol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	560	10.000	11.000	5.800	18.000	23.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS				1.200	40.000	42.000	25.000	82.000	110.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	420	500	1.400	4.700	6.500	6.000	3.900	4.300	7.300
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS					4.500				
Trockensubstanz	%	91,2	89,0	93,5	91,8	93,8	94,6	94,8	95,3	81,0

Proben-Bez.		T-B 8/2, K1	T-B 8/2, K2	T-B 8/2, K3	T-B 8/2, K3	T-B 8/2, K4	T-B 8/2, K5	T-B 8/2, K6		
Probenahme		30.11.2001	30.11.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001	03.12.2001		
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00-3,00m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m		
Labor-Nummer		DU 186	DU 187	DU 227	DU227Doppel	DU 228	DU 229	DU 230		
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	150		
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	440	710	1.900	6.900	9.800		
m/p-Xylole	µg/kg TS	170	450	2.300	3.500	7.700	27.000	40.000		
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	140	100	1.100	2.800		
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	170	450	2.700	4.400	9.700	35.000	53.000		
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	130	200	550	2.000	2.900		
Mesitylen	µg/kg TS	730	840	2.100	3.200	3.400	10.000	14.000		
Pseudocumol	µg/kg TS	2.200	1.100	5.700	8.600	10.000	28.000	35.000		
Hemellitol	µg/kg TS	1.100	970	2.900	4.300	4.300	11.000	14.000		
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	4.000	2.900	11.000	16.000	18.000	51.000	66.000		
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	3.800	3.900	4.800	5.400	3.400	7.300	8.200		
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			3.700						
Trockensubstanz	%	91,1	94,2	94,2	95,4	96,3	92,9	89,8		





Proben-Bez.		VK-B-9/2, K1	VK-B-9/2, K2	VK-B-9/2, K3A	VK-B-9/2, K3B	VK-B-9/2, K4	VK-B-9/2, K5	VK-B-9/2, K6
Probenahme		21.01.2002	21.01.2002	21.01.2002	21.01.2002	21.01.2002	21.01.2002	21.01.2002
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DW 015	DW 016	DW 017	DW 018	DW 019	DW 020	DW 021
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	250	500
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	4.300	9.200
m/p-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	10.000	20.000
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	5.000	11.000
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS						20.000	41.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	150	310
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.500	3.100
Mesitylen	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	6.600	12.000
Pseudocumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	15.000	26.000
Hemellitol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	5.400	9.200
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS						29.000	51.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	300	280	< 100	< 100	< 100	2.600	4.600
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			42				
Trockensubstanz	%	92,9	94,5	96,8	97,1	95,8	93,8	91,8
Korngrößenverteilung	mm	0,06-15	0,07-15	0,07-15		0,06-8	0,06-8	0,06-8
Porenanteil	Vol. %	28,0	30,1	31,8		32,2	32,6	29,9
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	5*10 <sup>-5</sup>	1*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-4</sup>		2*10 <sup>-4</sup>	7*10 <sup>-4</sup>	7*10 <sup>-4</sup>

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Startbeprobung

Proben-Bez.		VU-B-10/1, K1	VU-B-10/1, K2	VU-B-10/1, A	VU-B-10/1, B	VU-B-10/1, K3	VU-B-10/1, K4	VU-B-10/1, K5
Probenahme		22.01.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DW 033	DW 034	DW 035	DW 036	DW 037	DW 038	DW 039
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	720	570
m/p-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.900	1.400
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	110	110
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS						2.700	2.100
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	360	270
Mesitylen	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	2.000	1.400
Pseudocumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	4.100	3.000
Hemellitol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.400	1.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS						7.900	5.700
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	240	< 100	190	200	< 100	180	160
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			43				
Trockensubstanz	%	92,1	93,3	91,8	91,8	89,1	87,2	87,6
Benzoessäure	mg/kg TS							
pH-Wert	-	6,4	7,0	nicht		6,6	6,3	6,8
Gesamt-Stickstoff	mg/kg TS	341	101	ausreichendes		101	124	79,9
Verf. Ammonium-Stickstoff	mg/kg TS	< 2,0	< 2,0	Probenmaterial		< 2,0	< 2,0	< 2,0
Verf. Nitrat-Stickstoff	mg/kg TS	< 2,0	< 2,0	vorhanden,		< 2,0	< 2,0	< 2,0
Verf. Phosphat-P	mg/kg TS	19	21	somit		16	16	12
Bodenatmung	mgCO <sub>2</sub> /24h kg TS	888	41,9	keine		364	560	268
Dehydrogenase	µg TPF/16h g TS	103	44,3	Analysen		4,8	129	213
Nitrifikation: Nitrat/ Nitrit-Bildung	mg N/ kg TS	83,97	77,0			34	18	< 2,5
Nitrifikation: Ammonium-Verbrauch	mg N/ kg TS	127,92	115,1			48,4	45	-1
TOC	mg/kg TS	3.720	1.430	3.240		860	980	700
DOC im S4-Eluat	mg/l	11,0	7,4	möglich		6,1	7,0	4,5

Proben-Bez.		VU-B-10/2, K1	VU-B-10/2, K2	VU-B-10/2, K3A	VU-B-10/2, K3 B	VU-B-10/2, K4	VU-B-10/2, K5	VU-B-10/2, K6
Probenahme		22.01.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002	22.02.2002
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		DW 040	DW 041	DW 042	DW 043	DW 044	DW 045	DW 046
Benzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Toluol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	2.900
Ethylbenzol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	290	6.100
m/p-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.300	13.000
o-Xylole	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	940	9.400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS						2.500	31.000
Styrol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	300
Cumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.700
Mesitylen	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.500	7.000
Pseudocumol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	2.800	15.000
Hemellitol	µg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	1.000	5.200
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS						5.300	29.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	210	1.200	670
MKW > C40	mg/kg TS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS			94				
Trockensubstanz	%	93,6	94,4	93,9	93,6	91,6	87,2	86,9
Korngrößenverteilung	mm	0,06-15	0,06-15	0,06-15		0,06-15	0,06-15	0,06-15
Porenanteil	Vol. %	28,6	38,2	37,3		35,7	31,2	38,5
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	1*10 <sup>-4</sup>	2*10 <sup>-4</sup>	2*10 <sup>-4</sup>		1*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-4</sup>	3*10 <sup>-4</sup>

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 1/3, K1	T-B 1/3, K2	T-B 1/3, K3	T-B 1/3, K3	T-B 1/3, K4	T-B 1/3, K5	T-B 1/3, K6
Probenahme		14.10.2004	14.10.2004	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001	07.12.2001
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		08002	08003	08004	08004/Doppel	08005	08006	08007
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	310	180
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	610	630
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	23000	25000
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	280	100000	110000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	17000	3700
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	280	140000	140000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	630	210
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	6900	8600
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	670	31000	32000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	1500	70000	70000
Hemellitol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	660	27000	25000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	2800	140000	140000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	650	1200	430	430	360	4100	2400
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	94	97,5	96,9		97,3	96,5	86,2

Proben-Bez.		T-B 1/4, K1	T-B 1/4, K2	T-B 1/4, K3	T-B 1/4, K3	T-B 1/4, K4	T-B 1/4, K5	T-B 1/4, K6
Probenahme		13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	38273	38273	38273
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07975	07976	07977	07977/Doppel	07978	07979	07980
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	520	3700
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	690	83000
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	13000	61000
m/p-Xylole	µg/kg TS	230	<100	<100	<100	<100	56000	220000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	6400	80000
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	230	<100	<100	<100	<100	77000	450000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	520	2800
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	690	13000
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	270	13000	44000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	650	56000	94000
Hemellitol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	300	6400	34000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	1200	77000	190000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	180	<100	<100	<100	180	9100	2500
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,1	96,1	95,8		96,5	93,8	84,6

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

7.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 2/3, K1	T-B 2/3, K2	T-B 2/3, K3	T-B 2/3, K3	T-B 2/3, K4	T-B 2/3, K5	T-B 2/3, K6
Probenahme		12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07937	07938	07939	07939/Doppel	07940	07941	07942
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	200
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	500	3.800	14.000
m/p-Xylol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	1.600	13.000	57.000
o-Xylol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	120	530	5000
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	2.200	17.000	76.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	280
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	370	2100	4600
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	1.500	1.800	4.900	13.000	19.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	9.200	27.000	42.000
Hemellitil	µg/kg TS	<100	<100	670	400	4.300	11.000	16.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	2.200	2.200	19.000	53.000	82.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	420	2.800	4.700	4.900	1.800	3.100	6.100
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	97,0	94,1	95,6		93,2	92,8	86,8

Proben-Bez.		T-B 2/2, K1	T-B 2/2, K2	T-B 2/2, K3	T-B 2/2, K3	T-B 2/2, K4	T-B 2/2, K5	T-B 2/2, K6
Probenahme		13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07981	07982	07983	07983/Doppel	07984	07985	07986
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	150
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	3500	10000
m/p-Xylol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	17000	43000
o-Xylol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	490	8800
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	21000	62000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	400
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	2300	3800
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	14.000	15.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	30.000	35.000
Hemellitil	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	12000	14000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	58000	68000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	310	320	560	510	120	3.100	3.900
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,5	96,1	96,5		98,5	92,0	83,3
Benzoessäure	mg/kg TS							

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 3/3, K1	T-B 3/3, K2	T-B 3/3, K3	T-B 3/3, K3	T-B 3/3, K4	T-B 3/3, K5	T-B 3/3, K6	T-B 3/3, K7	T-B 3/3, K8
Probenahme		15.10.2004	18.10.2004	18.10.2004	18.10.2004	18.10.2004	18.10.2004	18.10.2004	18.10.2004	18.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m	6,00 - 7,00 m	7,00 - 8,00 m
Labor-Nummer		08051	08081	08082	08082/Doppel	08083	08084	08085	08086	08087
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	430	<100	<100
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	3300	21000	680	230
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	13000	93000	3300	1100
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	230	1100	<100	<100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	17.000	120.000	4000	1300
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	1500	7100	330	130
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	460	9.600	30.000	1.800	780
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	1.100	23.000	74.000	4.500	2.000
Hemellitil	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	320	8600	26000	1800	790
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	1900	43000	140000	8400	3700
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	310	<100	<100	<100	360	4.600	7.900	900	590
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	90,9	95,1	96,1		95,7	93,7	86,9	80,9	84,9

Proben-Bez.		T-B 3/4, K1	T-B 3/4, K2	T-B 3/4, K3	T-B 3/4, K3	T-B 3/4, K4	T-B 3/4, K5	T-B 3/4, K6	T-B 3/4, K7	T-B 3/4, K8
Probenahme		05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	05.12.2001	014.10.2004	06.12.2001	014.10.2005
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m	6,00 - 7,00 m	7,00 - 8,00 m
Labor-Nummer		08088	08089	08090	08090/Doppel	08091	08092	08093	08094	08095
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	320	<100	330	<100	<100
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	2.900	2.600	16.000	1.200	380
m/p-Xylole	µg/kg TS	360	<100	<100	<100	7.100	11.000	70.000	5.500	1.700
o-Xylole	µg/kg TS	140	<100	<100	<100	1700	150	850	<100	<100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	500	<100	<100	<100	12.000	14.000	87.000	6.700	4.100
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	1100	5600	490	170
Mesitylen	µg/kg TS	390	<100	<100	<100	610	6.800	24.000	2.400	860
Pseudocumol	µg/kg TS	800	<100	<100	<100	1.700	17.000	60.000	6.000	2.200
Hemellitil	µg/kg TS	400	<100	<100	<100	<100	6.800	24.000	2.500	900
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	1600	<100	<100	<100	2.300	32.000	110.000	11.000	4.100
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	450	<100	<100	<100	1.700	2.600	11.000	900	440
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,8	95,9	94,5		97,2	95,7	87,8	85,0	84,1

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 4/3, K1	T-B 4/3, K2	T-B 4/3, K3	T-B 4/3, K3	T-B 4/3, K4	T-B 4/3, K5	T-B 4/3, K6
Probenahme		12.10.2004	13.10.2004	14.10.2004	15.10.2004	16.10.2004	17.10.2004	18.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07943	07944	07945	07945/Doppel	07946	07947	07948
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	300
Ethylbenzol	µg/kg TS	140	<100	150	140	740	2.600	21.000
m/p-Xylol	µg/kg TS	1500	1.100	2.900	2.700	7.400	7.700	85.000
o-Xylol	µg/kg TS	630	720	500	480	320	240	1500
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	2300	1.800	3.600	3.300	8.500	11.000	110.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	290	1200	6700
Mesitylen	µg/kg TS	580	1.400	2.900	2.700	6.500	8.700	28.000
Pseudocumol	µg/kg TS	1.300	1.100	4.100	3.900	14.000	16.000	64.000
Hemellitl	µg/kg TS	750	1400	2.400	2.300	5.700	2.600	24.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	2.600	3.900	9.400	8.900	26.000	29.000	120.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.400	4.100	3.800	3.700	3.200	3.500	9.600
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	93,9	95,1	96,7		96,0	95,1	90,1

Proben-Bez.		T-B 4/4, K1	T-B 4/4, K2	T-B 4/4, K3	T-B 4/4, K3	T-B 4/4, K4	T-B 4/4, K5	T-B 4/4, K6
Probenahme		12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07949	07950	07951	07951/Doppel	07952	07953	07954
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	290
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	130	130	640	7.700	20.000
m/p-Xylol	µg/kg TS	<100	<100	2.200	2.300	5.600	29.000	82.000
o-Xylol	µg/kg TS	<100	<100	340	310	280	620	3100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	2.700	2.700	6.500	37.000	110.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	390	3500	6800
Mesitylen	µg/kg TS	<100	200	5.300	5.400	9.000	18.000	27.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	6.500	6.600	18.000	39.000	61.000
Hemellitl	µg/kg TS	<100	<100	4.500	4.600	8.200	15.000	24.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	200	16.000	17.000	36.000	76.000	120.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.400	3.200	5.500	5.600	4.600	4.700	6.900
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	94,1	95,8	96,1		96,1	92,4	77,2



## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 5/3, K1	T-B 5/3, K2	T-B 5/3, K3	T-B 5/3, K3	T-B 5/3, K4	T-B 5/3, K5	T-B 5/3, K6	T-B 5/3, K7	T-B 5/3, K8
Probenahme		14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	15.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m	6,00 - 7,00 m	7,00 - 8,00 m
Labor-Nummer		08020	08021	08022	08022/Doppel	08023	08024	08025	08026	08052
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	120	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	250	<100	<100
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	1.000	970	620	2.100	12.000	400	<100
m/p-Xylole	µg/kg TS	910	1.300	9.000	8.600	3.000	8.600	53.000	1.800	<100
o-Xylole	µg/kg TS	400	910	1.300	1.300	180	340	970	<100	<100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	1.300	2.200	11.000	11.000	3.800	11.000	66.000	2.200	<100
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	530	510	260	870	3800	160	<100
Mesitylen	µg/kg TS	890	3.600	11.000	11.000	3.500	8.000	19.000	980	<100
Pseudocumol	µg/kg TS	2.300	6.600	28.000	27.000	9.200	21.000	50.000	2.600	230
Hemellitil	µg/kg TS	1.200	4.200	13.000	13.000	4.200	9.100	22.000	1.200	100
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	4.400	14.000	53.000	52.000	17.000	39.000	95.000	4.900	330
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.700	5.700	5.700	5.500	2.800	5.600	9.000	1.000	<100
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,8	96,9	95,4		96,5	81,2	90,7	86,3	88,8

Proben-Bez.		T-B 5/4, K1	T-B 5/4, K2	T-B 5/4, K3	T-B 5/4, K3	T-B 5/4, K4	T-B 5/4, K5	T-B 5/4, K6	T-B 5/4, K7	T-B 5/4, K8
Probenahme		15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004	15.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		08043	08044	08045	08045/Doppel	08046	08047	08048	08049	08050
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	130	<100	<100
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	120	110	1.600	1.100	8.000	680	100
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	1.500	1.400	6.600	4.100	37.000	3.300	530
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	430	420	400	140	630	<100	<100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	2.100	1.900	8.600	5.300	46.000	4.000	630
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	710	510	3000	350	<100
Mesitylen	µg/kg TS	<100	240	4.100	4.000	9.100	4.700	16.000	2.000	480
Pseudocumol	µg/kg TS	140	<100	3.400	3.300	24.000	13.000	40.000	5.100	1.200
Hemellitil	µg/kg TS	<100	150	3.700	3.600	10.000	5.500	18.000	2.200	540
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	140	390	11.000	11.000	44.000	24.000	77.000	9.700	2.200
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.600	5.200	6.700	6.400	5.700	3.800	14.000	980	440
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	97,7	91,2	95,7		95,9	96,6	89,7	87,3	87,6

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 6/3, K1	T-B 6/3, K2	T-B 6/3, K3	T-B 6/3, K3	T-B 6/3, K4	T-B 6/3, K5	T-B 6/3, K6
Probenahme		11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07908	07909	07910	07910/Doppel	07911	07912	07913
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	120	320
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	2.000	8.400	21.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	390	<100	530	540	12.000	26.000	85.000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	330	550	1400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	390	<100	530	540	14.000	35.000	110.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	880	2600	5400
Mesitylen	µg/kg TS	1.400	<100	810	810	9.900	15.000	23.000
Pseudocumol	µg/kg TS	2.800	<100	1.800	1.800	23.000	36.000	58.000
Hemellitil	µg/kg TS	1.600	<100	940	950	10.000	16.000	25.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	5.800	<100	3.600	3.600	44.000	70.000	110.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.000	<100	1.000	1.100	4.800	6.100	12.000
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,8	95,7	94,2		95,9	95,4	87,7

Proben-Bez.		T-B 6/4, K1	T-B 6/4, K2	T-B 6/4, K3	T-B 6/4, K3	T-B 6/4, K4	T-B 6/4, K5	T-B 6/4, K6
Probenahme		12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004	12.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07955	07956	07957	07957/Doppel	07958	07959	07960
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	210
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	590	610	810	8.200	15.000
m/p-Xylole	µg/kg TS	510	<100	5.900	6.000	4.600	20.000	63.000
o-Xylole	µg/kg TS	150	<100	430	440	230	610	1100
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	660	<100	6.900	7.100	5.600	29.000	79.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	450	460	480	3000	4500
Mesitylen	µg/kg TS	770	<100	7.200	7.300	5.500	16.000	19.000
Pseudocumol	µg/kg TS	1.500	<100	16.000	16.000	13.000	37.000	46.000
Hemellitil	µg/kg TS	810	<100	7.600	7.800	5.600	14.000	19.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	3.100	<100	31.000	32.000	25.000	70.000	89.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	1.600	3.400	4.000	4.200	2.700	5.300	6.500
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	93,8	96,6	96,2		96,9	93,5	88,2

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 7/3, K1	T-B 7/3, K2	T-B 7/3, K3	T-B 7/3, K3	T-B 7/3, K4	T-B 7/3, K5	T-B 7/3, K6
Probenahme		14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		08008	08009	08010	08010/Doppel	08011	08012	08013
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	720	780	830	1.000	4.400
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	180	3.000	3.100	3.400	3.700	19.000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	860	900	180	190	680
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	180	4.600	4.800	4.400	4.900	24.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	340	360	320	420	1400
Mesitylen	µg/kg TS	<100	370	5.500	5.500	4.000	3.700	7.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	410	12.000	12.000	10.000	9.600	19.000
Hemellitol	µg/kg TS	<100	390	5.800	5.900	4.500	4.300	8.900
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	1200	24.000	24.000	19.000	18.000	36.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	670	3.700	5.700	6.100	2.300	2.900	7.900
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,7	95,5	94,6		95,5	96,2	89,4
Benzoessäure	mg/kg TS	<0,4	<0,4	<0,4		<0,4	<0,4	<0,4
pH-Wert	-	5,7	5,6	5,3		5,2	5,3	4,9
Gesamt-Stickstoff	mg/kg TS	210	< 50	<100		<100	<100	<100
Verf. Ammonium-Stickstoff	mg/kg TS	<2	<2	<2		<2	<2	<2
Verf. Nitrat-Stickstoff	mg/kg TS	<2	<2	<2		<2	<2	<2
Verf. Phosphat-P	mg/kg TS	52	11	13		<8	<8	<8
Bodenatmung	mgCO <sub>2</sub> /24h kg TS	54	54	24		30	12	39
Dehydrogenase	µg TPF/16h g TS	<4	<4	<4		<4	<4	<4
Nitrifikation: Nitrat/ Nitrit-Bildung	mg N/ kg TS	0,05	0,05	0,07		0,06		
Nitrifikation: Ammonium-Verbrauch	mg N/ kg TS	24	23,25	17,5		24,75		
TOC	mg/kg TS	4.400	4.210	6.460		2.660	2.860	6.700
DOC im S4-Eluat	mg/l	5,5	4,1	2,8		2,4	16	23
Karbonat	mg/kg TS		<10			<10		<10
Eisen	mg/kg TS	3.500	2.300	2.800		2.000	1.500	1.800
Kohlenwasserstoffindex im S4-Eluat	mg/l	0,3	<0,1	0,1		0,3	0,5	0,6
MKW > C40 im S4-Eluat	mg/l	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1
Korngrößenverteilung	mm							
Porenanteil	Vol. %							
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s							

Proben-Bez.		T-B 7/4, K1	T-B 7/4, K2	T-B 7/4, K3	T-B 7/4, K3	T-B 7/4, K4	T-B 7/4, K5	T-B 7/4, K6
Probenahme		14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004	14.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00 - 3,00 m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		08014	08015	08016	08016/Doppel	08017	08018	08019
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	100	<100
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	110	440	440	910	2.100	5.300
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	510	2.900	2.900	2.900	6.200	22.000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	360	340	290	340	630
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	620	3.700	3.700	4.100	8.700	28.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cumol	µg/kg TS	<100	180	330	330	380	850	1900
Mesitylen	µg/kg TS	330	3.000	8.300	8.100	4.200	5.400	10.000
Pseudocumol	µg/kg TS	430	5.100	18.000	18.000	11.000	15.000	28.000
Hemellitol	µg/kg TS	150	2.500	9.700	9.700	5.200	7.100	13.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	910	11.000	36.000	36.000	21.000	28.000	53.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	3.700	7.300	9.500	10.000	3.800	11.000	11.000
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	93,3	95,9	94,2		94,5	94,3	90,5

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		T-B 8/3, K1	T-B 8/3, K2	T-B 8/3, K3	T-B 8/3, K3	T-B 8/3, K4	T-B 8/3, K5	T-B 8/3, K6
Probenahme		11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004
Entnahmetiefe		0,00-1,00 m	1,00-2,00 m	2,00-3,00 m	2,00-3,00 m	3,00-4,00 m	4,00-5,00 m	5,00-6,00 m
Labor-Nummer		07896	07897	07898	07898/Doppel	07899	07900	07901
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	640	440
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	550	530	2.500	16.000	8.800
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	3.400	3.300	8.500	65.000	39.000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	280	290	220	9900	6900
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	4.200	4.100	11.000	92.000	55.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	430	330
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	150	130	740	4100	2400
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	5.300	4.900	5.600	21.000	12.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	17.000	16.000	19.000	59.000	33.000
Hemellitil	µg/kg TS	<100	<100	10.000	10.000	9.500	27.000	15.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	32.000	31.000	35.000	110.000	63.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	460	260	7.500	7.400	5.500	13.000	10.000
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	90,4	94,1	94,3		95,7	92,5	86,3

Proben-Bez.		T-B 8/4, K1	T-B 8/4, K2	T-B 8/4, K3	T-B 8/4, K3	T-B 8/4, K4	T-B 8/4, K5	T-B 8/4, K6
Probenahme		11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004	11.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00-3,00m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07902	07903	07904	07904/Doppel	07905	07906	07907
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	200
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	390	380	2.100	5.500	8.900
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	1.200	1.200	6.200	17.000	38.000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	100	110	220	830	2.400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	1.700	1.700	8.500	23.000	50.000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	170
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	170	150	720	1300	2700
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	2.900	2.600	4.900	6.900	13.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	7.800	7.100	15.000	21.000	32.000
Hemellitil	µg/kg TS	<100	<100	4.500	4.300	7.100	9.600	14.000
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	15.000	14.000	28.000	39.000	62.000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	220	220	5.500	5.600	4.800	6.800	8.300
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	92,3	96,6	94,9		93,6	94,7	85,2

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		V-K 9/3, K1	V-K 9/3, K2	V-K 9/3, K3	V-K 9/3, K3	V-K 9/3, K4	V-K 9/3, K5	V-K 9/3, K6
Probenahme		13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00-3,00m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07987	07988	07989	07989/Doppel	07990	07991	07907
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	130
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	3500	6800
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	18000	30000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	2000	6400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	24000	43000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	230
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	1900	2300
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	10.000	10.000
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	24.000	23.000
Hemellitol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	10000	9200
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	46000	45000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	3.100	3.000
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	91,6	96,6	96,6		98,1	92,5	84,5
Benzoessäure	mg/kg TS	<0,4	<0,4	<0,4		<0,4	<0,4	<0,4
pH-Wert	-	6,9	6,6	6,3		6,2	5,6	5,7
Gesamt-Stickstoff	mg/kg TS	420	< 50	<100		<100	<100	<100
Verf. Ammonium-Stickstoff	mg/kg TS	<2	<2	<2		<2	<2	<2
Verf. Nitrat-Stickstoff	mg/kg TS	<2	<2	<2		<2	<2	<2
Verf. Phosphat-P	mg/kg TS	52	9,2	<8		<8	<8	<8
Bodenatmung	mgCO <sub>2</sub> /24h kg TS	77	21	29		19	20	20
Dehydrogenase	µg TPF/16h g TS	<4	<4	<4		<4	<4	<4
Nitrifikation: Nitrat/ Nitrit-Bildung	mg N/ kg TS	0,05	0,03	1,25		0,00		
Nitrifikation: Ammonium-Verbrauch	mg N/ kg TS	26,0	25,5	32,0		32,0		
TOC	mg/kg TS	4.770	320	240		180	1.920	2.990
DOC im S4-Eluat	mg/l	17	1,6	1,5		8,9	21,0	23,0
Karbonat	mg/kg TS		<10			<10		<10
Eisen	mg/kg TS	3.300	3.100	2.500		1.300	1.400	2.000
Kohlenwasserstoffindex im S4-Eluat	mg/l	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	0,5	0,1
MKW > C40	mg/l	<0,1	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1

Proben-Bez.		V-K 9/4, K1	V-K 9/4, K2	V-K 9/4, K3	V-K 9/4, K3	V-K 9/4, K4	V-K 9/4, K5	V-K 9/4, K6
Probenahme		13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004	13.10.2004
Entnahmetiefe		0,00 - 1,00 m	1,00 - 2,00 m	2,00 - 3,00 m	2,00-3,00m	3,00 - 4,00 m	4,00 - 5,00 m	5,00 - 6,00 m
Labor-Nummer		07993	07994	07995	07995/Doppel	07996	07997	07998
Benzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Toluol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	110
Ethylbenzol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	4400	8000
m/p-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	23000	36000
o-Xylole	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	2000	7400
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	29000	52000
Styrol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	260
Cumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	2800	2600
Mesitylen	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	15.000	9.400
Pseudocumol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	33.000	20.000
Hemellitol	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	14000	8900
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	65000	41000
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	4.300	8.300
MKW > C40	mg/kg TS	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Trockensubstanz	%	93,2	97,1	96,7		95,4	93	82,4
Korngrößenverteilung	mm							
Porenanteil	Vol. %							
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s							

## Anhang 2.1: Analysendaten TL Schäferhof-Süd

alphacon, 17.11.04

### Endbeprobung

Proben-Bez.		Beprobung Vuk-B10/3 und Vuk-B10/4 ausgefallen						
Probenahme								
Entnahmetiefe								
Labor-Nummer								
Benzol	µg/kg TS							
Toluol	µg/kg TS							
Ethylbenzol	µg/kg TS							
m/p-Xylole	µg/kg TS							
o-Xylole	µg/kg TS							
Summe nachgew.BTEX	µg/kg TS							
Styrol	µg/kg TS							
Cumol	µg/kg TS							
Mesitylen	µg/kg TS							
Pseudocumol	µg/kg TS							
Hemellitol	µg/kg TS							
Summe nachgew.Aromaten	µg/kg TS							
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg TS							
MKW > C40	mg/kg TS							
Kohlenwasserstoffe	mg/kg TS							
Trockensubstanz	%							
pH-Wert	-							
Gesamt-Stickstoff	mg/kg TS							
Verf.Ammonium-Stickstoff	mg/kg TS							
Verf. Nitrat-Stickstoff	mg/kg TS							
Verf. Phosphat-P	mg/kg TS							
Bodenatmung, pot. mgCO <sub>2</sub> /24h kg TS								
Dehydrogenase µg TPF/16h g TS								
Nitrifikation: Nitrat/ Nitrit-Bildung	mg N/ kg TS							
Nitrifikation: Ammonium-Verbrauch	mg N/ kg TS							
TOC	mg/kg TS							
DOC im S4-Eluat	mg/l							





## Anhang 2.2: Analyseergebnisse der BTEX-Testsondierung (T-B11) am TL Schäferhof-Süd

Proben-Bez.		K 3, IV 1	K 3, IV 2	K 3, IV 3	K 3, IV 4	K 3, IV 5	K 3, IV 6	K 3, IV 7	K 3, IV 8	K 3, IV 9	K 3, IV 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe		IV 1	IV 2	IV 3	IV 4	IV 5	IV 6	IV 7	IV 8	IV 9	IV 10			
Labor-Nummer		DY 090	DY 091	DY 092	DY 093	DY 094	DY 095	DY 096	DY 097	DY 098	DY 099	IV 1-10	IV 1-10	IV 1-10
Benzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Toluol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Ethylbenzol	µg/kg OS	1.200	1.200	1.300	990	1.200	1.300	1.100	2.100	1.300	1.200	1.289	285	22
m/p-Xylole	µg/kg OS	3.300	3.300	3.500	2.700	3.400	3.600	3.400	5.600	3.700	3.600	3.610	713	20
o-Xylole	µg/kg OS	1.900	1.700	1.600	1.300	1.600	1.800	1.800	1.900	1.900	1.800	1.730	179	10
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>6.400</b>	<b>6.200</b>	<b>6.400</b>	<b>5.000</b>	<b>6.200</b>	<b>6.700</b>	<b>6.300</b>	<b>9.600</b>	<b>6.900</b>	<b>6.600</b>	<b>6.630</b>	<b>1.102</b>	<b>17</b>
Styrol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Cumol	µg/kg OS	450	470	500	390	470	520	440	790	520	450	500	104	21
Mesitylen	µg/kg OS	6.000	6.400	6.100	4.900	6.200	6.900	6.300	8.900	6.600	6.500	6.480	951	15
Pseudocumol	µg/kg OS	16.000	17.000	17.000	13.000	17.000	18.000	17.000	24.000	18.000	17.000	17.400	2.577	15
Hemellitil	µg/kg OS	6.300	6.900	6.600	5.300	6.600	7.300	6.600	9.200	6.900	6.800	6.850	929	14
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>29.000</b>	<b>31.000</b>	<b>30.000</b>	<b>24.000</b>	<b>30.000</b>	<b>33.000</b>	<b>30.000</b>	<b>43.000</b>	<b>32.000</b>	<b>31.000</b>	<b>31.300</b>	<b>4.518</b>	<b>14</b>
Proben-Bez.		K 3, E 1	K 3, E 2	K 3, E 3	K 3, E 4	K 3, E 5	K 3, E 6	K 3, E 7	K 3, E 8	K 3, E 9	K 3, E 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe		3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0			
Labor-Nummer		DY 100	DY 101	DY 102	DY 103	DY 104	DY 105	DY 106	DY 107	DY 108	DY 109			
Benzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Toluol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	120	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	120		
Ethylbenzol	µg/kg OS	300	890	1.600	2.300	890	1.200	1.200	870	1500	600	1.135	537	47
m/p-Xylole	µg/kg OS	580	1.900	4.200	6.800	2.600	3.800	4.400	3.000	3.600	1.900	3.278	1.628	50
o-Xylole	µg/kg OS	460	1.500	2.500	3.700	1.300	1.800	2.000	1000	480	940	1.568	941	60
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>1.300</b>	<b>4.300</b>	<b>8.300</b>	<b>13.000</b>	<b>4.800</b>	<b>6.800</b>	<b>7.600</b>	<b>4.900</b>	<b>5.600</b>	<b>3.400</b>	<b>6.000</b>	<b>3.034</b>	<b>51</b>
Styrol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	120	< 100	< 100	< 100	< 100	210	< 100	165	45	27
Cumol	µg/kg OS	< 100	340	610	760	310	420	450	340	600	230	451	162	36
Mesitylen	µg/kg OS	1.100	4.500	7.500	10.000	4.400	5.900	7.200	4.900	5.000	3.100	5.360	2.346	44
Pseudocumol	µg/kg OS	2.700	13.000	20.000	28.000	12.000	16.000	20.000	13.000	13.000	8.200	14.590	6.609	45
Hemellitil	µg/kg OS	1.100	4.900	8.000	11.000	4.600	6.200	7.900	5.200	5.200	3.300	5.740	2.602	45
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>4.900</b>	<b>23.000</b>	<b>36.000</b>	<b>50.000</b>	<b>21.000</b>	<b>29.000</b>	<b>36.000</b>	<b>23.000</b>	<b>24.000</b>	<b>15.000</b>	<b>26.190</b>	<b>11.823</b>	<b>45</b>

## Anhang 2.2: Analyseergebnisse der BTEX-Testsondierung (T-B11) am TL Schäferhof-Süd

Proben-Bez.		K 4, IV 1	K 4, IV 2	K 4, IV 3	K 4, IV 4	K 4, IV 5	K 4, IV 6	K 4, IV 7	K 4, IV 8	K 4, IV 9	K 4, IV 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe			IV 1	IV 2	IV 3	IV 4	IV 5	IV 6	IV 7	IV 8	IV 9			
Labor-Nummer		DY 110	DY 111	DY 112	DY 113	DY 114	DY 115	DY 116	DY 117	DY 118	DY 119			
Benzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Toluol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Ethylbenzol	µg/kg OS	1.700	1.500	1.500	1.500	1.500	1.600	1.500	1.500	1.600	1.700	1.560	80	5
m/p-Xylole	µg/kg OS	3.900	3.300	3.400	3.600	3.500	3.700	3.500	3.700	3.700	4.100	3.640	224	6
o-Xylole	µg/kg OS	300	240	310	300	300	440	430	450	430	460	366	79	21
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>5.900</b>	<b>5.000</b>	<b>5.200</b>	<b>5.400</b>	<b>5.300</b>	<b>5.700</b>	<b>5.400</b>	<b>5.700</b>	<b>5.700</b>	<b>6.300</b>	<b>5.560</b>	<b>358</b>	<b>6</b>
Styrol	µg/kg OS	220	190	200	200	200	210	200	210	210	230	207	11	5
Cumol	µg/kg OS	670	570	590	600	600	620	600	610	620	690	617	35	6
Mesitylen	µg/kg OS	5.100	4.300	4.600	4.800	4.700	5.200	4.900	5.100	5.300	5.800	4.980	397	8
Pseudocumol	µg/kg OS	13.000	11.000	12.000	13.000	13.000	14.000	13.000	14.000	14.000	15.000	13.200	1.077	8
Hemellitil	µg/kg OS	5.300	4.500	5.000	5.200	5.100	5.700	5.400	5.600	5.800	6.300	5.390	470	9
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>24.000</b>	<b>21.000</b>	<b>22.000</b>	<b>24.000</b>	<b>24.000</b>	<b>26.000</b>	<b>24.000</b>	<b>26.000</b>	<b>26.000</b>	<b>28.000</b>	<b>24.500</b>	<b>1.962</b>	<b>8</b>
Proben-Bez.		K 4, E 1	K 4, E 2	K 4, E 3	K 4, E 4	K 4, E 5	K 4, E 6	K 4, E 7	K 4, E 8	K 4, E 9	K 4, E 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe		4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0			
Labor-Nummer		DY 120	DY 121	DY 122	DY 123	DY 124	DY 125	DY 126	DY 127	DY 128	DY 129			
Benzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Toluol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Ethylbenzol	µg/kg OS	1.100	1.100	1.800	3.700	1.500	1.300	610	930	2.100	1.600	1.574	820	52
m/p-Xylole	µg/kg OS	2.700	2.600	4.300	8.800	3.500	3.000	1.400	2.100	4.700	3.500	3.660	1.949	53
o-Xylole	µg/kg OS	1.200	1.200	790	590	210	180	< 100	110	210	140	514	425	83
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>5.000</b>	<b>4.900</b>	<b>6.900</b>	<b>13.000</b>	<b>5.200</b>	<b>4.500</b>	<b>2.000</b>	<b>3.100</b>	<b>7.000</b>	<b>5.200</b>	<b>5.680</b>	<b>2.827</b>	<b>50</b>
Styrol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	500	200	170	< 100	120	270	200	243	123	51
Cumol	µg/kg OS	450	400	630	1.400	580	510	240	340	750	580	588	305	52
Mesitylen	µg/kg OS	5.100	4.900	5.700	11.000	4.100	3.900	1.700	2.400	5.500	4.200	4.850	2.384	49
Pseudocumol	µg/kg OS	14.000	13.000	15.000	28.000	11.000	10.000	4.600	6.400	14.000	11.000	12.700	6.010	47
Hemellitil	µg/kg OS	5.600	5.300	5.900	11.000	4.200	4.200	1.900	2.600	5.800	4.500	5.100	2.339	46
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>25.000</b>	<b>24.000</b>	<b>27.000</b>	<b>52.000</b>	<b>20.000</b>	<b>19.000</b>	<b>8.400</b>	<b>12.000</b>	<b>26.000</b>	<b>20.000</b>	<b>23.340</b>	<b>11.127</b>	<b>48</b>
Proben-Bez.		K 4, MP 1	K 4, MP 2	K 4, MP 3	K 4, MP 4	K 4, MP 5	K 4, MP 6	K 4, MP 7	K 4, MP 8	K 4, MP 9	K 4, MP 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe		MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10			
Labor-Nummer		DY 150	DY 151	DY 152	DY 153	DY 154	DY 155	DY 156	DY 157	DY 158	DY 159			
Benzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Toluol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Ethylbenzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
m/p-Xylole	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	120	< 100	120	0	0
o-Xylole	µg/kg OS	160	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	160	0	0
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>160</b>								<b>120</b>		<b>140</b>	<b>20</b>	<b>14</b>
Styrol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Cumol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Mesitylen	µg/kg OS	840	720	790	740	790	950	800	850	910	770	816	69	8
Pseudocumol	µg/kg OS	2.600	2.100	2.400	2.200	2.400	2.900	2.500	2.600	2.800	2.400	2.490	234	9
Hemellitil	µg/kg OS	1.300	1.200	1.200	1.200	1.200	1.500	1.300	1.400	1.400	1.300	1.300	100	8
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>4.700</b>	<b>4.000</b>	<b>4.400</b>	<b>4.100</b>	<b>4.400</b>	<b>5.400</b>	<b>4.600</b>	<b>4.900</b>	<b>5.100</b>	<b>4.500</b>	<b>4.610</b>	<b>411</b>	<b>9</b>

## Anhang 2.2: Analyseergebnisse der BTEX-Testsondierung (T-B11) am TL Schäferhof-Süd

Proben-Bez.		K 6, IV 1	K 6, IV 2	K 6, IV 3	K 6, IV 4	K 6, IV 5	K 6, IV 6	K 6, IV 7	K 6, IV 8	K 6, IV 9	K 6, IV 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
		IV 1	IV 2	IV 3	IV 4	IV 5	IV 6	IV 7	IV 8	IV 9	IV 10			
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe														
Labor-Nummer		DY 130	DY 131	DY 132	DY 133	DY 134	DY 135	DY 136	DY 137	DY 138	DY 139			
Benzol	µg/kg OS	120	< 100	< 100	< 100	120	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	120	0	0
Toluol	µg/kg OS	240	150	160	170	290	160	120	130	140	120	168	52	31
Ethylbenzol	µg/kg OS	15.000	10.000	11.000	11.000	15.000	10.000	7.600	8.800	9.300	7.400	10.510	2.527	24
m/p-Xylole	µg/kg OS	33.000	23.000	25.000	27.000	36.000	24.000	18.000	21.000	22.000	17.000	24.600	5.748	23
o-Xylole	µg/kg OS	1.800	1.300	1.300	1.400	1.600	1.300	970	1.200	1.200	940	1.301	247	19
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>50.000</b>	<b>34.000</b>	<b>37.000</b>	<b>40.000</b>	<b>53.000</b>	<b>35.000</b>	<b>27.000</b>	<b>31.000</b>	<b>33.000</b>	<b>25.000</b>	<b>36.500</b>	<b>8.605</b>	<b>24</b>
Styrol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100		
Cumol	µg/kg OS	5.000	3.400	3.700	3.900	5.300	3.600	2.700	3.000	3.200	2.600	3.640	855	23
Mesitylen	µg/kg OS	29.000	20.000	24.000	24.000	33.000	22.000	16.000	18.000	19.000	15.000	22.000	5.404	25
Pseudocumol	µg/kg OS	73.000	51.000	62.000	62.000	84.000	57.000	44.000	47.000	50.000	40.000	57.000	12.954	23
Hemellitil	µg/kg OS	31.000	21.000	26.000	25.000	34.000	23.000	18.000	19.000	20.000	16.000	23.300	5.478	24
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>140.000</b>	<b>95.000</b>	<b>120.000</b>	<b>110.000</b>	<b>160.000</b>	<b>110.000</b>	<b>81.000</b>	<b>87.000</b>	<b>92.000</b>	<b>74.000</b>	<b>106.900</b>	<b>25.727</b>	<b>24</b>

Proben-Bez.		K 6, E 1	K 6, E 2	K 6, E 3	K 6, E 4	K 6, E 5	K 6, E 6	K 6, E 7	K 6, E 8	K 6, E 9	K 6, E 10	Mittelwert	StabWN	StabWN %
Probenahme		13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002	13.06.2002			
Entnahmetiefe		5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0			
Labor-Nummer		DY 140	DY 141	DY 142	DY 143	DY 144	DY 145	DY 146	DY 147	DY 148	DY 149			
Benzol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	< 100	180	150	150	< 100	< 100	< 100	160	14	9
Toluol	µg/kg OS	< 100	< 100	< 100	170	310	230	190	< 100	< 100	< 100	225	54	24
Ethylbenzol	µg/kg OS	770	760	1.200	11.000	20.000	15.000	14.000	4900	< 100	< 100	8.454	7.044	83
m/p-Xylole	µg/kg OS	1.600	1.600	2.500	25.000	44.000	35.000	32.000	11.000	240	150	15.309	16.121	105
o-Xylole	µg/kg OS	< 100	< 100	130	1.400	2.200	1.800	2.000	780	< 100	< 100	1.385	725	52
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>2.400</b>	<b>2.400</b>	<b>3.800</b>	<b>38.000</b>	<b>67.000</b>	<b>52.000</b>	<b>48.000</b>	<b>17.000</b>	<b>240</b>	<b>150</b>	<b>23.099</b>	<b>24.332</b>	<b>105</b>
		0,0	0,0											
Styrol	µg/kg OS	< 100	< 100	140	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	140	0	0
Cumol	µg/kg OS	310	270	410	3.700	6.900	5.100	4.500	1600	< 100	< 100	2.849	2.386	84
Mesitylen	µg/kg OS	1.800	1.600	2.300	22.000	39.000	31.000	27.000	8.900	230	130	13.396	14.110	105
Pseudocumol	µg/kg OS	4.800	4.200	6.200	57.000	96.000	79.000	68.000	23.000	620	360	33.918	35.262	104
Hemellitil	µg/kg OS	2.000	1.700	2.500	23.000	40.000	33.000	29.000	9.400	270	160	14.103	14.737	104
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/kg OS</b>	<b>8.900</b>	<b>7.800</b>	<b>12.000</b>	<b>110.000</b>	<b>180.000</b>	<b>150.000</b>	<b>130.000</b>	<b>43.000</b>	<b>1.100</b>	<b>650</b>	<b>64.345</b>	<b>66.807</b>	<b>104</b>

## Anhang 2.3

Tab. 1: Interne und externe Qualitätssicherung (QS) bei der Startbeprobung, MKW-Gehalte nach DIN ISO 16703 und ISO TR 11046.

Proben-Nr.	interne QS (U-Nord)					externe QS	Vergleich
	MKW [mg/kg]	MKW [mg/kg]	MKW-Mittel [mg/kg]	StabWN %	MKW n. ISO TR 11046 [mg/kg]		
T- B1/1 K 3	520	550	<b>535</b>	2,8		<b>260</b>	49
T- B1/2 K 3	960	880	<b>920</b>	4,3	270	<b>360</b>	39
T- B2/1 K 3	2.800	3.000	<b>2.900</b>	3,4		<b>2.700</b>	93
T- B2/2 K 3	200	190	<b>195</b>	2,6	100	<b>100</b>	51
T- B3/1 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>			<b>&lt; 50</b>	
T- B3/2 K 3	< 100	370	<b>370</b>	0,0	34	<b>&lt; 50</b>	
T- B4/1 K 3	3.900	4.300	<b>4.100</b>	4,9		<b>2.900</b>	71
T- B4/2 K 3	6.500	6.500	<b>6.500</b>	0,0	5.200	<b>4.900</b>	75
T- B5/1 K 3	6.100	5.700	<b>5.900</b>	3,4		<b>4.300</b>	73
T- B5/2 K 3	6.000	5.600	<b>5.800</b>	3,4	4.300	<b>4.800</b>	83
T- B6/1 K 3	450	1.600	<b>1.025</b>	56,1		<b>210</b>	20
T- B6/2 K 3	5.200	4.600	<b>4.900</b>	6,1	3.700	<b>4.500</b>	92
T- B7/1 K 3	8.700	8.900	<b>8.800</b>	1,1		<b>11.000</b>	125
T- B7/2 K 3	6.000	6.300	<b>6.150</b>	2,4	4.400	<b>4.500</b>	73
T- B8/1 K 3	6.500	6.000	<b>6.250</b>	4,0		<b>4.700</b>	75
T- B8/2 K 3	4.800	5.400	<b>5.100</b>	5,9	3.700	<b>3.700</b>	73
Vk-B9/1 K 3	310	380	<b>345</b>	10,1		<b>&lt; 50</b>	
Vk-B9/2 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		42	<b>&lt; 50</b>	
Vuk-B10/1 K 3	190	200	<b>195</b>	2,6		<b>&lt; 50</b>	
Vuk-B10/2 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		94	<b>&lt; 50</b>	

Tab. 2: Interne Qualitätssicherung (QS) bei der Startbeprobung, BTEX- und Alkylbenzolgehalte n. DIN 38407- F9.

Proben-Nr.	BTEX [µg/kg]	BTEX [µg/kg]	Mittel- wert [µg/kg]	StabWN %	Alkyl- benzole [µg/kg]	Alkyl- benzole [µg/kg]	Mittel- wert [µg/kg]	StabWN %
T- B1/1 K 3	1.200	1.200	<b>1.200</b>	0,0	11.000	12.000	<b>11.500</b>	4,3
T- B1/2 K 3	1.200	1.800	<b>1.500</b>	20,0	15.000	17.000	<b>16.000</b>	6,3
T- B2/1 K 3	290	290	<b>290</b>	0,0	2.200	2.600	<b>2.400</b>	8,3
T- B2/2 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	
T- B3/1 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	
T- B3/2 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	
T- B4/1 K 3	12.000	8.700	<b>10.350</b>	15,9	28.000	21.000	<b>24.500</b>	14,3
T- B4/2 K 3	15.000	8.600	<b>11.800</b>	27,1	23.000	12.000	<b>17.500</b>	31,4
T- B5/1 K 3	26.000	36.000	<b>31.000</b>	16,1	81.000	59.000	<b>70.000</b>	15,7
T- B5/2 K 3	43.000	30.000	<b>36.500</b>	17,8	82.000	62.000	<b>72.000</b>	13,9
T- B6/1 K 3	270	200	<b>235</b>	14,9	2.300	1.600	<b>1.950</b>	17,9
T- B6/2 K 3	20.000	33.000	<b>26.500</b>	24,5	53.000	32.000	<b>42.500</b>	24,7
T- B7/1 K 3	21.000	18.000	<b>19.500</b>	7,7	54.000	46.000	<b>50.000</b>	8,0
T- B7/2 K 3	7.500	7.900	<b>7.700</b>	2,6	28.000	28.000	<b>28.000</b>	0,0
T- B8/1 K 3	10.000	9.900	<b>9.950</b>	0,5	40.000	42.000	<b>41.000</b>	2,4
T- B8/2 K 3	2.700	4.400	<b>3.550</b>	23,9	11.000	16.000	<b>13.500</b>	18,5
Vk-B9/1 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	
Vk-B9/2 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	
Vuk-B10/1 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	
Vuk-B10/2 K 3	< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>		< 100	< 100	<b>&lt; 100</b>	

**Tab. 3: Interne Qualitätssicherung (QS) bei der Abschlussbeprobung, MKW-Gehalte nach DIN ISO 16703.**

Proben-Nr.		MKW [mg/kg]	MKW [mg/kg]	MKW-Mittel [mg/kg]	StabWN %
T- B1/3	K 3	430	430	<b>430</b>	<b>0,0</b>
T- B1/4	K 3	<100	<100	<100	
T- B2/3	K 3	4.700	4.900	<b>4.800</b>	<b>2,1</b>
T- B2/4	K 3	560	510	<b>535</b>	<b>4,7</b>
T- B3/3	K 3	<100	<100	< 100	
T- B3/4	K 3	<100	<100	< 100	
T- B4/3	K 3	3.800	3.700	<b>3.750</b>	<b>1,3</b>
T- B4/4	K 3	5.500	5.600	<b>5.550</b>	<b>0,9</b>
T- B5/3	K 3	5.700	5.500	<b>5.600</b>	<b>1,8</b>
T- B5/4	K 3	6.700	6.400	<b>6.550</b>	<b>2,3</b>
T- B6/3	K 3	1.000	1.100	<b>1.050</b>	<b>4,8</b>
T- B6/4	K 3	4.000	4.200	<b>4.100</b>	<b>2,4</b>
T- B7/3	K 3	5.700	6.100	<b>5.900</b>	<b>3,4</b>
T- B7/4	K 3	9.500	10.000	<b>9.750</b>	<b>2,6</b>
T- B8/3	K 3	7.500	7.400	<b>7.450</b>	<b>0,7</b>
T- B8/4	K 3	5.500	5.600	<b>5.550</b>	<b>0,9</b>
Vk-B9/3	K 3	<100	<100	< 100	
Vk-B9/4	K 3	<100	<100	< 100	

**Tab. 4: Interne Qualitätssicherung (QS) bei der Abschlussbeprobung, BTEX- und Alkylbenzolgehalte n. DIN 38407- F9.**

Proben-Nr.		BTEX [µg/kg]	BTEX [µg/kg]	Mittelwert [µg/kg]	StabWN %	Alkylbenzole [µg/kg]	Alkylbenzole [µg/kg]	Mittelwert [µg/kg]	StabWN %
T- B1/3	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	
T- B1/4	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	
T- B2/3	K 3	<100	<100	<100		2.200	2.200	<b>2.200</b>	0,0
T- B2/4	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	
T- B3/3	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	
T- B3/4	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	
T- B4/3	K 3	3.600	3.300	<b>3.450</b>	4,3	9.400	8.900	<b>9.150</b>	2,7
T- B4/4	K 3	2.700	2.700	<b>2.700</b>	0,0	16.000	17.000	<b>16.500</b>	3,0
T- B5/3	K 3	11.000	11.000	<b>11.000</b>	0,0	53.000	52.000	<b>52.500</b>	1,0
T- B5/4	K 3	2.100	1.900	<b>2.000</b>	5,0	11.000	11.000	<b>11.000</b>	0,0
T- B6/3	K 3	530	540	<b>535</b>	0,9	3.600	3.600	<b>3.600</b>	0,0
T- B6/4	K 3	6.900	7.100	<b>7.000</b>	1,4	31.000	32.000	<b>31.500</b>	1,6
T- B7/3	K 3	4.600	4.800	<b>4.700</b>	2,1	24.000	24.000	<b>24.000</b>	0,0
T- B7/4	K 3	3.700	3.700	<b>3.700</b>	0,0	36.000	36.000	<b>36.000</b>	0,0
T- B8/3	K 3	4.200	4.100	<b>4.150</b>	1,2	32.000	31.000	<b>31.500</b>	1,6
T- B8/4	K 3	1.700	1.700	<b>1.700</b>	0,0	15.000	14.000	<b>14.500</b>	3,4
Vk-B9/3	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	
Vk-B9/4	K 3	<100	<100	<100		<100	<100	< 100	

## Anhang 2.4

Umweltschutz Nord GmbH & Co. Analytisches Labor	Prüfungsvorschrift  Prüfanweisungen	AQS-SPV-306 Revision 1 Seite 1/6
---	---	--

### Bestimmung von Benzoessäure in Bodenproben

#### Inhaltsverzeichnis

ZIELSETZUNG .....	2
KURZBESCHREIBUNG .....	2
STÖRUNGEN .....	2
<b>1. SUBSTANZEN .....</b>	<b>2</b>
<b>2. GERÄTE UND CHEMIKALIEN.....</b>	<b>2</b>
<b>3. STANDARDLÖSUNGEN .....</b>	<b>3</b>
3.1 KALIBRIERSTANDARDS .....	3
3.2 KONTROLLSTANDARD .....	3
<b>4. PROBENVORBEREITUNG.....</b>	<b>4</b>
4.1 PROBENAUFBEREITUNG.....	4
4.2 BLINDWERTBESTIMMUNG .....	4
4.3 BESTIMMUNG DER WIEDERFINDUNG .....	4
<b>5. MESSUNG.....</b>	<b>4</b>
5.1 HPLC-PARAMETER .....	4
5.2 CHROMATOGRAMM .....	5
5.3 RETENTIONSZEITEN (TYPISCH; ABHÄNGIG VOM ZUSTAND DER HPLC - TRENNSÄULE).....	5
5.4 ERSTELLEN DER KALIBRIERFUNKTION:.....	5
5.5 MESSUNG DES KONTROLLSTANDARDS .....	5
<b>6. AUSWERTUNG UND BERECHNUNG .....</b>	<b>6</b>
6.1 BERECHNUNG DER STEIGUNG DER KALIBRIERFUNKTION .....	6
6.2 BERECHNUNG DES MULTIPLIKATORS .....	6
6.3 BERECHNUNGSFORMEL .....	6
6.4 ANGABE DES ERGEBNISSES.....	6
<b>7. REGELKARTEN .....</b>	<b>6</b>

	Erstellt	Geprüft und Freigegeben	gültig ab
Name			
Datum			



Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-306
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 2/6

### Zielsetzung

Diese Prüfungsvorschrift ist geeignet zur Bestimmung von Benzoesäure in Bodenproben.

### Kurzbeschreibung

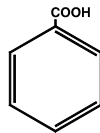
Benzoesäure wird nach Extraktion, eventueller Verdünnung/Anreicherung und Filtration direkt mittels HPLC und UV-Detektion bestimmt.

### Störungen

Substanzen die im gleichen Spektralbereich Licht absorbieren und ähnliche chromatographische Eigenschaften aufweisen, können zu Störungen in der Bestimmung führen.

## 1. Substanzen

### 1.1 Benzoesäure



Molare Masse: 122,12 g/mol  
 Summenformel: C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>  
 MAK-Wert: -

## 2. Geräte und Chemikalien

- 2.1 Acetonitril z.B. Fisher Art.Nr.: A/0630 PB17
- 2.2 Wasser z.B. Merck Art.Nr.: 1.15333.2500
- 2.3 Wasser pH 3,5
- 2.4 Benzoesäure min. 99,9 %
- 2.5 HPLC-Säule, z.B. Agilent Zorbax Eclipse 4,6 x150; 5 µm XDB C8; Art.Nr.: 993967-906
- 2.6 HPLC-Anlage mit Pumpe und UV-Detektor z.B. Milton-Roy / Agilent
- 2.7 Personal Computer mit Auswertesoftware z.B. HP-Chemstation
- 2.8 Einwegspritzenfilter 0,2 µm, z.B. M &N Nr. 718007
- 2.9 Tetrahydrofuran Uvasol, z.B. Merck
- 2.10 Laborübliche Gerätschaften

### Herstellung von 2.3: Wasser pH 3,5

1000 ml dest. Wasser (2.2) werden mit 1-molarer Schwefelsäure auf den pH von 3,5 eingestellt.

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-306
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 3/6

### 3. Standardlösungen

#### *3.1 Kalibrierstandards*

- 3.1.1 Benzoessäure-Stammlösung 10000 mg/l
- 3.1.2 Benzoessäure-Lösung 20 mg/l
- 3.1.3 Benzoessäure-Lösung 10 mg/l
- 3.1.4 Benzoessäure-Lösung 1 mg/l
- 3.1.5 Benzoessäure-Lösung 0,2 mg/l
- 3.1.6 Benzoessäure-Lösung 0,1 mg/l

#### **Herstellung von 3.1.1: Benzoessäure -Stammlösung (10000 mg/l)**

Von der Benzoessäure werden genau 1000 mg in einen 100 ml - Messkolben eingewogen und mit 50 ml Acetonitril (2.1) versetzt. Nach vollständiger Auflösung und Temperierung auf 20 °C wird bis zur Eichmarke mit Acetonitril (2.1) aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.2: Benzoessäure (20,0 mg/l)**

0,2 ml der Stammlösung (3.1) werden in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20° C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.3: Benzoessäure (10 mg/l)**

50 ml der Standardlösung (3.2) werden in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.4: Benzoessäure (1 mg/l)**

1 ml der Standardlösung (3.2) wird in einen 20 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.5: Benzoessäure (0,2 mg/l)**

1 ml der Standardlösung (3.2) wird in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.6: Benzoessäure (0,1 mg/l)**

0,5 ml der Standardlösung (3.2) wird in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### *3.2 Kontrollstandard*

- 3.2.1 Benzoessäure-Stammlösung 10000 mg/l
- 3.2.2 Benzoessäure-Kontrollstandard 20 mg/l

Die Herstellung der Kontrollstandardlösungen erfolgt analog der Herstellung der Kalibrierstandardlösungen 3.1.1 und 3.1.2. Es ist darauf zu achten, dass die für die Herstellung der Kontrollstandards eingesetzte Benzoessäure von einem anderen Hersteller als die für die Bereitung der Kalibrierstandards benutzten Benzoessäure stammt.

Die Standardlösungen (Kalibrier- und Kontrollstandards) müssen kühl und dunkel aufbewahrt werden.

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-306
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 4/6

#### 4. Probenvorbereitung

##### *4.1 Probenaufbereitung*

10 g der ungetrockneten Bodenprobe werden in ein 20 ml-Headspacevial eingewogen und mit 10 ml Tetrahydrofuran (2.9) versetzt. Das Vial wird zugedreht und für 2 Stunden im Ultraschallbad unter Kühlung auf 20°C extrahiert. Nach dem Absitzen, evtl. zentrifugieren, werden 2 ml des Extraktes mittels einer Einzelspritze entnommen und durch 0,2 µm PTFE-Spritzenfilter (2.8) in ein Autosampler-Vial filtriert und fest verschlossen. Diese Lösung wird mittels HPLC/UV analysiert.

##### *4.2 Blindwertbestimmung*

10 g Seesand werden an Stelle einer Probe bearbeitet. Die Bestimmung des Blindwertes hat arbeitstäglich zu erfolgen. Der Wert der Blindwertmessung wird in die entsprechende Blindwert-Regelkarte eingetragen.

##### *4.3 Bestimmung der Wiederfindung*

10 g eines blindwertfreien, getrockneten Bodens (falls nicht verfügbar, kann ersatzweise Seesand verwendet werden) werden mit 250 µl des Benzoesäurestandards (3.1.2) versetzt und entsprechend der Arbeitsvorschrift bearbeitet und gemessen. Hieraus ergibt sich eine Sollkonzentration von 0,5 mg/kg. Die Bestimmung der Wiederfindung erfolgt bei jeder Messserie.

#### 5. Messung

Vor Beginn der Messung hat sich der ausführende Mitarbeiter von der Funktionstauglichkeit der HPLC-Anlage zu überzeugen.

##### *5.1 HPLC-Parameter*

Säule: Chromatographiesäule z.B. Agilent Zorbax Eclipse 4,6x150 5µm XDB C8  
Art.Nr.: 993967-906  
 Laufmittel: Wasser-Acetonitril-Gradient (V/V)  
 Flußrate: 1,0 ml/min  
 Injektionsmenge: 20 µl  
 Druck: ca. 60 bar  
 Temperatur: 30 °C  
 Detektor: UV  
 Wellenlänge: 228 nm  
 Spalt: 10 nm  
 Response Time: 0,5 Sekunden

##### **Wasser-Acetonitrilgradient**

A: Wasser pH 3,0 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

B: Acetonitril

Zeit [Min]	A [%]	B [%]
0	99	1
4	98	2
8	75	25
10	0	100
12	0	100
13	99	1
16	99	1

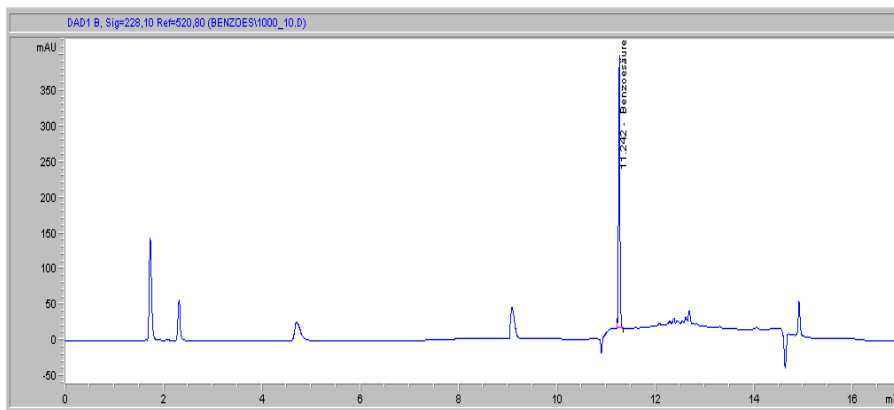
Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-306
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 5/6

### 5.2 Chromatogramm

Eine Standardlösung mit einer Konzentration von 0,1 mg/l muß noch gut auswertbare Peaks ergeben. Die Linearität muß sich über einen Bereich von 0,1 mg/l bis 20 mg/l erstrecken. Sollte dies nicht der Fall sein, muß gerätespezifisch optimiert werden. Messlösungen mit einer Konzentration > 20 mg/l müssen entsprechend mit Acetonitril (2.1) verdünnt werden.

Unter diesen Bedingungen wird folgendes Chromatogramm erhalten (die zusätzlichen Signale vor der Benzoessäure stammen von anderen Carbonsäuren, die für eine andere Analyse benötigt werden):

Standardlösung 10 mg/l



### 5.3 Retentionszeiten (typisch; abhängig vom Zustand der HPLC - Trennsäule)

Benzoessäure                    11,2 Minuten

### 5.4 Erstellen der Kalibrierfunktion:

Es wird eine Bezugsfunktion aus 5 Punkten mit den Standardlösungen nach 3.1.2 bis 3.1.6 erstellt. Die Kalibrierung ist zu erneuern, wenn die Überprüfung nach 5.5 eine unzulässig hohe Abweichung ergeben hat.

### 5.5 Messung des Kontrollstandards

Das fehlerfreie Arbeiten des Messgerätes und die Gültigkeit der Kalibrierung wird durch die Messung eines Kontrollstandards (3.2.2) überprüft. Dies hat arbeitstäglich zu erfolgen. Bei Abweichungen von mehr als  $\pm 10\%$  von der Soll - Konzentration, ist die Kalibrierung neu zu erstellen. Das Ergebnis der Kontrollstandardmessung wird in die entsprechende Kontrollstandard-Regelkarte eingetragen.

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-306
GmbH & Co.		Revision 1
Analytisches Labor	Prüfanweisungen	Seite 6/6

## 6. Auswertung und Berechnung

Die Datenaufnahme und -auswertung erfolgt mittels PC mit entsprechender Software. Die Quantifizierung erfolgt über externen Standard mit Mehrpunktkalibrierung.

### 6.1 Berechnung der Steigung der Kalibrierfunktion

$$\frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = b$$

- n: Anzahl der Messwertpaare  
y: Konzentration der Standardlösung in mg/l  
x: Fläche der jeweiligen Standardlösung  
b: Steigung der Kalibrierfunktion

### 6.2 Berechnung des Multiplikators

$$\frac{(V + (E_P * (100 - TS) / 100)) * 100}{E_P * TS} = F_M$$

- F<sub>M</sub>: Berechnungsfaktor  
V: Volumen der Extraktionsmittelmenge in ml  
E<sub>P</sub>: Eingesetzte Probenmenge in g  
TS: Trockensubstanz der Bodenprobe in %

### 6.3 Berechnungsformel

$$F_P * b * F_M = C$$

- C: Konzentration in der Bodenprobe in mg/kg TS  
F<sub>P</sub>: Fläche der Probenkomponente  
b: Steigung der Kalibrierfunktion (aus 6.1)  
F<sub>M</sub>: Berechnungsfaktor (aus 6.2)

### 6.4 Angabe des Ergebnisses

Die Massenkonzentration wird auf 0,1 mg/kg TS gerundete Werte, jedoch mit nicht mehr als 2 signifikanten Stellen angegeben.

## 7. Regelkarten

- Blindwert-Regelkarte Boden  
Wiederfindungs-Regelkarte Boden  
Kontrollstandard-Regelkarte

## Anhang 2.5: Statistische Auswertung der Schadstoffgehalte

Tab. 1: Mittelwerte und Medianwerte von MKW, BTEX und Alkylbenzolen in der ungesättigten Bodenzone (u) und im Kapillarsaum (k) bzw. in der gesättigten Bodenzone (g). Der zweite Teil der Tabelle gibt den prozentualen Anteil des jeweiligen Schadstoffes bei der Abschlussbeprobung gegenüber der Startbeprobung an.

Mittelwerte/Mediane Bohrareale							Prozentualer Anteil zu 2001		
AREAL	BZ	DATE		BTEX	AROMAT	MKW	BTEX	AROMAT	MKW
B 1	k	2001	Mittelwert	253750	182250	6850			
			N	4	4	4			
			Standardabw.	159132	99600	3027			
		Median	305000	210000	7750				
		2004	Mittelwert	201750	136750	4525	79,5	75,0	66,1
			N	4	4	4			
	Standardabw.		168144	46284	3148				
	u	2001	Median	140000	140000	3300	45,9	66,7	42,6
			Mittelwert	2588	12700	521			
			N	6	7	8			
		2004	Standardabw.	2859	11722	361			
			Median	1350	11500	410			
Mittelwert			255	2000	500	9,9	15,7	96,0	
B 2	k	2001	N	2	2	6			
			Standardabw.	35	1131	385			
			Median	255	2000	395	18,9	17,4	96,3
		2004	Mittelwert	40100	50500	4925			
			N	4	4	4			
			Standardabw.	33289	25736	2888			
	u	2001	Median	35000	46000	4800			
			Mittelwert	44000	65250	4050	109,7	129,2	82,2
			N	4	4	4			
		2004	Standardabw.	29473	12790	1418			
			Median	41500	63000	3500	118,6	137,0	72,9
			Mittelwert	215	1168	1197			
B 3	g	2004	N	2	4	8			
			Standardabw.	106	925	1337			
			Median	215	1005	690			
		2001	Mittelwert	2200	10350	1388	1023,3	886,1	116,0
			N	1	2	8			
			Standardabw.		12233	1664			
	k	2004	Median	2200	10350	478	1023,3	1029,9	69,3
			Mittelwert	4025	6800	708			
			N	4	4	4			
		2001	Standardabw.	2205	3517	231			
			Median	4050	6250	745			
			Mittelwert	91250	114000	7375			
u	2004	N	4	4	4				
		Standardabw.	17500	19253	3976				
		Median	92500	120000	7600				
	2001	Mittelwert	59500	81250	6525	65,2	71,3	88,5	
		N	4	4	4				
		Standardabw.	52577	52175	3698				
k	2004	Median	52000	76500	6250	56,2	63,8	82,2	
		Mittelwert	1643	7020	563				
		N	3	3	4				
	2001	Standardabw.	1344	5410	139				
		Median	2100	9200	605				
		Mittelwert	6250	1933	705	380,4	27,5	125,2	
B 4	k	2004	N	2	3	4			
			Standardabw.	8132	351	666			
			Median	6250	1900	405	297,6	20,7	66,9
		2001	Mittelwert	77000	94250	4575			
			N	4	4	4			
			Standardabw.	55600	55632	1634			
	u	2004	Median	75500	88000	4100			
			Mittelwert	67000	86250	6175	87,0	91,5	135,0
			N	4	4	4			
		2001	Standardabw.	50774	43439	2683			
			Median	73500	98000	5800	97,4	111,4	141,5
			Mittelwert	12181	21738	3813			
k	2004	N	8	8	8				
		Standardabw.	13345	24797	1439				
		Median	8525	14750	4000				
	2001	Mittelwert	4208	13479	3400	34,5	62,0	89,2	
		N	6	7	8				
		Standardabw.	2682	13406	1452				
u	2004	Median	3075	9150	3475	36,1	62,0	86,9	

## Anhang 2.5: Statistische Auswertung der Schadstoffgehalte

Tab. 1: Mittelwerte und Medianwerte von MKW, BTEX und Alkylbenzolen in der unges. Bodenzone (u) und im Kapillarsaum (k) bzw. in der gesättigten Bodenzone (g). (Fortsetzung)

Mittelwerte/Median Bohreal			Prozentualer Anteil zu 2001							
<b>B 5</b>	<b>g</b>	<b>2004</b>	Mittelwert	2277	4283	807				
			N	3	4	3				
			Standardabw	1686	4070	318				
		Median	2200	3550	980					
		<b>k</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	65250	100000	6900			
				N	4	4	4			
	Standardabw			40145	46368	3104				
	Median		66000	102500	6900					
	<b>2004</b>		Mittelwert	32075	58750	8100	<b>49,2</b>	<b>58,8</b>	<b>117,4</b>	
			N	4	4	4				
		Standardabw	28901	32887	4486					
		Median	28500	58000	7300	<b>43,2</b>	<b>56,6</b>	<b>105,8</b>		
<b>u</b>		<b>2001</b>	Mittelwert	20400	44388	4388				
			N	8	8	8				
	Standardabw		11861	22610	1336					
	Median	21000	46500	4300						
	<b>2004</b>	Mittelwert	4817	17929	4356	<b>23,6</b>	<b>40,4</b>	<b>99,3</b>		
		N	6	8	8					
Standardabw		4018	19807	1991						
	Median	3000	12500	5400	<b>14,3</b>	<b>26,9</b>	<b>125,6</b>			
	<b>B 6</b>	<b>k</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	68250	81000	7450			
				N	4	4	4			
Standardabw				26700	24125	1561				
Median			74500	89000	7200					
<b>2004</b>			Mittelwert	63250	84750	7475	<b>92,7</b>	<b>104,6</b>	<b>100,3</b>	
			N	4	4	4				
		Standardabw	38318	19068	3058					
		Median	57000	79500	6300	<b>76,5</b>	<b>89,3</b>	<b>87,5</b>		
		<b>u</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	8042	16481	2555			
				N	8	8	8			
Standardabw				9937	16226	2000				
Median			2350	8000	1650					
<b>2004</b>	Mittelwert		4698	18833	2664	<b>58,4</b>	<b>114,3</b>	<b>104,3</b>		
	N		6	6	7					
	Standardabw	5382	17212	1510						
	Median	3130	15400	2700	<b>133,2</b>	<b>192,5</b>	<b>163,6</b>			
	<b>B 7</b>	<b>k</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	35000	63750	6725			
				N	4	4	4			
Standardabw				17378	22969	3221				
Median			35500	66000	6800					
<b>2004</b>			Mittelwert	16400	33750	8200	<b>46,9</b>	<b>52,9</b>	<b>121,9</b>	
			N	4	4	4				
		Standardabw	11312	14796	3824					
		Median	16350	32000	9450	<b>46,1</b>	<b>48,5</b>	<b>139,0</b>		
		<b>u</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	9857	28543	5279			
				N	7	7	8			
Standardabw				8596	17278	2993				
Median			7700	26000	4650					
<b>2004</b>	Mittelwert		2950	16159	4640	<b>29,9</b>	<b>56,6</b>	<b>87,9</b>		
	N		6	7	8					
	Standardabw	2008	12712	2890						
	Median	3900	19000	3750	<b>50,6</b>	<b>73,1</b>	<b>80,6</b>			
	<b>B 8</b>	<b>k</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	62250	77250	6775			
				N	4	4	4			
Standardabw				27415	25237	1704				
Median			57000	74000	7300					
<b>2004</b>			Mittelwert	55000	68500	9525	<b>88,4</b>	<b>88,7</b>	<b>140,6</b>	
			N	4	4	4				
		Standardabw	28390	29805	2660					
		Median	52500	62500	9150	<b>92,1</b>	<b>84,5</b>	<b>125,3</b>		
		<b>u</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	4795	14966	3623			
				N	7	7	8			
Standardabw				4815	14543	1756				
Median			3550	13500	3850					
<b>2004</b>	Mittelwert		6338	27250	3058	<b>132,2</b>	<b>182,1</b>	<b>84,4</b>		
	N		4	4	8					
	Standardabw	4192	8968	3052						
	Median	6325	29750	2630	<b>178,2</b>	<b>220,4</b>	<b>68,3</b>			

## Anhang 2.5: Statistische Auswertung der Schadstoffgehalte

Tab. 1: Mittelwerte und Medianwerte von MKW, BTEX und Alkylbenzolen in der unges. Bodenzone (u) und im Kapillarsaum (k) bzw. in der gesättigten Bodenzone (g). (Fortsetzung)

Mittelwerte/Median Bohrereale			Prozentualer Anteil zu 2001							
<b>B 9</b>	<b>k</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	24875	33450	2950				
			N	4	4	4				
			Standardabw.	18048	20849	1974				
		Median	28500	38500	3450					
		<b>2004</b>	Mittelwert	37000	49250	4675	<b>148,7</b>	<b>147,2</b>	<b>158,5</b>	
			N	4	4	4				
	Standardabw.		12832	10720	2488					
	<b>Median</b>	36000	45500	3700	<b>126,3</b>	<b>118,2</b>	<b>107,2</b>			
		<b>u</b>	<b>2001</b>	Mittelwert			240			
				N			4			
	Standardabweichung					58				
	Median				235					
<b>Insgesamt</b>	<b>k</b>		<b>2001</b>	Mittelwert	79747	88494	6058			
				N	36	36	36			
		Standardabw.		84718	57230	2788				
	Median	53500	76500	6400						
	<b>2004</b>	Mittelwert	63997	73833	6583	<b>80,3</b>	<b>83,4</b>	<b>108,7</b>		
		N	36	36	36					
Standardabw.		77026	40020	3320						
<b>Median</b>	44500	66500	6100	<b>83,2</b>	<b>86,9</b>	<b>95,3</b>				
	<b>u</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	9152	20770	2722				
			N	49	52	64				
Standardabw.			10576	20535	2337					
Median		4200	12750	2700						
<b>2004</b>		Mittelwert	4260	15472	2793	<b>46,5</b>	<b>74,5</b>	<b>102,6</b>		
		N	33	39	57					
	Standardabw.	3854	14810	2378						
<b>Median</b>	3450	11000	2300	<b>82,1</b>	<b>86,3</b>	<b>85,2</b>				
	<b>Insgesamt</b>	<b>2001</b>	Mittelwert	39051	48475	3923				
			N	85	88	100				
Standardabw.			65465	51830	2969					
Median		18000	34500	3700						
<b>2004</b>		Mittelwert	32466	39828	4015	<b>83,1</b>	<b>82,2</b>	<b>102,3</b>		
		N	76	83	100					
	Standardabw.	60681	41122	3333						
<b>Median</b>	8650	28000	3450	<b>48,1</b>	<b>81,2</b>	<b>93,2</b>				



Anhang 3.1: Übersichtstabelle der Analysenergebnisse aus dem Bodenluft-Monitoring

Parameter	Testfeld																			
	31.1.02	12.3.02	3.6.02	11.9.02	6.12.02	22.5.03	3.6.03	19.6.03	3.7.03	16.7.03	30.7.03	12.8.03	27.8.03	4.9.03	22.9.03	6.10.03	3.12.03	18.3.04	9.6.04	1.9.04
Sauerstoff [Vol. %]	9,0	0,2	1,0	0,4	3,9	0,0	0,0	0,0	1,1	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3
CO <sub>2</sub> [Vol. %]	6,2	13,0	15,2	13,8	7,8	12,0	17,6	15,5	17,8	18,2	18,8	18,4	18,4	18,1	17,5	17,1	16,7	15,2	17,5	17,9
CO <sub>2</sub> [mg/ml]	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
CO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	12.256	25.698	30.047	27.280	15.419	23.722	34.792	30.640	35.187	35.978	37.164	36.373	36.373	35.780	34.594	33.803	33.013	30.047	34.594	35.385
C (aus CO <sub>2</sub> ) [mg/m <sup>3</sup> ]	3.345	7.013	8.200	7.445	4.208	6.474	9.495	8.362	9.603	9.819	10.143	9.927	9.927	9.765	9.441	9.225	9.010	8.200	9.441	9.657
C gesamt [mg/m <sup>3</sup> ]	4.500	7.700	13.000	14.000	4.300	n.b.	10.000	8.500	9.000	9.700	9.700	10.300	10.600	10.000	11.100	9.000	8.100	5.500	8.050	8.700
Methan [Vol. %]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,2	0,2	< 0,1	0,2	0,2	0,3	n.b.	0,3	0,3	n.b.	n.b.	0,2	0,2
Butan [mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Pentan [mg/m <sup>3</sup> ]	66	54	28	28	13	7,6	9,6	8	7,8	8,1	8,1	7,5	6,6	6,3	14	8,1	29	42	21	15
Hexan [mg/m <sup>3</sup> ]	340	330	130	330	100	120	170	190	160	180	160	160	140	140	170	110	130	170	110	110
Heptan [mg/m <sup>3</sup> ]	450	400	220	570	120	210	380	460	390	450	360	380	360	380	360	260	170	210	180	240
Octan [mg/m <sup>3</sup> ]	62	43	26	80	8	33	81	92	88	96	73	86	88	98	82	54	25	31	35	64
Nonan [mg/m <sup>3</sup> ]	22	< 1	< 1	7	< 1	6,2	16	19	22	21	16	20	31	39	23	14	5	5	9	22
Decan [mg/m <sup>3</sup> ]	6	1,4	< 1	5,0	< 1	3,5	9,0	9,2	< 1	9,9	9,3	12	24	19	20	5,3	1,3	2	3	20
Summe n-Alkane [mg/m <sup>3</sup> ]	950	830	400	1.000	240	380	670	780	670	770	630	670	650	680	670	450	360	460	360	470
Benzol [mg/m <sup>3</sup> ]	8,9	1,1	0,3	1,7	1,1	0,6	2,9	1,8	1,0	1,3	0,9	0,9	0,9	0,7	1,1	0,6	0,4	0,4	0,3	0,4
Toluol [mg/m <sup>3</sup> ]	8,0	1,2	0,4	2,0	1,5	1,1	5,7	5,2	2,0	3,2	1,6	1,9	2,3	1,7	3,0	1,5	0,9	0,9	1,0	1,4
Ethylbenzol [mg/m <sup>3</sup> ]	89	3,1	3,5	21,0	4,5	6,3	64,0	67,0	18,0	39	19	25	19	17	38	13	8,2	6	8	14
m/p-Xylol [mg/m <sup>3</sup> ]	20	35,0	0,7	74,0	22,0	1,3	260,0	270,0	68,0	160	74	100	77	66	150	51	32,0	22	29	55
o-Xylol [mg/m <sup>3</sup> ]	170	1,7	13,0	73,0	0,8	24,0	14,0	22,0	3,5	8,3	5,3	5,3	3,9	3,4	6,0	2,9	1,6	1	1	3
BTEX [mg/m <sup>3</sup> ]	300	42	18	170	30	33	350	370	93	210	100	130	100	89	200	69	43	30	39	74
Styrol [mg/m <sup>3</sup> ]	0,7	< 0,1	< 0,1	2,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,5	0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cumol [mg/m <sup>3</sup> ]	9,4	0,3	0,4	2,4	0,3	0,7	7,5	8,3	2,0	5,0	2,3	3,4	2,2	1,9	4,6	1,4	1,0	0,6	0,9	1,6
Mesitylen [mg/m <sup>3</sup> ]	29	3,8	1,2	7,0	1,3	2,4	29,0	37,0	5,3	20	6,7	13	7,2	6,2	18	3,9	3,0	1	2	5
Pseudocumol [mg/m <sup>3</sup> ]	50	5,7	2,0	13,0	1,6	3,6	48,0	65,0	7,7	35	10	23	12	10	33	6,4	5,2	2	3	8
Hemellitol [mg/m <sup>3</sup> ]	15	2,3	0,6	4,2	0,6	1,3	16,0	22,0	2,3	12	3,0	7,7	3,8	3,0	11	1,9	1,7	1	1	3
Alkylbenzole [mg/m <sup>3</sup> ]	100	12	4,2	29	4	8	100	130	17	72	22	47	25	21	67	14	11	4	6	17
GC-Screening Kettenlänge																				
n-alkane C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5-10	5-10	5-10	5-9	5-10	5-10	6-7	5-10	n.b.	n.b.	n.b.	5-10	n.b.	n.b.	n.b.
iso-alkane C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5-7	4-8	5-8	4-7	5-7	5-7	5-8	5-8	n.b.	n.b.	n.b.	4-7	n.b.	n.b.	n.b.
BTEX	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	-	vorh.	vorh.	vorh.	X	X	X	EX	n.b.	n.b.	n.b.	EX	n.b.	n.b.	n.b.
cycl. KW's	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	versch.	versch.	versch.	versch.	versch.	versch.	versch.	versch.	n.b.	n.b.	n.b.	5-6	n.b.	n.b.	n.b.

Anhang 3.1: Fortsetzung

Parameter	kontaminiertes Vergleichsareal																			
	31.1.02	12.3.02	3.6.02	11.9.02	6.12.02	22.5.03	3.6.03	19.6.03	3.7.03	16.7.03	30.7.03	12.8.03	27.8.03	4.9.03	22.9.03	6.10.03	3.12.03	18.3.04	9.6.04	1.9.04
Sauerstoff [Vol. %]	5,7	5,8	1,7	0,2	0,5	3,9	3,0	2,9	3,6	2,8	2,4	5,0	5,4	5,2	2,8	5,8	4,6	6,0	6,1	6,5
CO <sub>2</sub> [Vol. %]	6,6	10,4	14,8	13,8	16,5	10,4	14,5	13,5	14,5	15,3	16,0	16,1	13,5	14,0	15,1	13,5	12,8	12,0	12,2	11,9
CO <sub>2</sub> [mg/ml]	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
CO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	13.047	20.559	29.257	27.280	32.617	20.559	28.664	26.687	28.664	30.245	31.629	31.826	26.687	27.675	29.850	26.687	25.303	23.722	24.117	23.524
C (aus CO <sub>2</sub> ) [mg/m <sup>3</sup> ]	3.561	5.611	7.985	7.445	8.902	5.611	7.823	7.283	7.823	8.254	8.632	8.686	7.283	7.553	8.146	7.283	6.906	6.474	6.582	6.420
C gesamt [mg/m <sup>3</sup> ]	750	790	1.300	1.500	92	n.b.	720	45	35	23	43	19	34	29	132	16	8	3	7	3
Methan [Vol. %]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	n.b.	< 0,1	< 0,1	n.b.	n.b.	< 0,1	< 0,1
Butan [mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Pentan [mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Hexan [mg/m <sup>3</sup> ]	1,0	4	< 1	< 1	< 1	4,9	< 1	6,2	< 1	< 1	< 1	1,7	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	5
Heptan [mg/m <sup>3</sup> ]	1,7	11	< 1	7,1	< 1	8,4	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Octan [mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	2	< 1	2,4	< 1	1,7	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Nonan [mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Decan [mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Summe n-Alkane [mg/m <sup>3</sup> ]	2,7	18	< 1	9,5	< 1	15	< 1	6,2	< 1	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	5
Benzol [mg/m <sup>3</sup> ]	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Toluol [mg/m <sup>3</sup> ]	0,7	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,7	0,1
Ethylbenzol [mg/m <sup>3</sup> ]	3,3	0,1	< 0,1	1,1	< 0,1	0,6	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
m/p-Xylol [mg/m <sup>3</sup> ]	1,2	1,1	< 0,1	3,7	< 0,1	0,3	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,2	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	0,7	< 0,1
o-Xylol [mg/m <sup>3</sup> ]	6,7	< 0,1	< 0,1	3,7	< 0,1	2,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1
BTEX [mg/m <sup>3</sup> ]	12	1,2	< 0,1	8,6	< 0,1	3,8	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	0,2	< 0,1	0,2	< 0,1	0,1	2	0,1
Styrol [mg/m <sup>3</sup> ]	0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cumol [mg/m <sup>3</sup> ]	0,5	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mesitylen [mg/m <sup>3</sup> ]	2,1	< 0,1	< 0,1	0,7	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Pseudocumol [mg/m <sup>3</sup> ]	4,4	0,1	< 0,1	0,8	< 0,1	0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
Hemellitol [mg/m <sup>3</sup> ]	1,5	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Alkylbenzole [mg/m <sup>3</sup> ]	8,9	0,1	< 0,1	1,9	< 0,1	1,0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
GC-Screening Kettenlänge																				
n-alkane C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5-10	-	6	-	-	-	6	6-7	n.b.	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	n.b.
iso-alkane C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5-7	-	5	-	-	-	-	-	n.b.	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	n.b.
BTEX	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	-	-	-	-	-	-	-	-	n.b.	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	n.b.
cycl. KW's	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	versch.	-	-	-	-	-	C6	-	n.b.	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	n.b.

Anhang 3.1: Fortsetzung

Parameter		unkontaminiertes Vergleichsareal																			
		31.1.02	12.3.02	3.6.02	11.9.02	6.12.02	22.5.03	3.6.03	19.6.03	3.7.03	16.7.03	30.7.03	12.8.03	27.8.03	4.9.03	22.9.03	6.10.03	3.12.03	18.3.04	9.6.04	1.9.04
Sauerstoff	[Vol. %]	15,9	16,1	17,7	16,5	16,0	18,4	17,9	17,1	17,0	17,1	15,8	15,4	15,7	15,8	15,7	15,6	12,8	16,4	16,9	16,7
CO <sub>2</sub>	[Vol. %]	3,9	4,4	2,3	4,0	4,3	2,4	2,7	3,4	3,3	4,1	5,2	6,2	4,5	5,3	4,9	5,0	5,7	4,4	4,2	4,3
CO <sub>2</sub>	[mg/ml]	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
CO <sub>2</sub>	[mg/m <sup>3</sup> ]	7.611	8.599	4.626	7.907	8.500	4.744	5.337	6.721	6.523	8.105	10.279	12.256	8.896	10.477	9.686	9.884	11.268	8.698	8.303	8.500
C (aus CO <sub>2</sub> )	[mg/m <sup>3</sup> ]	2.077	2.347	1.262	2.158	2.320	1.295	1.457	1.834	1.780	2.212	2.805	3.345	2.428	2.859	2.644	2.697	3.075	2.374	2.266	2.320
C gesamt	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	15	16	17	10	n.b.	2	2	< 1	3	2	3	2	2	3	2	< 1	< 1	< 1	< 1
Methan	[Vol. %]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	n.b.	< 0,1	< 0,1	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Butan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Pentan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Hexan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	<1	3,2	<1	2,9	<1	<1	<1	1,9	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	3
Heptan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	2,0	2,5	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Octan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Nonan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Decan	[mg/m <sup>3</sup> ]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Summe n-Alkane	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	2,0	5,7	< 1	2,9	< 1	< 1	< 1	1,9	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3
Benzol	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Toluol	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ethylbenzol	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
m/p-Xylol	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 0,1	0,4	< 0,1	0,3	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
o-Xylol	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,0	< 0,1	< 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
BTEX	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,2	0,4	< 0,1	0,3	< 0,2	1,7	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,5	0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Styrol	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cumol	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mesitylen	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Pseudocumol	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,4	< 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	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Hemellitil	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Alkylbenzole	[mg/m <sup>3</sup> ]	1,5	< 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	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
GC-Screening	Kettenlänge																				
n-alkane	C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
iso-alkane	C	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
BTEX		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
cycl. KW's		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

## Anhang 3.2

### Prognose der Sickerwasserkonzentrationen aus dem Bodenluft-Monitoring

#### Testfeld

Schadstoff	mittlere BL-Konz. (mg/m <sup>3</sup> ) 2002	mittlere BL-Konz. (mg/m <sup>3</sup> ) 2003	mittlere BL-Konz. (mg/m <sup>3</sup> ) 2004	SW-Konz bei 10 mg/m <sup>3</sup> (µg/l)*	prognos. SW-Konz (µg/l) in 2002	prognos. SW-Konz (µg/l) in 2003	prognos. SW-Konz (µg/l) in 2004	Fracht 2002 (bei 350 l/m <sup>2</sup> *a SW) (µg/m <sup>2</sup> *a)	Fracht 2003 (bei 350 l/m <sup>2</sup> *a SW) (µg/m <sup>2</sup> *a)	Fracht 2004 (bei 350 l/m <sup>2</sup> *a SW) (µg/m <sup>2</sup> *a)
Butan	< 1	< 1	< 1							
Pentan	38	14	26							
<b>Hexan</b>	<b>246</b>	<b>153</b>	<b>130</b>	<b>0,251</b>	<b>6,2</b>	<b>3,8</b>	<b>3,3</b>	2.161	1.340	1.142
<b>Heptan</b>	<b>352</b>	<b>305</b>	<b>210</b>	<b>0,254</b>	<b>8,9</b>	<b>7,7</b>	<b>5,3</b>	3.129	2.711	1.867
<b>Octan</b>	<b>44</b>	<b>58</b>	<b>43</b>	<b>0,178</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>	272	360	270
Nonan	15	11	12							
Decan	4	6	8							
<b>Summe n-Alkane</b>	<b>684</b>	<b>615</b>	<b>430</b>							
<b>Benzol</b>	<b>2,6</b>	<b>1,2</b>	<b>0,4</b>	<b>87,9</b>	<b>23,0</b>	<b>10,8</b>	<b>3,2</b>	8.060	3.794	1.128
<b>Toluol</b>	<b>2,6</b>	<b>2,8</b>	<b>1,1</b>	<b>79,2</b>	<b>20,8</b>	<b>21,9</b>	<b>8,7</b>	7.263	7.669	3.049
<b>Ethylbenzol</b>	<b>24,2</b>	<b>30,1</b>	<b>9,3</b>	<b>68,5</b>	<b>165,9</b>	<b>206,1</b>	<b>63,5</b>	58.067	72.125	22.217
<b>m/p-Xylol</b>	<b>62,8</b>	<b>120,0</b>	<b>35,3</b>	<b>94,6</b>	<b>594,1</b>	<b>1135,2</b>	<b>334,3</b>	207.931	397.320	116.989
<b>o-Xylol</b>	<b>19,2</b>	<b>7,6</b>	<b>1,6</b>	<b>113,0</b>	<b>217,4</b>	<b>86,3</b>	<b>18,1</b>	76.094	30.190	6.328
<b>BTEX</b>	<b>112</b>	<b>149</b>	<b>48</b>		<b>1021</b>	<b>1460</b>	<b>428</b>	<b>357.416</b>	<b>511.098</b>	<b>149.711</b>
Styrol	1,6	0,5	< 0,1							
Cumol	2,6	4,4	1,0							
Mesitylen	8,5	17,9	2,7							
Pseudocumol	14,5	30,5	4,3							
Hemellitol	4,5	10,3	1,2							
<b>Alkylbenzole</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>9,2</b>							

\* nach Grathwohl und Reisinger (1996)

## Anhang 4.1: Übersichtstabelle der Analyseergebnisse aus dem Sickerwasser-Monitoring

Proben-Bez.		T-SW1_2						T-SW1_4		T-SW2_2								T-SW2-4					
		05.03.02	28.05.02	04.09.03	03.12.03	09.06.04	01.09.04	05.03.02	28.05.02	05.03.02	28.05.02	11.09.02	02.12.02	03.06.03	04.09.03	03.12.03	09.06.04	01.09.04	05.03.02	28.05.02	11.09.02	02.12.02	03.06.03
Probenahme		DW 704	DX 862	01763	03412	05534	07116	DW 705	DX 863	DW 706	DX 864	EA 656	EB 831	00568	01764	03414	05535	07117	DW 707	DX 865	EA 657	EB 832	00569
Benzol	µg/l	1	< 1	< 1	< 1			1	6	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	2	< 1	< 1	< 1	1	7	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	2	< 1
Ethylbenzol	µg/l	3	< 1	< 1	2			3	10	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			7	< 1	< 1	< 1	< 1
m/p-Xylol	µg/l	4	< 1	2	5			49	10	< 1	< 1	1	3	< 1	< 1	< 1			44	< 1	< 1	3	< 1
o-Xylol	µg/l	20	< 1	< 1	2			2	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			0	< 1	< 1	1	< 1
<b>Summe BTEX</b>	<b>µg/l</b>	<b>28</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>2</b>	<b>9</b>			<b>55</b>	<b>28</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>			<b>54</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>6</b>	<b>&lt; 1</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	2	< 1	< 1
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1			1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			1	< 1	< 1	< 1	< 1
Mesitylen	µg/l	10	< 1	1	2			10	3	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			11	< 1	< 1	1	< 1
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	1	2			23	4	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			28	< 1	< 1	1	< 1
Hemellitol	µg/l	20	< 1	< 1	3			24	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			29	< 1	< 1	1	< 1
<b>Summe Aromaten</b>	<b>µg/l</b>	<b>30</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>2</b>	<b>7</b>			<b>58</b>	<b>9</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>			<b>69</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>&lt; 1</b>
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01	***	n.b.			**	< 0,01	**	**	< 0,01	0,01	**	**	n.b.			**	< 0,01	n.b.	**	**
<b>KW-Index</b>	<b>mg/l</b>	<b>0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>**</b>	<b>&lt; 0,1</b>			<b>0,2</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,2*</b>	<b>0,5</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>			<b>&lt; 0,2*</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>**</b>
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1			< 0,2*	< 0,1	< 0,2*	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1			< 0,2*	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	1,8	1,09	2,6	0,92	5,5	0,12	0,6	2,67	5,45	16,5	0,33	0,22	0,04	0,03	0,07	0,06	<0,02	3,07	30,5	2,86	0,05	**
Eisen II					0,71											< 0,2							
Nitrat	mg/l	< 1	< 1	0,15	0,56	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	5,2	0,17	60	20	42	< 1	< 1	1	< 1	0,15
Phosphat	mg/l	< 1	< 5	***	n.b.			< 1	< 5	< 1	< 5	< 5	< 10	***	***	n.b.			< 1	< 5	< 5	< 10	***
Sulfat	mg/l			17	22,1	26	2					46	19	35,2	28	57,5	16	25			140	8	19,5
TOC	mg/l	140	120	62	74	74	45	130	110	180	130	83	29	41	44	41	20	29	34	63	57		
DOC	mg/l	140	120	***	n.b.			130	100	180	130	83	***	***	***	n.b.			33	62	56	***	***
Säurekapazität K <sub>S</sub> 4,3	mmol/l	6,48	4,58	**	4,9	4	3,27	3,46	4,35	1,67	1,61	**	2,11	1,86	0,85	0,74	0,96	0,81	2,32	3,57	**	***	**
Hydrogencarbonat	mmol/l	6,48	4,58		4,9	4	3,27	3,46	4,35	1,67	1,61		2,11	1,86	0,85	0,74	0,96	0,81	2,32	3,57	**	***	**
Sauerstoff		***	***	6,6	7,6	7,7	6,7	***	***	***	***	***	8,3	6,3	5,8	7,8	10,6	6,5	***	***	***	6,3	5,7
Leitfähigkeit	µS/cm	815	640	768	566	434	319	361	478	315	309	400	267	284	420	357	178	224	310	413	470	251	285
pH-Wert	-	8,1	7,8	7,4	6,9	6,7	7,3	8,2	7,7	7,7	7,7	7,1	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	7,3	6,8	6,8	7,0	7	7,6
Sickerwassermenge	ml	2.300	2.500	700	2.600	2.250	1.250	700	1.850	700	550	2.800	1.750	3.100	2.700	2.300	2.250	950	800	3.000	1.300	550	50
				****								****				**							

- \* : BG hochgesetzt, aufgrund zu geringer Probenmenge
- \*\* : Probenmenge zu gering
- \*\*\* : keine Analytik durchgeführt
- \*\*\*\* : Saugkerze neu eingebaut

## Anhang 4.1: Übersichtstabelle der Analyseergebnisse aus dem Sickerwasser-Monitoring (Fortsetzung)

Proben-Bez.		VK-SW_2									VK-SW_4						VuK-SW_2						
		05.03.02	28.05.02	11.09.02	02.12.02	03.06.03	04.09.03	03.12.03	09.06.04	01.09.04	05.03.02	28.05.02	03.06.03	04.09.03	03.12.03	01.09.04	11.09.02	02.12.02	03.06.03	04.09.03	03.12.03	09.06.04	01.09.04
Probenahme		DW 708	DX 866	EA 658	EB 833	00570	1766	03416	05536	07118	DW 709	DX 867	00571	1766	03417	07119	EA 659	EB 834	00572	1767	03418	05537	07120
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	2	13	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	2	37	< 1	< 1		
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	1	< 1	< 1	< 1		
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	3	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	2	< 1	< 1	< 1		
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	1	< 1	< 1	< 1		
<b>Summe BTEX</b>	<b>µg/l</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>			<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>			<b>&lt; 1</b>	<b>6</b>	<b>37</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>		
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	1	< 1	< 1	< 1		
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	1	< 1	< 1	< 1		
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1			< 1	< 1	< 1	< 1			< 1	1	< 1	< 1	< 1		
<b>Summe Aromaten</b>	<b>µg/l</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>4</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>			<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>			<b>&lt; 1</b>	<b>3</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 1</b>		
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	***	***	n.b.			**	< 0,01	***	***			< 0,01	< 0,01	***	***	n.b.		
<b>KW-Index</b>	<b>mg/l</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>			<b>&lt; 0,2*</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>**</b>	<b>**</b>			<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>		
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 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		
Eisen	mg/l	0,06	0,06	< 0,02	0,03	0,04	< 0,02	< 0,05	0,03	< 0,02	0,14	0,14	**	1		0,04	< 0,02	0,03	< 0,02	0,03	< 0,05	0,03	< 0,02
Eisen II								< 0,2													< 0,2		
Nitrat	mg/l	14	44	100	130	33	36	93,3	11	15	< 1	< 1	0,2	0		55	48	66	13	56	102,0	31	50
Phosphat	mg/l	< 1	< 5	< 5	< 10	***	***	n.b.			< 1	< 5	***	***			< 5	< 10	***	***	n.b.		
Sulfat	mg/l			73	210	39,6	41	53	38	37			41,7	21		42	39	31	15,2	28	51,6	30	31
TOC	mg/l	25	19	27	32	17,00	20	< 1	16	22	43	62				280	50	51	16,00	38	< 1	29	37
DOC	mg/l	25	19	26	***	***	***	n.b.			43	62	***	***			46	47	***	***	n.b.		
Säurekapazität K <sub>S</sub> 4,3	mmol/l	1,86	1,44	***	0,47	0,86	0,39	0,98	1,15	1,17	5,16	4,48	**	**		1,39	***	8,94	7,60	13,50	13	12,51	12,44
Hydrogencarbonat	mmol/l	1,86	1,44		0,47	0,86	0,39	0,98	1,15	1,17	5,16	4,48	**	**		1,39		8,94	7,6	13,5	13	12,51	12,44
Sauerstoff		***	***	***	7,2	6,1	7,2	7,9	8,4	6,6	***	***	5,6	6,4		6,5	***	6,5	6	6,4	7,1	10,1	6,5
Leitfähigkeit	µS/cm	347	396	460	731	257	368	429	216	226	680	636	399	618		407	920	1000	790	1255	1360	1160	1148
pH-Wert	-	7,1	7,2	6,6	6,6	6,8	6,6	6,8	6,7	7,2	7,7	8,1	8	7,7		7,5	7,7	7,4	7,9	7,6	7,5	7,6	7,7
Sickerwassermenge	ml	2.500	2.500	3.400	1.900	3.300	1.900	2.800	2.500	1.500	900	1.650	100	250	150	200	3.400	2.600	2.100	3.600	3.900	3.000	3.000
													****	**									

\* : BG hochgesetzt, aufgrund  
 \*\* : Probenmenge zu gering  
 \*\*\* : keine Analytik durchgeführt  
 \*\*\*\* : Saugkerze neu eingebaut

## Anhang 4.2

### Zusatzversuch zur Wiederfindung leicht flüchtiger Schadstoffe im Sickerwasser

Tab. 1: Wiederfindungsrate von Toluol D8 nach einem Tag, einer Woche und einem Monat an den Messstellen T-SW1\_2 und T-SW2\_2.

Flaschen-Nr.	1	3	9	10	9	10
Probenahmestelle	T-SW1_2	T-SW2_2	T-SW1_2	T-SW2_2	T-SW1_2	T-SW2_2
Standzeit	1 Tag		1 Woche		1 Monat	
Standard (ml)	99,7	98,7	100,1	102,3	100,1	102,3
Standard-Konz. (µg/l)	278	278	278	278	278	278
Gesamtgewicht (g)	619,2	659,9	631,8	629,7	629,8	627,7
Eingesetzt am	04.11.03		05.11.03		05.11.03	
Probenahme am	05.11.03		12.11.03		03.12.03	
Rückwaage (g)	654,2	691,0	835,1	847,7	1351,8	1427,7
Multipliar	1,351	1,315	3,031	3,131	8,243	8,820
Wiederfindung Standard (µg/l)	18	20	1,6	2,4	< 1	< 1
Wiederfindung Standard (%)	6,5	7,2	0,5	0,9	< 0,4	< 0,4

Tab. 2: Wiederfindungsrate von Toluol D8 nach einem Monat an allen Messstellen.

Flaschen-Nr.	9	2	10	4	5	6	7
Probenahmestelle	TSW1_2	T-SW1_4	TSW2_2	T-SW2_4	Vk-SW_2	Vk-SW_4	Vuk-SW
Standard (ml)	100,1	102,8	102,3	101,9	108,9	98,3	98,5
Standard-Konz. (µg/l)	278	278	278	278	278	278	278
Gesamtgewicht (g)	629,8	622,1	627,7	658,4	623,9	616,0	629,3
Eingesetzt am	05.11.03	04.11.03	05.11.03	04.11.03	04.11.03	04.11.03	04.11.03
Probenahme am	03.12.03	03.12.03	03.12.03	03.12.03	03.12.03	03.12.03	03.12.03
Rückwaage (g)	1351,8	623,4	1427,7	659,6	1534,8	617,3	1663,7
Multipliar	8,243	1,013	8,820	1,012	9,365	1,013	11,5
Wiederfindung Std. (µg/l)*	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Wiederfindung Std. (%)*	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4

\*Std. = Standard

**Tab. 3: Wiederfindungsrate von Toluol D8 in der Kontrollprobe.**

<b>Flaschen Nr.</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
<b>Standzeit</b>	<b>Start</b>	<b>1 Tag</b>	<b>1 Woche</b>	<b>1 Monat</b>
<b>Standard (ml)</b>				
<b>Standard-Konz. (µg/l)</b>	278	278	278	278
<b>Gesamtgewicht (g)</b>				
<b>Eingesetzt am</b>	04.11.03	04.11.03	04.11.03	04.11.03
<b>Probenahme am</b>	04.11.03	05.11.03	12.11.03	03.12.03
<b>Rückwaage (g)</b>				
<b>Multiplier</b>				
<b>Wiederfindung Std. (µg/l)*</b>	<b>278</b>	<b>231</b>	<b>165</b>	<b>150</b>
<b>Wiederfindung Std. (%)*</b>	<b>100</b>	<b>83</b>	<b>59</b>	<b>54</b>

\*Std. = Standard

**Tab. 4: Übersicht der Wiederfindungsversuche mit deuteriertem Toluol D8.**

<b>Messstelle</b>	<b>Start 04.11.03</b>	<b>Tagesprobe 05.11.03</b>	<b>Wochenprobe 12.11.03</b>	<b>Monatsprobe 03.12.03</b>
T-SW1_2	278	18	1,6	< 1
T-SW1_4	278			< 1
T-SW2_2	278	20	2,4	< 1
T-SW2_4	278			< 1
Vk-SW_2	278			< 1
Vk-SW_4	278			< 1
Vuk-SW_2	278			< 1
<b>Kontrollprobe</b>	<b>278</b>	<b>231</b>	<b>165</b>	<b>150</b>



Anhang 5.1

**Grundwasserstände [müNN] Tanklager Schäferhof Süd**

	Jan 02	Mrz 02	Jun 02	Sep 02	Dez 02	Mrz 03	Jun 03	Sep 03	Dez 03	Mrz 04	Jun 04	Aug 04
	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]	[mü.NN]
<b>B 8</b>	23,91		24,52		24,43	25,14	24,46					
<b>B 9</b>												
<b>B 10</b>												
<b>B 11</b>	23,92		24,62		24,43	25,09						
<b>B 12</b>	23,81		24,39		24,16	25,08						
<b>B 13</b>	23,86		24,65		24,38	25,14	24,57					
<b>MP 1f</b>	24	24,74	24,82	24,42	24,5	25,22	24,7	23,82	23,57	24,08	24,1	23,82
<b>MP 2f</b>	23,95	24,90	24,79	24,46	24,16	25,2	24,65	23,96	23,52	24,04	24,06	23,77
<b>MP 3f</b>	23,96	24,89	24,72	24,23	24,46	25,195	24,64	23,97	23,515	24,04	24,06	23,77
<b>MP 4f</b>	23,95	24,85	24,76	24,46	24,47	25,175	24,54	23,95	23,355	24,02	24,04	23,75
<b>MP 5f</b>	23,88	24,74	24,25	24,10	24,40	25,115	24,59	23,47	23,465	23,98	24,01	24,06

### Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA) Analysendaten der Grundwasserproben vom 07.01.2002

Proben-Bez.		B 8	B 11	B 12	B 13	MP - 1 T	MP - 1 F	MP - 2 T	MP - 2 F	MP - 3 T	MP - 3 F	MP - 4 T	MP - 4 F	MP - 5 T	MP - 5 F
Probenahme		07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002	07.01.2002
Entnahmetiefe		6,5 [m u. ROK]	6,8 [m u. ROK]	7 [m u. ROK]	7 [m u. ROK]	9,5 [m u. OKS]	6,5 [m u. OKS]	9,5 [m u. OKS]	6,5 [m u. OKS]	9,5 [m u. OKS]	6,5 [m u. OKS]	9,5 [m u. OKS]	6,5 [m u. OKS]	9,0 [m u. OKS]	6,5 [m u. OKS]
Labor-Nummer		DU 815	DU 816	DU 817	DU 818	DU 819	DU 820	DU 821	DU 822	DU 823	DU 824	DU 825	DU 826	DU 827	DU 828
Benzol	µg/l	6	26	4	890	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	9	< 1	2	41	33
Toluol	µg/l	10	< 1	15	530	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	71	130	370
Ethylbenzol	µg/l	20	18	21	170	< 1	< 1	< 1	7	< 1	21	< 1	52	110	190
m/p-Xylol	µg/l	76	15	150	800	< 1	< 1	< 1	43	< 1	120	< 1	340	390	770
o-Xylol	µg/l	11	< 1	20	120	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	76	65	140
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>	<b>120</b>	<b>59</b>	<b>210</b>	<b>2.500</b>				<b>50</b>		<b>150</b>		<b>540</b>	<b>740</b>	<b>1.500</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	1	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3	3	6
Cumol	µg/l	2	2	5	13	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3	< 1	4	6	13
Mesitylen	µg/l	3	2	18	7	< 1	< 1	< 1	4	< 1	7	< 1	8	15	60
Pseudocumol	µg/l	10	9	80	25	< 1	< 1	< 1	15	< 1	19	< 1	21	53	160
Hemellitof	µg/l	4	1	16	7	< 1	< 1	< 1	7	< 1	7	< 1	7	13	44
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>	<b>19</b>	<b>14</b>	<b>120</b>	<b>57</b>				<b>26</b>		<b>36</b>		<b>43</b>	<b>90</b>	<b>280</b>
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	0,2	< 0,1	0,2	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	0,1	< 0,1	0,1	0,1	0,2
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	41,3	18,5	2,12	28,6	0,55	0,06	0,04	26,3	0,17	27,5	0,05	40,4	68,6	55,1
Mangan	mg/l	1,97	1,68	0,83	1,86	0,06	< 0,01	0,04	1,18	0,10	2,19	0,05	0,83	3,59	2,07
Nitrat	mg/l	< 1	6	9	< 1	75	50	64	14	67	10	30	14	< 1	2
Phosphat	mg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sulfat	mg/l	10	13	15	15	42	30	26	15	35	21	26	15	2	22
TOC	mg/l	23	20	18	46	7	7	4	18	3	25	3	29	21	30
DOC	mg/l	23	20	16	39	5	6	4	17	3	25	3	26	20	22
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	2,24	2,23	5,26	3,60	0,08	0,10	0,11	2,54	0,18	2,84	0,55	3,44	4,42	3,32
Ammonium	mg/l	1,24	1,04	0,68	1,72	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,53	< 0,03	0,29	< 0,03	0,94	1,43	2,04
Hydrogencarbonat	mmol/l	2,24	2,23	5,26	3,60	0,08	0,10	0,11	2,54	0,18	2,84	0,55	3,44	4,42	3,32
Sauerstoff	mg/l	0,13	0,79	1,48	0,11	0,14	4,59	0,67	0,48	1,03	0,2	0,57	0,12	0,1	0,16
Leitfähigkeit	µS/cm	301	503	497	341	349	247	275	316	291	325	217	357	456	388
Redoxspannung	mV	+100	+140	+140	+130	+490	+480	+430	+110	+340	+140	+350	+100	+80	+140
Temperatur	°C	11,8	11,3	11,8	11,6	11,2	11,0	11,7	11,9	11,8	11,8	11,8	11,8	11,4	11,2
pH-Wert	-	6,1	6,4	6,8	6,3	5,6	5,8	5,9	6,3	6	6,2	6,3	6,3	6,6	6,4
<b>GW-Spiegel</b>	m u. ROK	5,24	5,78	6,03	5,69	5,61 [m u. OKS]	5,60 [m u. OKS]	5,35 [m u. OKS]	5,42 [m u. OKS]	5,03 [m u. OKS]	5,04 [m u. OKS]	5,03 [m u. OKS]	5,03 [m u. OKS]	4,53 [m u. OKS]	4,53 [m u. OKS]
<b>Abstand OKS/ROK</b>	cm					13,5	10,0	27,0	28,0	25,0	28,0	25,0	25,0	35,5	31,0
<b>GW-Spiegel</b>	m u. ROK	5,24	5,78	6,03	5,69	5,48	5,50	5,08	5,14	4,78	4,76	4,78	4,78	4,18	4,22

OKS = Oberkante Schutzdreieck

ROK = Rohroberkante

ROK war nur teilweise möglich, da Brunnenrohre noch nicht fixiert

### Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA) Analysendaten der Grundwasserproben vom 05.03.2002

Proben-Bez.		MP-1T	MP-1F	MP-2T	MP-2F	MP-3T	MP-3F	MP-4T	MP-4F	MP-5T	MP-5F
		05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002	05.03.2002
Probenahme											
Entnahmetiefe											
Labor-Nummer		DW 694	DW 695	DW 696	DW 697	DW 698	DW 699	DW 700	DW 701	DW 702	DW 703
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	3	< 1	6	< 1	4	120	95
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	2	< 1	120	430	760
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	26	< 1	34	< 1	150	330	300
m/p-Xylol	µg/l	< 1	1	1	94	3	110	2	530	820	760
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	3	< 1	3	< 1	190	300	330
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>130</b>	<b>3</b>	<b>160</b>	<b>2</b>	<b>990</b>	<b>2.000</b>	<b>2.200</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	3	< 1	5	< 1	15	24	22
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	8	< 1	11	< 1	34	48	46
Pseudocumol	µg/l	< 1	1	1	24	2	32	2	100	140	130
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	14	2	15	< 1	44	67	65
<b>Summe nachgew.Aromater</b>	<b>µg/l</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>49</b>	<b>4</b>	<b>63</b>	<b>2</b>	<b>190</b>	<b>280</b>	<b>260</b>
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01		0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	0,5	< 0,1	0,5	1,0	0,7
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	25,5	< 0,02	8,91	0,03	27,2	73,3	76,2
Mangan	mg/l	0,03	< 0,01	0,02	1,44	0,05	0,78	0,01	0,61	3,75	3,55
Nitrat	mg/l	72	62	75	15	58	14	42	3	< 1	< 1
Phosphat	mg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sulfat	mg/l	42	29	32	15	27	25	24	12	1	9
TOC	mg/l	2	3	2	28	2	9	2	20	20	18
DOC	mg/l	2	3	2	26	2	9	2	20	20	17
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,28	0,38	0,34	2,45	0,45	1,81	0,47	2,50	4,50	4,34
Ammonium	mg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,73	< 0,03	0,23	< 0,03	0,91	1,58	1,67
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,28	0,38	0,34	2,45	0,45	1,81	0,47	2,50	4,50	4,34
Sauerstoff	mg/l	0,34	3,37	0,35	3,5	5,46	3,64	0,58	0,22	0,2	0,21
Leitfähigkeit	µS/cm	379	299	363	329	289	295	236	311	498	490
Redoxspannung	mV	450	540	430	160	400	190	400	160	100	110
Temperatur	°C	11,2	10,5	11,1	10,5	11,4	10,6	11,3	10,6	11,1	10,2
pH-Wert	-	4,8	6	5,9	6,4	6,1	6,5	6,2	6,5	6,7	6,6
<b>GW-Spiegel</b>	<b>m u. ROK</b>	<b>4,86</b>	<b>4,86</b>	<b>4,47</b>	<b>4,47</b>	<b>4,11</b>	<b>4,11</b>	<b>4,14</b>	<b>4,13</b>	<b>3,67</b>	<b>3,67</b>

### Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

#### Analysendaten der Grundwasserproben vom 03.06.2002

Proben-Bez.		MP-1T	MP-1F	MP-2T	MP-2F	MP-3T	MP-3F	MP-4T	MP-4F	MP-5T	MP-5F	B 8	B 11	B 12	B 13
Probenahme		3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02	3.6.02
Entnahmetiefe															
Labor-Nummer		DX 911	DX 912	DX 913	DX 914	DX 915	DX 916	DX 917	DX 918	DX 919	DX 920	DX 921	DX 922	DX 923	DX 924
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	7	< 1	41	< 1	14	130	90	26	< 1	11	71
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	8	< 1	360	380	1.200	92	10	47	39
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	1	2	< 1	110	< 1	440	480	500	140	1	74	10
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	1	34	< 1	190	1	850	560	750	130	21	150	130
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	2	4	< 1	11	< 1	570	240	470	100	2	57	81
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>			<b>4</b>	<b>48</b>		<b>360</b>	<b>1</b>	<b>2.200</b>	<b>1.800</b>	<b>3.000</b>	<b>490</b>	<b>34</b>	<b>340</b>	<b>330</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	1	4	< 1	25	< 1	3
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	11	< 1	36	43	45	14	2	16	6
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	12	< 1	38	< 1	96	86	110	28	21	49	8
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	6	< 1	69	1	270	250	290	82	3	190	22
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	10	< 1	47	< 1	120	94	120	34	1	63	14
<b>Summe nachgew.Aroma</b>	<b>µg/l</b>				<b>28</b>		<b>170</b>	<b>1</b>	<b>520</b>	<b>470</b>	<b>570</b>	<b>160</b>	<b>52</b>	<b>320</b>	<b>53</b>
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,5	< 0,1	0,4	0,1	0,3	0,6	0,3	0,1	< 0,1	0,4	< 0,1
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	< 0,02	0,11	0,06	35,1	< 0,02	43,0	< 0,02	29,7	35,9	5,26	202	7,12	2,75	13,3
Mangan	mg/l	0,03	0,02	0,02	5,68	0,08	2,15	< 0,01	0,91	3,17	1,46	1,96	0,87	0,82	1,56
Nitrat	mg/l	65	46	78	2	52	8	33	1	< 1	1	< 1	15	19	9
Phosphat	mg/l	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Sulfat	mg/l	45	31	39	20	27	44	25	10	4	28	13	23	23	34
Methan	µg/l	<0,02	<0,02	<0,02	1200	<0,02	4100	<0,02	8500	7100	2100	3400	170	1200	2900
TOC	mg/l	4	5	4	65	5	35	3	47	24	27	21	12	11	27
DOC	mg/l	4	4	3	53	4	34	3	41	20	25	19	12	11	21
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,38	0,49	0,37	3,59	0,51	2,75	0,51	3,30	3,45	2,98	1,63	3,76	3,83	4,92
Ammonium	mg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	1,57	< 0,03	0,71	< 0,03	2,07	2,10	2,10	1,41	0,66	2,49	1,02
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,38	0,49	0,37	3,59	0,51	2,75	0,51	3,30	3,45	2,98	1,63	3,76	3,83	4,92
Sauerstoff	mg/l	0,42	5,49	0,22	0,24	0,67	0,24	1,00	0,39	0,40	0,68	0,31	2,25	3,58	0,44
Leitfähigkeit	µS/cm	358	257	382	605	272	467	213	450	464	474	344	469	478	619
Redoxspannung	mV	444	426	376	89	390	130	233	123	81	109	97	216	163	180
Temperatur	°C	10,8	10,4	11,0	10,8	10,9	10,9	11,0	10,8	10,8	10,8	11,0	10,7	10,8	10,9
pH-Wert	-	5,7	6,0	5,7	6,4	6,1	6,2	6,1	6,3	6,5	6,4	6,3	6,2	6,5	6,3

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 11.09.2002

Proben-Bez.		MP-1T	MP-1F	MP-2T	MP-2F	MP-3T	MP-3F	MP-4T	MP-4F	MP-5T	MP-5F
Probenahme		11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002	11.09.2002
Entnahmetiefe											
Labor-Nummer		EA 629	EA 630	EA 631	EA 632	EA 633	EA 634	EA 635	EA 636	EA 637	EA 638
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	15	2	47	< 1	6	120	39
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	5	4	10	2	180	370	330
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	65	4	150	5	460	440	290
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	1	300	11	540	14	1.500	1.100	890
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	12	5	16	7	510	320	310
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>			<b>1</b>	<b>400</b>	<b>26</b>	<b>760</b>	<b>28</b>	<b>2.700</b>	<b>2.400</b>	<b>1.900</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	1
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	4	5	14	3	55	44	37
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	48	1	53	2	130	96	110
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	100	7	150	6	330	300	280
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	69	5	71	2	130	110	110
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>				<b>220</b>	<b>18</b>	<b>290</b>	<b>13</b>	<b>650</b>	<b>550</b>	<b>540</b>
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
<b>Kohlenwasserstoffindex</b>	<b>mg/l</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	0,17	1,08	0,10	64,5	0,07	55,5	0,53	48,7	76,3	30,2
Nitrat	mg/l	65	24	56	< 1	25	2	22	< 1	< 1	< 1
Sulfat	mg/l	37	22	33	21	41	25	34	9	2	15
TOC	mg/l	5	6	5	49	12	41	6	55	25	30
DOC	mg/l	4	5	4	46	11	39	5	53	25	26
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,56	0,78	0,66	3,18	1,32	3,66	0,84	3,78	3,70	4,48
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,56	0,78	0,66	3,18	1,32	3,66	0,84	3,78	3,70	4,48
Leitfähigkeit	µS/cm	319	178	283	520	278	441	222	493	469	508
pH-Wert	-	5,8	6,2	6,0	6,5	6,2	6,4	6,3	6,5	6,8	6,7
Redoxspannung	mV	+430	+410	+370	+30	+230	+100	+210	+100	+60	+80
Sauerstoff	mg/l	5,0	8,4	4,3	2,5	3,1	2,3	3,8	2,2	2,4	1,9
Wassertemperatur	°C	11,0	12,0	11,5	13,3	12,5	13,6	12,0	13,3	11,9	14,1

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 02.12.2002

Proben-Bez.		B 8	B 11	B 12	B 13	MP1-T	MP1-F	MP2-T	MP2-F	MP3-T	MP3-F	MP4-T	MP4-F	MP5-T	MP5-F
Probenahme		02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002	02.12.2002
Entnahmetiefe															
Labor-Nummer		EB 800	EB 801	EB 802	EB 803	EB 804	EB 805	EB 806	EB 807	EB 808	EB 809	EB 810	EB 811	EB 812	EB 813
Benzol	µg/l	32	20	10	760	< 1	< 1	< 1	16	2	53	< 1	10	180	23
Toluol	µg/l	88	4	71	150	< 1	< 1	< 1	7	< 1	12	< 1	320	470	250
Ethylbenzol	µg/l	230	10	140	230	< 1	< 1	< 1	220	4	180	2	650	590	230
m/p-Xylol	µg/l	450	30	430	660	< 1	< 1	< 1	590	11	530	6	1.900	1.500	840
o-Xylol	µg/l	140	8	62	100	< 1	< 1	< 1	15	< 1	14	< 1	640	390	270
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>	<b>940</b>	<b>72</b>	<b>710</b>	<b>1.900</b>				<b>850</b>	<b>17</b>	<b>790</b>	<b>8</b>	<b>3.500</b>	<b>3.100</b>	<b>1.600</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	2	2
Cumol	µg/l	25	7	29	28	< 1	< 1	< 1	19	1	16	< 1	56	49	36
Mesitylen	µg/l	48	3	77	11	< 1	< 1	< 1	59	1	46	1	160	110	94
Pseudocumol	µg/l	130	10	250	38	< 1	< 1	< 1	130	3	130	2	400	330	260
Hemellitol	µg/l	56	3	77	16	< 1	< 1	< 1	72	2	66	1	170	130	120
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>	<b>260</b>	<b>23</b>	<b>430</b>	<b>93</b>				<b>280</b>	<b>7</b>	<b>260</b>	<b>4</b>	<b>790</b>	<b>620</b>	<b>510</b>
Benzoessäure	mg/l	0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01
<b>Kohlenwasserstoffindex</b>	<b>mg/l</b>	<b>1,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,7</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,8</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	42,5	14,0	6,01	24,0	0,06	0,04	< 0,02	32,0	0,03	37,7	0,07	50,6	74,4	12,8
Mangan	mg/l	1,78	1,14	0,68	2,00	0,01	< 0,01	< 0,01	1,94	0,05	2,48	< 0,01	1,14	4,08	0,64
Nitrat	mg/l	1	18	16	8	68	49	57	8	30	3	42	< 1	< 1	5
Sulfat	mg/l	11	16	12	23	34	34	42	10	31	19	40	5	< 1	14
Methan	µg/l	51	390	170	1900	<10	<10	<10	1300	1900	<10	4100	<10	7300	6900
TOC	mg/l	33	16	19	46	5,2	4,8	4,2	28	7	42	3,7	75	31	27
DOC	mg/l	23	16	18	41	3,8	4,6	3,5	24	7	38	3,4	73	30	22
Säurekapazität K <sub>6</sub> 4,3	mmol/l	0,94	4,00	5,30	3,99	0,60	0,45	0,37	2,00	1,13	3,16	0,47	3,06	2,39	3,29
Ammonium	mg/l	1,61	1,28	1,60	2,39	0,08	0,09	0,07	1,50	0,09	1,98	0,13	3,64	1,95	1,49
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,94	4	5,30	3,99	0,60	0,45	0,37	2,00	1,13	3,16	0,47	3,06	2,39	3,29
Sauerstoff	mg/l	0,3	3,8	2,4	0,3	0,3	6,0	0,3	0,1	0,4	4,9	2,8	0,3	0,2	0,5
Leitfähigkeit	µS/cm	369	486	563	461	328	237	308	350	253	485	223	475	481	415
Redoxspannung	mV	+120	+200	+170	+180	+490	+450	+420	+80	+170	+120	+240	+80	+80	+150
Temperatur	°C	13,0	12,6	12,8	12,2	11,8	12,1	12,1	12,8	12,1	13,0	12,2	13,0	12,6	12,9
pH-Wert	-	6,3	6,3	6,6	6,4	5,8	6,0	5,9	6,4	6,2	6,4	6,1	6,3	6,6	6,5

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 12.03.2003

Proben-Bez.		MP-1T	MP-1F	MP-2T	MP-2F	MP-3T	MP-3F	MP-4T	MP-4F	MP-5T	MP-5F
Probenahme		12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003	12.03.2003
Ruhewasserpegel	m u. ROK	4,25	4,28	3,89	3,89	3,52	3,52	3,57	3,55	2,99	2,98
Labor-Nummer		ED 047	ED 048	ED 049	ED 050	ED 051	ED 052	ED 053	ED 054	ED 055	ED 056
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	10	2	49	< 1	8	160	29
Toluol	µg/l	1	< 1	< 1	3	< 1	10	< 1	250	600	490
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	1	8	1	180	2	370	770	390
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	3	210	2	570	4	1.500	2.200	1.400
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	13	< 1	13	< 1	540	740	360
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>	<b>1</b>		<b>4</b>	<b>240</b>	<b>5</b>	<b>820</b>	<b>6</b>	<b>2.700</b>	<b>4.500</b>	<b>2.700</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	1	< 1	16	24	12
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	2	15	< 1	36	67	38
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	40	< 1	56	< 1	120	230	140
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	1	54	2	170	1	330	650	360
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	61	< 1	73	< 1	130	260	140
Summe nachgew.Aromaten	µg/l			1	160	4	320	1	630	1.200	690
Benzoessäure	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	0	0,4	0,7	0,3
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	< 0,02	< 0,02	0,05	79	0,05	37	0,07	39	80	20
Nitrat	mg/l	60	43	59	< 1	39	1	30	< 1	< 1	< 1
Sulfat	mg/l	42	33	47	31	32	41	35	4,2	6	23
TOC	mg/l	3,1	4,1	2,5	76	6,2	39	3,1	45	35	38
DOC	mg/l	1,8	3,6	2,5	67	3,6	32	1,5	36	33	35
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,33	0,57	0,35	2,75	1,04	2,53	0,48	2,11	2,66	5,52
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,33	0,57	0,35	2,75	1,04	2,53	0,48	2,11	2,66	5,52
Sauerstoff	mg/l	0,1	5,3	0,3	0,3	0,3	0,2	1,9	0,2	0,2	0,3
Leitfähigkeit	µS/cm	336	256	359	499	305	451	265	355	482	634
Redoxspannung	mV	+460	+430	+200	+60	+330	+130	+370	+90	+100	+110
Temperatur	°C	11,4	10,3	11,1	9,4	11,1	10,1	11,3	10,2	10,9	9,2
pH-Wert	-	5,6	5,5	5,4	5,9	5,8	5,9	5,6	6	6,1	6,2

**Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)**  
**Analysendaten der Grundwasserproben vom 03.06.2003**

Proben-Bez.		MP 1-T	MP 1-F	MP 2-T	MP 2-F	MP 3-T	MP 3-F	MP 4-T	MP 4-F	MP 5-T	MP 5-F	B8	B8	B13	B13
Probenahme		03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003	03.06.2003
Entnahmetiefe															
Labor-Nummer		00505	00506	00507	00508	00509	00510	00511	00512	00513	00514	00515	00516	00517	00518
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	28	< 1	86	< 1	11	230	15	60	45	480	520
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	11	< 1	14	< 1	420	600	300	320	320	270	300
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	160	< 1	300	< 1	1.100	860	500	530	430	120	140
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	2	520	2	950	1	4.100	2.200	1.800	1.500	1.200	370	440
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	22	< 1	23	< 1	1.500	660	410	440	440	61	70
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>			<b>2</b>	<b>740</b>	<b>2</b>	<b>1.400</b>	<b>1</b>	<b>7.100</b>	<b>4.600</b>	<b>3.000</b>	<b>2.900</b>	<b>2.400</b>	<b>1.300</b>	<b>1.500</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	4	1	< 1	1	< 1	< 1
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	11	< 1	25	< 1	87	76	60	48	41	24	27
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	68	< 1	85	< 1	250	180	190	130	110	5	6
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	170	1	250	< 1	690	530	460	400	320	16	18
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	95	1	120	< 1	310	210	200	160	130	7	8
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>				<b>340</b>	<b>2</b>	<b>480</b>		<b>1.300</b>	<b>1.000</b>	<b>910</b>	<b>740</b>	<b>600</b>	<b>52</b>	<b>59</b>
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,5	< 0,1	0,8	< 0,1	1	0,8	0,5	1,2	0,6	0,1	0,1
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	0,02	0,04	0,04	64	< 0,02	35	0,16	31	52	5,8	41	37	2	2,4
Nitrat	mg/l	55,2	29	56,1	0,13	31,3	0,12	18,9	0,17	0,1	0,14	0,13	0,1	22,6	17,9
Sulfat	mg/l	33,2	23,5	33,7	58,1	26,1	28,4	19,2	2,6	1,9	14,2	1,7	4,5	47,4	41,7
Methan	µg/l	26	<10	<10	1500	26	6200	27	6200	6800	1500	4900	6800	3200	3400
TOC	mg/l	5	5,5	3,6	76	4,4	35	2,6	53	29	51	50	50	45	46
DOC	mg/l	4,7	5,3	3,4	65	4,3	25	2,4	44	21	42	43	40	38	34
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,32	0,59	0,33	3,99	0,96	3,06	0,62	3,86	4,43	7,50	4,37	3,59	5,46	5,32
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,32	0,59	0,33	3,99	0,96	3,06	0,62	3,86	4,43	7,50	4,37	3,59	5,46	5,32
Sauerstoff	mg/l	0,2	6,9	0,2	0,1	0,1	0,4	5,9	0,1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,3	0,2
Leitfähigkeit	µS/cm	293	229	342	568	278	395	169	417	493	749	471	409	708	650
Redoxspannung	mV	470	440	410	160	290	180	320	130	90	120	130	130	210	210
Temperatur	°C	10,7	10,1	10,7	10,6	10,9	10,6	11,1	10,5	10,7	10,3	10,8	10,9	10,7	10,7
pH-Wert	-	6,1	6,1	5,8	6,3	6,3	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,4	6,4	6,4	6,4
												Entnahmetiefe 5m	Entnahmetiefe 9m	Entnahmetiefe 5,50m	Entnahmetiefe 9m



## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 04.09.03

Proben-Bez.		MP-1T	MP-1F	MP-2T	MP-2F	MP-3T	MP-3F	MP-4T	MP-4F	MP-5T	MP-5F
Probenahme		04.09.03	04.09.03	04.09.03	04.09.03	04.09.03	04.09.03	04.09.04	04.09.03	04.09.03	04.09.03
Entnahmetiefe											
Labor-Nummer		01750	01751	01752	01753	01754	01755	01756	01757	01758	01759
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	23	< 1	76	< 1	9	160	38
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	11	< 1	18	< 1	340	410	530
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	250	3	270	4	790	610	420
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1000	7	890	9	3200	1500	1600
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	18	1	20	1	980	460	460
Summe nachgew.BTEX	µg/l				1300	11	1300	14	5300	3100	3000
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	4	3
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	19	2	22	< 1	59	52	45
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	80	2	70	2	210	120	180
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	230	3	220	3	530	370	440
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	100	2	100	2	230	140	180
Summe nachgew.Aromaten	µg/l				430	9	410	7	1.000	690	850
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	< 0,1	0,7	< 0,1	0,5	0,7	0,2
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	< 0,02	0,02	< 0,02	28	< 0,02	37	0,13	51	71	24
Nitrat	mg/l	54,3	31,2	51,6	0,15	30,4	0,13	20,1	0,15	0,12	0,13
Sulfat	mg/l	33,8	25,7	42,3	48,6	27,5	31,6	25,8	3,2	2,1	18,9
TOC	mg/l	3,8	3,4	3,3	22	5,6	25	3,4	38	23	23
DOC	mg/l	3,5	2,8	3,1	21	4,8	3	3,4	37	23	22
Säurekapazität K <sub>S</sub> 4,3	mmol/l	0,3	0,48	0,44	2,39	1,45	2,93	0,65	4,23	4,5	3,89
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,3	0,48	0,44	2,39	1,45	2,93	0,65	4,23	4,5	3,89
Sauerstoff	mg/l	0,1	7,2	2,9	0,1	0,7	0,1	6,3	0,3	0,3	0,3
Leitfähigkeit	µS/cm	310	219	213	298	230	354	160	454	450	399
Redoxspannung	mV	+420	+430	+430	+50	+290	+90	+310	+80	+80	+90
Temperatur	°C	10,7	11,1	11,4	13,0	11,5	13,2	11,5	13,3	11,5	13,1
pH-Wert	-	6,0	6,3	6,2	6,8	6,7	6,6	6,3	6,7	6,9	6,9

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 04.12.03

Proben-Bez.		MP 1-T	MP 1-F	MP 2-T	MP 2-F	MP 3-T	MP 3-F	MP 4-T	MP 4-F	MP 5-T	MP 5-F
Probenahme		04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003	04.12.2003
Entnahmetiefe	m.u.ROK										
Labor-Nummer		03287	03288	03289	03290	03291	03292	03293	03294	03295	03296
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	12	< 1	37	< 1	6	130	33
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	5	< 1	11	< 1	230	280	340
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	170	< 1	170	2	540	440	320
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	1	600	1	500	2	1.800	1.100	910
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	13	< 1	10	< 1	530	310	290
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>			<b>1</b>	<b>800</b>	<b>1</b>	<b>730</b>	<b>4</b>	<b>3.100</b>	<b>2.300</b>	<b>1.900</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	17	12	11
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	17	< 1	18	< 1	48	38	37
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	60	< 1	39	< 1	140	93	110
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	170	< 1	120	1	360	270	290
Hemellitot	µg/l	< 1	< 1	< 1	73	< 1	54	< 1	160	110	120
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>				320		230	1	730	520	570
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,2	< 0,1	1	< 0,1	1,5	0,8	0,7
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	0,09	0,21	0,06	29	0,2	31	0,32	53	88	35
Nitrat	mg/l	62,6	40,9	40,3	1,2	9,3	4,4	24,1	0,17	0,07	0,16
Sulfat	mg/l	37,7	26,8	22,7	14,3	20,6	8,4	21,2	6,6	0,29	10,7
Methan	µg/l	<10	<10	<10	1200	23	6800	12	9000	7300	2000
TOC	mg/l	7,1	7,8	6,9	19	9	25	9	18	9,1	7,4
DOC	mg/l	5,3	7,7	5,6	17	8,7	16	5	18	9	6,5
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,32	0,42	0,42	1,6	1,20	2,4	0,66	2,60	3,5	2,10
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,32	0,42	0,42	1,6	1,20	2,4	0,66	2,60	3,5	2,10
Sauerstoff	mg/l	0,2	4,3	3	0,2	2,4	0,5	3,8	0,2	0,3	0,6
Leitfähigkeit	µS/cm	313	237	234	275	217	340	204	430	496	308
Redoxspannung	mV	+460	+460	+430	+150	+270	+170	+270	+150	+100	+120
Temperatur	°C	11,1	11,5	11,7	12,4	11,8	12,6	11,9	12,7	11,9	12,3
pH-Wert	-	5,8	5,9	5,8	6,4	6,3	6,3	6,1	6,4	6,6	6,5

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 17.03.04

Proben-Bez.		MP 1-T	MP 1-F	MP 2-T	MP 2-F	MP 3-T	MP 3-F	MP 4-T	MP 4-F	MP 5-T	MP 5-F
Probenahme		17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004	17.03.2004
Entnahmetiefe	m.u.ROK	9,5	6,5	9,5	6,5	9,5	6,5	9,5	6,5	9,0	6,5
Labor-Nummer		04498	04499	04500	04501	04502	04503	04504	04505	04506	04507
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	9	< 1	45	< 1	5	190	74
Toluol	µg/l	< 1	< 1	< 1	7	< 1	11	1	120	590	1100
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	120	< 1	88	2	68	990	990
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	490	2	480	5	1.100	2.800	3.400
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	21	< 1	13	1	330	710	960
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>				<b>650</b>	<b>2</b>	<b>640</b>	<b>9</b>	<b>1.600</b>	<b>5.300</b>	<b>6.500</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	12	25	34
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	10	2	9	< 1	9	89	100
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	79	< 1	45	< 1	120	260	340
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	120	< 1	88	1	210	750	870
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	< 1	110	< 1	68	< 1	130	300	370
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>				<b>320</b>	<b>2</b>	<b>210</b>	<b>1</b>	<b>480</b>	<b>1.400</b>	<b>1.700</b>
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	0,1	< 0,1	0,2	0,3	0,2
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	0,04	0,07	0,05	36	0,1	35	0,16	36	91	29
Nitrat	mg/l	65	51	66	2	23	1	27	< 1	< 1	2
Sulfat	mg/l	40	26	41	28	21	28	27	10	4	42
Methan	µg/l	<20	<20	<20	1300	38	5400	<20	5700	10000	2400
TOC	mg/l	8	7	6	31	11	34	8	26	38	34
DOC	mg/l	5	6	5	29	10	32	8	24	32	31
Säurekapazität K <sub>S</sub> 4,3	mmol/l	0,34	0,54	0,36	3	1,30	3,7	0,83	2,60	4,8	5,20
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,34	0,54	0,36	3	1,30	3,7	0,83	2,60	4,8	5,20
Sauerstoff	mg/l	0,2	2,9	0,1	0,1	2,4	0,2	4,5	0,1	0,1	0,3
Leitfähigkeit	µS/cm	346	265	358	357	228	449	216	281	516	581
Redoxspannung	mV	360	380	320	130	280	160	280	130	100	130
Temperatur	°C	11,1	10,6	11,1	10,4	11,4	10,6	11,3	10,5	10,9	10,0
pH-Wert	-	5,9	6,1	5,8	6,6	6,4	6,5	6,2	6,5	6,6	6,7

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 08.06.04

Proben-Bez.		MP 1-T	MP 1-F	MP 2-T	MP 2-F	MP 3-T	MP 3-F	MP 4-T	MP 4-F	MP 5-T	MP 5-F
Probenahme		08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004	08.06.2004
Entnahmetiefe	m.u.ROK	9,5	6,5	9,5	6,5	9,5	6,5	9,5	6,5	9,0	6,5
Labor-Nummer		05496	05497	05498	05499	05500	05501	05502	05503	05504	05505
Benzol	µg/l	< 1	< 1	< 1	11	< 1	88	< 1	12	220	110
Toluol	µg/l	< 1	< 1	1	6	< 1	22	< 1	370	540	1500
Ethylbenzol	µg/l	< 1	< 1	2	190	< 1	390	1	720	960	1.000
m/p-Xylol	µg/l	< 1	< 1	6	480	< 1	1200	3	2.000	2.500	3.500
o-Xylol	µg/l	< 1	< 1	< 1	16	< 1	27	< 1	570	530	810
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>			<b>9</b>	<b>700</b>		<b>1.700</b>	<b>4</b>	<b>3.700</b>	<b>4.800</b>	<b>6.900</b>
Styrol	µg/l	< 1	< 1	< 1	1	< 1	2	< 1	21	21	35
Cumol	µg/l	< 1	< 1	< 1	25	< 1	37	< 1	69	94	110
Mesitylen	µg/l	< 1	< 1	< 1	94	< 1	100	< 1	220	240	340
Pseudocumol	µg/l	< 1	< 1	1	270	< 1	340	< 1	560	700	830
Hemellitol	µg/l	< 1	< 1	1	120	< 1	160	< 1	250	290	360
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>			<b>2</b>	<b>510</b>		<b>640</b>		<b>1.100</b>	<b>1.300</b>	<b>1.700</b>
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	< 0,1	0,2	< 0,1	0,8	0,6	0,4
MKW > C40	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eisen	mg/l	0,04	0,07	0,05	27	0,14	20	0,44	49	98	33
Nitrat	mg/l	70	60	73	6	44	4	15	< 1	< 1	1
Sulfat	mg/l	39	27	40	21	28	16	18	16	< 1	20
Methan	µg/l	<10	<10	<10	590	<10	5800	<10	9300	12000	4000
TOC	mg/l										
DOC	mg/l										
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,45	0,68	0,57	1,33	1,12	3,17	0,93	2,53	3,57	6,30
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,45	0,68	0,57	1,33	1,12	3,17	0,93	2,53	3,57	6,30
Sauerstoff	mg/l	0,2	2,8	0,1	0,2	0,3	0,5	5,3	0,1	0,1	0,3
Leitfähigkeit	µS/cm	344	293	363	287	283	423	162	380	557	724
Redoxspannung	mV	+460	+460	+380	+80	+290	+120	+330	+90	+70	+100
Temperatur	°C	10,6	10,2	10,6	10,5	10,9	10,8	10,8	10,7	10,6	10,4
pH-Wert	-	5,8	6,2	6	6,6	6,6	6,6	6,5	6,7	6,8	6,9

## Tanklager Schäferhof-Süd (SELMA)

### Analysendaten der Grundwasserproben vom 31.08.2004

Proben-Bez.		MP 1-T	MP 1-F	MP 2-T	MP 2-F	MP 3-T	MP 3-F	MP 4-T	MP 4-F	MP 5-T	MP 5-F
Probenahme		31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004	31.08.2004
Entnahmetiefe	m.u.ROK	9,5	6,5	9,5	6,5	9,5	6,5	9,5	6,5	9,0	6,5
Labor-Nummer		07080	07081	07082	07083	07084	07085	07086	07087	07088	07089
Benzol	µg/l	<1	<1	<1	11	<1	68	<1	10	230	110
Toluol	µg/l	<1	<1	<1	6	<1	17	<1	350	520	1000
Ethylbenzol	µg/l	<1	<1	<1	120	<1	260	1	750	680	850
m/p-Xylol	µg/l	<1	<1	<1	320	<1	870	8	2.700	1.700	2.800
o-Xylol	µg/l	<1	<1	<1	12	<1	18	9	720	370	640
<b>Summe nachgew.BTEX</b>	<b>µg/l</b>				<b>470</b>		<b>1.200</b>	<b>18</b>	<b>4.500</b>	<b>3.500</b>	<b>5.400</b>
Styrol	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	24	14	25
Cumol	µg/l	<1	<1	<1	8	<1	21	<1	65	59	92
Mesitylen	µg/l	<1	<1	<1	42	<1	64	1	230	140	270
Pseudocumol	µg/l	<1	<1	<1	150	<1	220	4	540	420	700
Hemellitol	µg/l	<1	<1	<1	72	<1	100	2	240	170	300
<b>Summe nachgew.Aromaten</b>	<b>µg/l</b>				270		410	7	1.100	800	1.400
Kohlenwasserstoffindex	mg/l	<0,1	<0,1	<0,1	0,7	<0,1	0,7	<0,1	1,3	1,2	1,2
MKW > C40	mg/l	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Eisen	mg/l	0,11	0,11	<0,02	31	<0,02	22	0,37	60	78	36
Nitrat	mg/l	99	59	75	5	44	9	14	<1	<1	<1
Sulfat	mg/l	34	23	29	14	28	17	18	26	<1	5
Methan	µg/l	<10	<10	<10	1500	160	6400	570	14000	15000	5200
TOC	mg/l										
DOC	mg/l										
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,3	mmol/l	0,42	0,52	0,45	2,82	1,00	3,03	0,85	4,98	5,61	7,19
Hydrogencarbonat	mmol/l	0,42	0,52	0,45	2,82	1,00	3,03	0,85	4,98	5,61	7,19
Sauerstoff	mg/l	0,5	5,2	0,4	0,2	0,8	0,8	6	0,3	0,2	0,3
Leitfähigkeit	µS/cm	387	270	343	326	293	348	187	533	531	697
Redoxspannung	mV	+520	+490	+430	+30	+270	+80	+270	+40	+70	+70
Temperatur	°C	10,6	10,9	11	10,5	11,1	12,4	11,2	12,7	11,2	12,2
pH-Wert	-	5,9	6,2	6	6,5	6,5	6,4	6,3	6,4	6,7	6,7

Grundwasserbeprobung Schäferhof Süd 03.06.2002  
Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)

Probe	B 8	B 11	B 12	B 13	MP 1 flach	MP 1 tief	MP 2 flach	MP 2 tief	MP 3 flach	MP 3 tief	MP 4 flach	MP 4 tief	MP 5 flach	MP 5 tief
Substanz	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
<b><u>Metabolite</u></b>														
Benzoessäure	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,66	0,00	0,00	0,00	0,00
Methylbenzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Methylbenzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Methylbenzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C2-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45
C2-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	2,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C2-Benzoessäure (i)	10,50	0,00	0,00	3,95	0,00	0,00	42,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,79
C2-Benzoessäure (i)	1,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,05	0,00	43,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C2-Benzoessäure (i)	2,55	0,00	0,00	16,19	0,00	0,00	39,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,69
C2-Benzoessäure (i)	0,94	0,00	0,07	10,72	0,00	0,00	9,79	0,00	10,81	0,00	0,00	0,00	0,00	9,40
C3-Benzoessäure (i)	2,49	0,00	0,04	8,84	0,00	0,00	2,87	0,00	6,34	0,00	12,24	0,00	0,00	3,90
C2-Benzoessäure (i)	4,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,74	0,00	3,61	0,00	3,60	0,00	0,00	5,95
C2-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,96	0,00	0,00	3,07	0,00	0,00	0,00	13,07	0,00	0,00	1,59
C2-Benzoessäure (i)	9,68	0,00	0,07	7,40	0,00	0,00	50,45	0,00	2,02	0,00	3,03	0,00	0,00	8,25
C3-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,35	0,00	7,10	0,00	0,78	0,00
C2-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	8,33	0,00	6,04	0,00	2,38	0,00	0,17	0,21
C3-Benzoessäure (i)	6,36	0,00	0,00	13,81	0,00	0,00	5,10	0,00	0,00	0,00	1,68	0,00	0,93	10,76
C3-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	5,46	0,00	4,45	0,00	0,29	0,00
C3-Benzoessäure (i)	1,37	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	1,94	0,00	1,96	0,00	0,00	0,00	1,19	0,95
C3-Benzoessäure (i)	3,00	0,00	0,00	3,60	0,00	0,00	12,45	0,00	6,45	0,00	0,00	0,00	0,00	5,83
C3-Benzoessäure (i)	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,10	0,00	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36
C3-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,88	0,00	16,27	0,00	3,68	7,23
C3-Benzoessäure (i)	3,64	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,81	0,00	0,00	0,00	4,45	0,20
C3-Benzoessäure (i)	0,22	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75
C3-Benzoessäure (i)	1,94	0,00	0,00	3,82	0,00	0,00	2,27	0,00	1,89	0,00	1,55	0,00	0,00	1,85
C3-Benzoessäure (i)	3,16	0,00	0,05	0,40	0,00	0,00	20,98	0,00	1,23	0,00	1,89	0,00	0,00	7,86
C3-Benzoessäure (i)	3,67	0,00	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	8,85	0,00	5,74	0,00	4,29	3,83
C3-Benzoessäure (i)	1,47	0,00	0,16	3,24	0,00	0,00	2,60	0,00	8,29	0,00	1,25	0,00	0,00	0,78
C3-Benzoessäure (i)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	0,00	0,52	0,00	2,74	0,00
C3-Benzoessäure (i)	8,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,56	0,00	0,92	6,40
<b><u>Fettsäuren</u></b>														
Hexadecansäure	22,14	22,32	19,82	42,45	5,68	16,96	27,49	11,42	11,57	11,79	15,28	36,31	6,33	7,38
Octadecansäure	13,09	10,56	10,24	29,71	2,73	8,40	17,57	6,57	9,39	12,65	20,92	23,11	4,19	3,93
<b>Summe Metabolite</b>	<b>66,81</b>	<b>0,00</b>	<b>1,23</b>	<b>77,41</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>264,24</b>	<b>0,00</b>	<b>119,05</b>	<b>8,66</b>	<b>80,33</b>	<b>0,00</b>	<b>19,45</b>	<b>119,03</b>
<b>Summe Fettsäuren</b>	<b>35,23</b>	<b>32,88</b>	<b>30,06</b>	<b>72,16</b>	<b>8,41</b>	<b>25,36</b>	<b>45,06</b>	<b>17,99</b>	<b>20,97</b>	<b>24,44</b>	<b>36,20</b>	<b>59,42</b>	<b>10,51</b>	<b>11,30</b>

(i) = Isomere

C2-Benzoensäuren: Dimethylbenzoensäuren oder Ethylbenzoensäuren oder Toluylsäuren

C3-Benzoensäuren: Trimethylbenzoensäuren oder Methylethylbenzoensäuren

oder Propylbenzoensäuren

Grundwasserbeprobung Schäferhof Süd 02.12.2002  
Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)

Probe	B 8	B 11	B 12	B 13	MP 1 flach	MP 1 tief	MP 2 flach	MP 2 tief	MP 3 flach	MP 3 tief	MP 4 flach	MP 4 tief	MP 5 flach	MP 5 tief
Substanz	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
<b><u>Metabolite</u></b>														
Benzoessäure	0	12,85	15,49	20,73	55,05	14,61	8,91	3,66	3,88	4,51	12,72	3,48	4,5	0
C1-Benzoessäure	0	1,33	1,4	43,65	0	0	2,73	0,1	4,74	0,44	21,06	0,28	5,36	11,2
C1-Benzoessäure	0	0	1,22	24,19	0	0	9,72	0,07	5,71	0,29	8	0,17	5,96	2,52
C1-Benzoessäure	0	0	0	36,19	0	0	3,6	0	8,47	0	0	0	1,95	0
C2-Benzoessäure (i)	5,45	0	0	2,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0	1,33	0	0	0	0	0	0	5,1	0	0,31	0
C2-Benzoessäure (i)	8,39	4,07	5,3	20,61	0	0	3,26	0,27	1,23	0	50,52	0	1,31	0
C2-Benzoessäure (i)	10,37	0	1,54	57,7	0	0	26,43	0	8,27	0	27,39	0,08	5,04	32,73
C2-Benzoessäure (i)	0	1,65	1,9	63,94	0	0	11,88	0,05	44,34	0,41	21,39	0,25	4,7	27,99
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0,84	34	0	0	9	0	28,92	0,33	25,93	0	6	4,39
C2-Benzoessäure (i)	0	0	1,55	34	0	0	3,62	0	8,28	0	0	0	0	6,69
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0,3	5,52	0	0	8,06	0	5,02	0,04	12,13	0,48	0	0
C2-Benzoessäure (i)	3,45	0	1,63	11,8	0	0	8,84	0	7,55	0	11,38	0,04	0	0
C2-Benzoessäure (i)	0	0	2,8	18,52	0	0	23,77	0,08	25,92	0,34	21,02	0,18	7,25	31,97
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	11,31	0	0	4,63	0	7,66	0	0	0	0	0
C3-Benzoessäure (i)	3,12	4,61	0,94	39,04	0	0	3,64	0	12,75	0,32	19,93	0	2,09	10,94
C3-Benzoessäure (i)	10,37	0	1,01	24,38	0	0	1,88	0,06	7,94	0,24	4,34	0,04	0,65	10,15
C3-Benzoessäure (i)	3,45	1,85	0	14,37	0	0	13,28	0	30,72	0,74	15,27	0	4,35	26,81
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	45,29	0	0	5,46	0	8,73	0	8,89	0	1,4	3,68
C3-Benzoessäure (i)	3,62	0,95	0,23	13,79	0	0	5,07	0	11,12	0	27,24	0	3,05	15,3
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	6,88
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	50,99	0	0	7,57	0	26,96	0	19,61	0	4,54	8,77
<b><u>Fettsäuren</u></b>														
Tetradecansäure	1,96	13,33	14,11	50	36,2	11,8	6,64	4,56	12,05	5,87	0	5,94	4,98	9,68
Hexadecansäure	8,67	26,69	31,34	44,33	129,45	30,37	18,68	13,51	21,61	14,43	20,62	13,41	14,12	8,44
Octadecansäure	4,34	13,08	12,33	22,54	71,21	15,49	7,12	7,89	11,64	6,88	9,37	7,43	6,28	5,14
<b>Summe Metabolite</b>	<b>48,22</b>	<b>27,32</b>	<b>36,13</b>	<b>573,37</b>	<b>55,05</b>	<b>14,61</b>	<b>161,35</b>	<b>4,31</b>	<b>258,22</b>	<b>7,66</b>	<b>311,91</b>	<b>5,01</b>	<b>59,34</b>	<b>200,02</b>
<b>Summe Fettsäuren</b>	<b>14,97</b>	<b>53,1</b>	<b>57,78</b>	<b>116,87</b>	<b>236,85</b>	<b>57,66</b>	<b>32,44</b>	<b>25,96</b>	<b>45,3</b>	<b>27,18</b>	<b>29,99</b>	<b>26,78</b>	<b>25,37</b>	<b>23,26</b>

(i) = Isomere

C2-Benzoensäuren: Dimethylbenzoensäuren oder Ethylbenzoensäuren oder Toluylsäuren

C3-Benzoensäuren: Trimethylbenzoensäuren oder Methyläthylbenzoensäuren  
oder Propylbenzoensäuren

Grundwasserbeprobung Schäferhof Süd 03.06.03  
Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)

Probe	B 8 flach	B 8 tief	B 9 flach	B 13 tief	MP 1 flach	MP 1 tief	MP 2 flach	MP 2 tief	MP 3 flach	MP 3 tief	MP 4 flach	MP 4 tief	MP 5 flach	MP 5 tief
Substanz	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
<b><u>Metabolite</u></b>														
Benzoessäure	2,90	2,78	2,90	5,84	2,14	9,58	6,84	2,88	6,72	4,02	7,60	2,18	2,82	3,00
C1-Benzoessäure	15,02	14,40	0,88	0,86	0,00	0,00	3	0,18	3,28	0	17,06	0,08	7,06	12,62
C1-Benzoessäure	6,38	4,34	1,16	1,14	0,20	0,72	10,92	0,42	4,42	0,54	14,86	0,24	2,48	8,84
C1-Benzoessäure	2,78	1,68	3,02	2,14	0	0	17,62	0,18	2,90	0,18	6,90	0,10	1,46	4,94
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0	6,32	0	0	0	0	1,94
C2-Benzoessäure (i)	39,50	24,78	1,80	3,32	0	0	103,28	0,03	23,54	0	25,02	0,12	7,30	18,28
C2-Benzoessäure (i)	15,92	12,16	0	0	0	0	32,54	0	6,92	0	8,84	0	3,92	9,02
C2-Benzoessäure (i)	37,70	22,10	0,14	1,06	0	0	72,8	0,30	14,66	0	25,06	0	7,80	24,82
C2-Benzoessäure (i)	8,60	6,24	1,92	1,68	0	0	9,62	0	8,22	0	7,18	0	0,96	6,28
C2-Benzoessäure (i)	5,90	6,20	5,44	4,34	0	0	0	0	0	0	16,30	0	1,42	7,90
C2-Benzoessäure (i)	8,58	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	4,30	0	10,16	0	0	6,66
C2-Benzoessäure (i)	12,68	3,42	2,06	3,24	0	0	54,42	0	7,94	0	0	0	1,54	9,12
C2-Benzoessäure (i)	24,58	26,48	4,36	2,02	0	0	66,22	0	40,28	0,14	44,76	0	4,76	12,48
C3-Benzoessäure (i)	0	0,00	0	0,00	0	0	11,14	0	0	0	10,30	0	0,46	1,26
C3-Benzoessäure (i)	0	0,00	0	2,74	0	0	0	0	0	0	0	0	3,46	12,96
C3-Benzoessäure (i)	0	0,00	0	0	0	0	53,70	0	9,74	0	21,28	0,03	2,80	2,92
C3-Benzoessäure (i)	2,68	6,56	0	0	0	0	18,96	0	6,52	0	6,32	0	0	8,02
C3-Benzoessäure (i)	34,66	0,00	0	0	0	0	106,66	0,22	14,06	0	14,62	0	4,44	4,46
C3-Benzoessäure (i)	15,00	26,32	0	0	0	0	50,98	0	3,70	0	0	0	0	5,28
C3-Benzoessäure (i)	0	0	1,18	1,20	0	0	15,14	0	0	0	0	0	0	3,06
C3-Benzoessäure (i)	0	19,00	0	0	0	0	11,62	0	0	0	0	0	0	22,60
C3-Benzoessäure (i)	0	12,48	0	0	0	0	54,58	0,28	5,94	0	0	0	2,92	4,74
C3-Benzoessäure (i)	0	0,00	0	0	0	0	0	0	3,8	0	4	0	0	10,90
<b><u>Fettsäuren</u></b>														
Tetradecansäure	0	0	3,04	0	3,90	19,32	0	5,68	9,96	6,48	0	2,22	5,18	4,24
Hexadecansäure	9,16	6,54	11,08	3,02	8,38	60,32	14,98	18,26	52,74	26,64	19,2	6,12	11,48	12,04
Octadecansäure	6,38	0,00	5,24	1,78	22,72	42,38	8,94	3,4	28,22	19,18	16,14	22,34	6,70	7,68
<b>Summe Metabolite</b>	<b>232,88</b>	<b>188,94</b>	<b>24,86</b>	<b>29,58</b>	<b>2,34</b>	<b>10,30</b>	<b>700,04</b>	<b>4,49</b>	<b>173,26</b>	<b>4,88</b>	<b>240,26</b>	<b>2,75</b>	<b>55,6</b>	<b>202,10</b>
<b>Summe Fettsäuren</b>	<b>15,54</b>	<b>6,54</b>	<b>19,36</b>	<b>4,80</b>	<b>35,00</b>	<b>122,02</b>	<b>23,92</b>	<b>27,34</b>	<b>90,92</b>	<b>52,3</b>	<b>35,34</b>	<b>30,68</b>	<b>23,36</b>	<b>23,96</b>

(i) = Isomere

C2-Benzoensäuren: Dimethylbenzoensäuren oder Ethylbenzoensäuren oder Toluylsäuren

C3-Benzoensäuren: Trimethylbenzoensäuren oder Methyläthylbenzoensäuren  
oder Propylbenzoensäuren



Grundwasserbeprobung Schäferhof Süd 04.12.2003  
Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)

Probe	MP 1 flach	MP 1 tief	MP 2 flach	MP 2 tief	MP 3 flach	MP 3 tief	MP 4 flach	MP 4 tief	MP 5 flach	MP 5 tief
Substanz	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
<b><u>Metabolite</u></b>										
Benzoessäure	0,67	0,88	3,13	2,63	2,59	3,16	0	0,19	0	0,64
C1-Benzoessäure	0	0	0	0	1,07	0	18,08	0	9,86	16,52
C1-Benzoessäure	0	0	2,92	0,03	1,18	0,00	8,56	0	3,77	7,29
C1-Benzoessäure	0	0	0,81	0	0,70	0,00	4,65	0,02	0,77	7,82
C2-Benzoessäure (i)	0	0	2,01	0	8,08	0	34,73	0	5,01	30,53
C2-Benzoessäure (i)	0	0	1,42	0	4,39	0	8,55	0,13	4,22	11,68
C2-Benzoessäure (i)	0	0	4,27	0	0,00	0	0	0	0	48,41
C2-Benzoessäure (i)	0	0	7,37	0	7,75	0	16,87	0,07	8,62	0,00
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	2,12	0	7,86	0	2,52	9,87
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	10,69	0,04	8,19	11,04
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	11,51	0	0	5,01
C2-Benzoessäure (i)	0	0	4,61	0	0	0	0,00	0	4,03	12,00
C2-Benzoessäure (i)	0	0	21,73	0	34,44	0,14	11,75	2,28	3,75	20,05
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0	10,53
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	18,25	0	1,19	3,67
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	2,96	0	7,29	0,09	3,97	16,60
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	1,52	0	3,02	0	5,28	5,64
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	6,83	0	8,69	0	7,83	25,42
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	1,64	0	4,77	0	4,87	0
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0,99	0	0	0	0	5,67
C3-Benzoessäure (i)	0	0	4,09	0	0	0	0	0	0	0
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b><u>Fettsäuren</u></b>										
Tetradecansäure	2,17	2,35	13,24	2,75	6,59	3,86	0	2,16	6,60	0,00
Hexadecansäure	9,75	9,25	30,73	12,23	15,08	18,12	26,44	8,96	18,71	8,07
Octadecansäure	7,77	7,84	24,72	8,48	8,35	22,68	20,41	8,95	12,44	5,46
<b>Summe Metabolite</b>	<b>0,67</b>	<b>0,88</b>	<b>52,37</b>	<b>2,66</b>	<b>76,24</b>	<b>3,30</b>	<b>175,26</b>	<b>2,92</b>	<b>73,89</b>	<b>248,40</b>
<b>Summe Fettsäuren</b>	<b>19,69</b>	<b>19,44</b>	<b>68,69</b>	<b>23,47</b>	<b>30,03</b>	<b>44,66</b>	<b>46,85</b>	<b>20,08</b>	<b>37,76</b>	<b>13,54</b>

(i) = Isomere

C2-Benzoessäuren: Dimethylbenzoessäuren oder E

C3-Benzoessäuren: Trimethylbenzoe:

oder Propylbenzoessäuren

Grundwasserbeprobung Schäferhof Süd 08.06.2004  
Gehalte der polaren Kohlenwasserstoffe (Fettsäuren und aromatische Säuren)

Probe	MP 1 flach	MP 1 tief	MP 2 flach	MP 2 tief	MP 3 flach	MP 3 tief	MP 4 flach	MP 4 tief	MP 5 flach	MP 5 tief
Substanz	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
<b>Metabolite</b>										
Benzoessäure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C1-Benzoessäure	0	0	0	0	0	0	27,45	0	0	0
C1-Benzoessäure	0	0	0	0	0	0	18,09	0	0	0
C1-Benzoessäure	0	0	0	0	0	0	5,81	0	0	0
C2-Benzoessäure (i)	0	0	12,90	0	0	0	10,20	0	0	19,70
C2-Benzoessäure (i)	0	0	3,14	0	0	0	3,57	0	2,42	4,51
C2-Benzoessäure (i)	0	0	3,42	0	5,30	0	29,93	0	0	2,07
C2-Benzoessäure (i)	0	0	3,38	0	1,35	0	0	0	0	10,44
C2-Benzoessäure (i)	0	0	1,99	0	5,41	0	10,37	0	0,39	5,79
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0,56	0	3,90	0	17,85	0	1,59	14,88
C2-Benzoessäure (i)	0	0	1,06	0	8,97	0	0	0	1,11	1,21
C2-Benzoessäure (i)	0	0	0,89	0	5,35	0	12,81	0	0,95	1,62
C2-Benzoessäure (i)	0	0	3,62	0	6,94	0	35,92	0	2,28	6,77
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	13,87	0	0	8,01
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	4,87	0	0	0	0	1,17
C3-Benzoessäure (i)	0	0	1,65	0	0	0	13,09	0	0	1,96
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	7,76	0	5,09	0	0	20,98
C3-Benzoessäure (i)	0	0	1,88	0	13,00	0	0	0	0	0
C3-Benzoessäure (i)	0	0	7,22	0	0	0	13,56	0	0	0
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64	8,02
C3-Benzoessäure (i)	0	0	3,69	0	0	0	0	0	1,07	8,09
C3-Benzoessäure (i)	0	0	9,00	0	0	0	24,98	0	5,44	21,01
C3-Benzoessäure (i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Fettsäuren</b>										
Tetradecansäure	0	0	4,04	0	0	1	0	0	0	0
Hexadecansäure	0	0	13,64	0,33	21	5	27	0,82	17,34	0
Octadecansäure	0	0	9,10	0,50	12	6	35	0	10,71	0
<b>Summe Metabolite</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>54,40</b>	<b>0,00</b>	<b>62,85</b>	<b>0,00</b>	<b>242,59</b>	<b>0,00</b>	<b>15,89</b>	<b>136,23</b>
<b>Summe Fettsäuren</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>26,78</b>	<b>0,83</b>	<b>33,21</b>	<b>11,92</b>	<b>61,73</b>	<b>0,82</b>	<b>28,05</b>	<b>0,00</b>

(i) = Isomere

C2-Benzoensäuren: Dimethylbenzoensäuren oder Ethylbenzoensäuren oder Toluylsäuren

C3-Benzoensäuren: Trimethylbenzoensäuren oder Methyläthylbenzoensäuren oder Propylbenzoensäuren

## Anhang 5.4

Umweltschutz Nord GmbH & Co. Analytisches Labor	Prüfungsvorschrift  Prüfanweisungen	AQS-SPV-308 Revision 1 Seite 1/6
---	---	--

### Bestimmung von Benzoesäure in Wasserproben

#### Inhaltsverzeichnis

ZIELSETZUNG .....	2
KURZBESCHREIBUNG .....	2
STÖRUNGEN .....	2
<b>1. SUBSTANZEN .....</b>	<b>2</b>
<b>2. GERÄTE UND CHEMIKALIEN.....</b>	<b>2</b>
<b>3. STANDARDLÖSUNGEN .....</b>	<b>3</b>
3.1 KALIBRIERSTANDARDS .....	3
3.2 KONTROLLSTANDARD .....	3
<b>4. PROBENVORBEREITUNG.....</b>	<b>4</b>
4.1 PROBENAUFBEREITUNG.....	4
4.2 BLINDWERTBESTIMMUNG .....	4
<b>5. MESSUNG.....</b>	<b>4</b>
5.1 HPLC-PARAMETER .....	4
5.2 CHROMATOGRAMM.....	5
5.3 RETENTIONSZEITEN (TYPISCH; ABHÄNGIG VOM ZUSTAND DER HPLC - TRENNsäULE).....	5
5.4 ERSTELLEN DER KALIBRIERFUNKTION:.....	5
5.5 MESSUNG DES KONTROLLSTANDARDS .....	5
<b>6. AUSWERTUNG UND BERECHNUNG .....</b>	<b>6</b>
6.1 BERECHNUNG DER STEIGUNG DER KALIBRIERFUNKTION .....	6
6.2 BERECHNUNG DES MULTIPLIKATORS .....	6
6.3 BERECHNUNGSFORMEL .....	6
6.4 ANGABE DES ERGEBNISSES.....	6
<b>7. REGELKARTEN .....</b>	<b>6</b>

	Erstellt	Geprüft und Freigegeben	gültig ab
Name			
Datum			

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-308
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 2/6

### Zielsetzung

Diese Prüfungsvorschrift ist geeignet zur Bestimmung von Benzoesäure in Grund- und Sickerwässern sowie in Eluaten.

### Kurzbeschreibung

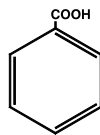
Benzoesäure wird nach Anreicherung und Filtration mittels HPLC mit UV-Detektion bestimmt.

### Störungen

Substanzen die im gleichen Spektralbereich Licht absorbieren und ähnliche chromatographische Eigenschaften aufweisen, können zu Störungen in der Bestimmung führen.

## 1. Substanzen

### 1.1 Benzoesäure



Molare Masse: 122,12 g/mol  
 Summenformel: C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>  
 MAK-Wert: -

## 2. Geräte und Chemikalien

- 2.1 Acetonitril z.B. Fisher Art.Nr.: A/0630 PB17
- 2.2 Wasser z.B. Merck Art.Nr.: 1.15333.2500
- 2.3 Wasser pH 3,5
- 2.4 Benzoesäure min. 99,9 %
- 2.5 HPLC-Säule, z.B. Agilent Zorbax Eclipse 4,6 x150; 5 µm XDB C8; Art.Nr.: 993967-906
- 2.6 HPLC-Anlage mit Pumpe und UV-Detektor z.B. Milton-Roy / Agilent
- 2.7 Personal Computer mit Auswertesoftware z.B. HP-Chemstation
- 2.8 Einwegspritzenfilter 0,2 µm, z.B. M &N Nr. 718007
- 2.9 Tetrahydrofuran Uvasol, z.B. Merck
- 2.10 SPE-Festphase M&N SB
- 2.11 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M
- 2.12 Laborübliche Gerätschaften

### Herstellung von 2.3: Wasser pH 3,5

1000 ml dest. Wasser (2.2) werden mit 1-molarer Schwefelsäure (2.11) auf den pH von 3,5 eingestellt.

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-308
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 3/6

### 3. Standardlösungen

#### *3.1 Kalibrierstandards*

- 3.1.1 Benzoessäure-Stammlösung 10000 mg/l
- 3.1.2 Benzoessäure-Lösung 20 mg/l
- 3.1.3 Benzoessäure-Lösung 10 mg/l
- 3.1.4 Benzoessäure-Lösung 1 mg/l
- 3.1.5 Benzoessäure-Lösung 0,2 mg/l
- 3.1.6 Benzoessäure-Lösung 0,1 mg/l

#### **Herstellung von 3.1.1: Benzoessäure -Stammlösung (10000 mg/l)**

Von der Benzoessäure werden genau 1000 mg in einen 100 ml - Messkolben eingewogen und mit 50 ml Acetonitril (2.1) versetzt. Nach vollständiger Auflösung und Temperierung auf 20 °C wird bis zur Eichmarke mit Acetonitril (2.1) aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.2: Benzoessäure (20,0 mg/l)**

0,2 ml der Stammlösung (3.1) werden in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20° C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.3: Benzoessäure (10 mg/l)**

50 ml der Standardlösung (3.2) werden in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.4: Benzoessäure (1 mg/l)**

1 ml der Standardlösung (3.2) wird in einen 20 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.5: Benzoessäure (0,2 mg/l)**

1 ml der Standardlösung (3.2) wird in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### **Herstellung von 3.1.6: Benzoessäure (0,1 mg/l)**

0,5 ml der Standardlösung (3.2) wird in einen 100 ml - Messkolben pipettiert und nach Temperierung auf 20 °C mit dest. Wasser zur Eichmarke aufgefüllt.

#### *3.2 Kontrollstandard*

- 3.2.1 Benzoessäure-Stammlösung 10000 mg/l
- 3.2.2 Benzoessäure-Kontrollstandard 20 mg/l

Die Herstellung der Kontrollstandardlösungen erfolgt analog der Herstellung der Kalibrierstandardlösungen 3.1.1 und 3.1.2. Es ist darauf zu achten, dass die für die Herstellung der Kontrollstandards eingesetzte Benzoessäure von einem anderen Hersteller als die für die Bereitung der Kalibrierstandards benutzten Benzoessäure stammt.

Die Standardlösungen (Kalibrier- und Kontrollstandards) müssen kühl und dunkel aufbewahrt werden.

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-308
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 4/6

#### 4. Probenvorbereitung

##### *4.1 Probenaufbereitung*

Die Festphasensäule (2.10) wird mit 2 Säulenvolumen Methanol und 2 Säulenvolumen dest. Wasser (2.2) konditioniert. Nach erfolgter Konditionierung ist darauf zu achten, dass die Festphasensäule nicht mehr trockenläuft!

1000 ml der klaren bzw. über 0,45 µm-Membranfilter filtrierten Wasserprobe werden langsam über die konditionierte Festphasensäule gesaugt. Nachdem die gesamte Wasserprobe über die Säule gesaugt ist, wird mit 3 ml dest. Wasser (2.2) nachgewaschen.

Die Festphasensäule wird durch Durchleitung eines Luftstroms getrocknet. Die Extraktion der Benzoesäure erfolgt mit 2 x 0,5 ml 1M Schwefelsäure (2.11) in einen 2 ml-Messkolben. Der Messkolben wird nach Temperierung auf 20° C mit 1M NaOH bis zur Eichmarke aufgefüllt. 1 ml dieser Lösung werden mittels Einmal-Spritze über einen 0,2 µm-Spritzenfilter (2.8) in ein Autosampler-Vial filtriert. Diese Lösung wird mittels HPLC/UV analysiert.

##### *4.2 Blindwertbestimmung*

1000 ml des zur Analyse benutzten Wassers (2.2) werden wie eine Probe behandelt. Die Bestimmung des Blindwertes hat arbeitstäglich zu erfolgen. Der Wert der Blindwertmessung wird in die entsprechende Blindwert-Regelkarte eingetragen.

#### 5. Messung

Vor Beginn der Messung hat sich der ausführende Mitarbeiter von der Funktionstauglichkeit der HPLC-Anlage zu überzeugen.

##### *5.1 HPLC-Parameter*

Säule: Chromatographiesäule, z.B. Agilent Zorbax Eclipse 4,6 x 150 mm, 5 µm XDB C<sub>8</sub>  
 Art.Nr.: 993967-906  
 Laufmittel: Wasser-Acetonitril-Gradient (V/V)  
 Flußrate: 1,0 ml/min  
 Injektionsmenge: 20 µl  
 Druck: ca. 60 bar  
 Temperatur: 30 °C  
 Detektor: UV  
 Wellenlänge: 228 nm  
 Spalt: 10 nm  
 Response Time: 0,5 Sekunden

##### **Wasser-Acetonitril-Gradient**

A: Wasser pH 3,0 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

B: Acetonitril

Zeit [Min]	A [%]	B [%]
0	99	1
4	98	2
8	75	25
10	0	100
12	0	100
13	99	1
16	99	1

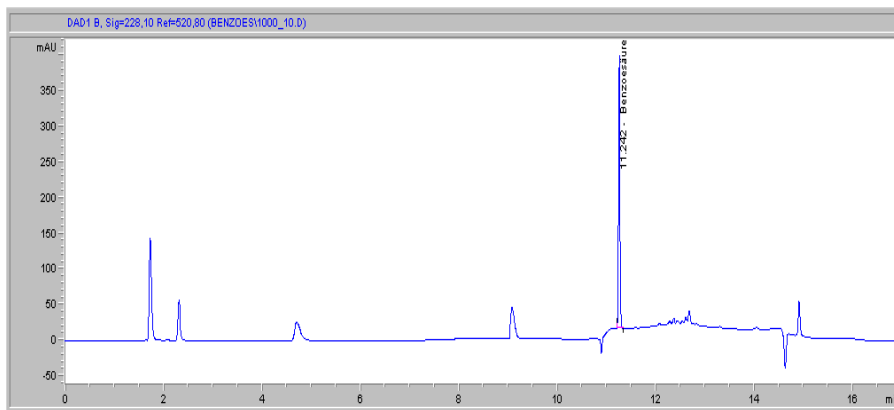
Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-308
GmbH & Co.		Revision 1
Analytisches Labor	Prüfanweisungen	Seite 5/6

### 5.2 Chromatogramm

Eine Standardlösung mit einer Konzentration von 0,1 mg/l muß noch gut auswertbare Peaks ergeben. Die Linearität muß sich über einen Bereich von 0,1 mg/l bis 20 mg/l erstrecken. Sollte dies nicht der Fall sein, muß gerätespezifisch optimiert werden. Messlösungen mit einer Konzentration > 20 mg/l müssen entsprechend mit Acetonitril (2.1) verdünnt werden.

Unter diesen Bedingungen wird folgendes Chromatogramm erhalten (die zusätzlichen Signale vor der Benzoessäure stammen von anderen Carbonsäuren, die für eine andere Analyse benötigt werden):

Standardlösung 10 mg/l



### 5.3 Retentionszeiten (typisch; abhängig vom Zustand der HPLC - Trennsäule)

Benzoessäure                    11,2 Minuten

### 5.4 Erstellen der Kalibrierfunktion:

Es wird eine Bezugsfunktion aus 5 Punkten mit den Standardlösungen nach 3.1.2 bis 3.1.6 erstellt. Die Kalibrierung ist zu erneuern, wenn die Überprüfung nach 5.5 eine unzulässig hohe Abweichung ergeben hat.

### 5.5 Messung des Kontrollstandards

Das fehlerfreie Arbeiten des Messgerätes und die Gültigkeit der Kalibrierung wird durch die Messung eines Kontrollstandards (3.2.2) überprüft. Dies hat arbeitstäglich zu erfolgen. Bei Abweichungen von mehr als  $\pm 10\%$  von der Soll - Konzentration, ist die Kalibrierung neu zu erstellen. Das Ergebnis der Kontrollstandardmessung wird in die entsprechende Kontrollstandard-Regelkarte eingetragen.

Umweltschutz Nord	Prüfungsvorschrift	AQS-SPV-308
GmbH & Co.	Prüfanweisungen	Revision 1
Analytisches Labor		Seite 6/6

## 6. Auswertung und Berechnung

Die Datenaufnahme und -auswertung erfolgt mittels PC mit entsprechender Software. Die Quantifizierung erfolgt über externen Standard mit Mehrpunktkalibrierung.

### 6.1 Berechnung der Steigung der Kalibrierfunktion

$$\frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = b$$

- n: Anzahl der Messwertpaare  
y: Konzentration der Standardlösung in mg/l  
x: Fläche der jeweiligen Standardlösung  
b: Steigung der Kalibrierfunktion

### 6.2 Berechnung des Multiplikators

$$\frac{V}{E_P} = F_M$$

- F<sub>M</sub>: Berechnungsfaktor  
V: Volumen des endgültigen Extraktes in ml  
E<sub>P</sub>: Eingesetzte Probenmenge in ml

### 6.3 Berechnungsformel

$$F_P * b * F_M = C$$

- C: Konzentration in der Wasserprobe in mg/l  
F<sub>P</sub>: Fläche der Probenkomponente  
b: Steigung der Kalibrierfunktion (aus 6.1)  
F<sub>M</sub>: Berechnungsfaktor (aus 6.2)

### 6.4 Angabe des Ergebnisses

Die Massenkonzentration wird auf 0,01 mg/l gerundete Werte, jedoch mit nicht mehr als 2 signifikanten Stellen angegeben.

## 7. Regelkarten

- Blindwert-Regelkarte Wasser  
Wiederfindungs-Regelkarte Wasser  
Kontrollstandard-Regelkarte



## Anhang 5.5

### **Analysenverfahren zur Bestimmung von Metaboliten – Hausverfahren Universität Frankfurt a.M. (Stand Juni 2004)**

Das Verfahren dient der Untersuchung von Metaboliten (polare Kohlenwasserstoffe) in der wässrigen Phase.

Zuerst wird eine Flüssig-Flüssig-Extraktion durchgeführt. Dazu werden 0,5 l einer Wasserprobe in einen 1l - Scheidetrichter gegeben und mit verdünnter Natronlauge auf einen pH-Wert von  $\geq 12$  eingestellt. Anschließend wird die Probe dreimal mit jeweils 60 ml Dichlormethan ausgeschüttelt, wobei die Kohlenwasserstoffe aus der Probe entfernt werden. Danach wird die Probe mit 10 %iger Salzsäure auf einen pH-Wert von  $\leq 2$  angesäuert und einer dreimaligen Schüttelextraktion mit jeweils 50 ml Diethylether unterzogen. Die zusammengeführten Extrakte werden über  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  getrocknet und im Vakuum-Rotationsverdampfer auf ca. 2-4 ml eingeengt und anschließend eingedampft.

Das getrocknete Extrakt wird nachfolgend mit 1ml Dichlormethan angelöst. Für die Derivatisierung mit Trimethylsulfoniumhydroxid (TMSH, pro mg Extrakt 33  $\mu\text{l}$ ) wird eine Teilmenge entnommen, welche ca. 1 mg Extrakt enthält. Als Katalysator fungiert Pyridin (pro mg Extrakt 7  $\mu\text{l}$ ). Die Derivatisierung erfolgt unter Erwärmung der Probe auf  $60^\circ\text{C}$  innerhalb einer Stunde. Dabei konvertieren die organischen Säuren zu Methylester. Als interner Standard wird Squalan (ca. 5  $\mu\text{g}$  pro mg Extrakt) hinzu gegeben.

Die Detektion erfolgt mittels GC/MS. Die Probe wird auf eine FS-Supreme-5 „fused silica“ Kapillarsäule (30 m;  $\varnothing$  0,25 mm) gegeben. Das Ofentemperaturprogramm des Gaschromatographen wird von  $40^\circ\text{C}$  bis  $300^\circ\text{C}$  mit einer Steigerungsrate von  $4^\circ\text{C}/\text{min}$  gefahren und für 30 min gehalten.

Die Identifikation der Metabolite erfolgt anhand der Massenspektren, wobei ein Responsefaktor von 1 angenommen wird.

## **Anhang 5.6**

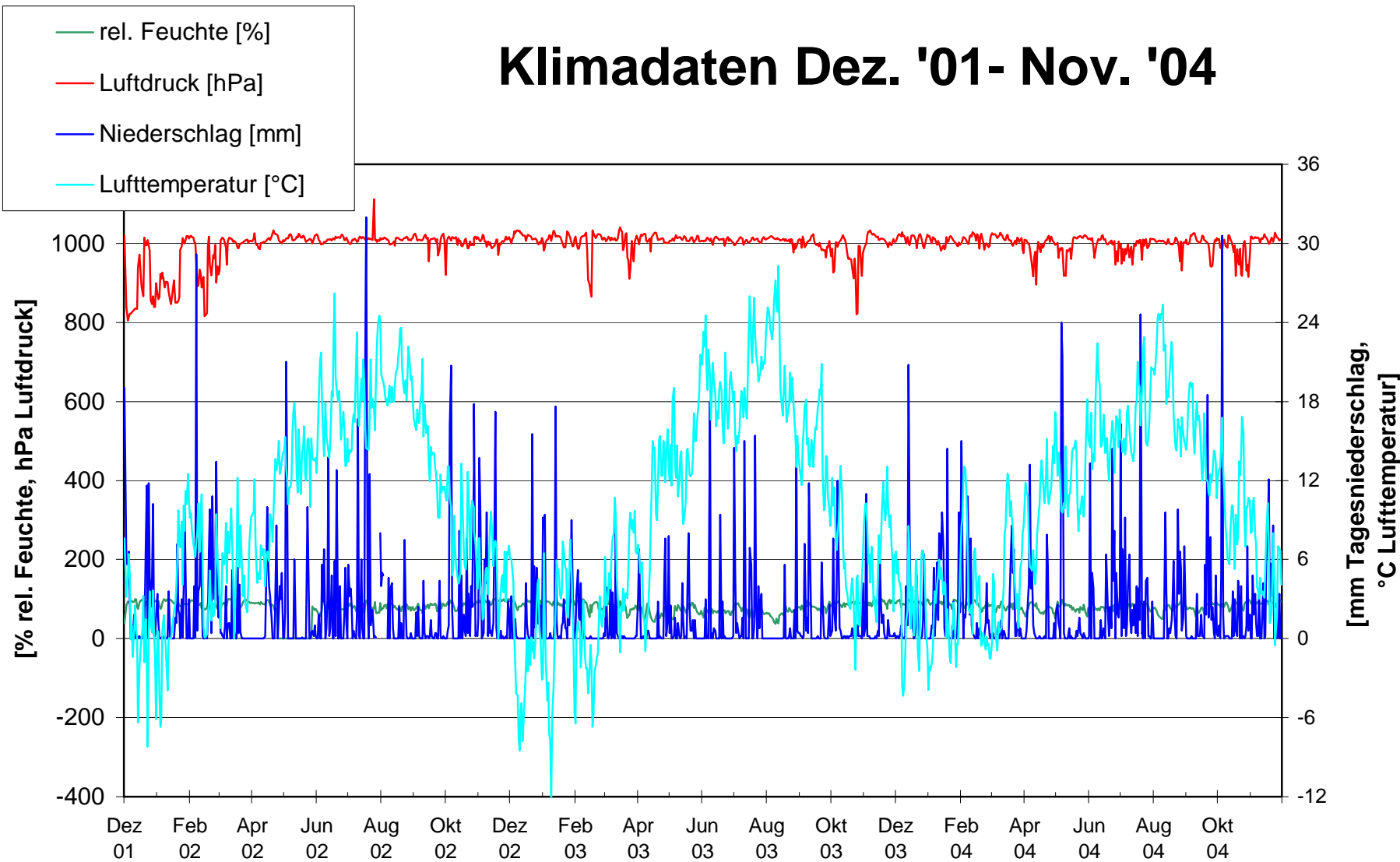
### **Bestimmung von niedermolekularen Aliphaten in Wasser mittels Headspace-GC-FID-Methode (Hausmethode Dr. Weßling Laboratorien GmbH)**

#### Kurzbeschreibung des Verfahrens

Das Analysenverfahren beruht auf dem Prinzip der Dampfphaseanalyse. Durch Erwärmen der Wasserprobe werden die leichtflüchtigen Komponenten in die Gasphase ausgetrieben. Ein Aliquot der Gasphase wird mittels eines automatischen Probengebers in den Gaschromatographen injiziert. Dort werden die Einzelsubstanzen nach der Trennung auf einer Kapillarsäule mit Hilfe eines Flammenionisations-Detektors erfasst. Die Identifikation erfolgt aufgrund der Retentionszeit.

# Anhang 6.1

## Klimadaten Dez. '01- Nov. '04



Anhang 6.2

# Bodentemperatur Dez. 2001- Nov. 2004

