



Milser Straße 37  
33729 Bielefeld  
Tel.: (0521) 977 10-0  
Fax.: (0521) 977 10-20  
info@ifua.de

Projekttitel:

**Hintergrundgehalte von BTEX und LCKW in  
Böden urbaner und ländlicher Räume in den  
Tiefenstufen 1-2 m unter GOK  
Anhang 2**

Auftraggeber:

Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern als Ge-  
schäftsführendes Land für das Länderfinanzierungspro-  
gramm "Wasser und Boden"

Bearbeitung:

Monika Machtolf (Dipl. Oec. troph.)  
Florian Raecke (Dipl.-Geogr.)  
Dr. Dietmar Barkowski (Dipl.-Chem.)

Projekt-Nr.:

P 205082

Datum:

März 2007

Gesellschafter:

- Dr. Dietmar Barkowski (Dipl.-Chem.)  
von der Industrie- und Handelskammer Ostwestfalen zu Bielefeld öffentlich bestellter und vereidigter  
Sachverständiger für Gefährdungsabschätzung für die Wirkungspfade Boden-Gewässer und Boden-  
Mensch sowie Sanierung (Bodenschutz und Altlasten, Sachgebiete 2, 4 und 5)
- Michael Bleier (Dipl.-Ing.)
- Petra Günther (Dipl.-Biol.)  
von der Industrie- und Handelskammer Ostwestfalen zu Bielefeld öffentlich bestellte und vereidigte Sach-  
verständige für Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Pflanze/Vorsorge zur Begrenzung  
von Stoffeinträgen in den Boden und beim Auf- und Einbringen von Materialien sowie für Gefährdungsab-  
schätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Bodenschutz und Altlasten, Sachgebiete 3 und 4)  
Wirtschaftsmediatorin (IHK)
- Monika Machtolf (Dipl. Oec. troph.)

## Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenhänge zwischen Stoffgehalten	1
1.1.	Datenaufbereitung - Stoffdaten	1
1.2.	Auswertung - Stoffdaten	3
2.	Zusammenhänge zwischen Stoffgehalten und Potenziellen Einflussgrößen	9
2.1.	Datenaufbereitung - Bodendaten	9
2.2.	Auswertung	12
2.2.1.	Korrelationsanalysen	12
2.2.2.	Regressionsanalysen	16
3.	Literatur	23

### Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Häufigkeitsverteilung der Toluolgehalte (Bodenluft), unveränderte und logarithmierte Werte	2
Abbildung 2:	Streudiagramm für Toluol: Bodenluft- und Feststoffgehalte	6
Abbildung 3:	Streudiagramm für Ethylbenzol: Bodenluft- und Feststoffgehalte	7
Abbildung 4:	Streudiagramm für o-Xylol: Bodenluft- und Feststoffgehalte	7
Abbildung 5:	Streudiagramm für m-,p-Xylol: Bodenluft- und Feststoffgehalte	8
Abbildung 6:	Streudiagramm für Tetrachlorethen: Bodenluft- und Feststoffgehalte	8
Abbildung 7:	Streudiagramm zum Zusammenhang Grobbodenanteil – o-Xylolgehalt im Feststoff	13
Abbildung 8:	Streudiagramm zum Zusammenhang Sandanteil – 1,1,1-Trichlorethan in der Bodenluft	15
Abbildung 9:	Streudiagramm zum Zusammenhang Carbonatgehalt – 1,1,1-Trichlorethan in der Bodenluft	16

### Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Bodenluft: Korrelationen der Stoffkonzentrationen	3
Tabelle 2:	Feststoff: Korrelationen der Stoffkonzentrationen	5
Tabelle 3:	Korrelationen zwischen Bodenluft- und Feststoffgehalten	5
Tabelle 4:	Übersetzung von Kohlenstoff- und Carbonatgehalt in metrische Angaben	10
Tabelle 5:	Korrelationsmatrix Einflussgrößen – Stoffgehalte	12
Tabelle 6:	Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen für Bodenluft	20
Tabelle 7:	Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen für Feststoff	20

## **1. Zusammenhänge zwischen Stoffgehalten**

### **1.1. Datenaufbereitung - Stoffdaten**

Im Fall der in dieser Studie betrachteten Stoffe treten geringe Stoffgehalte häufiger auf als hohe Stoffgehalte, sodass rechtsschiefe Häufigkeitsverteilungen vorliegen. Statistische Verfahren, die auf der Berechnung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten beruhen, setzen bivariat (zweidimensional) normalverteilte Daten voraus (SACHS 1992). Da die Prüfung der bivariaten Normalverteilung in der Praxis problematisch ist, können behelfsweise die beiden univariaten Verteilungen geprüft werden (BAHRENBERG et al. 1990).

Ein geeignetes und hier eingesetztes Mittel zur Erlangung einer zumindest angenäherten Normalverteilung besteht in der Logarithmierung (natürlicher Logarithmus,  $\ln$ ) der Daten (STOYAN et al. 1997). Eine solche nichtlineare Transformation führt allerdings zu einer Beeinflussung der Ergebnisse, sodass diese genau genommen nur für die transformierten Daten gelten und ist insofern nicht gänzlich unumstritten (NORCLIFFE 1981).

Abbildung 1 zeigt beispielhaft für die Bodenluftgehalte an Toluol die Häufigkeitsverteilung der realen, unveränderten und der logarithmierten Messwerte. Es wird deutlich, dass aufgrund der Vielzahl an sehr niedrigen Werten (unterhalb der Bestimmungsgrenze) nur eine leichte Verbesserung erreicht werden kann. Dies gilt analog für alle anderen Stoffe. Normalverteilung kann nicht erreicht werden. Aufgrund der insgesamt günstigeren Verteilung der logarithmierten Werte werden diese jedoch als Grundlage der weiteren statistischen Auswertungen herangezogen. Die zum Teil sehr geringe Anzahl realer Messwerte (oberhalb der Bestimmungsgrenze) und die (damit teilweise zusammenhängende) nicht gegebene Normalverteilung der Daten hat zur Folge, dass die Ergebnisse der statistischen Auswertungen mit Unsicherheiten verbunden sind.

Projekt-Nr.: P 205082

**Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Toluolgehalte (Bodenluft), unveränderte und logarithmierte Werte**

Klasse	Mittelpunkt	Häufigkeit
1	0,0	73
2	0,8	0
3	1,6	0
4	2,4	0
5	3,2	0
6	4,0	0
7	4,8	0
8	5,6	0
9	6,4	1

\*\*\*\*\*

unveränderte Werte

Klasse	Mittelpunkt	Häufigkeit
1	-4,0	0
2	-3,4	45
3	-2,8	12
4	-2,2	14
5	-1,6	2
6	-1,0	0
7	-0,4	0
8	0,2	0
9	0,8	0
10	1,4	0
11	2,0	1

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*

\*\*

logarithmierte Werte

Als Ausreißer werden diejenigen Elemente eines Datenpools bezeichnet, die gegenüber den anderen Elementen durch extrem abweichende Werte gekennzeichnet sind. Sie zeigen bei statistischen Auswertungen eine verzerrende Wirkung und sind somit auszuschließen (BAHRENBURG et al 1990). Es liegen verschiedene Verfahren zur Ausreißeridentifizierung vor; es wurde hier der Ausreißertest nach Grubbs (in Anlehnung an DIN 1981) eingesetzt. Dieser Test setzt Normalverteilung voraus und prüft lediglich den obersten bzw. untersten Einzelwert einer Messreihe. Zur Prüfung des höchsten Wertes wird von diesem der arithmetische Mittelwert abgezogen, das Ergebnis durch die Standardabweichung dividiert und das Resultat mit einem vom Stichprobenumfang abhängigen Tabellenwert abgeglichen.

Zur Prüfung des kleinsten Wertes wird dieser vom arithmetischen Mittel abgezogen, das Ergebnis durch die Standardabweichung dividiert und das Resultat

Projekt-Nr.: P 205082

wiederum mit dem Tabellenwert abgeglichen. Arithmetisches Mittel und Standardabweichung werden dabei aus der vorliegenden Stichprobe (logarithmierte Werte) einschließlich des ausreißerverdächtigen Wertes errechnet. Übersteigt der berechnete Prüfwert den Tabellenwert, so kann der untersuchte Einzelwert als Ausreißer angesehen werden. Es kann als Signifikanzniveau  $\alpha = 0,01$  oder  $\alpha = 0,05$  verwendet werden. In dieser Studie werden die bei einem Signifikanzniveau von 99 % ( $\alpha = 0,01$ ) ermittelten Ausreißer von den Auswertungen ausgeschlossen.

Ausreißer wurden für Toluol und m-,p-Xylol (50/S2), für Trichlormethan (49/S1), 1,1,1-Trichlorethan und Tetrachlormethan (66/S1) sowie für Trichlorethen (66/S2) erkannt und ausgeschlossen.

## 1.2. Auswertung - Stoffdaten

Tabelle 1 zeigt die Korrelationen zwischen den Bodenluftgehalten der betrachteten Stoffe. In keiner Probe nachgewiesene Stoffe (trans- und cis-1,2-Dichlorethen, 1,1,2-Trichlorethan und Vinylchlorid) können nicht mit einbezogen werden.

Tabelle 1: Bodenluft: Korrelationen der Stoffkonzentrationen

		BTEX					LCKW					
		Benzol	Toluol	Ethylbenzol	o-Xylol	m-,p-Xylol	Dichlormethan	Trichlormethan	1,1,1-Trichlorethan	Tetrachlormethan	Trichlorethen	Tetrachlorethen
BTEX	Benzol	****	0,00	1,00	1,00	0,00	-0,06	0,35	-0,03	-0,03	-0,05	-0,03
	Toluol	0,00	****	0,00	0,00	0,67	0,00	-0,14	-0,15	0,20	0,06	0,13
	Ethylbenzol	1,00	0,00	****	1,00	0,00	-0,06	0,35	-0,03	-0,03	-0,05	-0,03
	o-Xylol	1,00	0,00	1,00	****	0,00	-0,06	0,35	-0,03	-0,03	-0,05	-0,03
	m-,p-Xylol	0,00	0,67	0,00	0,00	****	0,06	-0,08	-0,12	0,07	0,05	0,17
LCKW	Dichlormethan	-0,06	0,00	-0,06	-0,06	0,06	****	-0,11	-0,13	-0,14	-0,19	0,10
	Trichlormethan	0,35	-0,14	0,35	0,35	-0,08	-0,11	****	0,49	0,40	0,39	0,30
	1,1,1-Trichlorethan	-0,03	-0,15	-0,03	-0,03	-0,12	-0,13	0,49	****	0,34	0,71	0,55
	Tetrachlormethan	-0,03	0,20	-0,03	-0,03	0,07	-0,14	0,40	0,34	****	0,62	0,58
	Trichlorethen	-0,05	0,06	-0,05	-0,05	0,05	-0,19	0,39	0,71	0,62	****	0,78
	Tetrachlorethen	-0,03	0,13	-0,03	-0,03	0,17	0,10	0,30	0,55	0,58	0,78	****

Erläuterung: Korrelationskoeffizienten = 0,4 = blau, = 0,7 = rot.

Projekt-Nr.: P 205082

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass signifikante Korrelationen (hier definiert mit  $r \geq 0,4$ ) nur innerhalb der beiden Stoffgruppen auftreten. Ein Korrelationskoeffizient von 1 wird für Benzol, Ethylbenzol und o-Xylol ermittelt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass für diese drei Stoffe lediglich jeweils ein realer Messwert vorliegt. Aus dem Sachverhalt, dass diese Stoffe in derselben Probe nachgewiesen wurden, entsteht der größtmögliche Korrelationskoeffizient. Innerhalb der BTEX korrelieren auch die Gehalte aller anderen Substanzen miteinander sehr deutlich.

Durch den Ausschluss des Toluol- und des m-,p-Xylolwertes aus der Probe 50/S2 ist eine Korrelation dieser beiden Substanzen mit Benzol, Ethylbenzol und o-Xylol nicht mehr möglich, da einzig diese Probe für die genannten drei Substanzen einen messbaren Bodenluftgehalt aufweist. Würden die beiden Ausreißer nicht eliminiert, läge der Korrelationskoeffizient jeweils bei  $r = 0,67$ .

Innerhalb der LCKW bestehen die größten Zusammenhänge zwischen den Gehalten an Tri- und Tetrachlorethen sowie Trichlorethen und 1,1,1-Trichlorethan. Trichlormethan zeigt nur maximal mittlere Korrelationen, Dichlormethan weist keine Zusammenhänge mit anderen Stoffen auf. Wären einzelne Werte des Standortes 66 nicht als Ausreißer identifiziert und ausgeschlossen worden, würden die Korrelationskoeffizienten teilweise etwas höher ausfallen (z. B. Trichlorethen und 1,1,1-Trichlorethan:  $r = 0,83$  statt  $0,71$ , Tri- und Tetrachlormethan:  $r = 0,78$  statt  $0,62$ ).

Tabelle 2 zeigt die Korrelationen zwischen den Feststoffgehalten der betrachteten Stoffe. In keiner Probe nachgewiesene Stoffe (Benzol, Dichlormethan, trans- und cis-1,2-Dichlorethen, Trichlormethan, 1,1,1- und 1,1,2-Trichlorethan, Tetrachlormethan, Trichlorethen und Vinylchlorid) können nicht mit einbezogen werden. Für die nachgewiesenen Stoffe liegt die Anzahl realer Messwerte zwischen zwei und vier und ist damit extrem klein. Auf eine Ausreißereliminierung wurde daher verzichtet. Die Korrelationskoeffizienten sind daher mit sehr großen Unsicherheit behaftet.

Projekt-Nr.: P 205082

**Tabelle 2: Feststoff: Korrelationen der Stoffkonzentrationen**

		BTEX				LCKW
		Toluol	Ethylbenzol	o-Xylol	m-,p-Xylol	Tetrachlorethen
<b>BTEX</b>	Toluol	****	0,61	0,68	0,94	-0,05
	Ethylbenzol	0,61	****	0,88	0,75	-0,03
	o-Xylol	0,68	0,88	****	0,89	-0,04
	m-,p-Xylol	0,94	0,75	0,89	****	-0,05
<b>LCKW</b>	Tetrachlorethen	-0,05	-0,03	-0,04	-0,05	****

**Erläuterung:** Korrelationskoeffizienten = 0,4 = blau, = 0,7= rot.

Analog zu den Zusammenhängen bei den Bodenluftgehalten sind auch für die Feststoffgehalte hohe Korrelationen zwischen den BTEX-Gehalten zu erkennen. Tetrachlorethen als einziger in Feststoffproben nachgewiesener Vertreter der LCKW-Gruppe korreliert mit den BTEX-Gehalten erwartungsgemäß nicht.

In Tabelle 3 sind die Korrelationskoeffizienten der Zusammenhänge zwischen Bodenluft- und Feststoffgehalten aufgeführt. Grundlage sind für Bodenluft die aureißerbereinigten, für Feststoff die nicht bereinigten Daten.

**Tabelle 3: Korrelationen zwischen Bodenluft- und Feststoffgehalten**

		Feststoffgehalte				
		BTEX				LCKW
<b>Bodenluftgehalte</b>		Toluol	Ethylbenzol	o-Xylol	m-,p-Xylol	Tetrachlorethen
<b>BTEX</b>	Benzol	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03
	Toluol	-0,17	-0,13	-0,16	-0,18	0,15
	Ethylbenzol	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03
	o-Xylol	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03
	m-,p-Xylol	-0,10	-0,07	-0,09	-0,11	0,25
<b>LCKW</b>	Dichlormethan	-0,11	-0,08	-0,10	-0,12	-0,11
	Trichlormethan	0,01	-0,04	0,04	0,04	-0,05
	1,1,1-Trichlorethan	-0,06	-0,04	-0,05	-0,06	0,16
	Tetrachlormethan	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06	0,45
	Trichlorethen	-0,09	-0,06	-0,08	-0,09	0,48
	Tetrachlorethen	-0,10	0,00	-0,02	-0,07	0,50

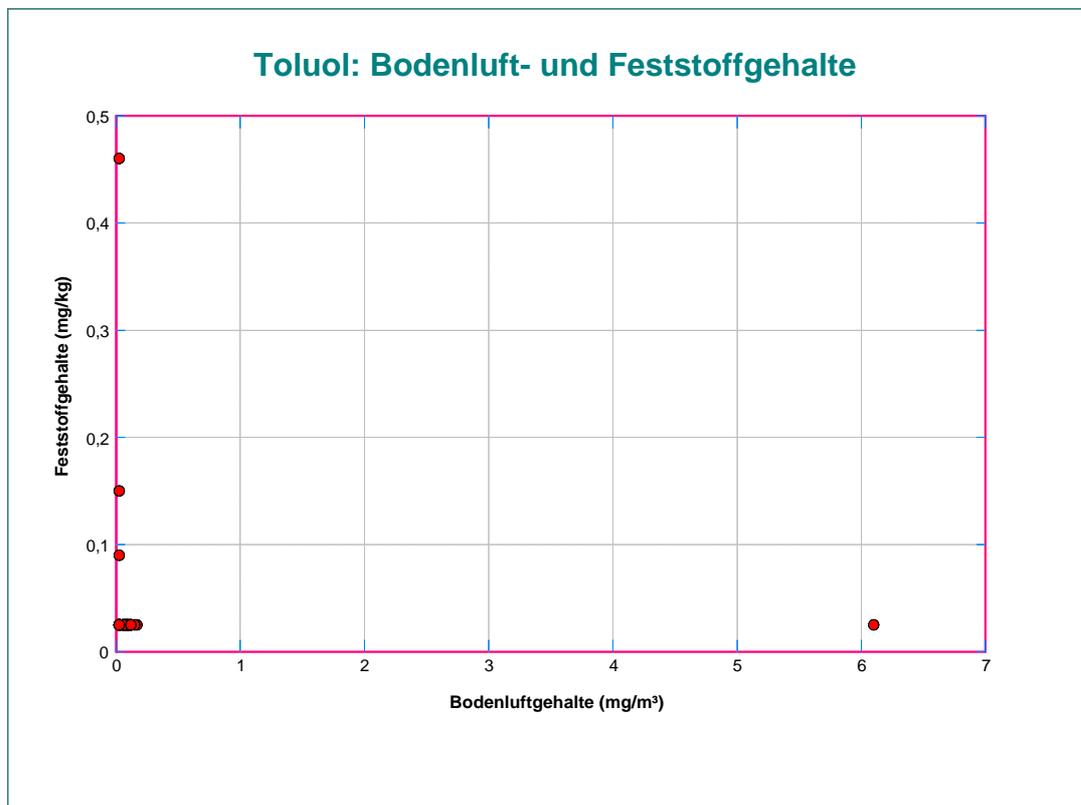
**Erläuterung:** Korrelationskoeffizienten = 0,4 = blau, = 0,7= rot.

Projekt-Nr.: P 205082

Es zeigt sich, dass auf Grundlage der vorliegenden Daten bei den BTEX Zusammenhänge zwischen Feststoff- und Bodenluftgehalten nicht erkennbar sind. Der einzige im Feststoff nachgewiesene LCKW Tetrachlorethen zeigt mittlere Zusammenhänge mit Tetrachlormethan sowie Tri- und Tetrachlorethen.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Verhältnis von Bodenluft- und Feststoffgehalten noch einmal stoffspezifisch in Form von Streudiagrammen.

Abbildung 2: Streudiagramm für Toluol: Bodenluft- und Feststoffgehalte



Projekt-Nr.: P 205082

Abbildung 3: Streudiagramm für Ethylbenzol: Bodenluft- und Feststoffgehalte

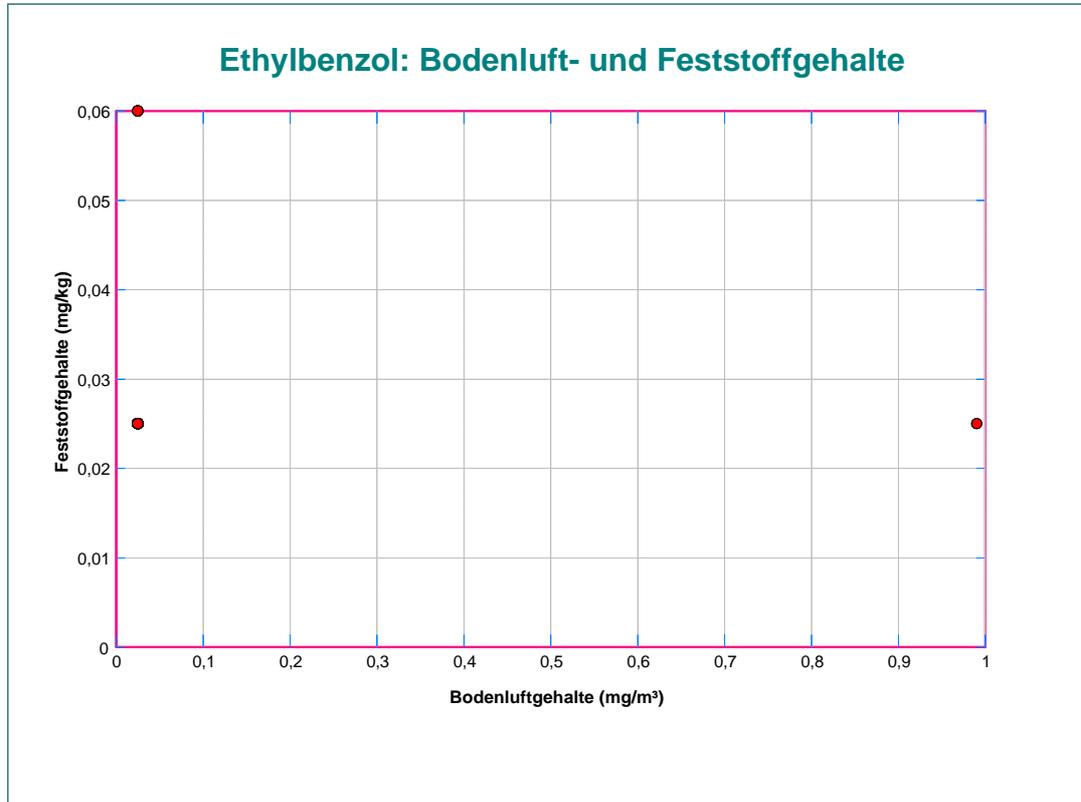
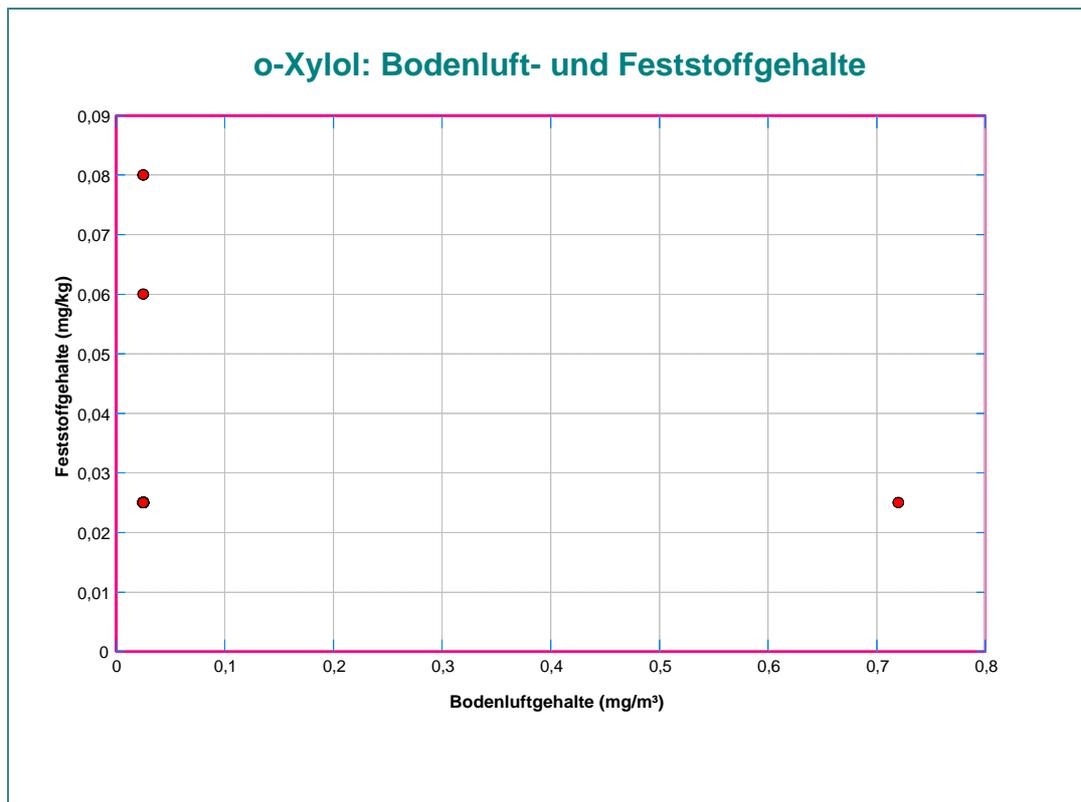


Abbildung 4: Streudiagramm für o-Xylol: Bodenluft- und Feststoffgehalte



Projekt-Nr.: P 205082

Abbildung 5: Streudiagramm für m-,p-Xylol: Bodenluft- und Feststoffgehalte

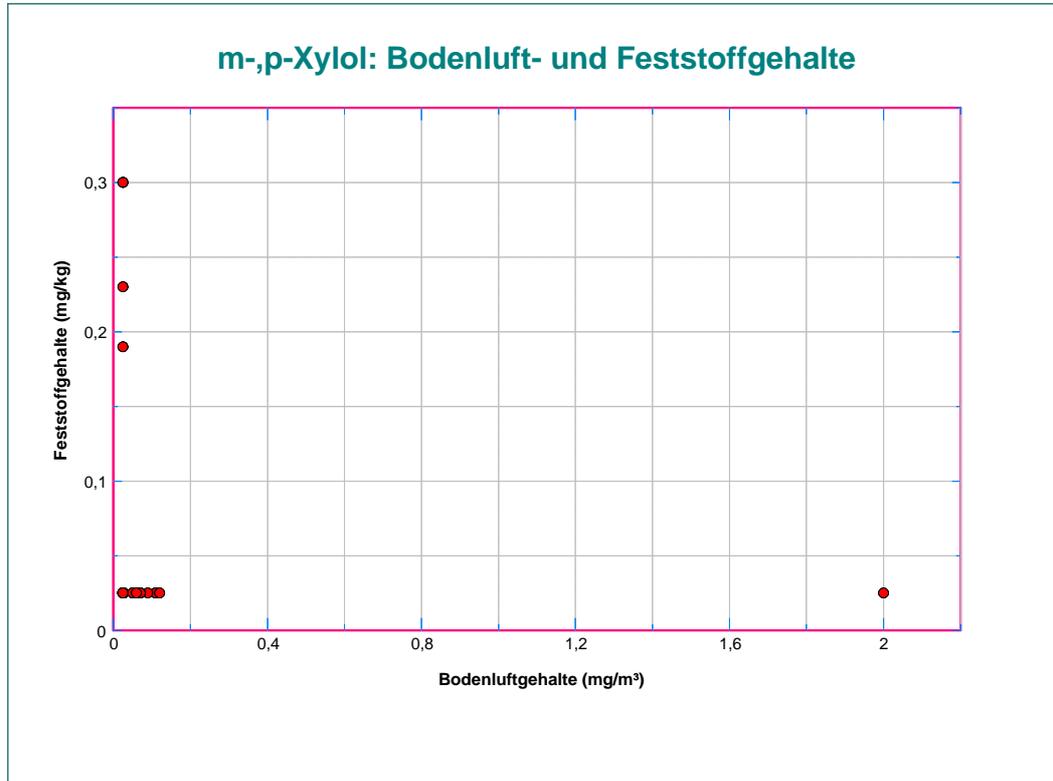
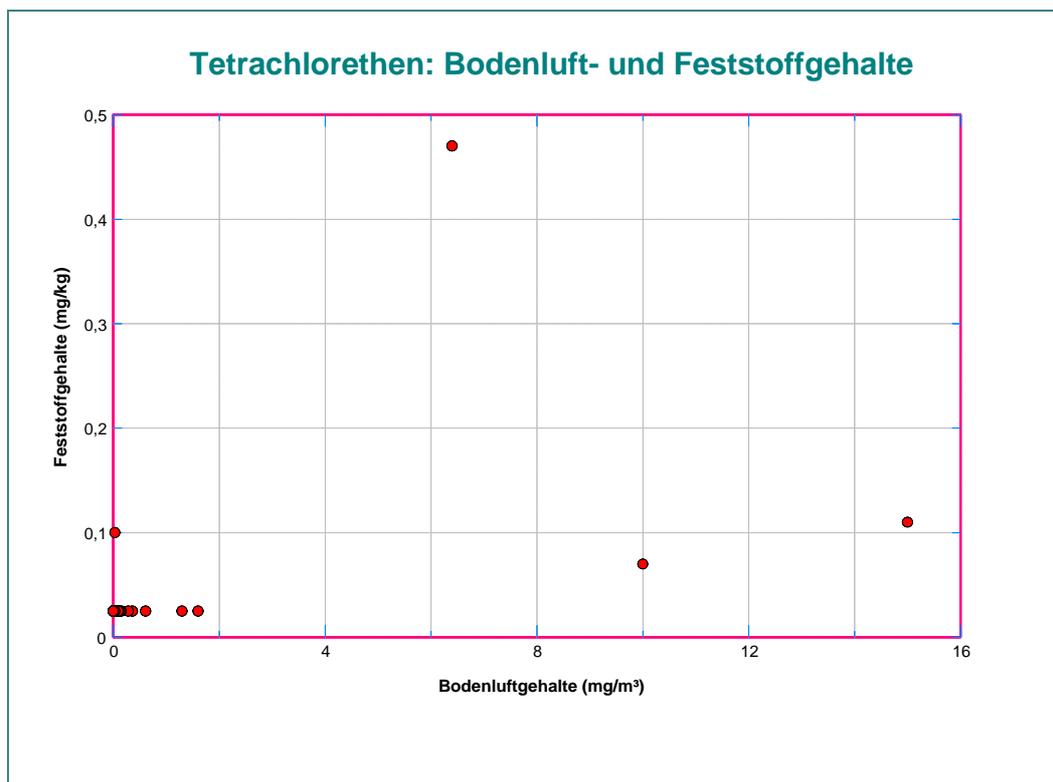


Abbildung 6: Streudiagramm für Tetrachlorethen: Bodenluft- und Feststoffgehalte



## 2. Zusammenhänge zwischen Stoffgehalten und Potenziellen Einflussgrößen

Mit Hilfe von Korrelations- und Regressionsanalysen sowie grafischen Auswertungen war zu prüfen, ob und wie die gemessenen Bodenluft- und Feststoffgehalte mit potenziellen Einflussgrößen zusammenhängen. Als denkbare Einflussgrößen wurden folgende Standort- und Profildaten (bezogen auf die Probenahmetiefe (1,90 – 2,0 m)) angesehen:

- Bodenart;
- Humusgehalt;
- Bodenfeuchte;
- Kohlenstoffgehalt;
- Carbonatgehalt;
- Grobbodenanteil;
- Probennahme aus Auffüllung (ja/nein);
- Auffüllung oberhalb der Probennahmetiefe (ja/nein);
- Umfeld (urban, ländlich, belastet);
- Luftdruckdynamik;
- Niederschlag;
- Temperatur.

Zur Einbeziehung dieser Daten in die statistischen Auswertungen war eine Aufbereitung erforderlich.

### 2.1. Datenaufbereitung - Bodendaten

Die profilbezogenen Angaben zu Bodenart, Bodenfeuchte, Kohlenstoffgehalt, Carbonatgehalt und Humusgehalt sind nach AG BODEN 2005 aufgenommen worden und bedurften der Umwandlung in metrische Daten.

Aus den Angaben zur Bodenart, z. B. "Su2" für "schwach schluffiger Sand" lassen sich metrische Daten erzeugen, indem eine Übersetzung in die Anteile der Korngrößenfraktionen Ton, Sand und Schluff vorgenommen wird. Sand ist in allen untersuchten Proben Hauptbodenart, mit Ausnahme der drei Proben vom Standort 66 und einer Probe vom Standort 69 (jeweils sandiger Schluff). Meist liegt sogar Sand in Reinform vor. Zur Erzeugung metrischer Daten ist es daher

Projekt-Nr.: P 205082

ausreichend, den Sandanteil in Prozent in die Auswertungen mit einzubeziehen. Das Beispiel Su2 enthält 0 bis < 5 Masse-% Ton, 10 bis < 25 Masse-% Schluff und 70 bis < 90 Masse-% Sand. Hier wurde daher von 80 Masse-% Sand ausgegangen.

Die Sandfraktion wurde weiter differenziert in Fein-, Mittel- und Grobsand. Als ja/nein-Variablen (sog. "Dummy-Variablen", vgl. Kapitel 2.2.2) wurden in die Auswertungen eingebracht: "Hauptanteil = Feinsand" sowie "Hauptanteil = Mittelsand". Grobsand kommt nur in zwei Proben vor.

Kohlenstoff- und Carbonatgehalt werden nach AG BODEN 2005 mit Kürzeln wie "k1" bzw. "c1" aufgenommen. Die entsprechenden Klassen von Masse-% wurden in eine metrische Angabe übersetzt (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4: Übersetzung von Kohlenstoff- und Carbonatgehalt in metrische Angaben**

<b>Kohlenstoffgehalt</b>	<b>Carbonatgehalt</b>	<b>Masse-% laut AG Boden</b>	<b>Übersetzung in metrische Angabe (Masse-%)</b>
-	c0	0	0
k1	c1	< 0,5	0,25
k2	c2	0,5 bis < 2	1
	c3	2 bis < 10	5

Die untersuchten Proben sind erwartungsgemäß fast ausschließlich humusfrei. Lediglich in einer Probe wurde Humus angetroffen; der Gehalt liegt hier bei < 1 Masse-%. Diese Angabe wurde in 0,5 Masse-% übersetzt. Auf Grundlage nur eines Wertes sind Abhängigkeiten zwar prinzipiell kaum erkennbar, dennoch wurde diese Variable zunächst in die Auswertungen mit einbezogen.

Die Bodenfeuchte, die ebenfalls mit Kurzzeichen wie "feu1" aufgenommen wird, kann nach AG BODEN 2005 nicht in prozentuale Anteile o. ä. übersetzt werden. Zur Erlangung metrischer Daten wurde daher die Ziffer des Kurzzeichens (z. B. "feu1" = 1) herangezogen.

Eine Aufbereitung der Angaben zum Grobbodenanteil war nicht erforderlich.

Projekt-Nr.: P 205082

Aus den horizontbezogenen Angaben "Benennung" ("Oberboden", "gewachsener Untergrund" oder "Auffüllung"), "geologische Kennzeichnung" ("anthropogen" oder "nicht anthropogen") und "Beimengungen" (Angaben u. a. zu technologischen Substraten wie etwa Bauschutt) wurden als Dummy-Variablen "Probenahme aus Auffüllung" bzw. "Probenahme nicht aus Auffüllung" sowie "Oberhalb Probennahmetiefe Auffüllung vorhanden" bzw. "Oberhalb Probennahmetiefe Auffüllung nicht vorhanden" abgeleitet. Allerdings sind nur zwei Sondierungen vollständig auffüllungsfrei (Standort 59); die Probenahme selbst erfolgte bei 70 der insgesamt 78 Sondierungen aus dem gewachsenen Untergrund.

Auch die Informationen zum Umfeld wurden als Dummy-Variablen einbezogen (belastet ja/nein; urban ja/nein, ländlich ja/nein).

Zur Berücksichtigung der Luftdruckdynamik wurden zwei Differenzen gebildet: Zum einen zwischen Luftdruck am Probennahmetermin und am Vortag, zum anderen zwischen Luftdruck am Probennahmetermin und zwei Tage zuvor. Zusätzlich wurden auch die Luftdrücke aller drei Tage selbst mit einbezogen. Beim Niederschlag wurde analog vorgegangen. Hier wurde ferner die Niederschlagssumme über alle drei Tage gebildet und als zusätzliche Variable berücksichtigt.

Eine Aufbereitung der Angaben zur Temperatur war nicht erforderlich. Für Luftdruck und Temperatur wurden zusätzlich auch die Angaben zum Zeitpunkt der Probennahme einbezogen.

Als Einflussgröße auf den Bodenluftgehalt wurde zudem auch der Feststoffgehalt der jeweiligen Substanz mit in die Regressionsanalysen eingebracht, soweit im Feststoff Gehalte oberhalb der Bestimmungsgrenze gefunden wurden.

Im Hinblick auf die durchgeführten Korrelations- und Regressionsanalysen wäre analog zu den Korrelationsanalysen innerhalb der Stoffgehalte (vgl. Kapitel 1) auch für die potenziellen Einflussgrößen eine Normalverteilung der Daten zu fordern. Die Verteilung stellt sich je nach Parameter sehr unterschiedlich dar: zum Teil rechtsschief, zum Teil eher linksschief (Sandanteil), zum Teil mehrgipflig (Luftdruck Wetterstation), zum Teil normalverteilt (Luftdruck Probennahme PN). Eine Normalverteilung zu erreichen, war bei den nicht normalverteilten Daten nicht möglich. Zur Abmilderung der Rechtsschiefe wurden die Daten fol-

Projekt-Nr.: P 205082

gender Variablen logarithmiert: 3-Tagessumme der Niederschläge, Grobbodenanteil und Carbonatgehalt.

## 2.2. Auswertung

### 2.2.1. Korrelationsanalysen

Tabelle 5 zeigt das Ergebnis der durchgeführten Korrelationsanalysen.

Tabelle 5: Korrelationsmatrix Einflussgrößen – Stoffgehalte

Potenzielle Einflussgrößen	Bodenluft											Feststoff				
	BTEX					LCKW						BTEX				LCKW
	Benzol	Toluol	Ethylbenzol	o-Xylol	m-,p-Xylol	Dichlormethan	Trichlormethan	1,1,1-Trichlorethan	Tetrachlormethan	Trichlorethen	Tetrachlorethen	Toluol	Ethylbenzol	o-Xylol	m-,p-Xylol	Tetrachlorethen
Luftdruck	-0,21	-0,26	-0,21	-0,21	-0,18	-0,01	-0,03	0,21	0,15	0,21	0,21	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,09
Luftdruck vor 1 T.	-0,18	-0,22	-0,18	-0,18	-0,18	-0,01	0,02	0,17	0,13	0,18	0,22	0,06	0,06	0,07	0,07	-0,08
Luftdruck vor 2 T.	-0,12	-0,21	-0,12	-0,12	-0,14	0,07	0,03	0,19	0,15	0,17	0,21	0,11	0,11	0,14	0,13	-0,14
Luftdr. Diff. vor 1 T.	-0,03	-0,05	-0,03	-0,03	0,02	0,00	-0,09	0,03	0,02	0,02	-0,06	-0,06	-0,06	-0,07	-0,07	-0,01
Luftdr. Diff. vor 2 T.	-0,14	-0,11	-0,14	-0,14	-0,07	-0,12	-0,09	0,04	0,02	0,07	0,00	-0,11	-0,12	-0,14	-0,14	0,06
Niederschlag	0,18	0,00	0,18	0,18	0,07	0,20	0,03	-0,03	-0,06	-0,06	-0,12	-0,08	-0,06	-0,07	-0,08	0,02
Niedersch. vor 1 T.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,07	-0,07	-0,07	-0,08	-0,10	-0,15	-0,08	-0,06	-0,07	-0,08	-0,01
Niedersch. vor 2 T.	-0,03	-0,01	-0,03	-0,03	0,05	0,02	-0,08	0,00	-0,03	-0,01	-0,04	-0,08	-0,06	-0,07	-0,08	0,12
Nied. Diff. vor 1 T.	0,11	0,00	0,11	0,11	-0,01	0,06	0,08	0,04	0,03	0,05	0,06	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
Nied. Diff. vor 2 T.	0,17	0,00	0,17	0,17	0,04	0,17	0,06	-0,03	-0,04	-0,05	-0,09	-0,04	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03
Sum. Nied. 3 Tage	0,14	-0,02	0,14	0,14	0,05	-0,17	0,19	0,25	0,08	0,22	0,05	-0,23	-0,17	-0,20	-0,24	0,23
Temp. Wetterstation	0,05	0,17	0,05	0,05	0,11	-0,03	0,14	<b>1,00</b>	0,16	-0,01	-0,06	<b>0,41</b>	0,37	<b>0,46</b>	<b>0,47</b>	0,00
Temperatur PN	-0,07	0,09	-0,07	-0,07	-0,03	0,01	-0,17	-0,23	-0,02	-0,10	0,07	0,27	0,10	0,15	0,24	-0,11
Luftdruck PN	-0,12	-0,10	-0,12	-0,12	-0,07	-0,17	0,17	0,34	0,21	0,28	0,11	0,05	0,05	0,07	0,06	0,13
Bodenfeuchte	0,02	-0,03	0,02	0,02	-0,08	0,08	0,04	0,05	0,05	0,06	0,15	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sandanteil	0,06	0,09	0,06	0,06	0,00	0,21	<b>-0,52</b>	<b>-0,59</b>	-0,37	<b>-0,50</b>	-0,31	-0,05	-0,11	-0,13	-0,10	-0,05
Anteil Grobboden	-0,05	-0,11	-0,05	-0,05	0,00	-0,09	-0,06	0,14	0,05	0,16	0,17	0,34	<b>0,44</b>	<b>0,53</b>	<b>0,46</b>	0,32
Kohlenstoff	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	0,05	-0,09	-0,04	-0,05	-0,05	-0,07	-0,06	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,04
Carbonat	-0,05	-0,14	-0,05	-0,05	-0,03	-0,19	0,26	<b>0,45</b>	0,28	0,36	0,13	-0,04	0,00	0,00	-0,04	-0,08
Humusgehalt	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,02

Erläuterung: Korrelationskoeffizienten = 0,4 bzw.  $\leq -0,4$  = blau, = 0,7 bzw.  $\leq -0,7$  = rot.



Projekt-Nr.: P 205082

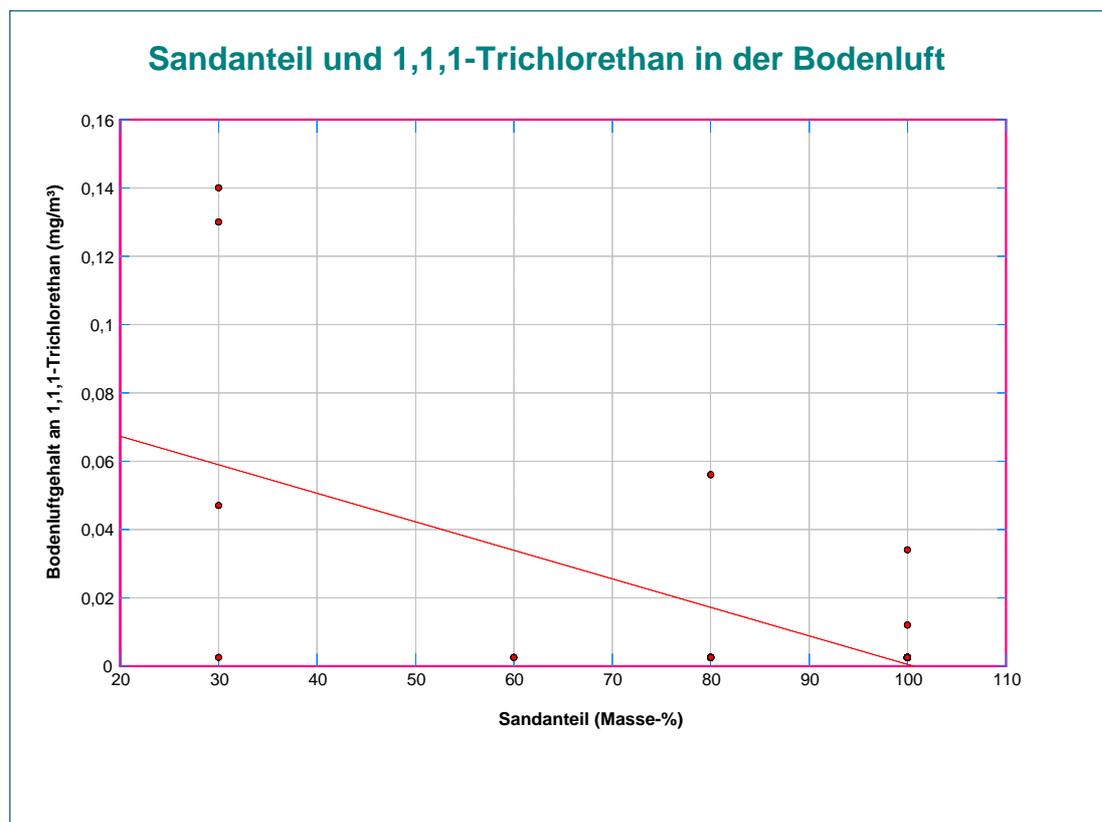
Allerdings verbergen sich hinter dem Punkt für 0 Vol.-% Grobbodenanteil und < 0,05 mg/kg o-Xylol (auf halbe Bestimmungsgrenze gesetzt = 0,025 mg/kg) 65 Wertepaare, hinter dem Punkt für 1 Vol.-% Grobbodenanteil und < 0,05 mg/kg o-Xylol sechs Wertepaare, hinter dem Punkt für 2 Vol.-% Grobbodenanteil und < 0,05 mg/kg o-Xylol sowie 5 Vol.-% Grobbodenanteil und < 0,05 mg/kg o-Xylol und 50 Vol.-% Grobbodenanteil und 0,08 mg/kg o-Xylol jeweils zwei Wertepaare. Die vermeintliche Korrelation basiert daher letztlich auf drei Messwerten oberhalb der Bestimmungsgrenze (einmal 0,06 mg/kg, zweimal 0,08 mg/kg o-Xylol), die sämtlich von einem Standort (45; Mülheim a.d.R., Zinkhüttenstraße) stammen. Dort wurden in der Probennahmetiefe hohe Grobbodenanteile von etwa 50 Vol.-% angetroffen. Belastbare Aussagen lassen sich hieraus nicht ableiten.

Positive Zusammenhänge ähnlicher Stärke werden auch zwischen der Temperatur und den Feststoffgehalten an Benzol und den beiden Xylole angezeigt. Hintergrund ist derselbe Sachverhalt: Am Standort 45, wo die einzigen Feststoffgehalte etwa für o-Xylol ermittelt wurden, wurde mit 18,3 °C auch die höchste Lufttemperatur gemessen. Sachlich-inhaltliche Zusammenhänge zwischen Temperatur und Feststoffgehalten erscheinen zunächst nicht plausibel.

Der betroffene Standort 45 ist aufgrund eines CKW-Schadens in der näheren Umgebung als belastet eingestuft.

Für die Bodenluftgehalte einiger LCKW zeigt die Tabelle negative Zusammenhänge mit dem Sandanteil im Feinboden an: Je geringer der Sandanteil, desto höher die Stoffgehalte. Abbildung 8 zeigt die Korrelation am Beispiel 1,1,1-Trichlorethan als Streudiagramm.

Abbildung 8: Streudiagramm zum Zusammenhang Sandanteil – 1,1,1-Trichlorethan in der Bodenluft



Das Diagramm erweckt den Eindruck, als sei der Zusammenhang hier möglicherweise geringfügig besser abgesichert. Allerdings verbirgt sich diesmal hinter jedem Punkt oberhalb von 0,005 mg/m<sup>3</sup> (auf halbe Bestimmungsgrenze gesetzt = 0,0025 mg/m<sup>3</sup>) jeweils nur ein Wertepaar. Die gesamte Korrelation wird daher von nur sechs Wertepaaren gestützt. Die entsprechenden sechs Messwerte stammen von drei Standorten (21 – Mülheim a.d.R., Mellinghoferstraße/Mühlenstraße, "belastet"; 22 – Mülheim a.d.R., Akazienallee, Raffelbergpark, "urban"; 66 – Ludwigshafen, Friesenheim, Schwedlerstr. Flur 3277/6, "belastet").

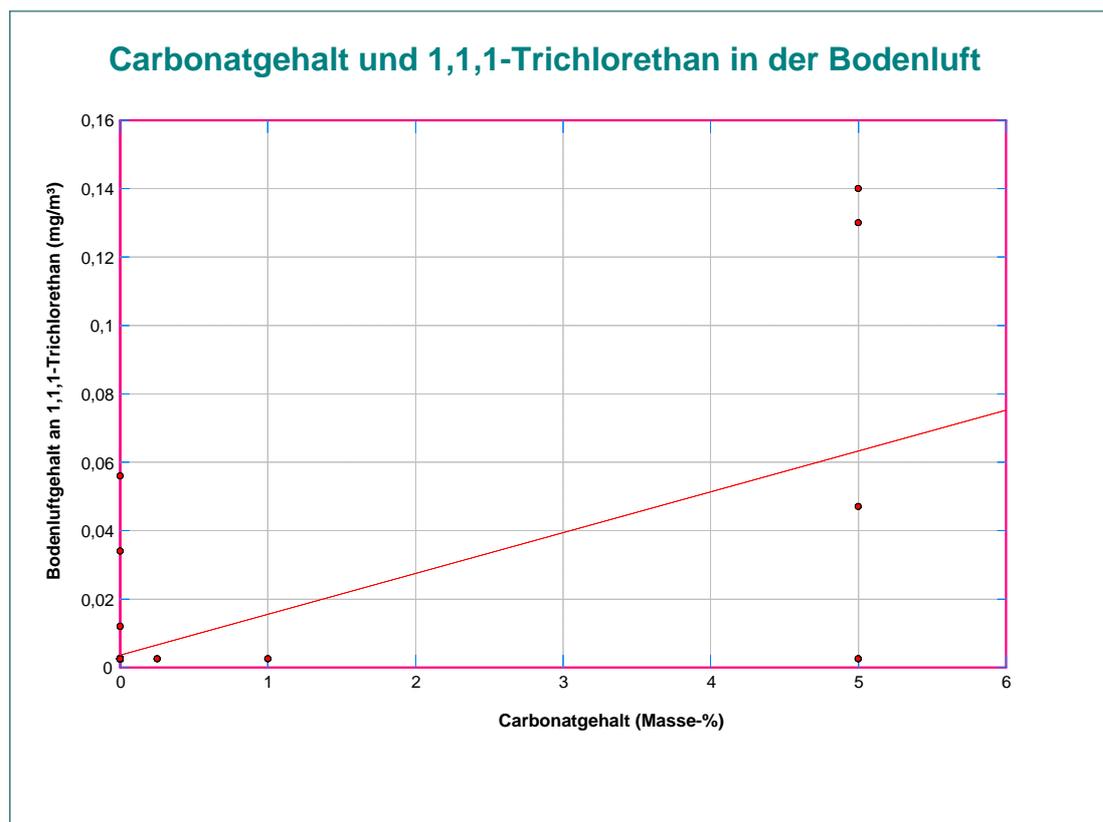
Zwar liegen somit bei Sandanteilen von etwa 30 Masse-% drei von vier Stoffgehalten (= 75 %) oberhalb der Bestimmungsgrenze – gegenüber zwei von 52 Stoffgehalten (< 4 %) bei Sandanteilen von annähernd 100 %. Doch ist auch in diesem Fall die Datenbasis viel zu gering, um nicht einem nur zufälligen, scheinbaren Zusammenhang aufzusitzen.

In der Tabelle wird als weiterer signifikanter Zusammenhang eine mittlere positive Korrelation zwischen dem Carbonatgehalt und der Bodenluftkonzentration an

Projekt-Nr.: P 205082

1,1,1-Trichlorethan angezeigt. Abbildung 9 zeigt die Korrelation als Streudiagramm.

**Abbildung 9: Streudiagramm zum Zusammenhang Carbonatgehalt – 1,1,1-Trichlorethan in der Bodenluft**



Beim höchsten ermittelten Carbonatgehalt von 5 Masse-% treten tatsächlich die höchsten Stoffgehalte in der Bodenluft auf. Allerdings gilt dies nur für die beiden Maximalwerte von 0,13 und 0,14 mg/m<sup>3</sup>, die beide in Proben vom Standort 66 (s. o.) gemessen wurden. Gehalte von bis zu 0,056 mg/m<sup>3</sup> treten allerdings auch in carbonatfreien Proben auf. Daher ist auch in diesem Fall zunächst nicht von einem tatsächlichen Zusammenhang der beiden Variablen auszugehen.

### 2.2.2. Regressionsanalysen

Es war die Frage zu klären, ob die Gehalte der hier betrachteten Substanzen in der Bodenluft und/oder im Feststoff zumindest angenähert aus der Ausprägung einer oder mehrerer Einflussgrößen abgeschätzt werden kann. Neben den Variablen, die bereits in die Korrelationsanalysen eingeflossen sind, kommen nun zusätzlich auch die ja/nein- bzw. Dummy-Variablen sowie die Stoffgehalte selbst

Projekt-Nr.: P 205082

zum Tragen (Feststoffgehalte eines Stoffes als Einflussgröße auf seine Bodenluftgehalte).

Zur Klärung dieser Frage wurden schrittweise Regressionsanalysen durchgeführt, die

- ermitteln, ob und welche der einbezogenen potenziellen Einflussgrößen (unabhängige Variablen) die Stoffgehalte in welchem Ausmaß beeinflussen;
- eine Rangfolge der als relevant erkannten Einflussgrößen aufstellen und es somit ermöglichen, relevante von weniger relevanten bis hin zu vernachlässigbaren Einflussgrößen zu unterscheiden;
- den durch eine Einflussgröße jeweils erklärten Varianzanteil und den durch alle relevanten Einflussgrößen zusammen erklärten Varianzanteil des betrachteten Stoffgehalts erkunden.

Während im Rahmen der Korrelationsanalyse also der statistische Zusammenhang zwischen Variablen untersucht wird, ist es Ziel der Regressionsanalyse, eine Variable aus einer bzw. mehreren anderen Variablen (bivariate bzw. multiple Regression) zu berechnen.

Im folgenden Kasten sind nähere Ausführungen zur angewendeten Methode der schrittweisen Regressionsanalyse enthalten.

### **Schrittweise Regressionsanalyse**

In der vorliegenden Bearbeitung findet die lineare Regressionsanalyse Anwendung (Alternativen stellen exponentielle, polynomische Funktionen dar).

$$\text{Lineare Regression: } y = c + \sum_{i=1}^n a_i x_i$$

mit: y: abhängige Variable, c: Konstante;  $x_i$  : unabhängige Variable mit spezifischem Regressionskoeffizient  $a_i$

Im Rahmen der schrittweisen Regressionsanalyse treten die partielle und die multiple Korrelation in Erscheinung, die im Folgenden kurz erläutert werden.

### Partielle Korrelation

In die Korrelationskoeffizienten  $r_{ij}$  gehen nicht nur der Zusammenhang zwischen den Variablen  $i$  und  $j$  ein, sondern auch die Einflüsse weiterer Variablen  $k$ , mit denen  $i$  und  $j$  selbst wieder korreliert sind. Um nun den Einfluss dieser weiteren Variablen  $k$  auf den Zusammenhang zwischen  $i$  und  $j$  möglichst auszuschließen, wird der partielle Korrelationskoeffizient  $r_{ij,k}$  berechnet, der für die anschließende Regressionsanalyse von Bedeutung ist. Ziel ist es, den unmittelbaren, direkten Zusammenhang zwischen den Variablen  $i$  und  $j$  zu erfassen. Der Vergleich der partiellen Korrelationskoeffizienten der betrachteten Variablen zeigt, welche der Variablen im Hinblick auf einen möglichen gegenseitigen Einfluss relevant und welche weniger relevant sind.

Die Formel für den partiellen Korrelationskoeffizienten lautet im Falle einer einzigen Variablen  $k$ :

$$r_{ij,k} = \frac{r_{ij} - r_{ki}r_{kj}}{(1 - r_{ki}^2)(1 - r_{kj}^2)}$$

### Multiple Korrelation

Mit Hilfe des multiplen Korrelationskoeffizienten wird die Korrelation zwischen einer abhängigen Variablen  $y$  und einer Kombination weiterer unabhängiger Variablen  $x_i$  charakterisiert. Im konkreten Fall wird dabei die Korrelation zwischen dem tatsächlichen Wert der Variablen  $y$  und dem aus der Kombination unabhängiger Variablen mittels linearer Regression geschätzten Wert der Variablen  $y$  bestimmt. Der Wert des multiplen Korrelationskoeffizienten gibt Auskunft darüber, wie gut die abhängige Variable aus den unabhängigen Variablen geschätzt werden kann.

### Durchführung der Regressionsanalyse

In der vorliegenden Studie wird das Verfahren der schrittweisen, multiplen, linearen Regression mit "vorwärtsgerichteter Auswahl" angewendet:

- Im 1. Schritt wird eine Regression der abhängigen Variablen  $y$  mit derjenigen unabhängigen Variablen  $x_1$  durchgeführt, die am meisten mit der abhängigen Variablen korreliert ist; unter Ausklammerung von  $x_1$  schließt eine partielle Korrelationsanalyse an.
- Im 2. Schritt wird diejenige unabhängige Variable  $x_2$  in die Regression mit einbezogen, deren partielle Korrelation mit der abhängigen Variablen  $y$  am größten ist; unter Ausklammerung von  $x_2$  wird wiederum eine partielle Korrelationsanalyse durchgeführt.
- Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis durch die Einbeziehung weiterer Variablen keine signifikante Verbesserung des Ergebnisses mehr eintritt<sup>1</sup>. Die Berechnung der Kon-

<sup>1</sup> Die Entscheidung, ob eine Variable in die Regression einbezogen wird, erfolgt über den sog. F-Test. Mit diesem wird geprüft, ob die Hinzunahme einer Variablen zu einer signifikanten Verbesserung des Modells führt (mit einem Signifikanzniveau  $\alpha \leq 0,05$ ). Dieser Test wird bei jedem Schritt der Regression für alle Variablen durchgeführt. Durch Hinzuziehung weiterer Variablen in die Regression kann es daher vorkommen, dass eine bereits in einem früheren Schritt in die Regressionsgleichung einbezogene Variable wieder aus der Gleichung entfernt wird, wodurch sich das Ergebnis insgesamt aber verbessert.

Projekt-Nr.: P 205082

stanten sowie der anderen Koeffizienten erfolgt für jeden Schritt der multiplen Regression erneut.

Das Auftreten der Variablen, ihre Reihenfolge und ihr Anteil an der multiplen Korrelation geben statistische Hinweise darauf, welche Parameter in welchem Ausmaß einen Einfluss auf die abhängige Variable (hier der Gehalt eines Stoffes in den untersuchten Klärschlammproben) haben. Da zur Bestimmung des partiellen Korrelationskoeffizienten die Korrelation der in dem jeweiligen Schritt der Regressionsanalyse einbezogenen unabhängigen Variable mit allen anderen (außer der ausgeschlossenen) Variablen geprüft wird, können nur jene Proben berücksichtigt werden, die für *alle* in die Regressionsanalyse eingehenden Variablen einen Wert aufweisen. Dies führt zu einer mitunter deutlich reduzierten Probenzahl und somit eingeschränkter Datenbasis. In den meisten Fällen können in die Regressionsanalyse also nicht alle der in die durchgeführten Korrelationsanalysen einbezogenen Proben eingehen. Daraus resultieren Abweichungen zwischen dem Korrelationskoeffizienten, der in den Regressionsanalysen im ersten Schritt für die abhängige und die einbezogene unabhängige Variable berechnet wird, und dem in den Korrelationsanalysen berechneten Korrelationskoeffizienten. Bei gleicher Datenbasis sind diese beiden Werte natürlich identisch.

Das Endergebnis der multiplen Korrelation (d. h. die multiple Korrelation nach dem letzten Schritt) zeigt an, wie gut ein Stoffgehalt durch die aufgelisteten Variablen approximiert werden kann. Das multiple Bestimmtheitsmaß nach dem letzten Schritt gibt Auskunft über den Varianzanteil (nach Multiplikation mit 100 in Prozent ausgedrückt) der abhängigen Variable, der insgesamt durch die aufgelisteten Variablen erklärt wird.

Hinsichtlich der Datengrundlage ist anzumerken, dass sich die Analysen auf die logarithmierten Stoffgehalte sowie teilweise auch logarithmierten anderen Variablen (vgl. Kapitel 2.1) beziehen.

Die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen für die Bodenluftgehalte werden in Tabelle 6 aufgeführt; Tabelle 7 enthält die Ergebnisse für die Feststoffgehalte. Die in den Tabellen nicht genannten Variablen können gemäß der derzeitigen Datenlage als nicht relevant bzw. als im Vergleich zu den aufgeführten Variablen weniger relevant eingestuft werden.

Projekt-Nr.: P 205082

**Tabelle 6: Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen für Bodenluft**

Stoffgruppe	Stoff	Anzahl Fälle*	Schritt	Variable*	Mehrfachkorrelation	Bestimmtheitsmaß	Koeffizient	Konstante
<b>BTEX</b>	Benzol	40	1	keine Zusammenhänge	-			
	Toluol	40	1	Temperatur Wetterstation (8:00)	0,3163	0,1000	0,1341	-4,7353
	Ethylbenzol	40	1	keine Zusammenhänge	-	-	-	-
	o-Xylol	40	1	keine Zusammenhänge	-	-	-	-
	m-,p-Xylol	40	1 2	"belastet" Temperatur Wetterstation (8:00)	0,4192 0,5231	0,1757 0,2737	0,8715 0,1074	-5,0638
<b>LCKW</b>	Dichlormethan	40	1 2	Niederschlag Luftdruck PN	0,5219 0,5906	0,2724 0,3489	0,1023 0,0147	-18,5486
	Trichlormethan	40	1	Sandanteil	0,4736	0,2243	-0,0291	-2,3965
	1,1,1-Trichlorethan	69**	1 2 3	Sandanteil Grobbodenanteil Bodenfeuchte	0,6042 0,6412 0,6885	0,3650 0,4111 0,4713	-0,0308 0,0691 1,0117	-5,0957
	Tetrachlormethan	40	1	Temperatur PN	0,3625	0,1314	0,0155	-8,5284
	Trichlorethen	40	1	Temperatur PN	0,5362	0,2875	0,0927	-9,6574
	Tetrachlorethen	40	1	Luftdruck vor 2 Tagen	0,3754	0,1409	0,0952	-101,9879

**Tabelle 7: Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen für Feststoff**

Stoffgruppe	Stoff	Anzahl Fälle*	Schritt	Variable*	Mehrfachkorrelation	Bestimmtheitsmaß	Koeffizient	Konstante
<b>BTEX</b>	Toluol	40	1	Temperatur PN	0,3194	0,1020	0,0297	-4,1584
	Ethylbenzol	40	1	Grobbodenanteil	0,5501	0,3026	0,2129	-0,7472
	o-Xylol	40	1	Grobbodenanteil	0,5501	0,3026	0,2129	-0,7472
	m-,p-Xylol	40	1	Temperatur PN	0,3194	0,1020	0,0207	-4,0159
<b>LCKW</b>	Tetrachlorethen	40	1	Grobbodenanteil	0,5501	0,3026	0,2129	-0,7472

\* "Anzahl Fälle" benennt die Anzahl der Datensätze (Proben), die in die schrittweise Regressionsanalyse einbezogen wurden. Datensätze, in denen eine oder mehrere der einbezogenen Variablen keinen Wert aufweist, werden nicht berücksichtigt. Dadurch sinkt die "Anzahl Fälle" auf unter 74 (Bodenluft) bzw. 78 (Feststoff) ab.

\*\* Für 1,1,1-Trichlorethan musste die Variable atmosphärische Temperatur entfernt werden, da sonst keine Analyse möglich war. Hierdurch liegt die Anzahl Fälle abweichend zu den anderen Substanzen bei 69.

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen lassen sich zusammenfassend und verallgemeinernd wie folgt kommentieren:

Projekt-Nr.: P 205082

- Die jeweils mit Hilfe der als relevant erkannten Einflussgrößen insgesamt erklärte Varianz der Stoffgehalte (= Bestimmtheitsmaß) liegt überwiegend deutlich unter 30 %.
- Es muss somit insgesamt festgehalten werden, dass den erkannten Zusammenhängen überwiegend nur geringe Korrelationen zugrunde liegen und von einer sehr großen Unsicherheit der Ergebnisse (und ihrer Interpretation) ausgegangen werden muss. Dies gilt insbesondere für die jeweils erst an nachgeordneter Position als statistisch relevant ermittelten Variablen.
- Am ehesten wird, sowohl auf die Bodenluft- als auch auf die Feststoffgehalte, ein Einfluss der Temperatur erkannt, und zwar zum einen der Lufttemperatur an der Wetterstation (8:00 Uhr) (Bodenluft BTEX), zum anderen die Temperatur zur Probennahme am Standort (Bodenluft LCKW; Feststoff BTEX).
- Auch die Luftdruckverhältnisse werden bei den LCKW teilweise als Einflussfaktor der Bodenluftgehalte erkannt.
- Im Hinblick auf die Feststoffgehalte kommt den Ergebnissen zufolge ansonsten dem Grobbodenanteil besonderes Gewicht zu.
- Die Standortumgebung kommt nur in einem Fall (m-, p-Xylol) zum Tragen.
- Ein Einfluss der Feststoffgehalte auf die Bodenluftgehalte wird nirgends erkannt.
- Bei vier Substanzen konnten überhaupt keine signifikanten Einflussgrößen identifiziert werden.

Hinreichend sichere Prognosen oder auch nur grobe Schätzungen von Stoffgehalten anhand bekannter Einflussgrößen sind somit diesen Ergebnissen zufolge nicht möglich.

Projekt-Nr.: P 205082

Die im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Korrelationsanalysen erstellten Streudiagramme zeigten zudem bereits die große Unsicherheit der statistisch erkannten Zusammenhänge mit Einflussgrößen, die im Rahmen der schrittweisen Regressionsanalysen ebenfalls wieder als statistisch relevant erkannt werden.

Projekt-Nr.: P 205082

### **3. Literatur**

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

BAHRENBURG, G, GIESE, E, NIPPER, J. (1990): Statistische Methoden in der Geographie 1. – Stuttgart, 3. Aufl.

NORCLIFFE, G. B. (1981): Schließende Statistik für Geographen – Eine Einführung. – Berlin, Heidelberg.

SACHS, L. (1992): Angewandte Statistik. – Berlin, Heidelberg. (7. Aufl.)

STOYAN, D., STOYAN, H., JANSEN, U. (1997): Umweltstatistik. – Statistische Verarbeitung und Analyse von Umweltdaten. – Leipzig.