

Programm Lebensgrundlage Umwelt  
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des  
Statusseminars des BWPLUS am 26. und 27. Februar 2002  
im Forschungszentrum Karlsruhe

**Boden- und Flächenressourcen-Management in Ballungsräumen:  
Innovative Erkundungsmethoden von Schadstoffbelastungen  
Vor-Ort-Analytik: Werkzeuge zur Minimierung von Probennahme-  
und Analytikaufwand**

von

*VEGAS*, Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. K. Batereau, Dipl.-Ing. M. Müller,

Dr.-Ing. B. Barczewski, Dr.-Ing. N. Klaas

Förderkennzeichen BWC 99006

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung  
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

# **Innovative Erkundungsmethoden von Schadstoffbelastungen Vor-Ort-Analytik: Werkzeuge zur Minimierung von Probennahme- und Analytikaufwand (Förderkennzeichen 99002)**

K. Batereau, M. Müller, B. Barczewski, N. Klaas

VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

## **Kurzfassung**

Im Rahmen des Projektes wurden neue Techniken und Messgeräte zur Vor-Ort-Erkundung kontaminierter Standorte entwickelt. Es wurden verschiedene Prototypen zur Messung von gelösten Schadstoffen im Grundwasser, gasförmigen Schadstoffen in der Bodenluft sowie Schadstoffen in Flüssigphase in der gesättigten und ungesättigten Zone entwickelt und im Labor getestet. Die Messgeräte für Bodenluft und für Schadstoffe in Flüssigphase wurden an verschiedenen Feldstandorten auf ihre Feldtauglichkeit untersucht. Diese Feldanwendungen zeigten, dass die Geräte robust und einfach in ihrer Handhabung sind. Mit dem Bodenluftmesssystem können semiquantitative Aussagen, d.h. Aussagen über vorhandene Schadstoffgruppen und Konzentrationsbereiche, gemacht werden. Mit gleichem finanziellem und zeitlichem Aufwand wie bei bisherigen Erkundungen kann ein dichteres Raster an Messungen erreicht werden und damit die Lage der Schadstoffe sowie das Schadstoffinventar zuverlässiger bewertet werden.

## **On-site assessment of contaminated land: application of detection systems and development of field screening instruments**

### **Summary**

In this project new techniques (methods, procedures) and devices for the on-site assessment of contaminated sites were developed. Different prototypes were built in order to be able to measure contaminants dissolved in ground water, gaseous contaminants in soil air and contaminants in liquid phase in the saturated and unsaturated zone. These devices were tested in the laboratory. The devices for gaseous contaminants and contaminants in phase were also tested in the field. These field tests showed that the equipment was robust and easy to handle. By measuring soil air, qualitative and semi-quantitative results can be obtained. With comparable expenses a more detailed grid of measurement locations can be assessed. This results in a better knowledge of the location of the contaminants as well as there estimated inventory.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Als Grundlage für eine zeit- und kostenoptimierte Erkundung von kontaminierten Altstandorten sollen im Rahmen des BWPLUS-Forschungsschwerpunktes "Boden- und Flächenressourcen-Management in Ballungsräumen" innovative Erkundungsmethoden entwickelt werden. Diese sollen zur Minimierung von Probennahme- und Analytikaufwand sowie zu statistisch besser gesicherten Ergebnissen bei der Erkundung beitragen. Hintergrund und Ziele des Projektes sowie die Ergebnisse der ersten beiden Projektphasen sind in den Zwischenberichten BARCZEWSKI ET AL. [2] vom März 2000 und BATEREAU ET AL. vom März 2001 [3] dargestellt.

## 1.2 Arbeitsprogramm

Grundsätzlich sind im Rahmen des Projektes zwei Teilaufgaben zu bearbeiten. Eine Aufgabe ist dabei die Geräteentwicklung, die andere Aufgabe die Erarbeitung von Anwendungsstrategien, d.h. das Aufzeigen der Einsatzmöglichkeiten und der Vorgehensweise beim Einsatz der im Projekt entwickelten sensorbasierten Vor-Ort-Erkundungsgeräte.

Abbildung 1 gibt eine Übersicht über das gesamte Arbeitsprogramm mit den wesentlichen Arbeitsschritten, die während der gesamten Projektlaufzeit bearbeitet werden.

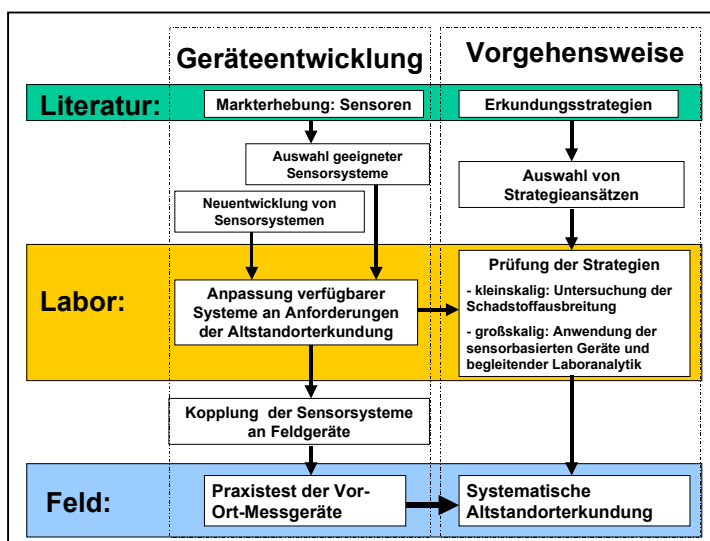


Abbildung 1: Arbeitsprogramm

# 2 Geräteentwicklung

## 2.1 Auswahl der Sensoren

Bei der Auswahl der verwendeten Sensoren wurde Wert darauf gelegt, dass diese im industriellen Einsatz erprobt und kostengünstig verfügbar sind. Die zu Projektbeginn ausgewählten Sensoren und Messgeräte wurden größten Teils beschafft und im Hinblick auf folgende Kriterien überprüft:

- Robustheit für den Feldeinsatz
- Preis
- Einfache Anwendbarkeit
- Ausreichende Sensitivität für einen oder mehrere ausgewählte Schadstoffe und Schadstoffgruppen
- Schnelles Ansprechen auf Schadstoffe.

Anhand einer Marktrecherche wurden verschiedene Sensortypen zur Schadstoffmessung ausgewählt [3]. Dabei erwiesen sich die in Tabelle 1 dargestellten Sensoren als tauglich, und die Entwicklung geeigneter Feldmessgeräte wurde auf ihrer Grundlage fortgesetzt.

Tabelle 1: Sensoren und deren Eignung für verschiedene Schadstoffgruppen

Medium	Bodenluft		Grundwasser		Schadstoffphase
	Metalloxid-Sensoren (MOX)	Schwingquarz-Sensoren (QMB)	Faseroptische Sensoren		
UV-Absorption			Fluoreszenz	NAPL-Sensor	
BTXE	X	X	X	-	-
CKW	X	X	X	-	-
PAK	-	-	(X)	X	-
MKW	X	X	(X)	(X)	-
NAPL	-	-	-	-	X

(X: messbar, (X): eingeschränkt messbar, -: nicht messbar), NAPL: non aqueous phase liquid

## 2.2 Geräteaufbau

### 2.2.1 Gasmesszelle

Aufbauend auf den ersten erfolgreich getesteten Prototypen, ist eine neue Messzelle zur Messung von Bodenluft konstruiert worden (Abbildung 2). Dabei konnte das nötige Messvolumen von über 2 l auf 0,2 l reduziert werden. Durch das Ansaugen einer kleineren Luftmenge kann eine lokal begrenzte Messung bei geringerer Gefahr des Zu-

strömens von Fremdluft durchgeführt werden. Die Messzelle bietet Platz für sechs Metalloxid- und vier QMB-Sensoren. Zusätzlich werden Sensoren zur Temperatur- und Luftfeuchtheitsmessung in der Messzelle betrieben. Es besteht außerdem die Möglichkeit, weitere Sensoren in die Messzelle zu integrieren.

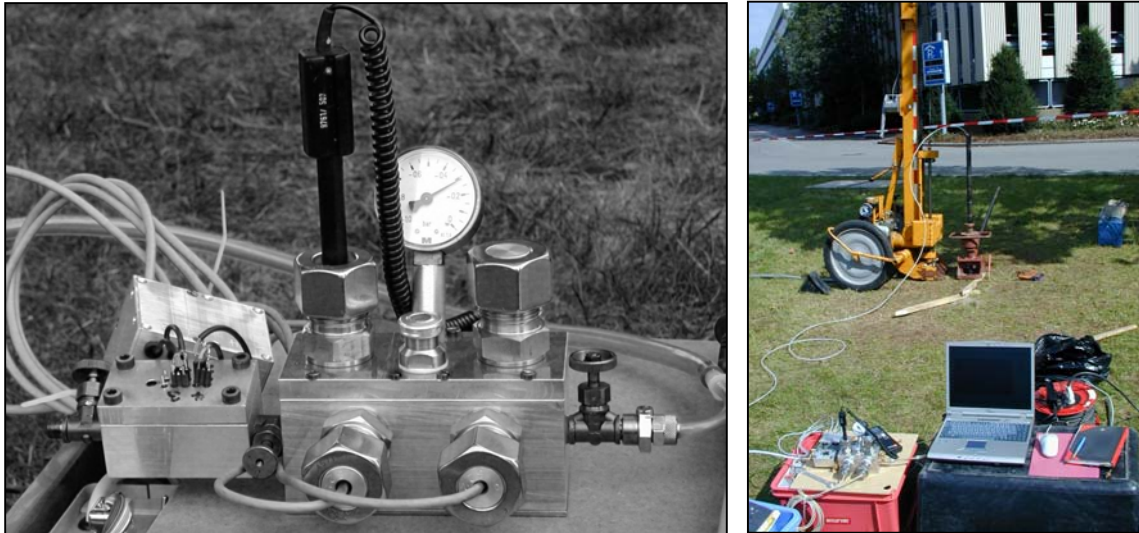


Abbildung 2: neue Messzelle im Feldeinsatz (li), Geräteaufbau im Feld (re)

### 2.2.2 Automatisierte Datenerfassung

Zur Erfassung, Visualisierung und Speicherung der Messdaten ist eine Anbindung der Sensoren an einen PC nötig. Das bisher eingesetzte USB-System hat sich als extrem störanfällig erwiesen und wurde durch eine robustere und kostengünstigere Lösung für die PC-Card-Schnittstelle ersetzt. Sollte es zukünftig erforderlich werden, mehr als vier Geräte anzuwenden, können mittels eines weiteren Adapters vier RS-232 Schnittstellen hinzugefügt werden<sup>1</sup>.

Zur Erfassung und Darstellung der Messwerte ist eine Software erstellt worden, die die Daten aller verwendeten Sensorsysteme unter einer Oberfläche zugänglich macht. Außerdem können die Umweltparameter Temperatur und Luftfeuchte abgelesen und zur Korrektur der Sensorsignale herangezogen werden. Zum Betrieb an der Gaskalibrieranlage ist mit derselben Hard-/ Softwarekonfiguration die vollständige Steuerung sowohl per Hand als auch in Form von programmierbaren Ablaufsteuerungen möglich. Dadurch lassen sich auch längere Messreihen unbeaufsichtigt durchführen.

---

<sup>1</sup> Es ist in diesem Fall auch der Einsatz eines Bussystems zu überprüfen. Dieses sollte aber für den Feldeinsatz robust und störunanfällig sein. Der CAN-Bus – entwickelt für die extrem gestörte Umgebung in Kraftfahrzeugen – wäre hierfür eine Alternative.

### 2.2.3 Aufbau der Gaskalibrieranlage:

Die geplante Gasmischanlage [3] ist aufgebaut und die Funktionsfähigkeit überprüft worden. Dazu wurden Messreihen durchgeführt, die die Sättigungskonzentration unterschiedlicher Stoffe nachweisen. Kalibriermessungen wurden mit den Stoffen: Trichlorethylen, Perchlorethylen, Trimethylbenzol, Toluol und Dichlorbenzol durchgeführt<sup>2</sup>. Die nächsten Ausbaustufen der Anlage umfassen eine Erweiterung um zwei Stränge zur Erzeugung von Gasgemischen, sowie Anschlüsse für Druckgasflaschen, um auch Gase definiert verdünnen oder mit anderen Stoffen mischen zu können. Abbildung 3 zeigt die Gaskalibrieranlage in ihrer derzeitigen Ausbaustufe.



Abbildung 3: Gaskalibrieranlage

Die Anlage ist zusammen mit der Datenerfassung vollständig automatisiert. Damit konnte erreicht werden, dass die Kalibrierung der Sensoren weitestgehend automatisch und unbeaufsichtigt durchgeführt werden kann.

Die Auslegung der erzeugbaren Konzentrationsbereiche lehnt sich an die zu detektierenden Grenzwerte an. Zur Beurteilung der VOC-Gehalte in Böden werden die entsprechenden Bodenluftmessungen nur als Orientierungshilfe für die Schadstoffverteilung benutzt. Weder in der BBodSchV noch in der LAGA-Richtlinie „Reststoffe“ gibt es

---

<sup>2</sup> Diese Stoffauswahl berücksichtigt die relevanten Schadstoffgruppen und weist die Zuverlässigkeit der Gaskalibrieranlage bei schwer flüchtigen Stoffen nach.

Prüfwerte bzw. Zuordnungswerte für Bodenluft. In einigen landeshoheitlichen Empfehlungen, z.B. LFUG Sachsen, sind Prüf- und Maßnahmewerte für kontaminierte Bodenluft als Schadstoffquelle für das Grundwasser aufgelistet. Danach liegen die Prüfwerte bei  $10 \text{ mg/m}^3$  und die Maßnahmewerte bei  $50 \text{ mg/m}^3$  [4]. Bis zu diesen Konzentrationen sind Gase in der Kalibrieranlage mischbar.

#### **2.2.4 Ausrüstung für Feldmessungen**

Durch die Weiterentwicklung der Geräte konnte erreicht werden, dass robuste und einfach zu handhabende Geräte für Feldmessungen zur Verfügung stehen. Abbildung 3 zeigt den Geräteaufbau im Feld für die Bodenluftmessungen. Durch die Verbesserung der Datenerfassung (Kap. 2.2.2) ist ein stabil laufender Aufbau geschaffen worden, welcher einfach zu bedienen ist.

### **2.3 Laboruntersuchungen**

#### **2.3.1 Sensoren**

##### Metalloxidsensoren (MOX)

Das verwendete Array aus vier MOX-Sensoren konnte in weitem Umfang sowohl an der Gaskalibrieranlage als auch in Feldmesskampagnen erprobt werden und liefert aussagekräftige Ergebnisse. Dabei ist das System zuverlässig und robust. Eine automatisierte Mustererkennung zur Komponentenbestimmung kann mit den vorliegenden Ergebnissen durchgeführt werden [1].

##### Quartz-Microbalance-Sensoren (QMB)

Die beschichteten Quarze sind ebenfalls standardmäßig im Einsatz [5] und konnten unempfindlich gegen Erschütterungen gemacht werden.

Bei Messungen an der Gaskalibrieranlage und bei Feldeinsätzen konnte die Robustheit und Tauglichkeit der QMB bestätigt werden. Die Quarze liefern ein dynamisches Signal, d.h. sie zeigen die Änderungen der Konzentrationen an. Daher ist die visuelle Beurteilung der Signale nicht so einfach wie bei den MOX möglich.

Die Messungen flüssiger Schadstoffe gestalten sich schwierig, da sowohl die Zuführung der Flüssigkeiten und die Benetzung der Quarze nur unter idealen Bedingungen im Labor möglich sind. Das System reagiert sehr anfällig auf Druckunterschiede und Luftbläschen auf der Quarzoberfläche. Diese Störanfälligkeit machen die Quarze für den Feldeinsatz untauglich.

### Oberflächenwellenresonator (SAGAS<sup>3</sup>)

Das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Messsystem stellt eine Sensorik zur Verfügung, die sowohl empfindlicher als auch rauschärmer als die QMB-Sensorik ist [6]. Vergleichbar mit diesen werden auch hier Polymer-Beschichtungen eingesetzt um definierte Stoff-Selektivitäten zu erreichen. Die zur Analyse der Sensorsignale verwendete Software ist allerdings wenig geeignet, mehr als sechs Einzelstoffe oder gar Stoffgemische zu unterscheiden und somit bisher auf den Laborbetrieb mit Einzelstoffen beschränkt. Mit den Sensorsignalen alleine ist allerdings eine Erweiterung der mit MOX und QMB bestückten Messzelle möglich und sinnvoll. Daher wird die Weiterentwicklung der SAW-Sensorik in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe betrieben.

### Fluorometer zur Messung gelöster PAK

Zur Messung von gelösten PAK und CKW im Grundwasser wird in Zusammenarbeit mit der Firma Avantes ein faseroptisches Photometer entwickelt. Durch die Verfügbarkeit einer neuen Generation von Glasfasern ist es möglich geworden, diese in einem Wellenlängenbereich bis zu 200 nm zu verwenden. Dies eröffnet einen völlig neuen Anwendungsbereich in der Photometrie und Fluorometrie, da die Absorption der Chlorkohlenwasserstoffe gerade im Wellenlängenbereich unter 240 nm deutlich zunimmt. In ersten Messungen an Kalibrierlösungen von TCE oder Toluol konnten die gewünschte spektrale Empfindlichkeit allerdings noch nicht ganz erreicht werden. Eine gute Abstimmung der verwendeten Komponenten sollte dies beheben.

## **2.3.2 Kalibrierung der Gassensoren**

Zur Kalibrierung der Gassensoren wurde die Gaskalibrieranlage verwendet (Kap. 2.2.3). Die Steuerung der Gaskalibrieranlage wurde mit der Datenerfassung der Sensorik (Kap.2.2.2) verbunden. Das ermöglichte die Durchführung automatischer Kalibrierungen. Dabei wurde die Anhängigkeit der Sensorsignale von Umgebungsparametern, der Art des Messaufbaus und den aerodynamischen Verhältnissen in der Messzelle bestimmt und optimiert.

Abbildung 4 zeigt eine Kalibriermessung, bei der das Sensorarray mit Perchloroethylen in den Konzentrationen 6, 4, 3, 2, 1 und 0,5 mg/l beaufschlagt wurde.

---

<sup>3</sup> Surface Acoustic Wave Aroma and Gas Analysing System



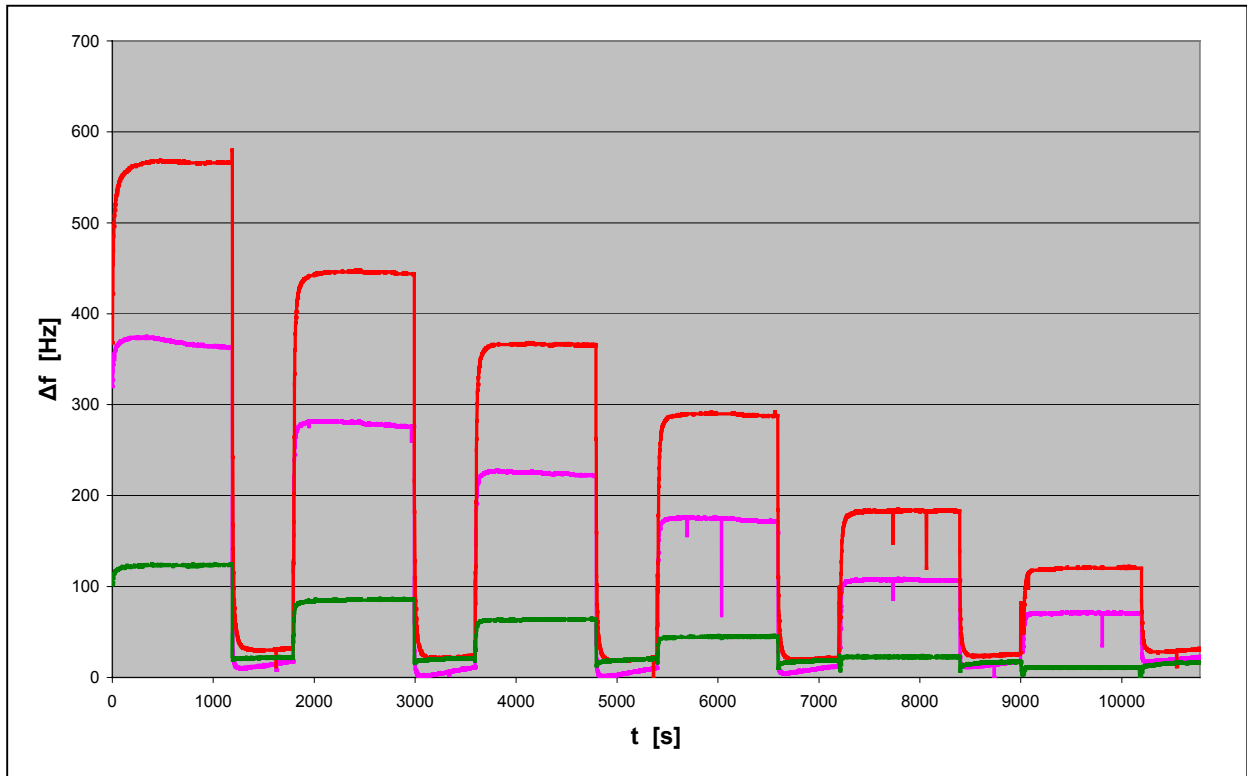


Abbildung 4: Kalibrierung der QMB-Sensoren

## 3 Feldanwendung der Geräte

In dieser Projektphase wurden verstärkt Feldmessungen mit dem Ziel, die Prototypen zu erproben und weiterzuentwickeln, durchgeführt. Für diese Messungen standen verschiedene Standorte mit unterschiedlichen Schadstoffgruppen zur Verfügung. Im Folgenden sollen Ergebnisse kurz beschrieben werden.

### 3.1 Messung leichtflüchtiger Schadstoffe in der Bodenluft

Für die Messung von Schadstoffen in der Bodenluft standen 3 Feldstandorte zur Verfügung. Davon war einer der Standorte (Standort 1) mit Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) kontaminiert, einer (Standort 2) mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) und einer der Standorte (Standort 3) war mit einem Gemisch verschiedener Schadstoffgruppen kontaminiert. Bei allen diesen Feldmessungen wurde der Messaufbau, wie in BATEREAU ET AL. [3] beschrieben, angewendet.

#### Standort 1

Dieser Standort ist mit MKW und BTEX kontaminiert. Eine klassische Erkundung lag für diesen Standort nicht vor. Es wurden mehrere Einzelmessungen mittels Vor-Ort-Messgeräten durchgeführt. Dabei konnten jedoch nur Erkundungen bis in eine Tiefe von 2,0 m durchgeführt werden, da das Grundwasser ab 2,5 m unter Geländeoberkante (GOK) anstand. Pro Sondierung wurden 2 bis 3 Bodenluftmessungen ab einer Tiefe von 1,0 m durchgeführt. Die mit den Sensoren gewonnenen Messsignale wurden hinsichtlich ihrer Signalmuster ausgewertet. Dabei wurden bei allen Messungen die typischen Muster für nicht chlorierte Stoffe gefunden. Außerdem konnte erwartungsgemäß gezeigt werden, dass die Schadstoffkonzentration direkt über dem Grundwasser, bei 1,5 bis 2,0 m unter GOK, am höchsten ist und im oberen Bereich, vermutlich durch den Austausch mit der Atmosphäre, sehr gering (Abbildung 5).

#### Standort 2

Dieser CKW-kontaminierte Standort war nur teilweise zugänglich. Im Rahmen der Vor-Ort-Messungen wurde der Bereich der vermuteten Schadstofffahne untersucht. Vergleichsmessungen durch eine klassische Erkundung lagen nicht vor. Das Grundwasser stand in einer Tiefe von  $> 10$  m unter GOK an. Deshalb wurde auf diesem Standort ein größeres Rammgerät verwendet, mit welchem eine Sondiertiefe bis 6 m erreicht werden konnte. Die Messergebnisse zeigten nur sehr geringe Schadstoffkonzentrationen im Erkundungsbereich. Anhand von Vergleichsmessungen mit Schnell-

tests sowie anhand der Signalmuster konnte festgestellt werden, dass es sich bei den Schadstoffen um chlorierte Kohlenwasserstoffe handelt. Entgegen der vorherigen Erwartungen wurde eine Abnahme der Schadstoffkonzentration mit zunehmender Tiefe gemessen. Dieses Ergebnis muss noch durch weitere Messungen verifiziert werden.

### Standort 3

Die Schadstoffe dieses Standortes, der Eintragsort und die vorhandenen Stoffgruppen, sind weitestgehend unbekannt. Die Historie des Standortes lässt einen diffusen Schadstoffeintrag von der Oberfläche in den Untergrund mit unterschiedlichen Kontaminanten vermuten. Durch die parallel zu den Vor-Ort-Messungen durchgeführte klassische Erkundung lagen in wenigen, meist räumlich weit voneinander entfernten Bereichen des Geländes Informationen über Lage und Art der Schadstoffe vor.

Bei den Vor-Ort-Messungen wurden die Schadstoffe in der Bodenluft jeweils in verschiedenen Tiefen, möglichst nach jedem Sondiermeter, gemessen. Die Messsignale (Abbildung 5) zeigen, dass entlang der Tiefenachse durch den Standort Schadstoffe im Untergrund oberhalb von 4 m anzutreffen sind. Dieses Ergebnis ist identisch mit den Aussagen der klassischen Erkundung und zeigt erwartungsgemäß den Eintragsweg der Schadstoffe. Im erkundeten Profil wurden zwei höher kontaminierte Bereiche detektiert. Einer dieser Bereiche konnte dabei mit allen eingesetzten Sensoren nachgewiesen werden, während bei dem anderen zwei Sensoren nicht reagierten. Das Ergebnis lässt vermuten, dass es sich in den beiden Schadstoffbereichen um unterschiedliche Stoffgruppen handelt, was anhand von Labormessungen nachgeprüft werden muss.

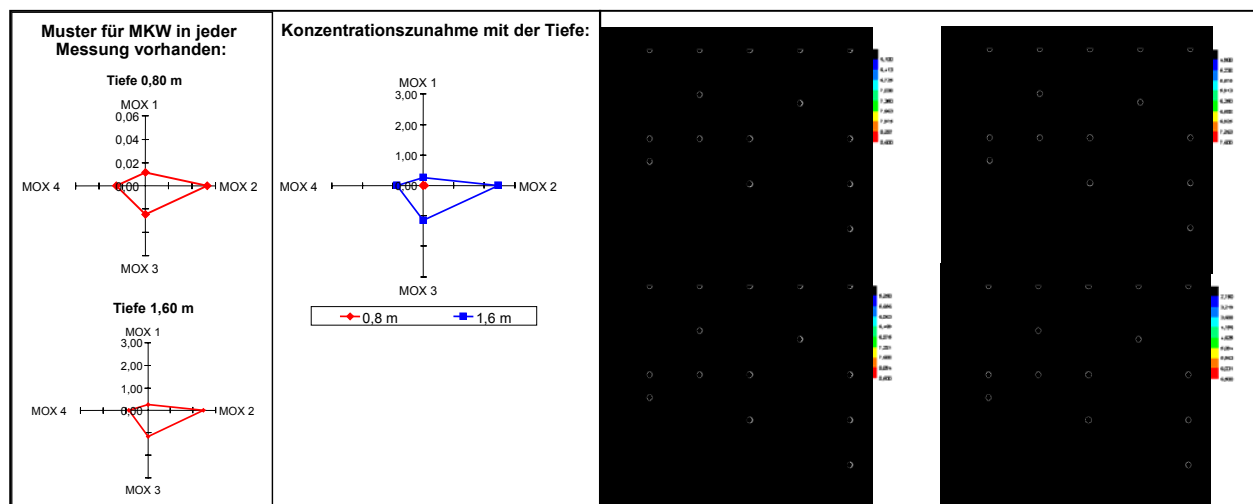


Abbildung 5: Tiefenorientierte Messung von MKW in der ungesättigten Zone (li), Messsignale im Tiefenprofil (re)

### 3.2 Messung von Schadstoffen in Phase im Untergrund

An einem mit MKW kontaminierten Standort konnte die Funktionsfähigkeit des faser-optischen NAPL-Detektors nachgewiesen werden (Abbildung 7). An der Wandung verschiedener Bohrlöcher konnte NAPL mittels einer 2 m langen Sonde detektiert werden. Das Gerät ist als Einstichsonde zur Messung an gut zugänglichen Orten ausgereift und wird mittlerweile bei der Sanierungsüberwachung einer Sondermülldeponie in der Schweiz routinemäßig angewendet.

Abbildung 7: NAPL-Detektor im Feldeinsatz



## 4 Kostenvergleich:

Ein Ziel bei der Entwicklung von Vor-Ort-Messtechnik ist die Entwicklung von Geräten, die preisgünstigere Einzelmessungen ermöglichen. Anhand eines Fallbeispiels soll gezeigt werden, dass äquivalente Informationen zu einem sehr viel günstigeren Preis gewonnen werden können als bei der herkömmlichen Erkundung, d.h. bei gleichem finanziellen Aufwand viel mehr Einzelmessungen durchführbar sind.

Beispiel:

An einem Standort soll die ungesättigte Zone auf CKW und BTXE untersucht werden. Durch eine Erkundung soll geprüft werden, ob und in welchen Konzentrationen BTXE und CKW vorhanden sind. Nach klassischem Vorgehen ist eine Untersuchung von Bodenproben aus Rammkernsondierungen möglich. Bei der Aufstellung der dafür anfallenden Kosten (Tabelle 2) werden folgende Arbeitsschritte berücksichtigt:

- 3 Rammkernsondierungen bis zu einer Tiefe von 5 m
- Probennahme von jeweils 1 Mischprobe pro Sondierung, welche auf beide Schadstoffgruppen im Labor untersucht werden.

Für die Bestimmung von CKW und BTXE wäre von herkömmlichen Erkundungsmethoden auch die Bodenluftprobennahme nach VDI 3865 [7] denkbar. In der Kostenrechnung wird von der Anwendung der Methode der Bodenluftprobennahme mittels Aktivkohleröhrchen gemäß VDI 3865/5 ausgegangen, und folgende Arbeitsschritte werden berücksichtigt:

- 3 Rammsondierungen bis zu einer Tiefe von 5 m (wobei im Preis der Probennahme eine Sondierung bis 2 m inklusive ist)
- Probennahme von jeweils 1 Probe pro Sondierung am tiefsten Punkt des Sondierloches, welche auf beide Schadstoffgruppen im Labor untersucht

Die entstehenden Kosten dieser klassischen Methode der Erkundung sollen verglichen werden mit den Kosten bei Nutzung von Vor-Ort-Messmethoden. In diesem Fall soll das Sensorarray zur Bodenluftmessung eingesetzt werden. Für die Nutzung von Vor-Ort-Methoden sind die Kosten für zwei Szenarien aufgestellt:

- Die Kosten für die Erkundung der gleichen Information, d.h. bei gleichem Erkundungsaufwand und gleicher Anzahl an Messpunkten
- Die Anzahl der möglichen Einzelmessungen, die bei gleichen Kosten durchgeführt werden können.

Folgende Arbeiten müssen bei Vor-Ort-Messungen durchgeführt werden:

- Rammsondierungen bis zu einer Tiefe von 5 m

- On-Site-Messung der Bodenluft: (1) Anzahl der Messpunkte analog der klassischen Vorgehensweise, (2) Maximale Anzahl an Messungen mit je 1 Messpunkt pro sondiertem Meter (17 Einzelmessungen)

Das Ergebnis zeigt, dass für die Gewinnung der gleichen Informationen wie bei der klassischen Erkundung nur die Hälfte der Kosten eingesetzt werden müssen und bei gleichen Kosten 17 Einzelmessungen anstelle von 3 durchgeführt werden können. Dabei ist zusätzlich eine Laboranalyse von zwei Proben vorgesehen, um die Messwerte zu verifizieren. Das Ergebnis der Modellrechnung zeigt, dass Vor-Ort-Methoden für die Erkundung von kontaminierten Flächen kostengünstig sind und gleichzeitig mehr und detailliertere Informationen liefern.

Tabelle 2: Kostenvergleich der konventionellen Erkundung mittels Boden- und Bodenluftprobenahme mit Vor-Ort-Messungen

		Konventionelle Erkundung				Erkundung mittels Vor-Ort-Analytik			
		Bodenprobenahme		Bodenluftprobenahme		Konst.Anz. Messungen		Konstante Kosten	
		Anz.	GK	Anz.	GK	Anz.	GK	Anz.	GK
	EK								
<b>Probennahme:</b>									
Bohrsondierung mittels Rammkernsonde pro m	25,-	15	375						
Probenklassifikation pro Meter	7,-	15	105						
Sondierung mittels leichter Rammsonde pro m	20,-			9*	180	15	300	17	340
Entnahme einer Boden- oder Feststoffprobe, Abfüllen in geeignete Flaschen pro Probe	25,-	3	75						
Bodenluftprobenahme mittels Aktivkohleröhrchen gemäß VDI 3865/5 pro Probe	75,-			3	225	1	10**	1	10**
<b>Analytik:</b>									
<b>Feststoffprobe</b>									
Analyse (LHKW oder BTXE) pro Probe	45,-	6	270			2	90	2	90
Analyse (LHKW und BTXE) pro Probe	65,-								
<b>Adsorptionsröhrchen</b>									
Analyse LHKW oder BTEX pro Probe aus Sorptionsröhrchen inkl. Elution	80,-			6	480				
<b>On-site-Messung</b>									
On-site-Messung von Schadstoffen pro Messung	5,-					3	15	17	85
Auswertung der On-site-Messungen pro Messung	20,-					3	60	17	340
<b>Anzahl der Messungen / Gesamtkosten</b>		<b>3</b>	<b>825</b>	<b>3</b>	<b>885</b>	<b>3</b>	<b>475</b>	<b>17</b>	<b>865</b>

EK – Einzelkosten, GK – Gesamtkosten, alle Kosten in €

\* - Messung in 2m Tiefe in Probennahmekosten enthalten

\*\* - Probe kann direkt vom Bodenluftmesssystem entnommen werden

# 5 Erkundungsstrategien

## 5.1 Literaturrecherche

Es wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt mit dem Ziel, Strategiekonzepte und Vorgehensweisen bei der Erkundung von Altstandorten unter Anwendung von Methoden der Vor-Ort-Analytik zu eruieren. Einschränkende Kriterien sind die Untersuchungen zur Einschätzung von Gefährdungen auf Altstandorten mit der Zielfunktion des Flächenrecyclings und die Methoden der Vor-Ort-Analytik zur Bestimmung chemisch-analytischer Parameter auf kontaminierten Flächen. Vornehmliche Einsatzbereiche der Vor-Ort-Analytik sind dabei Boden und Bodenluft, unerheblich ist der Ort der Messung (Off-site, On-site, In-situ). Anzumerken ist dabei, dass für die Vor-Ort-Analytik keine neue Vorgehensweise entwickelt werden muss, sondern bisherige Strategien durch die Einbindung von Vor-Ort-Messungen verbessert werden. Das bedeutet, dass die klassische, stufenweise Vorgehensweise die Grundlage bildet. Die Literatur hat gezeigt, dass Methoden der Vor-Ort-Analytik und dafür notwendige Verfahren der schnellen Probenaufbereitung nicht rechtlich geregelt sind und es dafür keine entsprechenden genormte Vorschriften gibt. Bezüglich der Vorgehensstrategie gelten die gleichen Regeln und Richtlinien wie bei der herkömmlichen Vorgehensweise. Zur Anwendung von Vor-Ort-Methoden gibt es in der BBodSchV die Empfehlung, diese bei der orientierenden Erkundung zu nutzen.

In den USA werden Vor-Ort-Methoden bereits erfolgreich eingesetzt, welche jedoch zum Teil auf anderen Hintergründen und Zielen basieren. Einer der Hauptunterschiede ist die zwingend vorgeschriebene Erzeugung analytisch exakter Daten im Feld. Als eine Verbesserung bei der Erkundung mittels Vor-Ort-Messtechniken werden hingegen überall die Realisierung eines dynamischen Messrasters und die ergebnisgesteuerte Erkundung angesehen.

## 5.2 Anwendung innovativer Messtechnik

Neu bei der Anwendung von schnellen und preisgünstigen Vor-Ort-Messtechniken ist die ergebnisgesteuerte Erkundung mit einem dynamischen Messraster. Eine wichtige Voraussetzung für das Festlegen der Messpunkte ist die genaue Kenntnis der Repräsentativität der lokalen Einzelmessung für den umliegenden kontaminierten Bereich. Um den nötigen Abstand der Messpunkte im Raster und die Aussagekraft der Messergebnisse der einzelnen Punktmessungen zu untersuchen, sollen im VEGAS-

Großbehälter Versuche anhand Bodenluftmessungen durchgeführt werden. In kleinskaligen Vorversuchen wurde das Ausbreitungsverhalten von CKW in der ungesättigten Bodenzone ermittelt (Abbildung 8). Diese Abbildung zeigt den Versuchstand, der eine Glaswand besitzt. Die Probenahmestellen sind mit hellen Punkten markiert. Durch die Glaswand kann man den Aufbau des Bodenkörpers und, nach abgeschlossener Infiltration, den mit Tracerfarbstoff angefärbten Schadstoff sehen. Anhand dieser Ergebnisse wurde die Lage der Schadstoffquellen im Großbehälter für die derzeit in der Planungsphase befindlichen Versuche bestimmt.

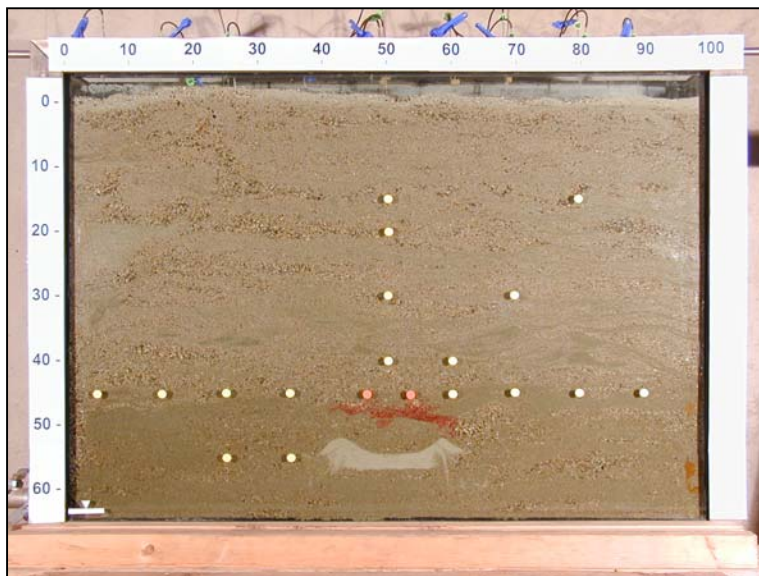


Abbildung 8: Kleinskaliger Versuch zur Ausbreitung von CKW in der ungesättigten Bodenzone



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Unterschiedliche Sensorsysteme zur Messung von Schadstoffen im Untergrund sind evaluiert und eine Auswahl für die folgende Entwicklung von Messgeräten ist getroffen worden.

Mit den ausgewählten Sensorsystemen sind Verfahren und Geräte entwickelt worden, die die Nachweisempfindlichkeit der Messsysteme steigern und die Anwendung im Feld ermöglichen. Bei ersten Feldeinsätzen wurde gezeigt, dass die Messsysteme geeignet sind, Schadstoffe im Boden, in der Bodenluft und im Grundwasser aufzuspüren. Für den Routineeinsatz müssen jedoch die Geräte noch weiter entwickelt werden. Ziel dabei ist, die Sensoren direkt in die Rammsonde einzupassen, in den Untergrund einzubringen und damit In-situ-Messungen zu ermöglichen.

Es sind weitere Messkampagnen geplant, um die Sondiertechnik und die Handhabbarkeit der Geräte weiter zu verbessern. Dabei sollen neben der Geräteentwicklung auch die Vorgehensweise bei der Erkundung im Feld und Anwendungsstrategien mit berücksichtigt und an die verwendete Technik adaptiert werden.

Durch die Reduzierung der Kosten im Vergleich zur klassischen Erkundung kann mit einer höheren Anzahl von Messpunkten die Lage der heterogen im Untergrund verteilten Schadstoffe detailgetreuer wiedergegeben werden.

## 7 Literatur

- [1] BARCZEWSKI, B. ET AL. (2000): Überprüfung der Eignung von verschiedenen Sensoren für die Vor-Ort-Messung von Schadstoffen in Altlasten, Wissenschaftlicher Bericht Nr. WB 2000/04 (HG 272) der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau
- [2] BARCZEWSKI, B. ET. AL. (2000): Boden- und Flächenressourcen- Management in Ballungsräumen: Innovative Erkundungsmethoden von Schadstoffbelastungen (Vor-Ort-Analytik: Werkzeuge zur Minimierung von Probennahme- und Analytikaufwand), Statusseminar 2000, <http://bwplus.fzk.de>
- [3] BATEREAU, K. ET AL. (2001): Boden- und Flächenressourcen-Management in Ballungsräumen: Innovative Erkundungsmethoden von Schadstoffbelastungen (Vor-Ort-Analytik: Werkzeuge zur Minimierung von Probennahme und Analytikaufwand), Diskussionskreis "Wasser und Boden" (BWPLUS) beim Statusseminar 2001, Internet: <http://bwplus.fzk.de>
- [4] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1995): Empfehlungen zur Handhabung von Prüf- und Maßnahmewerten für die Gefährdungsabschätzung von Altlasten in Sachsen, Materialien zur Altlastenbehandlung Bd. 2, S. 12
- [5] SCHAUF, E. ET AL. (2001): Anwendung von Schwingquarzsensoren zur Messung von leichtflüchtigen Verbindungen bei der Erkundung von Altlasten, Wissenschaftlicher Bericht Nr. WB 2001/01 (HG 278) der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau
- [6] RAPP, M. et al. (2000): New miniaturized SAW-sensor array for organic gas detection driven by multiplexed oscillators, *Sensors and Actuators B65* (2000)169-172
- [7] VDI 3865: Messen organischer Bodenverunreinigungen, Blatt 5 (Entwurf), Juli 1988