

## **Forschungsbericht FZKA-BWPLUS**

# **Optimierung von Erkundungsstrategie und Qualitätssicherung beim Einsatz von Feldanalytik in der Altlastenbearbeitung**

von

T. Ertel, W. Schulz

Umweltwirtschaft GmbH  
Stuttgart

Förderkennzeichen: PD 98.204

Die Arbeiten des Projektes "Wasser, Abfall, Boden" wurden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2000

## **1 Aufgabenstellung**

In der Altlastenbearbeitung hat sich der Einsatz von Vor-Ort-Analytik bisher nur in sehr begrenztem Umfang durchgesetzt. Dies ist mit darin begründet, daß die erhaltenen Meßwerte den aus der Laboranalytik erwachsenen Ansprüchen nicht genügen. Erst in den letzten Jahren findet hier ein Umdenken statt, nicht zuletzt verursacht durch den zunehmenden Kostendruck. Ferner stellt sich immer häufiger die Frage nach der Qualität der Ergebnisse. Unter Qualität ist aber nicht der einzelne Meßwert sondern das gesamte Untersuchungsziel zu verstehen. Altlasten oder Altstandorte besitzen oft eine sehr heterogene Schadstoffverteilung, deren Erkundung und Beschreibung, abhängig vom Qualitätsziel, eine Vielzahl von Sondierpunkten erfordert.

Der Einsatz von Vor-Ort-Analytik bei der Altlastenerkundung erfordert gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise jedoch neue Erkundungsstrategien und angepaßte Konzepte der ergebnisorientierten Qualitätssicherung. Da die reale Schadstoffverteilung an echten Fällen nicht bekannt ist, lassen sich diese alternativen Konzepte nur sehr schwer mit der herkömmlichen Vorgehensweise vergleichen. In der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) liegen dagegen genau beschriebene Schadstoffverteilungen bei unterschiedlichen Projekten vor. Für unser Projekt wurde ein Versuchsbehälter zur Grundwassersanierung einer BTEX-Kontamination verwendet, bei dem 63 Meßstellen in einer Ebene auf einer Fläche von 54 m<sup>2</sup> angeordnet sind. Dadurch ist die Schadstoffverteilung mit sehr hoher Auflösung bekannt.

Die herkömmliche Vorgehensweise bei der Altlastenerkundung arbeitet mit starren Untersuchungsrastern bei einer räumlichen und zeitlichen Trennung von Sondierung und Analytik. Der Einsatz von Vor-Ort-Analytik ermöglicht die Strategie der „ergebnisgesteuerten Probenahme“. Dabei erfolgt die Festlegung weiterer Probenahmepunkte auf Grundlage der zuvor erhaltenen Ergebnisse.

**Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens:**

- Überprüfung des ergebnisorientierten Qualitätssicherungskonzepts
- Gesamtbeurteilung der Aussagekraft und Ergebnisqualität von Altlastenuntersuchungen mit Feldanalytik
- Definition von Anforderungen an Feldmethoden hinsichtlich der Ergebnisschärfe bzw. Abgrenzung von Wertebereichen halbquantitativer Meßmethoden
- Erarbeitung von Grundlagen für Vorgaben zur Erkundungsstrategie und Qualitätssicherung beim Einsatz von Feldanalytik.

## **2 Stand der Wissenschaft und Technik**

### **2.1 Grundlagen**

Die technische Erkundung von Altlasten erfolgt unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Historischen Erkundung (Vorinformationen) in der Regel durch Festlegung eines Probenahmerasters bzw. an erkannten potentiellen Kontaminationsschwerpunkten ausgerichteten Sondierpunkten. Die Untersuchung der erhaltenen Proben erfolgt zeitversetzt in einem chemischen Untersuchungslabor nach genormten Analyseverfahren. Bei Bedarf werden Nachbeprobungen durchgeführt oder Rückstellproben untersucht.

Die erhaltenen Analysenergebnisse weisen im allgemeinen einen geringen Meßfehler auf, da in den Laboratorien eine umfangreiche Qualitätssicherung durchgeführt wird. Die Übertragbarkeit des Meßergebnisses von der Laborprobe auf das Beurteilungsvolumen (der Bereich, für den die Teilprobe repräsentativ sein soll) hängt entscheidend von der Heterogenität und vom Rastermaß ab. Durch die Fokussierung der Probenahmepunkte auf tatsächlich belastete Bereiche bei der ergebnisgesteuerten Probenahme wird de facto ein geringeres Beurteilungsvolumen erreicht und dadurch der Probenahmefehler verringert. Dieser Effekt wird weiter verstärkt, da kostengünstige Vor-Ort-Analytik eine höhere Probendichte bei gleichen Kosten zuläßt. Allerdings ist die Varianz des Meßfehlers bei diesen Verfahren im allgemeinen größer.

Bei der Beurteilung der Qualität des Ergebnisses ist der Gesamtfehler, resultierend aus der Summe von Meß- und Probenahmefehler, im Hinblick auf das Qualitätsziel (Aufgabenstellung) zu betrachten. Das hat zur Folge, daß nicht der Einzelwert (Probenahme und Messung) sondern die Gesamtheit der Werte, beispielsweise die ermittelte Schadstoffverteilung, betrachtet werden muß.

Es gilt das Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$Y = F(x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}, x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,m}) \quad (1)$$

$$S_Y^2 = \sum_i^n (\partial Y / \partial x_{1,i})^2 s_{x_{1,i}}^2 + \sum_k^m (\partial Y / \partial x_{2,k})^2 s_{x_{2,k}}^2 \quad (2)$$

Y stellt dabei das Untersuchungsergebnis dar, beispielsweise die Schadstoffverteilung, wie sie sich über die Funktion F aus den n Probenahmen  $x_{1,i}$  und den m Analyseergebnissen  $x_{2,k}$  berechnen läßt. Die Größen  $s_x^2$  stellen die Varianzen der jeweiligen Probenahme und Messung dar,  $S_Y^2$  die Varianz des Gesamtergebnisses. Die partiellen Differentialquotienten geben zum einen den Einfluß des gewählten Probenahmerasters und der Probenauswahl ( $\partial Y / \partial x_{1,i}$ ) auf das Gesamtergebnis wider, zum anderen den Einfluß der Messung der gewonnenen Proben ( $\partial Y / \partial x_{2,k}$ ) auf das Gesamtergebnis.

Aus Gleichung (2) wird deutlich, daß sich der Gesamtfehler additiv aus den Fehlern der Messung und der Probenahme zusammensetzt. Der Meßfehler ist im allgemeinen deutlich geringer als der der Probenahme. Deshalb muß zur Verringerung des Gesamtfehlers an der Probenahmestrategie angesetzt werden.

## 2.2 Stand der Technik

Stand der Technik ist der Einsatz von Laboranalytik zur Altlastenerkundung. Dadurch werden Ergebnisse mit hoher analytischer Genauigkeit erzielt, die hohe Kosten verursachen. Die Laborverfahren sind in DIN-Normen geregelt, die wiederum der Ableitung von Orientierungswerten zur Beurteilung von Kontaminationen zugrunde liegen.

Feldanalytik als kostengünstige Variante wird in der Praxis nur selten eingesetzt, da die Verfahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit den Stand der Laboranalytik nicht erreichen. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Labor und Feldanalytik ist bislang nur hinsichtlich von Einzelwerten je Meßpunkt ausgiebig untersucht. Die Frage, wie sich das Gesamtergebnis einer Erkundung ändert, wenn mit Feldanalytik deutlich mehr Punkte mit geringer Genauigkeit untersucht werden, wurde bislang noch nicht näher untersucht. Erste Hinweise hierzu geben:

ERTEL, T. & SCHULZ, W (1998): Kostenminimierung bei der Untersuchung großflächiger Altlasten-Verdachtsflächen, BrachflächenRecycling 3/98, S. 36-41.

ERTEL, T. & KERN, F. (1997): Optimization of Exploration strategies using On-Site Analysis, Field Screening Europe, Kluwer Academy Publishers, S. 3-7.

ERTEL, T., BESSEY, B., KERN, F. & MAURER, A. (1997): Vor-Ort-Analytik in der Altlastenbearbeitung - Ergebnisse eines Feldtests, TerraTech 3/97, S. 19-22.

ERTEL, T. & KERN, F. (1997): Vor-Ort-Analytik in der Altlastenbearbeitung, TerraTech 2/97, S. 24-26.

ERTEL, T. (1993): Sanierung eines Säureteerseees und dazugehöriger Bodenverunreinigung mit PAK, PCB, BTX und CKW durch Immobilisierung. In: ARENDT, F., ANNOKÉE, G. J., BOSMANN, R. & van den BRINK, W. J., Altlastensanierung 1993, S. 1173-1174, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

### **3 Versuchsplanung und -ablauf**

#### **3.1 Versuchsplanung**

- Auswahl der Feldmethoden und ihrer Wertebereiche
- Abstimmung der Versuchsdurchführung mit VEGAS
- Erarbeitung der strategischen Vorgehensweise

#### **3.2 Versuchsdurchführung**

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte an der Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung (VEGAS) an der Universität Stuttgart im Rahmen des Projektes „Tensidunterstützte Entfernung einer BTEX Kontamination“. Hierbei standen 9 x 7 fest eingebaute Probenahmestellen in einer Ebene (s. Abb. 7) zur Verfügung, die routinemäßig im Projektverlauf mit Labormethoden untersucht wurden. Dadurch lag eine genau definierte Schadstoffverteilung als Referenz vor.

Für die Vor-Ort-Analytik wurde der EnviroGard BTEX ELISA-Test (Vertrieb Fa. Coring Systems Diagnostix GmbH, Gernsheim) eingesetzt. Hierbei handelt es sich um einen Immunoassay Röhrentest, der zum Nachweis von BTEX und Kraftstoffen in Wasserproben konzipiert ist. Da es sich bei der Kontamination lediglich um eine Mischung der Substanzen Ethylbenzol, o-Xylol, m-Xylol und p-Xylol handelt sind für den Vergleich der Konzentrationen Korrekturfaktoren entsprechend der unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Substanzen für den Immunoassay anzuwenden. Diese Korrektur ist bei den folgenden Darstellungen nicht berücksichtigt. Die Quantifizierung der Proben erfolgte anhand der mitgelieferten BTEX-

Standards auf zwei unterschiedliche Arten. Zum einen, wie vom Hersteller empfohlen, durch Zuordnung von Konzentrationsklassen (0-0,1; 0,1-0,3; 0,3-0,5 und 0,5-3 mg/l), zum anderen durch Interpolation. Konzentrationen über 3 mg/l wurden in entsprechender Verdünnung gemessen.

Es wurden zwei Meßkampagnen am 16.11.1998 und 10.12.1998 durchgeführt. Bei der ersten Meßserie wurden für die Labor- und die Vor-Ort-Analytik alle Wasserproben parallel entnommen und analysiert. Bei der zweiten Meßserie erfolgte ein stufenweises Vorgehen ausgehend von einem groben Raster, das im weiteren Verlauf aufgrund der erhaltenen Analysenergebnisse entsprechend verfeinert wurde. Parallel erfolgte eine Probenahme für die Laboranalytik. Die Berechnung der jeweiligen Schadstoffverteilungen erfolgte mit dem Programm Surfer Version 6.04 (Golden Software, Inc. Golden USA) nach der Kriging Methode.

### **3.3 Auswertung der Ergebnisse**

- Statistische Beurteilung der Ergebnisse im Vergleich zur Laboranalytik
- Vergleichende Ermittlung der Schadstoffverteilung
- Simulation der Schadstoffverteilung für verschiedene Erkundungsszenarien
- Ableitung von Hinweisen zu Erkundungsstrategie und Ergebnisschärfe/Qualitätssicherung

## **4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Zur Eruierung der Ergebnisse neuer Analysemethoden ist die Heterogenität der Schadstoffverteilung auf realen Schadensflächen ungeeignet. Genau beschriebene Schadstoffverteilungen unterschiedlicher Projekte liegen dagegen in der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) an der Universität Stuttgart vor, an deren Versuchsstand das vorliegende Projekt durchgeführt wurde.

Die Bewertung der erzielten Ergebnisse erfolgte für die Erstellung einer Handlungsanweisung zum Einsatz von Feldanalytik in der Altlastenbearbeitung in Absprache mit der Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe.

## 5 Ergebnisse

Mit den Meßdaten vom 16.11.98 wurde die Strategie der ergebnisabhängigen Probenahme am Computer nachvollzogen. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen die BTEX-Verteilung mit Labor- und Vor-Ort-Analytik bei Anwendung eines rechteckigen Standardrasters aus 12 Sondierpunkten. Die Skalierung der Untersuchungsebene entspricht Metern. Bei der Angabe der Meßdaten ohne Interpolation wurden die Mittelwerte der jeweiligen Konzentrationsklassen verwendet.

In den Abbildungen sind die für die Berechnung der Verteilung berücksichtigten Probenahmepunkte durch ein Kreuz markiert. Die erhaltenen Verteilungen sind ähnlich und unterscheiden sich nur in der Ausdehnung. Bei der ergebnisgesteuerten Probenahme werden anhand dieser Verteilung weitere 12 Sondierpunkte festgelegt. Die sich daraus ergebende Schadstoffverteilung ist in Abbildung 4 dargestellt.

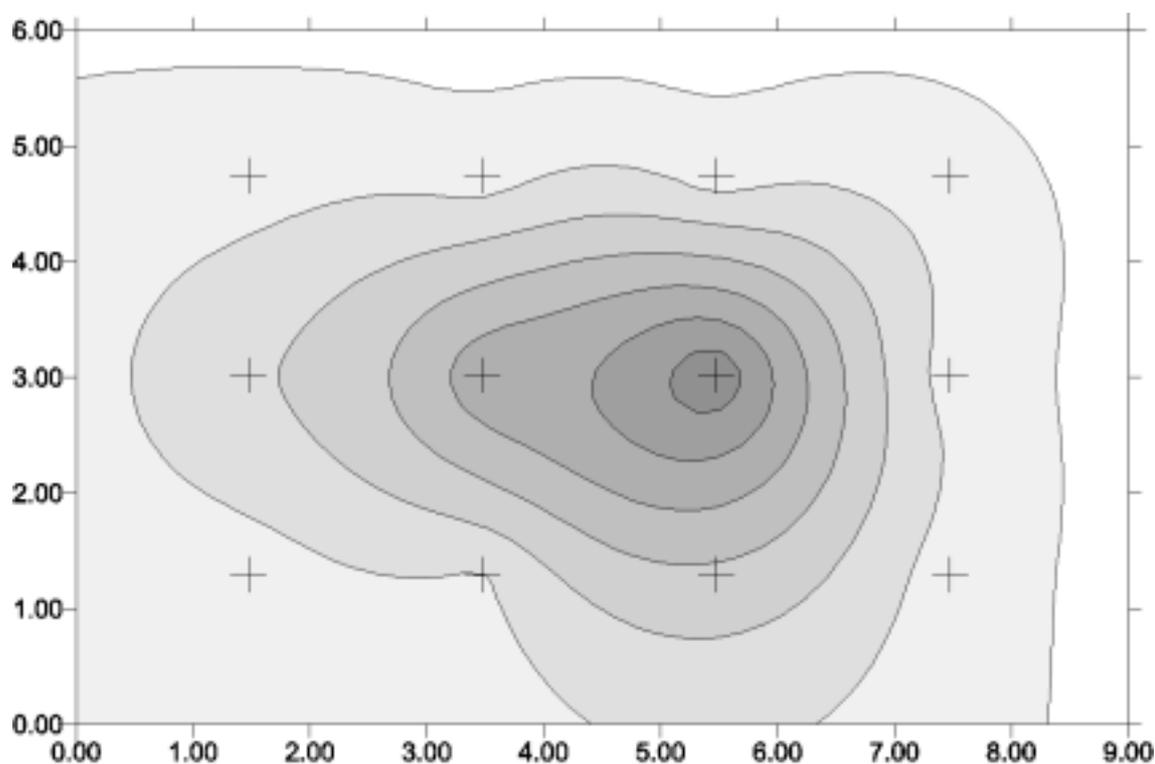


Abb. 1 BTEX-Verteilung berechnet aus den Labordaten

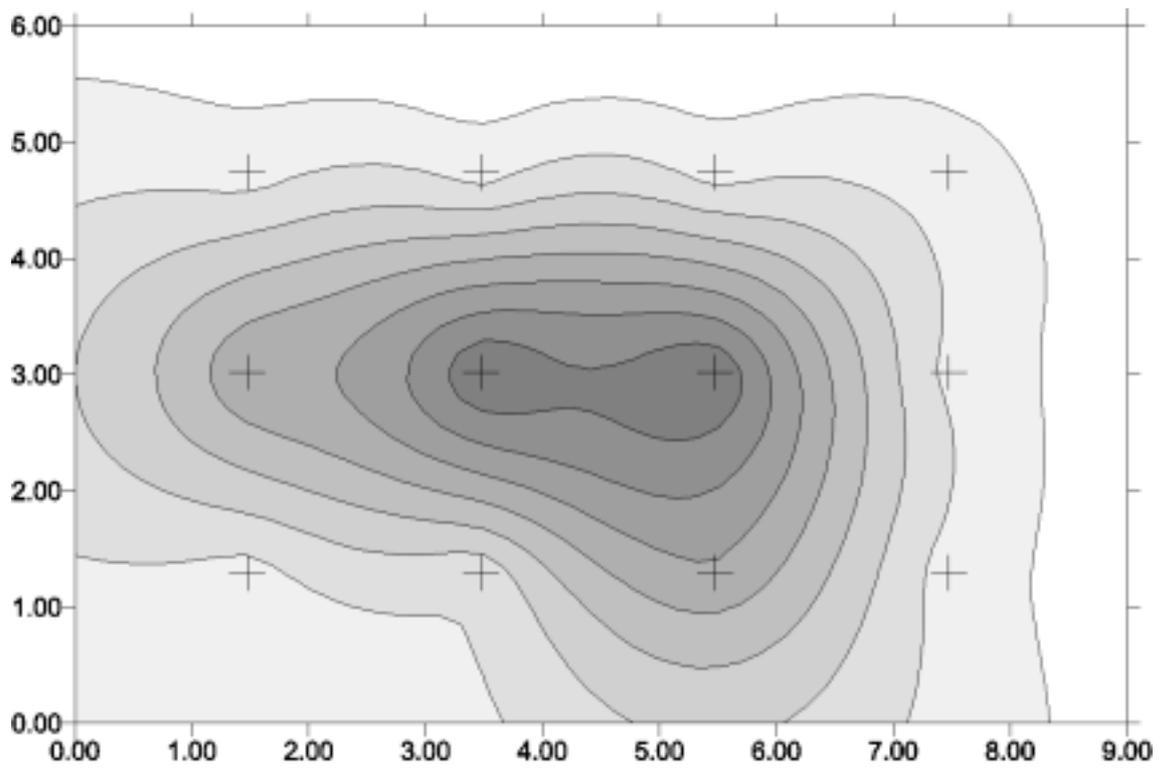


Abb. 2 BTEX-Verteilung berechnet aus den Vor-Ort-Analysendaten ohne Interpolation

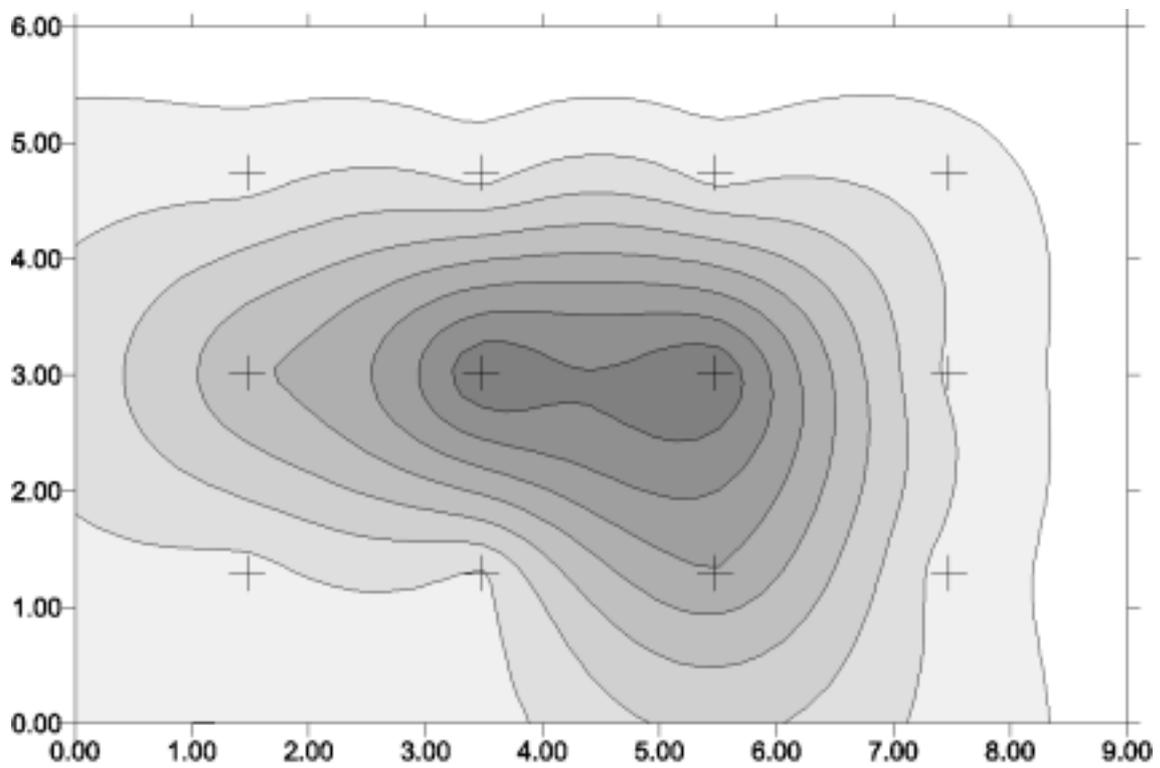


Abb. 3 BTEX-Verteilung berechnet aus den Vor-Ort-Analysendaten mit Interpolation

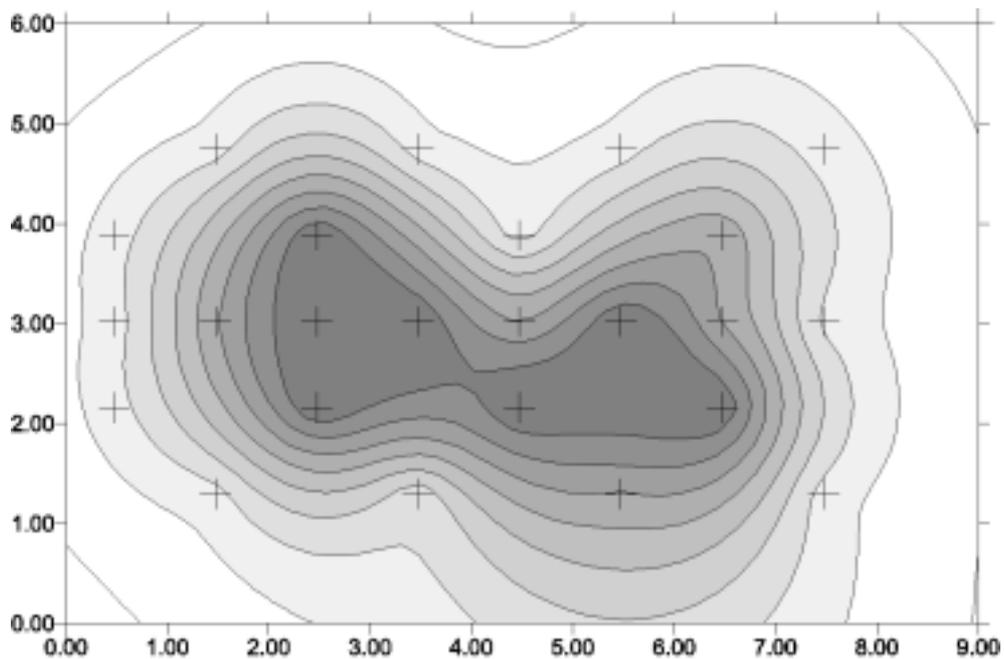


Abb. 4 BTEX-Verteilung berechnet aus den erweiterten Vor-Ort-Analysedaten aufbauend auf den Ergebnissen der Abb. 2 ohne Interpolation

Es ist eine deutliche Strukturierung der Schadstoffverteilung zu erkennen. Die Festlegung weiterer 12 Sondierpunkte liefert die in Abbildung 5 bzw. 6 dargestellte Verteilung.

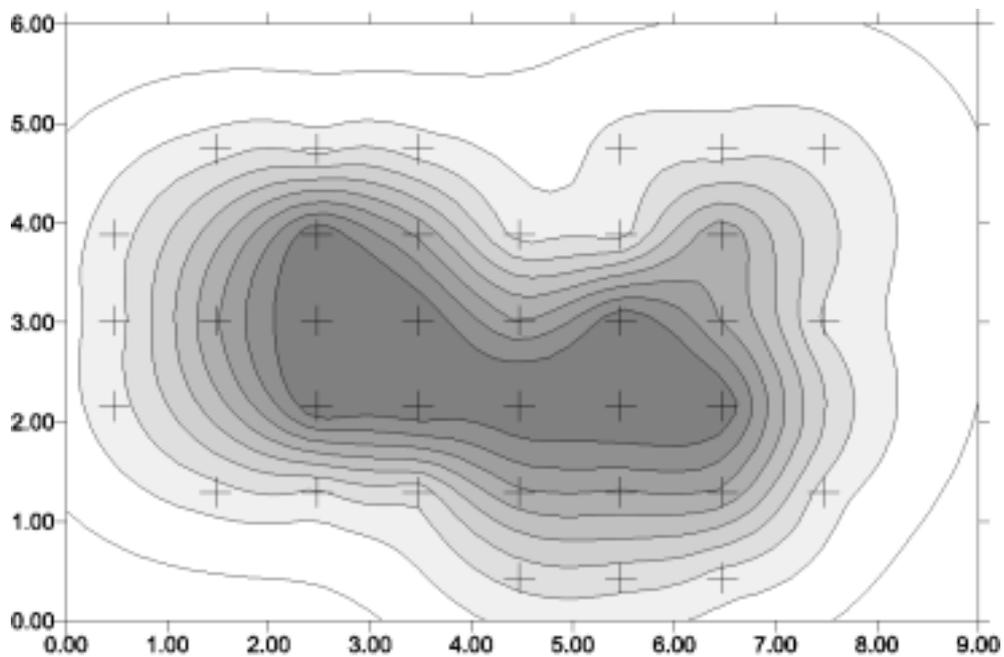


Abb. 5 BTEX-Verteilung berechnet aus den erweiterten Vor-Ort-Analysedaten aufbauend auf den Ergebnissen der Abb. 2 und 4 ohne Interpolation

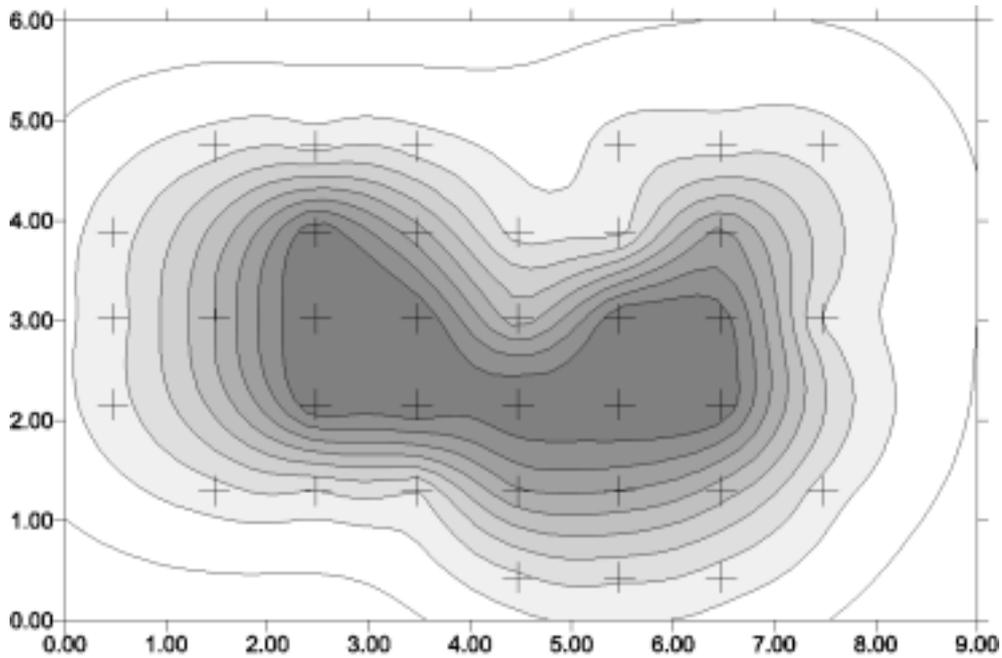


Abb. 6 BTEX-Verteilung berechnet aus den erweiterten Vor-Ort-Analysendaten aufbauend auf den Ergebnissen der Abb. 2 und 4 mit Interpolation

In Abbildung 7 ist die unter Einbeziehung der Laboregebnisse aller 63 Probenahmestellen ermittelte Verteilung dargestellt.

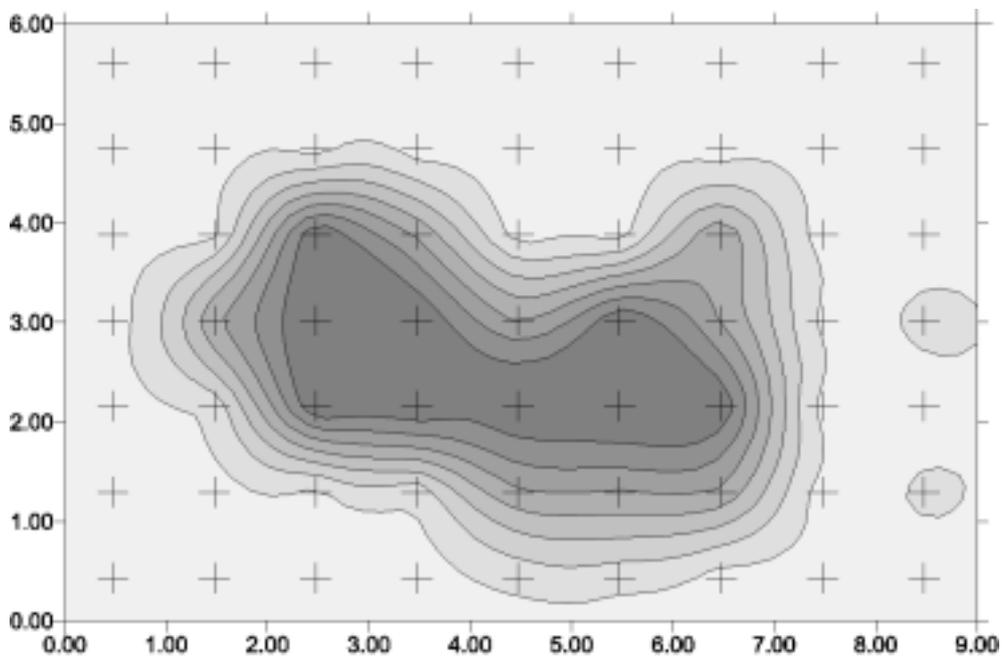


Abb. 7 BTEX-Verteilung berechnet aus allen Labordaten (Referenzverteilung)

Der Vergleich der ermittelten Verteilungen zeigt, daß durch die ergebnisabhängige sukzessive Erweiterung der Probenahmestellen die ermittelte Verteilung bei Einsatz der Vor-Ort-Analytik der Referenzverteilung sehr nahe kommt. Dies bestätigt experimentell den weit größeren Einfluß der Probenahme und somit des Probenahmefehlers hinsichtlich Anzahl und Positionierung gegenüber dem Meßfehler. Der Vergleich der erhaltenen Verteilungen, zum einen mit der Standardvorgehensweise unter Nutzung der Laboranalytik (Abb. 1), zum andern mit der ergebnisabhängigen Probenahme unter Nutzung der Vor-Ort-Analytik (Abb. 5) zeigt deutlich die Verbesserung der Qualität des Ergebnisses. Der Vergleich von Verteilungen mit und ohne Interpolation bei Anwendung des Immunoassays zeigt nahezu keine Unterschiede, obwohl durch die Mittelung der Konzentrationsbereiche Streuungen von 25-100 % auftreten.

In der zweiten Meßserie wurde die ergebnisabhängige Vorgehensweise bei einer anderen Schadstoffverteilung durchgeführt, und zwar nicht nach der Beprobung aller Punkte, sondern wie bei einer realen Vorgehensweise nacheinander. Die ermittelte Schadstoffverteilung wurde durch die Laboranalytik verifiziert. Hierbei konnten die oben aufgeführten Verbesserungen der Qualität des Gesamtergebnisses bestätigt werden.

## **6 Nutzung der Ergebnisse**

Anhand der vorliegenden Ergebnisse läßt sich die Leistungsfähigkeit der Feldanalytik in der Altlastenerkundung belegen. Die Anwendung der ergebnisgesteuerten Probenahme und der Einsatz von Vor-Ort-Analytik liefert, im Vergleich mit der Standardstrategie eines festen Rasters und dem Einsatz von Laboranalytik, trotz vergrößerter Varianz der Einzelmessung, eine deutlich verbesserte Qualität des Gesamtergebnis bei geringeren Gesamtkosten.

Die Kostenminimierung bei Anwendung der Vor-Ort-Analytik setzt sich im wesentlichen aus folgenden Faktoren zusammen:

- Reduzierung der Untersuchungsetappen (An- und Abfuhr des Meßtrupps, Zwischenberichte, Besprechungen etc.)
- Reduzierung des Untersuchungsaufwandes anhand zeitnaher Analytik zur Steuerung der Erkundungsrichtung und Festlegung der Probendichte.
- Reduzierung der Analysekosten, da aufwendige Laborarbeiten entfallen

Die vorliegenden Ergebnisse finden als Grundlage für Vorgaben zur Erkundungsstrategie und Qualitätssicherung beim Einsatz von Feldanalytik Eingang in die „Handlungsempfehlungen zum

Einsatz von Feldanalytik in der Altlastenbearbeitung“ der Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe.

## **7 Veröffentlichungen**

ERTEL,T. (1999): Einsatzstrategien zur Anwendung von Methoden der Vor-Ort-Analytik. ITVA-Symposium Altlasten 99, Stuttgart. Tagungsband, S79-84.

FZK/TNO-Kongress Consoil 2000 (in Vorbereitung).