

Bodenluftsanierungen

- Theoretische Grundlagen und Praxiserfahrungen -

Dr. Hans Dieter Stupp

Abstract

Bei sanierungsbedürftigen Bodenverunreinigungen durch flüchtige organische Inhaltsstoffe wird aufgrund der vergleichsweise günstigen Kosten in den meisten Fällen das Verfahren der Bodenluftsanierung eingesetzt. Insbesondere zur Sanierung der flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffe wird die Bodenluftsanierung in starkem Maße herangezogen. Unter besonderer Berücksichtigung der analytisch erfaßbaren halogenierten Verbindungen wird auf der Basis des Kenntnisstandes aus über 500 Sanierungsprojekten über die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens auf die einzelnen HKW-Komponenten berichtet.

Das Spektrum der durch die Bodenluftsanierung erfaßbaren Stoffe geht über die allgemein als "leichtflüchtig" bezeichneten Stoffe hinaus. Erfolgreich sanierbar sind Verbindungen mit Siedepunkten bis zu ca. 210 ° C. Es werden interessante Erkenntnisse aus den durchgeführten Sanierungsprojekten anhand von drei Fallbeispielen erläutert. Aus den Anwendungsfällen sind Ansätze zur Optimierung von Bodenluftsanierungen herleitbar.

1 Einleitung

Die ersten Schadenfälle mit Verunreinigungen des Bodens und Grundwassers durch leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) wurden in der BRD um 1970 detektiert. Das gesamte Ausmaß der LHKW-Grundwasser-kontaminationen wurde jedoch erst in der ersten Hälfte der achtziger Jahre bewußt. Die wichtigsten Problemstoffe sind den leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) zuzuordnen. Dabei handelt es sich im einzelnen in der Reihenfolge abnehmender Priorität um die LCKW-Einzelkomponenten Tetrachlorethen (Per), Trichlorethen (Tri), 1.1.1.-Trichlorethan (1.1.1.-Tri) und Dichlormethan (Methylenchlorid).

Die LCKW wurden zu verschiedenen industriellen Zwecken eingesetzt. Die größten Mengen wurden in der Metallverarbeitung, Textilreinigung und -fertigung, Lackherstellung und Tierkörperverwertung verwendet. In der Regel liegen bei einem mehrjährigen Einsatz der LCKW Verunreinigungen des Bodens und oft auch des Grundwassers vor.

Neben den Verunreinigungen durch LCKW treten seltener Kontaminationen durch leichtflüchtige fluorierte Kohlenwasserstoffe (LFKW) auf. Zu den wichtigsten Vertretern dieser Gruppe zählen die überwiegend als Kälte- und Feuerlöschmittel verwendeten Stoffe Trichlorfluormethan (R-11) und Trichlortrifluorethan (R-113).

Zur Sanierung der LHKW-Kontaminationen der ungesättigten Bodenzone wird bei den meisten Anwendungsfällen die Methode der Bodenluftsanierung herangezogen. Bei einer vergleichenden Betrachtung aller zur Verfügung stehenden Verfahren zur Sanierung des Bodens / Grundwassers dürfte sich kein anderes Verfahren dermaßen stark etabliert haben, wie die Bodenluftsanierung. Die großen Vorteile des Verfahrens bestehen in dem vergleichsweise geringen Aufwand und den günstigen Kosten. Hierbei ist ergänzend zu berücksichtigen, daß in vielen Fällen die Sanierung des Bodens unter Berücksichtigung der weiteren industriellen Fertigung umzusetzen ist. Diese Voraussetzungen werden nur durch ein In-situ-Verfahren erfüllt.

Im Hinblick auf die anstehende Verabschiedung des Bundes-Bodenschutzgesetzes gewinnt der Bodenschutz unabhängig vom Grundwasserschutz zukünftig in starkem Maße an Bedeutung. In diesem Zusammenhang sind zukünftig insbesondere derartige Sicherungs-/Sanierungsmaßnahmen stärker zu beachten, für deren Umsetzung keine Auskofferung des Bodens erforderlich ist. Das wichtigste in der Praxis angewandte In-situ-Verfahren dürfte die Methode der Bodenluftabsaugung sein.

In den vergangenen 20 Jahren wurden von der Gerling Consulting Gruppe über 500 LHKW-Sanierungsfälle gutachterlich betreut. Bei über 300 Fällen wurde die Bodenluftabsaugung zur Reinigung der ungesättigten Bodenzone angewandt. Es wird nachfolgend unter besonderer Berücksichtigung der insgesamt bei Bodenluftsanierungen analytisch erfaßten halogenierten Organika über einige interessante Erkenntnisse aus der Projektbearbeitung berichtet.

2 Grundlagen des Verfahrens

Eine unabdingbare Voraussetzung für die Planung von Bodenluftsanierungen und die sachgerechte Interpretation der bei der Sanierung gewonnenen Daten ist das Wissen über die Phasenaustausch- und Migrationsvorgänge der LHKW in dem überaus komplexen System Boden. Aufgrund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften in Form hoher Dichte, niedriger Oberflächenspannung und niedriger kinematischer Viskosität durchdringen LHKW für andere Stoffe dichte Lagen wie Oberflächenversiegelungen und bindige Sedimente und infiltrieren dominant in vertikaler Richtung in den Untergrund. Bei entsprechendem Nachschub können LHKW in extremen Fällen bis auf die Sohle des Aquifers migrieren.

Als Folge des hohen Dampfdruckes der LHKW bildet sich in der ungesättigten Bodenzone um die flüssige Phase ein LHKW-Gaskörper aus. Die Ausbildung des LHKW-Gasphasenkörpers wird im wesentlichen durch folgende Prozesse bestimmt:

- Stoffaustausch von der freien und sorbierten LHKW-Phase in die Dampfphase
- Stoffaustausch von den im Haft- und Grundwasser gelösten LHKW in die Dampfphase
- Ausbreitung der LHKW-Gasphase durch Diffusion

Naturgemäß werden die vorgenannten Vorgänge durch stoffspezifische und bodenphysikalische Vorgaben gesteuert. Zu den stoffbezogenen Grundlagen zählen beispielsweise Dampfdruck, Sättigungskonzentration und Wasserlöslichkeit. Den naturgegebenen Parametern sind u. a. der Bodenaufbau (Zusammensetzung, Kornspektrum, Porenvolumen etc.), die Tiefe des Grundwassers und die Bodentemperatur zuzuordnen.

Von grundlegender Bedeutung ist weiterhin, daß die Ausbildung des Gasphasenkörpers durch Gleichgewichte zwischen den verschiedenen LHKW-Aggregatzuständen kontrolliert wird. Die bestimmende Größe dürfte das Verdampfungsgleichgewicht zwischen der flüssigen und gasförmigen LHKW-Phase sein. Das Verdampfungsgleichgewicht beruht darauf, daß die Konzentration eines Stoffes in der Gasphase eine Funktion der Konzentration in der mit der Gasphase im Gleichgewicht stehenden flüssigen Phase ist.

Das Prinzip der Bodenluftsanierung beruht auf der lokalen Erzeugung eines Unterdruckes im Porenraum der ungesättigten Bodenzone. Entsprechend den Druckgradienten entstehen Gasströmungen, die auf das System der Unterdruckerzeugung gerichtet sind. Je nach Anordnung der Anlagenteile und des Luftdurchsatzes läßt sich das Luftdruckfeld hinsichtlich der max. Luftdruckdifferenz, seiner räumlichen Ausdehnung und Richtung des induzierten

Bodenluftdruckgradienten steuern.

Als Folge der induzierten Gasströmung migrieren die luftgetragenen Bodeneinhaltsstoffe in das Absaugsystem. Durch den Luftstrom wird die mit LHKW beladene Bodenluft aus dem Porenraum befördert und es strömt ständig nicht oder geringer mit LHKW-beaufschlagte Bodenluft in den Sanierungsbereich. Die Durchspülung der Kontaminationszone mit "Frischluft" führt, hervorgerufen durch die Änderung der Gleichgewichtsverhältnisse, zu einer "erzwungenen Verdampfung". Zur Wiederherstellung des Gleichgewichts wird infolgedessen ständig Gas aus der flüssigen LHKW-Phase nachgebildet.

Die Absaugsysteme bestehen aus den beiden Komponenten Filter und Unterdruckerzeuger. Als Filter können unter Berücksichtigung der Standortgegebenheiten sowohl Vertikal - als auch Horizontalfilter verwendet werden. Als Unterdruckerzeuger fungieren bei gut durchlässigen Böden Ventilatoren, bei mittel durchlässigem Untergrund Seitenkanalverdichter und bei schlecht durchlässigen Böden Vakuumpumpen. Bei den durchgeführten Sanierungsprojekten variierte die Reichweite einzelner Absaugpegel bei Luftfördermengen von ca. 10 - 2.000 m³/h zwischen ca. 1 m in Tonen und 200 m in sehr gut durchlässigem Untergrund.

3 Erfahrungen mit LHKW-Einzelstoffen

Aufgrund der über 300 Bodenluftsanierungsprojekte bei LHKW-Schadenfällen, die in den verschiedensten industriellen Branchen abgewickelt wurden, bestehen umfangreiche Erfahrungen darüber, welche Einzelstoffe aus dem großen Stoffspektrum der LHKW mittels Bodenluftabsaugung saniert werden können. Über den vorliegenden Kenntnisstand wird nachfolgend berichtet.

Naturgemäß besitzen nur "leichtflüchtige Stoffe", d. h. Stoffe mit einem hohen Dampfdruck, die Voraussetzungen zur erfolgreichen Bodenluftsanierung. Nach der allgemeinen Definition werden unter "leichtflüchtigen Stoffen" solche verstanden, deren Siedepunkt unter 150 °C liegt. Er erhebt sich somit die Frage, ob gemäß dieser Definition eine Abgrenzung der Stoffe hinsichtlich der Anwendbarkeit der Bodenluftsanierung möglich ist.

Die stoffbezogenen Erfahrungen aus den Sanierungsvorhaben sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Danach wird aufgrund der gesammelten Erkenntnisse im Hinblick auf die stoffliche Eignung zur Bodenluftsanierung eine Klassifizierung der LHKW-Einzelstoffe in gut-sehr gut, mäßig und schlecht vorgenommen.

Bei einer Auswertung der Tab. 1 nach dem Dampfdruck (bei 20 °C) ergibt sich folgendes Muster:

- Gut-sehr gut sanierbare Stoffe: Dampfdruck > 1500 Pa
- Mäßig sanierbare Stoffe: Dampfdruck > 50 Pa
- Schlecht / nicht sanierbare Stoffe: Dampfdruck < 50 Pa

Tab. 1: Eignung von HKW-Einzelstoffen zur Bodenluftsanierung

schlecht/nicht	mäßig	gut/sehr gut
Hexachlorcyclohexan	1,1,2,2-Tetrachlorethan	Dichlormethan
1,2,3-Trichlorbenzol	Pentachlorethan	Trichlormethan
1,2,4-Trichlorbenzol	Hexachlorethan	Tetrachlormethan
1,2,3,4-Tetrachlorbenzol	1,4-Dichlor-2-buten	Chlorethan
Pentachlorbenzol	Hexachlorbutadien	1,2-Dichlorethan
Hexachlorbenzol	Chlorbenzol	1,1,1-Trichlorethan
Trichlorphenole	1,2-Dichlorbenzol	2-Chlorpropan
Pentachlorphenol	1,3-Dichlorbenzol	1,2-Dichlorpropan
PCB ⁽¹⁾	1,4-Dichlorbenzol	1-Chlorbutan
DDT ⁽²⁾	Dichlorphenole	Dibrommethan
		Tribrommethan
		Bromchlormethan
		Bromdichlormethan
		Trichlorfluormethan
		Dichloridfluormethan
		Tetrachlordifluorethan
		Trichlortrifluorethan
		Epichlorhydrin ⁽³⁾
		Vinylchlorid
		1,1-Dichlorethen
		cis-1,2-Dichlorethen
		trans-1,2-Dichlorethen
		Trichlorethen
		Tetrachlorethen
		3-Chlorpropen
		3,4-Dichlor-1-buten

⁽¹⁾: Dichlordiphenyltrichlorethan

⁽²⁾: Polychlorierte Biphenyle

⁽³⁾: Chlor-2,3-epoxypropan

Das bei sehr vielen Schadenfällen auftretende Tetrachlorethen (Per) liegt in der Klasse der gut-sehr gut erfaßbaren Verbindungen am unteren Ende dieser Gruppe. Im unteren Bereich der noch als mäßig sanierbar eingeteilten Stoffe liegt bei den chlorierten Alkanen Hexachlorethan und bei den chlorierten Aromaten Dichlorbenzol. Von den chlorierten Phenolen wird Dichlorphenol im Gegensatz zu Trichlorphenol noch als mäßig sanierbar eingestuft. Von Bedeutung für Sanierungsentscheidungen ist die Tatsache zu werten, daß die bei LHKW-Schadenfällen insgesamt dominierenden chlorierten Alkene (Tetrachlorethen, Trichlorethen) gute bis sehr gute Voraussetzungen zur Bodenluftsanierung besitzen. Bei den als mäßig sanierbar klassifizierten Verbindungen ist von einer grundsätzlichen Sanierbarkeit auszugehen, jedoch sind die Sanierungszeiträume entsprechend lang einzuplanen.

Hinsichtlich der einführend als "leichtflüchtige Verbindungen" definierten Stoffe ist somit festzustellen, daß die maximalen Siedepunkte der noch als mäßig sanierbar bezeichneten Substanzen bei ca. 210 °C liegen. Demnach sind zahlreiche Stoffe, die im klassischen Sinne bereits als "schwerflüchtig" gelten, mittels Bodenluftabsaugung sanierbar.

4 Beobachtungen aus der Sanierungspraxis

Charakteristisch für die Mehrzahl der Bodenluftsanierungs-Projekte ist eine anfangs starke Abnahme der LHKW-Konzentrationen in der Bodenrohluft. Nach dieser einige Tage bis mehrere Monate dauernden Phase 1 stellen sich in Abhängigkeit der LHKW-Phasenmenge des Bodens nach und nach ? konstante LHKW-Gehalte in der Absaugluft ein. In der Phase 1 werden bevorzugt die gut zugänglichen Porenräume gereinigt.

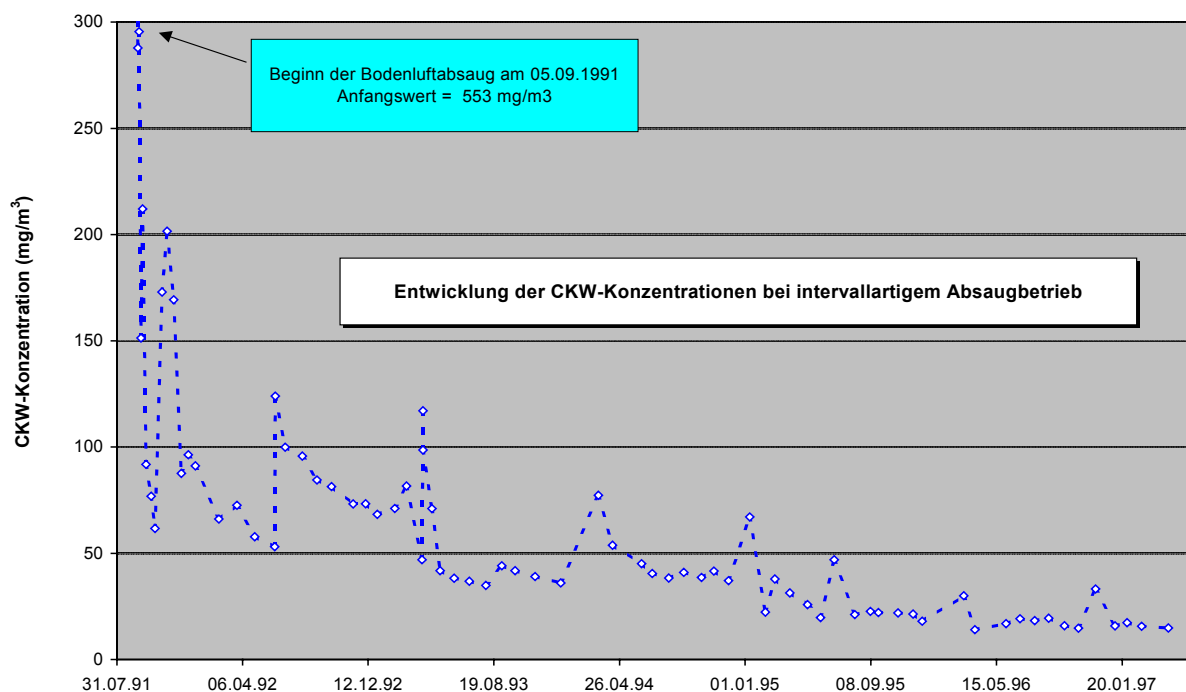
In der wesentlich längeren Phase 2, in der die Absaugung in der Regel diskontinuierlich betrieben wird, resultieren die LHKW-Konzentrationen in der abgesaugten Bodenluft in stärkerem Maße aus den schlecht zugänglichen Poren. Damit gewinnen Diffusionsvorgänge wesentlich an Bedeutung.

Fallbeispiel 1:

Ein Beispiel einer intermittierend betriebenen Bodenluftsanierung mit der typischen Entwicklung der LHKW-Konzentrationen und -Frachten ist in der Abb. 1 dokumentiert. Der Grundwasserspiegel des aus Fein-Mittelsanden bestehenden Untergrundes stand in einer Tiefe von ca. 4 m unter Gelände an.

Als LHKW-Einzelsubstanzen dominierte Tetrachlorethen vor Trichlorethen. In dem sich über insgesamt sechs Jahre erstreckenden Sanierungszeitraum wurde eine LHKW-Menge von ca. 345 kg aus dem Boden entfernt.

Abb. 1: Entwicklung der LCKW-Gesamtgehalte in der Bodenluft

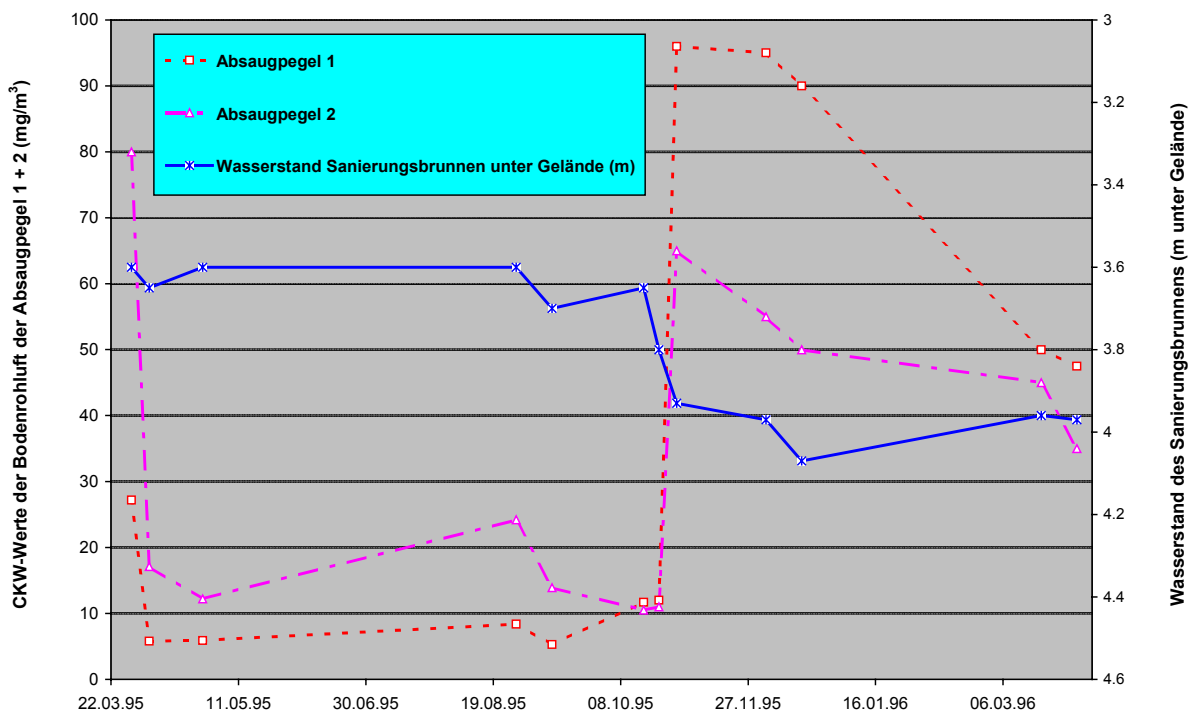


Fallbeispiel 2:

Bei einem weiteren Anwendungsfall besteht der oberflächennahe Untergrund aus stark schluffigen Feinsanden. Aufgrund der geringen Luftdurchlässigkeiten des Bodens werden Vakuumpumpen als Unterdruckerzeuger eingesetzt. Die erzielten Differenzdrücke liegen bei einer Reichweite der Absaugpegel von ca. 8 m bei 0,25 bar.

Die LHKW-Verunreinigung setzt sich aus den Hauptkomponenten Tetrachlor-ethen und Trichlortrifluorethan (Frigen 113) zusammen. Die Bodenluftsanierung wird mittels insgesamt 12 im Schadenbereich installierten Vertikal-Absaugfiltern vorgenommen. Parallel hierzu wird eine hydraulische Grundwassersanierung mit einem im Schadenszentrum gelegenen Brunnen betrieben. Die Förderrate beträgt bei kontinuierlichem Sanierungsbetrieb 1,3 m³/h.

Abb. 2: Entwicklung der CKW-Gehalte in der Bodenrohluft und Variation der Grundwasserstände



Wie aus der Abb. 2 hervorgeht, ist während des Sanierungsverlaufes eine eindeutige Beziehung zwischen dem Grundwasserstand und den LHKW-Konzentrationen in der abgesaugten Bodenluft erkennbar. Bei Unterschreitung eines Grundwasserstandes von ca. 3,80 m unter Gelände (Ende Oktober 1995) steigen die LHKW-Werte in der Absaugluft von ca. 11 auf 95 mg/m³ an. Offensichtlich werden durch den fallenden Grundwasserspiegel stark LHKW führende Horizonte "trockengelegt", die vorher zur gesättigten Bodenzone "gehörten", womit erst die Zugänglichkeit der Bodenluftabsaugmaßnahme zu diesen Schichten gegeben war. Der Anstieg der LHKW-Konzentrationen in der abgesaugten Bodenluft war ebenfalls mit einer starken Zunahme der LHKW-Werte im Rohwasser des Sanierungsbrunnens von ca. 400 auf 5.000 µg/l verbunden. Dieser deutliche Anstieg der LHKW-Gehalte im Förderwasser ist darauf zurückzuführen, daß die Konzentrationsmaxima der LHKW im Vertikalprofil bei 3,80 m unter Gelände auftreten und bei Einstellung dieses Wasserstandes eine stärkere Mobilisierung der LHKW gegeben ist.

Fallbeispiel 3:

Ein weiterer Sanierungsfall ist durch die starke CKW-Kontamination der ca. 12 m mächtigen ungesättigten Bodenzone gekennzeichnet. Der Untergrund besteht bis ca. 4 m unter Gelände aus lehmigen Sanden. Darunter folgen bis zur Aquiferbasis in ca. 22 m Tiefe gut durchlässige Sande und Kiese. Als Hauptkontaminanten sind die Stoffe Tetrachlorethen, 1,2-Dichlorethan, Di- bis Tetrachlormethan, Trichlor-ethen und Hexachlorbutadien zu nennen. Zur Sanierung wird eine Luftmenge von 250 m³/h über Vertikal-Absaugpegel einer thermischen Reinigungsanlage zugeführt. Die Sanierung des Grundwassers erfolgt über eine hydraulische Maßnahme.

Wie aus der Entwicklung der CKW-Gehalte in der Bodenrohluft während des Sanierungsbetriebes zu erkennen ist, traten im Laufe der Sanierung mehrfach starke Erhöhungen der CKW-Gehalte in der abgesaugten Luft auf (Abb. 3). Diese sprunghaften Anstiege der CKW-Werte können zeitlich den verschiedenen nachfolgend beschriebenen Ereignissen zugeordnet werden:

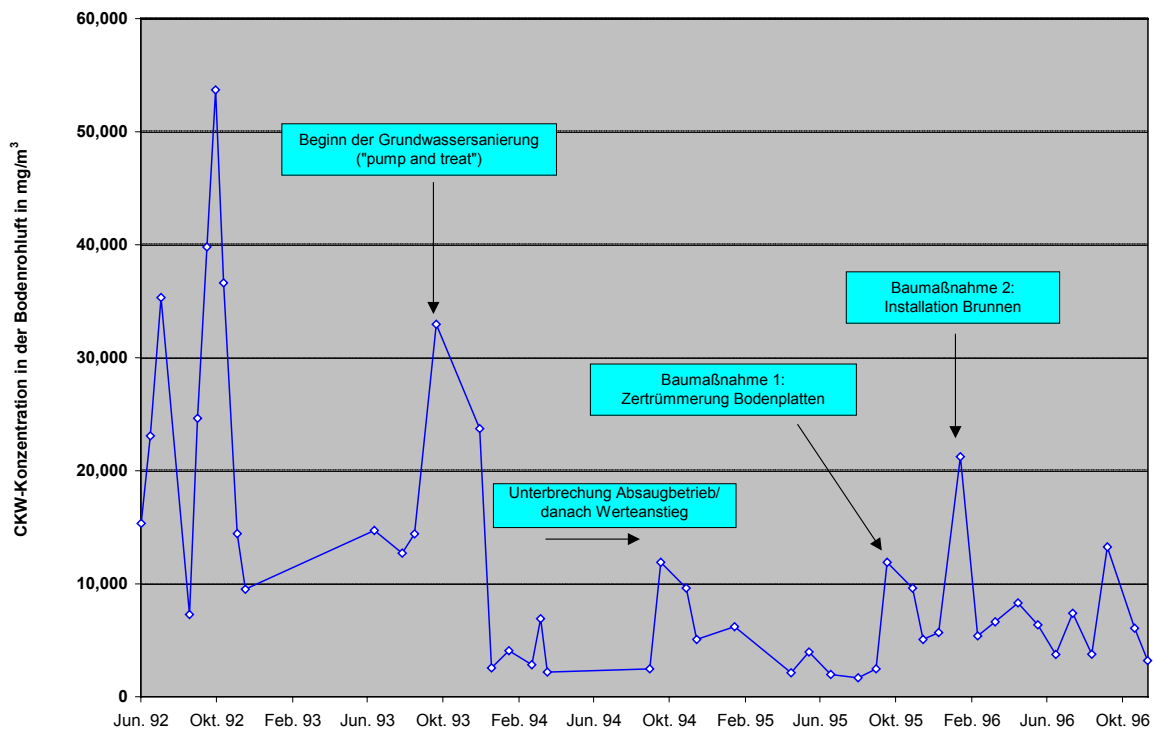
- Im August 1993 wurde mit der Grundwassersanierung begonnen. Als Folge stiegen die CKW-Gehalte der Absaugluft von ca. 12 auf ca. 33 g/m³ an.
- Im Oktober 1994 wurde nach einer ca. viermonatigen Unterbrechung die Bodenluftsanierung wieder aufgenommen. Als Folge war ein Anstieg der CKW-Konzentrationen von ca. 2 auf 12 g/m³ zu verzeichnen.
- Die Erhöhung der CKW-Gehalte im Zeitraum Oktober 1995 erfolgte gleichzeitig mit lokalen Baumaßnahmen. Dabei wurden im Sanierungsgebiet mächtige Bodenplatten aus Beton zertrümmert.
- Zum Zeitpunkt des Anstieges der CKW-Konzentration im Februar 1996 wurde im Sanierungsareal eine Greiferbohrung zur Installation eines neuen Sanierungsbrunnens abgeteuft.

Die Auswirkungen der zuvor genannten Ereignisse auf die Bodenluftsanierung lassen sich wie folgt interpretieren:

Der Anstieg der CKW-Gehalte im August 1994 ist auf die Absenkung des Grundwasserspiegels als Folge des Beginns der Grundwassersanierung zurückzuführen. Damit wurden der Bodenluftabsaugung bisher vom Grundwasser "geflutete" Bodenpartien zugänglich. Durch die Unterbrechung der Bodenluftsanierung im Zeitraum März - Oktober 1994 hat sich entsprechend den Dampfdrücken und Sättigungskonzentrationen eine stark CKW-haltige Gasphase in den Porenräumen des Sedimentes aufgebaut. Nach Entfernung dieses "CKW-Gaskörpers" nahmen die CKW-Konzentrationen deutlich ab und es begann sich ein Beharungsniveau der CKW-Konzentration auszubilden.

Bei den in den Jahren 1995 und 1996 durchgeführten Baumaßnahmen wurde der Untergrund durch die auf den Boden einwirkenden Kräfte erschüttert. Physikalisch wird das Bodengefüge durch die Baumaßnahmen in Schwingungen versetzt. Als Folge wird der Stoffübergang von der flüssigen Phase in die Gasphase beschleunigt, was wiederum zu steigenden CKW-Gehalten in der abgesaugten Bodenluft führt. Ähnliche Beobachtungen konnten auch bei derartigen Projekten gemacht werden, in deren Sanierungszeit Erdbeben oder Bergschläge erfolgten.

Abb. 3: Entwicklung der CKW-Konzentrationen in der Bodenrohluft



5 Schlußbemerkung

Als ein wichtiges Resultat aus der Vielzahl der Sanierungsprojekte ist die Erkenntnis zu werten, daß das Spektrum der durch die Bodenluftsanierung erfaßbaren Stoffe über die "leichtflüchtigen Stoffe" im engeren Sinne hinausgeht. Zu den erfolgreich sanierten Verbindungen gehören mit Hexachlorbutadien Organika mit Siedepunkten bis zu ca. 210 ° C.

Eine unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten optimale Steuerung des Sanierungsbetriebes setzt das Wissen über die Grundlagen der Phasenübergänge der organischen Stoffe und über die spezielle Standortsituation voraus. Bei der sachgerechten Interpretation der aus dem Sanierungsbetrieb gewonnenen Daten können unter anderem zur Minimierung des Gesamtsanierungszeitraumes verschiedene Modifizierungen des Sanierungsbetriebes vorgenommen werden. Einige dieser Möglichkeiten zur Steuerung sind nachfolgend zusammengestellt:

- Einstellung von Luftfördermenge, Unterdruck und Reichweite
- Absaugbetrieb kontinuierlich / diskontinuierlich
- Absaugung / Absaugung und Injektion
- Injektion erwärmter Luft in den Boden

Wie das dritte Fallbeispiel zeigt, können Schwingungen des Bodens in starkem Maße zu einer Erhöhung der aus dem Boden entfernbaren Frachten von Organika führen. Bei geeigneten Sanierungsprojekten eröffnet sich somit die Möglichkeit der Induzierung von Boden-

schwingungen. Dabei wäre insbesondere zu prüfen, ob durch eine induzierte Maßnahme ein wesentlicher Sanierungsfortschritt erzielt werden kann und wie die technischen und finanziellen Aufwendungen im Verhältnis zu dem erzielbaren Sanierungsfortschritt zu bewerten sind. Zur Erzeugung der Schwingungen können unterschiedliche Geräte in Form von Innenrüttlern und Akustik-Log-Ausrüstungen eingesetzt werden.

Ein entsprechendes Projekt mit der Induzierung von Bodenschwingungen befindet sich zur Zeit in der Planungsphase. Über die Resultate wird zu gegebener Zeit berichtet.

Veröffentlicht in: TerraTech 2/1998
