

Mitt. österr. geol. Ges.	83 (1990) Themenband Umweltgeologie	S. 69-76 2 Abb.	Wien, Februar 1991
--------------------------	---	--------------------	--------------------

Chlorierte Kohlenwasserstoffe in Boden, tieferem Untergrund und Aquifer. Prozesse im Untergrund, Erkundung und Sanierung

Von Manfred NAHOLD, Ulrike BÖHLER, Heinz HÖTZL*)

Mit 2 Abbildungen

Zusammenfassung

Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe werden in zunehmendem Maße bei Grundwasserschäden und Kontaminationen der ungesättigten Zone gefunden. Sie treten allein, oder auch gemeinsam mit anderen anorganischen und organischen Stoffen auf. Von den zu ihrer Beseitigung eingesetzten Techniken kommen der Bodenluftabsaugung und dem In-Situ-Strippen neben herkömmlichen hydraulischen Maßnahmen als effektivste Methoden zunehmende Bedeutung zu. Ihr Einsatz erfordert jedoch detailliertere Vorerkundung, als sie oftmals bisher betrieben wurde, sowie die begleitende Optimierung der Sanierungstechnik an jedem einzelnen Schadensstandort. In der Folge werden zwei Sanierungsfälle in Locker- und Festgesteinen kurz vorgestellt.

Der Reichweite rein pneumatischer Sanierungsmethoden sind jedoch materielle Grenzen gesetzt. Diese werden durch Kornverteilung, Tropie, Genität und den relativen Wassersättigungsgrad des Sedimentes bestimmt. Auch ein Nachlassen der Sanierungswirkung durch austrocknungsbedingte Kurzschlüsse über Schrumpfungsrisse konnte beobachtet werden. Nach den bisherigen Erfahrungen ist somit der geologisch-hydrogeologischen Erkundung vor dem Beginn jeder Sanierung besonderer Stellenwert zuzuordnen. Die durch die anschließend eingesetzten hydraulisch-pneumatischen Methoden zu erzielende Erniedrigung des zeitlichen und materiellen Aufwandes kompensiert höhere Kosten für die Vorerkundung in allen Fällen und erspart oftmals einen ungleich aufwendigeren Bodenaushub mit dessen nachgeschalteter Behandlung.

Abstract

High volatile halogenic hydrocarbons are increasingly found in contaminated groundwater and in the unsaturated zone. They occur alone or together with other inorganic or organic substances. Apart from standard hydraulic techniques the most effective methods to remove these substances are the soil air suction and in situ vaporizing techniques. However, in comparison with previous procedures the application of these two techniques requires more detailed preliminary site exploration and accompanying optimization of the cleanup technique at each individual contaminated site. In this paper two sites are discussed where rehabilitation measures were taken.

*) Adresse der Verfasser: Mag. Manfred NAHOLD, Prof. Dr. Heinz HÖTZL, Dipl.-Geol. Ulrike BÖHLER, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität (TH) Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-7500 Karlsruhe.

In unconsolidated sediments, the volume of contaminated material that can be cleaned up by pneumatic methods is limited by grain-size distribution, structure, and the degree of water saturation. The effectiveness of cleanup is further influenced by shrinkage cracks which are produced during the drying of the material. According to current experience, the geological and hydrogeological exploration is of particular importance before any clean-up technique is applied. Thereby the achieved reduction of the temporal and material expenditure compensates for the higher costs of the preliminary exploration in all cases.

1. Einleitung

Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) stellen eine der wohl am häufigsten anzutreffenden Gruppen organischer Verbindungen in Altlasten dar. Als Altlasten werden Schadstoffanreicherungen aus früherem Umgang und Gebrauch von entsprechenden Stoffen beziehungsweise deren Ablagerungen definiert, von denen eine Gefährdung für unsere Umwelt ausgeht. Hierzu gehören neben Altdeponien vor allem kontaminierte Standorte von stillgelegten, aber auch noch in Betrieb befindlichen Anlagen. Für LCKW-Kontaminationen sind vor allem Betriebe der metallverarbeitenden Industrie mit ihren Entfettungsanlagen als auch Bereiche der chemischen Industrie, chemische Reinigungen sowie Tierkörperbeseitigungsanlagen anzuführen.

Aufgrund ihrer allgemein hohen Dampfdrücke und geringen Adsorption in mineralischen Böden erscheinen LCKW zunächst jedoch relativ leicht wieder aus dem kontaminierten Untergrund entfernbar. Vor allem die ungesättigte Zone kann über das Verfahren der Bodenluftabsaugung bei Vorliegen entsprechender pneumatischer Voraussetzungen kostengünstig dekontaminiert werden. Es hat sich gezeigt, daß auch bei Untergrundscheiden mit BTX-Aromaten (Benzol, Toluol und Xylol) Sanierungserfolge in Lockergesteinen erzielt werden konnten (MOLITOR und RIPPER, 1990). Die Sanierung der gesättigten Zone und des Kapillarsaumes hingegen erweist sich als wesentlich schwieriger und langwieriger. Eine Alternative zur hydraulischen Maßnahme, die oft erst nach langjährigem Betrieb der Sanierungsbrunnen zum nachhaltigen Erfolg führt, ist das In-Situ-Strippen. Hierbei wird Luft in den Aquifer gepreßt und nach ihrem Durchwandern der gesättigten Zone in der ungesättigten Zone durch Bodenluftabsaugung wieder entnommen.

Erste Erfahrungen mit diesen Sanierungsmethoden lassen das In-Situ-Strippen bezüglich des Reinigungseffektes der gesättigten Zone weitaus wirksamer erscheinen als die bloße Grundwasserentnahme und on-site Reinigung. Wie bei jedem in-situ Verfahren ist jedoch für die kontrollierbare Anwendung die genaue Kenntnis der Vorgänge im Untergrund sowie der Parameter, die diese Vorgänge beeinflussen und steuern, erforderlich. Feldversuche in Poren- und Kluftrundwasserleitern lieferten wesentliche Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen dieses Verfahrens.

2. Physikochemische Eigenschaften

Chlorkohlenwasserstoffe und zum Teil auch die ähnlichen aliphatischen Brom- oder Fluorchlorkohlenwasserstoffe zeichnen sich im Vergleich zu Wasser durch höhere Dichten und meist höhere Dampfdrücke aus (einzig der Dampfdruck für Tetrachlorethen liegt knapp unter den für Wasser angegebenen 23 mbar), des weiteren durch geringere kinemati-

sche Zähigkeiten und niedrige Oberflächenspannungen und durch ihre erhöhte Lipophilie. Durch die gute Sorption an organischen Stoffen (EINSELE et al., 1990) erklärt sich die Speicherung von CKW in Böden und huminstoffreichen Sedimenten.

Das Zusammenwirken all dieser Eigenschaften ermöglicht meist die schnelle Untergrundpassage auch durch als dicht betrachtete natürliche hydraulische Barrieren. Gleichzeitig läßt sich auch Retardation durch diese physikochemischen Stoffeigenschaften (neben hydraulischen Ursachen) erklären. Bei Sanierungstechniken wie der hier beschriebenen Anwendung der Bodenluftabsaugung und des In-Situ-Strippens werden die stofftypischen Eigenschaften neben den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten als bestimmende Randbedingungen bei Entwicklung und Optimierung berücksichtigt.

3. Transportprozesse und Stoffumbildungen

Der Eintrag in den Untergrund erfolgte in den meisten nachvollziehbaren Fällen über defekte Rohr- und Abwassersysteme, diffusiv durch für Transport und Umschlag ungeeignete Materialien, wie z. B. Beton, sowie punktförmig durch Unfälle aller Art und lokale Bodenbegasung über Abluftanlagen. Daneben emittieren Altablagerungen, welche zum Teil gesättigte Schlämme beinhalten, ihre Lösemittel gasförmig und flüssig. Zunehmende Bedeutung muß auch der Verdriftung in der Atmosphäre und der flächenhaften Immission beigemessen werden, da der größte Teil der verwendeten Stoffe während und nach deren Einsatz verdampft. In flüssiger Phase (gelöst in Wasser oder als Reinstoff) und in Gasphase erfolgt die anschließende Untergrundpassage, wobei unterschiedliche Ausbreitungs- und Retardationsprozesse beobachtet werden, die zum Teil über die stofflichen Eigenschaften der Lösemittel, zum Teil auch durch die Gesamtheit der geologischen und hydrogeologisch-hydraulischen Untergrundeigenschaften erklärt werden. Der für die Ausbreitung bedeutendste Prozeß ist das durch das hohe spezifische Gewicht und die geringe Viskosität und Oberflächenspannung der Stoffe erfolgende Absinken entlang tektonischer und sedimentologischer Inhomogenitäten. Rekondensations- und Lösungsprozesse spielen innerhalb der wasserungesättigten Zone, besonders aber im Bereich des Kapillarsaumes eine besondere Rolle. Dort kann es wie auch an der Aquifersohle (SCHWILLE, 1984) zu bedeutenden CKW-Anreicherungen kommen. Schwankungen des Grundwasserspiegels führen wiederum zur Aufnahme von Schadstoffen direkt aus der Porenluft (z. B. EISELE, 1989). Während konvektive Ausbreitung als Folge der Schwerkraft (SCHWILLE & WEBER, 1991), Temperaturströmung und Diffusion für die Stoffwanderung in gasförmiger Phase bestimmend sind, wird die Ausbreitung im Grundwasser größtenteils durch rein hydraulische Parameter und Diffusion in flüssiger Phase bewirkt.

Neben photochemischen Abbaureaktionen in der Atmosphäre wurden für die einzelnen CKW sehr unterschiedliche abiotische und biotische Umsetzungen im Untergrund beobachtet (WERNER und RITTER 1989 cum lit.). Als Beispiel können bei Schadensfällen mit Tetrachlorethen die Stoffe Trichlorethen, verschiedene Dichlorethene sowie Vinylchlorid als dechlorierte Produkte gaschromatographisch detektiert werden. Es wird mit unterschiedlichem Erfolg versucht, diese Möglichkeiten mikrobieller Transformationen zu Sanierungen in Reaktoren und in situ einzusetzen. Geringe Abbauraten und zum Teil wieder toxische Reaktionsprodukte einiger Stoffe bewirken, daß diese Verfahren bis jetzt nur sehr beschränkt einsetzbar sind.

4. In-Situ-Strippen in Porenaquiferen

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des In-Situ-Strippens ist eine gute vertikale Durchlässigkeit des Bodens. Damit Luft in den Porenraum eindringen kann, muß sie das darin befindliche Wasser verdrängen. Hierzu ist der kapillare Eintrittswiderstand oder Eintrittskapillardruck p_{ke} zu überwinden (vgl. BRAUNS & WEHRLE, 1990). Die Ergebnisse aus Modellversuchen belegen die Schwierigkeit, feinkörnige wassergesättigte Böden mit Luft zu durchströmen: Die in solche Böden verpreßte Luft durchwandert diese nur auf wenigen Luftbahnen. Bei geschichtetem Bodenaufbau werden die feinkörnigen Lagen eher umströmt als durchströmt. Man kann sagen, daß Lockergesteine, die dem Luftertritt nennenswerten Widerstand entgegensetzen (mehr als wenige cm Wassersäule), für die Durchströmung mit Luft zum Zwecke des In-Situ-Strippens nicht geeignet sind.

Werden jedoch geeignete Untergrundverhältnisse angetroffen (vorwiegend Sande und Kiese ohne Tonhorizonte), so ist mit einem guten Reinigungseffekt der gesättigten Zone zu rechnen. Als Beispiel wird auf die Versuche zur Drucklufteinblasung an einem CKW-belasteten Standort im Lockergestein verwiesen, der als Testgebiet für Vergleichsuntersuchungen diente (vgl. BÖHLER, BRAUNS & HÖTZL, 1989). Der betreffende Standort liegt in ca. 10 m mächtigen sandig-kiesigen Flußablagerungen, deren Basis mehrere Dekameter mächtige tertiäre Tone bilden. Abbildung 1 gibt schematisch den Versuchsaufbau und die durchschnittliche CKW-Belastung der Bodenluft und des Grundwassers wieder.

Zu Beginn der 13tägigen Drucklufteinblasung (Einblasrate=100 m³/h) war für sämtliche CKW-Komponenten ein Konzentrationsanstieg im Grundwasser festzustellen. Diese anfängliche Belastungszunahme ist auf die Mobilisierung zuvor immobilisierter CKW-Reserven im nicht durchflußwirksamen Porenraum zurückzuführen. Mit Fortsetzung der Drucklufteinblasung gingen die CKW-Gehalte des Grundwassers auf Werte unterhalb der Anfangskonzentrationen zurück.

Über die parallel mitbetriebene Bodenluftabsauganlage (Absaugrate=160 m³/h) wurde in den 13 Tagen der Versuchseinblasung ein wesentlich höherer Anteil an CKW aus dem Untergrund entfernt als in dem entsprechenden Zeitraum vor Beginn der Drucklufteinblasung bei gleicher Absaugleistung. Die hierbei erfaßten CKW-Mengen lagen zudem ein Vielfaches über den Mengen, die nach den zuvor durchgeführten Konzentrationsmessungen im Grundwasser erwartet worden waren. Das In-Situ-Strippen hatte demnach nicht nur zu einer Mobilisierung vorher immobilisierter CKW-Reserven in der gesättigten Zone geführt, sondern auch zu deren Austrag. Damit wird auch die oftmals lange Dauer einer Grundwassersanierung mittels konventioneller Grundwasserentnahme verständlich. Die in schlecht durchflossenen Zonen des Porenraumes befindlichen CKW-Mengen höherer Konzentration lassen sich durch Wasserströmung allein ungleich langsamer mobilisieren, als dies bei der Drucklufteinblasung der Fall ist (BÖHLER & BRUCKNER, 1990). Gegen Versuchsende waren die mobilisierten CKW-Reserven ausgetragen, und die CKW-Fracht der abgesaugten Bodenluft ging wieder auf die Ausgangswerte zurück.

Zusätzlich zur CKW-Mobilisierung und zum CKW-Austrag induziert die Drucklufteinblasung offensichtlich eine Grundwasserbewegung, die zu Beginn der Einblasmaßnahme bei fehlender Grundwasserhaltung ein radial nach außen gerichtetes Abströmen des Wassers zur Folge hat. Während der weiteren Drucklufteinblasung scheint sich eine quasistationäre Strömung einzustellen, die durch die Ausbildung von Grundwasserwalzen charakterisiert wird. Nach Beendigung des In-Situ-Strippens strömt während des Entweichens der

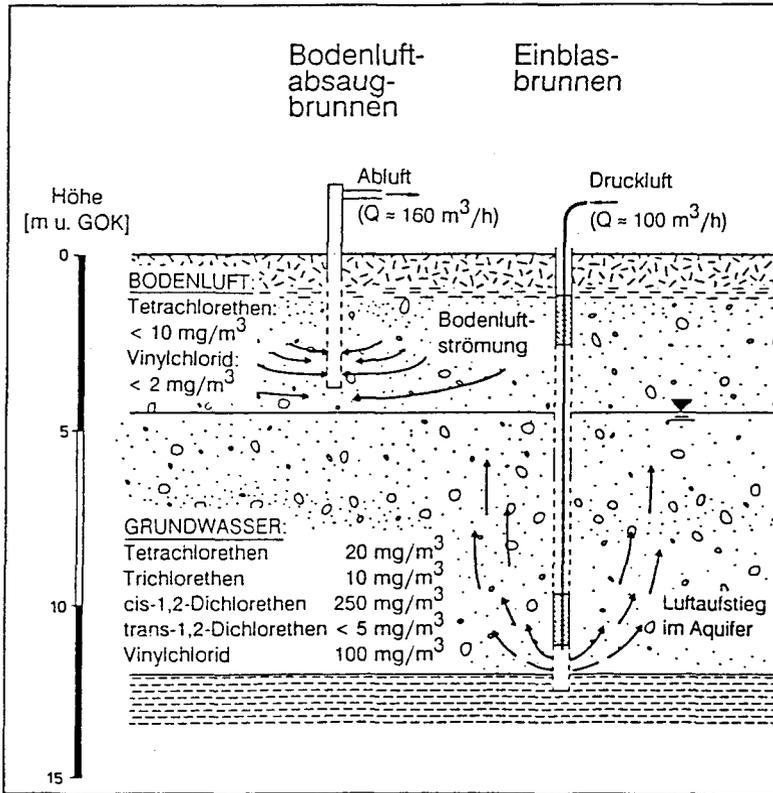


Abb. 1. Versuchsaufbau zum In-Situ-Strippen (schematisch) und mittlere CKW-Gehalte der Bodenluft und des Grundwassers vor Versuchsbeginn.

Restluft aus dem Aquifer Grundwasser von außen in den Einblasbereich. Damit ist nach derzeitigem Kenntnisstand zumindest in der Anfangsphase der Drucklufteinblasung eine zusätzliche Grundwasserentnahme zur Vermeidung einer möglichen Schadstoffverschleppung notwendig. Gleichzeitig ist besonderes Augenmerk auf die Vorgänge im Kapillarsaum zu richten, da bei feinkörnigen Sedimenten dort mit einer Wiederanreicherung von CKW zu rechnen ist.

5. Beobachtungen in Festgesteinsaquiferen

Ein weiterer detailliert untersuchter Schadensfall befindet sich in einem geologisch komplex aufgebauten Standort mit einem oberflächennahen geringmächtigen Porengrundwasserleiter, der von einem zweiten, mächtigen Kluftgrundwasserleiter im oberen Muschelkalk (Trias) unterlagert wird.

Durch den Betrieb einer Tierkörperbeseitigungsanlage, wo Tetrachlorethen (Per) verwendet worden war, wurden erst die oberen Schichten sowie das dort enthaltene Grundwasser kontaminiert. Die höchsten Konzentrationen im Schadenszentrum betragen 3 bis 5 Gramm Gesamt-CKW pro kg Feststoff. Durch biologische Umsetzungen kam es dabei

auch zur Bildung von Trichlorethen, cis- und trans-1,2-Dichlorethen sowie Vinylchlorid (0,5 mg VC/kg Feststoff). Trotz der kaum durchlässigen Tone und der tonig-mergeligen Keuperfolge gelangten die Schadstoffe auch in das zweite Grundwasserstockwerk im Muschelkalk. Innerhalb dieses semigespannten Kluftaquifers kam es vor allem im oberen stärker verkarsteten Teil zur Ausbreitung von vorwiegend Tetra- und Trichlorethen.

Im Rahmen eines mehrstufigen Erkundungsprogrammes wurden in einzelnen Bauabschnitten insgesamt 18 Bohrungen abgeteuft und selektiv ausgebaut, so daß eine getrennte Beobachtung der beiden Aquifere möglich ist. Zur Sanierung wurde als erster Schritt eine Grundwasserentnahme aus dem Kluftaquifer mit Rückgewinnung der CKW-Komponenten durch nachgeschaltete Strippung eingeleitet. Damit soll vor allem eine zwischenzeitlich weitere Ausbreitung der CKW im Untergrund unterbunden werden. In einem zweiten Sanierungsschritt ist vorgesehen, den Zentralbereich der Kontamination von etwa 600 m³ in den tonigen quartären Ablagerungen auszukoffern und den Umgebungsbereich mittels einer erprobten neuen Anwendung der Bodenluftabsaugung zu reinigen, die in der Folge vorgestellt wird. Der ursprüngliche Plan, unter Verwendung von Vakuumpumpen und Heißlufteinpressung im Bereich der bindigen Sedimentbedeckung eine Sanierung herbeizuführen, war wegen der geringen Durchlässigkeit dieser Folge gescheitert. Parallel zum zweiten Sanierungsschritt soll auch im zweiten Grundwasserstockwerk die Sanierung durch ein verbessertes Verfahren fortgeführt werden. Dazu wurde in zwei Pilotversuchen am Standort eine modifizierte Luftabsaugung erprobt (HÖTZL et al., 1990). Im Rahmen dieses modifizierten Verfahrens wird der Kluftgrundwasserspiegel abgesenkt und die Luft aus der nun wasserungesättigten Kluftzone mittels Seitenkanalverdichter abgesaugt. Abbildung 2 zeigt den geologischen und hydrogeologischen Aufbau, die Anordnung einiger Meßstellen sowie schematisch die Funktionsweise der Sanierungseinrichtung.

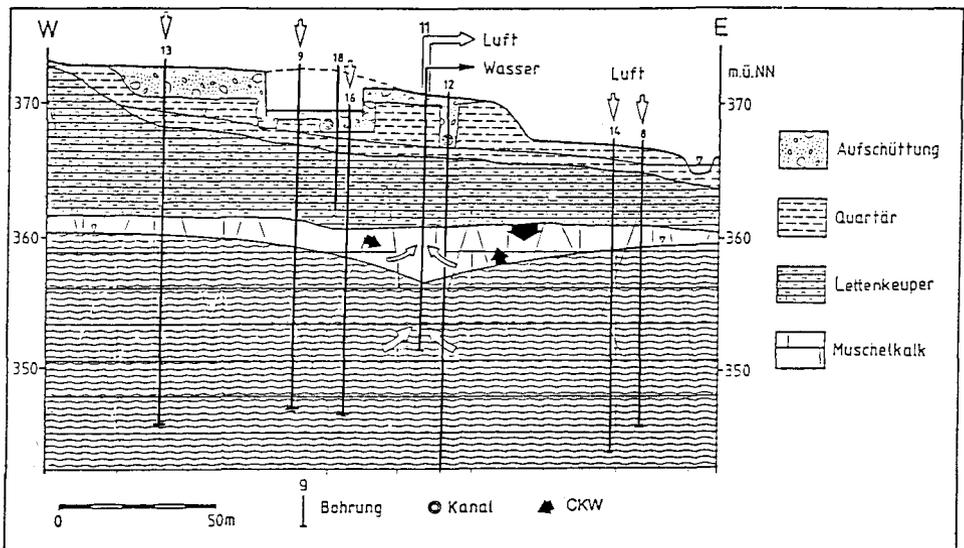


Abb. 2. Geologischer Aufbau des zu sanierenden Bereiches mit schematischer Darstellung der Stoffströme: Schwarze Pfeile symbolisieren die CKW-Mobilisierung, weiße Pfeile weisen auf die Zu- und Abfuhr von Wasser und Luft hin.

Die belüftete Kluftzone befindet sich unter dem noch immer wassergesättigten Poren-aquifer der Sedimentbedeckung. Der Luftnachstrom erfolgt von der Oberfläche über einzelne Bohrungen; die selektive Luftdurchströmung von Kontaminationsbereichen ist dabei über Schieber an den Bohrköpfen steuerbar. Diese Technik der Luftspülung bewirkt die Reinigung des hoch kontaminierten Kontaktbereiches an der Basis des oberen Aquifers. Zusätzlich wird durch den angelegten Unterdruck scheinbar ein erhöhter hydraulischer Gradient im oberen, hoch kontaminierten Aquifer induziert. Die Lösemittelanteile der dadurch in den Kluftbereich nachströmenden Wässer verdampfen bei Erreichen der ungesättigten Zone und werden zum Teil durch den Luftstrom ausgezogen. Nach unten in den gesättigten Klufttraum einsickernde Lösemittelanteile werden über die zur Pumpe führende Wasserströmung ausgezogen. Insgesamt ist der durch diese kombinierte hydraulisch-pneumatische Technik erreichte Lösemittelaustrag um ein Vielfaches höher als die über die herkömmliche Sanierungsmethode erzielte Reinigungswirkung. Die hochkontaminierte und bisher für eine Sanierung nur langsam und schwer zugängliche Basis der bindigen Sedimentbedeckung und der für einen Aushub nicht zugängliche Bereich sind damit wirtschaftlicher sanierbar.

Als dritter und letzter Abschnitt des Sanierungsprogrammes ist nach Abklingen der Schadstofffracht im Kontaktbereich der beiden Aquifere eine weitere Intensivierung der Reinigungsleistung im Kluftgrundwasser vorgesehen: Die In-Situ-Strippung als eine in Porengrundwasserleitern bereits erprobte Technik soll dazu im Kluftbereich Verwendung finden. Sowohl die aufsteigenden Luftblasen als auch eine dadurch induzierte Wasserströmung führen zu einer Mobilisierung von CKW. Zur Ermittlung der dabei wirksamen Randbedingungen wurden Vorversuche an Kluftkörpern im Labormaßstab durchgeführt. Es folgte eine Serie von hydraulisch-pneumatischen Geländeversuchen mit gleichzeitiger Grundwassermarkierung in einem unkontaminierten Kluftgrundwasserleiter (FISCHER und STADLER, 1990). Die Ergebnisse seien hier kurz zusammengefaßt:

- a) Bereits geringe Drücke und Einblasraten erlauben die Durchströmung bedeutender Gebirgsräume, höhere dagegen vergrößern den Wirkungsradius nicht, sondern führen zu intensiveren Luftaustritten im Bereich der Hauptwegigkeiten oder auch zur vollständigen Wasserverdrängung aus diesen.
- b) Die Länge der Einblasstrecke hat allenfalls geringen Einfluß auf die Luftausbreitung.
- c) Wie im Porengrundwasserleiter kommt es im Kluftaquifer zur lokalen, zeitlich begrenzten Aufdomung der Grundwasseroberfläche. Einem Abfluß hoch kontaminierten Wassers in randliche Bereiche ist auch hier, besonders in der Anfangsphase, durch eine begleitende Grundwasserentnahme entgegenzuwirken.
- d) Die Aufstiegsbewegung der Luftblasen und Dichteunterschiede bedingen eine komplexe Grundwasserströmung im Kluftaquifer. Diese kann eine Sanierungswirkung ermöglichen, die über den unmittelbar luftdurchströmten Kluftbereich hinausgeht, kann jedoch andererseits zur Verlagerung von Schadstoffen aus den höheren in tiefere und nicht kontaminierte Aquiferbereiche führen. Voraussetzung für die Anwendung ist eine gründliche dreidimensionale Erkundung (durch Analytik begleitete hydraulische Versuche) und die vorgeschaltete Pumpmaßnahme im Schadenszentrum.
- e) Zwei Untergrundbereiche möglicher CKW-Anreicherungen vor und während der Sanierungsmaßnahmen erfordern besondere Berücksichtigung bei Erkundung (Beprobung) und Sanierung: Es sind dies die Zone des Kapillarsaumes und Schichten oder Linsen von Sediment mit Anteilen organischen Materials (Pflanzenhäcksel oder Torflagen).

- f) Aus horizontalen Hohlräumen und damit in Verbindung stehenden, sich nicht fortsetzenden Kluftelementen wird Wasser dauerhaft verdrängt, hier bildet sich eine Kanalströmung der Luft aus, und der eigentliche Stripeffekt unterbleibt. Der Vorerkundung des Trenngefüges mit hydraulischer Bewertung der Raumlage ist auch aus diesem Grund besondere Bedeutung beizumessen.
- g) Hygienische und hydrochemische Aspekte, wie der Transport von Partikeln und Bakterien sowie die Möglichkeit zur Verockerung müssen vor dem Einsatz pneumatisch-hydraulischer in-situ Maßnahmen berücksichtigt werden.

7. Bibliographie

- BÖHLER, U., BRAUNS, J. & HÖTZL, H. (1989): Bodenluftabsaugung und Drucklufteinblasung zur Sanierung von CKW-Schadensfällen: Systematische Untersuchungen zu einer Sanierungsmaßnahme im Lockergestein.- Mitteilungen Abteilung Erddammbau und Deponiebau am Institut für Böden- und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 2, Karlsruhe.
- BÖHLER, U. & BRUCKNER, F. (1990): In-Situ-Strippen: Erfahrungen an einen Standort im Lockergestein. In P. BOCK, H. HÖTZL & M. NAHOLD (Hrsg.), *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie Karlsruhe, **9**: 241-254.
- BRAUNS, J. & WEHRLE, K. (1990): Zur Dynamik der Bodenluftabsaugung in Lockergesteinen. In P. BOCK, H. HÖTZL & M. NAHOLD (Hrsg.), *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie Karlsruhe, **9**: 123-142.
- EINSELE, G., GRATHWOHL, P., SANNS, M. (1990): Verteilung und Ausbreitung verschiedener leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW) im System Feststoff-Bodenwasser-Bodenluft (und Übergang ins Grundwasser). — In P. BOCK, H. HÖTZL & M. NAHOLD (Hrsg.), *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie Karlsruhe, **9**: 33-50.
- EINSELE, G. (1989): Labor- und Felduntersuchungen zur Ausbreitung und Verteilung leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW) im Übergangsbereich wasserungesättigte/ wasser gesättigte Zone.- *Tübinger Geowissensch. Arbeiten, Reihe C, Hydro-, Ingenieur- und Umweltgeologie*, **3**, 84 S.
- FISCHER, T. & STADLER, W. (1990): Vorversuche zum In-Situ-Strippen im Kluftgrundwasserleiter. In P. BOCK, H. HÖTZL & M. NAHOLD (Hrsg.), *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie Karlsruhe, **9**: 255-274.
- HÖTZL, H., NAHOLD, M., XIANG-WEI & BOCK, P. (1990): CKW-Sanie rung—Erfahrungen über einen Schadensfall in Festgesteinen. In P. BOCK, H. HÖTZL & M. NAHOLD (Hrsg.), *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Ange wandte Geologie Karlsruhe, **9**: 175-186.
- MOLITOR, N. & RIPPER, P. (1990): Die Bodenluftspülung als Sanierungsmaßnahme. — In P. BOCK, H. HÖTZL & M. NAHOLD (Hrsg.), *Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie Karlsruhe, **9**: 187-198.
- SCHWILLE, F. (1984): Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe in porösen und klüftigen Medien — Modellversuche. — *Besond. Mitt. zum Dt. Gewässerkundl. Jahrb.*, **46**, der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- SCHWILLE, F. & WEBER, D. (1991): Model experiments on gravity spreading of heavy organic vapors in the zone of aeration. — *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Angewandte Geologie Karlsruhe*, **12**.
- WERNER, P., RITTER, R. A. (1989): Abbau und Biotransformation von leichtflüchtigen aliphatischen Halogenkohlenwasserstoffen in der Umwelt unter besonderer Berücksichtigung der Vorgänge im Untergrund.- *Schriften der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Insti tut für Wasser- und Abfallwirtschaft*, **70**, Karlsruhe, Dezember 1989.