



Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung · VEGAS  
Institut für Wasserbau · Universität Stuttgart · Pfaffenwaldring 61 · D-70550 Stuttgart

Universität Stuttgart  
Institut für Wasserbau

Wissenschaftlicher Leiter VEGAS  
Jürgen Braun, PhD ☎ 685-67018  
Technischer Leiter VEGAS  
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky ☎ 685-64716

Pfaffenwaldring 61  
D - 70550 Stuttgart  
Telefon +49 (0) 711 685 -64717  
Telefax +49 (0) 711 685 - 67020  
E-Mail: vegas@iws.uni-stuttgart.de

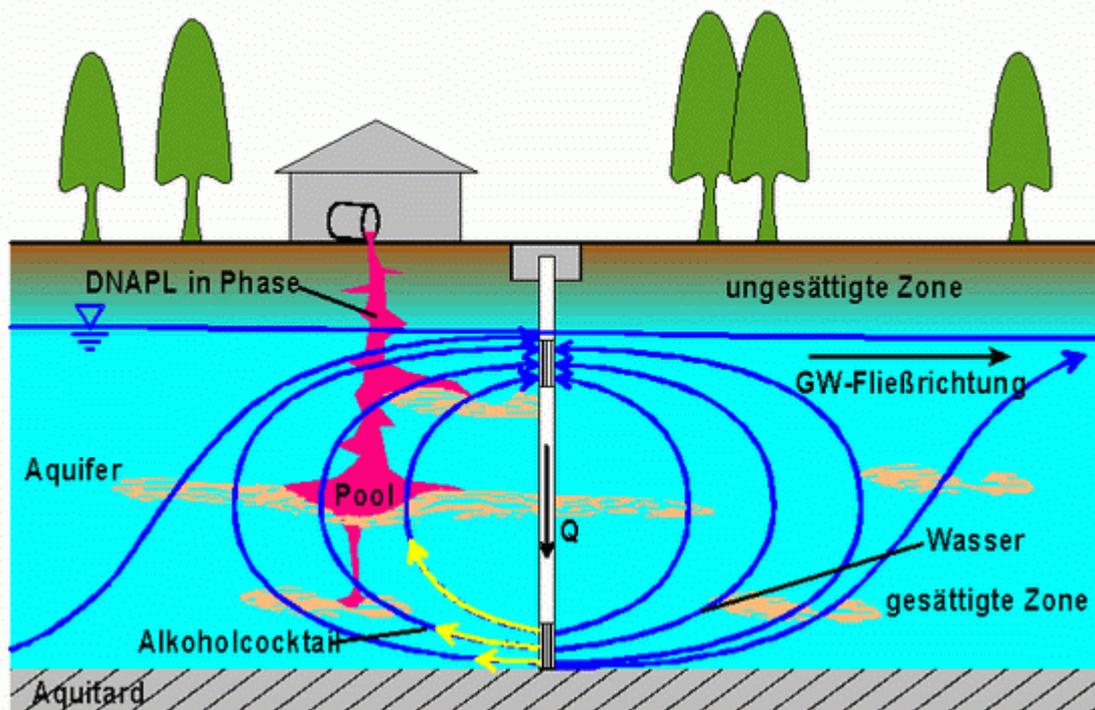
## **Entwicklung einer weitergehenden Grundwassersanierungstechnologie zur Abreinigung von anthropogenen chlorierten Kohlenwasserstoffen hoher Dichte (CKW) durch Alkoholinjektion**

### **1. Einleitung**

Ziel dieses Projektes (Entwicklung einer weitergehenden Grundwassersanierungstechnologie zur Abreinigung von anthropogenen chlorierten Kohlenwasserstoffen hoher Dichte (CKW) durch Alkoholinjektion:

Teil A - Hydraulische Steuerung der gezielten Alkoholinjektion und  
Teil B - Solubilisierung und kontrollierte Mobilisierung)

ist es, eine innovative In-situ-Sanierungstechnologie zu entwickeln, um CKWs effizient aus der gesättigten Bodenzone zu entfernen. Durch gezielte Injektion mittels eines Grundwasserzirkulationsbrunnens (GZB) soll ein Alkoholcocktail in den Boden injiziert werden und den kontaminierten Bereich durchströmen, so dass der Schadstoff durch Solubilisierung und kontrollierte Mobilisierung anschließend aus dem Grundwasserleiter entfernt werden kann. Dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt wird gemeinsam vom Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe (IfH) und dem Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (IWS) bearbeitet.



**Abb.1:** Prinzipskizze des Grundwasserzirkulationsbrunnens während der Alkoholspülung

Das Institut für Hydromechanik beschäftigt sich dabei mit der "Hydraulischen Steuerung der gezielten Alkoholinjektionen" (Teil A) mittels eines Grundwasserzirkulationsbrunnens. Am Institut für Wasserbau wird die "Solubilisierung und kontrollierte Mobilisierung von CKW" (Teil B) untersucht. Basierend auf verschiedenskalgigen Versuchen und mit Unterstützung numerischer Simulationen soll eine effiziente Sanierungstechnologie entwickelt werden. In Batch- und Säulenversuchen wurde ein geeigneter Alkoholcocktail ausgewählt und sein Verhalten im Boden und sowie in Bezug auf den Schadstoff untersucht. Rinnen- und großskalige Behälterversuche dienen dazu das hydraulische System während der Alkoholspülung weiter zu erforschen, um die Sanierungsdauer abzuschätzen zu können.

## 2. Vorgehensweise

1. Entwicklung eines Alkoholcocktails (Mischung aus einem hydrophilen, einem lipophilen Alkohol und Wasser)
2. Nachweis der hydraulischen Kontrollierbarkeit der dichtebeeinflussten Mehrphasen- / Mehrkomponentenströmung
3. Entwicklung einer Injektionstechnik zur räumlichen gezielten, auf den Schadensherd begrenzten Zugabe des Alkoholcocktails
4. Einsatz und Weiterentwicklung der innovativen Technologie des Partitioning Tracer Tests (PTT) zur räumlichen Eingrenzung des Schadstoffherds und zur Abschätzung der Schadstoffmasse
5. Weiterentwicklung einer bereits zur Verfügung stehenden Anlage zur Abwasseraufbereitung / Alkoholrecycling

6. Numerische Modellierung und Entwicklung eines neuen Moduls für das numerische Modell MUFTE\_UG (Multiphase Flow, Transport and Energy Model – Unstructured Grid)
7. Durchführung realitätsnaher, großskaliger Experimente im Blockaquifer (VEGAS)
8. Konzepterstellung und Standortauswahl für eine Pilotstudie auf Basis der experimentellen Ergebnisse

### 3. Aktueller Stand

#### Batchtests

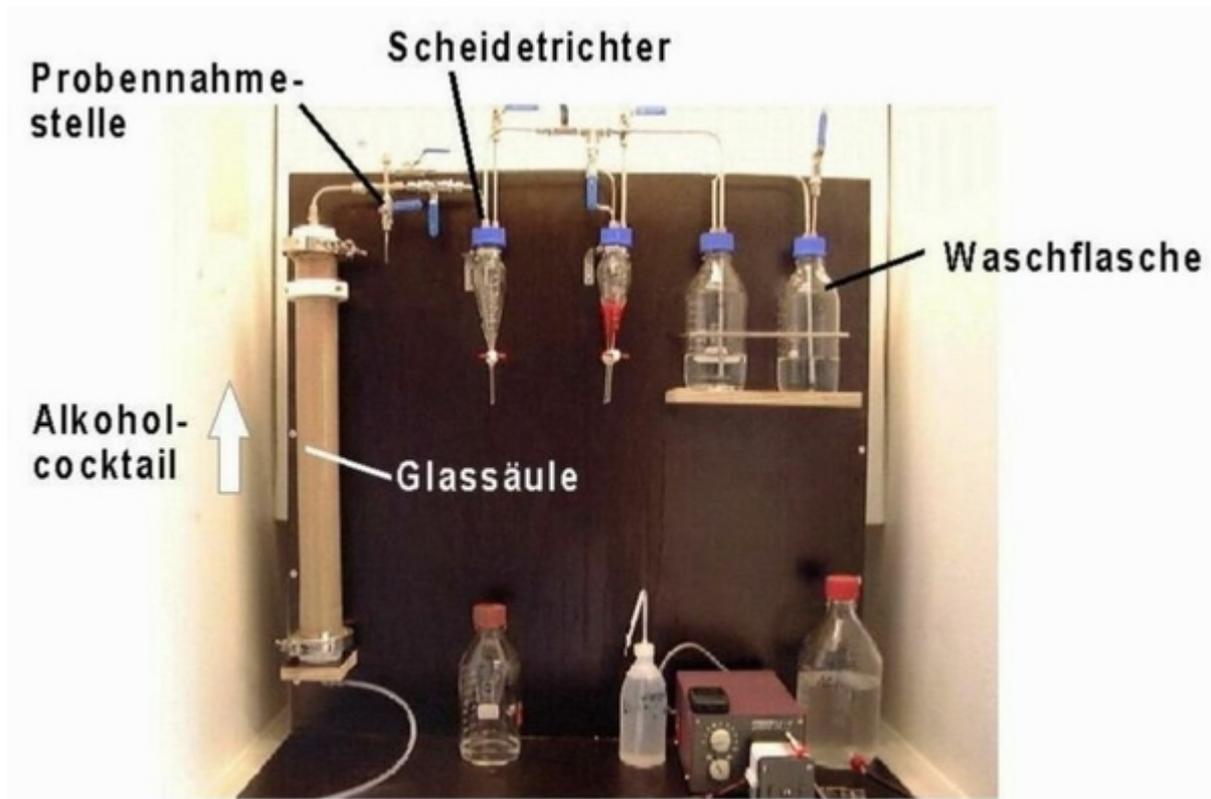
Zur Untersuchung der relevanten Prozesse der Alkoholspülung wurden Batchtests und Säulenversuche durchgeführt. In Batchtests wurden diverse Alkohol-Wasser-Mischungen (Alkoholcocktails) auf ihre Eignung als Sanierungslösung getestet.



**Abb. 2:** Ansetzen von Alkohol-Wasser-Mischungen zur Bestimmung des Mischungsverhaltens

#### Säulenversuche

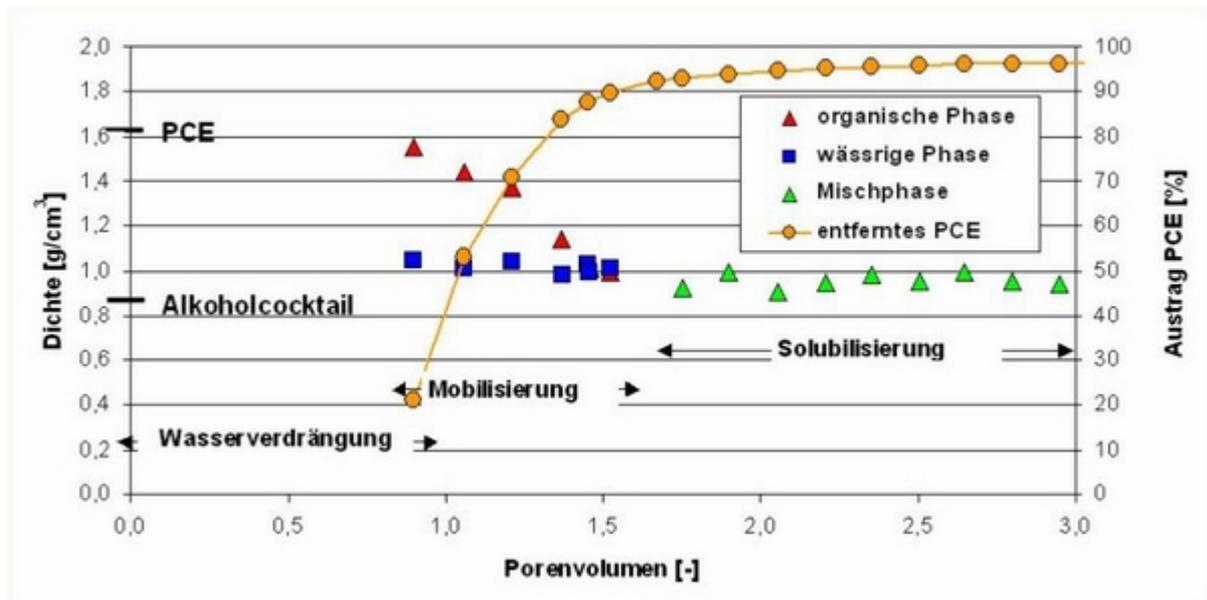
Die Sanierungseffizienz geeigneter Alkoholcocktails wurde in anschließenden Säulenversuchen untersucht. Dabei wurde der Alkoholcocktail von unten nach oben durch eine mit Sand gefüllte und wassergesättigte Säule gespült. Als Schadstoffe waren zuvor PCE bzw. TCE (repräsentative DNAPL) in residualer Sättigung eingebracht worden. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen porösen Medien und unterschiedlichen Injektionsraten (Filtergeschwindigkeiten) durchgeführt.



**Abb. 3:** Säulenversuchsstand für Alkoholspülungsversuche

In den Säulenversuchen konnte der DNAPL sicher und effizient entfernt werden. Neben einem geeigneten Alkoholcocktail ist eine aufwärtsgerichtete Strömung nötig um ein Absinken des Schadstoffes zu verhindern. In den Säulenversuchen konnten für verschiedene Sande die vertikal aufwärtsgerichtete Mindestgeschwindigkeiten (kritische Geschwindigkeiten) bestimmt werden, bei der gerade keine abwärtsgerichtete Verlagerung des Schadstoffes stattfindet (unkontrollierte Mobilisierung).

In der folgenden Abbildung ist die Veränderung der Dichte eines Alkoholcocktails und der PCE Austrag als Funktion des injizierten Porenvolumens aufgetragen. Der mit PCE residual gesättigte Feinsand wurde mit einem Alkoholcocktail, bestehend aus 54% 2-Propanol, 23% Wasser und 23% 1-Hexanol, mit einer Filtergeschwindigkeit von 4 m/d durchströmt.

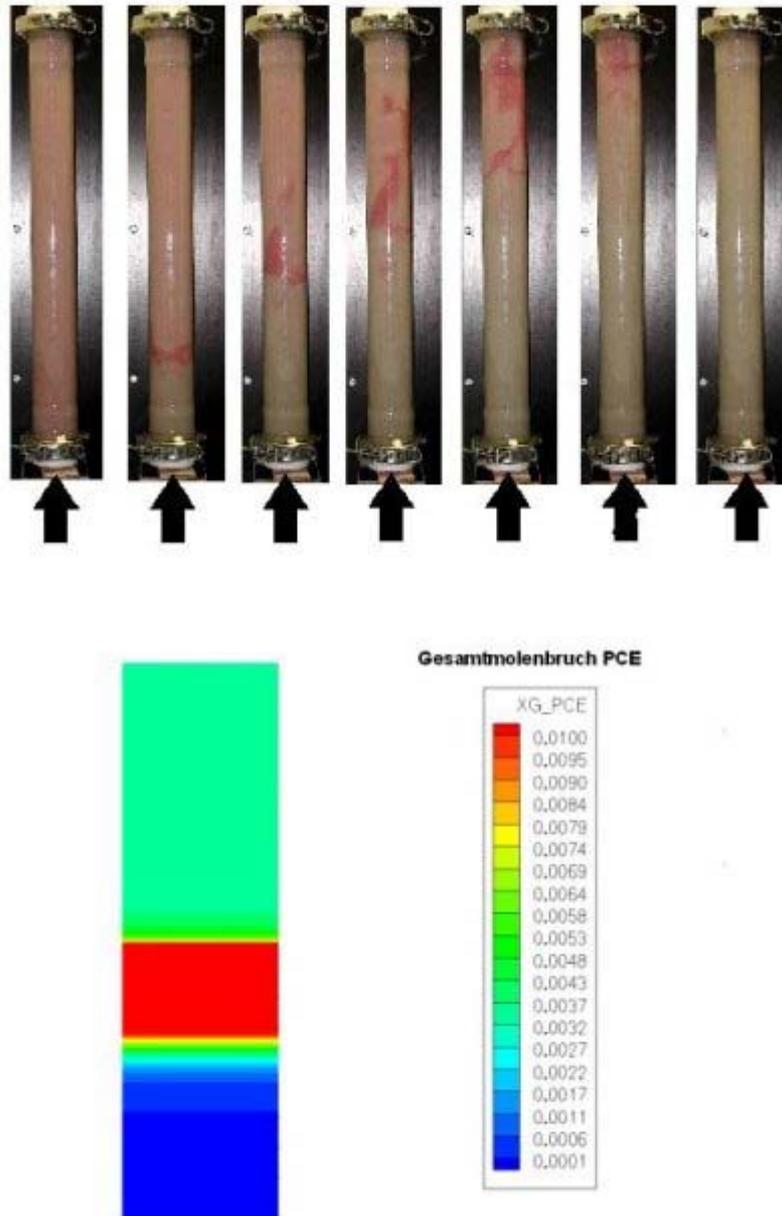


**Abb. 4:** Dichteänderung und Austrag von PCE während eines Säulenversuches

Mit dem ersten Porevolumen des Cocktails verdrängte man das Wasser aus dem Porenraum des Sandes. Beim Kontakt des Alkohols mit dem PCE wurde die Grenzflächenspannung herabgesetzt und der Schadstoff mobilisiert. Während der Alkohol-Spülung partitionierte immer mehr 1-Hexanol (lipophiler, schwellender Alkohol) in das PCE und verringerte so dessen Dichte stetig, so dass nach ca. 1,5 gespülten Porevolumen die Dichte der Schadstoffphase von ursprünglich  $1,62 \text{ g/cm}^3$  auf die Dichte von Wasser reduziert war. Ab diesem Zeitpunkt wurde nur noch wässrige Phase aus der Säule ausgetragen, in der der Schadstoff gelöst war (Solubilisierung).

#### Numerik

Die aus den Versuchen gewonnenen Daten wurden zur Weiterentwicklung des numerischen Modells MUFTE (Multiphase Flow, Transport and Energy Model – Unstructured Grid) verwendet. Dabei wurden Gleichungen für die relevanten Einflussparameter des 2-Phasen/4-Komponenten-Gemisch abgeleitet (Dichte-, Viskositätsänderung, Phasenübergänge und Änderung der Grenzflächenspannung), die in das numerische Modell implementiert wurden.



**Abb. 5:** Schadstoffaustrag während eines Säulenversuches und zugehörige numerische Simulation

### Großskaliger Versuch im VEGAS-Blockmodell

Das VEGAS-Blockmodell ist 9 m lang, hat eine Breite von 6 m und ist 4,5 m tief. Es besteht aus quaderförmigen Blöcken mit einer Kantenlänge von jeweils 1,5 m. Die drei-dimensionale Blockstruktur des Blockaquifers ergab sich aus der Verteilung von Blöcken aus einem gutdurchlässigen, grobsandigen Feinkies,  $KW = 3,5 \cdot 10^{-3}$  m/s, und einem mitteldurchlässigen, kiesigen

Sand,  $KW = 7,5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Der freie Grundwasserspiegel befand sich etwa 40 cm unter der Geländeoberkante.

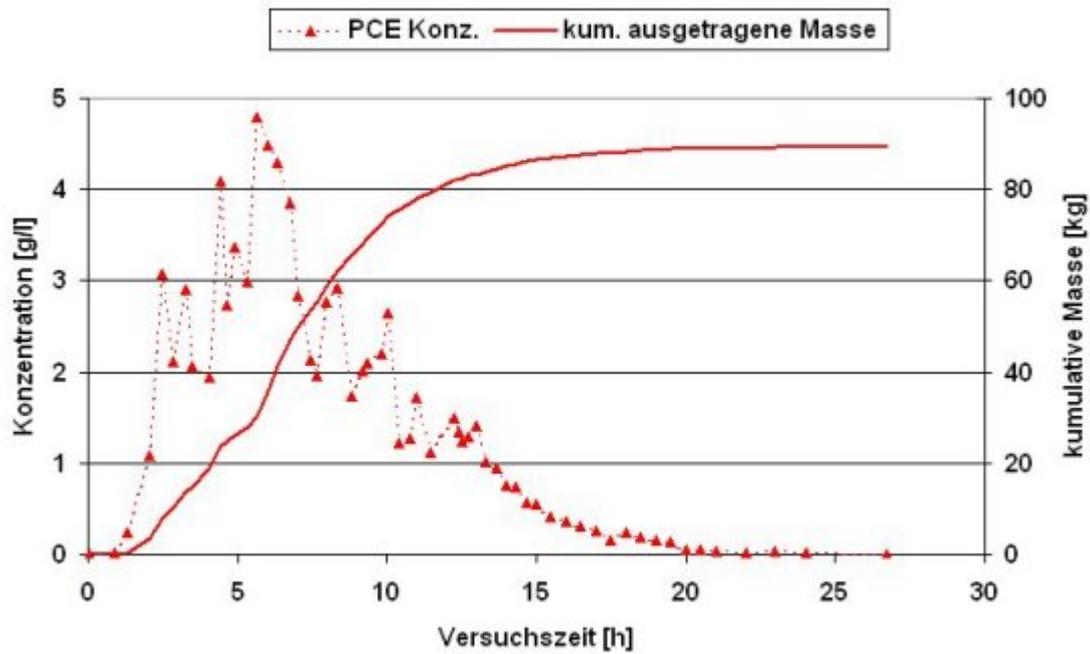


**Abb. 6:** Blick auf das VEGAS Blockmodell

Der Bereich des eingebauten Schadstoffs misst ca.  $1,5\text{m} \times 0,7\text{m} \times 0,9\text{m}$  (L\*B\*H) und umfasst demnach ein Volumen von ca.  $1\text{ m}^3$ . Insgesamt wurden 4 Schichten mit je 12 geforenen Schadstoffblöcken eingebaut. Ein Schadstoffblock enthielt  $0,32\text{ kg}$  (=  $0,2\text{ l}$ ) PCE. Das gesamte Schadstoffvolumen umfasste  $15,36\text{ kg}$  (=  $9,5\text{ l}$ ). Bei einer Porosität von  $0,33$  ergab dies eine mittlere Schadstoffsättigung von  $3\%$  des Porenraums.

Durch den Schadensherd wurde ein Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) gerammt. Über diesen GZB wurde zunächst ein Alkoholcocktail, bestehend aus  $54\%$  2-Propanol,  $23\%$  Wasser und  $23\%$  1-Hexanol, mit einer Pumprate von  $540\text{ l/h}$  über 8 Stunden zugegeben. Anschließend wurde eine Wasser / Propanol Mischung mit einer Pumprate von  $330\text{ l/h}$  über 6 Stunden zugegeben, bevor 12 Stunden lang mit der selben Pumprate Wasser in das Blockmodell injiziert wurde. Die Versuchsdauer betrug insgesamt 26 Stunden.

Durch diese Alkoholspülung konnte der Schadstoff PCE innerhalb kurzer Zeit sicher und effizient aus dem künstlichen Aquifer entfernt werden. Die Schadstoffkonzentrationen am Auslauf (Entnahmekammer des GZB) sind in Abb. 7 dargestellt.



**Abb. 7:** Schadstoffkonzentration am Entnahmebrunnen und kumulativer Schadstoffaustrag

Der nächste Schritt ist die Übertragung der gewonnenen Kenntnisse auf einen realen Schadensfall (Pilotprojekt).