



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

## **Thermisch unterstützte In-situ-Sanierung einer Untergrundverunreinigung durch Perchlorethylen (PCE) in Albstadt-Ebingen, Zollernalbkreis**

### **Ziele**

Der Grundwasserleiter und der Bodenkörper am ehemaligen Standort eines metallverarbeitenden Betriebes unterhalb der Räumlichkeiten einer Metallreinigungsanlage in Albstadt, Zollernalbkreis ist verunreinigt mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (Perchlorethen). Das ehemalige Produktionsgebäude wurde verkauft, der derzeitige Eigentümer betreibt in den Räumlichkeiten eine Druckerei.

Am Standort wurde seit ca. 10 Jahren eine klassische hydraulische Grundwassersanierung und Bodenluftabsaugung betrieben. Der gasseitige Schadstoffaustrag sollte über das in-well stripping Verfahren verbessert werden. Mit dem Rückgang der Austragsraten in den Jahren vor 2001, war die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme in Frage gestellt und die Sanierung im Jahre 2001 ausgesetzt worden. Die zuständigen Behörden schlugen im Jahre 2002 den Einsatz der Dampf-Luft-Injektion (TUBA) zur Sanierung des Standortes vor.

Im Rahmen eines öffentlich-rechtlichen Sanierungsvertrages zwischen dem Landratsamt Zollernalbkreis und dem Sanierungspflichtigen wurde eine thermisch unterstützte Sanierung des lokal begrenzten Schadens mittels Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone vereinbart (Abb. 1) und als Pilotsanierung ab Oktober 2003 durchgeführt. Die Planung, Anlagenauslegung, wissenschaftliche Betreuung und sanierungstechnische Durchführung erfolgte durch VEGAS. Ein Ingenieurbüro betreute die Sanierung im Auftrag des Sanierungspflichtigen.

Ziel war die Reinigung des Bodens im Bereich des Schadensherdes innerhalb eines Zeitraumes von drei bis vier Monaten. Die laufende Produktion sollte durch die Sanierungsmassnahme nicht beeinträchtigt werden. Die gesamte Maßnahme sollte bis Ende März 2004 abgeschlossen sein. Der Nachweis des Sanierungserfolges sollte über den Massenaustrag, der vollständigen Erwärmung des Schadenzentrums auf Temperaturen größer 90°C, sowie dem signifikanten

Rückgang der PCE-Konzentrationen im abstromigen Grundwasser (> 95 %-ige Reduzierung) erfolgen.

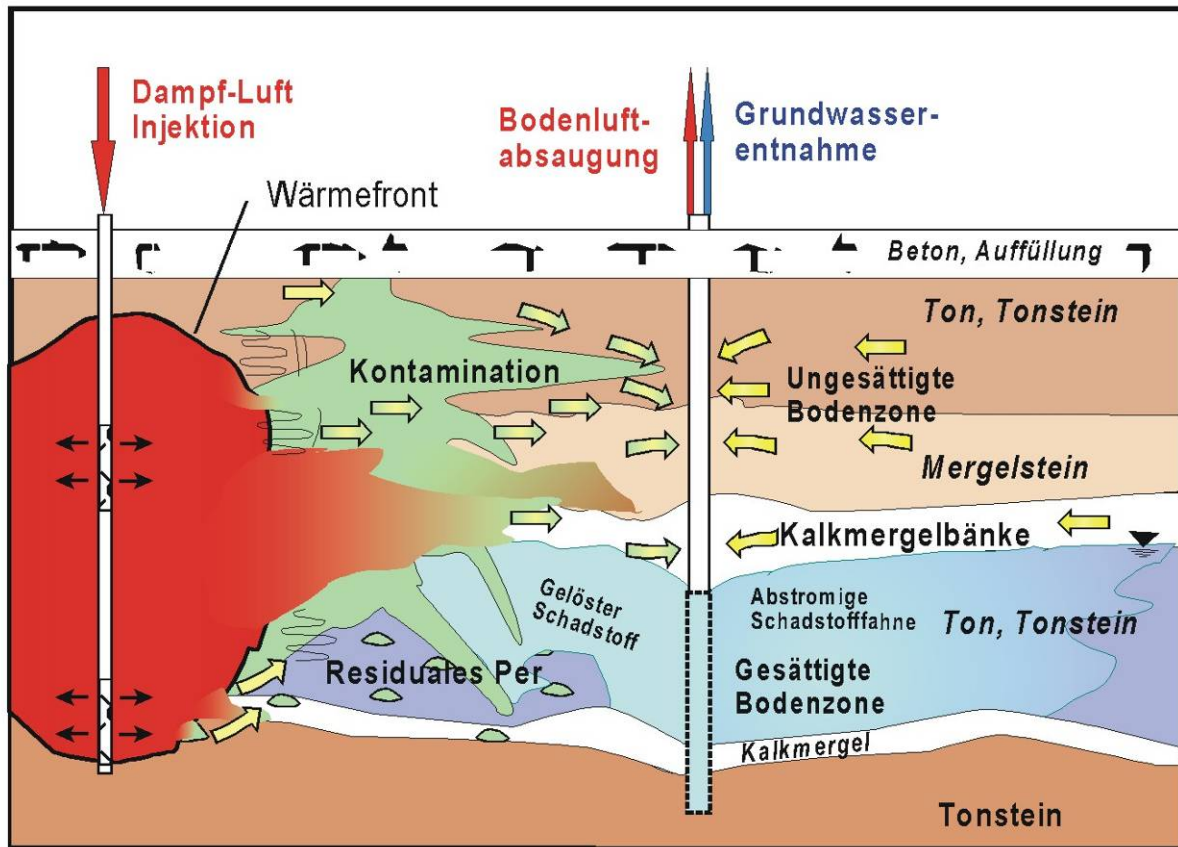


Abbildung 1: Prinzipskizze der simultanen Sanierung der gesättigten und ungesättigten Zone mittels Dampf-Luft-Injektion am Standort Albstadt

## Vorgehensweise

### Prüfung der Eignung des Verfahrens

Auf Anfrage des Landratsamtes Zollernalbkreis prüfte VEGAS die Möglichkeit des Einsatzes der Dampf-Luft-Injektionstechnik zur Reinigung des Grundwassers und Bodens am Standort Albstadt unter den Aspekten:

- Lage, Art und Ausmaß der Kontamination (Erkundungs- und Sanierungskontrollberichte Ing.-Büro Dr. Eisele und Partner)
- Hydrologische Charakterisierung des Standortes
- Bauliche und technische Gegebenheiten am Standort

Das Verfahren erschien grundsätzlich geeignet, aufgrund einer anstehenden gut durchlässigen Kalkmergelschicht, einem gespannten Grundwasserleiter, sowie angesichts der räumlichen Ausdehnung und den baulichen Gegebenheiten.

## **Hydrogeologische Untersuchung des Standortes**

Im April 2003 wurde der komplexe, stark heterogene geologische Aufbau im Schadenszentrum hydrogeologisch eingehend untersucht. Die Messungen bestätigten das Vorliegen einer mitteldurchlässigen geringmächtigen Schicht mit einer hydraulischen Leitfähigkeit um  $2 \times 10^{-04}$  m/s. Im Mai 2003 wurde ein Angebot zur Sanierung des Schadensherdes mittels Injektion einer 90%-igen Dampf-Luft-Mischung auf Anfrage des Sanierungspflichtigen und dem beratenden Ingenieurbüro abgegeben. Die projektierte Sanierungsdauer lag bei drei - vier Monaten. Dem Angebot wurde im Rahmen eines öffentlich-rechtlichen Sanierungsvertrages zwischen dem Sanierungspflichtigen und dem Landratsamt im Juli 2003 entsprochen.

## **Einrichtung des Sanierungsfeldes und Anlageninstallation**

Die In-situ-Sanierung sollte ohne Einschränkung der Produktion im Fabrikgebäude erfolgen. Ein Bereich der Halle wurde als Sanierungsraum abgetrennt, die erforderlichen Bohrungen zur Installation der Injektions- und Extraktionsbrunnen, sowie der Temperaturmesslanzen erfolgten im August 2003. Die Sanierungsanlage wurde im September 2003 installiert und in Betrieb genommen.

## **Gastracertest und hydraulische Untersuchung**

Die hydraulische Anbindung der Extraktionsbrunnen wurde nach deren Installation über flow-log-Messungen dokumentiert. Die hydraulische Anbindung der Injektionsbrunnen an die Bodenluftabsaugung unter dem Aspekt einer vollständigen Erfassung der injizierten Luftmenge konnte in einem Gastracertest nachgewiesen werden.

## **Sanierung des Standortes**

Nach einer einwöchigen Air-Sparging Phase wurde Mitte Oktober mit der Injektion des Dampf-Luft-Gemisches begonnen. Nach ca. 12 Wochen Sanierungsbetrieb konnte die Dampf-injektion nach Erreichen des Sanierungsziels (Aufheizung des vorgesehenen Untergrundbereichs) abgeschaltet werden. In der anschließenden dreiwöchigen Abkühlphase wurde die Luftinjektion (Air-Sparging) ohne nennenswerten Schadstoffaustrag weiterbetrieben.

## **Rückbau der Sanierungsanlage**

Der Abbau der Sanierungsanlage erfolgte termingerecht bis Ende März 2004, die genutzten Räumlichkeiten stehen als Produktionsräume wieder zur Verfügung.

## Ergebnisse

Der Standort ist geologisch durch seinen stark heterogenen Aufbau mit schichtenweiser Lagerung von Tonstein, Mergelgestein und Kalkmergelstein gekennzeichnet und kann als hydraulisch schwer sanierbar angesehen werden. Die geringen Durchlässigkeiten der anstehenden Tonsteine und Tone im unteren Bereich der Aquifers, sowie der ungesättigten Zone erzeugen einen gespannten Grundwasserleiter (Abb. 2). Die durchgehend anzutreffende Kalkmergelsteinschicht ca. 4 m u. GOK bildet die bevorzugt wasserführende Schicht. Der Schadstoff ist unter- und oberhalb dieser Schicht über eine Mächtigkeit von 2 - 2,5 m anzutreffen. Insgesamt sind ca. 350 m<sup>3</sup> Boden kontaminiert.

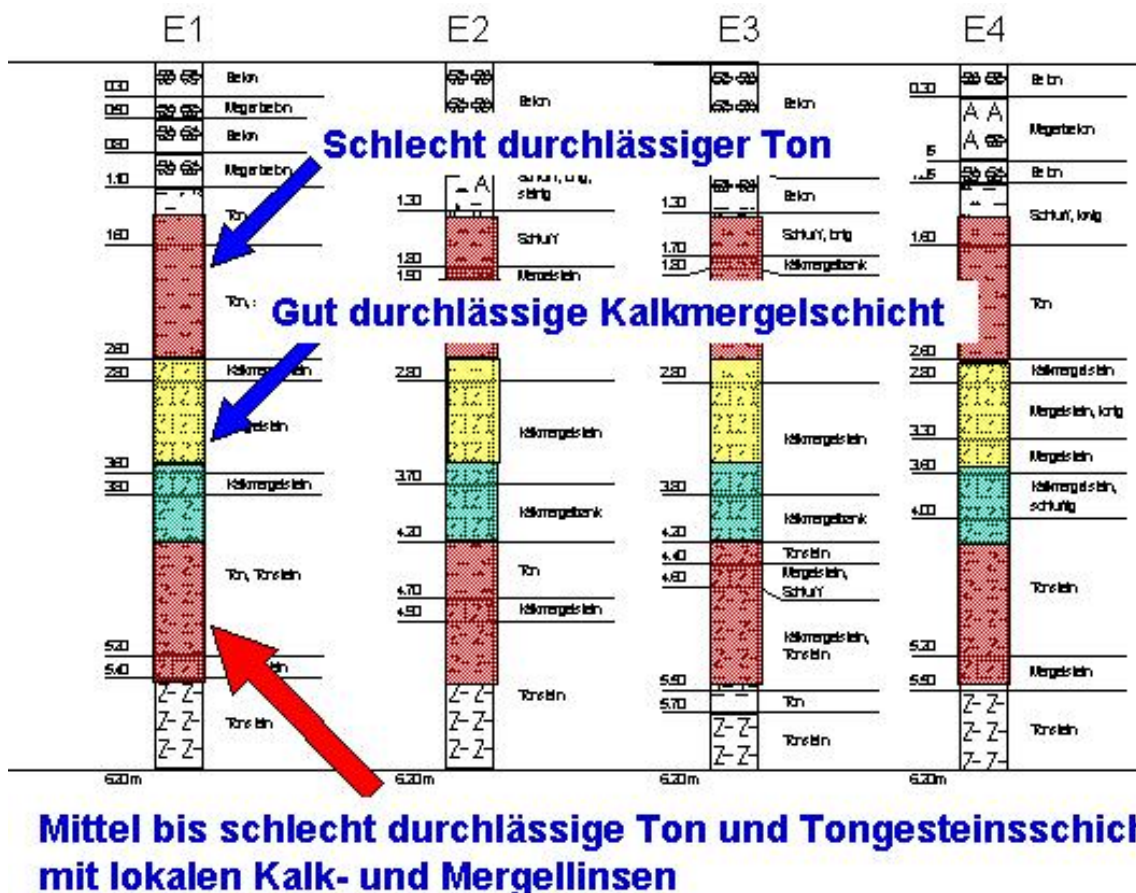


Abbildung 2: Bodenprofil am Standort basierend auf den Bohrungen zur Installation der Sanierungsbrunnen

Das Schadenszentrum liegt unterhalb den Räumlichkeiten der ehemaligen Entfettungsanlage eines metallverarbeitenden Betriebes. Zwischen 1994 und 2001 wurde eine hydraulische Sanierung, verbunden mit der Injektion von Luft in den Grundwasserextraktionsbrunnen (in-well-Stripverfahren) und einer Bodenluftabsaugung. Insgesamt konnte in 7 Betriebsjahren ca. 32 kg Schadstoff (Perchloroethen) entfernt werden.

## Das Sanierungskonzept

Die Sanierung erfolgte über Injektion eines 90%-igen Dampf-Luft-Gemisch (ca. 45 kW Injektionsleistung) in 4 Stufen:

1. Injektion in den unteren Bereich des Aquifers bis zur vollständigen Erwärmung der mittel durchlässigen Kalkmergelschicht,
2. parallele Injektion in den oberen und unteren Bereich des Aquifers bis zum Rückgang der Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft,
3. alleinige Injektion in den oberen Bereich bis zum Erwärmen der ungesättigten Zone und Rückgang der Schadstoffkonzentrationen,
4. Betrieb der Luftinjektion (Air-Sparging) nach Ausschalten der Dampf-injektion zur Abkühlung des sanierten Bodenbereichs.

Die verdampften und mit der injizierten Luft ausgetragenen Schadstoffe wurden über eine Bodenluftabsaugung entfernt. Parallel wurde eine intensive Grundwasserhaltung zur hydraulischen Sicherung betrieben.

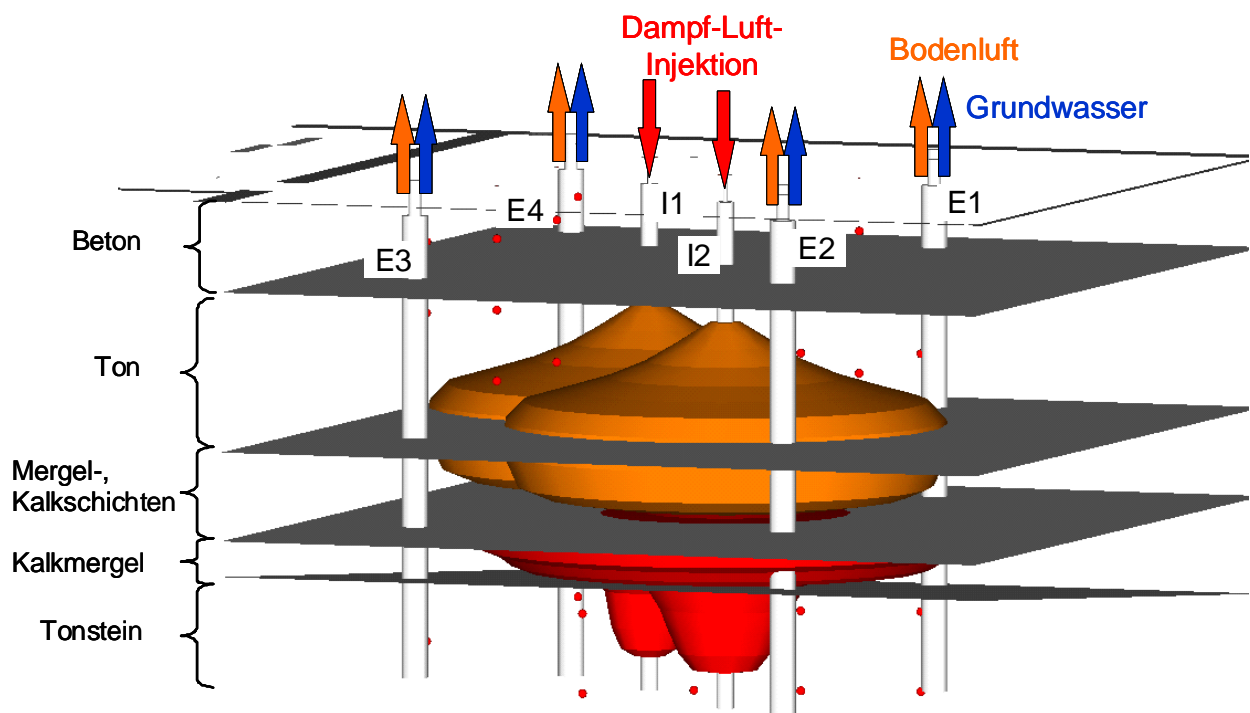


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Sanierungskonzepts

## Das Sanierungsfeld und der Anlagenaufbau

Das Schadenszentrum wird über zwei Dampf-injektionsbrunnen (2"-Ausführung) mit je 2 Filterbereichen und vier Extraktionsbrunnen (vollverfiltert, 6"-Ausführung) erschlossen. Zur Überwachung der Temperaturen im Sanierungsfeld sind 10 Temperaturlanzen mit insgesamt ca. 60 Temperaturmessstellen installiert.



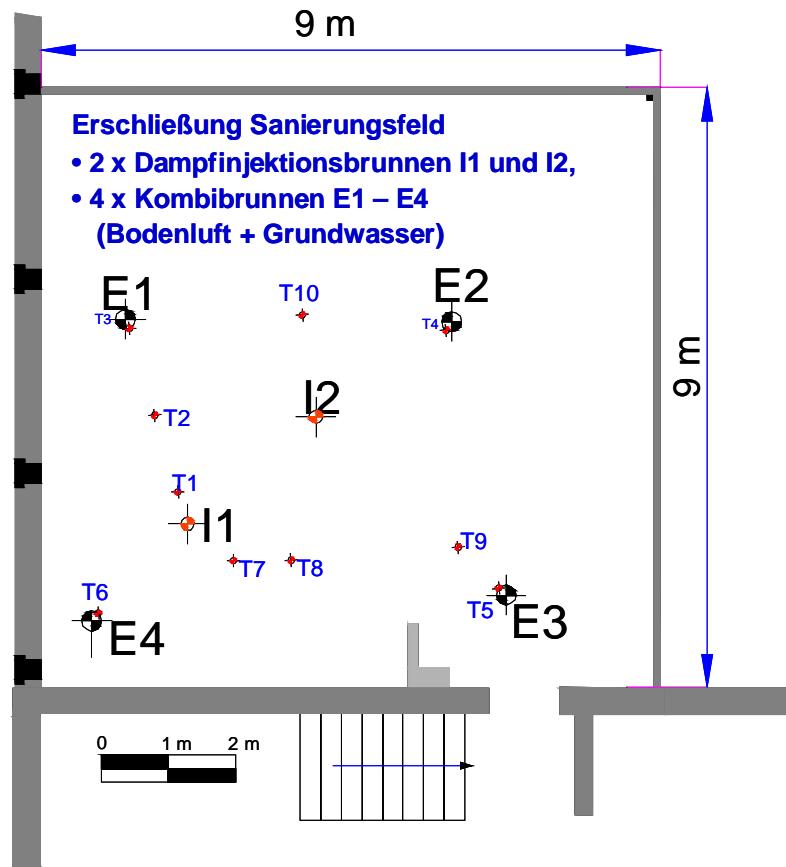


Abbildung 4: Lageplan Sanierungsraum Albstadt



**Installation der Brunnen und Temperaturmesslanzen**

**Ansicht Sanierungsanlage Dampf-Luft-Injektion und "heiße" Bodenluftabsaugung**

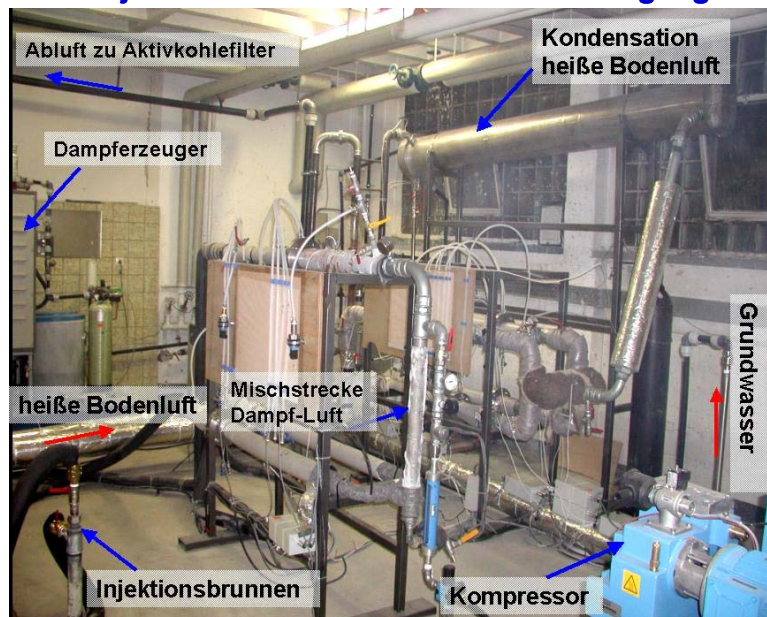


Abbildung 5: Bohrarbeiten und Anlageninstallation im Sanierungsraum Albstadt

Die erforderlichen Bohrungen mussten aufgrund der Höhe der Fabrikationshalle mit einem Kellerbohrgerät ausgeführt werden (Abb. 5). Die technologiespezifische Sanierungsanlage mit Dampferzeuger, Bodenluftabsaugung, Kondensator und Kompressor wurde im abgeteilten Sanierungsraum installiert (Abb. 5).

### Wärmeausbreitung im Sanierungsfeld

In den ersten 5 Wochen der Dampf-Luft-Injektion erfolgte eine weitreichende Erwärmung der gesättigten Zone zwischen 2,5 und 6 m u. GOK auf Temperaturen zwischen 60 – 100°C (Abb. 6). In diesem Zeitraum konnte der Dampfdurchbruch an den Extraktionsbrunnen E1–E3 erzielt werden (Abb. 8).

Das Dampf-Luft-Gemisch wurde sieben Wochen lang in das Grundwasser oberhalb des Grundwasserstauers injiziert und anschließend um die Injektion in die höherliegenden Bereiche und die ungesättigte Zone erweitert.

Nach Zugabe des Dampf-Luft-Gemisches in den oberen Bereich des Aquifers erfolgte nach weitem 8 Wochen auch der Dampfdurchbruch am Extraktionsbrunnen E4, außerdem konnte die ungesättigte Zone auf Temperaturen zwischen 50 – 100°C erwärmt werden (Abb. 7).

Die Dampfausbreitung erfolgte sehr rasch in der gesättigten Zone im Bereich zwischen 8 und 5 m u. GOK, s. Abb. 6.

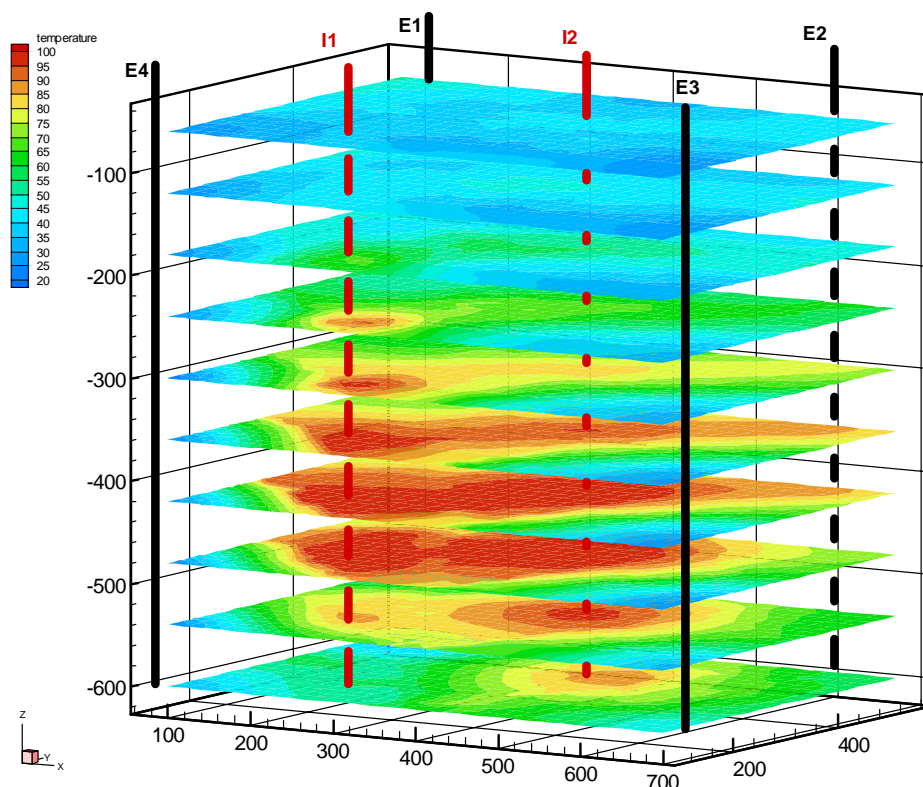


Abbildung 6: Wärmeausbreitung nach 35 Tagen Sanierungsdauer

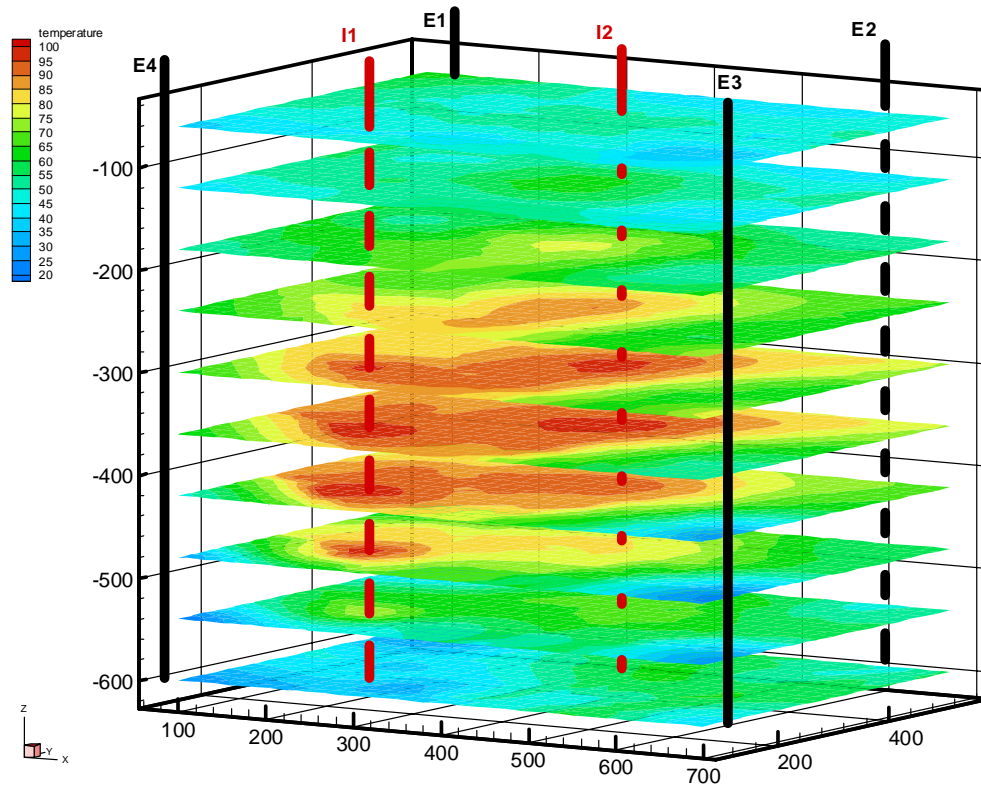


Abbildung 7: Wärmeausbreitung nach 75 Tagen Sanierungsdauer

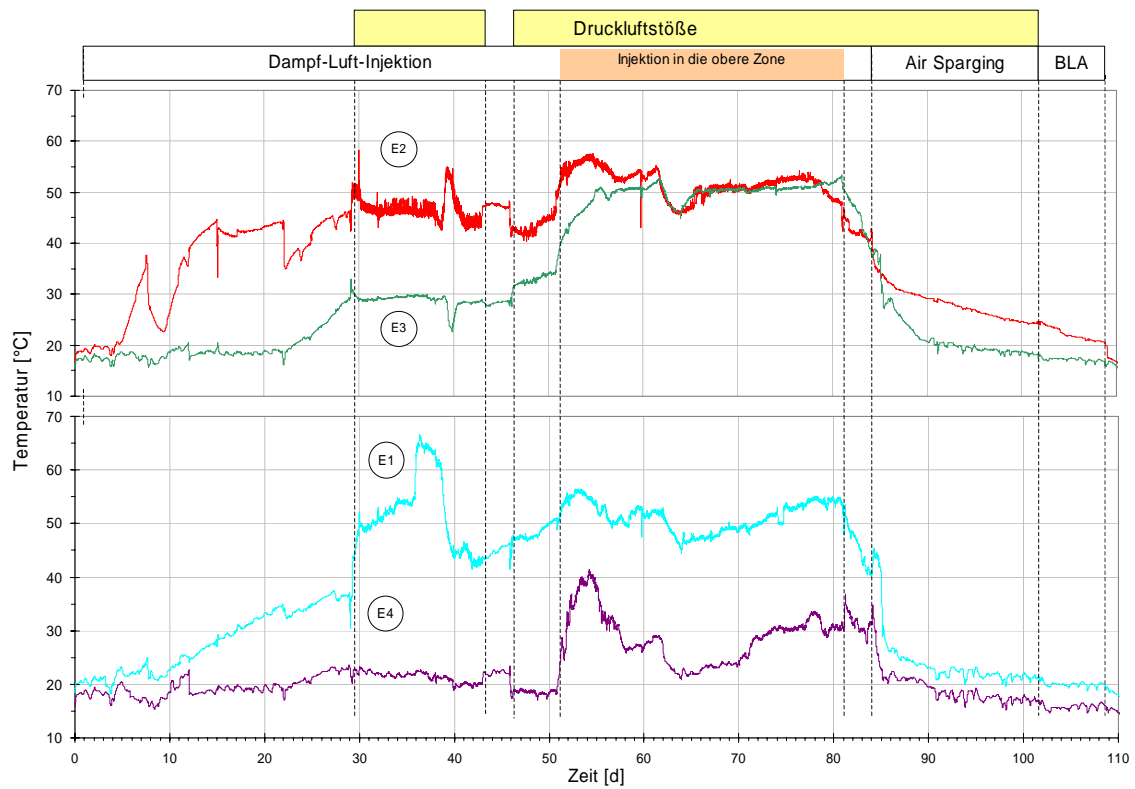


Abbildung 8: Temperatur der extrahierten Bodenluft an den Einzelbrunnen



## Schadstoffaustrag

Bereits nach vier Wochen Sanierungsbetrieb führte die Dampf-injektion in der gesättigten Zone zu einem signifikanten Rückgang der PCE-Konzentrationen in der extrahierten Bodenluft und im Grundwasser und somit zu einer erfolgreichen Sanierung dieses Bereiches.

Die sich nach weiteren 3 Wochen anschließende Injektion der Dampf-Luft-Mischung in den oberen Bereich des Grundwasserleiters zur Sanierung der ungesättigten Zone wurde gleichfalls erfolgreich durchgeführt. Nach einem starken Anstieg der Schadstoffkonzentrationen in der extrahierten Bodenluft konnte die Sanierung der ungesättigten Zone mit einem Rückgang der PCE-Konzentrationen Anfang Januar 2004 abgeschlossen werden (Abb. 9).

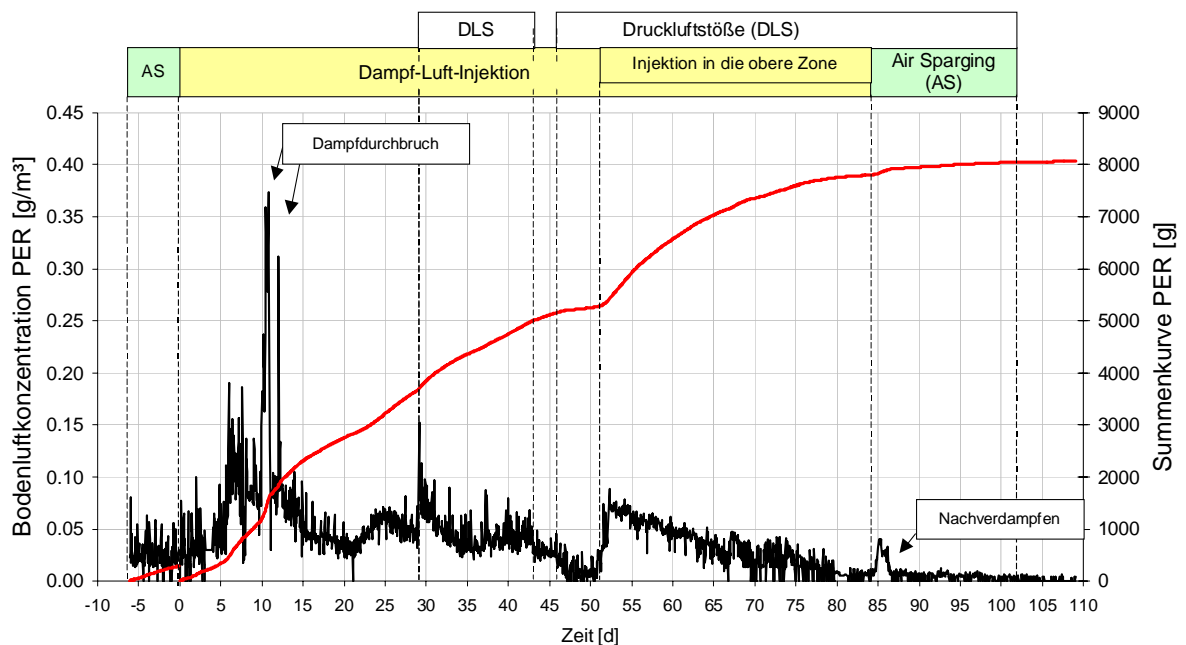


Abbildung 9: PCE-Austrag über die Bodenluftabsaugung

Die Grundwasserkonzentrationen an den Extraktionsbrunnen fielen insbesondere im Bereich der abstromig gelegenen Brunnen E1 und E2 von bis zu 7800 µg PCE/l auf Werte unter 100 µg PCE/l zurück (Abb. 10), während die Konzentrationen an den oberstromig gelegenen Brunnen kaum zurück gingen. Dies begründet den Verdacht eines oberstromigen Zustroms von kontaminiertem Grundwasser aus Bereichen außerhalb des Sanierungsfeldes. Die vergleichsweise hohen Konzentrationen an einem weiteren oberstromig gelegenen Grundwasserpegel bestätigen diesen Verdacht.

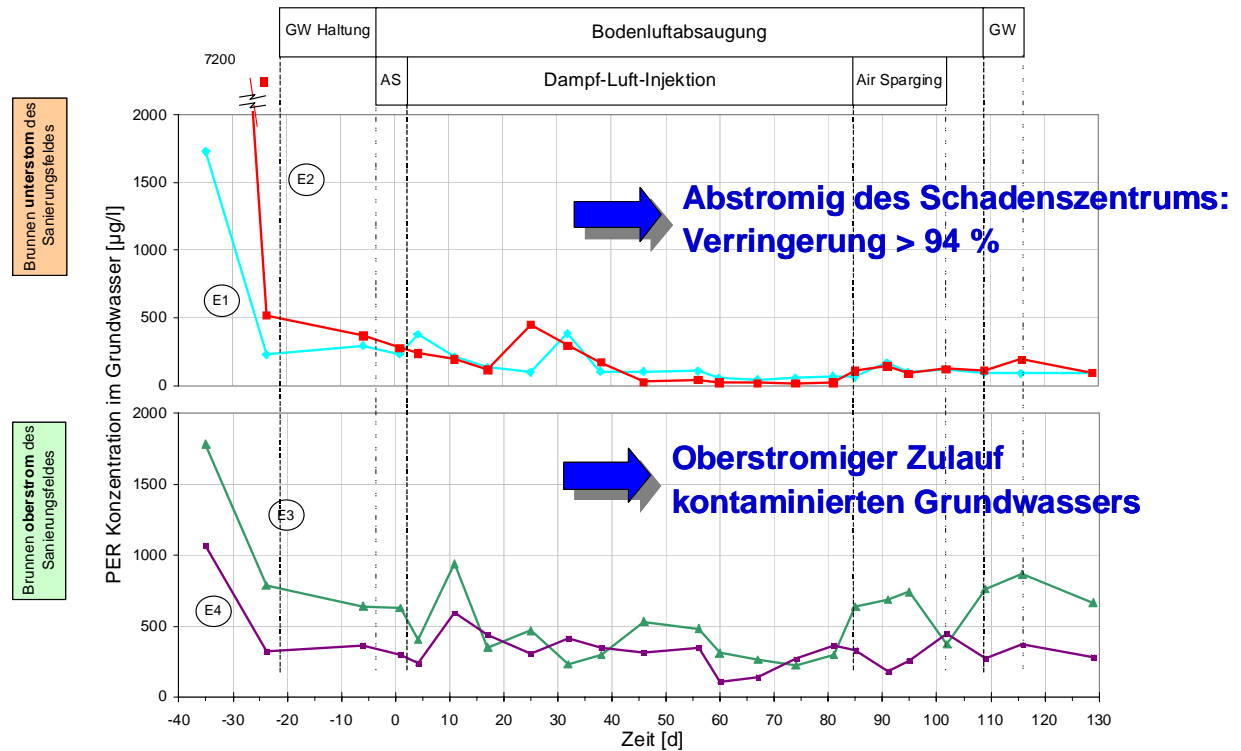


Abbildung 10: Verlauf der PCE-Konzentrationen an den Grundwasserbrunnen

Innerhalb des Sanierungszeitraums von 3 Monaten konnten ca. 10,6 kg PCE ausgetragen werden, wobei 2,2 kg PCE über den Austragspfad Grundwasser entfernt wurden. Durch die thermisch unterstützte Sanierung konnten über 8,0 kg PCE, eingerechnet die anfängliche einwöchige Air-Sparging Phase sogar über 8,4 kg über die Bodenluft entfernt werden.

Die direkt vor der Sanierung gewonnenen 16 Bodenproben ließen im Sanierungsbereich maximal 300 g PCE erwarten; Bodenproben aus den Jahren 1999 ließen um 7 kg PCE erwarten. Eine exakte Abschätzung der Sanierungseffizienz ist aufgrund des stark heterogenen Untergrundes und der vorliegenden Bodenproben nicht möglich. Während der vorhergegangenen Sanierung konnten jährlich lediglich 240 g PCE über die Bodenluft ausgetragen werden. Der zeitliche Schadstoffaustrag der Dampf-Luft-Injektion lag um Faktoren über den Leistungen der vorangegangenen „konventionellen“ Sanierung (Abb. 11).

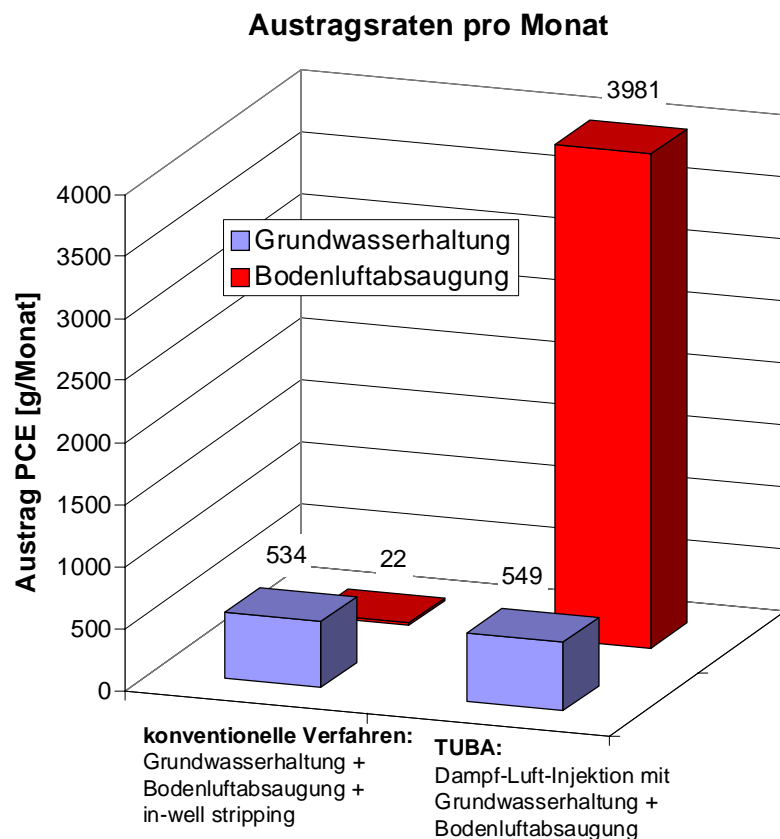


Abbildung 11: Vergleich der monatlichen Austragsraten zwischen konventioneller Sanierung und Dampf-Luft-Injektion

Schwierig gestaltete sich die Steuerung der Wärmeausbreitung in Richtung des Extraktionsbrunnens E4. Offensichtlich verhinderten kleinskalige Inhomogenitäten und eindringendes Grundwasser eine Wärmeausbreitung auf Höhe des Grundwasserstauers. Mit Umstellung der Injektionstiefe konnte jedoch der Bereich oberhalb 4 m u. GOK erwärmt und saniert werden. Der Kernbereich der Kontamination konnte effizient erwärmt und von den Schadstoffen abgereinigt werden. Die Sanierung konnte nach 3 Monaten erfolgreich und mit einer hohen Effizienz entsprechend den Anforderungen des öffentlich-rechtlichen Sanierungsvertrags zwischen dem Landratsamt Zollernalbkreis und der sanierungspflichtigen Firma abgeschlossen werden.

Mit dieser erstmaligen Feldanwendung des modifizierten TUBA-Verfahrens (Dampf- Luft-Injektion) zur Sanierung der wassergesättigten und ungesättigten Bodenzone, verunreinigt mit chlorierten Kohlenwasserstoffen konnte die Eignung und der Einsatz des Verfahrens in heterogenen Bodenstrukturen erfolgreich nachgewiesen werden.

### Ansprechpartner

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky (Projektleiter) +49 (0)711 - 685 - 64716

Dipl.-Ing. (FH) Oliver Trötschler +49 (0)711 - 685 - 67021