

Thermische In-situ-Sanierung im Kluftgestein mit Dampf-Luft-Injektion - geht das? - Machbarkeitsuntersuchung an einem Standort -

H.-P. Koschitzky¹, O. Trötschler¹, M. Epp², B. Lidola²

¹ VEGAS, Universität Stuttgart,

² Stadtbauamt Villingen-Schwenningen

Corresponding author: koschitzky@iws.uni-stuttgart.de

Veranlassung

Auf dem Gelände des ehemaligen städtischen Verbrennungsplatzes Biswurm der Stadt Villingen-Schwenningen liegen entsprechend der Sanierungsuntersuchung des Ingenieurbüros GEOsens [1] im Bereich unterhalb der ehemaligen Verbrennungsbecken (ca. 800 m² Fläche) und in weiten Bereichen des umliegenden Geländes erhöhte Gehalte an CKW, BTEX und KW in der Bodenluft und dem Grundwasser vor. Der oberflächennahe Bereich der ehemaligen Verbrennungsbecken wurde im Jahr 2004 durch Aushub / Bodenaustausch bis max. 3,50 m Tiefe saniert. Dabei wurden etwa 7.100 t Boden verwertet / entsorgt. Das entfernte Schadstoffpotenzial betrug im Mittel 1.600 kg LHKW, 2.200 kg Kupfer, 40 kg Blei und 600 kg MKW. Zur Fassung der Bodenluft und des Sickerwassers wurden Drainageleitungen verlegt. Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung [1] wurde eine Pilotsanierungsanlage installiert, von 08/2006 bis 05/2007 betrieben und mehrmonatige Bodenluftabsaugversuche und Multilevel-Pumpversuche durchgeführt. Vor Beginn der Dampf-Luft-Injektion konnten CKW-Konzentrationen im Grundwasser zwischen 1 mg/L (gesättigte Zone) und 40 mg/L (Drainage) und in der Bodenluft im Bereich zwischen 200 – 3.000 mg/m³ bestimmt werden.

Standortbeschreibung

Die anstehende Schichtenfolge besteht aus Auffüllungen, Verwitterungszone der Rötformationen (bindig, bis 3 m Teufe), Plattensandstein (bis 22 m Teufe), Mittlerer Buntsandstein (bis 37 m Teufe) und dem Grundgebirge (Granit). Das Ruhepotenzial des gespannten Aquifers im mittleren Buntsandstein liegt bei ca. 12 m u. GOK.

Das Schadstoffpotenzial kann im Bereich der ungesättigten Zone entsprechend den Bodenluftabsaugversuchen im Jahr 2007 [1] als vergleichsweise hoch angesehen werden. Über die Multilevel-Pumpversuchen im Rahmen der SU konnte die Schadstofflage in der gesättigten Zone im Bereich der ehemaligen Becken eingegrenzt werden. Es konnte ein hohes und vergleichsweise immobiles Schadstoffinventar im oberen Bereich des Plattensandsteins bestimmt werden. Im unteren Bereich des Plattensandsteins und im Kristallsandstein sind die Schadstoffe über Lösung im Grundwasser vergleichsweise mobil, d.h. hydraulisch gut erfassbar. Das Schadstoffpotenzial im eigentlichen Aquifer, dem Kristallsandstein kann geringer als im Plattensandstein eingestuft werden.

Zwischen beiden Sandsteinschichten besteht eine hydraulische Verbindung. Die trennenden Ton- und Schluffsteinschichten sind über vertikale Klüfte teilweise durchlässig [1]. Der Aquifer kann als Kluftgrundwasserleiter mit geringer Matrixporosität charakterisiert werden. Die durch VEGAS im Rahmen von Tracerversuchen (Nov. 2008 – März 2009) [2] bestimmten

Abstandsgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 100 – 300 m/d (bei laufender Grundwassersanierung) lassen auf einen Porenanteil des Kluft-Matrix Systems kleiner 0,5% schließen.

Sanierungsoptionen

In der Sanierungsuntersuchung [1] und den aktuellen Tracerversuchen [2] wurde die Eignung einer hydraulischen Sanierung und Sicherung des Standorts nachgewiesen. Die Grundwassersanierungsanlage wird seit Februar 2009 wieder betrieben. Als mögliche Maßnahmen zur Verkürzung der Sanierungszeit der hydraulischen Sanierung wurden seitens des Stadtbauamts Villingen-Schwenningen und des Ingenieurbüros GEOsens im Rahmen der SU Air-Sparging oder thermische In-situ-Verfahren vorgeschlagen.

Nach Prüfung und Vorplanungen im Frühsommer 2008 durch VEGAS läuft derzeit im Rahmen des Forschungsprogramms SAFIRA II des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, in Kooperation mit der Stadt Villingen-Schwenningen in „Biswurm“ eine thermische Pilotsanierung mit Dampf-Luft-Injektion im Kernbereich des Boden- und Grundwasserschadens. Die Maßnahme wird durch die LUBW und das Regierungspräsidium Freiburg fachlich unterstützt. Die Leitung des Pilotversuchs obliegt dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig, Department Grundwassersanierung. Mit der verantwortlichen Durchführung wurde VEGAS beauftragt. Die Finanzierung tragen etwa zu je ein Drittel das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig, das Land Baden-Württemberg und die Stadt Villingen-Schwenningen.

Die Pilotanwendung ist von VEGAS als Feasibility-Studie konzipiert und dient neben dem erstmaligen Nachweis der technischen Machbarkeit und der Effizienz einer thermischen Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion im geklüfteten Festgestein der späteren Planung einer thermischen In-situ-Sanierung des oberen Plattensandsteinaquifers des Schadenskernbereichs einschließlich einer entsprechenden Kostenschätzung.

Thermische Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI) im geklüfteten Festgestein ?

Die Dampf-Luft-Injektion eignet sich zur Sanierung des Schadenherds aufgrund einer mittleren hydraulischen Durchlässigkeiten zwischen 10^{-4} - 10^{-5} m/s. DLI im Grundwasserbereich kombiniert die Verfahren Bodenluftabsaugung, Air-Sparging und Dampf-injektion [3].

Verfahrensbedingt können bei DLI die in den Klüften vorliegenden Schadstoffe gasförmig ausgetrieben (verdampft) werden. Durch konduktive Erwärmung des Festgesteins über die Kondensation des Dampfanteils während der Ausbreitung des Dampfes in den Klüften, kann am Sandstein imprägnierter Schadstoff desorbiert und verdampft werden. Über einen hohen Luftanteil (ca. 10 Ma%) wird ein gasförmiger Schadstofftransport erzeugt, bzw. die Gefahr einer Flüssigphasenverfrachtung vermindert. Die ausgetragenen Kontaminanten (LHKW, BTEX und kurzkettige MKW) werden über die Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Zone erfasst und abgesaugt. Hierzu muss jedoch eine effektive pneumatische Verbindung zwischen den Klüften in der gesättigten und ungesättigten Zone und den Bodenluftabsaugbrunnen bestehen und nachgewiesen werden.

Das bei VEGAS entwickelte thermische In-situ-Verfahren ist in den letzten Jahren mehrfach zur Schadensherdsanierung in der gesättigten und ungesättigten Zone für BTEX und CKW im Rahmen von Pilot- und Feldanwendungen eingesetzt worden [3]. Ein Novum stellt die thermische Sanierung in Kluftaquiferen dar.

Die „thermische Reichweite“, d.h. die radiale horizontale Ausbreitung des Dampftraums in der gesättigten Bodenzone kann derzeit für Porengrundwasserleiter über Typenkurven [4] näherungsweise ermittelt werden. Eine Aussage über die Ausbreitung in Kluftaquiferen ist derzeit schwer möglich, die Reichweite kann lediglich sehr grob abgeschätzt werden. Im Gegensatz zum Lockergestein kann sich im geschichteten und geklüfteten Festgestein (z.B. Plattensandsteinlagen) der Dampf in den verbundenen Klüften ausbreiten. In Abhängigkeit der Kluftweite kann der Dampf mit einer vergleichsweise hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der Klüfte strömen während er aufgrund des umliegenden kalten Bodens kondensiert.

Ziel der Pilotierung

Anhand einer Pilotanwendung mit einem Zeitrahmen von 6 Monaten soll daher vorrangig die thermische Reichweite bestimmt werden. Darüber hinaus soll die pneumatische Verbindung zwischen den Klüften bis hin zur Bodenluftabsaugung nachgewiesen werden. Zudem sollen die zu erwartende Steigerung des Schadstoffaustrags und der zeitliche Verlauf der Erwärmung des Untergrunds in die Dimensionierung und Kostenschätzung einer thermischen Schadensherdsanierung einfließen.

Die Dampfinjektion erfolgt auf 3 Ebenen, an der Basis des oberen Aquifers, dem Plattensandstein (17-20 m u.GOK), auf Höhe des gespannten Aquifers (9,5 – 12,5 m u. GOK) und in der ungesättigten Zone (3,5 – 7,5 m u. GOK). Durch diese Anordnung soll einer möglichen Limitierung der horizontalen Dampfausbreitung über verbundene, vertikale Klüfte entgegnet werden. Ziel ist die Sanierung des oberen Aquifers und der ungesättigten Zone.

Eine Empfehlung zur Dampf-Luft-Injektion in den unteren Aquifer, den Kristallsandsteinformationen konnte nicht gegeben werden. Aufgrund der Tracerversuche [2] konnte jedoch gezeigt werden, dass im unteren Aquifer als innovative In-situ-Sanierungstechnik ISCO zur Grundwassersanierung bei der Sanierungsplanung erfolgversprechend ist und projektiert werden sollte.

Die thermische Sanierung erfolgt mit einer, für derartige Pilotsanierungen im Rahmen von übergreifenden F&E-Projekten konzipierten **mobilen thermischen Sanierungsanlage** in **Modulbauweise** (MOSAM, siehe Abb. 1).

Durchführung der Pilotinjektion

Zur Durchführung der Pilotinjektion ist ein zentraler Injektionsbrunnen (I1, Abb. 2) mit drei Injektionsniveaus installiert. Hier besteht die Möglichkeit der selektiven und kollektiven Beschickung mit einer Dampf-Luft-Mischung mit Temperaturen bis 125°C und einer maximalen Leistung von 100 kW. Die Temperatursausbreitung wird im projektierten Testfeld mit einem Durchmesser von ca. 12 m über Temperaturmesslanzen (T, Abb. 2), bestückt mit je 11 Pt-100 Temperaturfühlern, überwacht. Diese sind im radialen Abstand zwischen 0,7 und 7 m um den Injektionsbrunnen verteilt und bis auf 22 m abgeteuft. Die mit den Schadstoffen angereicherte heiße Bodenluft wird an den Brunnen GW8 (7 m östlich I1), einem Drainageschacht D2 (6 m westlich I1), an einem südlich im Abstand von 7 m zu I1 abgeteuften Bodenluftbrunnen E1, sowie einem Bodenluftbrunnen E2 (5 m nördlich I1) abgesaugt.



Abb. 1: Sanierungsanlage MOSAM und Ausstattung Pilotfeld (Photo VEGAS 2009)

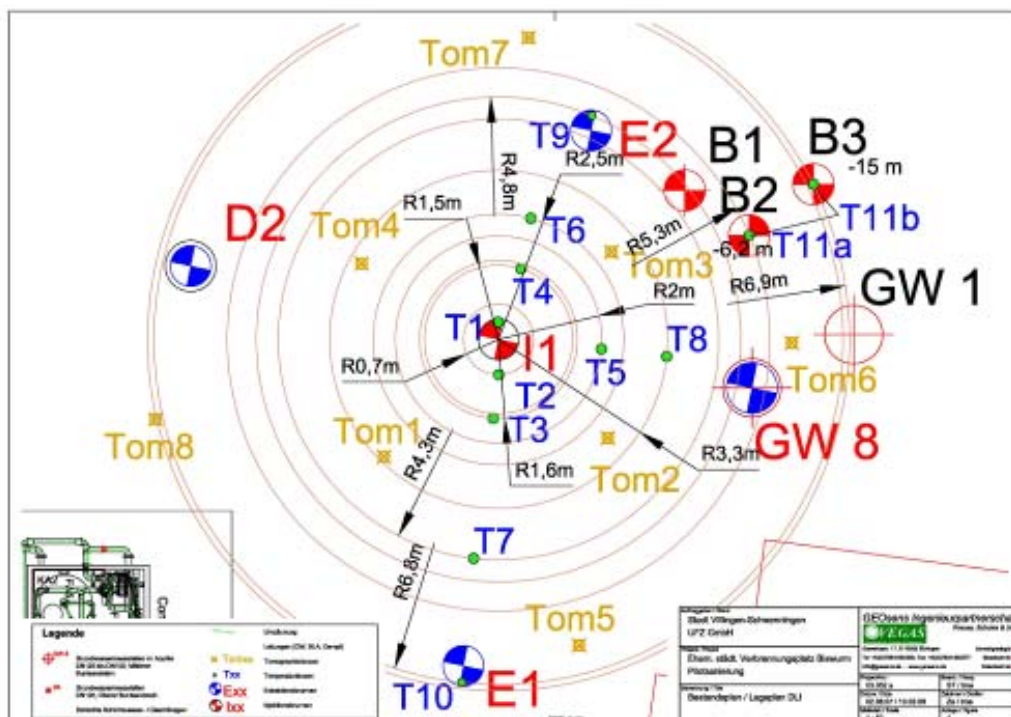


Abb. 2: Lageplan des Pilotierungsfeldes

Eine Grundwasserentnahme an E1 ($0,5 - 2 \text{ m}^3/\text{h}$) dient der hydraulischen Kontrolle der Sanierung im Nahbereich. Parallel wird im Abstrom der ehemaligen Verbrennungsanlage eine Grundwassersicherung mit ca. $14 \text{ m}^3/\text{h}$ Förderleistung betrieben.

Die In-situ-Sanierung untergliedert sich in mehrere Phasen:

Phase 1: Bodenluftabsaugung (BLA) und Grundwasserhaltung, 3 Woche Dauer

Phase 2: BLA, Grundwasserhaltung und Air-Sparging, 3 Wochen Dauer

Phase 3: Dampf-Luft-Injektion, ca. 17 Wochen Dauer

Phase 4: Abkühlungsphase, ca. 3 Wochen

Erste Ergebnisse der Pilotinjektion

Mit einer vollständigen und raschen Wiederfindung von CO₂ während Gastracertests kann das Pilotfeld als pneumatisch gesichert angesehen werden. Aufgrund der geringen Porosität und der Gefahr des zu schnellen Dampffortschritts in den ausgeprägten Klüften wurde die Dampfmenge auf ca. 45 kW Injektionsleistung während Phase 3.1 reduziert. Ab Phase 3.2 wurde sowohl die Injektionsebene auf Höhe der Aquifersohle, als auch der Bereich auf Grundwasserspiegels Höhe simultan mit jeweils 42 kW beschickt. Während der derzeit laufenden Phase 3.3 wurde die Injektionsleistung auf der Aquifersohle auf 30% der Gesamtleistung von 93 kW beschränkt, die Injektionsleistung auf Grundwasserhöhe gleich belassen und die Injektionsleistung in die ungesättigte Zone aufgrund der anzutreffenden Injektionsdrücke auf max. 25 kW beschränkt. In der anschließenden Phase 3.4 soll die Ausbreitung entlang der Aquifersohle über eine Injektionsleistung von zwischen 50 – 70 kW unter Nutzung des Schadstofftransports bei Dampfinjektion in die oberen Zonen bestimmt werden.

Das Ausbreitungsverhalten der Dampffront in allen Bereichen war durch eine ausgeprägte horizontale Ausrichtung gekennzeichnet. Es erfolgte kein deutlich messbarer Aufstieg des Dampfraums in vertikaler Richtung in Folge der Auftriebskräfte oder des Kluftsystems. Das nicht durchströmte Festgestein wird mittels Konduktion erwärmt. Es konnten bisher konduktiv Temperaturen zwischen 30 – 50°C erzielt werden (s. Abb. 3).

Zudem zeigte sich, dass die thermische Reichweite bisher nur durch den Energieeintrag begrenzt wurde. Die derzeitige radiale Ausbreitung im unteren Aquiferbereich liegt bei 2 – 2,5 m, gefolgt von einer Reichweite von etwa 2,5 m auf Grundwasserhöhe. Derzeit wird die Dampfausbreitung an der Aquifersohle konstant gehalten. Die Ausbreitung oberhalb des Grundwasserspiegels nimmt gleichmäßig zu. In der ungesättigten Zone bricht aktuell das Dampf-Luft-Gemisch an E2 durch, also 5 m vom Injektionsbrunnen entfernt.

Die Eignung des Kluftaquifers für eine thermische In-situ-Sanierung wurde bisher bestätigt.

Während der kalten Bodenluftabsaugung (Phase 1, Abb. 4) zeigte sich ein hohes Schadstoffpotenzial im Schadenszentrum mit Werten von mehreren g CKW / m³ Bodenluft. TCE war höher konzentriert als PCE. Während 3 Wochen Betrieb konnte ein annähernd gleichbleibend hoher täglicher Austrag um 3 kg/d erzielt werden. Der Einsatz des Air-Sparging lieferte bei Injektion der Druckluft nach Zuschaltung des Air-Sparging in den Grundwasserwechselbereich (Phase 2.2) eine Steigerung des Schadstoffaustrags mit abklingenden Konzentrationen zum Ende des zweiwöchigen Betriebs. Die Dampf-Luft-Injektion bewirkte eine leichte Steigerung (Faktor 2) des Austrags. Eine deutliche Steigerung des gasseitigen Austrags wurde mit Zuschaltung der Dampf-Luft-Injektion auf Grundwasserhöhe (Phase 3.2) mit einem Faktor 3,5 im Vergleich zum Ende der Phase 1 und analog zum Air-Sparging erzielt. Jedoch sanken die Konzentrationen innerhalb von 10 - 12 Tagen wieder auf das Niveau der kalten Bodenluftabsaugung ab. Ein Ansteigen des Schadstoffaustrags bis zum Beginn des Dampfdurchbruchs an E2 kann derzeit bestimmt werden.

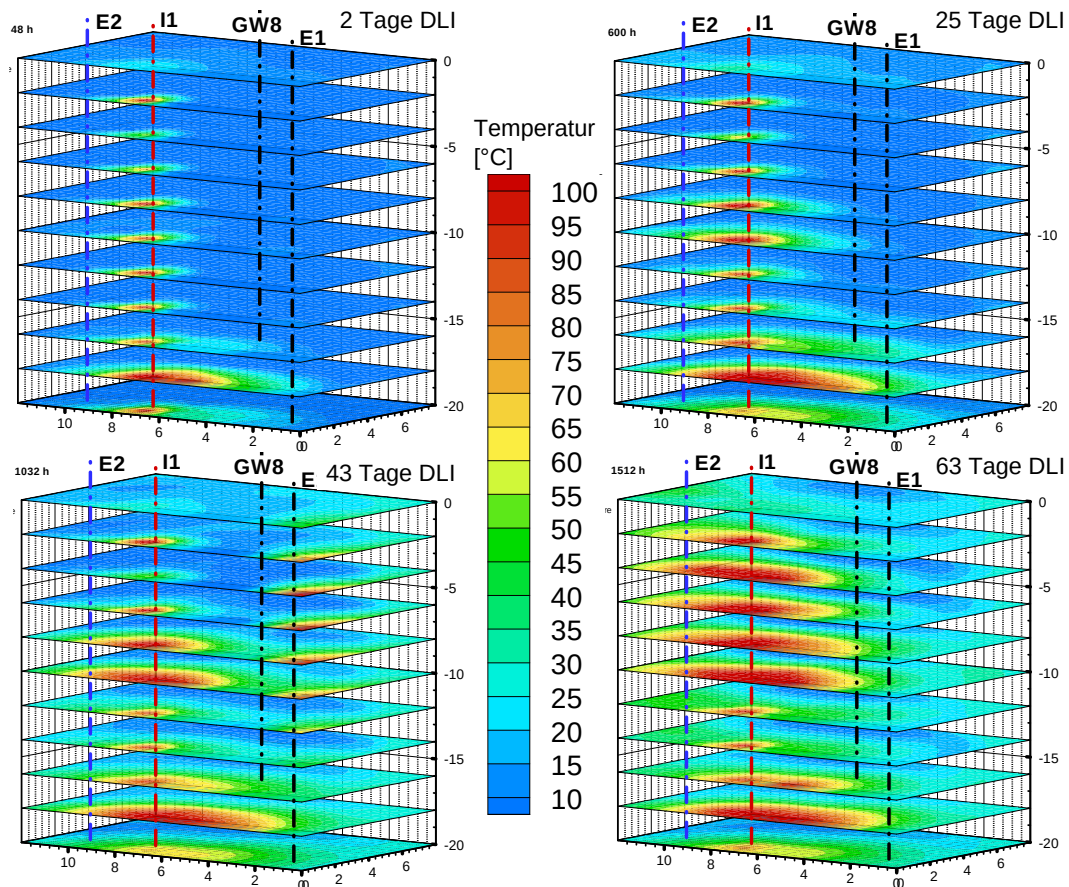


Abb. 3: Wärmeprofile (2 – 63 Tage DLI)

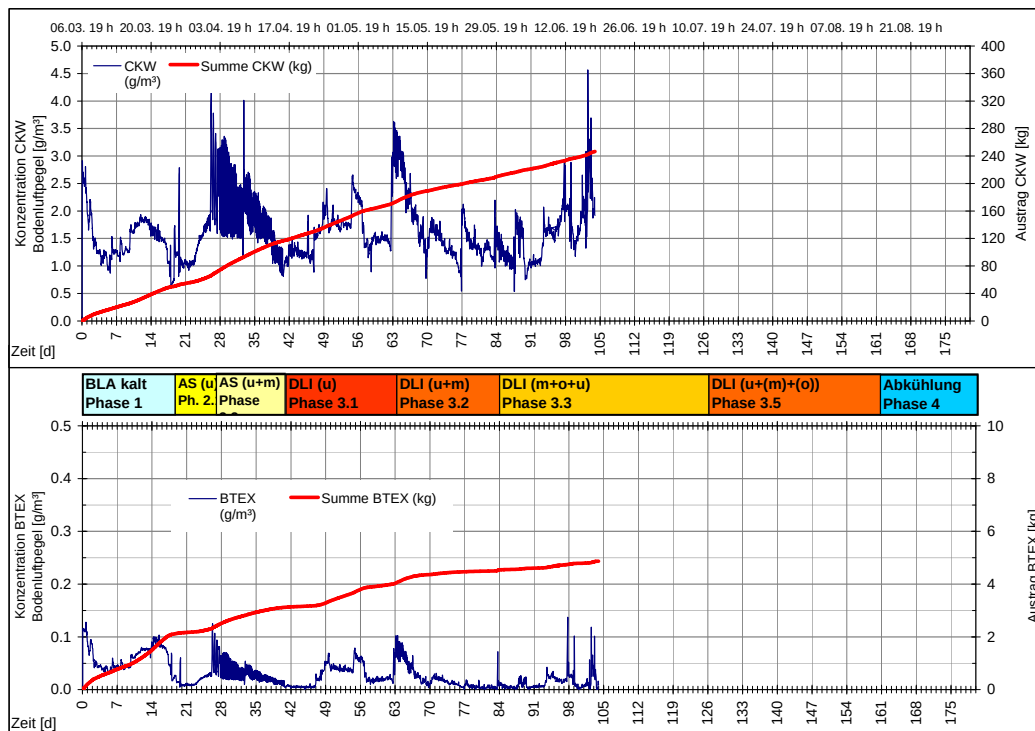


Abb. 4: Verlauf Benzol- und CKW-Konzentrationen in der Bodenluftabsaugung und Massenbilanz während Phase 1 - 3.1

Die Konzentrationen der CKW und BTEX im entnommenen Grundwasser an den Sicherungsbrunnen GW10 – GW12 war in den ersten acht Wochen stark rückläufig. Von CKW-Gehalten zwischen 2 – 5 mg/l sanken die Werte auf 200 und 500 µg/l ab und stagnieren derzeit. Es konnten keine Anzeichen einer Flüssigphasenmobilisierung durch die fortschreitende Dampffront festgestellt werden.

Insgesamt konnte über das Grundwasser weniger als 10% der bisher entfernten Schadstoffmasse entfernt werden (ca. 20 kg CKW). Über die Bodenluft wurden ca. 235 kg CKW in 13 Wochen Betrieb entfernt.

Zum Vergleich: In der Sanierungsuntersuchung wurden in 20 Wochen Betrieb ca. 300 kg LHKW über die Bodenluftabsaugung und 165 kg LHKW über die Entnahme an 5 Grundwassermessstellen und der Drainage Reinigung in der Vor-Ort-Anlage gereinigt.

Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse haben bereits gezeigt, dass der vorliegende obere Kluftaquifer (Plattensandstein) für eine thermische In-situ-Sanierung geeignet ist. Die Pilotierung wird voraussichtlich noch bis August 2009 betrieben werden.

Für eine In-situ-Sanierung des unteren Aquifers (Kristallsandsteinformationen (>20 m u. GOK) ist aufgrund der Ergebnisse von Tracerversuchen [2] als innovatives In-situ-Sanierungsverfahren ISCO zur Grundwassersanierung bei der Sanierungsplanung als erfolgversprechend zu bewerten.

Beim derzeit positiven Verlauf der DLI-Pilotierung kann bis zum Jahresende ein Sanierungsvorschlag für die Gesamtsanierung des Standorts ausgearbeitet werden.

Ein besonderer Dank gebührt auch dem Ingenieurbüro GEOsens für die Betreuung und Leitung der Sanierungsplanung.

Literaturhinweise

- [1] GEOsens Ingenieurpartnerschaft (2007): 03.052a ehem. Städt. Verbrennungsplatz Biswurm Sanierungsuntersuchung Juni 2007, Bericht vom 10.10.2007
- [2] Koschitzky, H.-P., Trötschler, O. (2009): Markierungsversuche zur Prüfung der hydraulischen Eignung hinsichtlich ISCO am Standort „Biswurm“ in Villingen, Schwarzwald-Baar-Kreis, Technischer Bericht Nr. 2009/07 (VEG 37)
- [3] Koschitzky, H.-P., Trötschler, O. (2008). Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung, Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, 55. Aktualisierung, 3. Aufl., Mai 2008, Franzius, Altenbockum, Gerhold (Hrsg.), C. F. Müller Verlagsgruppe, München, 5716, pp. 1 – 47, Grundwerk ISBN 978-3-8114-9700-9
- [4] Ochs, S.O. (2006): Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations, Mitteilungen Heft 159, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-63-8