

Thermische In-situ-Sanierung: Grundlagen und Fallbeispiele

Hans-Peter Koschitzky und Oliver Trötschler

1 Problemstellung und Begrifflichkeiten

Die Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen, die durch halogenierte chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW, LHKW) oder aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) hervorgerufen werden, ist nach wie vor eine große Herausforderung in der Sanierungspraxis. Ausgehend von Schadensherden (hochkontaminierte Bereiche, teilweise als Phasenpools) in der ungesättigten Bodenzone und in Grundwasserleitern (Aquiferen), bilden bzw. bildeten sich oft lange Schadstofffahnen im Grundwasserabstrom aus.

Eine wirkungsvolle und nachhaltige Beseitigung der Grundwasserkontaminationen erfordert die Entfernung der Schadensherde (Schadstoffquellen), um eine lang anhaltende Nachlieferung der Schadstoffe (Emissionen) in den Grundwasserabstrom zu unterbinden. Daher sind sowohl Sanierungsverfahren erforderlich, die - wann immer möglich - die Schadensherde beseitigen (Quellensanierung), als auch Sanierungsverfahren und -konzepte, welche die gelösten Schadstoffe aus dem Grundwasser aktiv entfernen (Fahnenanierung) oder die Grundwasserfahne sichern bzw. überwachen (MNA-Konzepte).

Auf Grund ihrer hohen Dichte (DNAPL, Dense Non Aqueous Phase Liquid) sind CKW, ausgehend von der Geländeoberfläche bzw. von unterirdischen Eintragsstellen aus Leitungen, Tanks etc., meist tief in den Untergrund eingedrungen. Sie befinden sich, bedingt durch den Eintrag, entweder fein verteilt im Boden und insbesondere im Aquifer (jüngere Schäden) oder in und auf Schichten mit geringer Durchlässigkeit (z.B. Schluff-, Tonschichten), in Grundwasserleitern oder am Grund eines Aquifers auf dessen Stauer. Oft sind die Schadensherde, die z.B. durch chemische Reinigungen verursacht wurden, erschwert zugänglich und liegen in überbauten, innerstädtischen Bereichen.

BTEX Schadensherde (LNAPL, Light Non Aqueous Phase Liquid) befinden sich sowohl in der ungesättigten Bodenzone als auch im Grundwasser (teilweise sind sie z.B. durch Lösungsvermittler auch in größeren Tiefen eingedrungen) und insbesondere im Grundwasserschwankungsbereich.

Daher sind in vielen Fällen Sanierungsverfahren erforderlich, die sowohl die ungesättigten als auch die gesättigten Bodenbereiche (Aquifere) reinigen können.

Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIsS) können bei Kontaminationen in Boden und Grundwasser durch Schadstoffe, deren Stoffdichte gegenüber Wasser kleiner (LNAPL) oder größer (DNAPL) ist, eingesetzt werden. Organische Schadstoffe wie die oben genannten CKW, LHKW, BTEX oder auch Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) bis zu einem Siedepunkt von etwa 200°C, lassen sich mittels TIsS sanieren.

Eine wichtige Anlagenkomponente aller TIsS ist eine Bodenluftabsaugung mit entsprechender Abluftreinigung, die auch heiße und feuchte Gase behandeln können muss. Schadensherdsanierungen in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone (Grundwasser) können sowohl in grobkörnigen Lockergesteinen, in bindigen oder heterogenen Bodenschichten oder im Kluftegestein ausgeführt werden.

Im nachfolgenden Beitrag werden Möglichkeiten zur Beseitigung von Schadenherden aus dem Boden und Grundwasser – in der Regel simultan - durch den Einsatz thermischer In-situ-Sanierungsverfahren vorgestellt. In mehr als 20 Jahren wurden bei VEGAS an der Universität Stuttgart derartige Verfahren erforscht, mitentwickelt und optimiert und erfolgreich

Technologietransfer betrieben. Ihre Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen (Operating Windows) werden und wurden in einer Vielzahl von Praxisanwendungen stetig erweitert und ausgetestet.

2 Veränderung der Stoffeigenschaften und Nutzung von thermodynamischen Prozessen bei thermischen Verfahren

Die Veränderung der Stoffeigenschaften der flüssigen Schadstoffe und Prozesse beim Phasenübergang zwischen flüssiger und gasförmiger Phase bei der Erwärmung sind wichtige Grundlagen für das „Funktionieren“ thermischer Sanierungsverfahren. So nimmt z.B. bei steigender Temperatur der Dampfdruck exponentiell zu und kann für Reinstoffe in Abhängigkeit der Temperatur berechnet werden. Wird ein kontaminierter, feuchter Boden (Schadensherd) erwärmt, wird die Schadstoffphase gemeinsam mit dem Wasser verdampft, dies wird als Wasserdampfdestillation bezeichnet [2, 11]. Bei diesem Prozess addieren sich die beiden Dampfdrücke der nicht mischbaren Phasen Wasser und Schadstoff zum Gemischsiededampfdruck. Entscheidend für die thermische In-situ-Sanierung ist, dass dieser über dem Dampfdruck der „niedrigsiedenden“ Phase (meist Wasser) liegt. Dies bedeutet, dass die Siedetemperatur des Gemisches aus den Komponenten Wasser und Schadstoff(en) immer unter den Siedetemperaturen der Einzelstoffe liegt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

exponentielle Erhöhung des Dampfdrucks organischer Kontaminanten mit der Temperatur

Siedetemperaturerniedrigung (Azetrop) durch Wasserdampfdestillation (bei Atmosphärendruck)

Benzol 80 → 69°C
TCE 87 → 74°C
PCE 121 → 87°C
m-Xylol 144 → 93°C

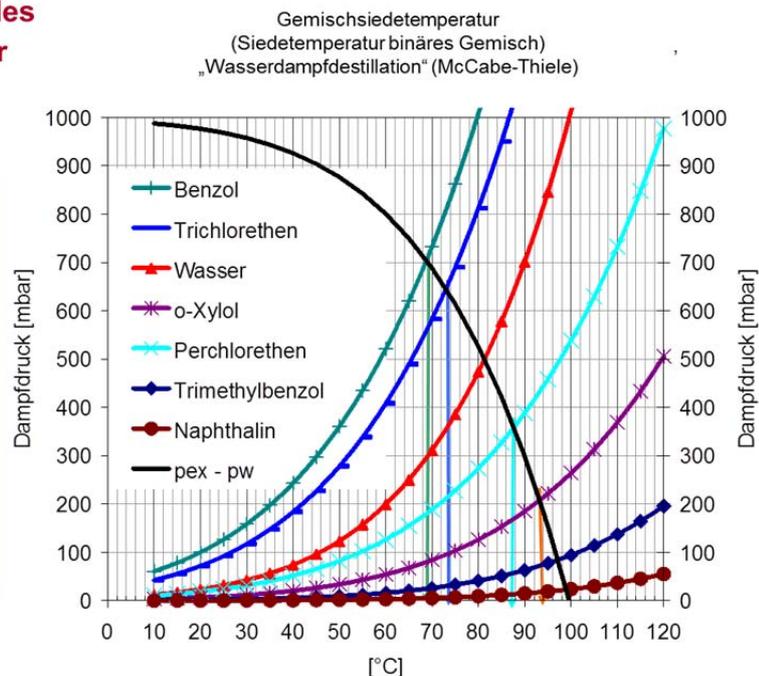


Abb.: 1: Dampfdruckkurven verschiedener organischer Schadstoffe und Wasser sowie die zugehörigen Gemischsiedetemperaturen (Zweiphasengemisch mit Wasser)

3 Verfahrensprinzip thermische In-situ-Verfahren

3.1 Einbringungsmöglichkeiten der Wärme in den Untergrund

Das Prinzip thermischer In-situ-Sanierungsverfahren beruht auf der Aufheizung des Untergrunds mit dem Ziel, die organischen Schadstoffe im Boden und im Grundwasser zu verdampfen und sie dann mittels einer Bodenluftabsaugung gasförmig aus dem Untergrund zu entfernen.

Zur Erwärmung des Untergrunds können verschiedene Möglichkeiten zu Anwendung kommen [2, 4, 6, 7, 11]. Bei der Dampf-Luft-Injektion (DLI) erfolgen der Wärmeintrag und die Wärmeausbreitung vorwiegend konvektiv (durch die Dampfströmung).

Bei der thermische In-Situ-Sanierung mit elektrischen Heizelementen (Feste Wärmequellen, z.B. THERIS) wird die Wärme primär konduktiv (Wärmeleitung) in den Untergrund eingebracht.

Auf andere Möglichkeiten wie z.B. durch elektrisches Widerstandheizen oder die HF-Bodenerwärmung soll hier nicht eingegangen werden, da zu diesen Verfahren keine eigene Anwendungserfahrung vorliegen (Infos hierzu siehe TASK Leitfaden 2012 [11]).

3.2 Dampf-Luft-Injektion, DLI

3.2.1 Einsatz in der ungesättigte Bodenzone

Beim Einsatz in der ungesättigten Bodenzone, früher auch als "heiße" Bodenluftabsaugung oder TUBA, thermisch unterstützte Boden-Luft-Absaugung bezeichnet, wird Dampf- oder ein Dampf-Luft-Gemisch in die ungesättigte Bodenzone im oder am Rand des Schadenszentrums injiziert. Der injizierte Dampf kondensiert an der kalten Bodenmatrix und gibt dadurch seine Energie (Verdampfungsenthalpie) an die Bodenmatrix ab. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess - bis der Boden die Dampftemperatur erzielt hat - kann Dampf von der Injektionsstelle an die Dampffront strömen. Es bildet sich eine räumlich mehr oder weniger ausgedehnte Wärmefront aus, die sich von der Injektionsstelle aus idealerweise radialsymmetrisch ausbreitet. Im erwärmten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffen durch die Wasserdampfdestillation bei der entsprechenden Gemischsiedetemperatur verdampft. Die mit Schadstoffen beladene Bodenluft wird über die gleichzeitig betriebene Bodenluftabsaugung abgesaugt [7, 11].

Da sich bei reiner Dampfinjektion an der Kondensationsfront Schadstoffe anreichern und in ungünstigen Fällen bis auf den Grundwasserspiegel absinken können, ist ein Einsatz mit alleiniger Dampfinjektion zwar bei organischen Schadstoffen mit einer Dichte < 1 kg/L (LNAPL) möglich, er bedingt jedoch ggf. den Einsatz einer Phasenabschöpfung im Grundwasser und eine entsprechende Grundwasserabstromsicherung. Daher ist eine reine Dampfinjektion nicht zu empfehlen.

Im Falle von „schweren“ organischen Schadstoffen (DNAPL, z.B. CKW) muss zwingend ein Dampf-Luft-Gemisch injiziert werden. Die mit dem Dampf injizierte Luft wirkt als inertes Trägergas, durchdringt die Kondensationsfront und trägt die Kontaminanten gasförmig mit der Bodenluft aus.

3.2.2 Einsatz im Grundwasser

Beim Einsatz der DLI in der gesättigten Zone (Grundwasserleiter), wird ein Wasserdampf-Luft-Gemisch unterhalb bzw. auf Höhe des Schadenszentrums injiziert. Die Schadstoffe werden infolge der sich um die Injektionsbrunnen im Idealfall radialsymmetrisch ausbreitenden Dampf- und Wärmefronten verdampft. Die mit dem Dampf injizierte Luft trägt die Kontaminanten dann gasförmig in Richtung der ungesättigten Bodenzone und der Bodenluftabsaugbrunnen aus. Beim Einsatz der DLI im Grundwasser erschließt die Dampffront in Folge der Auftriebskräfte im weiteren Sanierungsverlauf auch die ungesättigte Bodenzone, so dass simultan beide Zonen behandelt werden können (Abbildung 2).

Auch hier erfolgt die gasseitige Entfernung der Schadstoffe über eine Bodenluftabsaugung (BLA) aus der ungesättigten Bodenzone. Mit Erwärmung der gesättigten Zone und der Grundwasserwechselzone erfolgt auch eine erhöhte Lösung der Schadstoffe im Grundwasser (Löslichkeit wird bei Erwärmung auch erhöht). Der Betrieb einer Grundwasserhaltung sichert die Entnahme der wassergelösten Schadstoffe und schützt vor einer abstromigen Verfrachtung.

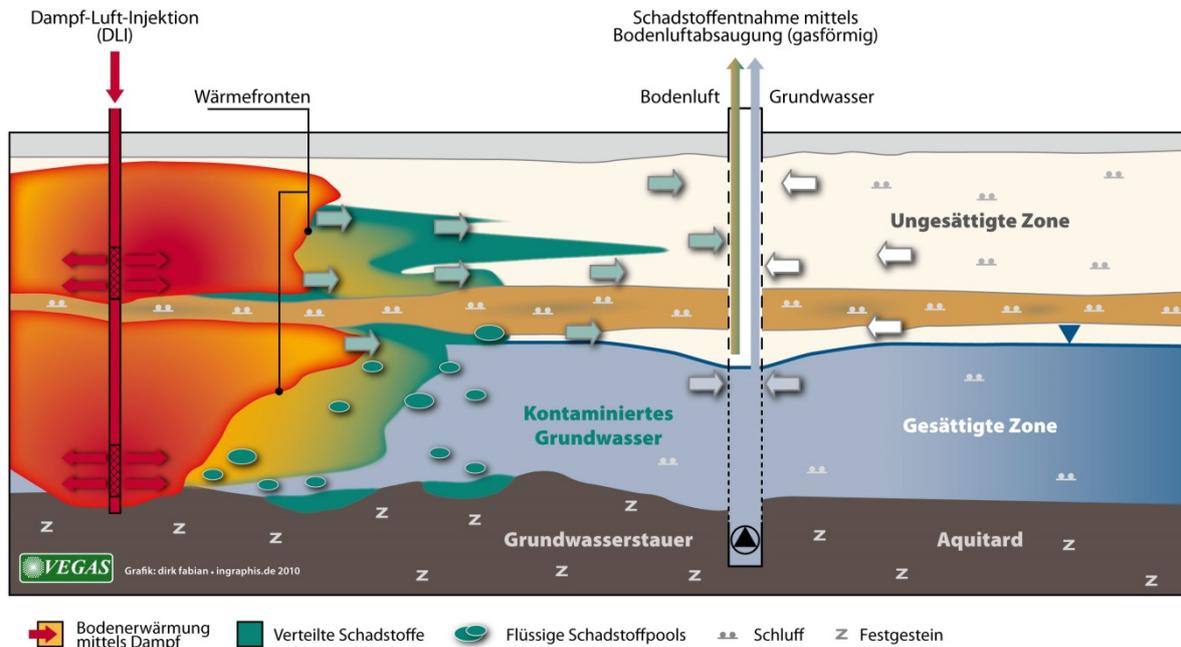


Abb. 2: Schematische Darstellung der Dampf-Luft-Injektion im Grundwasser und der ungesättigten Bodenzone

Durch die Injektion von Satttdampf oder einer Dampf-Luft-Mischung beginnen die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur des Wassers von 100°C (bei Atmosphärendruck), bei der oben beschriebenen Gemisch-Siedetemperatur (Azeotrop) zu sieden (Wasserdampfdestillation). Meist liegen an einem Standort Schadstoffgemische (z.B. PCE, TCE) mit verschiedenen Massenanteilen vor. Die entsprechende Gemisch-Siedetemperatur unter Berücksichtigung der bei der späteren Sanierung zur Injektion erforderlichen Drücke, kann entsprechend berechnet werden und ist die der Sanierung zu Grunde zu legende Zieltemperatur im Untergrund [6, 7, 11].

Wird diese erreicht, werden alle Schadstoffe verdampft und über die Bodenluftabsaugung abgesaugt. Der auf die Zieltemperatur aufgeheizte Bodenbereich kann dann theoretisch als saniert angesehen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Zieltemperatur eine gewisse Zeit aufrecht erhalten bleiben muss, um das Schadstoffinventar zu verdampfen und absaugen zu können. In der Sanierungspraxis (Durlach, Zeitz, Biswurm, [8, 9, 10, 12, 14]) hat sich gezeigt, dass infolge von Kondensations-, Sorptions- und Diffusionseffekten die Gemisch-Siedetemperatur über einen Zeitraum von mehreren Wochen aufrecht erhalten bzw. überschritten werden muss, um eine gesicherte Schadstoffentfernung aus den thermisch behandelten Bodenbereichen zu gewährleisten. Dann konnten jedoch Reinigungsleistungen von über 95% Schadstoffabreinigung aus der Bodenmatrix erzielt werden.

3.2.3 Besonderheiten und Einsatzbereiche

Der Vorteil des Verfahrens liegt in geringen Sanierungszeiten, einer vollständigen Reinigung der bis zur Gemischsiedetemperatur des entsprechenden Schadstoffs (oder Gemisches) erwärmten Bereiche und der Kontrolle des Sanierungsfortschritts und der gezielten Steuerung der Sanierung.

Da sich der Dampf in der gesättigten Zone durch Auftriebseffekte nicht nur horizontal im Aquifer sondern auch vertikal nach oben ausbreitet, ist zwar einerseits die (horizontale) „thermische Reichweite“ eines Injektionsbrunnens im Grundwasser begrenzt, andererseits kann aber dadurch das Verfahren zur simultanen Sanierung der gesättigten und

ungesättigten Zone eingesetzt werden. Hat die Dampf front den Grundwasserspiegel durchdrungen, breitet sich die Front auch in der ungesättigten Zone aus und führt auch dort die Schadstoffe in die Gasphase über, die dann ebenfalls über die BLA abgesaugt werden.

Je nach Aufbau und Durchlässigkeit des Untergrundes, sowie der injizierten Dampf-Luft-Massenströme erfolgt die Wärme- und Dampfausbreitung unterschiedlich stark in horizontaler und vertikaler Richtung. Das Verfahren der Dampf-Luft-Injektion ist für die gesättigte Zone bei gut durchlässigen, ungeschichteten (isotropen) Böden (Grobsande) mit einer Durchlässigkeit größer als 5×10^{-4} m/s nur bedingt einsetzbar, da durch die dominierende vertikale Dampfausbreitung die „thermische Reichweite“ in diesen Fällen kleiner einem Meter Radius liegen kann, sofern der Aquifer ungespannt und isotrop ist. In solchen Fällen wäre eine unwirtschaftlich hohe Anzahl an Injektionsbrunnen erforderlich.

Eine DLI ist zur thermischen Sanierung hochkontaminierter Bereiche in der gesättigten Zone mit einer Durchlässigkeit im Bereich zwischen 5×10^{-5} m/s bis 5×10^{-4} m/s bzw. in der ungesättigten Bodenzone zwischen 1×10^{-4} bis 1×10^{-2} m/s gut anwendbar. Schluff- bzw. Tonlagen geringer Mächtigkeit (bis ca. 0,5 m) schränken die Anwendbarkeit hinsichtlich einer zügigen Erwärmung zwar ein, sind jedoch durch den sogenannten „Steam Override“ sanierbar. Unter „Steam Override“ (Begriff aus der Erdölförderung) versteht man bei Injektion eines Wasserdampf-Luftgemisches in der gesättigten Bodenzone unterhalb einer gering durchlässigen, z.B. bindigen Bodenschicht das horizontalen Unterströmen dieser bindigen Lagen, wobei das Grundwasser verdrängt wird. Dadurch kommt es zur Aufwärmung der bindigen Lagen durch Wärmeleitung mit gleichzeitigem, gasförmigem Schadstoffaustrag nach oben in die darüber liegende besser durchlässigen Schichten. Aus diesen können dann die Schadstoffe über die Bodenluftabsaugung abgezogen werden.

Der zum Teil rasche zeitliche Verlauf der thermischen Sanierung bedingt ein entsprechendes Monitoring und in Folge einen entsprechenden Personaleinsatz. Ein hoch aufgelöstes Temperaturmonitoring im Sanierungsgebiet ist zur Kontrolle der zu erreichenden Gemisch-Siedetemperatur erforderlich und muss solange aufrecht erhalten werden, bis die Schadstoffkonzentration in der BLA aus dem aufgeheizten Bereich abnimmt. Außerdem ist das Temperaturmonitoring zur optimalen und zeitnahen Kontrolle und Steuerung der Dampfausbreitung und damit der Sanierung erforderlich. Der Betrieb erfordert zudem eine tägliche Überwachung des Schadstoffaustrags (vorzugsweise online) und der wichtigsten Prozessgrößen der Anlagentechnik. Aus diesem Grund wird zumeist eine Fernüberwachung über ein Datenerfassungssystem mit Gasmesstechnik (GC-PID o.ä.) und Temperaturmesstechnik eingesetzt.

Das Verfahren wurde auch schon erfolgreich in dichter Altstadtbebauung unter Gebäuden eingesetzt, bei vollem Erhalt der Gebäudenutzung. Details können u.a. aus dem TASK-Leitfaden [11] und insbesondere aus dem ÖVA Report [3] entnommen werden.

Für die Auslegung einer thermischen In-situ-Sanierung mit dem DLI Verfahren wurde ein Excel basiertes Dimensionierungstool entwickelt, welches kostenlos auf der Homepage von TASK, Kompetenzzentrum für Boden, Grundwasser & Flächenrevitalisierung, am UFZ Leipzig zur Verfügung gestellt wird <http://www.task-leipzig.info/>.

3.3 Feste Wärmequellen

Feste Wärmequellen werden in der Regel mit elektrischen Heizlanzen mit bis zu 600°C betrieben. Es gibt auch Heizlanzen, in denen die Aufheizung im Innern der Heizelemente durch einen Gasbrenner erfolgt, der zum Teil mit den abgesaugten Gasen aus der Sanierung betrieben wird und somit die Reinigung der abgesaugten, schadstoffbeladenen Bodenluft zum Teil ersetzt [4, 11].

Feste Wärmequellen werden vornehmlich in gering durchlässigen bis schlecht durchlässigen Böden bzw. Bodenschichten angewandt. Das Verfahren ist für die ungesättigte Bodenzone erprobt und wird vielfach eingesetzt, für den Grundwasserbereich wurde es bei VEGAS in

Rahmen eines F&E Projektes erprobt und die Machbarkeit unter bestimmten Randbedingungen gezeigt [1]. Zu Anwendungen aus der Sanierungspraxis liegen jedoch noch keine eigenen Erfahrungen vor.

Die Wärmeausbreitung bei festen Wärmequellen wird maßgeblich durch die thermische Leitfähigkeit des Bodens beeinflusst, die eine sehr invariante Bodeneigenschaft ist (nur etwa Faktor zwei zwischen Lehm zu Kies). In der Umgebung der heißen Wärmequellen werden Porenwasser und Schadstoff verdampft und strömen mit der Bodenluft entlang des sich von der Wärmequelle zur kälteren Umgebung ausbildenden Temperaturgradienten. Mit dem Gas bzw. Dampfstrom wird neben der reinen Wärmeleitung Energie in Form der Verdampfungsenthalpie transportiert, die bei Kondensation in kühleren Randbereichen wieder frei wird und so eine Aufheizung des Bodenkörpers bewirkt. Gleichzeitig wird, vornehmlich in bindigen Böden, Wasser aus den kälteren, feuchten Randbereichen in Flüssigphase entgegen den Temperaturgradienten durch Kapillarkräfte in den bereits heißen Bereich transportiert und dort erneut verdampft. Im Bereich dieser Zirkulationsströmung, der sogenannten „Heatpipe“, überwiegt der konvektive Wärmetransport, in den anderen Bereichen dominiert die Wärmeleitung (Abbildung 3).

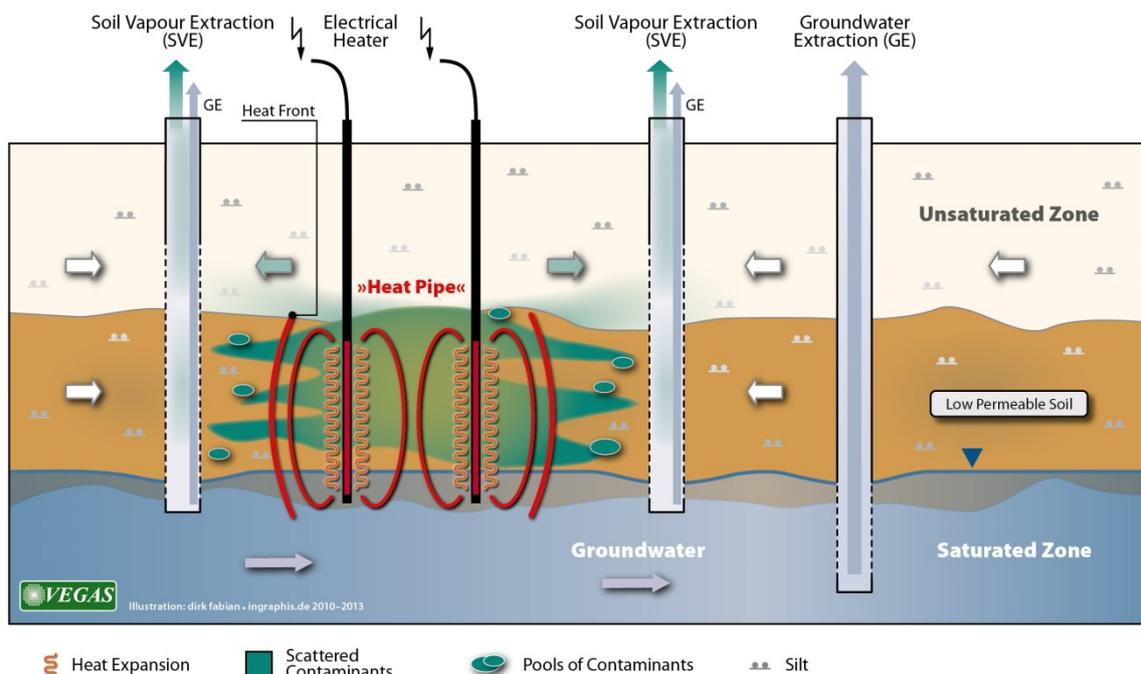


Abb. 3: Schematische Darstellung der Dampf-Luft-Injektion im Grundwasser und der ungesättigten Bodenzone

Durch die anfänglich schnelle Abnahme der Wassersättigung erhöht sich die Gasdurchlässigkeit, wodurch der gasförmige Schadstoffaustrag begünstigt wird. Infolge der Wasserdampfdestillation bei Temperaturen $< 100\text{ °C}$ ist bei der Sanierung von leicht- und mittelflüchtigen Schadstoffen (s.o.) zum Sanierungsende noch eine Wasserrestsättigung im Bodenkörper vorhanden. Erst nach vollständiger Trocknung des Porenraums können Temperaturen $> 100\text{ °C}$ erreicht werden und auch schwerflüchtige Schadstoffe verdampft werden. Die In-situ-Anwendung des Hochtemperaturbereiches wird in der Praxis aber nur für besondere Schadensfälle angewandt (z.B. Pestizide) und erfordert spezielle Erfahrung.

Üblicherweise werden mehrere (teilweise mehr als 10) Heizelemente sowie Bodenluftabsaugbrunnen parallel betrieben. Die Reinigung der abgesaugten Bodenluft erfolgt mit konventionellen Anlagen, die jedoch heiße Bodenluft behandeln können müssen.

Das Verfahren kann für organische Schadstoffe (DNAPL und LNAPL, leicht- und mittelflüchtig, Siedetemperaturen bis 200°C) in der ungesättigten und (gesättigten) Zone eingesetzt werden. Der Einsatz kann insbesondere auch unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung erfolgen [5]. Details können u.a. aus dem TASK-Leitfaden [11] entnommen werden.

Durch Kombination der Dampf-Luft-Injektion mit dem THERIS-Verfahren können gezielt geringleitende Schichten größerer Mächtigkeit in der ungesättigten Zone über Wärmeleitung auf die Gemisch-Siedetemperatur aufgeheizt und die Schadstoffe verdampft und somit auch die schlecht durchlässigen Schichten thermisch saniert werden.

4 Technologieentwicklung und Technologietransfer

Seit der Inbetriebnahme von VEGAS im Jahr 1995 wurden im Rahmen von nationalen und internationalen F&E-Projekten thermische In-situ-Sanierungsverfahren erforscht, mitentwickelt, getestet und optimiert. Ein wichtiger Schritt der Technologienentwicklung war und ist der Technologietransfer in die Praxis, d.h. die Anwendung der Verfahren im Rahmen von Pilotprojekten bis hin zur Beteiligung bei Gesamtsanierungen, um das Know-how an die Sanierungspraxis weiter zu geben. In einigen Fällen dienten die Ergebnisse einer Pilotierung der nachfolgenden Auslegung bis hin zur Ausschreibung und Auftragsvergabe an Sanierungsfirmen und der späteren wissenschaftlichen Begleitung einer Sanierung. Eine Übersicht der wichtigsten Feldanwendungen im Rahmen des Technologietransfers gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Feldanwendungen im Rahmen des Technologietransfers seit 1998

Jahr	Standort	Geologie/Hydrogeologie	Schad	Beschreibung / Besonderheiten
1998	Plauen, ehemalige Benzol-Verladestation	(UZ), sandiger Schluff, -2,5 bis -4,5 m über kiesig/sandigem GWL	BTEX	EU Projekt mit Sanierungsfirma
1998 - 2000	Mühlacker, ehemalige Sondermülldeponie	(UZ), verwitterte Ton-/Mergelsteine (Gipskeuper) getrennt durch Schichtwasserhorizont (-15m u. GOK, DRM-Aquifer bei -30 m)	CKW	Modellvorhaben LfU Baden-Württemberg
2004	Albstadt, ehemaliger metallverarbeitender Betrieb	(UZ / GZ): schluffig/tonig (-3,8 m), durchlässiger Kalkstein (-5,6 m) über Mergelgestein	CKW	Schadensherd unter Gebäude, Sanierung durch Bodenplatte
2005 Pilot 2010/11 San.	Durlach, ehemalige chemische Reinigung	(GZ, vadose, UZ) schluffig, sandiger Kies mit Schlufflagen (bis -9 m)	CKW (PCE)	Bewohntes Gebäude, Sanierung unter Gebäude, 2010/2011 Gesamtsanierung erfolgreich abgeschlossen, Konz. im GW heute n.n.
2008	Zeitz, ehemaliges Hydrierwerk & Verladestation	(GZ, vadose, UZ), kiesig/sandig, Schlufflage, sandig/kiesig (-12 m) über Kohlekomplex	Benzol	Pilot. erfolgreich, Sanierungskonzept erstellt, jedoch keine Umsetzung
2009 Pilot ab 2012 San. laufend	Biswurm, ehemalige Verbrennungsanlage	(GZ, vadose, UZ), geklüfteter Sandsteinaquifer, (Tonstein -21 m)	CKW	Erfolg. Pilotierung Grundlage für Sanierungsplanung, Sanierungsbetrieb seit 06.08.2012 mit DLI (geplant DLI bis August 2016), „Lessons Learned“

Jahr	Standort	Geologie/Hydrogeologie	Schad	Beschreibung / Besonderheiten
2010 / 2013 / 2014 San. laufend	Oberursel, Ehemaliger Chemikalenhandel	(UZ, vadose), schlecht durchlässiger Untergrund, Tonschichten, ($10^{-6} - 10^{-5}$ m/s)	CKW	Altstadt unter einem Gebäude Feasibility, Pilotierung (Fj. 2013 bis Sept. 2013, derzeit Sanierung)
2011 mit Unterbr. bis heute	Sindelfingen unter einem Parkhaus	(UZ und GZ) tonige schluffig mit Torfanteil	CKW	Feasibility / Pilotierung , abschnittweise Schadenherdentfernung je nach Haushaltslage des Sanierungspflichtigen
2012 / 2014	EU-Projekt CityChlor: „Stuttgarter Str.“ LH Stuttgart	(UZ und GZ), tonig-dichter Keuper und DRM, unterliegend Gipskeuper Aquifer	CKW	Pilot, feste Wärmequellen, Wiss. Begleitung, abgeschl. 31.07.2013, Sanierung 12.2013-05.2014 (o. VEGAS)
2012 Feasibility seit 2015 San.	Schwarzwald Nagoldtal	(UZ, GZ) teilweise unter Gebäude, quartäre Talablagerungen, kiesig, sandig, schluffig, Wechsellagen	CKW	Feasibility / Sanierungsvorschlag, wirtschaftlichere Alternative zur Großbohrlochverfahren (Abbruch Gebäude) laufende Sanierung

Allen Projekten gemein war, dass von Projekt zu Projekt der „Schwierigkeitsgrad“ gesteigert wurde bzw. die Anwendung anders als beim Vorgängerprojekt war. Dies hatte zum Ziel die Anwendungsmöglichkeiten auszuloten und soweit möglich zu erweitern bzw. die Anwendungsgrenzen aufzuzeigen. So wurden auch immer wieder Machbarkeitsstudien erstellt, teilweise mit begleitende Laboruntersuchungen (z.B. Torfproblematik), die zu dem Ergebnis kamen, dass der Einsatz von TIsS nicht möglich oder sinnvoll ist. Diese, sowie einige derzeit noch laufende Projekte sind in Tabelle 1 nicht mit aufgenommen.

5 Fallbeispiele

5.1 Ehemalige chemische Reinigung – innenstädtisch, Karlsruhe Durlach

Kurzbeschreibung analog TASK-Leitfaden 2012 [11]: Das Schadenszentrum einer CKW-Kontamination der ungesättigten und gesättigten Zone mit Perchlorethen konnte auf eine Fläche von 200 m² unterhalb einer ehemaligen chemischen Reinigung und dem Gebäudeinnenhof (ca. 100 m²) eingegrenzt werden. Die vertikale Ausbreitung des Schadenszentrums konnte basierend auf Bodenproben (850 – 3.800 mg CKW je kg Boden) auf 5 m u. GOK eingegrenzt werden. Das denkmalgeschützte Gebäude wird im Erdgeschoss als Atelier genutzt, die oberen Stockwerke sind bewohnt.

Im Rahmen eines dreimonatigen Pilotversuchs (2005) zur Bestimmung der thermischen Reichweite der Dampfausbreitung in der gesättigten Zone konnten ca. 450 kg PCE aus dem oberen Aquifer und dem Schluffbereich am Übergang zur ungesättigten Zone entfernt werden. Aufgrund der thermischen Reichweite von 4 m Radius und einer Injektionstiefe von 7 – 8 m sah die Sanierungsplanung des Gesamtstandortes eine Aufteilung der Gesamtfläche in vier sequentiell zu behandelnder Abschnitte mit je zwei Injektionsbrunnen vor.

In 2010 wurde das Gebäude für die thermische Sanierung mittels schräg gebohrten Dampfinjektionsbrunnen, einem umlaufenden Ring von Bodenluft- und Grundwasserbrunnen und einer horizontalen Bodenluftdrainage unterhalb des Gebäudes erschlossen. Während der fünfmonatigen Dampfinjektion ab Frühsommer 2010 wurde die gesättigte Zone oberhalb 5 m u. GOK auf die erforderliche Gemischsiedetemperatur von 92°C erwärmt. Der

schadstoffbelastete Grundwasserwechselbereich und die Schlufflage wurden auf 85°C bzw. 75°C erwärmt.

In der zehnmonatigen Gesamtsanierungszeit konnten 50 kg CKW aus dem Schluffbereich (2,5 – 3,5 m u. GOK) und dem oberen Grundwasserleiter (3 – 5 m u. GOK) entfernt werden.

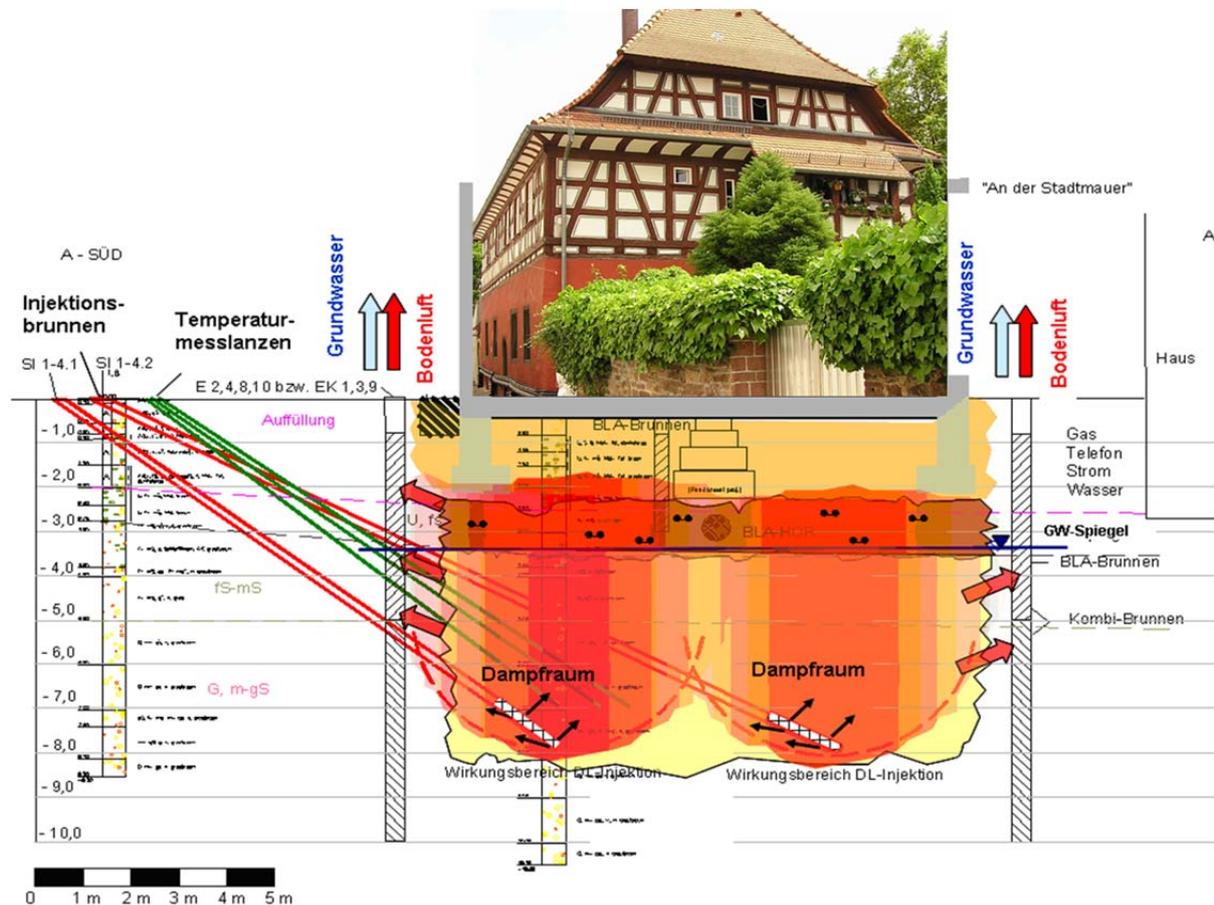


Abb. 4: CKW-Sanierung unter dem historischen, bewohnten Gebäude einer ehemaligen chemischen Reinigung in Karlsruhe Durlach

Nach Erreichen der geforderten Sanierungszielwerte von 10 mg CKW je m³ Bodenluft bzw. 10 µg CKW/l im Grundwasser wurde die Dampf-injektion Ende 2010 ausgeschaltet. Nach Abschluss der anschließenden zweimonatigen Abkühlphase konnte das Erreichen der Sanierungszielwerte bestätigt werden (13 µg/l im Grundwasser und 1,1 mg/m³ in der Bodenluft). Während des anschließenden zweijährigen Monitorings gingen die Werte im Grundwasser weit unter 10 µg/l zurück, so dass der Standort als vollständig saniert eingestuft wurde.

Eine zusammenfassende Beschreibung des Sanierungsprojektes findet sich im ÖVA Report 2011 (Denzel et. al.).

5.2 Ehemalige Benzolanlage - altes Industriegelände Zeitz

Kurzbeschreibung analog TASK-Leitfaden 2012 [11]: Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II wurde am Standort des ehemaligen Hydrierwerks in Zeitz im Bereich der Destillationsanlage eine Dampf-Luft-Injektion zur Erwärmung des Bodens auf die

Siedetemperatur des am Standort massiv vorliegenden Benzols (85°C) eingesetzt. Zur Sanierung wurde eine im Auftrag des UFZ angefertigte Mobile Thermische In-situ-Sanierungsanlage (MOSAM) eingesetzt, die für den Einsatz entsprechend ATEX umgebaut wurde. Das Sanierungsfeld wurde thermisch über drei Injektionsbrunnen mit zwei Injektionstiefen (gesättigte und ungesättigte Zone), sowie sechs ringförmig am Rand des Pilotfeldes angeordnete, voll verfilterte Extraktionsbrunnen erschlossen.



Abb. 5: Sanierungsfeld in Zeit mit Injektions- und Extraktionsbrunnen und den Einrichtungen fürs Temperaturmonitoring (rote Kästchen)

Ziel der Pilotanwendung war der Nachweis einer über 99%-igen Entfernung der Kontaminanten aus gesättigter und ungesättigter Zone. Das Schadstoffinventar wurde vor Beginn der zehnmönatigen Anwendung auf 1.700 kg Benzol bestimmt. Bereits während der ersten Phase mit „kalter“ Bodenluftabsaugung und Air-Sparging konnten 4.050 kg Benzol entfernt werden. Zu Vergleichszwecken wurde zunächst die ungesättigte Zone thermisch saniert (weitere 2.280 kg Benzol). Der Schadstoffaustrag aus der gesättigten Zone über die Dampf-Luft-Injektion war mit 300 kg Benzol vergleichsweise gering. Während der anschließenden Behandlung der am Standort oberhalb des Grundwasserspiegels anstehenden ca. 1 m mächtigen Schluffschicht durch eine Dampf-Luft- Umströmung konnten nochmals 240 kg Benzol entfernt werden.

Der Sanierungserfolg wurde über Beprobung der Bodenluft und Umrechnung der Gehalte auf die am Boden adsorbierte, verbliebene Schadstoffmasse nachgewiesen. Im Mittel lag der Gehalt nach der thermischen Sanierung bei 0,16 mg Benzol per kg Boden. Dies wurde 6 Monate nach Sanierungsende über Bodenproben verifiziert (0,1 mg/kg in der ungesättigten Zone und 0,5 mg/kg in der gesättigten Zone).

Angesichts des hohen Benzolgehalts in der ungesättigten Bodenzone und der hohen Austragsraten stellt eine klassische, intensiv betriebene Bodenluftabsaugung eine ökonomische Möglichkeit zur Schadstoffentfernung dar, wobei damit die Sanierungszielwerte nicht erreicht werden können, die bei Einsatz von thermischen Verfahren erreicht würden.

5.3 Ehemalige Verbrennungsanlage Biswurm – CKW im Kluffgestein

5.3.1 Ausgangslage

Auf dem Gelände des ehemaligen städtischen Verbrennungsplatzes in Villingen-Schwenningen (Gewann Biswurm) versickerten in den Jahren 1960 bis 1974 aus Lagerbecken Schadstoffe (vorwiegend CKW, BTEX) in das darunter liegende Kluffgestein und die Grundwasserleiter. Die Becken wurden zur gezielten Verbrennung von Lacken, Produktionsrückständen aus der Metallverarbeitung, Inhalten von Öl- und Benzinabscheidern und verbrauchten Lösemittel genutzt. Ab Anfang der neunziger Jahre wurde diese „Altlast“ bearbeitet. Die verunreinigten tonigen Böden im Bereich der ehemaligen Verbrennungsbecken und Drainagen wurden im Sommer 2004 durch einen Bodenaustausch bis in den Verwitterungs-horizont des Festgesteins (ca. 3 m Tiefe) saniert. Es wurden 7.100 t Boden ausgehoben und verwertet / entsorgt. Das entfernte Schadstoffpotenzial betrug ca. 1.600 kg LHKW, 2.200 kg Kupfer, 40 kg Blei und 600 kg MKW. Zur Fassung der verunreinigten Bodenluft und dem mit Schadstoffen belasteten Sickerwasser wurde in das Festgestein Schlitze gefräst und Drainageleitungen verlegt. Insgesamt 9 Sanierungs- und Überwachungsbrunnen wurden errichtet und Bodenluft sowie Grundwasser gefördert.

Unterhalb des Aushubs lag der Schadensherd in der ungesättigten Bodenzone bis 12 m u. GOK und dem darunter liegenden Grundwasserleiter der anstehenden Bundsandsteinlagen. Der Schadensherd umfasste eine Fläche von ca. 2.800 m² mit einer Tiefe von bis zu 37 m. Die abströmende Schadstofffahne erstreckte sich über mehrere Hektar.

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung wurde eine Gesamtmasse von ca. 10 bis 50 Tonnen CKW in klüftigen Sandstein und den Kluffgrundwasserleitern prognostiziert. Die CKW-Konzentration im Grundwasser reichte von 1 mg/L in der gesättigten Zone bis zu 40 mg/L im Drainagesystem (6 m u. GOK). Im Schadenszentrum waren bis zu 4 g LHKW je m³ Bodenluft nachweisbar. Die Hauptmasse der Schadstoffe befand sich in der oberen Zone des Sandsteinaquifers (bis 15 m u. GOK) und der ungesättigten Zone.

5.3.2 Pilotstudie

Aufbauend auf einer Machbarkeitsstudie zum Einsatz einer thermischen In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI) führte VEGAS im Jahr 2009 im Auftrag der Stadt Villingen-Schwenningen gemeinsam mit dem UFZ Halle-Leipzig eine Pilotanwendung auf einem Teilbereich (Testfeld mit ca. 15 m Radius) des Standorts durch [12, 13]. Hierbei wurde das DLI-Verfahren erstmalig im Kluffgestein eingesetzt. Die Heizperiode der Dampf-Luft-Injektion dauerte 19 Wochen. Das Testfeld umfasste insgesamt 2.000 m³ Kluffgestein und erstreckte sich auf die ungesättigte Zone und den oberen Kluffgrundwasserleiter in einer Plattensandsteinformation. Die thermische Reichweite, der Radius der Dampfausbreitung, betrug 5 m in der Zielzone zwischen 3 -15 m u. GOK. Schadstoffe, die in die Sandsteinmatrix eingedrungen waren, wurden während der konduktiven Aufheizung des Festgesteins thermisch desorbiert während das Dampf-Luft-Gemisch in Klüften strömte. Mehr als 91% der gesamten extrahierten Masse (560 kg CKW) wurde durch die Bodenluftabsaugung aus der Grundwasserschwankungszone und der ungesättigten Zonen entfernt. Über die Grundwasserförderung wurden weniger als 6%, 34 kg CKW, entfernt. Die CKW-Werte in der Bodenluft und im Grundwasser wurden um 95% bzw. 85% verringert.

5.3.3 Sanierungskonzept

Basierend auf den Ergebnissen der Pilotstudie hinsichtlich thermischer Reichweite, Heizdauer, Wärmeleistung, Bodenluftabsaugrate und Schadstoffaustragsverhalten wurde die thermische In-situ-Sanierung mit DLI für die ungesättigte Zone, die Grundwasserschwankungszone und den oberen Kluffaquifer für den Standort (ca. 2.900 m², 15 m Mächtigkeit) geplant, ausgelegt und letztendlich nach öffentlicher Ausschreibung vergeben [10, 14, 15].

Der zu sanierende Standort wurde in neun überlappende Abschnitte mit 600 – 800 m² Fläche unterteilt. Je Abschnitt sind 5 bis 6 Injektionsbrunnen in zwei verschiedenen Tiefenbereichen verfiltert, um die Erwärmung im gesättigten und ungesättigten Festgestein steuern zu können. Um die Injektionsbrunnen sind 10 bis 12 Bodenluftabsaugbrunnen angeordnet. Die Gesamtdauer der Dampf-Luft-Injektion (Dampf-Injektionsleistung mit ca. 400 kW Wärmeleistung) wurde auf 33 Monaten berechnet. Insgesamt wurden 31 zweistufige Injektionsbrunnen und 34 Bodenluftabsaugbrunnen vorgesehen. Zur Erwärmung der einzelnen Abschnitte wird das Dampf-Luft-Gemisch abschnittsweise über die vier bis fünf Injektionsbrunnen mit einer Gesamtleistung von 300 - 500 kW injiziert.

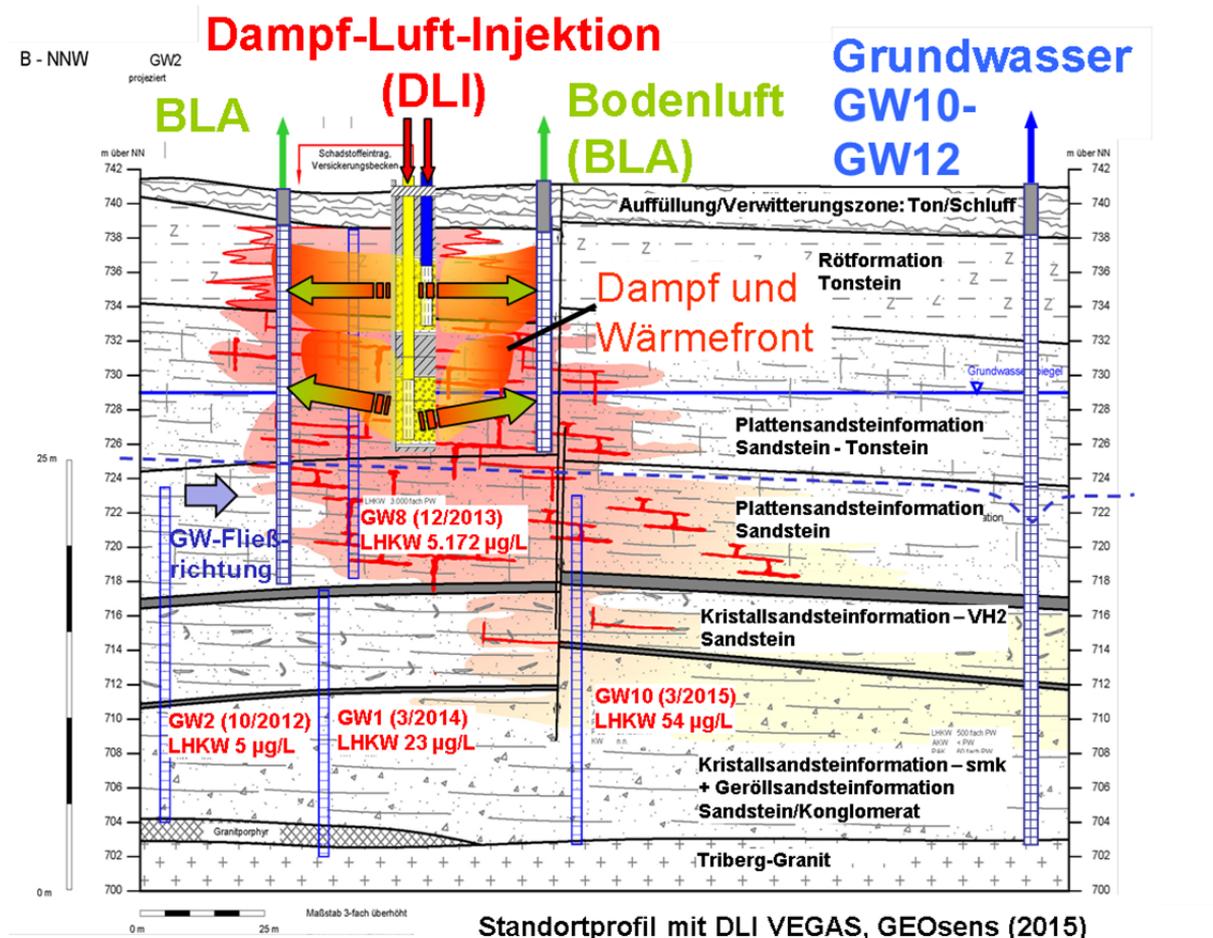


Abb. 6: Sanierungskonzept Kluffgestein Standort Biswurm

Die Kosten wurden mit 2,6 Mio. EUR netto veranschlagt. Bei der Sanierung sollten 40.000 m³ Kluffsandstein innerhalb eines vierjährigen Einsatzes behandelt d.h. dekontaminiert werden. Die Dampf-Luft-Injektion begann im August 2012. Die Sanierung läuft derzeit noch und die Dampf-Luft-Injektion wird voraussichtlich bis August 2016 andauern.

Das in Deutschland bisher einmalige Projekt stellt an alle Beteiligten hohe Anforderungen und hat bisher sehr viele Erfahrungen gebracht („Lessons learned“) über die an verschiedenen Stellen schon berichtet wurde. Es hat aber schon heute gezeigt, dass die Sanierung des Kluffgesteins am Standort Biswurm durch DLI möglich ist [10, 14, 15].

Details hierzu werden im anschließende Vortrag von Stefan Schulze: „Planung und Kontrolle einer thermischen In-situ-Sanierung im Kluffgestein“ vorgestellt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach über 20 Jahren Entwicklungsarbeit, Technologietransfer und Anwendungserfahrung stehen mit den thermischen In-situ-Sanierungsverfahren Möglichkeiten zur Verfügung Kontaminationsquellen im Boden und Grundwasser, hervorgerufen durch organische Schadstoffe, effektiv und nachhaltig zu beseitigen.

Die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten, die Verfahrensauswahl und die Auslegung eines möglichen Einsatzes erfordern einerseits detaillierte Standortkenntnisse aber andererseits auch eine entsprechend hohe Sachkenntnis und Erfahrung des Planers bzw. des Gutachters. Nicht unerwähnt bleiben darf, dass die Verfahren mit hohem Überwachungs- und Steuerungsaufwand und mit entsprechendem Personaleinsatz verbunden sind.

Erfahrungen in den letzten Jahren haben auch gezeigt, dass zwischen den an einer Sanierung Beteiligten (Sanierungspflichtiger / Geldgeber, Sanierungsfirma, Gutachter und Behörden) eine offene und zeitnahe Kommunikation erforderlich ist, um z.B. während der Sanierung auf untergrundbedingte Änderungen und Anpassungen kurzfristig und flexibel reagieren zu können. Hierzu müssen die Entscheidungsträger im Team mit eingebunden sein.

Es bleibt festzustellen:

- Die Dimensionierung einer Dampf-Luft-Injektion entsprechend dem Stand der Technik im Rahmen der Sanierungsplanung ist möglich, jedoch gibt es noch ein Defizit an entsprechenden Planern.
- Ein Dimensionierungstool zur Auslegung einer Sanierung wurde erarbeitet und steht auf der Homepage von TASK kostenlos zur Verfügung.
- Eine vollständige und nachhaltige Sanierung von Schadensherden innerhalb definierten und bestimmbaren Zeiträumen (mit gewissen Bandbreiten) ist möglich.
- TIS erfordern eine intensive Sanierungsbegleitung und -steuerung (Online-Datenerfassung, Anlagensteuerung).
- Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen werden ständig „erweitert“ bzw. „ausgereizt“, zum Teil über Pilotanwendungen.
- Der Einsatz im Kluftgestein ist möglich.
- Durch zahlreiche Referenzprojekte ergeben sich immer neue Erkenntnisse und Erfahrungen („Lessons learned“).
- Entwicklung war / ist nur möglich durch viele Beteiligte und entsprechende Geldgeber.

Somit kann mit Blick auf die Zukunft gesagt werden, dass bei sorgfältiger und sachkundiger Anwendung mit TIS auch zum Teil als „unsanierbar“ geltende Schadensherde beseitigt werden können. TIS leisten somit einen wertvollen und wichtigen Beitrag bei der Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen. Sie sind aber kein Allheilmittel und es gibt auch viele Standorte, an denen sie auf Grund verschiedenster Randbedingungen (z.B. wärmeempfindliche Infrastruktur im Untergrund, hohe Torfanteile im Boden, setzungsempfindliche Böden) nicht eingesetzt werden können.

Literaturhinweise

- [1] BAKER, RALPH S. & UWE HIESTER (2009): Large-Scale Physical Models of Thermal Remediation of DNAPL Source Zones in Aquifers. Final Report (ER-1423), Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP), 5/2009.
- [2] BETZ, C. (1998): Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie; Mitteilungsheft Nr. 097, (Dissertation) Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1998. ISBN: 3-921694-97-3.
- [3] DENZEL, S., HETZER, S., PURKHOLD, C., TRÖTSCHLER, O. UND H.-P. KOSCHITZKY (2011): CKW-Boden- und Grundwassersanierung unter einem historischen, bewohnten Gebäude mittels

- Dampf-Luft-Injektion ins Grundwasser. ÖVA Sanierungsreport, SR oo1. ÖVA, Österreichischer Verein für Altlastenmanagement, Wien, <http://www.altlastenmanagement.at/home>
- [4] HIESTER, U. (2009): Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen: Promotionsschrift Nr. 178, Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau Nr. 178 (Dissertation) Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2009. ISBN: 978-3-933761-82-8.
- [5] HIESTER, U. & V. SCHRENK (2008): Thermally enhanced in-situ remediation beneath buildings during their continued usage new source removal options for urban sites. ConSoil 2008. Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO-Conference on Soil-Water Systems in cooperation with Provincia die Milano, 3.-6. June 2008, pp. 143-150, Stella Polare Congress Centre - Fiera Milano, Italy.
- [6] ITVA (2010): Arbeitshilfe H1-13: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. Berlin.
- [7] KOSCHITZKY, H.-P. & O. TRÖTSCHLER (2008): Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung. In Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T. (eds.): Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. 55. Aktual., 3rd edition, C.F. Müller Verlag, 5/2008, pp. 5716. ISBN: 978-3-8114-9700-9.
- [8] KOSCHITZKY, H.-P.; TRÖTSCHLER, O.; LIDOLA, B.; EPP, M.; SCHULZE, S. (2009): CKW-Schaden im Kluffgestein. Neues Anwendungsfeld der thermischen In-situ-Sanierung mit Dampf-Luft-Injektion. Terra Tech (TerraTech 12, pp. TT10ff).
- [9] KOSCHITZKY, H.-P.; TRÖTSCHLER, O.; DENZEL, S.; PURKHOLD, C.; MAIER-OßWALD, W.; HETZER, S. (2011): Thermische In-situ-Sanierung eines CKW-Schadens unter einem denkmalgeschützten Gebäude – von der Planung bis zur Umsetzung. Altlastensymposium 2011, GAB-af, Neu-Ulm (7 –8 July 2011, Neu-Ulm) altlastenforum Baden-Württemberg e. V., Stuttgart, 2011, S. 101-117.
- [10] KOSCHITZKY, H.-P.; TRÖTSCHLER, O.; LIDOLA, B.; KLEEBERG, I.; SCHULZE, S. (2016): Steam-Air-Injection in fractured bedrock: Experience and lessons learned from a CHC contaminated site. NICOLE Spring Workshop, "Turning failure into success – What can we learn when remediation does not go as planned", Vienna, Austria, 15-17 June 2016.
- [11] TASK LEITFADEN (2012): Hiester, U., Müller, M., Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Roland, U., Holzer, F., Edel, H.-G.: Thermische In-Situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. In englisch: In situ thermal treatment (ISTT) for source zone remediation of soil and groundwater, TASK Centre of Competence, Leipzig, Germany, www.ufz.de/export/data/38/50022_ISTT_Guidelines_FINAL_PRINT.pdf
- [12] TRÖTSCHLER, O. & H.-P. KOSCHITZKY (2009): Pilotanwendung des In-Situ-Sanierungsverfahrens „Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone (DLI)“ zur Bestimmung der thermischen Reichweite und der Sanierungsleistung am Standort „Biswurm“ in Villingen, Schwarzwald-Baar-Kreis. Technischer Bericht Nr. VEG 41, 2009/13. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 10/2009. Auftraggeber: Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH –UFZ Leipzig und Stadtbauamt Villingen-Schwenningen (auf Nachfrage u.U. erhältlich).
- [13] TRÖTSCHLER, O.; KOSCHITZKY, H.-P.; WEIß, H. LIDOLA, B.; EPP, M.; SCHULZE, S. (2010): Removal of CHC from fractured bedrock: results of a pilot application using steam-air injection at the site Biswurm (Villingen-Schwenningen, Germany). In: F&U Confirm Publisher, Leipzig Germany: Proceedings of ConSoil 2010, LeS ThS_A23, Salzburg, 22-24 September 2010, ISBN 978-3-00-024598-5
- [14] TRÖTSCHLER, O.; KOSCHITZKY, H.-P.; LIDOLA, B.; KLEEBERG, I.; SCHULZE, S. (2015): Thermische In-situ-Sanierung im Kluffgestein: „Lessons learned“ von der Planung bis zur Sanierungsrealität am Standort „Biswurm“, DECHEMA Symposium Nov. 2015, Frankfurt
- [15] TRÖTSCHLER, O.; KOSCHITZKY, H.-P.; LIDOLA, B.; KLEEBERG, I.; SCHULZE, S. (2015): Steam-Air Injection in fractured bedrock: results and lessons learned of a CHC remediation at the site Biswurm (Villingen-Schwenningen, Germany). In Proceedings of AquaConSoil 2015 Kopenhagen, ThS 1C.27 Thermal remediation. Page 375 -384
http://www.aquaconsoil.org/assets/aquaconsoil_proceedings_2015.pdf

Anschriften der Autoren

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky
VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung,
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
D - 70569 Stuttgart
Tel.: +49 (711) 685 64716
Fax: +49 (711) 685 67020
E-Mail: Koschitzky@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.vegas.uni-stuttgart.de>

Dipl.-Ing. (FH) Oliver Trötschler
VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung,
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
D - 70569 Stuttgart
Tel.: +49 (711) 685 67021
Fax: +49 (711) 685 67020
E-Mail: Oliver.Troetschler@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.vegas.uni-stuttgart.de>