

Thermische In-situ-Sanierung von Boden- und Grundwasser – über 20 Jahre Technologietransfer

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, Dipl.-Ing. (FH) Oliver Trötschler et al.

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Tel.: +49 (711) 685 64716

E-Mail: koschitzky@iws.uni-stuttgart.de

1. Veranlassung

Die Beseitigung von Schadensherden bei der Boden- und Grundwassersanierung ist von großer Bedeutung bei der Sanierung von Altlasten, um eine dauerhafte und nachhaltige Verbesserung der Boden- und Grundwasserqualität zu erreichen. Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIS) haben ein hohes Potential, effizient und umfassend Herde von organischen Schadstoffen – insbesondere auch bei vorhandener Bebauung - zu beseitigen. Bei derartigen Sanierungen spielt auch die zeitliche „Planbarkeit“ zum Erreichen eines bestimmten Sanierungsziels eine wichtige Rolle. Eine In-situ-Sanierung, insbesondere im innerstädtischen Bereich, muss oft innerhalb eines durch äußere Randbedingungen vorgegebenen Zeitrahmens zum Sanierungserfolg führen. Mit Blick auf die zeitliche Vorhersage bieten TIS im Vergleich zu anderen Technologien deutliche Vorteile. Durch den „berechenbaren“ Zeitbedarf im Vergleich zu klassischen, langlaufenden Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen (z.B. kalte Bodenluftabsaugung oder Pump&Treat) werden der Zeit- und Kostenrahmen kalkulierbar. Sie liefern somit einen wichtigen Beitrag bei der Revitalisierung von kontaminationsbelasteten Industriebrachen und innerstädtischen Brachflächen wie auch bei der Stadtentwicklung und tragen damit auch zum Erreichen des 30 ha Ziels bei.

Im nachfolgenden Beitrag werden Möglichkeiten zur Beseitigung von Schadensherden aus dem Boden und Grundwasser – in der Regel simultan - durch den Einsatz von TIS vorgestellt. Seit über 20 Jahren werden bei VEGAS an der Universität Stuttgart derartige Verfahren erforscht, mitentwickelt und optimiert und erfolgreicher Technologietransfer betrieben. Dabei lag und liegt der Schwerpunkt auf der Dampf-Luft-Injektion (DLI). Ihre Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen („Operating Windows“) wurden und werden in einer Vielzahl von Praxisanwendungen stetig erweitert und ausgelotet.

2. Verfahrensprinzip thermischer In-situ-Sanierungsverfahren

2.1 Möglichkeiten der Wärmeerbringung 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 zur Anwendung kommen [3, 4, 5, 6, 9, 11, 14]. Bei der Dampf-Luft-Injektion (DLI) erfolgen der Wärmeintrag und die Wärmeausbreitung vorwiegend konvektiv (durch die Dampfströmung). Bei der thermischen In-Situ-Sanierung mit elektrischen Heizelementen (Feste Wärmequellen, z.B. THERIS) wird die Wärme primär konduktiv (Wärmeleitung) in den Untergrund eingebracht. Beispiele hierzu werden u.a. in den nachfolgenden Beiträgen vorgestellt oder sind in [4, 10] zu finden.

Auf andere Möglichkeiten wie z.B. 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]).

2.2 Dampf-Luft-Injektion, DLI

2.2.1 Einsatz in der ungesättigten Bodenzone

Beim Einsatz in der ungesättigten Bodenzone wird Wasserdampf- oder ein Wasserdampf-Luft-Gemisch in, unter oder am Rand des Schadenszentrums injiziert. Der injizierte heiße Dampf kondensiert an der kalten Bodenmatrix und gibt dadurch seine Energie (Verdampfungsenthalpie) an die Bodenmatrix ab und erwärmt diese. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess - bis der Boden die Dampftemperatur erreicht hat - strömt Dampf von der Injektionsstelle zur Dampffront. Dadurch bildet sich von der Injektionsstelle im Idealfall eine räumlich radialsymmetrische Wärmefront aus. Im erwärmten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffen durch die Wasserdampfdestillation bei der entsprechenden Gemischsiedetemperatur ($<$ der Dampftemperatur) verdampft. Die mit Schadstoffen beladene Bodenluft wird über die gleichzeitig betriebene Bodenluftabsaugung abgesaugt [5, 6, 11].

Da sich bei einer alleinigen Dampf-injektion an der Kondensationsfront Schadstoffe anreichern und in ungünstigen Fällen bis auf den Grundwasserspiegel absinken können, ist ein Einsatz mit alleiniger Dampf-injektion zwar bei organischen Schadstoffen mit einer Dichte < 1 kg/L (LNAPL) und nur für diesen Fall grundsätzlich möglich, er bedingt jedoch ggf. eine entsprechende Grundwasserabstromsicherung und eine Phasenabschöpfung. Eine reine Dampf-injektion ist daher 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.

2.2.2 Einsatz im Grundwasser

Beim Einsatz der DLI in der gesättigten Zone (Grundwasserleiter), wird ein Wasserdampf-Luft-Gemisch mit einer Temperatur ≥ 100 °C unterhalb bzw. auf Höhe des Schadenszentrums injiziert. Der heiße Dampf kondensiert an der kalten Bodenmatrix, verdrängt dabei das anstehende Grundwasser und bewirkt die Erwärmung der Bodenmatrix und die Verdampfung der Schadstoffe (Überführung in die Gasphase). Der injizierte Luftanteil transportiert die verdampften, gasförmigen Schadstoffe in Richtung der ungesättigten Bodenzone (UZ) und vermeidet dadurch eine Rückkondensation der Schadstoffe in kälteren Bodenbereichen. In der UZ werden die gasförmigen Schadstoffe über die Bodenluftabsaugbrunnen abgesaugt. 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 (Abb. 1).

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. Eine Grundwasserhaltung sichert die Entnahme des erwärmten Grundwassers und der wassergelösten Schadstoffe und schützt vor einer abstromigen Verfrachtung.

Durch die Injektion von Sattdampf oder einer Dampf-Luft-Mischung beginnen die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampftemperatur des Wassers von 100 °C (bei Atmosphärendruck), bei der so genannten Gemischsiedetemperatur (Azeotrop) zu siedeln (Wasserdampfdestillation). Meist liegen an einem Standort Schadstoffgemische (z.B. PCE, TCE) mit verschiedenen Massenanteilen vor. Die entsprechende Gemischsiedetemperatur unter Berücksichtigung des bei der späteren Sanierung angelegten Injektionsdrucks wird berechnet und ist die der Sanierung zu Grunde zu legende Ziel- und Verdampfungstemperatur im Untergrund [5, 6, 11, 14]. Wird diese erreicht verdampfen die Schadstoffe und können über die Bodenluftabsaugung abgesaugt werden. Wichtig ist, dass die Zieltemperatur solange aufrechterhalten werden muss, bis die Schadstoffe (Schadstoffinventar) annähernd restlos verdampft und abgesaugt sind. In der Sanierungspraxis (Durlach, Zeitz, Biswurm, [2, 7-11, 14]) hat sich gezeigt, dass infolge von Kondensations-, Sorptions- und Diffusionseffekten die Gemischsiedetemperatur z.T. 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 Reinigungsleistungen von über 95 % Schadstoffabreinigung erzielt werden.

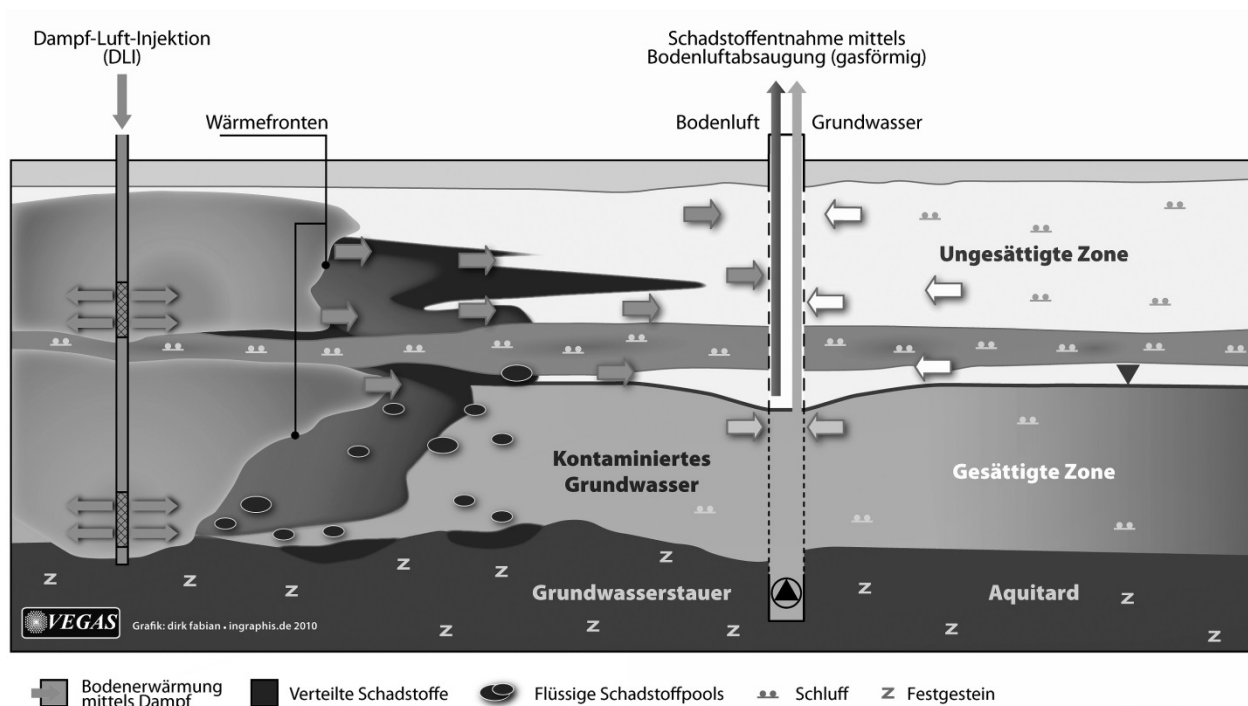


Abb. 1: Schematische Darstellung der Dampf-Luft-Injektion im Grundwasser und in der ungesättigten Bodenzone

2.2.3 Besonderheiten und Einsatzbereiche

Die Vorteile des Verfahrens liegen in geringen und kalkulierbaren Sanierungszeiten, einer vollständigen Reinigung der bis zur Gemischsiedetemperatur des Schadstoffs (oder Gemisches) erwärmten Bereiche und der Kontrolle und gezielten Steuerung der Sanierung durch ein entsprechendes Temperatur- und Schadstoffmonitoring.

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 dadurch das Verfahren zur simultanen Sanierung der gesättigten und ungesättigten Zone eingesetzt werden. Hat die Dampffront den

Grundwasserspiegel durchdrungen, breitet sich die Front auch in der ungesättigten Zone aus wodurch diese mitsaniert wird.

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 bei einem ungespannten gut durchlässigen, ungeschichteten (isotropen) Aquifer mit einer besseren Durchlässigkeit als 5×10^{-4} m/s (Grobsande) nur bedingt einsetzbar. Die „thermische Reichweite“ kann in diesen Fällen unter 1 bis 2 Meter liegen. Dies erfordert eine Vielzahl (Unzahl) von Injektionsbrunnen.

Eine DLI ist zur thermischen Sanierung hochkontaminierter Bereiche in der gesättigten Zone mit einer Durchlässigkeit im Bereich zwischen 2×10^{-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. Darunter versteht man das horizontale Unterströmen einer gering durchlässigen Bodenschicht bei Injektion eines Wasserdampf-Luftgemisches. Die gering durchlässigen Schichten werden durch Wärmeleitung aufgeheizt, der gasförmige Schadstoffaustrag erfolgt vertikal nach oben in die darüber liegenden besser durchlässigen Schichten aus denen sie über die BLA abgezogen werden.

Der zum Teil rasche zeitliche Verlauf beim Einsatz von TIS bedingt ein entsprechendes Monitoring und in Folge einen entsprechenden Personaleinsatz. Ein hoch aufgelöstes Temperaturmonitoring im Sanierungsgebiet ist erforderlich zur Kontrolle der zu erreichenden und über den erforderlichen Austragszeitraum zu haltenden Gemisch-Siedetemperatur, 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. Dies sollte mittels Fernüberwachung über ein Datenerfassungssystem mit Gasmesstechnik (GC-PID o.ä.) und Temperaturmesstechnik erfolgen.

Das Verfahren wurde bereits erfolgreich und bei vollem Erhalt der Gebäudenutzung in dichter Altstadtbebauung unter Gebäuden eingesetzt. Details können u.a. aus dem TASK-Leitfaden [11] und dem ÖVA-Report [2] 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/>. Hinsichtlich der exakten Bestimmung der Verdampfungsdauer besteht ein standortbedingter Untersuchungsbedarf.

2.3 Feste Wärmequellen

Feste Wärmequellen werden in der Regel mit elektrischen Heizlanzen mit bis zu 600 °C, i.d.R. 400 °C betrieben [3, 4, 5, 11]. 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.

Feste Wärmequellen werden vornehmlich bei gering durchlässigen bis schlecht durchlässigen Böden bzw. Bodenschichten angewandt [3]. Das Verfahren ist für die ungesättigte Bodenzone erprobt und wird viel-

fach eingesetzt, für den Grundwasserbereich wurde es bei VEGAS im Rahmen eines F&E Projektes erprobt und die Machbarkeit unter bestimmten Randbedingungen gezeigt [1]. Zu Anwendungen aus der Sanierungspraxis wird u.a. auf Beiträge in diesen Tagungsunterlagen oder auf [4, 10, 11] verwiesen.

Die Wärmeausbreitung bei Festen Wärmequellen wird maßgeblich durch die thermische Leitfähigkeit des Bodens beeinflusst, die eine nahezu invariante Bodeneigenschaft ist (nur etwa Faktor zwei zwischen Lehm zu Kies). Entscheidend für die Wärmeleitfähigkeit und dem Wärmebedarf ist der Wasseranteil. 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. dem 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 (Abb. 2).

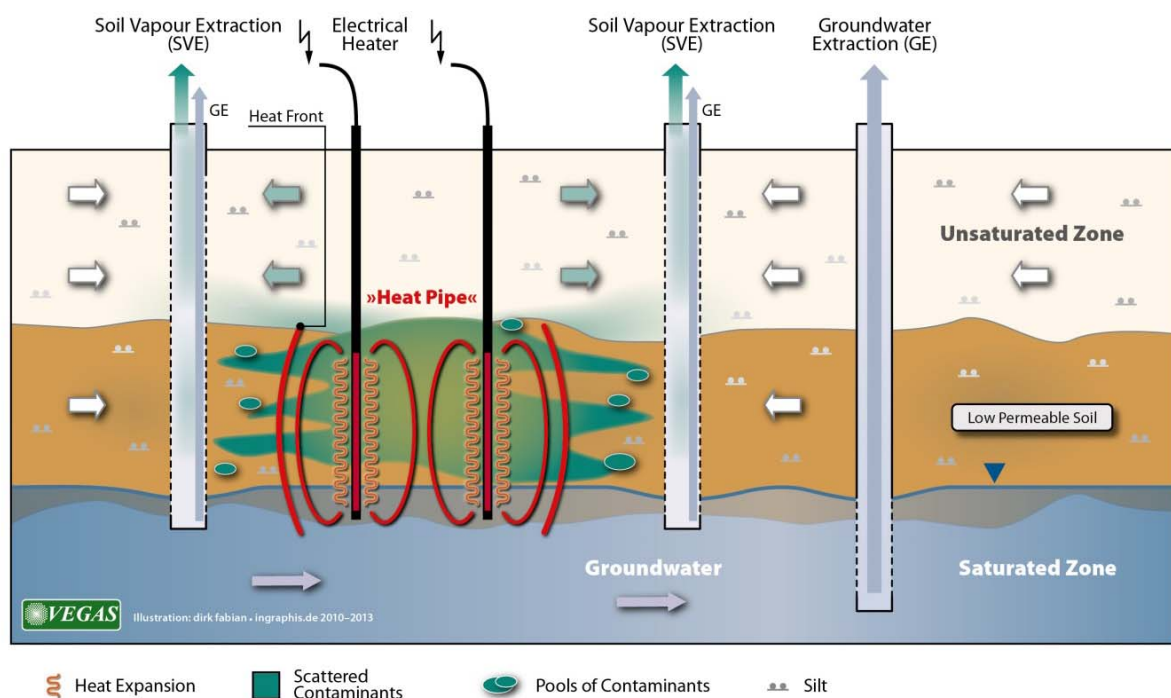


Abb. 2: Schematische Darstellung der Anwendung Fester Wärmequellen

Durch die Abnahme der Wassersättigung erhöht sich auch 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 und auch schwerflüchtige Schadstoffe verdampft werden [3]. 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 eine Vielzahl an Heizelementen 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 250 °C) in der ungesättigten (und gesättigten) Zone eingesetzt werden. Der Einsatz kann insbesondere auch unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung erfolgen [4] siehe auch Beitrag U. Hiester in diesem Heft [15]. Details können u.a. auch aus dem TASK-Leitfaden [11] entnommen werden.

Durch Kombination der Dampf-Luft-Injektion mit Festen Wärmequellen können gezielt geringleitende Schichten größerer Mächtigkeit über Wärmeleitung auf die Gemisch-Siedetemperatur aufgeheizt und die Schadstoffe verdampft und somit auch schlecht durchlässige Schichten thermisch saniert werden.

3. 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 (Tabelle 1), um das Know-how an die Sanierungspraxis weiterzugeben. In einigen Fällen dienten die Ergebnisse einer Pilotierung der nachfolgenden Auslegung bis hin zur Ausschreibung und Auftragsvergabe an Sanierungsfirmen und der späteren wissenschaftlichen / technischen Begleitung einer Sanierung.

Tabelle 1: Feldanwendungen im Rahmen des Technologietransfers seit 1998

Jahr	Standort	Geologie/Hydrogeologie	Schadstoff	Beschreibung / Besonderheiten
1998 Pilot	Plauen ehem. Benzol-Verladestation, Industriebrache	(UZ), sandiger Schluff, -2,5 bis -4,5 m über kiesig/sandigem GWL	BTEX	EU-Projekt mit Sanierungsfirma, erste erfolgreiche Anwendung und Nachweis der Effektivität und Wirtschaftlichkeit
1998 – 2000 Pilot	Mühlacker ehemalige Sondermülldeponie, Deponie heute gesichert	(UZ), verwitterte Ton-/Mergelsteine (Gipskeuper) getrennt durch Schichtwasserhorizont (15 m u. GOK, DRM-Aquifer bei 30 m u. GOK)	CKW	Modellvorhaben LfU Baden-Württemberg, Sanierungskonzept erstellt, keine Umsetzung, Deponie gesichert, Abstrommonitoring
2003/2004 Pilot Feste Wärmequellen	Hamburg ehem. chem. Reinigung, innerstädtisch, dicht bebaut	(UZ), bei -4 bis -6,5 m bindige Sedimentschicht und Mergellage, GW bei -11 m, Sanierungsfläche ca. 80 m ²	CKW	drei Monaten Sanierungszielwert unterschritten, Einsatzfähigkeit nachgewiesen, Sanierungszeit „kalten“ BLA um eine Größenordnung, geringer
2004 Sanierung	Albstadt ehemaliger metallverarb. Betrieb, innerstädtisch	(UZ / GZ): schluffig/tonig (-3,8 m), durchlässiger Kalkstein (-5,6 m) ü. Mergelgestein	CKW	Schadensherd unter Gebäude, Sanierung unter Bodenplatte, laufender Betrieb (Druckerei), erfolgreiche Sanierung
2005 Pilot 2010/11 Sanierung	Karlsruhe-Durlach ehem. chem. Reinigung, hist. Altstadt	(GZ, vados, UZ) schluffig, sandiger Kies mit Schlufflagen (bis -9 m)	CKW (PCE)	Sanierung unter bewohntem Gebäude. Gesamtsanierung abgeschlossen, Konz. im GW heute n.n.

Jahr	Standort	Geologie/Hydrogeologie	Schadstoff	Beschreibung / Besonderheiten
2008 Pilot	Zeitz ehemaliges Hydrierwerk & Verladestation, Industriebrache	(GZ, vadose, UZ), kiesig/ sandig, Schlufflage, sandig/kiesig (-12 m) über Kohlekomplex	Benzol	Pilot. erfolgreich, Sanierungskonzept erstellt, keine Umsetzung / Auskoffnung im Zuge großräumiger Bebauung
2009 Pilot 2012- 2016, DLI, 2016-2018 Abkühl., BLA	Biswurm, VS ehemalige Verbrennungsanlage, Brachfläche	(GZ, vadose, UZ), geklüfteter Sandsteinaquifer, 3 - 18 m u. GOK (Tonstein bis -21 m u. GOK)	CKW	Erfolg. Pilotierung Basis für Sanierungsplanung, Sanierung mit „Überraschungen“ und „lessons learned“, derzeit Nachsorge / Überwachung
2010 / 2013 Fesib./Pilot, 2018 Sanierung laufend	Oberursel ehemaliger Chemikalienhandel, hist. Altstadt	(UZ, vadose), schlecht durchlässiger Untergrund, Ton-schichten, (10^{-6} – 10^{-5} m/s)	CKW	Altstadt unter Gebäude Feasibility, Pilotierung (Fj. 2013 bis Sept. 2013, derzeit Sanierung, starkes, öffentliches Interesse durch NGO
2013 2015 2016 Pilot/San.	Sindelfingen ehemaliges Chemielager unter Parkhaus	(UZ und GZ) tonige schluffig mit Torfanteil 2 – 16 m u. GOK	CKW	Feasibility / Pilotierung, dann abschnittsweise Schadherdentfernung, starke Setzungen aber ohne Einfluß auf Gebäude
2012 – 2013 Pilot 2014 Sanierung	Stuttgart ehemaliger metallverab. Betrieb, innerstädtisch	(UZ und GZ), tonig-dichter Keuper und DRM, unterliegend Gipskeuper-Aquifer 2 - 8 m u. GOK <i>siehe u.a. [16] „youtube“</i>	CKW	EU-Projekt CityChlor „Stuttgarter Str.“ Pilot, Feste Wärmequellen, wiss. Begleitung abgeschlossen 07.2013, Basis für Sanierung 12/13 – 05/2014 (ohne VEGAS)
2012 Feasibility 2015 – 2016 Sanierung	Bad Liebenzell ehemaliger metallverarb. Betrieb, Fotoapp. Campingplatz,	(UZ, GZ) teilweise u. Gebäude, quart. Talablagerungen, kiesig, sandig, schluffig, hoher GW-Stand 1 - 10 m u. GOK	CKW	Feasibility / Sanierungsvorschlag, wirtschaftlichere Alternative zur Großbohrlochverfahren Sanierung abgeschlossen, derzeit Nachsorgemonitoring

Allen Projekten gemein war, dass von Projekt zu Projekt der „Schwierigkeitsgrad“ zunahm bzw. die Anwendung bzw. die Einsatzbereiche anders als bei den anderen Projekten waren. Ziel war dabei die Anwendungsmöglichkeiten auszuloten und soweit möglich zu erweitern bzw. die Anwendungsgrenzen aufzuzeigen. So wurden und werden auch immer wieder Machbarkeitsstudien erstellt, teilweise mit begleitenden Laboruntersuchungen (z.B. Torfproblematik), die zum Teil auch zu dem Ergebnis kamen, dass der Einsatz von TIS nicht möglich oder sinnvoll ist. Diese, sowie einige derzeit sich in der Bearbeitung befindliche Projekte sind in Tabelle 1 nicht mit aufgenommen.

In den letzten Jahren wurde von der Firma *reconsite*, einer ehem. Ausgründung von VEGAS, einige Projekte mit Festen Wärmequellen durchgeführt und deren Anwendungen stetig weiterentwickelt und verbessert. Einige Fallbeispiele sind im Leitfaden [11] dokumentiert und wurden z.B. in [10, 15] vorgestellt.

4. Fallbeispiele

4.1 Ehemalige chemische Reinigung – innenstädtisch, Karlsruhe-Durlach

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 wurde basierend auf Bodenproben (850 – 3.800 mg CKW je kg Boden) auf 5 m u. GOK eingegrenzt. Das denkmalgeschützte Gebäude wird im Erdgeschoss als Atelier genutzt, die oberen Stockwerke sind bewohnt (Abb. 3).

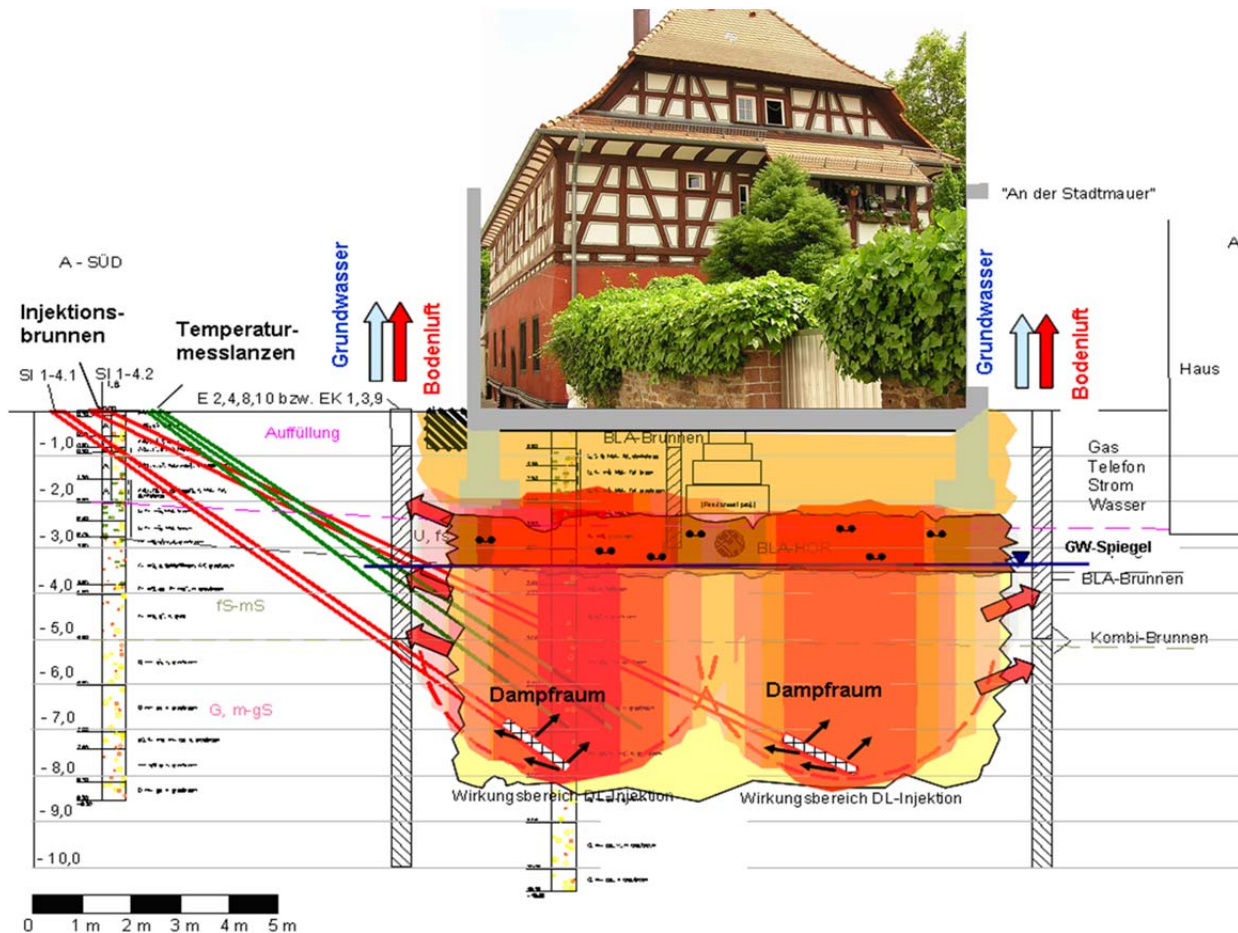


Abb. 3: CKW-Sanierung unter dem historischen, bewohnten Gebäude einer ehemaligen chemischen Reinigung in Karlsruhe-Durlach

Im Rahmen eines im Jahr 2005 von VEGAS durchgeführten dreimonatigen Pilotversuchs (AG: Stadt Karlsruhe, Ing.-Büro: dplan) zur Bestimmung der thermischen Reichweite der Dampfausbreitung in der gesättigten Zone konnten ca. 450 kg PCE (erwartet wurden ca. 80 kg) 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 darauf aufbauende Sanierungsplanung des Gesamtstandortes eine Aufteilung der Gesamtfläche in vier sequentiell zu behandelnde Abschnitte mit je zwei Injektionsbrunnen vor.

Nach öffentlicher Ausschreibung und Vergabe (Züblin Umwelttechnik) wurde 2010 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. Nach Erreichen der gefor-

derten 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 u.a. in [2].

4.2 Ehemalige Benzolanlage - altes Industriegelände Zeitz

Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II des UFZ (Umweltforschungszentrum Halle-Leipzig), 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 [11]. Das Sanierungsfeld wurde thermisch über drei Injektionsbrunnen mit zwei Injektionstiefen (gesättigte und ungesättigte Zone), sowie sechs ringförmig am Rand des Pilotfeldes angeordneten, voll verfilterten Extraktionsbrunnen erschlossen (Abb. 4).



Abb. 4: Sanierungsfeld in Zeitz mit Injektions- und Extraktionsbrunnen und den technischen Anlagen 3 x 20“-Container (MOSAM) 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 zehnmonatigen Anwendung auf 1.700 kg Benzol bestimmt. Bereits während der ersten Phase mit „kalter“ Bodenluftabsaugung und Air-Sparging konnten bereits 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 [11]. Hierbei konnte die Effektivität des „steam-overrides“ zur Erwärmung der Schlufflage dargelegt 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 thermi-

schen 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. Trotzdem wurde am Standort keine Gesamtsanierung mit TIS durchgeführt, da der spätere Investor im Rahmen der Bebauung sich u.a. für Bodenaustauschverfahren entschied.

4.3 Ehemalige Verbrennungsanlage Biswurm – CKW im Kluftgestein

4.3.1 Ausgangssituation

Auf dem Gelände des ehemaligen städtischen Verbrennungsplatzes in Villingen-Schwenningen (Biswurm) versickerten in den Jahren 1960 bis 1974 aus Lagerbecken Schadstoffe (vorwiegend CKW, BTEX) in das darunterliegende Kluftgestein und die Grundwasserleiter. Die Becken wurden zur Buntmetallrückgewinnung durch Verbrennung von Kabeln mit Lacken, Produktionsrückständen aus der Metallverarbeitung, Inhalten von Öl- und Benzinabscheidern und verbrauchten Lösemitteln 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 Verwitterungshorizont 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 wurden in das Festgestein Schlitze gefräst und Drainageleitungen verlegt. Insgesamt neun Sanierungs- und Überwachungsbrunnen wurden errichtet und Bodenluft mit ca. 200 m³/h sowie Grundwasser mit 10 m³/h gefördert.

Unterhalb des Aushubs lag der Schadensherd in der ungesättigten Bodenzone bis 12 m u. GOK und dem darunterliegenden 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 Kluftgrundwasserleitern prognostiziert. Die CKW-Konzentration im Grundwasser reichte von 3 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.

4.3.2 Pilotierung als Grundlage der Sanierung

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 Durchmesser) des Standorts durch [8, 10-12]. Hierbei wurde das DLI-Verfahren erstmalig im Kluftgestein eingesetzt. Die Heizperiode der Dampf-Luft-Injektion dauerte 19 Wochen. Das Testfeld umfasste insgesamt 2.000 m³ Kluftgestein und erstreckte sich auf die ungesättigte Zone und den oberen Kluft-

grundwasserleiter 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 Klüfte 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.

4.3.3 Sanierung

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 Kluftaquifer für den Standort (ca. 2.800 m², 15 m Mächtigkeit) geplant, ausgelegt und letztendlich nach öffentlicher Ausschreibung 2012 vergeben (AN: Bauer Umwelt GmbH, GEOsens).

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 (Dampfinjektionsleistung mit ca. 400 kW Wärmeleistung) wurde auf 33 Monaten berechnet. Insgesamt wurden 31 zweistufige Injektionsbrunnen und 34 Bodenluftabsaugbrunnen vorgesehen. Zur Erwärmung der einzelnen Feldabschnitte (Sanierungsabschnitte) wurde das Dampf-Luft-Gemisch abschnittsweise über die vier bis fünf Injektionsbrunnen mit einer Gesamtleistung von 300 - 500 kW injiziert.

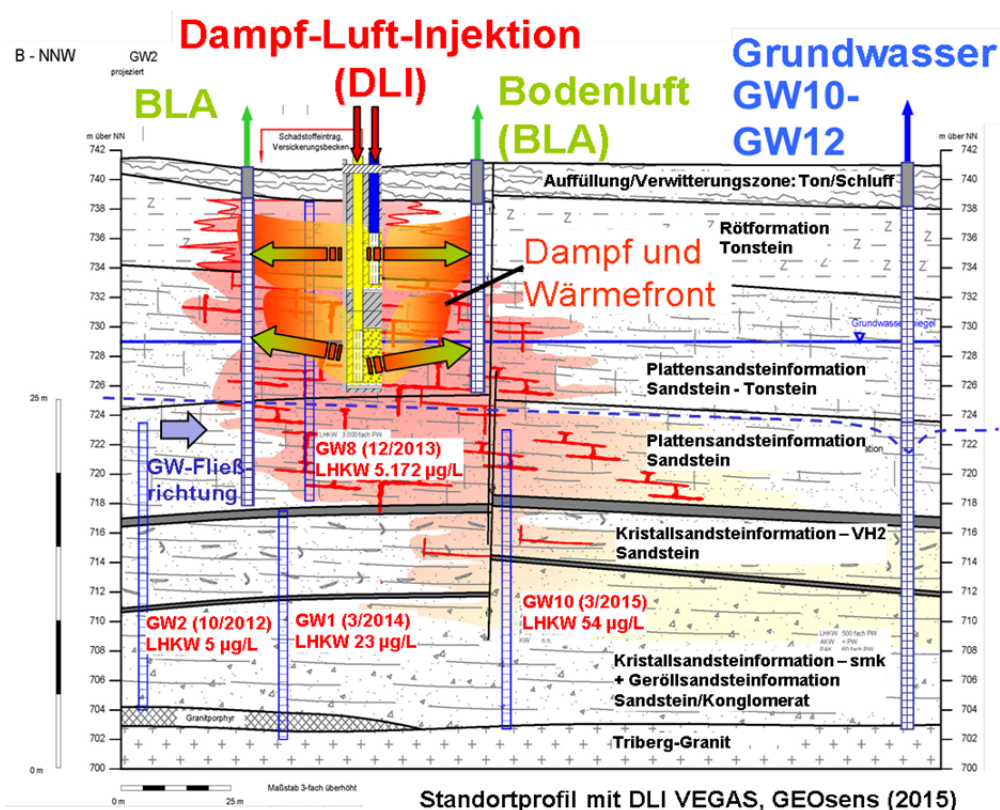


Abb. 5: Sanierungskonzept Kluftgestein Standort Biswurm

Bei der Sanierung wurden ca. 40.000 m³ Tonstein- und Kluftsandstein innerhalb eines vierjährigen Einsatzes behandelt d.h. dekontaminiert. Die Dampf-Luft-Injektion begann im August 2012 und wurde im August 2016, nachdem alle Sanierungsfelder sukzessive aufgeheizt und der Schadstoffaustrag unter 100 g/d zurückging und der mittlere Schadstoffgehalt in der Bodenluft unter 10 mg/m³ lag, beendet.

In der sich anschließenden 6-monatigen Abkühlphase wurden ein Teil der BLA und die Grundwassersicherung weiter betrieben. Die DLI-Sanierungsanlage wurde im April 2017 abgebaut, da das Sanierungsziel einer Emission über das Grundwasser von max. 20 g/d LCKW mit 6 g/d LCKW erreicht wurde. Allerdings erfolgte die Abkühlung des Untergrundes langsamer als erwartet, so dass in Abstimmung mit den Behörden, vom Sanierungspflichtigen mit dem Ingenieurbüro GEOsens und VEGAS ein gezieltes Überwachungsprogramm umgesetzt wird. Zur Beurteilung der verbleibenden Immission wurde Ende März 2018 ein „Reboundtest“ mit Abschalten der BLA über 14 Tage und ein weiterer Test Ende April 2018 mit Abschalten der BLA und der Grundwasserförderung für 9 Tage durchgeführt. Die Auswertung beider Tests ergab, dass sich derzeit noch eine tägliche Immission ins Grundwasser im Bereich von einigen g/d vorhanden ist. Daher wird eine reduzierte BLA weiter betrieben und das Überwachungsprogramm und die Grundwassersicherung ebenfalls weiter geführt.

Das in Deutschland bisher einmalige Projekt stellte an alle Beteiligten hohe Anforderungen und hat bisher auch sehr viele Erfahrungen und neue Erkenntnisse gebracht („Lessons learned“) über die an verschiedenen Stellen schon berichtet wurde und noch berichtet werden wird. Auch wenn die abschließende Bewertung durch die Bewertungskommission des Landes Baden-Württemberg noch aussteht, hat sich gezeigt, dass die Sanierung des Kluftgesteins am Standort Biswurm durch DLI möglich ist [8, 9, 11-14].

4.4 Ehemaliges „Fotoapparatewerk“ - Sanierung eines CKW-kontaminierten Standort mit hohem Grundwasserstand im Nagoldtal

Das ehemalige „Fotoapparatewerk“ in Bad Liebenzell im Nagoldtal (Firmengründung 1936), war bis Anfang der 80ziger Jahre einer der erfolgreichsten Kamerahersteller in Deutschland. Nach dem Konkurs der Firma verblieb der heutige Altstandort, direkt an der Bundesstraße und angrenzend an einen Campingplatz, der sich bis zur nahegelegene Nagold erstreckt (Abb. 6). Am Standort lagen, teilweise unter den Sozialgebäuden des Campingplatzes, Untergrundverunreinigungen der ungesättigten und gesättigten Zone durch leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) vor. Ab Mai 2004 erfolgte eine hydraulische / pneumatische „Sanierung“ (Pump & Treat und BLA), ohne das Sanierungsziel zu erreichen.

Auch nach 8 Jahren stagnierten die Schadstoffkonzentrationen auf sehr hohem Niveau, so dass das Regierungspräsidium Karlsruhe 2012 die Stadt Bad Liebenzell als Sanierungspflichtigen aufforderte alternativer Sanierungsverfahren prüfen zu lassen. Neben klassischem Aushub wurden Großlochbohrungen sowie das DLI-Verfahren geprüft. Primär aus wirtschaftlichen und technischen Gründen fiel die Entscheidung auf das DLI-Verfahren. Anfang 2014 erfolgte durch VEGAS und CDM Smith Consult GmbH die Sanierungsplanung für die am Standort vorliegenden Durchlässigkeiten, die Schadstoffverteilung und der prognostizierten Schadstoffmasse. Die Schadensfläche umfasste zwei Bereiche mit insgesamt 700 m² Fläche und einer Kubatur von 4.800 m³ Boden. Nach öffentlicher Ausschreibung im Sommer 2014 wurde im Auftrag der Stadt Bad Liebenzell unter Begleitung von VEGAS und CDM Smith im Herbst 2014 mit der Durchführung begonnen (AN: Bauer Umwelt GmbH). Die Sanierung wurde durch den Altlastenfonds Baden-Württemberg bezuschusst.

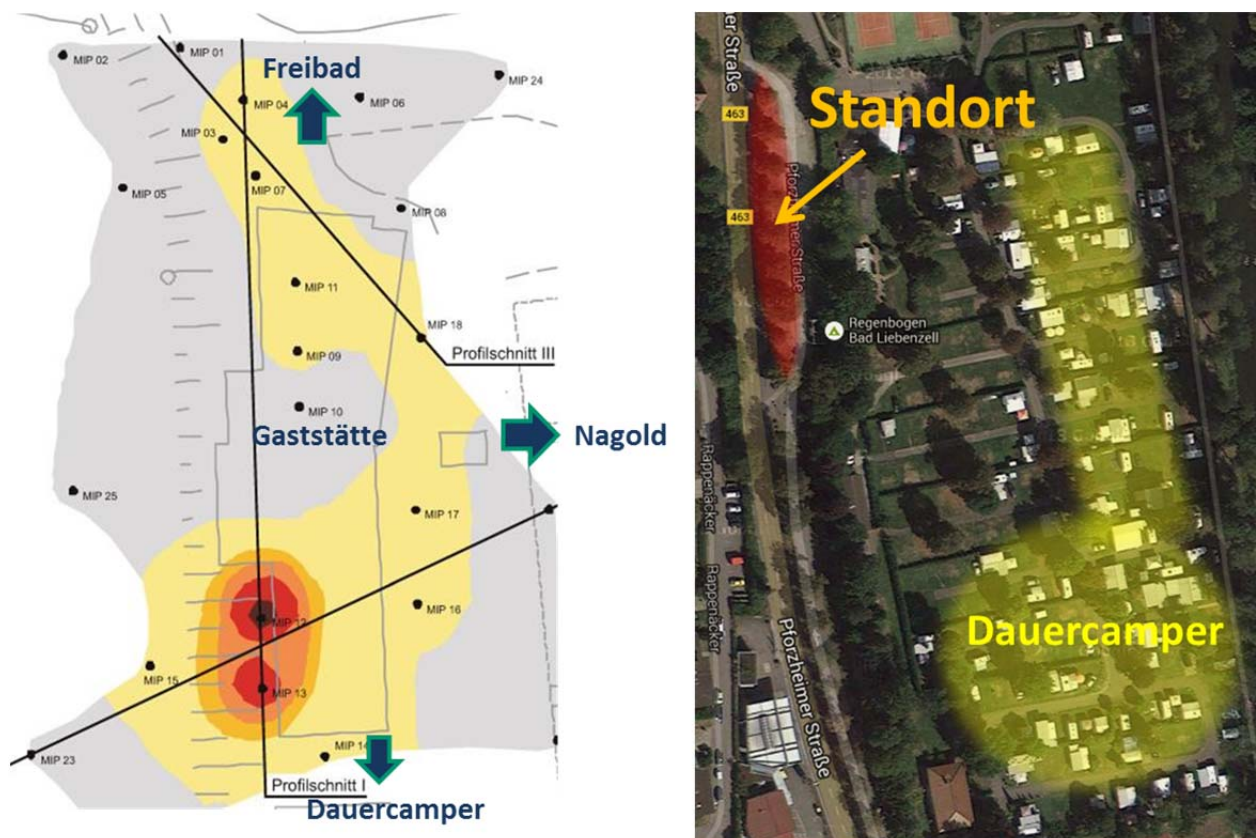


Abb. 6: Situation am Standort Campingplatz im Nagoldtal im Schwarzwald

Nach Abschluss aller Installationsarbeiten begann die Sanierung im April 07.04.2015 mit der Bodenluftabsaugung und Grundwasserförderung. Die DLI erfolgte vom 13.04.2015 bis 23.08.2016 (mit Unterbrechungen z.B. für den Wechsel der Sanierungsfelder), die Sanierung wurde am 23.09.2016 beendet.

Der anisotrope Bodenaufbau mit 1 – 4 m mächtigen Schlufflagen begründete eine relativ weitreichende horizontale Dampfausbreitung in der gesättigten Zone ca. 4 m bzw. 7 m u. GOK im Südfeld. Auf Basis der zur Verfügung gestandenen Standortdaten (gemittelte hydraulische Durchlässigkeit K_f des Aquifers 3×10^{-5} m/s (Südfeld) und 3×10^{-4} m/s (Nordfeld), ungesättigte Bodenzone Südfeld $K_f = 4 \times 10^{-5}$ m/s, Nordfeld bei 5×10^{-5} m/s) wurde eine horizontale Dampfausbreitung (Reichweiten) zwischen 2,8 – 4,6 m Radius berechnet. Entsprechend wurden die Abstände der Injektionsbrunnen auf maximal 7 m zur gesicherten, überlappenden Ausbreitung des Dampftraums gewählt. Die anstehenden schlechtdurchlässigen Schluffe wurden im Verlauf der Sanierung mit einem Dampf fortschritt in vertikaler Richtung advektiv und konduktiv erwärmt.

Die Sanierung erfolgte in sechs Sanierungsabschnitten, wobei vier Felder im sogenannten Südbereich und zwei Felder davon im räumlich etwas getrennten Nordbereich lagen. Bis Januar 2016 wurde der Südbereich mit ca. 680 kg LCKW-Austrag und nach Umbau auf den Nordbereich dieser ab April 2016 bis August 2016 mit 28 - 30 kg LCKW-Austrag, (deutlich weniger als erwartet), erfolgreich saniert.

Insgesamt wurden nach 507 Betriebstagen ca. 710 kg LCKW mittels DLI aus dem Untergrund entfernt. Über das Grundwasser wurden in Summe 5 kg LCKW entfernt, d.h. ca 0,7 % des Schadstoffaustrags. Rechnerisch müsste die während der DLI betriebene Grundwasserentnahme somit ca. 160 Jahre lang betrieben werden, um dieselbe Schadstoffmasse zu entfernen. An allen Kontrollbrunnen wurde die LCKW-Emissionen von $< 40 \mu\text{g/L}$ erreicht, d.h. deutlich kleiner als 4 g/d (Bagatellgrenze).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Nach über 20 Jahren Entwicklungsarbeit, Technologietransfer und Anwendungserfahrung stehen mit den thermischen In-situ-Sanierungsverfahren, TIsS Möglichkeiten zur Verfügung, Kontaminationsquellen im Boden und Grundwasser, hervorgerufen durch organische Schadstoffe, effektiv, kontrollier- und planbar und zuverlässig 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, raschen Reaktionszeiten bei Störungen 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 um kurzfristige Entscheidungen treffen zu können. Insgesamt kann aus heutiger Sicht folgendes Fazit - mit Schwerpunkt auf DLI - gezogen werden:

- Die Dimensionierung einer Dampf-Luft-Injektion entsprechend dem Stand der Technik im Rahmen der Sanierungsplanung ist möglich, ein gewisses „Defizit“ an Planern ist jedoch noch festzustellen.
- Ein Dimensionierungstool zur Auslegung einer DLI-Sanierung steht auf der Homepage von TASK kostenlos zur Verfügung und soll auf Basis der gemachten Erfahrungen und aktuell laufender Grundlagenuntersuchungen bei VEGAS zur Frage der Schadstoffdesorption erweitert werden.
- Eine vollständige, kontrollier- und nachweisbare Sanierung von Schadensherden innerhalb definierter und bestimmbarer Zeiträume ist möglich.
- Zur Kostensicherheit in der Vorplanung sollten bis zu 30 % Reserve angesetzt werden.
- Der Einsatz thermischer In-situ-Sanierungsverfahren erfordert 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 erfolgreich möglich.
- Durch zahlreiche Referenzprojekte ergeben sich immer neue Erkenntnisse und Erfahrungen („Lessons learned“).
- Entwicklung war / ist nur möglich durch viele Beteiligte und entsprechende Geldgeber.

Der erfolgreiche Einsatz von TIsS vorwiegend mit Festen Wärmequellen oder deren Kombination mit DLI wird in anderen Beiträgen in diesem Tagungsband aufgezeigt.

Mit Blick auf die Zukunft kann festgestellt werden, dass bei sorgfältiger und sachkundiger Anwendung mit TIsS auch zum Teil als „unsanierbar“ geltende Schadensherde beseitigt werden können. TIsS 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] 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>
- [3] Hiester, U. (2009): Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen: Promotionsschrift, Mitteilungsheft Nr. 178 des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2009. ISBN: 978-3-933761-82-8.
- [4] Hiester, U.; Bieber, L.: Dominierende Prozesse bei der thermischen In-situ-Sanierung (TISS) kontaminierter Geringleiter, Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2017) 22:185–195.
- [5] ITVA (2010): Arbeitshilfe H1-13: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. Berlin.
- [6] Koschitzky, H.-P. & O. Trötschler (2008): Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung. In Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. C.F. Müller Verlag, 5/2008, pp. 5716. ISBN: 978-3-8114-9700-9.
- [7] 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 Juli 2011, Neu-Ulm) altlastenforum Baden-Württemberg e. V., Stuttgart, 2011, S. 101-117.
- [8] 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, www.nicole.org.
- [9] Koschitzky, H.-P.; Trötschler, O.: Erfahrungen und Lehren aus fast 20 Jahren thermischer In-situ-Sanierung - wo stehen wir heute? Altlastensymposium 2017, GAB, Nürnberg, 05.-06.07.2017, S.58-71, <http://www.altlasten-bayern.de/>
- [10] Müller, M.; Hiester, U.; Bieber, L.: Entfernung einer CKW-Quelle zum nachhaltigen Grundwasserschutz bei komplexen Randbedingungen, ITVA Altlastensymposium 2018, Mainz 08-09-03.2018, S.91-100.
- [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.; Koschitzky, H.-P.; Lidola, B.; Kleeberg, I.; Schulze, S. (2015): Thermische In-situ-Sanierung im Kluftgestein: „Lessons learned“ von der Planung bis zur Sanierungsrealität am Standort „Biswurm“, DECHEMA Symposium Nov. 2015, Frankfurt

- [13] 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). Proceedings AquaConSoil 2015 Kopenhagen, ThS 1C.27 Thermal remediation. Page 375 -384
http://www.aquaconsoil.org/assets/aquaconsoil_proceedings_2015.pdf
- [14] Trötschler, O.; Koschitzky, H.-P.; Lidola, B.; Kleeberg, I.; Schulze, S. (2017): Thermische In-situ-Sanierung in geklüftetem Festgestein mittels Dampf-Luft-Injektion - Auslegung, Anwendung, Erfahrungen und Empfehlungen, In Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. C.F. Müller Verlag, 5/2017 pp. 5718. ISBN: 978-3-8114-9700-9.
- [15] Hiester, U.: Thermische Sanierung unter Gebäuden – energiesparend zur wirtschaftlichen Grundwassersanierung, Tagungsunterlagen, 18. Karlsruher Altlastenseminar, 27.06.2018.
- [16] CityClor: In situ thermal remediation in Stuttgart - pilot test, (Link, 01.06.2018;
<https://www.youtube.com/watch?v=zH8JDlEY0eo>)