

Erfahrungen und Lehren aus fast 20 Jahren thermischer In-situ-Sanierung - wo stehen wir heute?

Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart,
www.vegas-uni-stuttgart.de, 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 (TisS) besitzen ein hohes Potential, effizient und umfassend Herde von organischen Schadstoffen – insbesondere auch bei vorhandener Bebauung - zu beseitigen. Oft spielt bei derartigen Sanierungen auch die zeitliche „Planbarkeit“ und die Vorhersage des Sanierungserfolgs eine wichtige Rolle. Auch bieten TisS im Bereich der zeitlichen Vorhersage einer In-situ-Sanierung deutliche Vorteile zu anderen Technologien und liefern somit einen wichtigen Beitrag bei der Revitalisierung von Industriebrachen, zur Stadtentwicklung und zur Wiedernutzbarmachung von Brachflächen und können somit auch zum Erreichen des 30 ha Ziels beitragen.

Eine In-situ-Sanierung, insbesondere im innerstädtischen Bereich, muss oft innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens zum Sanierungserfolg führen. Insbesondere durch den vergleichbar geringen Zeitbedarf im Vergleich zu klassischen, langlaufenden Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen (kalte Bodenluftabsaugung oder auch Pump&Treat) werden der Zeit und Kostenrahmen kalkulierbar.

Im nachfolgenden Beitrag werden Möglichkeiten zur Beseitigung von Schadensherden aus dem Boden und Grundwasser – in der Regel simultan - durch den Einsatz von TisS vorgestellt. Seit mehr als 20 Jahren werden bei VEGAS an der Universität Stuttgart derartige Verfahren erforscht, mitentwickelt und optimiert und erfolgreich Technologietransfer betrieben wobei der Schwerpunkt auf der Dampf-Luft-Injektion, DLI, liegt. Ihre Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen (Operating Windows) werden und wurden 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, 5, 6, 9, 12]. 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. Über Beispiele hierfür wurde auf dem letzten GAB-Symposium 2016 berichtet [4].

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 [9]).

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 ins 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, 9].

Da sich bei einer alleinigen 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. eine entsprechende Grundwasserabstromsicherung und eine Phasenabschöpfung. Eine reine Dampfinjektion ist 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 unterhalb bzw. auf Höhe des Schadenszentrums injiziert. Die Schadstoffe werden infolge der sich um die Injektionsbrunnen im Idealfall radialsymmetrisch ausbreitenden Dampf- und Wärmefronten verdrängt bzw. verdampft. Die mit dem Dampf injizierte Luft trägt die Kontaminanten dann gasförmig in Richtung der ungesättigten Bodenzonen 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 (*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 sieden (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, 9, 12].

Wird diese erreicht, beginnen die Schadstoffe zu sieden, verdampfen und können über die Bodenluftabsaugung abgesaugt werden. Der auf die Zieltemperatur aufgeheizte Bodenbereich kann dann theoretisch als saniert angesehen werden. Wichtig ist, dass die Zieltemperatur solange aufrechterhalten werden muss, bis die Schadstoffe (Schadstoffinven-

tar) annähernd restlos verdampft und abgesaugt sind. In der Sanierungspraxis (Durlach, Zeitz, Biswurm, [2, 7, 8, 10, 12]) hat sich gezeigt, dass infolge von Kondensations-, Sorptions- und Diffusionseffekten die Gemisch-Siedetemperatur 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.

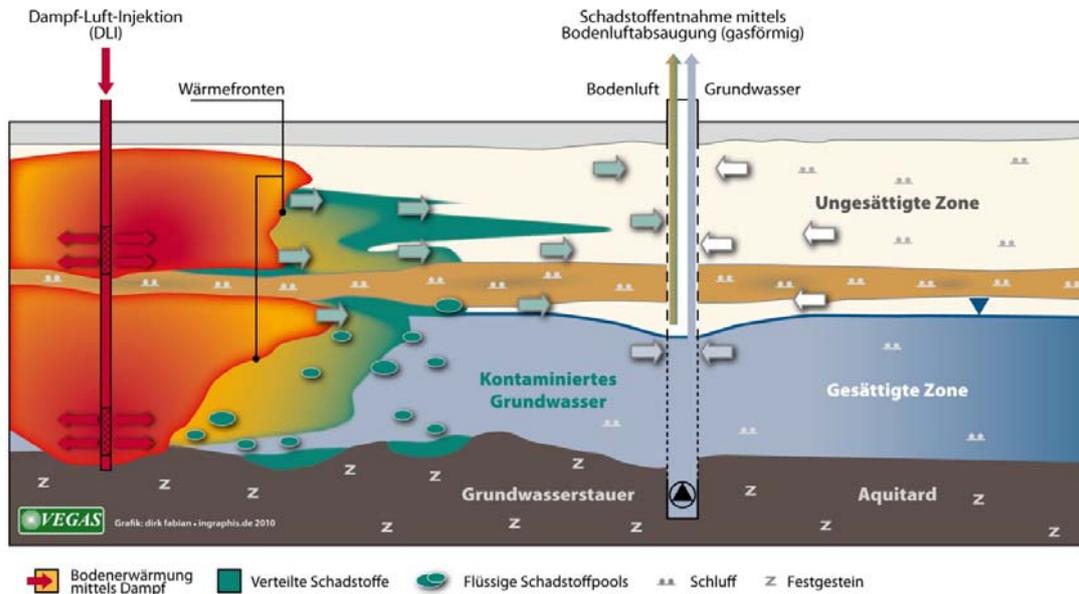


Abb. 1: Schematische Darstellung der Dampf-Luft-Injektion im Grundwasser und in der ungesättigten Bodenzone

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 mit saniert 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

sigen 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 zur Kontrolle der zu erreichenden Gemisch-Siedetemperatur erforderlich. Das Temperaturniveau muss solange aufrechterhalten 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. 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 [9] 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, 5, 9]. 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. Das Verfahren ist für die ungesättigte Bodenzone erprobt und wird vielfach 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 liegen uns jedoch keine eigenen Erfahrungen vor. Hierzu wird auf [4] 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. 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).

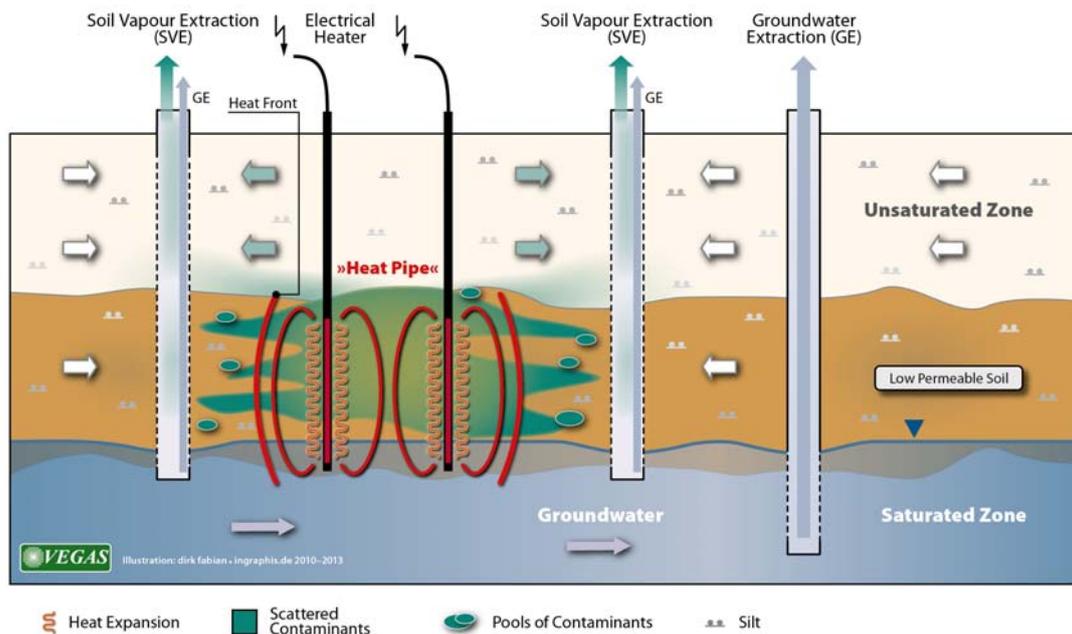


Abb. 2: Schematische Darstellung der Anwendung Fester Wärmequellen

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 wird 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]. Details können u.a. aus dem TASK-Leitfaden [9] 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.

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 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	(UZ), sandiger Schluff, -2,5 bis -4,5 m über kiesig/sandigem GWL	BTEX	EU Projekt mit Sanierungsfirma
1998 – 2000 Pilot	Mühlacker ehemalige Sondermülldeponie	(UZ), verwitterte Ton-/Mergelsteine (Gipskeuper) getrennt durch Schichtwasserhorizont (15m u. GOK, DRM-Aquifer bei 30 m u. GOK)	CKW	Modellvorhaben LfU Baden-Württemberg, Sanierungskonzept erstellt keine Umsetzung, Dep. gesichert
2004 Sanierung	Albstadt ehem. metallverarbeitender Betrieb	(UZ / GZ): schluffig/tonig (-3,8 m), durchlässiger Kalkstein (-5,6 m) ü. Mergelgestein	CKW	Schadensherd unter Gebäude, Sanierung durch Bodenplatte
2005 Pilot 2010/11 Sanierung	Karlsruhe-Durlach ehem. chem. Reinigung	(GZ, vadose, UZ) schluffig, sandiger Kies mit Schlufflagen (bis -9 m)	CKW (PCE)	Sanierung unter bewohntem Gebäude. Gesamtsanierung abgeschlossen, Konz. im GW heute n.n.
2008 Pilot	Zeitz ehem. Hydrierwerk & Verladestation	(GZ, vadose, UZ), kiesig/ sandig, Schlufflage, sandig/kiesig (-12 m) über Kohlekomplex	Benzol	Pilot. erfolgreich, Sanierungskonzept erstellt, keine Umsetzung / Auskoffnung
2009 Pilot 2012 DLI - 08.2016, akt. Abkühlphase	Biswurm ehemalige Verbrennungsanlage	(GZ, vadose, UZ), geklüfteter Sandsteinaquifer, 3 - 18 m u. GOK (Tonstein bis -21 m)	CKW	Erfolg. Pilotierung Basis für Sanierungsplanung, Sanierung → Überraschungen und „lessons learned“. Seit 08.2016 Abkühlphase
2010 / 2013 / 2018 San. laufend	Oberursel Ehemaliger Chemikalienhandel	(UZ, vadose), schlecht durchlässiger Untergrund, Tonschichten, (10^{-6} – 10^{-5} m/s)	CKW	Altstadt unter Gebäude Feasibility, Pilotierung (Fj. 2013 bis Sept. 2013, derzeit Sanierung)
2013 2015 2016 Pilot/San.	Sindelfingen unter Parkhaus Drainage ehem. Chemielager	(UZ und GZ) tonige schluffig mit Torfanteil 2 - 16 m u. GOK	CKW	Feasibility / Pilotierung , abschnittsweise Schadherdentfernung je nach vorh. Budget
2012 – 2013 Pilot 2014 Sanierung	Stuttgart EU-Projekt City-Chlor: „Stuttgarter Str.“	(UZ und GZ), tonig-dichter Keuper und DRM, unterliegend Gipskeuper Aquifer 2 - 8 m u. GOK	CKW	Pilot, feste Wärmequellen, Wiss. Begleitung abgeschl. 07.2013, Sanierung 12/13 – 05/2014 (o. VEGAS)
2012 Feasibility 2015 – 2016 San.	Bad Liebezell Campingplatz im Nagoldtal, Schwarzwald	(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

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 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, eine Reihe von TisS mit festen Wärmequellen durchgeführt und Anwendungen stetig weiterentwickelt und verbessert. Einige Fallbeispiele sind im Leitfaden [9] dokumentiert und wurden in [4] 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).

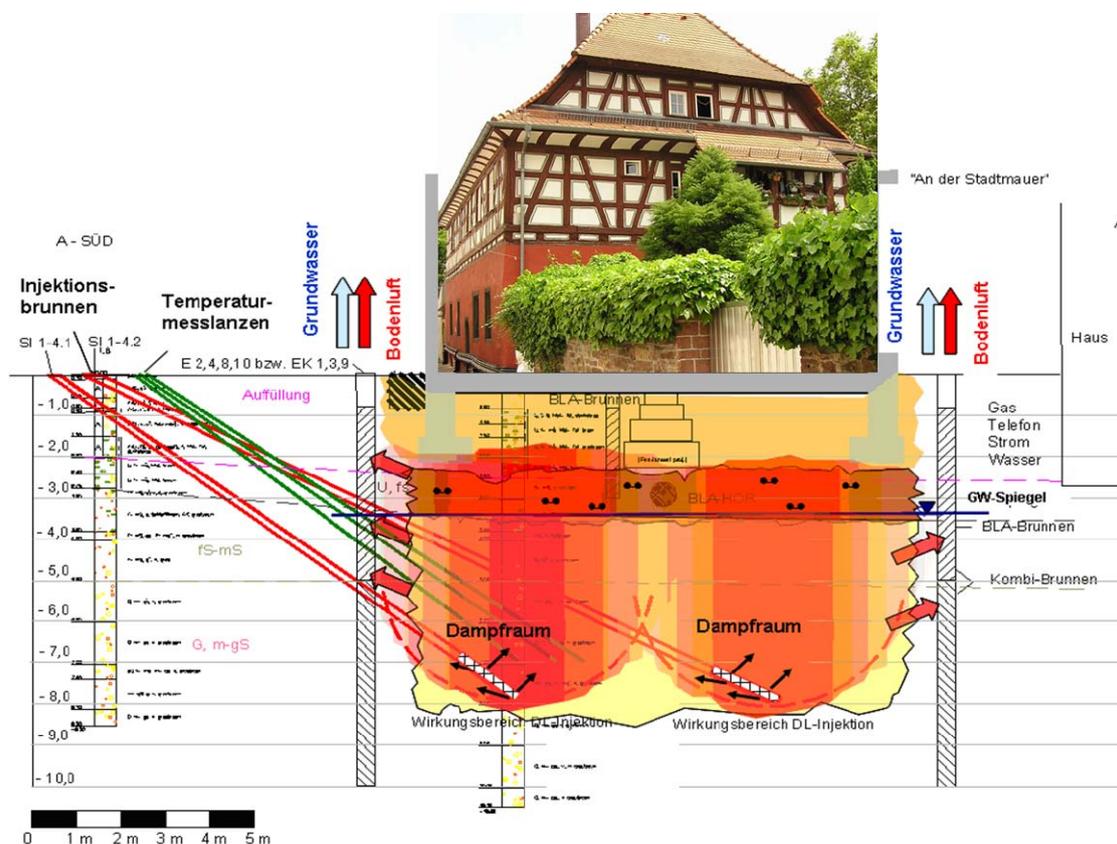


Abb. 3: CKW-Sanierung unter dem historischen, bewohnten Gebäude einer ehemaligen chemischen Reinigung in Karlsruhe-Durlach

Im Rahmen eines 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 Dampf-injektionsbrunnen, einem umlaufenden Ring von Bodenluft- und Grundwasserbrunnen und einer horizontalen Bodenluftdrainage unterhalb des Gebäudes erschlossen. Während der fünfmonatigen Dampf-injektion 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 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 in [2].

4.2 Ehemalige Benzolanlage - altes Industriegelände Zeitz

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 [9]. 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 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 [9]. 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 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.

4.3 Ehemalige Verbrennungsanlage Biswurm – CKW im Kluftgestein

4.3.1 Ausgangslage

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 gezielten Verbrennung von 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 9 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 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 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 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 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 Kluftgrundwasserleiter 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.

4.3.3 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 Kluftaquifer für den Standort (ca. 2.800 m², 15 m Mächtigkeit) geplant, ausgelegt und letztendlich nach öffentlicher Ausschreibung 2012 vergeben.

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 Feldabschnitte (Sanierungsabschnitte) wird das Dampf-Luft-Gemisch abschnittsweise über die vier bis fünf Injektionsbrunnen mit einer Gesamtleistung von 300 - 500 kW injiziert.

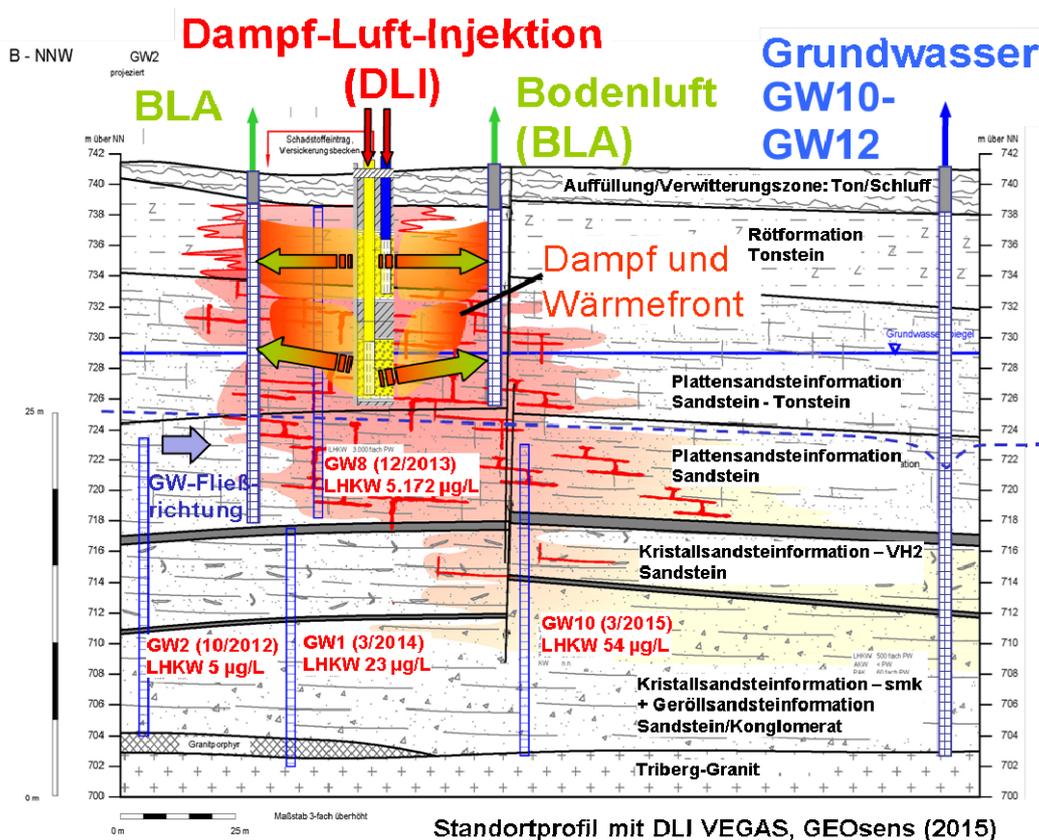


Abb. 5: Sanierungskonzept Kluftgestein Standort Biswurm

Bei der Sanierung sollten ca. 40.000 m³ Tonstein- und Kluftsandstein innerhalb eines vierjährigen Einsatzes behandelt d.h. dekontaminiert werden. 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. Nach einer vierwöchigen Abschaltung der BLA zur Bestimmung der Restgehalte in der ungesättigten Bodenzone bei einer mittleren Bodentemperatur von 40°C wurden in einigen Kontrollpegeln erhöhte Konzentrationen in der Bodenluft gemessen. Rückgerechnet ergibt sich eine maximale Emission in die Bodenluft von 50 g/d LCKW aus der warmen Sandsteinmatrix. Daher werden eine reduzierte BLA und die Grundwassersicherung im Rahmen des Monitoringprogramms vorläufig weiter betrieben. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass diese Ende 2017 eingestellt werden kann.

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. Es hat aber schon heute gezeigt, dass die Sanierung des Kluftgesteins am Standort Biswurm durch DLI möglich ist [8, 10 -12].

5 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 miteingebunden sein. Insgesamt kann aus heutiger Sicht folgendes Fazit gezogen werden:

- Die Dimensionierung einer Dampf-Luft-Injektion entsprechend dem Stand der Technik im Rahmen der Sanierungsplanung ist möglich, jedoch gibt es noch ein gewisses „Defizit“ an entsprechenden Planern.
- Ein Dimensionierungstool zur Auslegung einer DLI-Sanierung steht auf der Homepage von TASK kostenlos zur Verfügung und soll hinsichtlich der standortspezifischen Schadstoffdesorption erweitert werden.
- Eine vollständige und nachhaltige Sanierung von Schadensherden innerhalb definierter und bestimmbarer Zeiträumen 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.
- 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 001. 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.; Müller, M.: Thermische in-situ-Sanierung (THERIS) unter Gebäuden und Effekte auf die CKW-Belastung im Grundwasser. Altlastensymposium 2016 - GAB und altlastenforum BW, Neu-Ulm/Ulm, 22.-23.06.2016, S.110-118, <http://www.altlasten-bayern.de/>
- [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] 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
- [10] Trötschler, O.; Koschitzky, H.-P.; Lidola, B.; Kleeberg, I.; Schulze, S. (2015): Thermische In-situ-Sanierung im Kluffestgestein: „Lessons learned“ von der Planung bis zur Sanierungsrealität am Standort „Biswurm“, DECHEMA Symposium Nov. 2015, Frankfurt
- [11] 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
- [12] 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.