

## 544 Thermische In-situ-Verfahren

Im Gegensatz zu den *Ex-situ*-Verfahren verbleiben bei der *In-situ*-Sanierung der kontaminierte Boden und im Wesentlichen auch das belastete Grundwasser in ihren standortspezifischen Lagerungsverhältnissen. Ein Aushub von belastetem Bodenmaterial und ein Heben von belastetem Grundwasser sind somit nicht erforderlich. *In-situ*-Verfahren können sich daher auch für die Sanierung von Flächen eignen, bei denen die Zugänglichkeit der kontaminierten Bodenbereiche aufgrund vorhandener Gebäude, Anlagen, Ver- und Entsorgungsleitungen u. ä. stark eingeschränkt ist. Auch eine Überbauung des Sanierungsareals ist nach Errichtung der Sanierungsinfrastruktur prinzipiell möglich.

*In-situ*-Verfahren können sowohl zur Behandlung der ungesättigten als auch der gesättigten Bodenzone eingesetzt werden und basieren darauf, dass Stoffe ohne ein Bewegen des Bodens oder ein Heben des Grundwassers biologisch, physikalisch oder chemisch behandelt werden, um sie aus dem Boden oder dem Grundwasser zu entfernen, in unschädliche Stoffe umzuwandeln oder deren Ausbreitung zu verhindern.

Bei den thermischen Verfahren (ISTR, *In-situ Thermal Remediation*) wird, vereinfacht ausgedrückt, Wärmeenergie in den Untergrund eingetragen. Thermische *In-situ*-Verfahren sind den physikalischen Verfahren zuzuordnen. Durch den Eintrag von Wärmeenergie steigt der Dampfdruck der Schadstoffe und es sinkt die Oberflächenspannung, Viskosität und Dichte, so dass die leichtflüchtigen Schadstoffe bevorzugt in die Gasphase übergehen (verdampfen), aus der sie mit Hilfe einer Bodenluftabsaugung entfernt werden. Thermische *In-situ*-Verfahren sind vornehmlich für die ungesättigte Bodenzone geeignet. Zur Erhitzung des Bodens gibt es verschiedene Verfahren. Hauptsächlich angewendet werden feste Wärmequellen (Thermische Konduktion), das sogenannte Electrical Resistance Heating (ERH) und Dampf-Luft-Injektion. Beispiele bekannter Verfahren sind TUBA (Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung) und THERIS (Thermische In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen).

Feste Wärmequellen sind elektrisch oder mittels Heißluft betriebene, im ungesättigten und/oder gesättigten Boden im kurzen Abstand eingebaute Heizlanzen. Beim Einbau von Heizelementen in die gesättigte Bodenzone sind besondere Dichtungsmaßnahmen zum Schutz der elektrischen Konstruktionen gegen einen Wasserzutritt zu ergreifen. Diese Lanzen können sich auf 500 – 800 °C erhitzen, mit zunehmender Entfernung zu den Lanzen werden jedoch rasch deutlich geringere Temperaturen erzielt. Die Bodenschichten werden dabei konduktiv erwärmt. Da die Heterogenität des Untergrundes für eine konduktive gleichförmig Aufheizung von untergeordneter Rolle ist und die Wärmeleitung unterschiedlicher Boden- und Gesteinsarten nur mäßig variiert, sind feste Wärmequellen vorzugsweise zur Sanierung mäßig bis gering durchlässiger Bodenschichten geeignet.

Bei dem (3-Phasen- oder 6-Phasen-) *Electrical Resistance Heating* (ERH) werden Stahl-Elektroden in den Boden eingebaut und eine elektrische Spannung angelegt. Durch den elektrischen Widerstand des Bodens entsteht die Hitzebildung, nicht durch die Elektroden selbst. Die Elektrizität sucht sich den Weg des geringsten Widerstandes. Dies ist oft auch der Bereich höchster Schadstoffbelastung. Wenn der Boden durch Verdampfung des Porenwassers ausgetrocknet ist, werden die Ströme in andere Bereiche umgelenkt. Sand hat eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Daher ist es schwieriger, in solchen Böden hohe Temperaturen aufrecht zu erhalten. Die Erhitzung erfolgt bis maximal zur Siedetemperatur des Porenwassers.

Die Erwärmung des Untergrundes kann auch über die Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches in die gesättigte und ungesättigte Bodenzone erfolgen. Die Ausbreitung der Gase erfolgt im Grundwasser in erster Linie ähnlich dem Airsparging. Das Grundwasser wird zum Teil verdrängt und das Gas strömt durch die Heterogenität des Untergrundes eingeschränkt radialsymmetrisch und, bedingt durch den Auftrieb, nach oben. Die laterale Reichweite der Gasströmung bzw. die thermische Reichweite ist somit begrenzt. Der Dampf kondensiert an der kalten Bodenmatrix und gibt seine Wärme (Verdampfungsenthalpie) solange an den Boden ab bis dieser Dampfatemperatur erreicht hat. Die Dampf-Luft-Injektion ist somit an eine hinreichende Durchlässigkeit des Untergrundes gebunden. Für einen hinreichenden Sanierungserfolg muss der erzeugte Dampfraum in der gesättigten Zone den gesamten Schadensherd vollständig erfassen. Um eine Kondensation der Schadstoffe an der Dampffront zu ver-

meiden, muss diese deutlich außerhalb des Schadensbereiches liegen. Die mit dem Dampf injizierte Luft dient als Trägergas und nimmt die gasförmigen Schadstoffe auf.

Sobald die Gemischtsiedetemperatur (azeotrope Temperatur) des Schadstoff-Wasser-Gemisches erreicht ist, gehen sie in die Gasform über. Damit verbunden ist eine erhebliche Volumenzunahme, die insbesondere bei bindigen Böden zur Ausbildung von Rissen und neuen Wegsamkeiten führt. Auf diese Weise können die gasförmigen Schadstoffe entweichen. Es ist jedoch messtechnisch zu überprüfen, dass die geschaffenen neuen Wegsamkeiten nicht zu einer unkontrollierten Verbreitung der gasförmigen Schadstoffe führen. Die bisher beschriebenen Prozesse alleine reichen meist jedoch nicht für einen Übergang der gasförmigen Schadstoffe in die ungesättigte Bodenzone aus. Daher ist es in der gesättigten Zone zunächst erforderlich, einen Dampfraum auszubilden. Damit dieser entstehen kann, muss der Grundwasserleiter erst auf die Siedetemperatur des Wassers erhitzt werden.

Mittels einer Bodenluftabsaugung werden die gasförmigen Schadstoffe aus der ungesättigten Bodenzone entnommen. Der Sanierungsbereich ist gegen einen unbeabsichtigten Schadstoffaustrag über das Grundwasser zu sichern.

Da die Sanierungsprozesse bei thermischen Verfahren sehr schnell ablaufen – die Gesamtsanierungsdauer liegt im Bereich weniger Monate – ist eine zeitnahe Überwachung der Maßnahme erforderlich. Je nach Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung und des Schadstoffaustrags kann eine tägliche Bewertung von Messwerten zur entsprechenden Anlagen- und Sanierungssteuerung erforderlich sein. Das analytische Monitoring des Sanierungserfolges sind übliche Leistungen (Probennahme, chemische Analytik).

Für das Grundwasser ist eine Überwachung des Rückgangs der Schadstoffkonzentrationen als Ergebnis der Quellensanierung über einen längeren Zeitraum erforderlich. Die Temperaturmessung während der Sanierung dient zur Bilanzierung des Wärmeverlustes durch das abströmende Grundwasser.

Auch das thermische Verfahren beinhaltet Benutzungstatbestände, die nach § 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) eine Erlaubnis oder Bewilligung erfordern.

## 544.1 Bau der Sanierungsinfrastruktur

### 544.1.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Alle im Untergrund verbauten Teile einschließlich der Ringverfüllung der Bohrungen müssen mit hitzebeständigen Materialien ausgeführt werden. Bereits vorhandene temperatursensible Bauteile im Untergrund (z.B. erdverlegte Leitungen) müssen separat geschützt werden.

Zu Injektion des Dampf/Luftgemisches werden Brunnen ähnlich den Airspargingbrunnen errichtet. Der Ausbau erfolgt meist in Rohstahl. Die Abdichtung des Ringraumes muss mit temperaturbeständigem Material erfolgen. Der Brunnenkopf ist fest mit der Zuleitung (Dampf/Luft) verbunden. Einen vergleichbaren Aufbau weisen auch die Bodenluftabsaugbrunnen auf.

Der Brunnen zur Aufnahme fester Wärmequellen besteht aus in Untergrund verbauten unverfilterten Stahlrohren, in die die Wärmelemente in die gewünschte Tiefe abgelassen werden können. Die einzelnen Rohrelemente müssen wasserdicht verschraubbar sein, so dass kein Wasser eindringen und die elektrischen Bauteile zerstören kann. Die Abdichtung des Ringraumes muss mit temperaturbeständigem Material erfolgen.

Die Zu- und Ableitungen zu den Brunnen müssen gegebenenfalls isoliert werden, insbesondere dann wenn eine Berührung durch Personen nicht ausgeschlossen werden kann. Wegen der zeitlich verhältnismäßig kurzen Sanierungsdauer werden die Leitungen in der Regel „fliegend“ verlegt.

Zur Überwachung und Steuerung der Sanierungsmaßnahmen dient im Wesentlichen die Temperaturentwicklung im aufgeheizten Boden. Dazu werden an ausgewählten Punkten Temperatursensoren in eigenständigen Sondierungen in unterschiedlichen Tiefen in den Untergrund eingebaut. Die Temperatursonden werden in der Regel

direkt in das Bohrloch eingebracht und mit unbelastetem Bohrgut überschüttet. Am Ende der Sanierung werden die elektrischen Leitungen gekappt und die Temperaturelemente verbleiben im Untergrund. Liegen temperatur-sensible Bauteile im Untergrund vor, die vor einer unzulässigen Erwärmung besonders zu schützen sind, sind diese mit Hilfe von Temperaturmesselementen separat zu überwachen. Auch nach Beendigung der Wärmezufuhr muss das Auskühlen mit Hilfe der Messelemente überwacht werden.

#### 544.1.2 Kostenermittlung

Die Gesamtkosten setzen sich aus der Einrichtung der Dampf-injektionsbrunnen, Brunnen zur Aufnahme der Wärmeelemente, Bodenluftabsaugbrunnen, Temperatursensoren und deren Positionierung, den Heizgeräten und ggf. erforderlicher Sickerbrunnen im Abstrom zusammen. Weitere Kosten entstehen durch die Entsorgung kontaminierten Bohrgutes.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 544).

##### weiterführende Leistungen:

LB 240	Brunnenbau
LB 520.1	Aktive hydraulische Maßnahmen, Entnahme von Grundwasser
LB 530	Behandlung von Grundwasser, Prozess- oder Sickerwasser
LB 510	Behandlung von Bodenluft
LB 340	Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge

#### 544.1.3 Literatur

Department of the Army - U.S. Army Corps of Engineers, (2009), Engineering and Design – In-situ Thermal Remediation (Manual) EM 1110-1-4015.

ITVA, (2010), Innovative In-situ-Verfahren, FA H1-13

U. Hiester, et al, (2012), Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser

#### 544.1.4 Information über Leistungsanbieter

### 544.2 Dampf-Luft-Injektion und Bodenluftabsaugung

#### 544.2.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Die erforderliche Verfahrenstechnik kann sehr umfangreich sein. Sofern freie Phase entsteht, sind spezielle Verfahren, z.B. Dual-Phase-Extraction zu deren Abschöpfung nötig.

Für das Verfahren der Dampf-(Luft)-Injektion wird ein Dampferzeuger benötigt. Zur Vermeidung von Kalkausfällungen wird das verwendete Trinkwasser zunächst in einem Ionentauscher deionisiert. Darüber hinaus sind ein Kompressor zur Erzeugung der Druckluft sowie eine Mischeinrichtung zur Einstellung des gewünschten Dampf-Luft-Verhältnisses erforderlich.

Die Abführung der verdampften Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung. Standortspezifisch können je nach Lage des Schadensherdes und der (hydro-)geologischen Situation Absaugbrunnen in unterschiedlichen

Tiefen erforderlich werden. Für die Behandlung der abgesaugten Bodenluft kommen im wesentlichen Standardverfahren zur Anwendung. Zusätzlich wird als erste Stufe ein Wärmetauscher eingebaut. Die freiwerdende Wärme kann zur Vorwärmung des Wassers zur Dampferzeugung verwendet werden. Bei der Abkühlung der abgesaugten Bodenluft können Schadstoffe als freie Produktphase und der Wasserdampf als Wasser auskondensieren. Beide werden abgetrennt, die Phase in einem Phasenabscheider gesammelt und das Wasser über Aktivkohle gereinigt. Die nun gekühlte und weitgehend getrocknete Luft sollte wieder etwas erwärmt werden, so dass bei einer Abkühlung in der nachfolgenden Luft-Aktivkohleabsorbereinheit kein Wasser auskondensiert, das die Sorptionsfähigkeit der Kohle vermindern würde. Neben der Aktivkohlefiltrierung kommen eine Nachverbrennung und katalytische Oxidation zur Schadstoffelimination in Frage. Auf der Wasserseite ist zu beachten, dass bei steigender Temperatur vermehrt Kalk ausfällt.

Da die abgesaugte Bodenluft Schadstoffe in Konzentrationen oberhalb der Unteren Explosionsgrenze (UEG) aufweisen kann, sind entsprechende Sicherheitsvorrichtungen vorzusehen wie UEG-Messung, Frischluftzufuhr und die Installation von Flammenschutzgittern.

Zusätzlich werden die wesentlichen Mess- und Steuergrößen der Bodenluftabsaugung (Unterdruck, Volumenstrom, relative Feuchte, Temperatur, Gase O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und Schadstoffgehalte) erfasst. Mit Hilfe von Unterdruckkontrollpegeln kann die Reichweite der Absaugung überprüft werden. Bei überbauten Sanierungsstandorten ist messtechnisch zu überwachen, ob die durch die Aufheizung des Bodens mobilisierten Schadstoffe über den Bodenluftpfad in die Innenräume der Gebäude eindringen können.

Die Anlage wird durch eine SPS (Systemprogrammierbare Steuerung) gesteuert, die in der Regel eine Auslesung der erfassten Daten sowie eine Fernsteuerung über Internet erlauben.

Eine hydraulische Abstomsicherung ist für den Einzelfall zu prüfen, auch wenn der Austrag über den Wasserpfad nur gering ist und nach Beginn der Heizphase die Schadstoffgehalte im Grundwasser nur kurzfristig ansteigen. Optional kann Abstomsicherung lediglich vorgehalten und nur dann in Betrieb genommen werden, wenn die Schadstoffkonzentrationen im Abstrom tatsächlich ansteigen. Unter Umständen kann ein *Pump-and-Treat* aber auch zur Wasserspiegelabsenkung und damit zur Schaffung eines entwässerten Bereiches im Grundwasserleiter genutzt werden, der dann mit geringerem Energieeinsatz erwärmbar ist.

#### 544.2.2 Kostenermittlung

Neben einem Dampferzeuger und einem Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemisches, Injektionspegeln und Bodenluftentnahmebrunnen mit Filteranlage entstehen Kosten durch den Verbrauch von Strom und Wasser sowie von Luft- und Wasseraktivkohle oder alternativ für den Luftpfad durch den Betrieb einer Nachverbrennung oder katalytischen Oxidation. Darüber hinaus kann ein Setzungsmonitoring und bei Gebäuden ein Rissmonitoring erforderlich werden. Zusätzliche Kosten entstehen durch die chemisch-analytische Überwachung der Anlage.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 544).

weiterführende Leistungen:

LB 110.2	Probenahme
LB 130	Chemisch-physikalische Analytik
LB 240	Brunnenbau
LB 510	Behandlung von Bodenluft, Deponiegas und Abluft
LB 810	Verwertung und Beseitigung von Aushub- und Abbruchmaterial

### 544.2.3 Literatur

Trötschler, O., Koschitzky, H.-P., (2012), Grundlagen der Dampf-Luft-Injektion.  
www.unfz.de/export/data/38/48831\_DLI-Tool-V1.2.10.zip (25.05.2013).

Hiester, U., Müller, M., Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Roland, U., Holzer, F., Edel, H.-G., (2012), Leitfaden Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. www.unfz.de/export/data/38/40405\_TASK\_Leitfaden\_TISS.pdf (25.05.2013).

ITVA, (2010), Innovative In-situ-Verfahren, FA H1-13

Department of the Army - U.S. Army Corps of Engineers, (2009), Engineering and Design – In-situ Thermal Remediation (Manual) EM 1110-1-4015.

### 544.2.4 Information über Leistungsanbieter

## 544.3 Steueranlage Feste Wärmequellen und Bodenluftabsaugung

### 544.3.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Die Anlagentechnik für die Sanierung mittels fester Wärmequellen ist vergleichsweise einfach. Die Erhitzung des Bodens wird über die Stromzufuhr zu den festen Wärmequellen gesteuert. Basis dafür ist die aktuell mittels des vorhandenen Temperatursensorfeldes gemessene Temperatur des Bodens.

Die Abführung der verdampften Schadstoffe erfolgt wie auch bei dem Dampf-Luft-Injektionsverfahren (Kapitel 544.2) über eine Bodenluftabsaugung. Bei heißluftbetriebenen Wärmeelementen kann die in einem Wärmetauscher entzogene Wärme wieder genutzt werden, bei festen Wärmequellen fällt sie als Abwärme an.

Auch bei den festen Wärmequellen sind die wesentlichen Mess- und Steuergrößen der Bodenluftabsaugung der Unterdruck, Volumenstrom, relative Feuchte, Temperatur sowie die Konzentration der Gase O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und der Schadstoffe. Mit Hilfe von Unterdruckkontrollpegeln kann die Reichweite der Absaugung überprüft werden. Bei überbauten Sanierungsstandorten ist messtechnisch zu überwachen, ob die durch die Aufheizung des Bodens mobilisierten Schadstoffe über den Bodenluftpfad in die Innenräume von Gebäuden eindringen.

### 544.3.2 Kostenermittlung

Neben den Kosten für die Installation fester Wärmequellen und der Bodenluftabsaugung mit Behandlung entstehen Kosten durch den Verbrauch von Strom sowie von Luft- und Wasseraktivkohle oder alternativ für den Luftpfad durch den Betrieb einer Nachverbrennung oder katalytischen Oxidation. Darüber hinaus kann ein Setzungsmonitoring und bei Gebäuden ein Rissmonitoring erforderlich werden. Zusätzliche Kosten entstehen durch die chemisch-analytische Überwachung der Anlage.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 544).

weiterführende Leistungen:

LB 110.2	Probenahme
LB 130	Chemisch-physikalische Analytik
LB 240	Brunnenbau
LB 510	Behandlung von Bodenluft, Deponiegas und Abluft

### 544.3.3 Literatur

Hiester, U., Müller, M., Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Roland, U., Holzer, F., Edel, H.-G., (2012), Leitfaden Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIsS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. [www.ufz.de/export/data/38/40405\\_TASK\\_Leitfaden\\_TISS.pdf](http://www.ufz.de/export/data/38/40405_TASK_Leitfaden_TISS.pdf) (25.05.2013).

Department of the Army - U.S. Army Corps of Engineers, (2009), Engineering and Design – In-situ Thermal Remediation (Manual) EM 1110-1-4015.

Held, T., (2014), In-situ-Verfahren zur Boden und Grundwassersanierung – Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.

ITVA, (2010), Innovative In-situ-Verfahren, FA H1-13