

Leitfaden

**Thermische in situ-Sanierungsverfahren (TISS)
zur Entfernung von Schadensherden
aus Boden und Grundwasser**



Gefördert von:

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ



Autorenteam

(1) Dr.-Ing. U. Hiester, Dipl.-Ing. M. Müller
reconsite GmbH
Auberlenstraße 13, 70736 Fellbach



(2) Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky, Dipl.-Ing. (FH) O. Trötschler
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und
Altlastensanierung (VEGAS), Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart



(3) Dr. rer. nat. habil. U. Roland, Dr.-Ing. F. Holzer
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig



unter Mitwirkung von:

Dr. rer. nat. H.-G. Edel
Züblin Umwelttechnik GmbH
Otto-Dürr-Straße 13, 70435 Stuttgart



Stand: August 2012

Inhalt

Vorwort	8
1 Einleitung, Verfahrensprinzip, Zielsetzung	10
2 Grundlagen	13
2.1 Wärmeeintrag	13
2.1.1 Konvektiver Wärmeeintrag: Dampf-(Luft-)Injektion (TUBA-Verfahren)	13
2.1.2 Konduktiver Wärmeeintrag: Feste Wärmequellen (THERIS-Verfahren).....	14
2.1.3 Dielektrischer Wärmeeintrag: Radiofrequenz(RF)-Energie	15
2.2 Einfluss wichtiger Prozesse und Standortbedingungen auf den Sanierungsbetrieb	16
2.2.1 Phasenübergänge (flüssig – gasförmig – flüssig)	16
2.2.2 Trocknungsverhalten, relative Permeabilität, Transportprozesse	19
2.2.3 Geologie, Hydrogeologie, Anisotropie, Setzungen.....	20
2.3 Stoffkennwerte und Stoffgrößen wichtiger Schadstoffgruppen	22
2.3.1 Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)	22
2.3.2 Aromatische Kohlenwasserstoffe, BTEX, Mineralölkohlenwasserstoffe	22
2.3.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	25
2.3.4 Sonstige Stoffe	25
3 Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen von thermischen <i>in situ</i>-Sanierungsverfahren	27
3.1 Übersicht bisheriger erfolgreicher Anwendungsbereiche	27
3.2 Prinzipielle anlagenspezifische und räumliche Bedingungen.....	28
3.2.1 System zur Untergrunderwärmung.....	28
3.2.2 Bodenluftabsaugung, Grundwasserhaltung, Abluft- und Wasserreinigung.....	29
3.2.3 Sanierungsbegleitende Messsysteme.....	29
3.3 Möglichkeiten und Grenzen von Dampf-(Luft-)Injektionen (TUBA-Verfahren).....	30
3.3.1 Ungesättigte Zone	30
3.3.2 Gesättigte Zone	31
3.3.3 Hinweise zur Dimensionierung	31
3.4 Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz fester Wärmequellen (THERIS-Verfahren)	34
3.4.1 Ungesättigte Zone	34
3.4.2 Gesättigte Zone	34
3.4.3 Hinweise zur Dimensionierung	35
3.5 Möglichkeiten und Grenzen der Radiofrequenz(RF)-Bodenerwärmung	36
3.5.1 Ungesättigte Zone	36
3.5.2 Gesättigte Zone	37
3.5.3 Hinweise zur Dimensionierung	39
3.6 Verfahrenskombinationen – Wann ist das sinnvoll?.....	39
3.6.1 Kombinierte Anwendung verschiedener TISS-Verfahren.....	39
3.6.2 Kombination TISS mit anderen Sanierungs- & Sicherungsmaßnahmen	40
3.7 Aktuelle Weiterentwicklungen der Sanierungsverfahren	41
3.7.1 Sanierung von Kluffgesteinen.....	41
3.7.2 Verbesserte Mehrphasenschöpfung.....	42
3.8 Rechtliche Aspekte, Genehmigungsfähigkeit	42
3.9 Ökologische und ökonomische Betrachtungen	43
3.9.1 Ökobilanzen, energetische Bewertung	43
3.9.2 Definition von Sanierungszielen bei TISS	46
3.9.3 Wirtschaftlichkeit von TISS.....	47
4 Zusammenfassung	48
5 Bildnachweise	50
6 Weiterführende Literatur / Literaturübersicht (Auswahl)	50

Anwendungsbeispiele

- Sanierung ehemalige Chemische Reinigung mittels Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Zone
- Pilotanwendung Dampf-Luft-Injektion an ehemaliger Benzolanlage (nach Bodenaushub) in der gesättigten und ungesättigten Zone
- Entfernung eines LHKW-Schadens in der UZ mittels fester Wärmequellen (THERIS-Verfahren)
- Tankstellensanierung mittels fester Wärmequellen (THERIS-Verfahren) in der gesättigten Zone und im Kapillarsaum
- Pilotanwendung RF-Verfahren am ehemaligen Hydrierwerk Zeitz (Sachsen) in der ungesättigten Zone
- Sanierung einer ehemaligen Tankstelle mittels RF-Verfahren in der ungesättigten Zone
- Kombinierte Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion und festen Wärmequellen (TUBA-THERIS-Kombination) des Schadensherds an einem Industriestandort in zwei Grundwasserstockwerken und dem Zwischenstauer

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1.1:	Schematische Darstellung einer Schadstoffausbreitung im Untergrund.....	10
Abbildung 1.2:	Anwendungsbereiche von Untergrunderwärmungen in der Altlastensanierung und Anwendungsbereich dieses Leitfadens (Prozesstemperaturen maßgeblich zwischen etwa 50°C und 100°C bei Atmosphärendruck)	12
Abbildung 2.1:	Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte und gesättigte Zone	13
Abbildung 2.2:	Prinzipskizze THERIS-Verfahren (Erwärmung mit festen Wärmequellen)	15
Abbildung 2.3:	Prinzip der RF-Bodenerwärmung	16
Abbildung 2.4:	Dampfdruckkurven von Wasser und Tetrachlorethen (PCE)	17
Abbildung 2.5:	Anzahl ausgeführter TIsS mit Setzungsmessungen, differenziert nach Sanierungen unter oder neben Gebäuden sowie auf Freiflächen.....	21
Abbildung 2.6:	Explosionsfähige Atmosphäre in einem Absaugpegel (schematisch).....	24
Abbildung 3.1:	Beispiel der Reichweitenabschätzung mit der Software „DLI-Tool“	32
Abbildung 3.2:	Dampf-Luft-Injektion am Demonstrationsstandort „Biswurm“. Links: Containeranlage, rechts: Brunnenfeld mit Dampf-Luft-Injektion, Bodenluftabsaugung (BLA) und Grundwassersicherung (GW)	32
Abbildung 3.3:	Standortspezifische THERIS-Pilotierung. Deutlich ist die laterale thermische Reichweite an der Oberfläche durch die Schmelze der 20 cm mächtigen Schneedecke zu erkennen (Projekt der HIM GmbH, Bereich Altlastensanierung).....	35
Abbildung 3.4:	Varianten der Elektrodenanordnung zur RF-unterstützten Bodenluftabsaugung an verschiedenen Standorten (rechts: Elektroden befinden sich unter den Abschirmgehäusen)	37
Abbildung 3.5:	Kopplung mehrerer Frequenzen für die homogene Erwärmung des Kapillarsaums	38
Abbildung 3.6:	Homogene Erwärmung des Grenzbereichs zwischen gesättigter und ungesättigter Bodenzone (in 1 und 3 m Tiefe, GW-Spiegel bei 2 m u.GOK, Bodenart: sandiger Boden, z.T. Auffüllmaterial).....	38
Abbildung 3.7:	Schematische Darstellung der Standortsituation mit Injektions- und Extraktionsbrunnen im Pilotfeld	42
Abbildung 3.8:	Projektbeispiel zum spezifischen Energieverbrauch bei einer THERIS-Sanierung.	44
Abbildung 3.9:	Ergänzend zu Abbildung 3.8 der Verlauf der LHKW-Belastung an allen BL-Pegeln.....	44
Abbildung 3.10:	Spezifische Energieverbräuche von Bodensanierungen (BLA und TIsS) in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung und der Bodenbeschaffenheit (Projektbeispiele aus Tabelle 8)	46

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1:	Siedetemperaturen und Gemischtsiedetemperaturen bei Normaldruck einiger Schadstoffe	18
Tabelle 2:	Physikalische Eigenschaften von ausgewählten LHKW	22
Tabelle 3:	Physikalische Eigenschaften von ausgewählten AKW.....	23
Tabelle 4:	UEG/OEG, Sättigungskonzentration und Zündtemperatur von ausgewählten AKW (BTEX).....	24
Tabelle 5:	Stoffgrößen PAK.....	25
Tabelle 6:	Auswahl sonstiger Stoffe für TIsS	26
Tabelle 7:	Dimensionierungsgrößen Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren).....	33
Tabelle 8:	(Betriebs-) Energieverbräuche ausgewählter Projekte.....	45
Tabelle 9:	Vornehmliche Anwendungsbereiche und Randbedingungen von TIsS	49

Abkürzungen

Häufige Abkürzungen

AKW	Aromatische Kohlenwasserstoffe
BL	Bodenluft(-Pegel)
BLA	Bodenluftabsaugung
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
CCl ₄	Tetrachlormethan
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
DCA, DCEa	Dichlorethan
DCB	Dichlorbenzol
DCE	Dichlorethen
DLI	Dampf-(Luft-) Injektion (TUBA-Verfahren)
DNAPL	Dense Non Aqueous Phase Liquid (Stoffdichte > 1000 kg/m ³)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GWM	Grundwassermessstelle
GZ	gesättigte Zone (Grundwasser oder Aquitard)
HF	Hochfrequenz
KatOx	Katalytische Oxidation
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
LHKW	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LNAPL	Light Non Aqueous Phase Liquid (Stoffdichte < 1000 kg/m ³)
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante
NAPL	Non Aqueous Phase Liquid
OEG	obere Explosionsgrenze
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCA, PCEa	Tetrachlorethan
PCE	Tetrachlorethen = Perchlorethen = Perchlorethylen = Per
PLF	power-line-frequency
RF	Radiofrequenz
TCA	Trichlorethan
TCE	Trichlorethen = Trichlorethylen = Tri
TISS	Thermische <i>in situ</i> -Sanierung(en)
TRbF	Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten
TUBA [®] -Verfahren	Thermische <i>in situ</i> -Sanierung mittels Dampf-(Luft-) Injektion (DLI)
THERIS [®] -Verfahren	Thermische <i>in situ</i> -Sanierung mit festen Wärmequellen
UEG	untere Explosionsgrenze
UZ	ungesättigte Zone
VAwS	(Landes-) Anlagenverordnung wassergefährdende Stoffe
VC	Vinylchlorid
VP	Vakuumpumpe
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Nomenklatur

Symbol	Bedeutung	Einheit
c_{gas}	Stoffkonzentration in der Luft	[g/m ³ bzw. Vol.%]
c_w	Wassergleichgewichtskonzentration	[µg/l]
i	Grundwassergradient	[-]
k_f	hydraulische Durchlässigkeit	[m/s]
p	(Luft) Partialdruck	[mbar]
p_d	Dampfdruck	[mbar]
v_f	Filtergeschwindigkeit	[m/d]
ρ	Dichte	[kg/m ³]

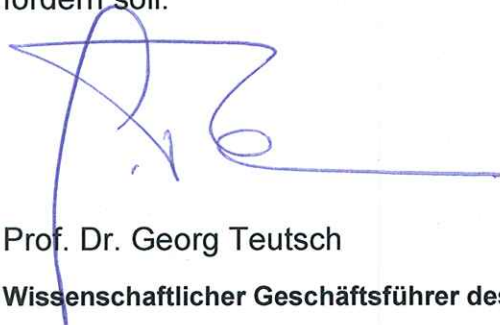
Vorwort

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert seit 1995 zahlreiche praxisorientierte Verbundvorhaben sowie Einzelprojekte im Bereich der Altlastenbearbeitung, des Boden- und Grundwasserschutzes und der nachhaltigen Flächenrevitalisierung. Trotz hoher Qualität, Praxiseignung und entsprechendem Innovationspotential können sich viele der entwickelten Methoden nicht am Markt durchsetzen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. So liegen oftmals Wissensdefizite bei potentiellen Anwendern vor, die innovative Produkte nicht ausreichend wahrnehmen.

Um diese Hürden zu überwinden, wurde im August 2007 das „Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum Leipzig“ (TASK) eingerichtet. Ziel des vom BMBF und vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ geförderten Projektes ist die Förderung und Verbreitung von Innovationen im Bereich Altlastenerkundung und -sanierung. Unterstützt durch ein Netzwerk der ingenieurtechnischen und behördlichen Praxis werden in TASK konkrete Maßnahmen entwickelt und umgesetzt, um den Technologie- und Wissenstransfer aus der Forschung in die Praxis zu verbessern.

Der vorliegende, von TASK geförderte Leitfaden „Thermische *in situ*-Sanierungsverfahren (TISS) für Schadensherden aus Boden und Grundwasser“ knüpft hieran an. Er dient der erfolgreichen Durchführung thermischer *in situ*-Sanierungen. Die einzelnen Planungs- und Umsetzungsschritte in den jeweiligen Projektphasen werden für Anwender, Auftraggeber und Behörden nachvollziehbar und praxisgerecht dargestellt. Darüber hinaus soll der Leitfaden helfen, bereits in einer frühen Planungsphase den zu erwartenden standortspezifischen Sanierungserfolg von TISS abschätzen und bewerten zu können. Zudem werden Möglichkeiten zur Kompensation von Erkundungs- und Prognoseunsicherheiten durch Anpassung des Gesamtdesigns aufgezeigt sowie Hinweise zur Überwachung des Sanierungsbetriebs und zur Bewertung der erreichten Sanierungserfolge gegeben.

Ziel des Autorenteam ist es, mit dem Leitfaden eine Arbeitshilfe zur Verfügung zu stellen, die die Anwendung dieses Verfahrens erleichtern und somit nachhaltig fördern soll.



Prof. Dr. Georg Teutsch

Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ

Danksagung

Für die fachliche Unterstützung, Anregungen und Hinweise möchten wir uns bedanken bei Prof. Thilo Hofmann, Universität Wien, Department für Umweltgeowissenschaften, Dr. Thomas Held, ARCADIS Deutschland GmbH, Michael Woisnitza, HIM GmbH, Dr. Karsten Menschner, CDM Consult GmbH sowie dem altlastenforum Baden-Württemberg e.V.

1 Einleitung, Verfahrensprinzip, Zielsetzung

Die Sanierung von Schadensherden im Boden und im Grundwasser hat beim Flächenrecycling belasteter Industriebrachen einen hohen Stellenwert. *In situ*-Sanierungen können hier einen wichtigen Beitrag zum Bauen im Bestand leisten, wenn sie mit verlässlichen Zeitangaben und Kostenbudgets in die Gesamtprojektierung eingebunden werden. Ungeachtet der Schadstoffverteilung¹ an einem Standort, schematisch dargestellt in Abbildung 1.1, muss eine *in situ*-Sanierung häufig innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens - oft binnen weniger Monate - zum Sanierungserfolg bei der Herdsanierung führen.

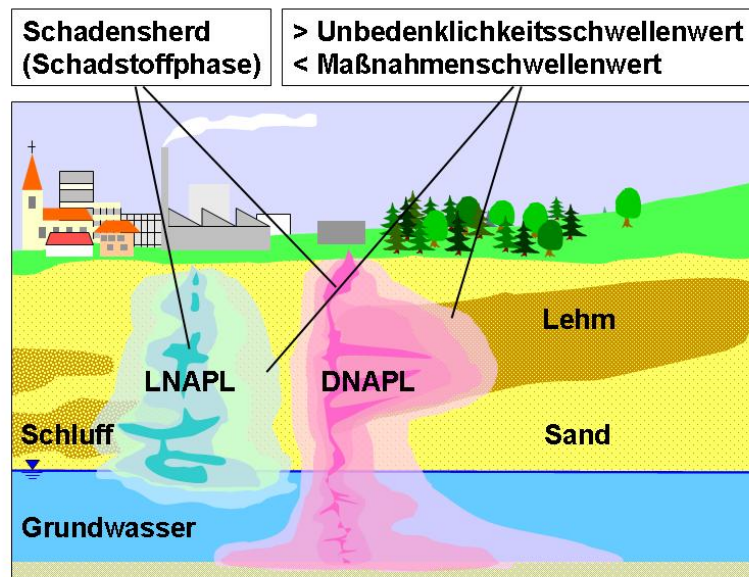


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung einer Schadstoffausbreitung im Untergrund. Thermische *in situ*-Sanierungen (TISS) zielen auf eine Entfernung der Schadensherde, nicht auf eine Entfernung der mäßigen, randlichen Belastungen.

Herkömmliche *in situ*-Sanierungsverfahren für organische Schadstoffe, wie beispielsweise die konventionelle „kalte“ Bodenluftabsaugung (BLA) oder eine hydraulische Abstromsicherung mittels „Pump & Treat“, benötigen zur Reinigung eines Grundstücks aufgrund der diffusionslimitierten Schadstofffreisetzung oftmals mehrere Jahre bis Jahrzehnte. Vor diesem Hintergrund können thermische *in situ*-Sanierungen (TISS) durch schnelle Dekontamination von Schadensherden wirksame Lösungen anbieten. Limitierungen, die aus den Eigenschaften leichtflüchtiger Schadstoffe (z.B. Diffusionslimitierung) und den Untergrundeigenschaften resultieren (z.B. Inhomogenitäten im Bodenaufbau), können mit TISS

¹ Die Prozesse bei der Schadstoffausbreitung von LNAPL und DNAPL sind in der einschlägigen Fachliteratur umfänglich beschrieben. Sie sind daher nicht Gegenstand dieses Leitfadens. Schematisch sind die Schadstoffausbreitungen für zwei Schadensszenarien in Abbildung 1.1 dargestellt.

durch eine Erwärmung des gesamten Sanierungsvolumens und der dadurch um Faktoren beschleunigten Verdampfung der Schadstoffe auch in geringer durchlässigen und gering durchströmten Bereichen überwunden werden.

Im Laufe der letzten Dekade erfolgten nach den ersten, wissenschaftlich begleiteten Pilotierungen zusehends Projektierungen und Umsetzungen im Rahmen von Herdsanierungen und Flächenrecyclingprojekten sowohl auf Freiflächen als auch unter Gebäuden [HIESTER & SCHRENK 2008].

Nachfolgend werden drei Varianten thermischer *in situ*-Sanierungen zur effizienten Schadensherdsanierung mittels **Dampf-Luft-Injektion (TUBA[®]-Verfahren)**, mittels **fester Wärmequellen (THERIS[®]-Verfahren)** und mittels **Radiofrequenz(RF)-Energie** vorgestellt. Der Fokus der beschriebenen TISS liegt auf der Beseitigung von Schadensherden durch eine **Verdampfung der Schadstoff(-phase) im Schadensherd infolge der Untergrunderwärmung und einer Extraktion des Gasgemisches** aus dem Untergrund **durch eine Bodenluftabsaugung**. Hierzu ist i.d.R. eine Erwärmung des Untergrundes auf 50°C bis 100°C erforderlich (Abbildung 1.2). Sanierbar sind sowohl Schadstoffe, deren Stoffdichte gegenüber Wasser kleiner (LNAPL²) oder größer (DNAPL³) ist. Organische Schadstoffe, wie beispielsweise chlorierte oder halogenierte Kohlenwasserstoffe (CKW, LHKW), Benzol, Ethylbenzol, Xylole und Toluol (BTEX) oder Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) bis zu einem Siedepunkt von etwa 200°C lassen sich mittels TISs sanieren [HIESTER 2009]. Die abgesaugte, schadstoffbelastete Bodenluft wird einer Abluftreinigung zugeführt. Gängige Abluftreinigungssysteme sind beispielsweise Luftaktivkohlefilter oder eine katalytische Oxidation. Die beschriebenen Schadensherdsanierungen wurden sowohl in grobkörnigen Lockergesteinen als auch in bindigen oder heterogenen Bodenschichten oder in Kluftgesteinen ausgeführt. Ebenso sind Anwendungen in der ungesättigten als auch in der wassergesättigten Bodenzone (Aquifer und Aquitard) möglich.

Bei Untergrundtemperaturen über 120°C treten Prozesse auf, bei denen Schadstoffe chemisch umgewandelt werden können. Beispiele hierfür sind Vergasung und Hydrolyse (ab ca. 120°C), Steamcracking bei Benzolderivaten und linearen Alkanen (ab ca. 180 °C), Torrefizierung (bei hohen Kohlenstoffgehalten) und anaerobe Pyrolyse (ab ca. 250 °C), aerobes Cracken bzw. anaerobe Pyrolyse (ab ca. 500 °C) oder das Sintern (ab ca. 1.000 °C). Da diese Temperaturbereiche bei der hier beschriebenen Anwendung der TISS nicht erreicht werden bzw. die hier beschriebenen Schadstoffgruppen bereits bei niedrigeren Temperaturen verdampfen, sind diese Prozesse nicht sanierungsrelevant.

² Light Non-Aqueous Phase Liquid ($\rho_{\text{pollutant}} < \rho_{\text{water}}$)

³ Dense Non-Aqueous Phase Liquid ($\rho_{\text{pollutant}} > \rho_{\text{water}}$)

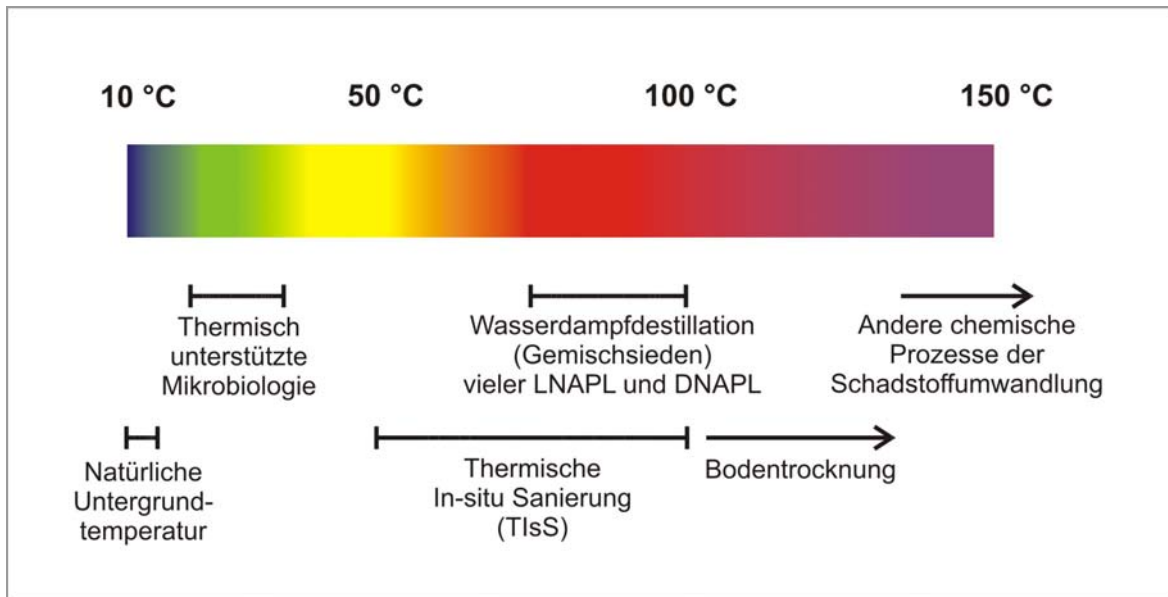


Abbildung 1.2: Anwendungsbereiche von Untergrunderwärmungen in der Altlastensanierung und Anwendungsbereich dieses Leitfadens (Prozesstemperaturen maßgeblich zwischen etwa 50°C und 100°C bei Atmosphärendruck)

Die Einsatzbereiche von Untergrunderwärmungen, auch in Kombination mit anderen Sanierungsverfahren, erweitern sich kontinuierlich. Neben den hier vorgestellten TISS-Verfahren arbeiten weitere *in situ*-Verfahren mit einer Erwärmung des Untergrunds. Sie unterscheiden sich jedoch anhand des Anwendungsbereiches zum Teil wesentlich vom Inhalt dieses Leitfadens.

Genannt seien beispielhaft die Injektion von warmer oder heißer Luft (z.B. ProAir-Verfahren, ThermoAir-Verfahren), die Injektion von warmem oder heißem Wasser, Electrical Resistance Heating (ERH, Widerstandsheizen), Sinterung (bei Temperaturen von 1.600-2.000°C), das Thermopile[®]-Verfahren oder eine thermisch unterstützte Flüssigphasenförderung. Diese Anwendungen werden im Leitfaden nur am Rande gestreift, da sie den Umfang des Leitfadens deutlich übersteigen würden.

2 Grundlagen

2.1 Wärmeeintrag

2.1.1 Konvektiver Wärmeeintrag: Dampf-(Luft-)Injektion (TUBA-Verfahren)

Zum Aufheizen des Untergrunds wird vorzugsweise ein Dampf-Luft-Gemisch, seltener ausschließlich Sattedampf (trocken gesättigter Wasserdampf) in die ungesättigte oder gesättigte Bodenzone im Schadenszentrum oder am Rand des Schadenszentrums injiziert. Strömung und Ausbreitung des Dampfanteils dominieren den konvektiven Wärmeeintrag, während der Luftanteil den Schadstoffaustrag über die Bodenluftabsaugung beschleunigt und sichert.

In der ungesättigten Bodenzone bei Lockergesteinen und feinklüftigen Festgesteinen mit guter bis mäßiger Durchlässigkeit (k_f -Werte) im Bereich von 10^{-2} bis 5×10^{-5} m/s (Kiese, Sande, grobschluffige Böden) kondensiert der injizierte Dampf an der kalten Bodenmatrix und gibt seine Energie (Verdampfungsenthalpie) an die Bodenmatrix ab. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess - bis der Boden die Dampftemperatur erreicht hat - kann Dampf von der Injektionsstelle an die Dampffront strömen. Es bildet sich entsprechend der injizierten Dampfmenge eine räumlich mehr oder weniger ausgedehnte, vertikale Wärmefront aus, die sich von der Injektionsstelle aus im Idealfall (bei homogenen Untergrundverhältnissen) horizontal und radialsymmetrisch ausbreitet. Im erwärmten Bereich werden die oft residualen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffe verdampft und mit Unterstützung des injizierten Luftanteils in Richtung der Extraktionsbrunnen der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung transportiert und dort abgesaugt.

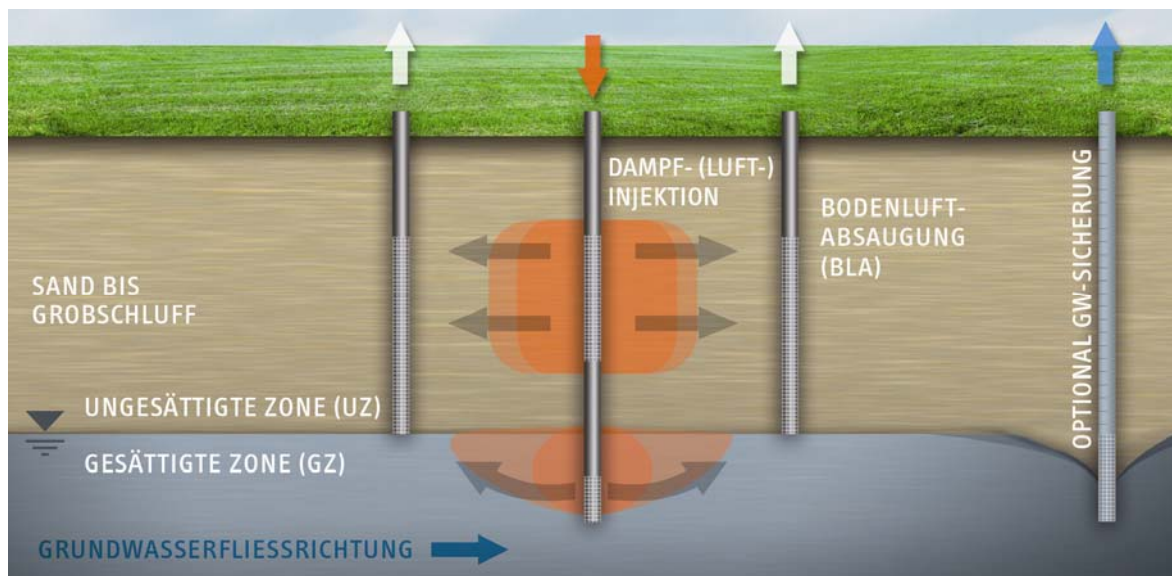


Abbildung 2.1: Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte und gesättigte Zone

Bei der Injektion in Lockergesteinsaquifere (d.h. in die gesättigte Zone) mit hydraulischen Durchlässigkeiten im Bereich zwischen 5×10^{-4} bis 5×10^{-5} m/s (kiesige Sande bis schluffige Sande) breitet sich - in Abhängigkeit von der injizierten Dampfrate und der Durchlässigkeit - ein geschlossener Dampfraum um die Injektionsstelle aus (im Idealfall radialsymmetrisch). Dabei wird das vorhandene Grundwasser zum Teil verdrängt. Über

den fortschreitenden Kondensationsprozess wird der zu sanierende Bereich erwärmt. Wenngleich die Injektion des Dampfes üblicherweise durch Vertikalbrunnen lateral in den Aquifer erfolgt, breitet sich der Dampf, bedingt durch seine gegenüber Wasser geringere Dichte, auch vertikal nach oben aus. Dieser Auftriebsbewegung wirken sowohl die Reibungskräfte bei hohen Injektionsraten als auch die Anisotropie durch die natürliche Schichtung in den Porengrundwasserleitern (vertikale Durchlässigkeit meist kleiner als horizontale Durchlässigkeit) entgegen, wodurch entsprechend die horizontale Dampfausbreitung unterstützt und somit die erzielbaren Reichweiten erweitert werden. Nach einem Dampfdurchbruch in die ungesättigte Zone erfolgt keine weitere maßgebliche horizontale Ausbreitung in der gesättigten Zone mehr. Die mit dem Dampf injizierte Luft strömt als Trägergas von der Injektionsstelle bis zur Dampffront, nimmt dabei die gasförmigen Schadstoffe auf und transportiert diese aus dem Grundwasserkörper (Aquifer) nach oben in die ungesättigte Bodenzone. Der Luftanteil ist relativ hoch anzusetzen (10 - 20% Massenanteil), um einen gesicherten Schadstofftransport der verdampften Kontaminanten aus dem Dampfraum durch die gesättigte Zone in Richtung der Bodenluftbrunnen zu erzeugen. Die gasseitige Entfernung der Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung.

2.1.2 Konduktiver Wärmeeintrag: Feste Wärmequellen (THERIS-Verfahren)

Feste Wärmequellen in Form elektrisch betriebener Heizlanzen können mit Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius betrieben werden und ermöglichen über Wärmeleitung und wärmeinduzierte Zirkulationsströmungen (Heat Pipe) auch eine Erwärmung gering durchlässiger Bodenschichten (vgl. Kap. 2.2.2). Dieser konduktive Wärmeeintrag ist im Gegensatz zur Dampf-injektion nicht auf ein Wärmeträgermedium angewiesen. Die Heterogenität eines Untergrundes ist für seine konduktive Aufheizung von untergeordneter Rolle, da die Wärmeleitung unterschiedlicher Bodenschichten nur mäßig variiert [HIESTER 2009]. Gleichwohl ist es unerlässlich, die verdampften Schadstoffe über eine Bodenluftabsaugung zu erfassen. Standortspezifisch kann je nach Lage des Schadensherdes und der (hydro-) geologischen Situation die Anordnung der Heizelemente und der Bodenluftabsaugpegel in unterschiedlichen Tiefen ratsam und besonders effizient sein [HIESTER 2009].

Positionierung und Betriebszustände von Heizelementen und Bodenluftpegeln können hierbei je nach Standortbedingungen und Zielstellung stark variieren. Für Wechsellagerungen von bindigen und rolligen Lagen in der ungesättigten Bodenzone konnte gezeigt werden, dass ein ausschließliches Beheizen bindiger Schichten und der Betrieb einer Bodenluftabsaugung ausschließlich in rolligen Schichten für eine effiziente Sanierung des gesamten Bodenprofils ausreichend sein kann [HIESTER 2009]. Ebenso konnte für mehrere Meter mächtige bindige Schichten gezeigt werden, dass eine Absaugung direkt in der bindigen Schicht mit hohem Unterdruck effizient sein kann [HIESTER ET AL. 2004, HIESTER 2009]. Bei Einbauten von Heizelementen in die gesättigte Bodenzone sind Dichtungsmaßnahmen zum Schutz der elektrischen Konstruktionen gegen einen Wasserzutritt zu ergreifen.

Prinzipiell ist mit festen Wärmequellen eine vollständige Trocknung des Untergrundes und eine anschließende Erwärmung auf $> 100^{\circ}\text{C}$ möglich. Dieser Effekt tritt beim THERIS-Verfahren in der beschriebenen Betriebsvariante jedoch erst nach längerem Betrieb im Bereich der ersten ein bis zwei Dezimeter um die festen Wärmequellen auf. Auf Sonderanwendungen, bei denen der Bodenkörper zwischen den festen Wärmequellen vollständig getrocknet und auf Temperaturen deutlich über 100°C erhitzt wird, wird im Rahmen dieses Leitfadens nicht eingegangen.

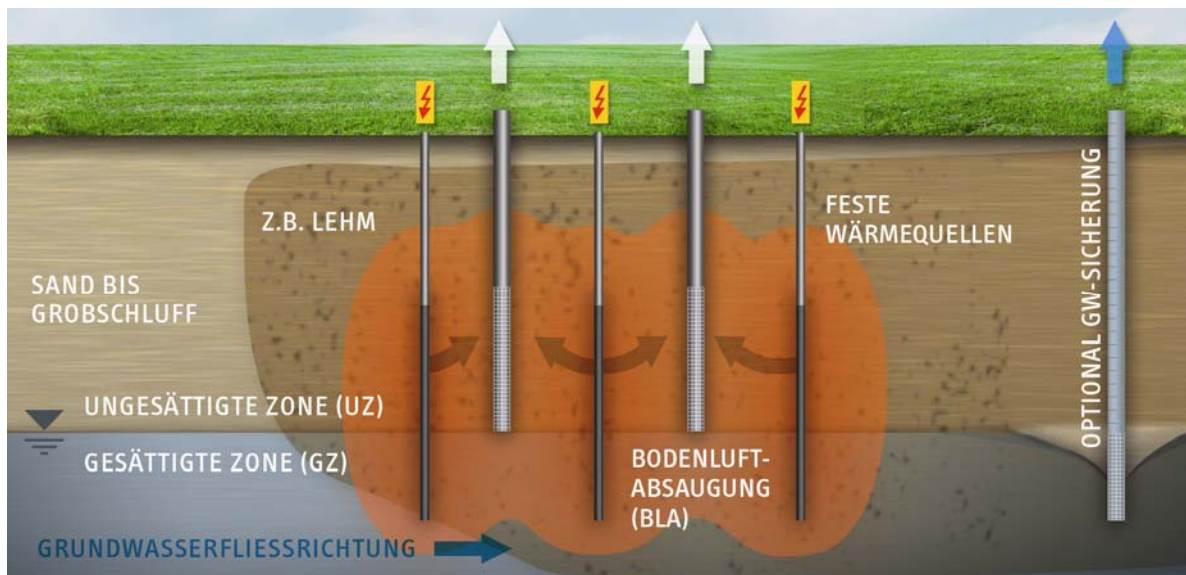


Abbildung 2.2: Prinzipskizze THERIS-Verfahren (Erwärmung mit festen Wärmequellen)

2.1.3 Dielektrischer Wärmeeintrag: Radiofrequenz(RF)-Energie

Bei der Nutzung von Radiofrequenz(RF)-Energie wird der Untergrund (ungesättigte und / oder gesättigte Zone) durch die eingetragenen elektromagnetischen Wellen erwärmt, ähnlich dem Wirkprinzip eines Mikrowellengeräts zum Erhitzen von Speisen. Üblicherweise werden Frequenzen von einigen MHz (3 bis 50 MHz) verwendet (RF-Bereich). Die dielektrische Erwärmung im Volumen ist dabei nicht an das Vorhandensein von Wasser gekoppelt. Im Vergleich zur Mikrowelle sind die Eindringtiefen der elektromagnetischen Wellen in das zu erwärmende Medium deutlich größer und liegen im technisch relevanten Bereich von einigen Metern. Mit der RF-Bodenerwärmung können unterschiedliche Böden (trocken oder feucht, sandig oder schluffig) erwärmt werden. Die Umwandlung von Radiofrequenz(RF)-Energie in Wärme im Boden erfolgt in der Regel mit einem Wirkungsgrad von über 90 % [ROLAND ET AL. 2007a; ROLAND ET AL. 2008a].

Die RF-Energie wird in einem RF-Generator erzeugt und über ein elektronisches Anpassnetzwerk (Matchbox) an das Elektrodensystem im Boden übertragen (Abbildung 2.3). Durch die elektronische Anpassung wird der Energieeintrag maximiert, indem die zum Generator rücklaufende Leistung auf Null abgeglichen wird. Als Elektrodensysteme kommen Stab-, Platten- oder Netzelektroden zum Einsatz. Stabelektroden, die gleichzeitig als Absaugbrunnen eingesetzt werden können, haben sich für die thermisch unterstützte Bo-

denluftabsaugung durchgesetzt [ROLAND ET AL. 2007a; ROLAND ET AL. 2008c; ROLAND ET AL. 2007b]. Ein spezielles Design erlaubt es, die Energie in ausgewählte Tiefen zu übertragen, um die Kontamination gezielt zu sanieren. Zur Verbesserung mikrobiologischer Reinigungsverfahren bieten sich parallele Platten- oder Netzelektroden an, da mit diesen eine moderate Temperaturerhöhung mit geringen Gradienten erzielt werden kann. Prinzipiell sind auch andere Antennengeometrien möglich, wenn eine örtlich sehr selektive Erwärmung gewünscht wird [ROLAND ET AL. 2007b; KASEVICH, R.S., 1998]. Hier wird die RF-Energie mit Hilfe eines Koaxialkabels über den nicht abgeschirmten Bereich des Kabels in den Boden eingekoppelt.

Wie bei der Dampf-Luft-Injektion oder dem Betrieb fester Wärmequellen kann die abgesaugte, schadstoffbeladene Bodenluft entweder durch Adsorption an Aktivkohle oder durch thermische bzw. thermo-katalytische Oxidation gereinigt werden. Unter bestimmten Randbedingungen (ausreichend hohe Kohlenwasserstoff-Konzentrationen in der Abluft) ist beim RF-Verfahren zudem eine *in situ*-Oxidation an einem in der Elektrode platzierten Katalysator möglich [GEBRAUCHSMUSTER DE 202007014507.1, 2007].

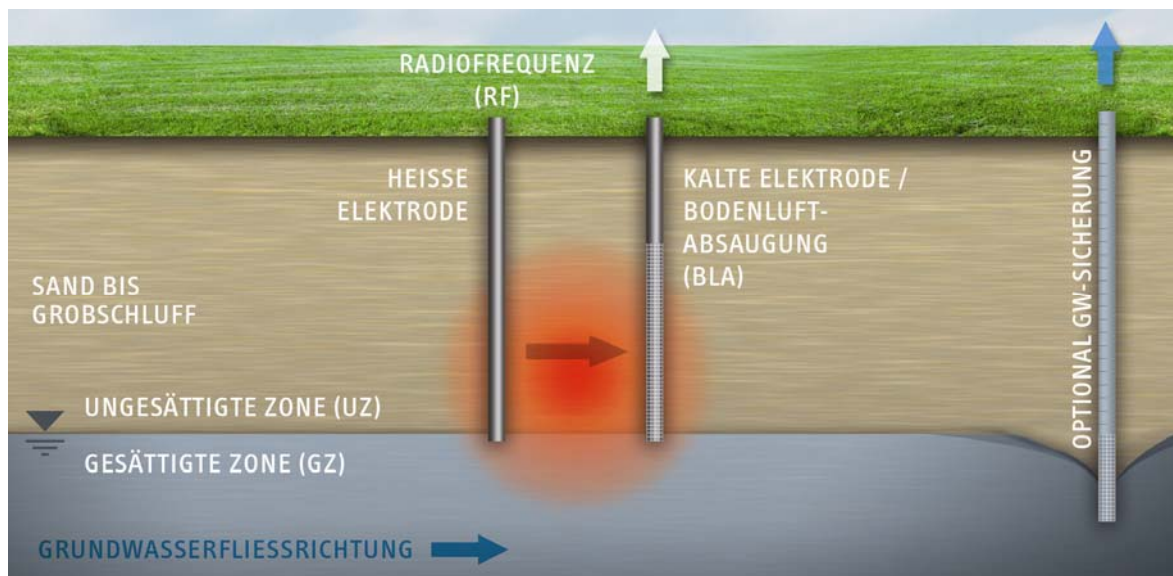


Abbildung 2.3: Prinzip der RF-Bodenerwärmung

2.2 Einfluss wichtiger Prozesse und Standortbedingungen auf den Sanierungsbetrieb

2.2.1 Phasenübergänge (flüssig – gasförmig – flüssig)

Bei thermischen *in situ*-Sanierungen sind vielfach die Prozesse beim Phasenübergang zwischen flüssiger und gasförmiger Phase wichtiger als die Stoffeigenschaften des flüssigen Schadstoffs. Substanzen mit einem Dampfdruck über 70 Pa bei natürlichen Untergrundverhältnissen werden als gut flüchtig eingestuft [US-EPA 1991]. In einem idealen Zweiphasensystem Flüssigkeit-Luft lässt sich der Phasenübergang über den exponentiell mit der Temperatur T ansteigenden Dampfdruck p_d beschreiben. Der Dampfdruck kann für Reinstoffe beispielsweise nach ANTOINE bzw. der WAGNER-Gleichung berechnet wer-

den. Die stoffspezifischen Koeffizienten (A, B, C) sind u.a. in REID ET AL. [1987] tabelliert. Bei der Erwärmung eines kontaminierten, feuchten Bodens wird die Schadstoffphase (NAPL) zusammen mit Wasser verdampft (Wasserdampfdestillation). Hierdurch addieren sich die Dampfdrücke der beiden nicht mischbaren Phasen Wasser (Index W) und Schadstoff (Index NAPL⁴) zum Gemischsiededampfdruck p_d [Gl. 1], der immer über dem der niedrigsiedenden Phase (oft Wasser) liegt. Bei der Gemischsiedetemperatur sieden die Stoffe und das Optimum des Stoffübergangs von der Schadstoffphase in die Gasphase wird erreicht.

$$p_d = \exp(A_w - B_w / (C_w + T)) + \exp(A_{NAPL} - B_{NAPL} / (C_{NAPL} + T))$$

Bei einer Wasserdampfdestillation der Komponenten Wasser und Schadstoff liegt daher die druckabhängige Siedetemperatur des Gemisches im offenen System (hier: Poren des Bodengefüges) immer unter der Siedetemperatur der Einzelstoffe. Beispielhaft ist die Dampfdruckkurve von PCE (Tetrachlorethen) und Wasser sowie die Dampfdruckkurve beim Gemischsieden (PCE mit Wasser) in Abbildung 2.4 dargestellt.

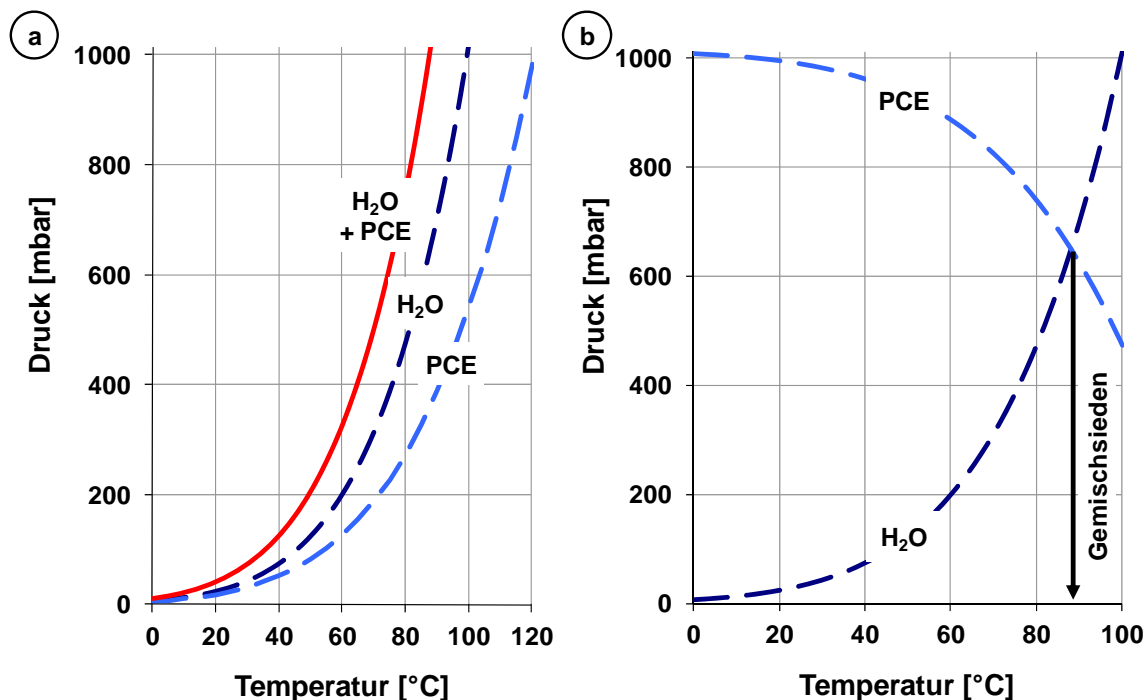


Abbildung 2.4: Dampfdruckkurven von Wasser und Tetrachlorethen (PCE)

a) Dampfdruckkurven der Einzelstoffe (H₂O, PCE) und des Stoffgemisches (H₂O + PCE) beim Gemischsieden

b) Bestimmung der Gemischsiedetemperatur von PCE und Wasser nach dem Verfahren von Badger-McCabe [BETZ 1998]

Zur Veranschaulichung dieses Prozesses kann bei Normaldruck temperaturabhängig das Verhältnis des Dampfdrucks des Wasser-Schadstoff-Gemisches zum Wasserdampfdruck als NAPL-Druck-Beiwert ausgedrückt werden (Tabelle 1) [HIESTER 2009]. Bei Schadstoff-

⁴ NAPL = Non Aqueous Phase Liquid. Oberbegriff für LNAPL und DNAPL

fen mit einem Siedepunkt von ca. 200°C geht der NAPL-Druck-Beiwert gegen 1, da hier die Erniedrigung des Wasserdampfdrucks durch das Gemischsieden nur noch minimal ist. Entsprechend ist der Prozess der Wasserdampfdestillation für Schadstoffe höherer Siedepunkte > 200°C von untergeordneter Bedeutung.

Beim Betrieb einer Bodenluftabsaugung mit mehreren hundert Millibar Unterdruck kann sich in deren Einflussbereich die Gemischsiedetemperatur bei den üblichen CKW- oder BTEX-Kontaminationen um etwa 5-8 °C verringern.

In der gesättigten Zone ist hingegen zur Verdampfung von Schadstoffen zunächst die Ausbildung eines Dampfraumes erforderlich. Hierzu sind bei der Auslegung der Energiezufuhr der TISS in die gesättigte Bodenzone der hydrostatische Druck im Sanierungsbereich und der Ausgleich von Energieverlusten durch eine Grundwasserströmung zu beachten. Ersterer erhöht die Siedetemperatur von Wasser proportional zur Tiefe unterhalb der Grundwasseroberfläche. Dieser Temperaturanstieg kann gegenüber Atmosphärenbedingungen mehrere Grad Celsius betragen.

Tabelle 1: Siedetemperaturen und Gemischsiedetemperaturen bei Normaldruck einiger Schadstoffe [abgeleitet aus REID ET AL. 1987], NAPL-Druck-Beiwerte [HIESTER 2009]

Schadstoff	Siedetemperatur des Schadstoffs	Gemischsiedetemperatur mit Wasser	NAPL-Druck-Beiwert
	[°C]	[°C]	[-]
1,2-cis-Dichlorethen	60	55	6,0 – 10,0
Trichlorethen	87	73	2,8 - 3,9
Benzol	80	69	3,4
Toluol	111	84	1,8
Tetrachlorethen	121	88	1,6 - 1,8
(m-) Xylol	139	93	1,3
Mesitylen, Trimethylbenzol	165	97	1,1
Dichlorbenzol	180	98	1,08
Naphthalin	218	99	1,0

Für Schadstoffgemische aus mehreren Einzelstoffen errechnet sich der Partialdampfdruck des Schadstoffgemisches nach RAOULT aus der Summe der Produkte des Molenbruchs und des Dampfdrucks des Einzelstoffes [ATKINS 1988]. Vereinfachend kann die Siedetemperatur des Gemisches mit den Dampfdrücken des höchstsiedenden, sanierungsrelevanten Schadstoffs und Wasser abgeschätzt werden.

Der Übergang des im Poren- oder Grundwasser gelösten Schadstoffs in die Gasphase (Bodenluft) errechnet sich über den HENRY-Koeffizienten, der entweder als Verhältnis zwischen dem Partialdruck des Stoffes in der Gasphase und der Konzentration in der wässrigen Phase oder als dimensionsloses Verhältnis der Gleichgewichtskonzentrationen in der Gas- und Flüssigphase angegeben wird [LFU BW 1995]. Die Flüchtigkeit eines Stoffes ist hiernach eine Funktion des HENRY-Koeffizienten (in Wasser gelöste Schadstoffe), der Wasserlöslichkeit bzw. des Dampfdrucks (Schadstoffphase), welche wiederum vom

Druck, von der Temperatur und anderen Wasserinhaltsstoffen, z. B. Salze beeinflusst werden. Eine Erhöhung des Dampfdrucks bewirkt grundsätzlich eine vermehrte Löslichkeit des Schadstoffs im Poren- bzw. Grundwasser. Eine umfangreiche Stoffdatensammlung zur Berechnung des HENRY-Koeffizienten unter Berücksichtigung der Temperatur hat SANDER [1999] zusammengestellt.

2.2.2 Trocknungsverhalten, relative Permeabilität, Transportprozesse

Infolge der Untergrunderwärmung und der Verdampfung von Wasser erfährt ein Bodenkörper im Verlauf einer TISS tendenziell eine Trocknung, wodurch sich der Anteil der luftgefüllten Poren gegenüber dem Anteil der flüssigkeitsgefüllten Poren erhöht. Dieser Effekt wird bei der Dampfinjektion durch das Zuführen von Wasserdampf weitestgehend kompensiert. Beim Einsatz fester Wärmequellen oder bei RF-Anwendungen können lokale Trocknungseffekte auftreten. In Folge eines Trocknungsprozesses erhöhen sich der Luftporenanteil, die relative Permeabilität der Gasphase und die Gesamtdiffusion der im Porenwasser gelösten Schadstoffe in die Gasphase, wodurch der Schadstoffaustrag über eine Bodenluftabsaugung verbessert wird. Dieser Effekt ist in bindigen Schichten aufgrund ihres hohen Wasserbindevermögens ausgeprägter als beispielsweise in ungesättigten Sanden.

Vollständige Trocknungen treten bei TISS üblicherweise erst im Sanierungsverlauf und dann nur im Nahbereich von wenigen Dezimetern um die festen Wärmequellen oder die stabförmigen RF-Sonden auf. Eine vollständige Trocknung des Bodenkörpers ist für eine effiziente Sanierung aufgrund des Effekts der Wasserdampfdestillation nicht erforderlich (vgl. Kapitel 2.2.1). Auch bei Anwendungen in der gesättigten Zone (Aquifer und Aquitard) ist das Entstehen eines Dampftraumes nicht mit einem vollständigen Trocknungsprozess gleichzusetzen [BAKER & HIESTER 2009].

Insbesondere in bindigen Böden setzt zudem eine nicht-isotherme zirkulierende Luft-Wasser-Strömung ein (Heat-Pipe-Effekt) [UDELL & FITCH 1985], die durch einen Temperaturgradienten und die Kapillarkräfte im Boden erzeugt wird. Hierbei bewegt sich der Gasstrom mit dem Temperaturgradienten weg von der Wärmequelle. Mit steigender Entfernung zur Wärmequelle kühlt sich der Gasstrom ab, wobei bei Überschreiten der Sättigungskonzentration in der Gasphase vormals verdampfte Flüssigkeit wieder kondensiert. Hierdurch wird der durch die Verdampfung entstandene Gradient in der Flüssigphase verstärkt. Dieser Gradient kann über Kapillarkräfte wieder ausgeglichen werden, so dass Porenwasser entgegen dem Temperaturgradienten in den heißen Bereich transportiert wird.

Bei TISS in sandigen Böden ist der Heat-Pipe-Effekt aufgrund der geringen Kapillarkräfte vernachlässigbar. Hingegen wirkt sich der Heat-Pipe-Effekt bei TISS in gering durchlässigen Böden beschleunigend auf die Wärmeausbreitung aus, da sich zusätzlich zum konduktiven Wärmetransport im direkten Umfeld der Heizelemente ein konvektiver Bereich anschließt. Gleichzeitig wird bereits erwärmtes Wasser wieder in den heißen Bereich um die Heizelemente bzw. Wärmequelle zurückgeführt, was eine vollständige Trocknung des Bodens signifikant verzögert [HIESTER 2009].

2.2.3 Geologie, Hydrogeologie, Anisotropie, Setzungen

Die hydraulische Leitfähigkeit des Untergrunds bestimmt im Wesentlichen das Anwendungsfenster von TISS. Während das advective bzw. konvektive Verfahren der Dampf-Luft-Injektion gut bis mittel durchlässige Böden erfordert, können feste Wärmequellen oder die Radiofrequenz-Energie auch in gering durchlässigen Böden eingesetzt werden.

TISS können zur Quellensanierung in Grundwasserleitern bei gut leitfähigen Strukturen oder / und hohen hydraulischen Gradienten aufgrund der hierdurch bedingten hohen Wärmeverluste üblicherweise nicht effizient eingesetzt werden. Überschreitet die Filtergeschwindigkeit $v_f (k_f \times i)$ in Lockergesteinsaquiferen ein kritisches Maß von 0,5 m/d, wird eine wärmetechnische Überprüfung empfohlen.

Der geologische Aufbau des Untergrunds ist zumeist durch Sedimentations- und Erosionsprozesse gekennzeichnet. Die Mächtigkeiten der einzelnen Schichtenlagen können bis zu mehrere Meter betragen und beeinflussen damit sowohl einen Schadstoffeintrag als auch die Auswahl des thermischen Sanierungsverfahrens. Geringmächtige, wechselnde Schichtenfolgen können zu einer dispersen Schadstoffausbreitung führen, während mächtige, homogene Lagen bindigen Bodens zur Ansammlung von Schadstoffen in Phase führen können (Pools). Eine thermische Erschließung bindiger Bodenlagen erfolgt durch Wärmeleitung (Konduktion) durch den Betrieb fester Wärmequellen oder die Zuführung über RF-Energie, um die über Diffusion permeierten Schadstoffe zu desorbieren. Eine konduktive Erwärmung von bindigen Lagen von außen durch eine Umströmung mittels Dampf kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bis zu einer Mächtigkeit von ca. 1 m gegeben sein [FÄRBER & HIESTER 2006, TRÖTSCHLER ET AL. 2006]. Über oder unter bindigen Lagen anstehende Schichten aus Lockergestein (Sande, schluffige Sande und Kiese) können zur Absaugung der verdampften Schadstoffe genutzt werden [HIESTER 2009].

Sedimentations- und Erosionsprozesse führen grundsätzlich zu einer anisotropen Durchlässigkeitsverteilung im Untergrund. Dabei ist die vertikale Durchlässigkeit oft um eine Größenordnung geringer als die horizontale Durchlässigkeit. In der gesättigten Zone bedeutet dies für eine Dampf-Luft-Injektion stets eine Reichweitenvergrößerung mit entsprechend verringerter Anzahl an Injektions- und Extraktionsbrunnen. Konduktive Verfahren werden in der Anwendung weniger bis kaum durch die Anisotropie beeinflusst. Unterschiedliche Bodenarten wirken sich aufgrund der geringen Varianz der Wärmeleitfähigkeit nur untergeordnet auf die Geschwindigkeit einer konduktiven Erwärmung aus.

Änderungen im Wassergehalt wirken sich in der ungesättigten Zone üblicherweise gering auf die Tragfähigkeit des Bodens im Sanierungsbereich aus [HIESTER 2009]. In der gesättigten Zone verdrängt der Dampf im Untergrund zum Teil das Wasser, übernimmt dabei aber auch dessen bodenphysikalische Funktion. Organische Bodenbestandteile können bei erhöhten Temperaturen schneller unter Volumenverlust umgesetzt werden. Im Extremfall und bei hohen Auflasten, beispielsweise durch Gebäude, können solche Volumenreduktionen Setzungen zur Folge haben. Wenngleich neuere Untersuchungen im Labor versuchen, die einaxiale Volumenreduktion von Torfen in Folge von TISS an Bodenproben zu simulieren [TRÖTSCHLER ET AL. 2011], sind die Übertragung dieser Ver-

suchsergebnisse auf triaxiale Spannungszustände beim Sanierungsbetrieb und die Ableitung von Setzungsprognosen derzeit noch im Forschungsstadium. Gleichwohl sind insbesondere im Umfeld organischer Böden die Randbedingungen und möglichen Einschränkungen bei einer Umsetzung von TISS sehr sorgfältig zu überprüfen und in der Planung zu berücksichtigen.

Die Erfahrung zeigt aber, dass nur bei etwa einem Viertel der in den letzten Jahren ausgeführten TISS überhaupt Setzungsmessungen ausgeführt wurden (Abbildung 2.5). Die durch Bohrungen und Änderung des Wasserhaushalts bedingten Volumenänderungen lagen hierbei bei einigen Millimetern. Hingegen können Volumenänderungen bei stark organischen Böden (Organikanteil > 10 %, s.o.) je nach Mächtigkeit der Schicht und Auflast im Extremfall mehrere Zentimeter betragen. Grundsätzlich sind daher bei der Planung von TISS unter Gebäuden oder in deren mittelbarer Nähe und bei entsprechenden Untergrundverhältnissen die Auswirkungen eines Sanierungsbetriebs auf Gebäudegründungen im Vorfeld abzuschätzen und während einer Sanierung zu überwachen.

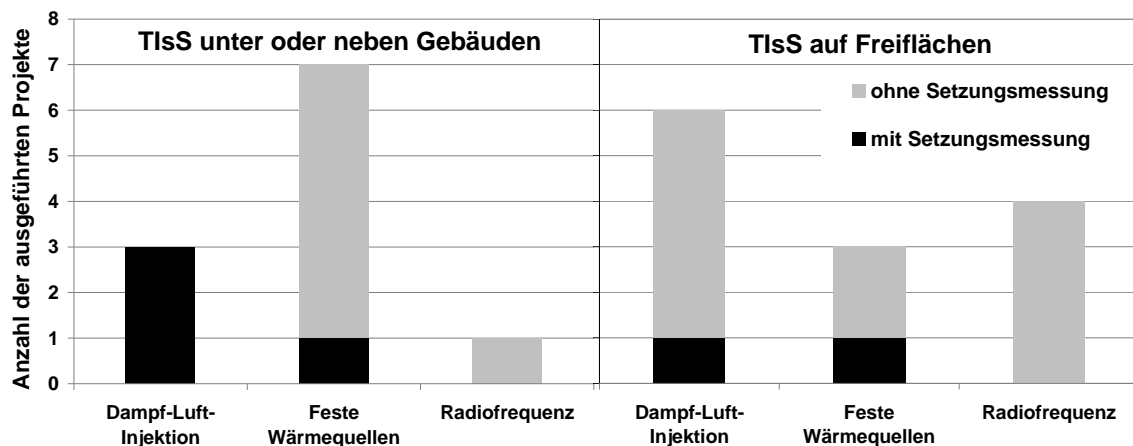


Abbildung 2.5: Anzahl ausgeführter TISS mit Setzungsmessungen, differenziert nach Sanierungen unter oder neben Gebäuden sowie auf Freiflächen

Generell beeinflusst eine Erwärmung immer auch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und die Löslichkeit von Wasserinhaltsstoffen (z.B. Eisen oder Mangan). Im Gegensatz zur steigenden Löslichkeit von Schadstoffen im Wasser bei steigenden Temperaturen fällt Kalk bei hohen Temperaturen vermehrt aus. In sehr kalkreichen Grundwässern sind auf der Porenskala daher lokale Kalkausfällungen zu erwarten. Ob solche kleinräumigen Effekte sich signifikant auf einen Sanierungsablauf auswirken könnten, ist projektspezifisch in der Planung zu bewerten. Üblicherweise werden entsprechende Effekte vornehmlich in der Auswahl der Wasseraufbereitungstechniken berücksichtigt.

2.3 Stoffkennwerte und Stoffgrößen wichtiger Schadstoffgruppen

2.3.1 Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)

Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) sind niedrigsiedende organische Verbindungen, die außer Kohlenstoff und Wasserstoff auch Halogenatome (Fluor, Chlor, Brom, Jod) enthalten. LHKW finden bzw. fanden u.a. Verwendung als Reinigungs-, Extraktions- und Lösungsmittel (z.B. PCE oder TCE), als Kältemittel und Treibgase (FCKW) oder als Feuerlöschmittel (Halone). Da die Dichte der meisten sanierungsrelevanten LHKW größer als die von Wasser ist, LHKW nicht mit Wasser mischbar sind (NAPL) und die meisten LHKW eine geringe Viskosität besitzen, kann LHKW-Phase gravimetrisch im Aquifer bis zu dessen Sohle, also bis zum Aquitard eindringen. Hierbei bildet die ins Grundwasser eingedrungene LHKW-Phase Schadstofftröpfchen in der gesättigten Bodenzone, die üblicherweise zu einer massiven, sanierungsrelevanten Grundwasserverunreinigung führen. Die meisten LHKW sind als gesundheitsschädlich für den Menschen (u.a. kanzerogen oder mutagen) und als schädlich bis giftig für Wasserorganismen eingestuft [GESTIS STOFFDATENBANK 2011].

LHKW können über längere Zeiträume (aerob bzw. anaerob) unter bestimmten Milieubedingungen biologisch bis zum Ethen bzw. bis zum CO₂ abgebaut werden. Hierbei können die entstehenden Zwischenprodukte wie cis-DCE oder VC erheblich gesundheitsschädlicher sein als die Ausgangsstoffe.

Aufgrund ihrer relativ hohen Dampfdrücke lassen sich LHKW-Schadensherde in der ungesättigten Zone je nach Zusammensetzung bereits bei Temperaturen von etwa 75 - 95 °C innerhalb weniger Monate vollständig sanieren (Tabelle 1 und Tabelle 2).

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von ausgewählten LHKW [GESTIS STOFFDATENBANK 2011 oder errechnet nach REID ET AL 1987]

Stoff	Siedepunkt	Dampfdruck bei 20°C 50°C 80°C	Wasserlöslichkeit (bei 20°C)	Dichte bei 0°C, 1013 mbar
	[°C]	[mbar]	[mg/l]	[kg/m ³]
Vinylchlorid	-13,4	>1.013 >1.013 >1.013	1.100	2,86
Dichlormethan	40	470 >1.013 >1.013	20.000	1.330
1,2-cis-Dichlorethen	60	216 704 >.1013	600 - 800	1.280
Trichlorethen	87	78 284 812	1.000	1.460
Tetrachlorethen	121	19 82 748	160	1.620

2.3.2 Aromatische Kohlenwasserstoffe, BTEX, Mineralölkohlenwasserstoffe

Aromatische Kohlenwasserstoffe (AKW) wie Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole sind organische Verbindungen, die sich vom Benzol ableiten. Die stark flüchtigen und chemisch beständigen BTEX reichern sich in der Bodenluft an und weisen eine hohe Mobilität auf. Wasserlöslichkeiten sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Benzol, Toluol und ihre Derivate besitzen als Lösungsmittel eine große Bedeutung. Da die Dichte der BTEX geringer als die von Wasser ist, sollte BTEX-Phase nicht zur Grundwassersohle absinken. Gleichwohl kann sich z.B. Ölphase auch unter der Grundwasseroberfläche befinden. Dieser Effekt tritt

vermehrt bei stark schwankenden Grundwasserständen oder bei großen Schadstoffeinträgen auf. Viele AKW sind als gesundheitsschädlich für den Menschen (u.a. kanzerogen oder mutagen) und als schädlich bzw. giftig für Wasserorganismen anzusehen [GESTIS STOFFDATENBANK 2011].

Gegenüber BTEX sind Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) geringer wasserlöslich und adsorbieren stärker an hydrophoben bzw. organischen Bodenbestandteilen. Bei unterschiedlichen Ölsorten begünstigen hohe Viskositäten (zähflüssig) eine laterale Ausbreitung (z.B. Rohöl) während geringe Viskositäten eine vertikale Verlagerung begünstigen (z.B. Kerosin) [BLUME 1990].

Aufgrund der geringen Dampfdrücke von Ethylbenzol und Xylol gegenüber Tetra- und Trichlorethen sind für TISS von BTEX-Herden in der ungesättigten Zone meist Temperaturen von 90 – 99 °C anzustreben (Tabelle 1 und Tabelle 3). Durch die höheren Temperaturen bei TISS besteht bei der Verdampfung von BTEX ein erhöhtes Risiko zur Bildung explosiver Gas-Luft-Gemische. Zur Reaktionseinschätzung dieser Gas-Luft-Gemische dienen unter anderem die untere (UEG) bzw. obere Explosionsgrenze (OEG) und die Zündtemperatur (Tabelle 4).

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von ausgewählten AKW [GESTIS STOFFDATENBANK 2011 oder errechnet nach REID ET AL 1987]

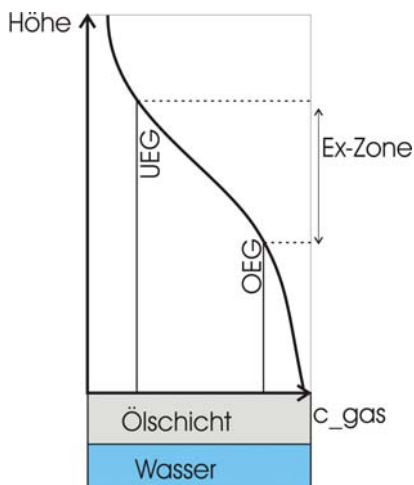
Stoff	Siedepunkt	Dampfdruck bei 20°C 50°C 80°C	Wasserlöslichkeit (bei 20°C)	Dichte bei 0°C, 1013 mbar
	[°C]	[mbar]	[mg/l]	[kg/m³]
Benzol	80	100 361 1.008	1.800	880
Toluol	111	29 122 387	470	870
Ethylbenzol	136	10 47 167	140	870
m-Xylol	139	8 41 151	200	860
Trimethylbenzol, Mesitylen	165	3 15 60	20	860

Ist die Stoffkonzentration eines explosiven Gases in der (Boden-)Luft zwischen der unteren und der oberen Explosionsgrenze ($UEG \leq c_{\text{gas}} \leq OEG$), liegt ein explosives Gas-Luft-Gemisch vor. Für eine Explosion sind dann eine Initialzündung und ein Mindestreaktionsvolumen erforderlich [ATEX 2008, BGR 104 2005]. Im Anlagenbau wird dieses beispielsweise durch die Maschenweite eines Flammenschutzgitters in Rohrleitungen unterschritten. Eine ähnliche Funktion übernimmt der Porenraum zwischen Sandkörnern und kleineren Partikeln. So konnten bereits mehrere BTEX- und MKW-Schäden auch mit aufschwimmender Schadstoffphase erfolgreich thermisch *in situ* saniert werden [BARBIAN ET AL. 2009, KOSCHITZKY ET AL. 2007], obgleich explosive Gemische im Porenraum vorlagen.

Tabelle 4: UEG/OEG, Sättigungskonzentration und Zündtemperatur von ausgewählten AKW (BTEX)[GESTIS STOFFDATENBANK 2011]

Stoff	Untere Explosionsgrenze (UEG)	Obere Explosionsgrenze (OEG)	Sättigungskonzentration 20°C 50°C 80°C	Zündtemperatur
	[g/m ³ Vol. %]	[g/m ³ Vol. %]	[g/m ³]	[°C]
Benzol	39 1,2	280 8,6	321 1.049 2.682	555
Toluol	42 1,1	300 7,8	110 420 1.215	535
Ethylbenzol	43 1,0	340 7,8	41 185 605	430
m-Xylol	48 1,1	310 7,0	36 164 544	540
Mesitylen	40 0,8	365 7,0	13 65 247	550
Phenol	51 1,3	352 9,0	1,5 73 177	595

Bezüglich des Explosionsschutzes sind die Sicherheitsregeln beim Umgang mit explosiven Gas-Luft-Gemischen zu beachten [ATEX 2008]. Im Besonderen ist bei den Brunnenbohrarbeiten im Trockenbohrverfahren das Einbringen einer Zündenergie (z.B. bei Rammarbeiten oder Meißeleinsatz) zu vermeiden. In den Absaugpegeln herrschen prinzipiell auch bei einer TISS ähnliche Bedingungen wie in einem Mehrphasenextraktionsbrunnen mit aufschwimmender Schadstoffphase (z.B. bei Kerosinschäden). Im Absaugpegel liegt oberhalb einer Schadstoffphase immer ein explosives Gas-Luft-Gemisch vor. Seitens des Anlagenbaus sind entsprechend explosionsgeschützte Pumpen und Gebläse sowie Flammenschutzgitter vorzusehen.

**Abbildung 2.6: Explosionsfähige Atmosphäre in einem Absaugpegel (schematisch)**

Da sich im Gegensatz zu kalten Bodenluftabsaugungen bei TISS-Anwendungen die Zusammensetzung des Gas-Luft-Gemisches schnell ändern kann, ist der Einsatz automatischer Überwachungssysteme (Ex-Schutz-Wächter, Frischluftventil, Notabschaltung) erforderlich. Bei Abschaltung der BLA oder anderen explosionsschutz-kritischen Betriebszuständen sollte eine automatische Abschaltung der Dampf-Luft-Injektion erfolgen. Beim

Heizbetrieb mit Heizelementen oder RF-Energie ist die Notwendigkeit einer automatischen Abschaltung in der standortspezifischen Sicherheitsanalyse zu prüfen.

2.3.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bestehen aus zwei oder mehreren kondensierten aromatischen Ringen, die unterschiedlich angeordnet sein können. PAK sind in Erdöl und Kohle enthalten, können aber auch bei unvollständigen Verbrennungsprozessen entstehen (Pyrolyse). Sie werden in Böden hauptsächlich hydrophob adsorbiert. Trotz starker Sorption am Bodenkorn können PAK bis ins Grundwasser verlagert werden und z.B. als Teeröl bis auf den Grundwasserstauer absinken. Einige PAK wie z.B. Naphthalin, Pyren, Chrysen oder Benzo[a]pyren sind für Menschen gesundheitsschädlich bzw. kanzerogen.

Tabelle 5: Stoffgrößen PAK [GESTIS STOFFDATENBANK 2011 oder errechnet nach REID ET AL 1987]

Stoff	Siedepunkt	Dampfdruck bei 20°C 50°C 80°C	Wasserlöslichkeit (bei 20°C)	Dichte (bei 0°C, 1013 mbar)
	[°C]	[mbar]	[mg/l]	[kg/m ³]
Naphthalin	218	0,04 1,6 9,1	32	1.140
Fluoren	295	13 (bei 146°C)	1,8	1.200

Für eine effiziente Wasserdampfdestillation zum vollständigen Schadstoffaustrag scheiden PAK aufgrund ihrer hohen Stoff siedepunkte aus. Gleichwohl sind aus Laborversuchen Austragssteigerungen bei einem Temperaturniveau zwischen etwa 90 °C bis 100°C insbesondere bei PAK mit niedrigeren Siedepunkten bekannt [ROLAND ET AL 2010]. Auf die Nutzung thermischer Zersetzungsprozesse beispielsweise bei PAK bei Temperaturen >> 150°C u.a. durch Pyrolyse und Hydrolyse wird im Rahmen dieses Leitfadens nicht eingegangen.

2.3.4 Sonstige Stoffe

TISS können prinzipiell für ein breites Schadstoffspektrum, maßgeblich für organische Stoffe mit einer Siedetemperatur unter 200°C eingesetzt werden. Beispielhaft ist nachfolgend eine Stoffauswahl aufgeführt (Tabelle 6).

In der ungesättigten Zone können durch Kombination bzw. Erweiterung der beschriebenen thermischen Verfahren, z.B. Dampf-Luft-Injektion mit nachgeschalteter Heißluftinjektion oder in Kombination mit festen Wärmequellen, auch Stoffe mit Siedetemperaturen > 200°C thermisch saniert werden. Im Labormaßstab konnte die Sanierbarkeit von Quecksilberschäden (Siedepunkt 356°C) mit TISS bei einer Bodentemperatur von 250°C nachgewiesen werden. Vor einer Umsetzung solcher Sonderanwendungen sind ergänzende standortspezifische Untersuchungen erforderlich. Darüber hinaus setzen bei diesen Temperaturen schadstoffzersetzende Prozesse ein, beispielsweise Pyrolyse. Auf diese

Sonderfälle wird im Folgenden jedoch nicht weiter eingegangen und stattdessen auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen.

Tabelle 6: Auswahl sonstiger Stoffe für TISS

Schadstoff (Summenformel)	Siedetempe- ratur [°C]	Dichte [kg/m ³]
Kohlenstoffdisulfid		
Kohlenstoffdisulfid	46	1260
Methyl-tert-butylether (MTBE)		
Methyl-tert-butylether (MTBE)	55	740
Chloroform (Trichlormethan)		
Chloroform (Trichlormethan)	61	1480
Hexan		
Hexan	69	660
Cyclohexan		
Cyclohexan	81	780
Halone		
Dibromchlormethan (CHClBr₂)		
Dibromchlormethan (CHClBr ₂)	120	2450
1,2-Dibrommethan (CH₂Br₂)		
1,2-Dibrommethan (CH ₂ Br ₂)	131	2180
Tribrommethan (CHBr₃)		
Tribrommethan (CHBr ₃)	150	2900
Aromatische Kohlenwasserstoffe		
Chlorbenzol (C₆H₅Cl)		
Chlorbenzol (C ₆ H ₅ Cl)	132	1100
Dichlorbenzole (C₆H₄Cl₂)		
Dichlorbenzole (C ₆ H ₄ Cl ₂)	174 – 180	1300
Phenol (C₆H₆O)		
Phenol (C ₆ H ₆ O)	182	1070
Kresole (C₆H₈O)		
Kresole (C ₆ H ₈ O)	190 – 200	1020
Anorganische Stoffe		
Quecksilber		
Quecksilber	356	13534

3 Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen von thermischen *in situ*-Sanierungsverfahren

3.1 Übersicht bisheriger erfolgreicher Anwendungsbereiche

Nach umfangreichen Forschungsaktivitäten seit etwa Mitte der 1990er Jahre und den sich hieran anschließenden ersten TISS-Pilotierungen in den darauf folgenden 10 Jahren kamen TISS in den letzten Jahren regelmäßiger zur Anwendung. Da die Sanierungsprozesse in der gesättigten Zone gegenüber denen in der ungesättigten Zone komplexer sind, lag der Schwerpunkt bislang ausgeführter TISS in der ungesättigten Zone. Sanierungen in der gesättigten Zone (Aquifer und Aquitard) kommen erst in den letzten Jahren vermehrt zur Ausführung [KOSCHITZKY & TRÖTSCHLER 2010].

TISS wurden in Sanden, Schluffen, Tonen und Kluftgesteinen sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Zone erfolgreich ausgeführt. Mehr als jede zweite Grundwasserunreinigung wird durch LHKW verursacht, knapp jede Dritte durch Mineralölkohlenwasserstoffe und jede Fünfte durch BTEX [BAYRISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 2004]. Entsprechend finden sich auch für ausgeführte TISS beispielsweise mehr Referenzprojekte für LHKW-Sanierungen als für BTEX-Sanierungen. Andere Stoffgruppen (z.B. PAK) wurden bislang meist als Begleitstoffe zusammen mit LHKW- oder BTEX-Schäden saniert.

Bei TISS in der ungesättigten Zone und geringem vertikalen Abstand zum Grundwasser sowie bei TISS im Grundwasser ist der Betrieb einer Abstomsicherung oft genehmigungsrechtlich gefordert bzw. aus Risikoabwägungen üblich. Als Gründe hierfür werden beispielsweise eine Erhöhung der Schadstofflöslichkeit im Wasser (vgl. Kap. 2.3) und die Besorgnis für eine potenzielle Schadstoffverfrachtung über die Grundwasserströmung genannt. Auch wenn bis auf Weiteres aufgrund der geringen Anzahl an Referenzprojekten dieses Vorgehen aus Sicht des Risikomanagements zu empfehlen ist, waren bislang nur bei vereinzelt TISS kurzzeitige, geringe Steigerungen der Schadstofffrachten in der Grundwasserförderung zu verzeichnen. Typisch für die hier beschriebenen TISS auch in der gesättigten Zone ist, dass üblicherweise mehr als 90% der ausgetragenen Schadstoffmasse über die Bodenluftabsaugung gefördert wird. Bei einem vertikalen Abstand zwischen der Unterkante des Schadensherdes und dem Grundwasser von mehr als drei Metern und einem adäquaten Betrieb einer BLA ist durch die TISS kein zusätzlicher Schadstoffeintrag ins Grundwasser zu erwarten. Eine Anordnung von BLA-Pegeln im Übergangsbereich zwischen Schadensherd und Grundwasser kann im Einzelfall sinnvoll sein. In solchen Fällen ist üblicherweise keine Grundwassersicherung zur Verhinderung unkontrollierter Schadstoffverfrachtungen erforderlich. Erläuterungen zu Randbedingungen, die eine Migration von Schadstoffen bei der Anwendung von TISS im Einzelfall bewirken können finden sich u.a. bei BETZ 1998, SCHMIDT 2001, HIESTER 2009, BAKER & HIESTER 2009.

TISS unter Gebäuden oder in deren direkter Nähe, oftmals unter Beibehaltung der Gebäudenutzung für Gewerbe und Wohnen während der Sanierung wurden bereits mehrfach erfolgreich realisiert [u.a. HIESTER & SCHRENK 2008, HIESTER & MÜLLER 2010, KOSCHITZKY ET AL. 2011].

3.2 Prinzipielle anlagenspezifische und räumliche Bedingungen

3.2.1 System zur Untergrunderwärmung

Für eine Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren) sind anlagentechnisch ein Dampferzeuger und ein Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemischs erforderlich. Zur Anwendung kommen sowohl kleinere Dampferzeuger in Einzelaufstellung u.a. in Gebäuden als auch größere Dampferzeuger in Containerbauweise. Vor Inbetriebnahme und beim Betrieb von Dampferzeugern sind die entsprechenden Vorschriften zu beachten (TRD001-802). Je nach Dampfleistung sind die Dampferzeuger TÜV-prüf- bzw. überwachungspflichtig (siehe TRD 500ff). Ein Kesselwärter ist i.d.R. bei einer Einteilung des Dampferzeugers in Gruppe IV notwendig (Wasserinhalt des Kessels > 50 l, Betriebsüberdruck > 1 bar, Produkt aus Wasserinhalt [l] und zulässigem Betriebsüberdruck [bar] > 1000). Je nach Leistung und Betriebsüberdruck kann die Anwesenheit eines Kesselwärters 24 h/d vor Ort erforderlich sein, weshalb Sanierungsanlagen üblicherweise so konzipiert werden, dass ein sicherer Betrieb ohne Kesselwärter möglich ist (Limitierung der Dampfleistung bzw. Aufstellung kleinerer Einheiten).

Als Betriebsstoffe für einen Dampferzeuger sind Strom, Gas oder Diesel gängig. Entsprechend geben Anlagenverbrauch und Betankungsintervalle die Größe des Treibstofftanks vor. Entsprechende Vorschriften zum sachgerechten Betrieb von Tankanlagen sind zu beachten (u.a. Wasserhaushaltsgesetz WHG, Landes-Anlagenverordnungen VAWS, BetrSichV, TRbF). In Einzelfällen wurde die Nutzung von industrieller Prozesswärme zur Dampferzeugung projektiert bzw. konnte auf vorhandene Dampfversorgungsnetze zurückgegriffen werden. Kompressoren werden meist elektrisch betrieben.

Beim THERIS-Verfahren werden elektrisch betriebene Heizelemente direkt in den Untergrund eingebaut. Die Leistungsabgabe der Heizelemente muss zum sachgerechten Betrieb regelbar sein. Die Regeleinheiten können zentral oder dezentral aufgebaut werden.

Für die RF-Bodenerwärmung sind ein HF-Generator, eine Matchbox sowie das Elektroden-system erforderlich. Der Generator sowie die Elektrodenköpfe inklusive deren elektrischen Verbindung zur Matchbox sind zum Schutz vor elektromagnetischen Störungen und Elektrosmog für Personen im Umfeld der Anlage gesondert mithilfe von Gehäusen abzuschirmen.

Insbesondere für die beiden zuletzt genannten, elektrisch betriebenen Verfahren gilt, dass der Zutritt von Wasser in den elektrischen Kreislauf bautechnisch zu unterbinden ist. Bei größeren Anlagen ist das Verlegen eines gesonderten Stromanschlusses wirtschaftlich. Anlagen mit Sonderanschlüssen von mehreren hundert Kilowatt wurden bereits ausgeführt. Beim Einkauf des Stroms wird die Wahl von Sondertarifen im Grundlastbereich empfohlen. Hierdurch sind erhebliche Einsparungen gegenüber Privatverbrauchertarifen möglich. Auf den Bezug eines Baustromtarifs sollte aus ökonomischen Gründen verzichtet werden.

3.2.2 Bodenluftabsaugung, Grundwasserhaltung, Abluft- und Wasserreinigung

Die Verdichter- und Pumpenauswahl ist so zu treffen, dass bei der standortspezifischen Geologie, Hydrogeologie, Brunnenanordnung und Leitungslängen die geplanten Förderströme sicher realisiert werden können. Die Anordnung der Bodenluftabsaugaggregate in Anlagencontainern empfiehlt sich u.a. aufgrund des Lärmschutzes.

Da die Luftfeuchte der geförderten Gasströme bei einer TISS für den Großteil des Betriebszeitraums 100% beträgt und sich die Gasströme bis zum Anlagencontainer abkühlen, ist bei TISS mit einem regelmäßigen, kontinuierlichen Kondensatanfall zu rechnen, der vor der Abluftreinigung abzuscheiden ist. Zudem ist zur Gewährleistung einer hinreichenden Effizienz der Abluftreinigung (insbesondere bei Luftaktivkohle) eine Trocknung der Luft durch Kondensation und eine Abscheidung des Kondensats aus dem Luftstrom erforderlich. Entsprechend ist das Vorhalten einer Reinigungsstufe für die Flüssigphase (z.B. Wasseraktivkohle) auch bei einer BLA immer erforderlich.

Bei einer begleitenden Grundwasserförderung können Grundwasser und Kondensat beispielsweise in einem gemeinsamen Vorlagetank zusammengeführt werden. Der Einsatz von Phasenabscheidern zur Trennung organischer Flüssigkeiten von der wässrigen Phase und einer separaten Abfallentsorgung der abgetrennten Schadstoffphase ist nur in Ausnahmefällen, beispielsweise bei der absehbaren Förderung von Schadstoffphase, wirtschaftlich. Das gereinigte Grundwasser einer Abstromsicherung kann ökonomisch zur Kühlung des Luftstroms eingesetzt werden, wenn die zulässigen Einleittemperaturen des Grundwassers in die Vorflut (alternativ einen Abwasserkanal oder bei der Wiederversickerung in das Grundwasser) eingehalten werden können.

3.2.3 Sanierungsbegleitende Messsysteme

Die gegenüber konventionellen Anlagen umfangreichere Anlagentechnik bei TISS und damit verbundenen höheren täglichen Betriebskosten erfordern ein professionelles Projekt- und Sanierungsmanagement mit regelmäßiger Optimierung des Anlagenbetriebs. Zudem sind die Sanierungsprozesse bei TISS erheblich schneller als bei konventionellen Bodenluftabsaugungen. Eine Steigerung der ausgetragenen Schadstofffracht (Massenfracht) einer konventionellen BLA durch TISS um Faktoren zwischen 10 bis 50 sind, wenngleich immer geprägt von den Bedingungen an einem Standort, keine Seltenheit. Eine zeitnahe Auswertung der Messdaten ist daher bei TISS erforderlich. Je nach Dynamik der Sanierungsprozesse (Wärmeausbreitung, Schadstoffaustrag u.a.), Randbedingungen und Anforderungen (z.B. Explosionsschutz) kann eine tägliche Bewertung von Messwerten zur entsprechenden Anlagen- und Sanierungssteuerung erforderlich sein.

Zur Überwachung und Anlagenoptimierung ist die Bilanzierung der eingetragenen Wärmemenge ebenso wie die Erfassung der wesentlichen Mess- und Steuergrößen in der gesamten Anlage wie beispielsweise Durchflüsse, Drücke, Schadstofffrachten u.ä. üblich. Zur Überwachung der Wärmeausbreitung und Bewertung des Sanierungsfortschritts sind Temperaturüberwachungen im TISS-Feld erforderlich. Die Messquerschnitte und -intervalle sind so zu wählen, dass bei unterschiedlichsten Betriebszuständen alle sanierungs-

relevanten Prozesse im Feld interpretiert werden können. Etabliert haben sich automatisierte Erfassungssysteme mit Datenfernübertragung. Auch sind Systeme zur Datenfernübertragung und Alarmmeldungen der Anlagensteuerung Stand der Technik.

Projektspezifisch kann eine Erweiterung der Überwachungs- und Monitoringkonzepte auf sanierungsbegleitende Aufgabenstellungen erforderlich sein. Übliche Schnittstellen gibt es beim Schutz erdverlegter Leitungen vor einer unzulässigen Erwärmung, der Überwachung der Raumluft in Gebäuden oder der Überwachung der Standsicherheit von Gebäuden (u.a. Setzungsmessungen des Untergrundes, Rissmonitoring). Aus diesen begleitenden Aufgabenstellungen und Randbedingungen können sich in der Planungsphase Restriktionen für den Sanierungsbetrieb ergeben, deren Überwachung beim Betrieb Aufgabe des Sanierungsmanagements ist.

3.3 Möglichkeiten und Grenzen von Dampf-(Luft-)Injektionen (TUBA-Verfahren)

3.3.1 Ungesättigte Zone

Der Anwendungsbereich umfasst die Sanierung von Schadensherden in locker- und feinklüftigem Festgestein mit guter bis mäßiger Durchlässigkeit (Kiese, Sande bis schluffiger Boden) mit einer hydraulischen Durchlässigkeit (k_f -Wert) im Bereich zwischen 5×10^{-5} bis 1×10^{-2} m/s.

Da sich bei einer reinen Dampfinjektion an der Kondensationsfront Schadstoffe anreichern können und in ungünstigen Fällen bis auf den Grundwasserspiegel absinken könnten, ist der alleinige Einsatz von Dampf kritisch zu bewerten. In der ungesättigten Zone (UZ) sollte eine reine Dampfinjektion nur auf LNAPL-Sanierungen beschränkt bleiben, wenngleich auch hier eine zusätzliche Luftinjektion den Schadstoffaustrag beschleunigt und so verkürzend auf die Sanierungszeit wirkt. Im Fall einer reinen Dampfinjektion sollte einer Verfrachtung von flüssiger Schadstoffphase über hohe Absaugraten oder eine Phasenabschöpfung Rechnung getragen werden. Eine Grundwassersicherung ist wie zuvor beschrieben oftmals sinnvoll. Bei DNAPL-Sanierungen (z.B. LCKW) sollte ein Dampf-Luft-Gemisch injiziert werden, um potenzielle Schadstoffakkumulationen zu unterbinden. Die mit dem Dampf injizierte Luft wirkt als Trägergas, durchdringt die Kondensationsfront und trägt die Kontaminanten gasförmig mit der Bodenluft aus.

Schlecht durchlässige Schluff- oder Tonlinsen bis zu einer Mächtigkeit von etwa 1 m [FÄRBER & HIESTER 2006] können über flächenhafte Konduktion mit Dampf von außen ebenfalls aufgeheizt werden. Hierzu strömt der Dampf vorzugsweise in den besser durchlässigeren Bereichen unter- oder oberhalb der bindigen Schichten. Die Schadstoffe gelangen dann gasförmig in die besser durchlässigeren Bereiche und können hier von der BLA erfasst werden. Bei bindigen Lagen größerer Mächtigkeit empfiehlt sich eine Erwärmung von innen über den Betrieb fester Wärmequellen oder den Eintrag elektromagnetischer Wellen.

3.3.2 Gesättigte Zone

Der Anwendungsbereich umfasst Porengrundwasserleiter (Feinsand bis Schluff) mit einer hydraulischen Durchlässigkeit im Bereich zwischen $k_f \approx 5 \times 10^{-5}$ bis 5×10^{-4} m/s sowie geeignete Kluftgesteinsaquifere mit vergleichbaren Durchlässigkeiten (gleichmäßige Klüfte, keine ausgeprägten Grobklüfte). Basierend auf Erfahrungen aus Pilotanwendungen in Porengrundwasserleitern kann bei anisotropen Schichtungen in diesem Durchlässigkeitsbereich von einer „lateralen thermischen Reichweite“ von 3 - 5 m Radius bei einer Injektionsrate von rund 150 kg/h Satttdampf (je m Filterstrecke), einem Luftanteil von etwa 10 Ma% und einem Wasserstand oberhalb des Injektionsfilters von 4 – 5 Metern ausgegangen werden [OCHS, S.O. 2006, TRÖTSCHLER ET. AL. 2006].

Der Dampf breitet sich im Aquifer lateral und vertikal nach oben aus und wird erst in der ungesättigten Zone (UZ) von der BLA erfasst. Entsprechend der bisherigen Erfahrungen ist ein Abstand der Injektionstiefe zur UZ von maximal 10 m realisierbar. In Abhängigkeit der Durchlässigkeit der UZ (5×10^{-5} - 1×10^{-2} m/s) sollte die Mächtigkeit der UZ zwischen 3-5 m betragen. Standortspezifisch können zusätzliche Dampf-Luft-Injektionen im Bereich der ungesättigten Zone wirtschaftlich sein, wenn deren Mächtigkeit etwa 3 m übersteigt. Im Rahmen einer Sanierungsplanung können Pilotversuche zur Reichweitenbestimmung der Dampfausbreitung mit entsprechend angeordneten Absaugbrunnen und einem Temperatur- und Schadstoffmonitoring durchgeführt werden. Für Anwendungen in heterogenen Strukturen oder außerhalb der o.a. Anwendungsbereiche können standortspezifische Pilotierungen zur Klärung offener Fragen der Sanierungsplanung beitragen.

Bei Zwischenstauern geringer Mächtigkeit $< 1,5$ m, zum Beispiel Schluff- oder Tonlinsen, strömt der Dampf unterhalb der hydraulisch schlecht durchlässigen Bereiche („steam-override“) und kann den darüber anstehenden Boden über flächenhafte Konduktion innerhalb mehrerer Wochen aufwärmen [FÄRBER & HIESTER 2006, KLEINKNECHT 2011]. Bei Entstehen eines Dampfraums werden die Schadstoffe verdampft und mit dem Temperaturgradienten in die darüber liegenden Bereiche transportiert, wo sie in der ungesättigten Bodenzone von einer BLA erfasst werden können. Etwaig kondensierte Schadstoffe werden durch die „nachrückende“ Wärme wieder verdampft. Bei bindigen Lagen größerer Mächtigkeit kann eine Erwärmung von „innen“ über den Betrieb fester Wärmequellen (Kapitel 3.4.1) oder den Eintrag elektromagnetischer Wellen (Kapitel 3.5) erfolgen.

3.3.3 Hinweise zur Dimensionierung

Die Vorgehensweise und Dimensionierung einer Dampf-Luft-Injektion in der ungesättigten Zone basiert auf Berechnungen zur Dampfausbreitung [SCHMID ET. AL. 2000, SCHMIDT 2001], die auf analytischen Lösungen zur Koppelung der thermodynamischen Zustände und der Strömungsverhältnisse beruhen [FÄRBER 1997].

Die Ausbreitung einer Dampffront im Grundwasser kann über Typenkurven abgeschätzt werden [OCHS 2006, KOSCHITZKY & TRÖTSCHLER 2008]. Hierfür ist eine gute Erkundung der geologischen und hydrogeologischen Beschaffenheit eines Aquifers erforderlich. Eine

Software zur Bemessung einer Dampf-Luft-Injektion wird 2012 im Rahmen von TASK veröffentlicht (<http://www.task-leipzig.de>).

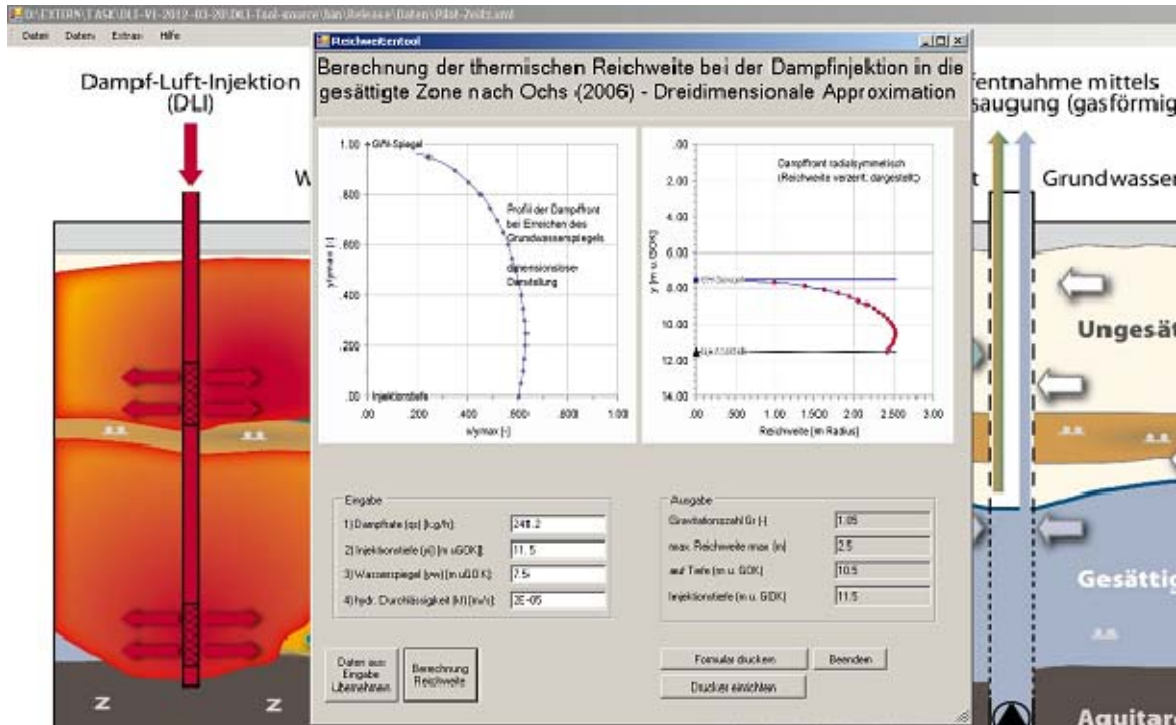


Abbildung 3.1: Beispiel der Reichweitenabschätzung mit der Software „DLI-Tool“

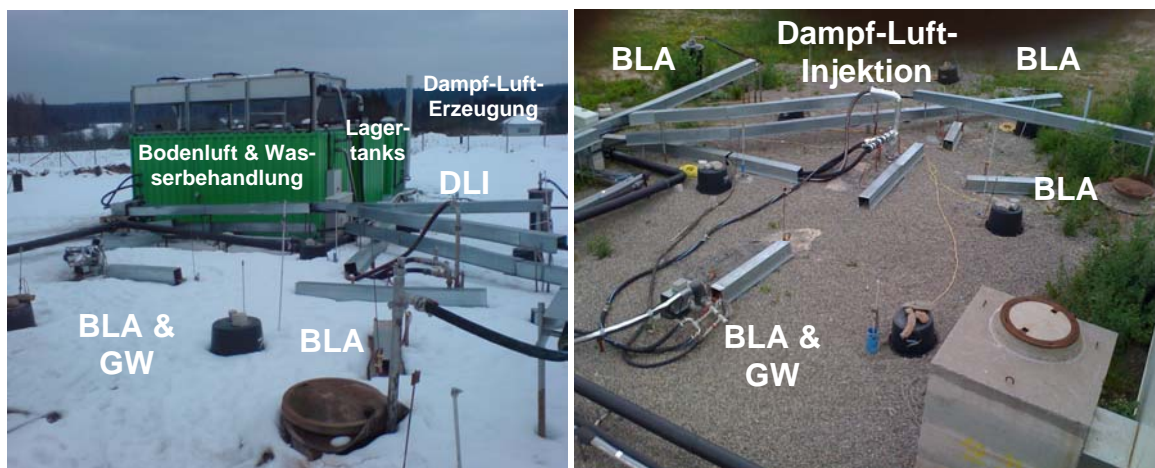


Abbildung 3.2: Dampf-Luft-Injektion am Demonstrationsstandort „Biswurm“. Links: Containeranlage, rechts: Brunnenfeld mit Dampf-Luft-Injektion, Bodenluftabsaugung (BLA) und Grundwassersicherung (GW)

Eine TISS unter Gebäuden ist sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Bodenzone bei Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung möglich. Eine bautechnische Prüfung und Beweissicherung des Gebäudes ist vor Sanierungsbeginn durchzuführen und während der Sanierung in regelmäßigen Abständen fortzusetzen.

Tabelle 7: Dimensionierungsgrößen Dampf-Luft-Injektion (TUBA-Verfahren)

Kenngröße	Auswirkung auf	Dimensionsgrößen
Hydraulische Durchlässigkeit		
Ungesättigte Zone $10^{-2} - 5 \times 10^{-5}$ m/s	Dampftrate Absaugrate BLA Zeitbedarf	0,1 – 0,5 kW/m ³ Boden 0,1 – 0,5 Nm ³ /(m ³ Boden x h) 0,03 – 0,06 d/m ³ Boden
Gesättigte Zone $5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$ m/s	Thermische Reichweite Dampftrate Absaugrate BLA Zeitbedarf	3 – 5 m Radius (s. auch Text) 0,3 – 0,5 kW/m ³ Boden 0,1 – 0,5 Nm ³ /(m ³ Boden x h) 0,06 – 0,12 d/m ³ Boden
Schadensherd	Wirtschaftlichkeit Sanierungsdauer	> 500 mg Kontaminant / kg Boden 0,5 – 2 a
Dimension der Kontamination (Kubatur)	Anlagengröße → abschnittsweise Sanierung	200 – 1000 kW Injektionsleistung (>1 MW [4. BImSchV 1997])
Kontaminanten		
Siedetemperatur < 100°C (Benzol, DCE, TCE, DCA, TCA, CCl ₄)	Austragsrate Konzentrationsniveau BLA	> 95% erzielbar > 10 g/m ³ Bodenluft
Siedetemperatur 100 - 150°C (PCE, PCA, BTEX, Benzin, Chlorbenzol)	Austragsrate Konzentrationsniveau BLA	> 90% erzielbar 1 - 10 g/m ³ Bodenluft
Siedetemperatur 150 - 180°C (Diesel, (n-Dekan), Phenol, DCB, Naphthalin, Trimethylbenzol)	Austragsrate Konzentrationsniveau BLA	> 70 % erzielbar < 1 g/m ³ Bodenluft
Sanierungsfläche bebaut/unbebaut	Technischer Aufwand, Erschließungs- und Sicherungskosten, Anlagenstellfläche, baustatische Prüfung, Raumlüftüberwachung, pneumatische Sicherung, bzw. Kühlung sensibler Bereiche durch Luftinjektion	Abstand Injektionsbrunnen / Extraktionsbrunnen UZ: 10 – 15 m GZ: 4 – 8 m
Versiegelung Oberfläche	Folienabdeckung, Beton, Asphalt, mineralische Dichtung	Erforderlich, falls Oberboden $k_f > 10^{-5}$ m/s oder geringe Überdeckung des Sanierungsbereichs
Mächtigkeit ungesättigte Zone (UZ)	Pneumatische Sicherung Verhältnis Anzahl Extraktions- zu Injektionsbrunnen Maximaler Injektionsdruck	mind. 3 bis 10 m Massenstrom Extraktion / Injektion > 1,5 mind. 2 bis 6 Bodenauflast x Sicherheit (0,3 – 0,7)
Mächtigkeit gesättigte Zone (GZ)	Anwendbarkeit Injektionsleistung Maximaler Injektionsdruck	derzeit meist bis ca. 8 m zu dimensionieren (s.o.) Bodenauflast x Sicherheit (0,3 – 0,7) + Wassersäule über Injektionsniveau

3.4 Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz fester Wärmequellen (THERIS-Verfahren)

3.4.1 Ungesättigte Zone

Bindige oder inhomogene Bodenschichten gelten allgemein als nicht oder nur schlecht geeignet für Bodenluftabsaugungen. Durch einen konduktiven Wärmeeintrag über feste Wärmequellen sind jedoch Herdsanierungen auch in diesen Böden effizient umsetzbar. Die Durchlässigkeit des Untergrunds spielt für den Energieeintrag im Gegensatz zum konvektiven Wärmeeintrag wie bei der Dampf-Luft-Injektion eine untergeordnete Rolle.

Gleichwohl beeinflusst die Bodenbeschaffenheit die Reichweite einer Bodenluftabsaugung. Herdsanierungen mit dem THERIS-Verfahren wurden in Böden mit einer hydraulischen Durchlässigkeit bis zu $k_f \approx 10^{-9}$ m/s erfolgreich abgeschlossen. Voraussetzung hierfür sind leistungsstarke Absaugaggregate zur Erzeugung von hohen Unterdrücken.

Aufgrund der einfachen Handhabung, der guten Installationsmöglichkeiten und des geräuschlosen Betriebs fester Wärmequellen wurden viele Standorte innerorts ausgeführt. Unberührt hiervon bleibt die Minderung der Lärmemissionen der konventionellen Anlagenkomponenten wie beispielsweise Pumpen und Verdichtern.

3.4.2 Gesättigte Zone

Feste Wärmequellen können effizient zur Herdsanierung in Aquitarden eingesetzt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigten, dass hierbei tendenziell mäßige bis geringe hydraulische Durchlässigkeiten $k_f < 1 \times 10^{-7}$ m/s die Effizienz positiv beeinflussen [BAKER & HIESTER 2009]. Damit der Schadstoffaustrag maßgeblich über die Gasphase erfolgt, muss zunächst im Aquitard ein Dampfraum durch Verdampfung von Wasser erzeugt werden, also der Untergrund auf die Siedetemperatur von Wasser erhitzt werden. Eine geringe hydraulische Durchlässigkeit verringert den lateralen Zutritt von Wasser in den Sanierungsbereich und begünstigt dort eine Wärmeakkumulation. Die in der gesättigten Zone verdampften Schadstoffe werden in Folge einer wärmeinduzierten Bodenluftströmung in die ungesättigte Bodenzone transportiert und dort von einer Bodenluftabsaugung erfasst.

Für einen hinreichenden Sanierungserfolg muss die erzeugte Dampffront in der gesättigten Zone den gesamten Schadensherd vollständig erfassen. Im technischen Maßstab war als Randeffekt bei einem geringen Abstand der Dampffront zum Schadensherd von wenigen Dezimetern eine mäßige laterale Verfrachtung von Schadstoff infolge der Kondensation an der Dampffront zu beobachten [BAKER & HIESTER 2009]. Dieser Prozess ist einer potenziellen Schadstoffakkumulation bei einer Satttdampfinjektion ähnlich. Entsprechend ist bei Feldanwendungen eine vollständige Schadensherderkundung wichtig. Der oben beschriebene Randeffekt ist jedoch bei Feldanwendungen von untergeordneter Bedeutung, da der thermisch zu sanierende Bereich weniger von Randeffekten beeinflusst wird als im technischen Maßstab. Erste THERIS-Sanierungen in Aquitarden sind bereits umgesetzt. Beispielsweise wurde eine zeitgleiche Herdsanierung von zwei Grundwasserleitern mit dem TUBA-Verfahren und des Grundwassernichtleiters mit dem THERIS-Verfahren

ren, bei den BROWNFIELD BRIEFING AWARDS 2011 als „HIGHLY COMMENDED“ in der Kategorie „Best In-situ Treatment“ bewertet (s. Projektbeispiel G).

3.4.3 Hinweise zur Dimensionierung

Der Energieeintrag ist maßgeblich vom Schadstoffinventar, den Sanierungszielen, der Bodenfeuchte und der anvisierten Dauer einer Herdsanierung abhängig. Der Zutritt von Schichtwasser in der ungesättigten Bodenzone sollte in der Planungsphase bekannt sein oder abgeschätzt werden, da er im Anlagen- und Brunnendesign zu berücksichtigen ist.

Im Rahmen standortspezifischer Pilotierungen können im Einzelfall Sonderfragestellungen geklärt werden (Abbildung 3.3). Generell verbessern große Sanierungsfelder die Wirtschaftlichkeit durch eine Minderung der Energieverluste über die Berandung. Sollte die verfügbare elektrische Leistung an einem Standort nicht ausreichen, um einen Schadensherd vollständig in einem Schritt zu sanieren, ist das Heranführen zusätzlicher elektrischer Leistung über zusätzliche Leitungen üblicherweise wirtschaftlicher als eine Teilung des Sanierungsbereiches in mehrere Teilfelder. Beide Varianten kamen schon zur Ausführung.



Abbildung 3.3: Standortspezifische THERIS-Pilotierung. Deutlich ist die laterale thermische Reichweite an der Oberfläche durch die Schmelze der 20 cm mächtigen Schneedecke zu erkennen (Projekt der HIM GmbH, Bereich Altlastensanierung⁵)

⁵ Weiterführende Informationen: WOISNITZA ET AL.: *Thermische In-situ-Sanierung (Pilotversuch) am Beispiel "ehemalige Lederfabrik Berninger" in Idstein.*

Für die BLA-Pegel wird bei tonigen Böden ein Abstand von wenigen Metern empfohlen [VDI 1997]. Der Abstand der Heizelemente zueinander beträgt ebenfalls mehrere Meter und variiert je nach Kubatur des Schadensherdes, der Schadstoffe und der angestrebten Sanierungszeit. Bodenluftabsaugversuche wie in ITVA [2002] beschrieben sind nicht aussagekräftig, da sie die Prozesse im erwärmten Zustand nicht abbilden. Die dominierenden Sanierungsprozesse sind in bindigen Böden besonders temperaturabhängig, da sich erhöhte Dampfdrücke der Flüssigkeiten mit Änderungen des Wasserhaushalts und thermo-hydraulischen Prozessen wie dem Heat-Pipe-Effekt überlagern und letztere die Mobilität der Schadstoffe erheblich beeinflussen.

Häufig kommen Sanierungen unter Gebäuden oder in direkter Nähe zu Gebäuden in der ungesättigten oder der gesättigten Bodenzone zur Ausführung. Eine bautechnische Prüfung und Beweissicherung der Gebäude ist vor Sanierungsbeginn durchzuführen und während der Sanierung in regelmäßigen Abständen fortzusetzen. Der Schutz temperatur-sensibler Bauteile im Untergrund, wie beispielsweise erdverlegten Leitungen, kann mit dem THERIS-Verfahren sowohl durch ein fachgerechtes Design als auch durch entsprechende Betriebszustände einfach umgesetzt werden. Grundlage hierzu sind beispielsweise die Kenntnis erdverlegter Leitungen und eine Abstimmung mit dem jeweiligen Leitungsbetreiber zur Sensitivität einer Leitung bei Temperaturerhöhungen oder -schwankungen und dem Umfang der Dokumentation (Temperaturmessung) zur sicheren Vermeidung von Schäden.

3.5 Möglichkeiten und Grenzen der Radiofrequenz(RF)-Bodenerwärmung

3.5.1 Ungesättigte Zone

Im Gegensatz zur Erwärmung mit niederfrequenten Strömen (power-line-frequency [PLF] heating, six-phase heating) [BILSHAW-BIDDLE 2000; CKY INCORPORATED ENVIRONMENTAL SERVICES 1995] ist die RF-Bodenerwärmung nicht an das Vorhandensein einer bestimmten Bodenfeuchte gekoppelt [ROLAND ET AL. 2007a; ROLAND ET AL. 2008a]. Auch trockene Böden können mit hoher Effizienz bis zu Temperaturen weit oberhalb von 100°C erwärmt werden, weshalb das RF-Verfahren für den Einsatz in der ungesättigten Zone prädestiniert ist.

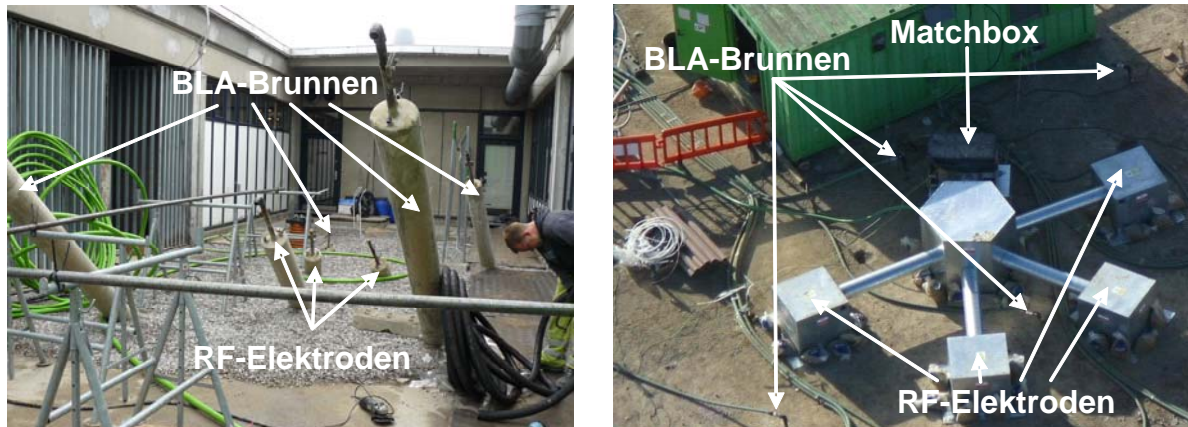


Abbildung 3.4: Varianten der Elektrodenanordnung zur RF-unterstützten Bodenluftabsaugung an verschiedenen Standorten (rechts: Elektroden befinden sich unter den Abschirmgehäusen)

Durch den Einsatz spezieller Stabelektroden [ROLAND ET AL. 2008b, ROLAND ET AL. 2007b] oder Antennen [ROLAND ET AL. 2001] können auch große Tiefen bzw. Sanierungsbereiche unter Gebäuden erreicht werden. Ebenso ist der Einbau von Stabelektroden in Schrägbohrungen möglich (Abbildung 3.4). Bei einer Kombination der RF-Bodenerwärmung mit einer BLA kann der Luftstrom im Bodenkörper als Wärmetransportmedium zur Homogenisierung des Temperaturprofils ausgenutzt werden. Der Elektrodenabstand kann dann einige Meter (meist 3 bis 5 m) betragen [HOLZER ET AL. 2010].

3.5.2 Gesättigte Zone

Obwohl die RF-Bodenerwärmung prinzipiell auch in der gesättigten Bodenzone eingesetzt werden kann, bieten sich auf Grund der hohen elektrischen Leitfähigkeit dort vor allem niederfrequente elektrische Verfahren an (PLF heating oder six-phase heating) [BILSHAW-BIDDLE 2000]. Wandlungsverluste von Netzenergie in HF-Energie entfallen hierbei (ca. 45 % bis unter 20 % bei neueren Generatoren) [VOLKMAR & WRONA 2010]. In vielen Fällen erstreckt sich die Kontamination jedoch über den Kapillarsaum an der Grenzfläche zwischen gesättigter und ungesättigter Zone (z.B. LNAPL). Bei einer RF-Bodenerwärmung sind dann große Temperaturgradienten in diesem Bereich zu vermeiden, um eine Rekondensation und eine Readsorption zu verhindern.

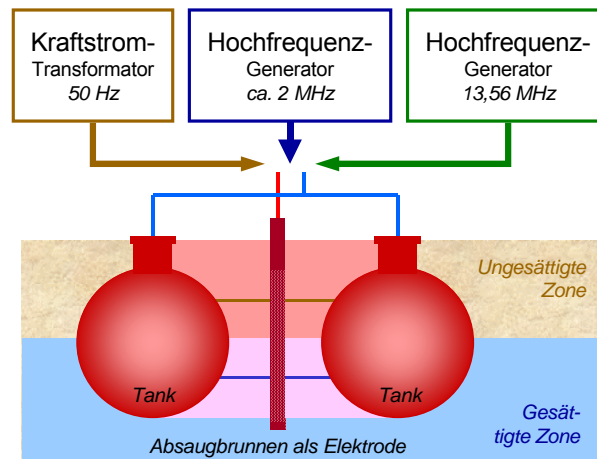


Abbildung 3.5: Kopplung mehrerer Frequenzen für die homogene Erwärmung des Kapillarsaums

Für derartige Einsatzfälle wurde ein Kombinationsverfahren aus ohmscher (niederfrequenter) und dielektrischer (hochfrequenter) Erwärmung entwickelt und bereits erfolgreich an einem Modellstandort (ehemaliges Lösungsmitteltanklager) erprobt [ROLAND ET AL. 2008b; ROLAND ET AL. 2007b; ROLAND 2008]. Über ein Elektrodenystem wird dabei Energie mit zwei unterschiedlichen Frequenzen in den Boden eingebracht (Frequenzkopplung ähnlich dem „Internet über die Steckdose“; Abbildung 3.5).

Geeignete Kopplungseinrichtungen sorgen dafür, dass die beiden Quellen (z.B. 50 Hz und 13,56 MHz) unabhängig voneinander geregelt werden können. Im Ergebnis gelingt es, den Grenzbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Bodenzone gleichförmig zu erwärmen (Abbildung 3.6), was mit einer Frequenz allein nicht gelänge [ROLAND 2008; ROLAND ET AL. 2008a].

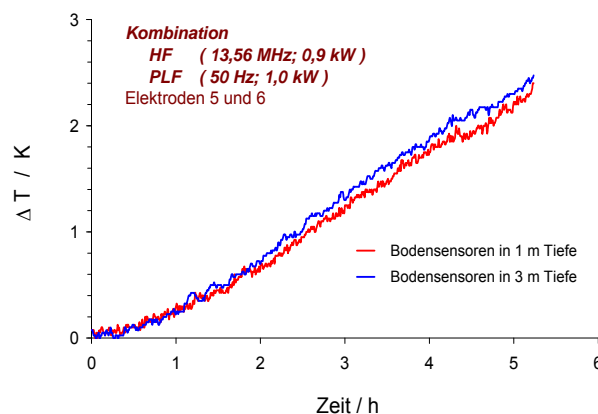


Abbildung 3.6: Homogene Erwärmung des Grenzbereichs zwischen gesättigter und ungesättigter Bodenzone (in 1 und 3 m Tiefe, GW-Spiegel bei 2 m u.GOK, Bodenart: sandiger Boden, z.T. Auffüllmaterial)

3.5.3 Hinweise zur Dimensionierung

Die erreichbaren Endtemperaturen hängen vor allem von der auf das Bodenvolumen bezogenen Leistungsdichte, vom Vorhandensein von Wasser im zu erwärmenden Bodenvolumen und vom Wärmetransport in die Umgebung einschließlich der thermischen Isolation an der Oberfläche ab. Hinsichtlich des Bodenmaterials bzw. der Bodenart gibt es aber praktisch keine Limitierung.

Die Entfernung zwischen den einzelnen RF-Stabelektroden beziehungsweise zwischen den Elektroden und den Absaugbrunnen der BLA sollte in einem Bereich von 3 – 5 m liegen, da der Wirkungsradius der RF-Bodenerwärmung zwischen 4 und 5 m beträgt. Richtwerte für die Obergrenze einer zu erwärmenden Bodenkubatur liegen bei 300 m³ im Fall eines 15 kW- und bei 500 m³ im Fall eines 30 kW-RF-Containersystems.

Bei einer Kombination mit einer BLA bestimmen vor allem deren Anforderungen die Gesamtauslegung des Prozesses. Prinzipiell kann mit der Bodenluftabsaugung durch Absaugen über die RF-Elektrode(n) in einer Art Gegenstromprinzip die Bodenluft von kalten in heiße Bodenbereiche transportiert werden. Der konvektive Wärmetransport ist hier der dielektrischen Erwärmung und der Wärmeleitung entgegen gerichtet. Dieses Regime wäre bei einer örtlich, um die RF-Elektrode(n) konzentrierten und somit stark begrenzten Kontamination sinnvoll. Zusätzlich wird so ein Schadstofftransport von wärmeren in kältere Bodenbereiche vermieden.

Möglich ist auch eine Anordnung, bei der die Absaugbrunnen um die RF-Elektrode(n) herum positioniert sind. Auf Grund der Strömungsrichtung (Gleichstromprinzip) unterstützt bei dieser Variante die Bodenluft durch konvektiven Wärmetransport die Ausbreitung der Wärme front im Boden. Mittels dieses Absaugregimes gelingt es, großflächiger kontaminierte Bodenbereiche zu erwärmen. Diese Herangehensweise ist bei hohen Schadstoffkonzentrationen über der unteren Explosionsgrenze in der abgesaugten Bodenluft zu bevorzugen.

3.6 Verfahrenskombinationen – Wann ist das sinnvoll?

3.6.1 Kombinierte Anwendung verschiedener TISS-Verfahren

Auch wenn mit einem konvektiven Erwärmungsverfahren (Dampfinjektion) eine konduktive Erwärmung bindiger Oberflächen erfolgen kann und ebenso sandig-kiesige Lagen mit festen Wärmequellen erhitzt werden können, sind derartige Anwendungen nur für geringmächtige Lagen, üblicherweise mit einer Mächtigkeit von wenigen Dezimetern, sinnvoll. Bei mehreren Metern mächtigen Wechsellagerungen von rolligen und bindigen Böden ist hingegen eine Kombination der beschriebenen TISS-Verfahren üblich, um auch Standorte mit komplexen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen effizient zu sanieren.

Ausgeführt wurden bislang u.a. mehrere TUBA-THERIS-Kombinationen, da sich beide Verfahren insbesondere durch die Anwendung in unterschiedlichen geologischen Strukturen abgrenzen. Sowohl eine laterale Anordnung von Sanierungsfeldern für einen konvektiven und einen konduktiven Wärmeeintrag als auch „Sandwich“-Konzepte, also eine vertikal überlagernde Anordnung der unterschiedlichen TISS-Verfahren, kamen zum Ein-

satz. Ein Beispiel für eine TUBA-THERIS-TUBA-Kombination ist im Projektdatenblatt G dargestellt. Hierbei wurde der Schadensherd im ersten und zweiten Aquifer (jeweils TUBA) einschließlich des tonigen Stauers (THERIS) komplett bis 18 m u.GOK gereinigt. Wichtig bei derartig komplexen Anlagen sind sowohl für den Heiz- als auch für den Absaugbetrieb getrennte Steuer-, Pumpen- und Überwachungssysteme je Sanierungshorizont, um den Randbedingungen in den jeweiligen Sanierungsbereichen bestmöglich Rechnung zu tragen. Ein detailliertes, zeitnahes Projektmanagement ist unerlässlich, um die Interaktionen zwischen den einzelnen Sanierungsbereichen zu erfassen und den Sanierungsprozess unter Ausnutzung von Synergieeffekten im laufenden Betrieb zu steuern.

Zur zeitgleichen Reinigung von ungesättigter und gesättigter Bodenzone mittels RF wurde ein Kombinationsverfahren aus ohmscher (niederfrequenter) und dielektrischer (hochfrequenter) Erwärmung entwickelt und erfolgreich an einem Modellstandort erprobt. Details sind Kapitel 3.5.2 zu entnehmen. Zusätzlich wäre aber auch eine Kombination der RF-Bodenerwärmung mit einer *in situ* katalytischen Oxidation [GEBRAUCHSMUSTER DE 202007014507.1, 2007] besonders bei hohen Konzentrationen an nicht-chlorierten organischen Schadstoffen in der Bodenluft möglich.

Die RF-Bodenerwärmung kam bislang noch nicht in Kombination mit den anderen TISS-Verfahren (TUBA und THERIS) zum Einsatz. Ähnlich der Kombination TUBA-THERIS wäre auch eine Arbeitsteilung von RF-Erwärmung und TUBA vorstellbar. In diesem Fall würde die RF-Technologie analog zu THERIS bindige Bodenschichten vorrangig in vertikaler Richtung erwärmen, während TUBA durch konvektiven Stoff- und Energietransport zur Erwärmung und zum Schadstoffaustrag in lateraler Richtung führt.

3.6.2 Kombination TISS mit anderen Sanierungs- & Sicherungsmaßnahmen

TISS lassen sich im Bedarfsfall gut mit anderen Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen kombinieren. Eine hydraulische Abstomsicherung im Grundwasser wird, wie beschrieben, bei TISS im Grundwasser empfohlen. Mit moderaten Kosten kann so eine potenzielle Schadstoffverfrachtung im Grundwasser unterbunden werden. Die Erfahrung zeigt, dass nur bei vereinzelt ausgeführten TISS im Grundwasser eine kurzzeitige, geringe Erhöhung der Schadstofffracht in der hydraulischen Sicherung gemessen wurde. Der Schadstoffaustrag über das Grundwasser ist gegenüber einem Austrag über die Bodenluft gering bis sehr gering, so dass die mit dem Grundwasser geförderten Schadstoffe bei einer TISS meist nur untergeordnet in die Massenbilanz eingehen.

Hydraulische Maßnahmen können bei TISS in der gesättigten Zone dazu genutzt werden, hier temporär eine ungesättigte Zone zu schaffen. Da der thermodynamische Aufwand zur Verdampfung großer Wasservolumina zur Schaffung eines erforderlichen Gasvolumens und zum Ausgleich der Wärmeverluste im Grundwasserkörper erheblich sein kann, können sich durch begleitende hydraulische Maßnahmen ökonomische Vorteile ergeben.

Eine Abreinigung von Schadensherden im Grundwasser auf Trinkwasserqualität mit einem einzigen Sanierungsverfahren ist, wenngleich technisch in Einzelfällen möglich, nicht immer effizient und oftmals ökonomisch unverhältnismäßig. TISS können jedoch bereits in

der Sanierungsplanung in zeitlicher und/oder räumlicher Abfolge mit anderen Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen kombiniert werden (Treatment-Train). TISS ermöglichen dann eine schnelle und sichere Entfernung von Schadensherden auf Belastungen, wie sie in der umliegenden Fahne vorliegen. Diese Restbelastungen können dann oftmals ökonomischer mit einer temporär limitierten, nachlaufenden hydraulischen Sicherung (Betriebszeit ca. 2 bis max. 5 Jahre) oder in Kombination mit Maßnahmen in der Schadstoff-fahne (z.B. Stimulierung der mikrobiologischen Aktivität) behandelt werden. Entsprechende Konzepte wurden bereits erfolgreich umgesetzt (s. Projektbeispiel Verfahrenskombination) und bei den BROWNFIELD BRIEFING AWARDS 2011 als „HIGHLY COMMENDED“ in der Kategorie „Best In-situ Treatment“ bewertet (siehe Projektbeispiel G im Anhang).

Die Art der Kombination unterschiedlicher Maßnahmen im Schadensherd und der Fahne kann sich auf die Betriebssteuerung und das Abschaltkriterium einzelner Maßnahmen, auch die einer TISS, auswirken. Veröffentlichungen zu ersten ausgeführten Projekten mit Verfahrenskombinationen sind in Vorbereitung.

3.7 Aktuelle Weiterentwicklungen der Sanierungsverfahren

3.7.1 Sanierung von Kluffgesteinen

Auch bei der Dampf-Luft-Injektion in Klufftaquiferen wirken die zuvor beschriebenen Sanierungsprozesse über eine Verdampfung der Schadstoffe. Im Gegensatz zu Lockergesteinsaquiferen geben bei Kluffgesteinen die Klüfte die verfügbaren Fließwegsamkeiten für Wasser, Dampf und Luft vor. Die „thermische Reichweite“ des Dampfraums in Klufftaquiferen kann aus stochastischen Gründen nicht berechnet werden. Sie kann jedoch in Analogie zu Porengrundwasserleitern rechnerisch abgeschätzt werden.

Im Rahmen einer Pilotierung in einem geklüfteten Sandsteinaquifer wurde über die Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches die Festgesteinsmatrix konduktiv über die Kondensation des Dampfanteils erwärmt [TRÖTSCHLER & KOSCHITZKY 2009, KOSCHITZKY ET AL. 2009], wobei durch die Dampfausbreitung in den Klüften die am Sandstein imprägnierten Schadstoffe desorbiert und verdampft wurden.

Das Vorhandensein einer effektiven pneumatischen Verbindung zwischen den Klüften in der gesättigten und ungesättigten Zone sowie den Bodenluftabsaugbrunnen wurde im Rahmen einer zusätzlichen, spezifisch für die beabsichtigte thermische *in situ*-Sanierung, durchgeführten Standorterkundung über Gastracertests nachgewiesen. Über einen hohen Luftanteil (ca. 10 Ma%) wurde ein gasförmiger Schadstofftransport erzeugt.

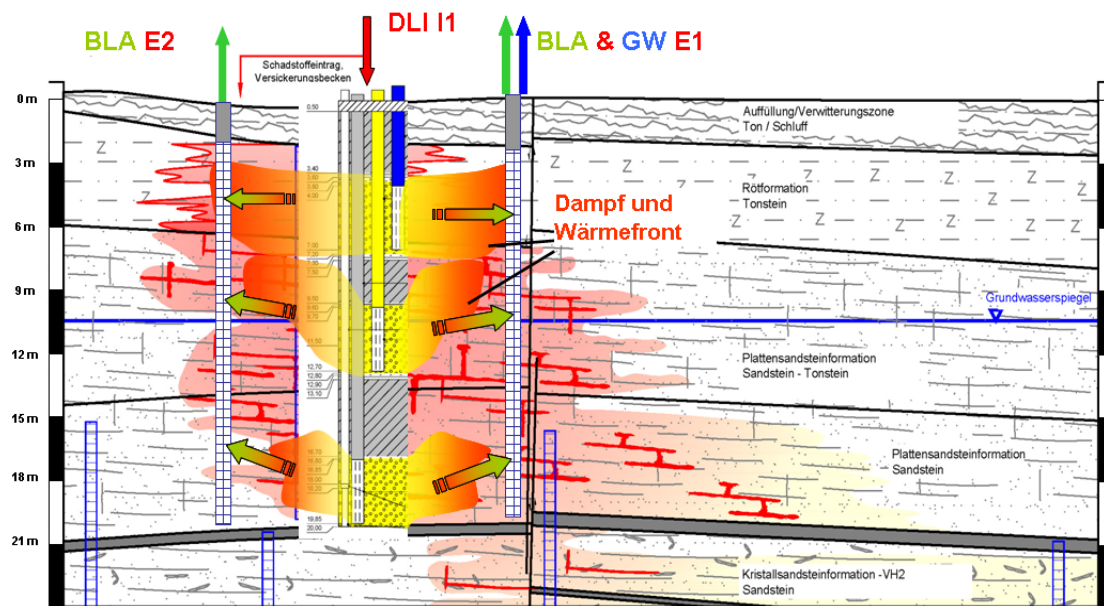


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der Standortsituation mit Injektions- und Extraktionsbrunnen im Pilotfeld

Im oberen Aquifer und in der ungesättigten Zone, wurde eine thermische Reichweite von mehr als 10 m Durchmesser erzielt. Insgesamt konnten in 7 Monaten mehr als 510 kg LHKW entfernt werden. Die thermisch induzierte Steigerung der Sanierungseffizienz im Bereich des oberen Aquifers und der ungesättigten Zone, sowie der Minderung der Emissionen von 210 g LHKW/d auf 37 g LHKW/d führten zur Entscheidung für eine thermische *in situ*-Sanierung des gesamten Standorts [KOSCHITZKY ET. AL., 2009].

3.7.2 Verbesserte Mehrphasenschöpfung

Eine Weiterentwicklung der TISS ist die thermische Verbesserung der Fließeigenschaften von flüssiger Schadstoffphase zur Steigerung einer Flüssigphasenförderung. Erste Untersuchungen mit Ölphasen im Labor und im Feld zeigten gute bis sehr gute Ergebnisse zur Steigerung des Schadstoffaustrags unter anderem bei Teerölen. Veröffentlichungen hierzu stehen noch aus.

3.8 Rechtliche Aspekte, Genehmigungsfähigkeit

Grundlage für die Bearbeitung von Altlasten, d.h. auch für den Einsatz von *in situ*-Sanierungsverfahren, sind in Deutschland das Bundesbodenschutzgesetz [BBodSchG 1999] und die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung [BBodSchV 1999] in Verbindung mit den jeweiligen landesrechtlichen Regelungen.

In situ-Sanierungsverfahren in der ungesättigten Bodenzone oder im Grundwasser sind wasserrechtlich erlaubnispflichtig. Daher kommt beim Einsatz von TISS - auch beim Einsatz in der ungesättigten Zone - genehmigungsrechtlich oft das Wasserhaushaltsgesetz

(WHG) in der jeweils aktuellen Fassung (derzeit 01.03.2010) zum Tragen. Gemäß § 8 Abs. 1 WHG bedarf die Benutzung eines Gewässers (auch des Grundwassers) der Erlaubnis oder der Bewilligung, soweit nicht durch das Gesetz oder auf Grund des Gesetzes erlassener Vorschriften etwas anderes bestimmt ist. Die Anwendung physikalischer, hier thermischer, *in situ*-Sanierungsverfahren erfüllt die Benutzungstatbestände von § 9 Abs. 1 und 2 WHG. Gemäß § 10 Abs. 1 WHG gewährt die Erlaubnis, ein Gewässer zu einem bestimmten Zweck in einer nach Art und Maß bestimmten Weise zu benutzen. Zuständig für die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis sind die Landkreise und kreisfreien Städte als untere Wasserbehörde.

Darüber hinaus können weitere Regelungsbereiche – vorrangig die Rechtsgebiete des Immissionsschutz-, des Bauordnungs-, des Abfall- und des Naturschutzrechts – berührt und eine Reihe der damit verbundenen behördlichen Genehmigungen erforderlich sein.

Die zu erarbeitenden Planungsunterlagen müssen die Vorgaben und Genehmigungserfordernisse der einschlägigen Gesetze und Verordnungen des Bundes und der Länder, der Technischen Regelwerke, Unfallverhütungsvorschriften, Berufsgenossenschaftlichen Richtlinien, Sicherheitsregeln, Grundsätze, Merkblätter und DIN-Normen in der jeweils gültigen Fassung berücksichtigen. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind jeweils im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen. Bei Installation und Betrieb von TISS-Anlagen sind die gesetzlichen Anforderungen an den Gesundheits- und Arbeitsschutz einzuhalten.

3.9 Ökologische und ökonomische Betrachtungen

3.9.1 Ökobilanzen, energetische Bewertung

Ökobilanzen [DIN 14040 ff] können als „*Instrument zur (...) Erfassung der Umweltauswirkungen*“ [SCHRENK 2005] von Altlastensanierungsverfahren eingesetzt werden. Hierbei werden die Auswirkungen eines technischen Systems (hier Boden- und Grundwassersanierung) auf die Umwelt untersucht (z.B. Emissionen, Abfälle, Verbrauch an Ressourcen), wobei in der Bilanzierung zwischen Verbrauchsmengen (z.B. Energie- und Wasserverbrauch), auftretenden Stoff- und Energieströmen (Sachbilanzen: z.B. Materialherstellung, Abfallentstehung, Transport) und Wirkungen (z.B. von Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas) unterschieden wird. Exemplarisch wurden für unterschiedliche Standorte ausgeführte „kalte“ BLA und die sich anschließenden TISS-Maßnahmen anhand von Felddaten mit einer speziellen Software zur Umweltbilanzierung von Altlastensanierungen [LFU BW 1999] analysiert und bewertet [HIESTER & SCHRENK 2005].

Für TISS-Verfahren ergab sich aus den Felddaten standortunabhängig in Folge kurzer TISS-Betriebszeiten eine Verringerung der spezifischen Energieverbräuche gegenüber einer „kalten“ BLA. Tendenziell ähnliche Ergebnisse zeigten Vergleichsbilanzen von TISS mit anderen „konventionellen“ Sanierungsverfahren [HIESTER ET AL 2003, SCHRENK 2005].

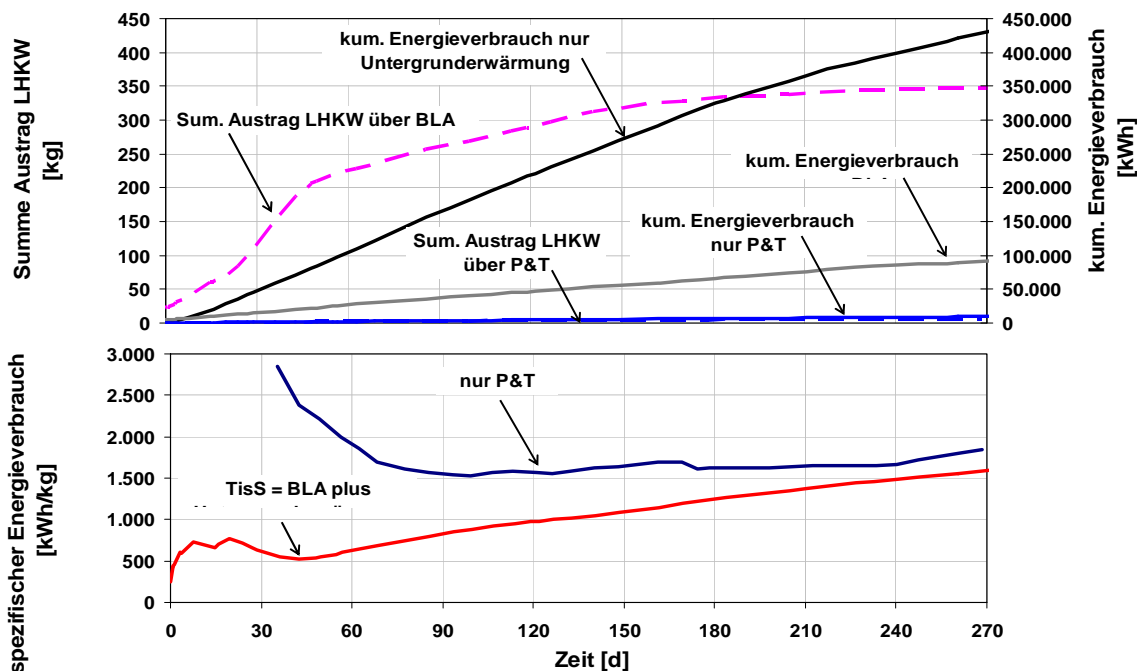


Abbildung 3.8: Projektbeispiel zum spezifischen Energieverbrauch bei einer THERIS-Sanierung. Oben: kumulierter Schadstoffaustrag und Energieverbrauch, getrennt nach Bodenluftabsaugung, Untergrunderwärmung und Abstromsicherung (P&T). Unten: Spezifischer Energieverbrauch für TISS und P&T.

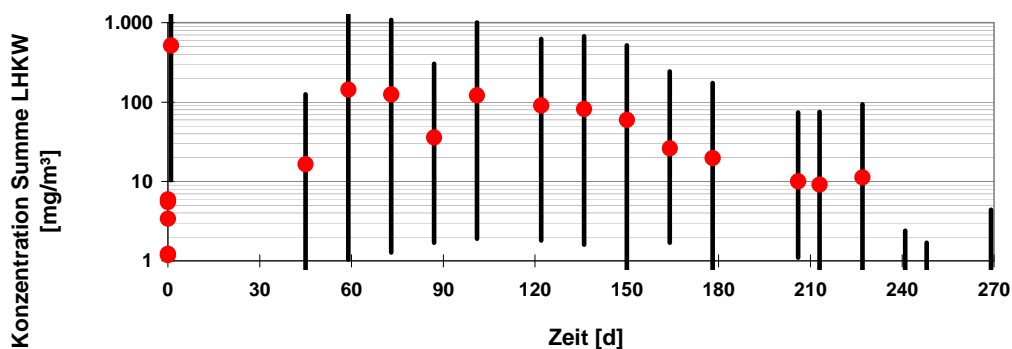


Abbildung 3.9: Ergänzend zu Abbildung 3.8 der Verlauf der LHKW-Belastung an allen BL-Pegeln. (Schwankungsbreite (Max-Min-Werte) und Mittelwerte (Punkte))

Tabelle 8: (Betriebs-) Energieverbräuche ausgewählter Projekte

Projekt	TISS-Verfahren	UZ / GZ (maßgebliche Bodenart)	„kalte“ BLA			TISS		
			Schadstoffaustrag	Energie*	spez. Energie**	Schadstoffaustrag	Energie*	spez. Energie***
			[kg]	[MWh]	[kWh/kg]	[kg]	[MWh]	[kWh/kg]
Biswurm: Pilotierung (500 m ³ Kluftgestein)	TUBA	UZ + Kluft-GW	117	13	111	394	315	797
		DLI in GZ				15,4	27	1.753
		GW-Förderung	12,5	21	592	22	61	2.795
Zeititz Pilotierung (1.500 m ³ Lockergestein)	TUBA	UZ	4.050	21	5	2.521	275	109
		DLI in GZ				300	150	499
		GW-Förd.	16	3	156	56	10	180
Hamburg II a	THERIS	UZ (Lehm)	5,05	3	657	1.525	326	214
UK-NH	THERIS	Kapillarsaum + GZ (toniger Sand)	1,03	3	2.906	110	65	591
Idstein	THERIS	UZ (Lehm mit Schichtwasser)	0,06	0,7	>11.500	19	21	1.100
Landshut	THERIS	UZ (Quartär, Auelehm)	19	18	956	527	572	1.084
Manston (Ecologia)	RF	UZ (Kalkgestein)	32	2	68	913 ¹	56	61
						951 ²	27	29
Zeititz	RF	UZ (gemischt)	600	2,5	4	660 ¹	55	83

* Die Angaben zum Energieverbrauch beziehen sich auf thermische Energie (Dampferzeugung) und elektrische Energie (Sanierungsanlage, Heizelemente, Match-Box)

** „Kalte“ BLA: spezifischer Energieverbrauch bei Inbetriebnahme = bester Wert, da im Sanierungsverlauf der spez. Energieverbrauch aufgrund der rückläufigen Austräge und gleichbleibendem Energieverbrauch ansteigt.

*** TISS: spezifischer Energieverbrauch für die Gesamtsanierung einschließlich BLA, GW-Sicherung und Reinigung von Luft und Wasser.

¹ Die Bilanzierung der entfernten Schadstoffmenge erfolgte auf Grund des Vorhandenseins eines Schadstoffgemisches auf Basis des organischen Kohlenstoffs.

² Während der Sanierungsmaßnahme wurde neben einem parallelen auch ein alternierender Betrieb von RF-Erwärmung und BLA getestet. Aus den für diese Variante gemessenen Austragsraten wurden für einen ähnlichen Gesamtaustrag an Schadstoffen die dargestellten Kennzahlen berechnet.

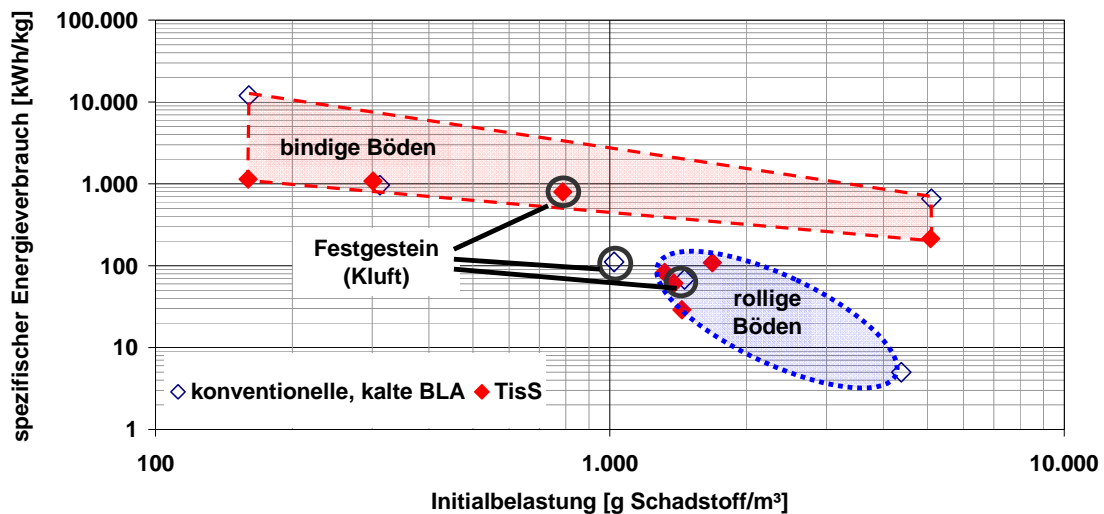


Abbildung 3.10: Spezifische Energieverbräuche von Bodensanierungen (BLA und TISS) in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung und der Bodenbeschaffenheit (Projektbeispiele aus Tabelle 8)

Da die meiste Energie beim TISS-Betrieb zur Untergrunderwärmung und zur Schadstoffförderung aufgewandt wird, ist eine vereinfachte Bewertung von konventioneller Absaugung und TISS über die schadstoffspezifische Betriebsenergie zur Förderung eines Kilogramms Schadstoff möglich. Exemplarisch sind in Abbildung 3.8 die Schadstoffausträge und Energieverbräuche bei einer THERIS-Sanierung in der ungesättigten Zone über die BLA und parallel betriebene hydraulische Sicherung (P&T) dargestellt. In Abbildung 3.9 ist zudem zur Verdeutlichung des Sanierungsfortschritts die Entwicklung der Bodenluftkonzentrationen während dieser TISS aufgetragen (Auswertung von >20 BLA-Pegeln).

Das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen [LUA NRW [2001] gibt Anhaltswerte zur energetischen Effizienzbewertung einer Absaugmaßnahme. Exemplarisch wurden spezifische Betriebsenergien von TISS-Standorten zusammengestellt (Tabelle 8). Die geringsten Energieverbräuche zeigten sich bei hoch belasteten Schadensherden und gut durchlässigen Böden (Abbildung 3.10).

3.9.2 Definition von Sanierungszielen bei TISS

Grundlage für ein TISS-Design sind neben einer Abgrenzung eines Schadensherdes, seine Lage und Beschaffenheit und einer integralen Standortbewertung einschließlich Benennung der angestrebten Sanierungsziele, immer auch die standortspezifischen Randbedingungen (u.a. verfügbarer Platz, Gebäudenutzung, angestrebte Sanierungszeit).

Die angestrebten Sanierungsziele für einen Standort werden üblicherweise im Rahmen der Erstellung eines Sanierungsplans bzw. eines Sanierungsbescheids festgelegt und bedürfen der behördlichen Zustimmung. TISS können in diesem Zusammenhang eine

nachhaltige Herdsanierung ermöglichen und sind daher oft der entscheidende Schritt zur Entfernung eines Großteils des Schadstoffinventars aus dem Untergrund. Bei vielen Standorten schließen sich einer TISS im Herd weitere Maßnahmen in der Fahne an (z.B. zeitlich befristete, der TISS nachlaufende Abstomsicherung). In diesen Fällen ist es für TISS meist wirtschaftlicher, ungeachtet ihrer technischen Leistungsfähigkeit zur Beseitigung kleinerer Restbelastungen, Betriebs- und Abschaltkriterien bei moderat höheren Restbelastungen im Herd unter Berücksichtigung der weiteren Maßnahmen in der Fahne zu formulieren. Eine Übernahme von abschließenden, langfristigen Sanierungszielen für einen Gesamtstandort auch für TISS im Schadensherd ist nur in Einzelfällen anzuraten.

Sinnvolle Abschaltkriterien für eine TISS können ökonomische und ökologische Lösungen hingegen unterstützen. Hierbei sollten u.a. die Entwicklung der Austragsfrachten über die BLA und das Grundwasser (Bewertung der Emissionen) und der spezifische Energieverbrauch je Kilogramm Schadstoff als Abschaltkriterium herangezogen werden. Voraussetzung hierfür sind standortspezifisch das Erreichen einer definierten Zieltemperatur (i. d. R. Gemischsiedetemperatur) und das Halten dieser über einen definierten Zeitraum unter Beachtung der Entwicklung der Schadstoffausträge bzw. deren Minderung im zeitlichen Verlauf. Ebenso sind auch die langfristig angestrebten Sanierungsziele (angestrebte „Rest-Schadstoffkonzentration“ oder das verbleibende Schadstoffinventar) zu berücksichtigen.

3.9.3 Wirtschaftlichkeit von TISS

Eine Monetarisierung von Ergebnissen aus Ökobilanzen ist nicht sinnvoll möglich. Bei einer ökonomischen Bewertung können andere, projektspezifisch relevante (Zusatz-) Positionen (beispielsweise Gebäudemonitoring, Schutzeinrichtungen und Monitoringmaßnahmen für das Umfeld, überfahrbare Sanierungsinstallationen u.ä.) die Sanierungskosten erhöhen, ohne die Ökobilanz nennenswert zu beeinflussen.

Wirtschaftlich einsetzbar sind TISS in der Regel bei der Sanierung von Schadensherden. Große TISS-Felder verringern generell die spezifischen Sanierungskosten je Einheitsvolumen [pro m³ Boden]. Um die Vielzahl an Einflussparametern bei einer Standortbewertung zu beachten, sind standortspezifische Kostenschätzungen unerlässlich.

4 Zusammenfassung

Thermische *in situ*-Sanierungen (TISS) mittels Dampf-Luft-Injektion, fester Wärmequellen oder durch den Einsatz von Radiofrequenz-Energie ermöglichen eine schnelle, zuverlässige und wirtschaftliche Sanierung von Schadensherden. Organische Schadstoffe können aus gut durchlässigen, rolligen Böden ebenso wie aus gering durchlässigen, bindigen Böden und aus Kluffgesteinen innerhalb von wenigen Monaten zuverlässig entfernt werden.

TISS haben sich bei Sanierungen im Bestand, in Innenstädten, unter und neben Gebäuden ebenso wie auf (ehemaligen) Industriestandorten bewährt. Aufgrund ihrer Effizienz kommen sie zusehends auch bei Flächenrecyclingprojekten zum Einsatz, um hier schnelle Herdsanierungen und Projektentwicklung miteinander zu verknüpfen.

Der vorliegende Leitfaden gibt einen Überblick über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, zeigt aber auch die Grenzen der einzelnen Verfahren auf (Tabelle 9). TISS-Verfahrenskombinationen untereinander und mit konventionellen Sanierungsverfahren sind möglich und können unter dem Aspekt einer raschen Sanierung bei komplexen Aufgabenstellungen sinnvoll sein.

Voraussetzung für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Sanierungskonzepte mit TISS sind, insbesondere bei Sanierungen in der gesättigten Zone, neben einer guten Erkundung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse eine zuverlässige Abgrenzung des Schadensherdes. Die Sanierungszielwerte und Überwachungsmethoden sind standortspezifisch im Rahmen einer Risikobewertung unter Berücksichtigung der (künftigen) Nutzungen von Grundstück, Boden und Grundwasser frühzeitig im Zuge der Genehmigungsplanung mit den Behörden unter Beachtung der geltenden gesetzlichen Regelungen und der Verhältnismäßigkeit der Maßnahmen einvernehmlich festzulegen. (vgl. u.a. Wirkungspfade BBodSchV 1999). Hinweise zu Grenzwerten und Bewertungsmethoden unter Berücksichtigung von Emissionen finden sich u.a. im Bundes- und den Landesbodenschutzgesetzen, den Merkblättern und Handlungshilfen der Länder und den Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) und Wasser (LAWA) in der jeweils gültigen Fassung. Beispielsweise kann bei punktuellen Schadstoffquellen eine erfolgreiche TISS des Schadensherdes eine Änderung des nachsorgenden Grundwasserschutzes bewirken [LABO / LAWA 2006].

Tabelle 9: Vornehmliche Anwendungsbereiche und Randbedingungen von TISS

Vornehmliche Anwendungsbereiche		Dampf-Luft-Injektion (DLI / TUBA)	Feste Wärmequellen (THERIS)	Radiofrequenzenergie (RF)
UNGESÄTTIGTE BODENZONE				
Bodenart				
ROLLIG	Kies	++	○	+
	Sand	++	○	++
	schluffiger Sand, sandiger Schluff	+	++	++
BINDIG	Schluff	○	++	++
	Lehm, Mergel	-	++	+
	Ton	-	++ bis +	+
Schadstoffe				
LHKW		++	++	++
BTEX		++	++	++
MKW		○	+ bis ○	+ bis ○
PAK		-	○ bis -	○
GESÄTTIGTE BODENZONE				
Bodenart				
AQUIFER	Kies	+ bis ○	-	○ bis -
	Sand	++	-	○ bis -
	schluffiger Sand, sandiger Schluff	+	+ bis ○	+
AQUITARD	Schluff	-	+	++ bis +
	Lehm, Mergel	-	++ bis +	+
	Ton	-	++ bis +	+
Schadstoffe				
LHKW		++ bis +	++ bis +	++ bis +
BTEX		++ bis +	++ bis +	++ bis +
MKW		○	+ bis ○	+ bis ○
PAK		○	○	○
ANLAGENKOMPONENTEN				
Energieversorgung für den Heizbetrieb		Gas, Diesel, (elektrisch)	elektrisch	elektrisch
BLA – Absaugaggregat		Seitenkanalverdichter (SKV)	Vakuumpumpen (VP)	SKV, VP
Kühlung entnommener Bodenluft und Kondensatabscheidung		zwingend	meistens empfehlenswert	meistens empfehlenswert
Abluftreinigung		z.B. Luft-Aktivkohle, katalytische Oxidation		
SONSTIGE EINSATZBEREICHE				
Verkürzung Sanierungszeit gegenüber „kalter“ BLA		> 90 %	> 90 %	> 90 %
Sanierung auf frei zugänglichen Flächen		++	++	++
Sanierung unter und neben Gebäuden		++	++	++
Erhalt der Gebäudenutzung während einer thermischen <i>in situ</i> -Sanierung		++ bis +	++ bis +	++ bis +
++	sehr gut			
+	gut			
○	bedingt möglich / Einzelfallprüfung nach Randbedingungen			
-	ungünstige Randbedingungen für eine wirtschaftliche Anwendung, Einzelfallprüfung notwendig			

5 Bildnachweise

Die Bilder in diesem Leitfaden wurden von den nachfolgenden Firmen und Instituten zur Verfügung gestellt und unterliegen dem Copyright.

RECONSITTE GMBH

Titelbild, Abb. 1.1 – 2.5. 3.3, 3.8 – 3.10

VERSUCHSEINRICHTUNG ZUR GRUNDWASSER- UND ALTLASTENSANIERUNG (VEGAS), UNIVERSITÄT STUTTGART

Abb. 3.1 – 3.2, 3.7

ECOLOGIA ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD

Abb. 3.4 rechts

HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG GMBH (UFZ)

Abb. 3.4 links und 3.5 – 3.6

6 Weiterführende Literatur / Literaturübersicht (Auswahl)

ATEX (2008): Leitlinien zur Anwendung der Richtlinie 94/9/EG des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen

ATKINS, P. W. (1988): Physikalische Chemie. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1 Auflage. ISBN 3-527-25913-9.

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.

BARBIAN, N.; ROSS, I.; WEBB, M.; HIESTER, U. & W. FRANSE (2009): Thermal Remediation Via IN-SITU Heating Probes for Remediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants. Contaminated Site Management in Europe (CSME), Conference-Proceedings, Redox Technologies, Inc., UWO Research Park, 100 Collip Circle, Suite 110, London, Ontario N6G 4X8 Canada (Publ.), 27-29 October.2009 NH Gent Belfort Hotel, Gent, Belgium.

BAYRISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2004): Grundwasser – Der unsichtbare Schatz. Spektrum Wasser 2, München, ISSN 3-937911-01-4

BBODSCHG – BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (1999): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, vom 17. März 1998 (BGBl. I 1998 S. 502, 2001 S. 2331; 09.12.2004 S. 3214) Inkrafttreten zum 1. März 1999

BBODSCHV - BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG (1999), (BGBl. I 1999 S. 1554; 23.12.2004 S. 3758; 22.07.2009 S.2542; 31.07.2009 S. 2585) GI.-Nr.: 2129-32-1 vom 12. Juli 1999

BETZ, C. (1998): Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie; Mitteilungsheft Nr. 97, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 1998, ISBN 3-921694-97-3.

BGR 104 (2005): Explosionsschutz-Regeln Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften Fachausschuss „Chemie“, März 2005

BGR 128 (1997): BG-Regel Kontaminierte Bereiche, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften Fachausschuss „Tiefbau“, April 1997

- BALSHAW-BIDDLE, K.; OUBRE, C.L.; WARD, C.H.; DABLOW, J.F.; PEARCE, J.A.; JOHNSON, P.C. (2000): Steam and Electroheating Remediation of Tight Soils, CRC Press, Boca Raton
- BlmSCHV, 4. (1997): Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Art. 1 d. V zur Neufassung und Änderung von Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BlmSchV), Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643)
- BLUME, H.-P. (HRSG.) (1990): Handbuch des Bodenschutzes, Bodenökologie und –belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. ecomed, Landsberg/Lech.
- BUCHENHORST, D.; HOLZER, F.; ROLAND, U.; KOPINKE, F.-D. (2009): Abschlussbericht zum Teilvorhaben des SAFIRA-II-Projektes „Radiowellen-unterstützte Bodensanierung am Standort des ehemaligen Hydrierwerkes Zeitz (RF-Tool)“, Leipzig
- CKY INCORPORATED ENVIRONMENTAL SERVICES (1995): Six phase soil heating, Innovative Technology Summary Report, U.S. Department of Energy, Oak Ridge
- ECOLOGIA ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. (2011): Firmeninformationen <http://www.ecologia-environmental.com/index.php/remediation/in-situ-remediation/in-situ-soil-radio-frequency-heating/>. 10.02.2011, 12:00
- FÄRBER, A. (1997): Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ Sanierungstechnologie; Mitteilungsheft Nr. 96, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 1997, ISBN 3-921694-96-5
- FÄRBER, A & U. HIESTER (2006): Thermische Verfahren zur Bodensanierung - Wirkungsweisen und Anwendungsgrenzen. Altlasten-annual 2006, pp. 43-53, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- GESTIS STOFFDATENBANK (2011): <http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll?f=templates&fn=main-hit-h.htm&2.0>, 02.02.2011, 12:00
- HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG GMBH – UFZ (2008): Vorrichtung zur thermisch unterstützten in-situ-Reinigung von mit Schadstoffen belasteten Materialien, Gebrauchsmuster DE 202007014507.1, vom 13.12.2007 (angemeldet am 11.10.2007).
- HIESTER, U. (2009): Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen: Mitteilungsheft Nr. 178, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 2009, ISBN: 978-3-933761-82-8.
- HIESTER, U.; KOSCHITZKY, H.-P.; FÄRBER, A. (2004): THERIS: Effizienzsteigerung der Bodenluftabsaugung durch Feste Wärmequellen – Entwicklungspotentiale neuer Einsatzbereiche, In: Barczewski, B., Koschitzky, H.-P., Weber, K. & R. Wege (eds.): VEGAS–Statuskolloquium, Universität Stuttgart. 131. Institut für Wasserbau, 2004, 88-97. ISBN: 3-933761-34-4
- HIESTER, U. & M. MÜLLER (2010): THERIS - CKW-Sanierung mit dem THERIS-Verfahren: Design, Betrieb, Ergebnisse. 2. ÖVA Technologieworkshop "Thermisch unterstützte In-Situ Sanierungsverfahren", Wien, 28.10.2010, Org.: ÖVA Österreichischer Verein für Altlastenmanagement.
- HIESTER, U. & V. SCHRENK (2005): In-Situ Thermal Remediation: Ecological and Economic Advantages of the TUBA and THERIS Methods. S. 1581 - 1587. - In: Uhlmann, O., Annokée, G.-J., & Arendt, F. (2005): ConSoil 2005. Proc. 9th Int. FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems, 3 - 7 October 2005, Bordeaux/France
- HIESTER, U. & V. SCHRENK (2008): Thermally enhanced in-situ remediation beneath buildings during their continued usage new source removal options for urban sites. ConSoil 2008. Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO-Conference on Soil-Water Systems in cooperation with Provincia die Milano, 3.-6. June 2008, pp. 143-150, Stella Polare Congress Centre - Fiera Milano, Italy

- HIESTER, U. & V. SCHRENK; WEISS, T. (2003): Environmental Balancing of 'cold' SVE and thermally enhanced soil vapour extraction – practical support for decision makers. In: Annokkée G.J., Arendt F. & O. Uhlmann (eds.): 8. International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil (ConSoil 2003-Proceedings) (12. - 16. Mai 2003, Gent, Belgium). The Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), 2003, 2253-2262. Poster Session.
- HOLZER, F.; LIPPIK, D.; HEIMBOLD, T.; ROLAND, U.; KOPINKE, F.-D.; SCHENK, J. (2010): Modular System Concept for Soil Heating Using Radio-Frequency Energy IAENG Transactions on Engineering Technologies, Volume 4, American Institute of Physics, Melville New York 2010; AIP Conference Proceedings 1247 (2010) 136 - 144.
- ITVA (2002): RICHTLINIE H1-1/02 Bodenluftabsaugversuch. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. Berlin
- ITVA (2010): Arbeitshilfe H1-13: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. Berlin
- KASEVICH, R.S. (1998): Understand the potential of radiofrequency energy, Chem. Eng. Prog., 75-81.
- KLEINKNECHT, S. (2011): Steam Injection Technique for In Situ Remediation of Chlorinated Hydrocarbons from Low Permeable Saturated Zones - Experiment and Numerical Approach. Diplomarbeit, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2/2011 (<http://www.hydrosys.uni-stuttgart.de/institut/hydrosys/publikationen/paper/kleinknecht-Diplom.pdf>.)
- KOSCHITZKY, H.-P. & U. HIESTER (2005): Thermische In-situ-Sanierungen: Ökologische und ökonomische Vorteile der Verfahren TUBA und THERIS. Altlastensymposium 2005 (6.-7. Juni 2005, Weiden i. d. OPf.), Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH, München, 6/2005. S. 108-113
- KOSCHITZKY, H.-P.; TRÖTSCHLER, O.; LIMBURG, B.; HIRSCH, M.; WEIß, H. (2007): Pilotanwendung DLI Zeit: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann (Hrsg.), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2007.-Nr. 165, S. 52-62, ISBN: 3-933761-69-7
- KOSCHITZKY, H.-P. & O. TRÖTSCHLER (2008): Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung. In: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T. (eds.): Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. 55. Aktual., 3. Aufl., C.F. Müller Verlag, 5/2008, S. 5716 ff. ISBN: 978-3-8114-9700-9.
- KOSCHITZKY, H.-P.; TRÖTSCHLER, O.; LIDOLA, B.; EPP, M.; SCHULZE, S. (2009): CKW-Schaden im Kluffgestein. Neues Anwendungsfeld der thermischen In-situ-Sanierung mit Dampf-Luft-Injektion. Terra Tech (Zeitschrift für Altlasten und Bodenschutz) 12, S. TT10.
- KOSCHITZKY, H.-P. & O. TRÖTSCHLER (2010): Thermische In-Situ-Sanierungsverfahren Verfahrensprinzipien und Anwendungsbereiche. 2. ÖVA Technologieworkshop "Thermisch unterstützte In-Situ Sanierungsverfahren", Wien, 28.10.2010, Org.: ÖVA Österreichischer Verein für Altlastenmanagement.
- KOSCHITZKY, H.-P.; TRÖTSCHLER, O.; DENZEL, S.; PURKHOLD, C.; MAIER-OBWALD, 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, Seite 101-117.
- KOSCHITZKY, H.-P. (2011): Innovative In-situ-Sanierungsverfahren – die ITVA-Arbeitshilfe zur Unterstützung bei der Altlastensanierung. Altlasten – annual 2011, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, S.43-53.
- LIDE, DAVID R. (1998-1999): Hrsg. CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, USA, 79. Auflage
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA), LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN (LABO) (2006): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen. Unterausschuss „Gefahrenabwehr bei Grundwasserverunreinigungen und Grundwas-

sergefährdungen“ der Ständigen Ausschüsse „Grundwasser und Wasserversorgung“ der LAWA und „Altlasten“ der LABO.

- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (LFU) (1995): Hydraulische und pneumatische *in-situ* Verfahren. Materialien zur Altlastenbearbeitung Band 16, Karlsruhe.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1999): Umweltbilanzierung von Altlastensanierungsverfahren. Software-CD, Karlsruhe.
- LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN LUA NRW (2001): Arbeitshilfe Bodenluftsanierung. Ergebnisse einer Recherche zum Stand der Bodenluftsanierungspraxis mit Handlungsempfehlungen für die Planung und Durchführung von Bodenluftsanierungsmaßnahmen, ISSN 1432-3575, Essen 2001
- MAINI, G.; HUON, G.; WILL, F.; ROLAND, U. (2010): Treatment of Hydrocarbon Contamination in Chalk using *in situ* Radio-Frequency Heating (ISRFH) at a Former Petrol Filling Station in Kent, England 7th International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, California
- OCHS, S.O. (2006): Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations, Mitteilungsheft Nr. 159, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 2006, ISBN 3-933761-63-8
- REID, R.C.; PRAUSNITZ, J.M.; POLING, B.E. (1987): The Properties of Liquids and Gases. McGraw Hill, New York, USA, 4. Auflage
- ROLAND, U. (2008): Dielektrische Erwärmung mit Radiowellen in der Umwelttechnik, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken
- ROLAND, U.; BERGMANN, S.; HOLZER, F.; KOPINKE, F.-D. (2010): Influence of *in-situ* Steam Formation by Radio-Frequency Heating on Thermodesorption of Hydrocarbons from Contaminated Soil; Environ. Sci. Technol. 44; 9502 - 9508
- ROLAND, U.; BUCHENHORST, D.; HOLZER, F.; KOPINKE, F.-D. (2008a): Engineering Aspects of Radio-Wave Heating for Soil Remediation and Compatibility with Biodegradation; Environ. Sci. Technol. 42, 1232-1237.
- ROLAND, U.; HOLZER, F.; BERGMANN, S.; BUCHENHORST, D.; KOPINKE, F.-D. (2008c): Thermisch unterstützte Bodenreinigung durch direkte Erwärmung mittels Radiowellen Teil 2: Kombination mit unterschiedlichen Sanierungsverfahren; Chem. Ing. Tech. 80, 295-306.
- ROLAND, U.; HOLZER, F.; BUCHENHORST, D.; KOPINKE, F.-D. (2007a): Thermisch unterstützte Bodenreinigung durch direkte Erwärmung mittels Radiowellen Teil 1: Grundlagen und verfahrenstechnische Aspekte; Chem. Ing. Tech. 79, 1667-1678.
- ROLAND, U.; HOLZER, F.; BUCHENHORST, D.; KOPINKE, F.-D. (2007b): Results of Field Tests on Radio-Wave Heating for Soil Remediation; Environ. Sci. Technol. 41 8447-8452.
- ROLAND, U.; HOLZER, F.; KOCH, M.; NÜCHTER, U.; LIPPIK, D.; BUCHENHORST, D.; KOPINKE, F.-D. (2008b): Thermisch unterstützte Bodenreinigung durch direkte Erwärmung mittels Radiowellen Teil 3: Referenzversuche im Feldmaßstab; Chem. Ing. Tech. 80, 573-585.
- ROLAND, U.; HOLZER, F.; KOPINKE, F.-D. (2011): Ambivalent Role of Water in Thermodesorption of Hydrocarbons from Contaminated Soil; Environ. Sci. Technol. 45; 732 – 737
- ROLAND, U.; KOCH, M.; KOPINKE, F.-D.; NÜCHTER, U.; MOTHESS, J.; SCHREIBER, H. (2001): Selektive Bodenerwärmung mittels Hochfrequenzenergie zur Optimierung von Bodensanierungsverfahren; Umwelt 31, 38-43.
- SANDER, R. (1999): Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environment Chemistry. <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html> 08. April 1999. Version 3.
- SCHMIDT, R.; FÄRBER, A.; BETZ, CHR.; KOSCHITZKY, H.-P. (2000): Dampfinjektion zur *In-situ*-Sanierung der ungesättigten Zone. In: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T. (eds.): Hand-

- buch der Altlastensanierung und Flächenmanagement. 2. Aufl., C.F. Müller Verlag, 12/2000, S. 5715 ff. ISBN: 978-3-8114-9700-9.
- SCHMIDT, R. (2001): Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte, Mitteilungsheft Nr. 106, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 2001, ISBN 3-933761-09-3
- SCHRENK, V. (2005): Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen; Mitteilungsheft Nr. 141, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 2005. ISBN: 3-933761-44-1
- SWITZER, CR; PIRONI, G.; REIN, T. (2010): Field Trials of In Situ Smouldering Remediation for Non-Aqueous Phase Liquid Contaminated Soils, ConSoil2010 Salzburg
- TRÖTSCHLER, O.; KOSCHITZKY, H.-P.; OCHS, S.O.; DENZEL, S.; STÖCKL, K. (2006): Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P., Stuhmann, M. (Hrsg.), Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2006. Nr. 150, S. 60-70, ISBN: 3-933761-53-0
- TRÖTSCHLER, O. & H.-P. KOSCHITZKY (2009): Pilotanwendung des In-Situ-Sanierungsverfahrens „Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone (DLI)“ zur Bestimmung der thermischen Reichweite und der Sanierungsleistung am Standort „Biswurm“ in Villingen, Schwarzwald-Baar-Kreis. Technischer Bericht Nr. VEG 41, 2009/13. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Eigenverlag IWS, Versand auf Anfrage
- TRÖTSCHLER, O.; FEURING, T.; KOSCHITZKY, H.-P. (2011): Machbarkeitsstudie zur Anwendung von Dampf-Luft-Injektion an einem mit CKW belasteten Standort in der Schweiz - Untersuchungen zum Setzungsverhalten. Technischer Bericht Nr. VEG 51, 2011/14. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 11/2011. Eigenverlag IWS, Versand auf Anfrage
- UDELL, K.S. & J.S. FITCH (1985): Heat and Mass Transport in Capillary Porous Media Considering Evaporation, Condensation and Non Condensable Gas Effects, Proceedings of the 23th ASME/AICHE National Heat Transfer Conference
- UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (2004): Verfahren und Vorrichtung zur Behandlung von Feststoffen, PATENT DE 10309686, vom 18.11.2004 (angemeldet 27.02.2003); Erfinder: Roland, Ulf; Kopinke, Frank Dieter, Prof. Dr.; Buchenhorst, Daniel; Holzer, Frank; Koch, Michael; Europäisches Patent EP 1596998 vom 29.04.2009 (angemeldet 18.02.2004).
- USEPA U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1991). Soil vapor extraction technology Reference Handbook USEPA/540/2-91/003, Washington, USA.
- USEPA; U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, DAVIS, E. L. (1997): How Heat Can Enhance In-situ Soil and Aquifer Remediation: Important Chemical Properties and Guidance on Choosing the Appropriate Technique
- VDI-RICHTLINIE 3897 (2007): Emissionsminderung, Anlagen zur Bodenluftabsaugung und zum Grundwasserstrippen. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 2, Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Dezember 2007.
- VOLKMAR M. & E. WRONA (2010): New RF power supplies for induction and plasma applications with new levels of operational reliability and energy efficiency, Proc. Int. Symp. Heating by Electromagnetic Sources, Servizi Grafici Editoriali, Padova,
- WOISNITZA, M.; HIESTER, U.; REUTER, A.: Thermische In-situ-Sanierung (Pilotversuch) am Beispiel "ehemalige Lederfabrik Berninger" in Idstein. Seminar Altlasten und Schadensfälle 2011 - Neue Entwicklungen, Wetzlar, 24./25.05.2011, Org.: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

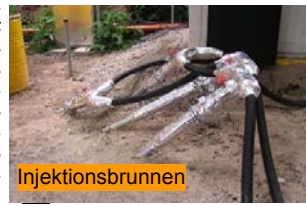
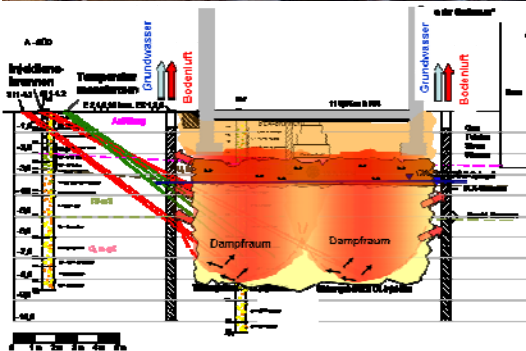
Anwendungsbeispiele

A) Sanierung ehemalige Chemische Reinigung mittels Dampf-Luft-Injektion in der GZ

Relevante Schadstoffe: PCE
Ausgangsbelastung (Σ CKW): Bodenluft: max. 7.000 mg/m³
 Boden: 480 mg/kg (max. 3,8 g/kg)
 Grundwasser: max. 60.000 µg/l
 (Abstrom bis 350 µg/l)

Sanierungsziel: Herdsanierung in der GZ und primär Schlufflage GZ-UZ:
 Konzentration Bodenluft < 10 mg/m³,
 Grundwasser < 10 µg/l

Entnommene Schadstoffmasse: ca. 500 kg CKW



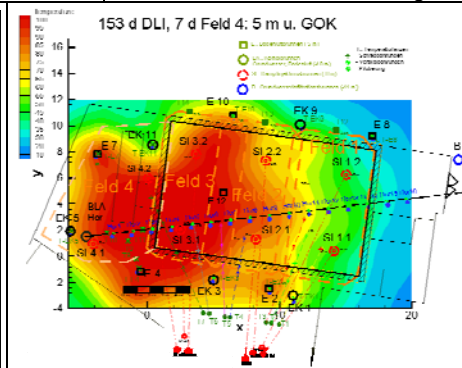
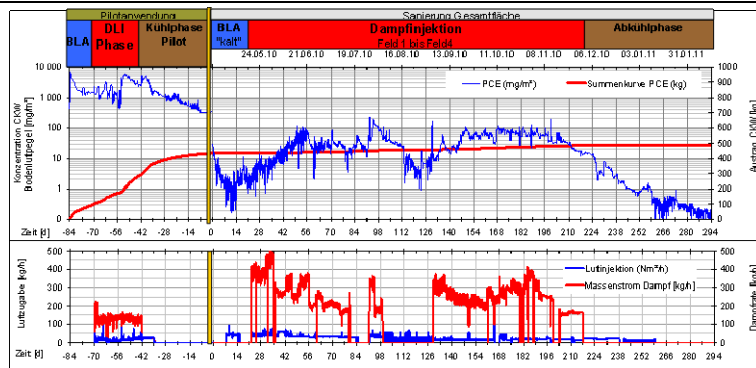
Pilotanwendung 2005, Sanierung 2010

Sanierungsrelevante Kubatur:
 Grundfläche: 300 m²
 Tiefe: von 1 bis 8 m u.GOK
 Volumen: ca. 2.200 m³

Sanierungsdauer: 84 d + 294 d
 davon „kalte“ BLA: 36 d
 Dampf-Luft-Injektion: 28 + 150 d
 Kühldauer auf 25°C: 119 d

Schadstoffaustrag:
über Bodenluft:
 440 kg CKW während Pilotierung
 50 kg während Gesamtanierung
über Grundwasser:
 10,5 kg CKW

Spez. Energieverbrauch:
Bodenluft: 2.010 kWh/kg CKW
Grundwasser: 2.980 kWh/kg CKW



Kurzbeschreibung:

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

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

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 Fröhsommer 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.

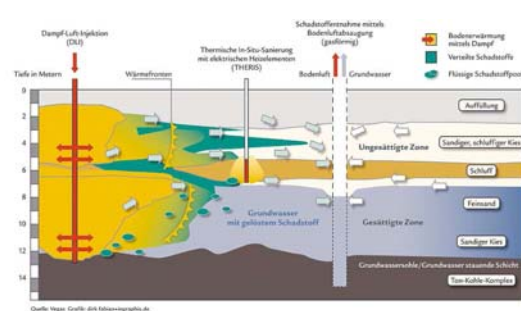
In der zehnmonatigen Gesamtanierungszeit konnten 50 kg CKW aus dem Schluffbereich (2,5 – 3,5 m u.GOK) und dem oberen Grundwasserleiter (3 – 5 m u.GOK) entfernt werden.

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). Ein weiterer Rückgang wird während des zweijährigen Monitorings erwartet.

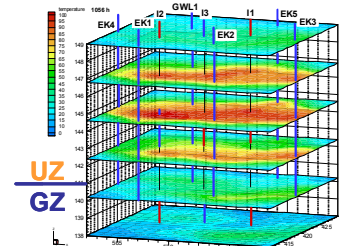
B) Pilotanwendung Dampf-Luft-Injektion an einer ehemaligen Benzolanlage (nach Bodenaushub) in der GZ und UZ



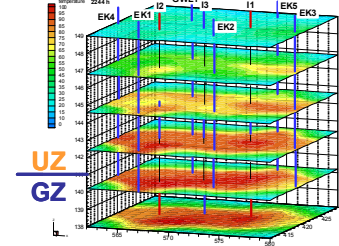
Relevante Schadstoffe: BTEX, vornehmlich Benzol (untergeordnet AKW, MKW)
Ausgangslastung: Bodenluft: max. 60 mg/m³
 Boden (Proben): 1,4 g/kg (max. 3,5 g/kg)
 Grundwasser: 200 mg/l
Sanierungsziel: Herdsanierung in der GZ und UZ:
 Reduzierung der Schadstoffmasse > 99 %
Entnommene Schadstoffmasse: ca. 6.870 kg



Injektion in UZ: I1 + I2 + I3 + EK3 Tag 44

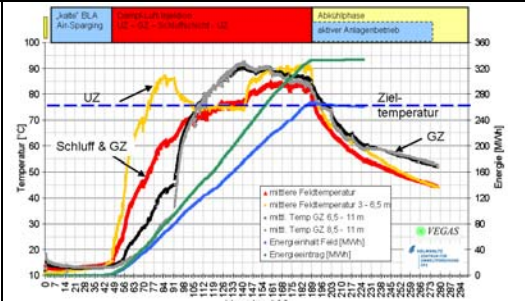
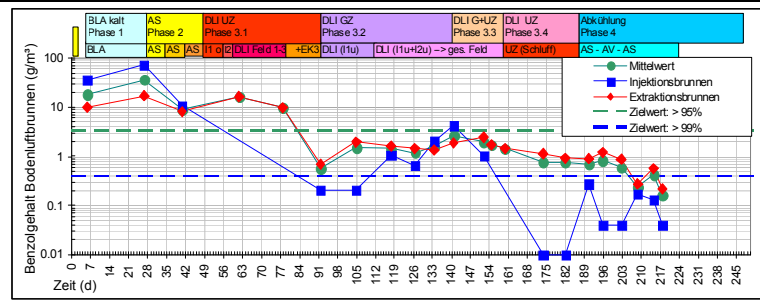


Injektion in GZ: I1 + I2 Tag 50



Pilotanwendung 2007

Sanierungsrelevante Kubatur:
 Grundfläche: 180 m²
 Tiefe: von 3 bis 11 m u.GOK
 Volumen: ca. 1.500 m³
Sanierungsdauer: 280 d
 davon „kalte“ BLA: 49 d
 Dampf-Luft-Injektion: 140 d
 Abkühldauer auf 45°C: 91 d
Schadstoffaustrag:
über Bodenluft: 6.870 kg Benzol
über Grundwasser: 72 kg Benzol
Spez. Energieverbrauch:
Bodenluft: 65 kWh/kg Benzol
Grundwasser: 175 kWh/kg Benzol



Kurzbeschreibung:

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 in Modulbauweise (MOSAM) eingesetzt, die für den Einsatz entsprechend ATEX umgebaut wurde. Das Sanierungsfeld wurde thermisch über drei Injektionsbrunnen mit zwei Injektionstiefen (gesättigte und ungesättigte Zone), sowie sechs ringförmig am Rand des Pilotfeldes angeordnete, voll verfilterte Extraktionsbrunnen erschlossen.

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

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

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

C) Entfernung eines LHKW-Schadens aus der UZ mittels fester Wärmequellen (THERIS-Verfahren)

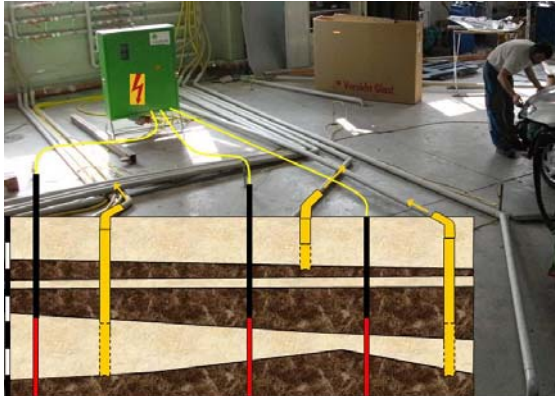


Relevante Schadstoffe: PCE, nachrangig TCE und cis-DCE
Ausgangsbelastung (Σ LHKW): Bodenluft: > 1.000 mg/m³
 Boden: > 1.000 mg/kg (max. 1.985 mg/kg)
 Grundwasser: > 400 µg/l (Abstrom bis 1.000 µg/l)

Sanierungsziel: Herdsanierung in der UZ:
 10 mg/m³ bei 4-stündigen Absaugversuchen je BL-Pegel

Entnommene Schadstoffmasse: ca. 353 kg Σ LHKW, davon ca. 5 kg via GW

Jahr: 2010



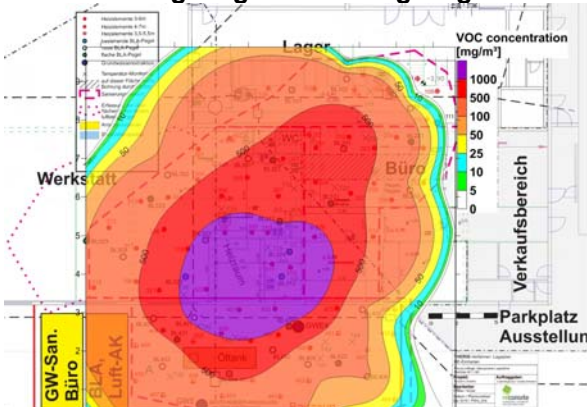
Sanierungsrelevante Kubatur:
 Grundfläche: 540 m²
 Tiefe: von 3 bis 6 (7) m u.GOK
 Volumen: ca. 1.600 m³

Sanierungsdauer: 290 d (davon kBLA: 14 d)

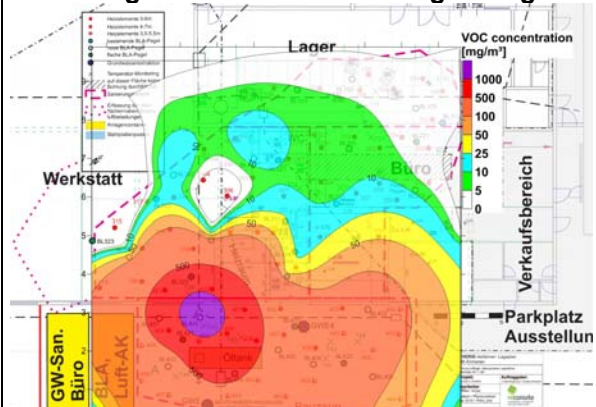
Schadstoffaustrag:
 über Bodenluft: 348 kg LHKW
 über Grundwasser: 5 kg LHKW

Spez. Energieverbrauch:
 Bodenluft: ca. 1.500 kWh/kg
 Grundwasser: ca. 1.890 kWh/kg

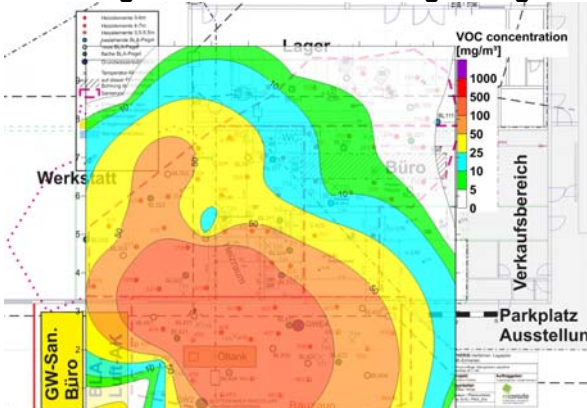
Vor Sanierungsbeginn / Austrag 0 kg LHKW



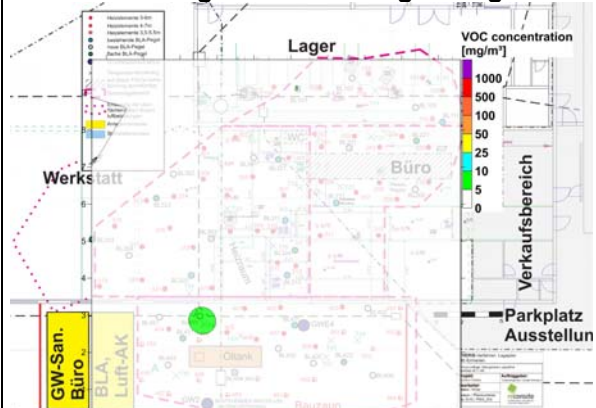
Sanierungszeit 2 Monate / Austrag 223 kg LHKW



Sanierungszeit 5 Monate / Austrag 316 kg LHKW



Nach Sanierungsende / Austrag 350 kg LHKW



Kurzbeschreibung:

Die Gesamtfläche untergliederte sich aufgrund der Randbedingungen in vier Teilflächen. Zum Einsatz kamen 2 und 3 Meter lange Heizelemente in der ungesättigten Zone. Oberflächennah erfolgte eine Bodenluftabsaugung zur Unterbindung von Schadstoffmigrationen in der Raumluft. Der Hauptschadstoffaustrag erfolgte aus dem tiefer gelegenen Schadstoffbereich zwischen 4 und 6 m u.GOK. Zur Abluftreinigung wurde Luftaktivkohle eingesetzt. Begleitend wurde eine Grundwassersicherung über einen zentralen Brunnen betrieben.

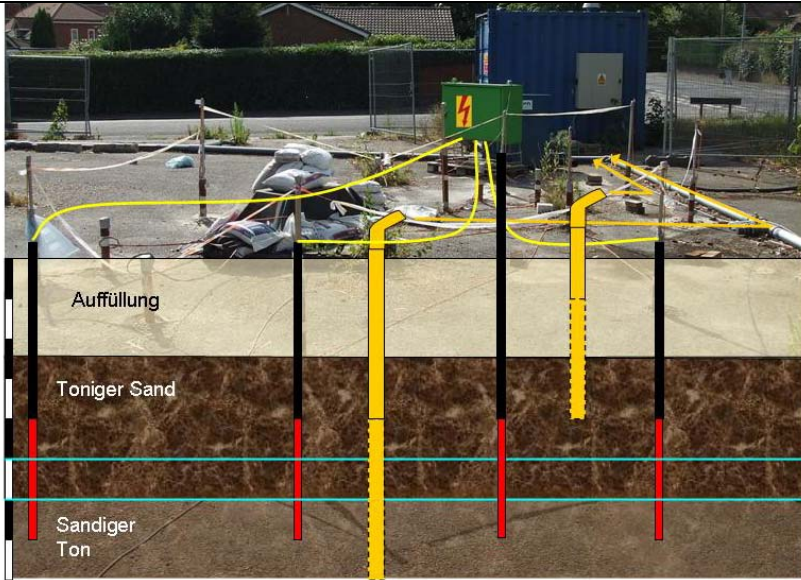
Die vier Pläne (oben) stellen die Bodenluftbelastungen zum Sanierungsbeginn, sowie nach zwei und fünf Monaten und zum Sanierungsende (nach dem Freimessen) dar. Bereits nach vier Monaten waren die BL- Belastungen gegenüber den Initialbelastungen etwa um eine Größenordnung reduziert. Dies entspricht einer Schadstoffrückgewinnung von etwa 90 % des Initialinventars.

Die LHKW-Förderung über das GW war im Sanierungsverlauf weitestgehend konstant und trug insgesamt mit 1,5 % zum Gesamtaustrag bei. Im Bereich des ehem. Schadensherdes gingen die LHKW-Konzentrationen im GW zum Sanierungsende deutlich zurück. Zwei Jahre nach Ende der Herdsanierung lagen die GW-Werte im Nahbereich zwischen 100 und < 10 µg/l.

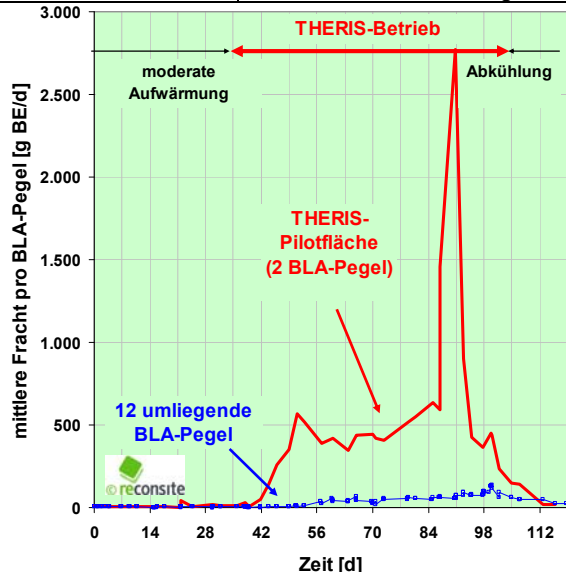
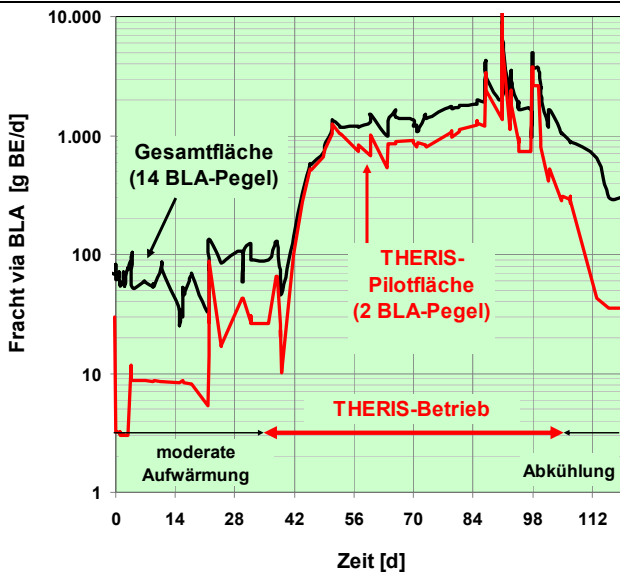
D) Tankstellensanierung mittels fester Wärmequellen in der GZ (+Kapillarsaum)



Relevante Schadstoffe: BTEX, TMB
Ausgangsbelastung: Restbelastungen im Grundwasser und im Kapillarsaum nach 3 Jahren „kalter“ BLA und Air Sparging
Sanierungsziel: Herdsanierung in der GZ und im Kapillarsaum
Entnommene Schadstoffmasse: Pilotfeld: ca. 67 kg Benzoläquivalente (BE)
 Umfeld: zusätzl. 45 kg Benzoläquivalente



Jahr: 2008
Sanierungsrelevante Kubatur:
 Grundfläche: ca. 25 m² + Peripherie
 Tiefe: von 4 bis 7 m u.GOK
 Volumen: ca. 80 m³+ Peripherie
Sanierungsdauer: 128 d
 (davon „kalte“ BLA: 12 d
 Moderate Aufwärmphase: 35 d
 THERIS-Betrieb: 70 d
 Abkühlphase: 10 d)
Schadstoffaustrag:
„warme“ BLA: $Q_{\text{mittel}} = 85 \text{ g BE/d}$
THERIS: $Q_{\text{mittel}} = 980 \text{ g BE/d}$
Abkühlphase: $Q_{\text{mittel}} = 635 \text{ g BE/d}$
Spez. Energieverbrauch:
Gesamt: ca. 650 kWh/kg
„kalte“ BLA: ca. 2900 kWh/kg
THERIS: ca. 625 kWh/kg



Kurzbeschreibung:

Zur Sanierung des Tankstellenschadens wurde von Oktober 2004 bis Oktober 2007 eine konventionelle In-situ-Sanierung durchgeführt (BLA, Air Sparging). Wenngleich hierbei über 2 Tonnen Schadstoff entfernt wurden, verblieb ein Restinventar im Untergrund.

Während einer anschließenden THERIS-Pilotierung wurden um zwei höher belastete Bestandspegel zwei Heizelementgruppen mit Heizelementen von je 3 m Länge installiert. In der Peripherie befanden sich weitere 12 Bodenluftpegel, die ebenfalls zur BLA genutzt wurden. Aufgrund der möglichen Bildung explosiver Gas-Luft-Gemische (u.a. Benzol) verfügte die BLA über eine Notabschaltung. Die Abluft wurde über Luftaktivkohle gereinigt. In den Diagrammen sind die Schadstofffracht als Benzoläquivalente (BE, links) aus dem Pilotierungsfeld und dem Umfeld sowie die mittlere BE-Fracht pro Brunnen (rechts) im Verlauf der Sanierung dargestellt.

Für zwei Wochen erfolgte zunächst eine „kalte“ BLA, die dann mit moderater Heizleistung in eine „warme“ BLA überführt wurde (35 Tage). Im Verlauf der „warmen“ BLA stieg die BE-Rückgewinnung aus dem Gesamtfeld von etwa 70 g BE/Tag auf rund 100 g BE/Tag an. Bei dem darauf folgenden THERIS-Betrieb (70 Tage) mit hoher Heizleistung wurde der Austrag um 2-3 Größenordnungen auf bis zu 19 kg BE/Tag gesteigert. Die Austragsmaxima am Tag 49 bzw. 91 stammen aus den Dampfdurchbrüchen in der kleineren bzw. der größeren Teilfläche.

Nach etwa 98 Tagen sanken die Schadstofffrachten im Pilotierungsbereich innerhalb von zwei Wochen um zwei Größenordnungen. Aus dem Umfeld wurden zum Pilotierungsende aufgrund der Wärmeausbreitung weiterhin erhöhte Austräge erzielt (ca. 300 g BE/Tag). Insgesamt entfielen etwa 60 % des Schadstoffaustrags auf die 2 Pegel im THERIS-Feld, etwa 40 % auf die 12 BLA-Pegel im Umfeld.

E) Pilotanwendung RF-Verfahren am ehemaligen Hydrierwerk Zeitz (Sachsen) in der UZ

Relevante Schadstoffe:
Ausgangsbelastung:

BTEX (Benzol)
Bodenluft: 60 g/m³ org. C (max. 90 g/m³)
Boden: 100 mg/kg org. C (max. 250 mg/kg)
Herdsanierung in der UZ eines sandigen bis schluffigen Bodens in Tiefen zwischen 3 und 8 m u.GOK, Grundwasser ca. 8,5 m u.GOK

Sanierungsziel:

Entnommene Schadstoffmasse: ca. 660 kg BTEX als org. Kohlenstoff

Jahr: 2008

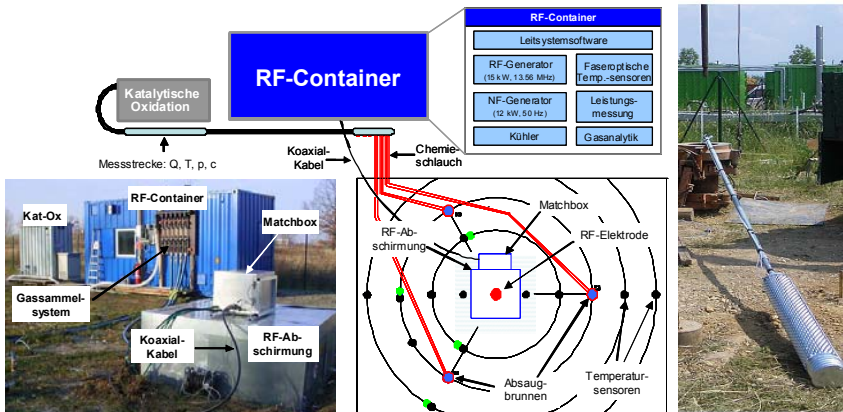
Sanierungsrelevante Kubatur:

Grundfläche: 100 m²
Tiefe: von 3 bis 8 m u.GOK (en. blg)
Volumen: ca. 500 m³

Sanierungsdauer: 100 d
(davon KBLA: 24 d)

Schadstoffaustrag:
660 kg BTEX als org. Kohlenstoff

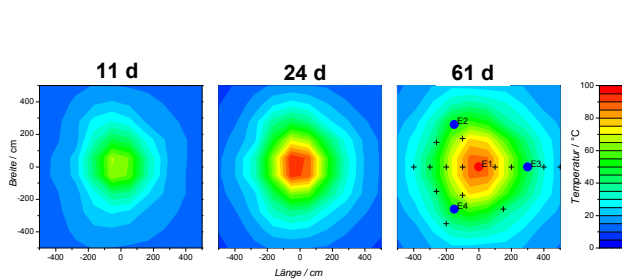
Spez. Energieverbrauch:
ca. 83 kWh/kg



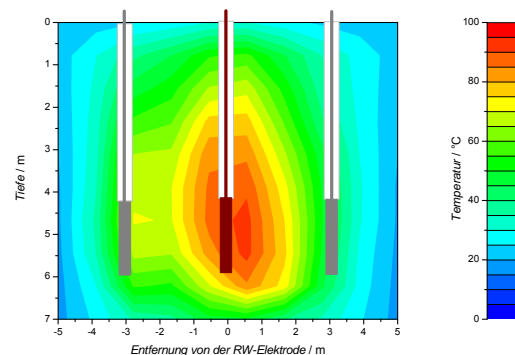
L.: Aufbau des Standortes

R.: Design der RF-Elektrode

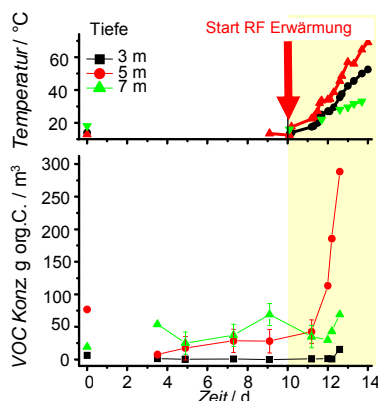
Horizontale Temperaturverteilung in 5 m u.GOK nach



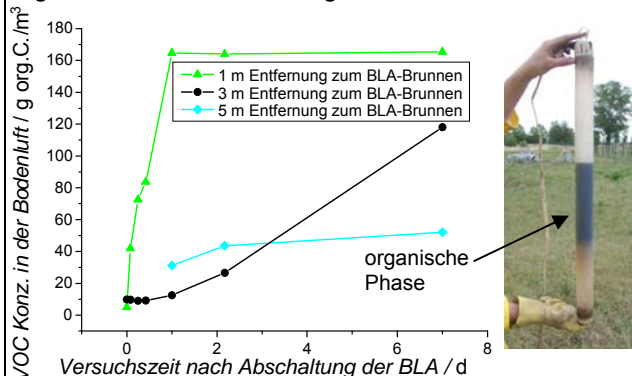
Vertikale Temperaturverteilung im Boden nach 61 Tagen RF-Erwärmung mit 13 kW



VOC-Konzentration in der Bodenluft an einzelnen Messstellen



Schnelle Rekontamination im Sanierungsbereich durch mobile organische Phase im Sanierungsumfeld



Kurzbeschreibung:

Mittels einer zentralen speziell modifizierten RF-Elektrode (E1) wurde am Demonstrationsstandort in Zeitz innerhalb von 71 Tagen mit einer durchschnittlichen RF-Leistung von ca. 13 kW (15 kW RF-System) ein Bodenvolumen von ca. 300 m³ in einer Tiefe von 1 bis 7 m u.GOK auf eine durchschnittliche Temperatur von 54 °C erwärmt (Abb. Mitte). Der Wirkradius der RF-Erwärmung um die zentrale Elektrode betrug ca. 4 m. Drei Absaugbrunnen (E2-E4) waren sternförmig um die zentrale Elektrode angeordnet (Abb. oben) und unterstützten durch die Strömungsrichtung von der RF-Elektrode hin zu den Absaugbrunnen den Wärmetransport im Boden und führten somit zu einer Homogenisierung des radialen Temperaturprofils innerhalb des zu erwärmenden Bodensegmentes. Die Reinigung der abgesaugten Bodenluft erfolgte durch eine katalytische Oxidationsstufe. Die RF-Bodenerwärmung führte zur Erhöhung der Schadstoffkonzentration in der aus einzelnen Bodenluftmessstellen abgesaugten Bodenluft um den Faktor 4 bis 8 (Abb. links unten). Auf Grund des Überschreitens von 20 % der UEG von Benzol in der Bodenluft wurde während der gesamten Dauer der Sanierung die abgesaugte Bodenluft mit Frischluft verdünnt. Am Standort wurde eine schnelle Rekontamination zuvor gereinigter Bodenbereiche beobachtet, welche durch das Vorhandensein einer auf dem GW-Leiter aufschwimmenden und beweglichen organischen Phase verursacht wird (Abb. rechts unten).

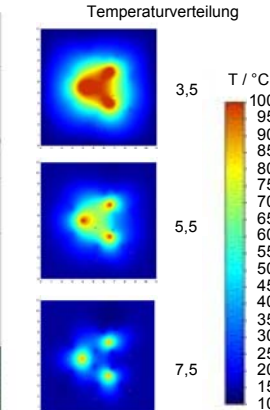
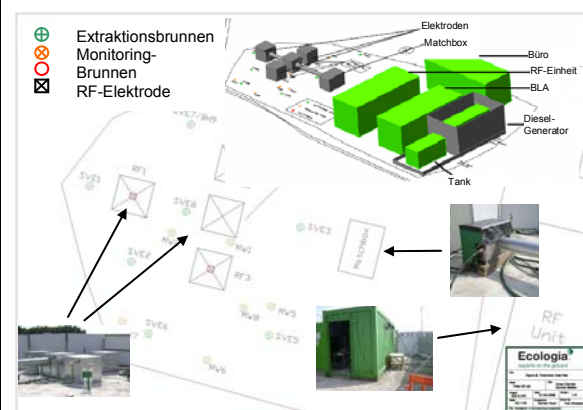
F) Sanierung einer ehemaligen Tankstelle mittels RF-Verfahren in der UZ

Relevante Schadstoffe:
Ausgangsbelastung:

BTEX und MKW
Bodenluft: > 10.000 ppmv (max. 43.000 ppmv)
Boden BTEX: 9.300 mg/kg (max. 66.500 mg/kg)
Boden MKW: 6.400 mg/kg (max. 23.000 mg/kg)
Herdsanierung in der UZ eines Kalkgestein
in Bodentiefen zwischen 2 und 7 m u.GOK,
Grundwasser 47 m u.GOK

Sanierungsziel:

Entnommene Schadstoffmasse: ca. 913 kg MKW/BTEX als org. Kohlenstoff



Jahr: 2008

Sanierungsrelevante Kubatur:
Grundfläche: 132 m²
Tiefe: von 2 bis 7 m u.GOK (en. blg)
Volumen: ca. 660 m³

Sanierungsdauer: 117 d
(davon kBLA: 25 d)

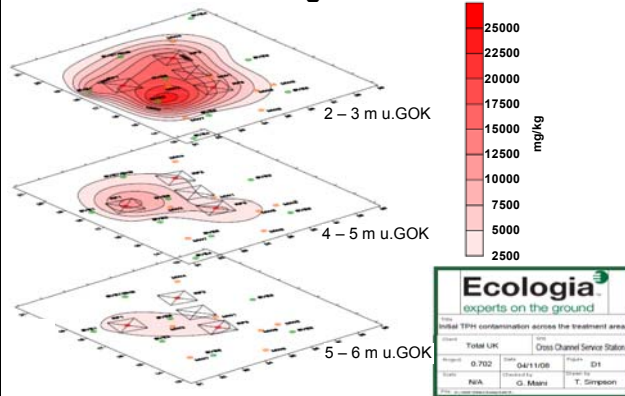
Schadstoffaustrag:
913 kg BTEX als org. Kohlenstoff

Spez. Energieverbrauch:
ca. 61 kWh/kg

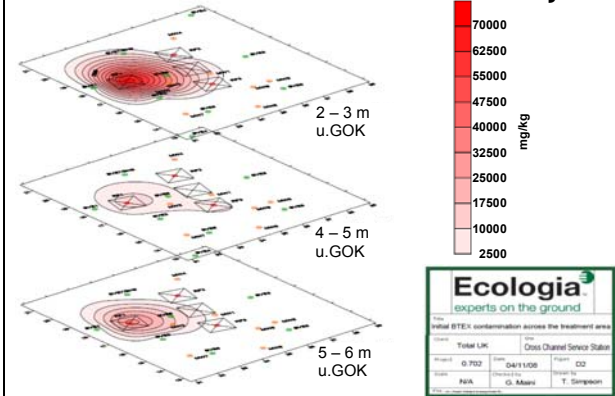
L.: Aufbau des Feldstandortes

R.: Temperaturverteilung

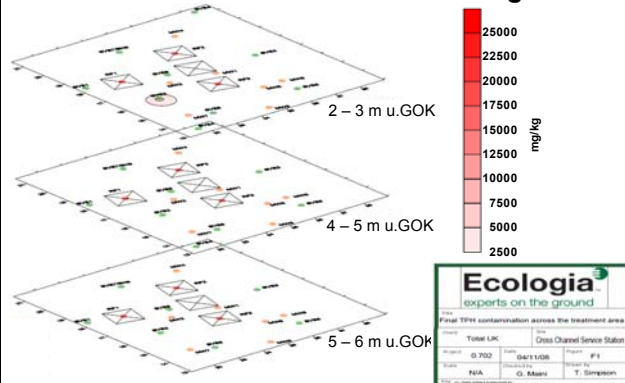
MKW im Boden zum Beginn der Sanierung



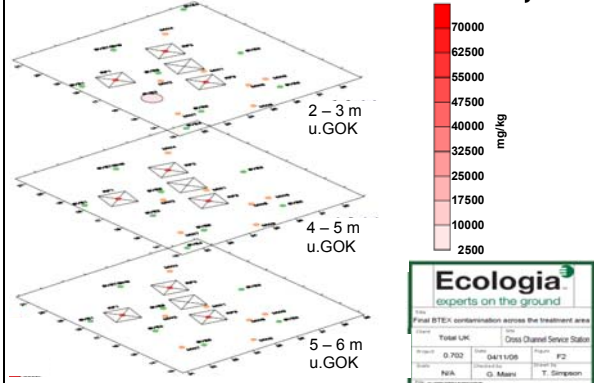
BTEX im Boden zum Beginn der Sanierung



MKW im Boden zum Ende der Sanierung



BTEX im Boden zum Ende der Sanierung



Kurzbeschreibung:

Vor der Sanierung wurden die höchsten Schadstoffkonzentrationen im Bodenbereich von 2 bis 3 m u.GOK detektiert. Mittels der RF-Elektroden, welche in einer sternförmigen Anordnung mit einer horizontalen Entfernung von 3 m in den Boden eingebracht wurden, konnte innerhalb von 27 Tagen mit einer durchschnittlichen RF-Leistung von ca. 22 kW (30 kW RF-System) ein Bodenvolumen von je ca. 120 m³ auf eine mittlere Temperatur von 49,1 °C (in 3,5 m u.GOK), 31,7 °C (in 5,5 m u.GOK) und 18,7 °C (in 7,5 m u.GOK) erwärmt werden (Abb. rechts oben).

Die Reinigung der abgesaugten Bodenluft erfolgte in Aktivkohlefiltern. Die Austragsrate erhöhte sich nach Erreichen einer durchschnittlichen Bodentemperatur von ca. 40 °C (in 3,5 m u.GOK) im Vergleich zur kalten BLA um einen Faktor von 10.

Die aus den Bodenbeprobungen ermittelte Reduzierung der Schadstoffkonzentrationen betrug >95 % für BTEX und MKW der Fraktion < C₈-C₁₀ und ca. 80 % für MKW der Fraktion C₁₀ – C₁₆ (Abb. unten). Toluol- und Xylol-Konzentrationen wurden zu über 99 % verringert. Zusätzlich zu den 945 kg extrahierten VOC fielen neben 1.300 l Wasser ca. 172 kg organische Phase im Kühler der BLA an.

G) Kombinierte TUBA-THERIS-Sanierung des Schadensherds an einem Industriestandort

Relevante Schadstoffe:

Schadstoffcocktail, u.a. LHKW, BTEX-Phase, Aliphate, PAK

Ausgangslastung:

bis zu 140.000 µg/l Σ AKW im GW

Sanierungsziel:

Entfernung d. Schadensherde in UZ u. GZ:
TUBA 1.Aquifer – THERIS Stauer – TUBA 2.Aquifer, nachlaufende Fahnensanierung

Entnommene Schadstoffmasse:

ca. 250 kg über BLA, ca. 31 kg über GW, Phasenförderung und Kondensat

TAMDOWN
REMEDICATION & ENABLING

AECOM

cornelsen
Ltd.

reconsite

Jahr: 2010

Sanierungsrelevante Kubatur:

Grundfläche: ca. 230 m²

1. Aquifer: 0-6 m u.GOK

Stauer: 6-13,5 m u.GOK

2. Aquifer: 13,5-19 m u.GOK

Volumen: ca. 4.370 m³

Sanierungsdauer: 140 d

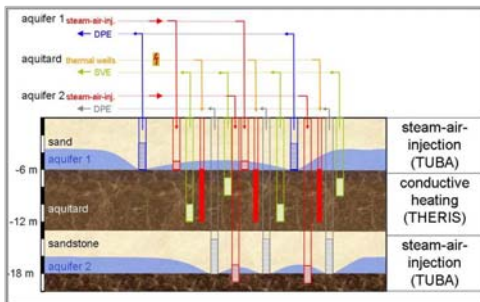
(davon kBLA: 11 d)

Schadstoffaustrag:

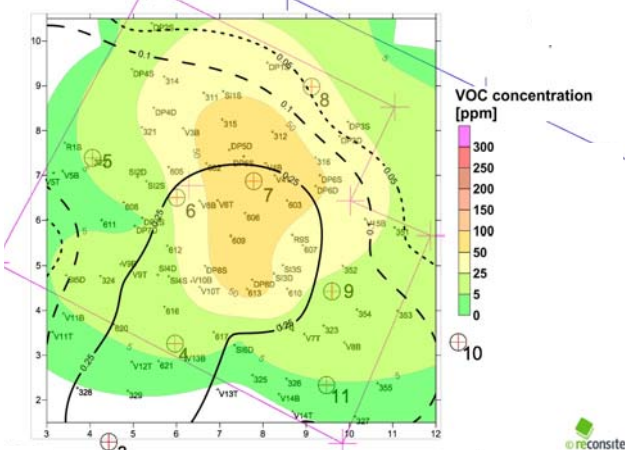
über Bodenluft: 250 kg LHKW

über GW, Phasenförderung, Kon-

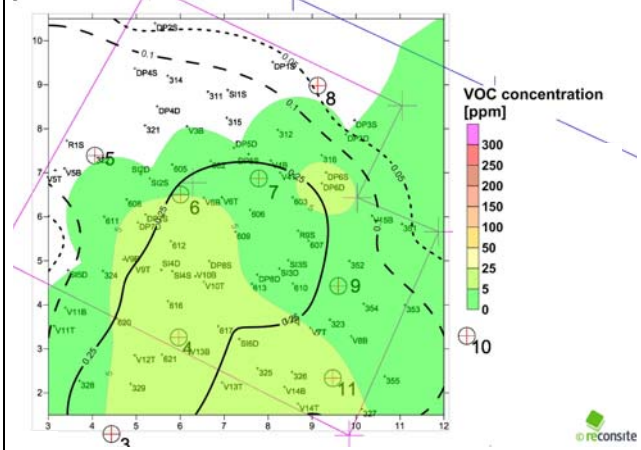
densat: 31 kg LHKW



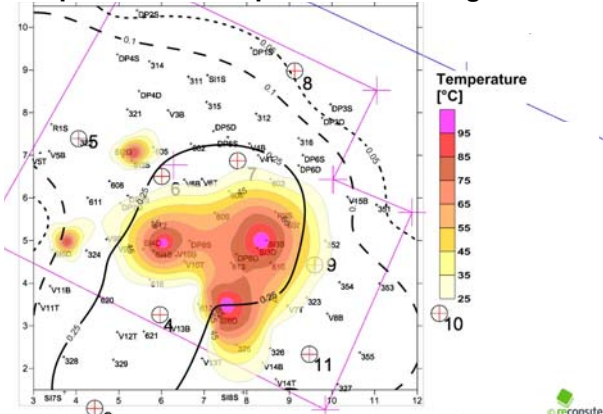
VOC Konzentration im 2. Aquifer nach 50 Tagen



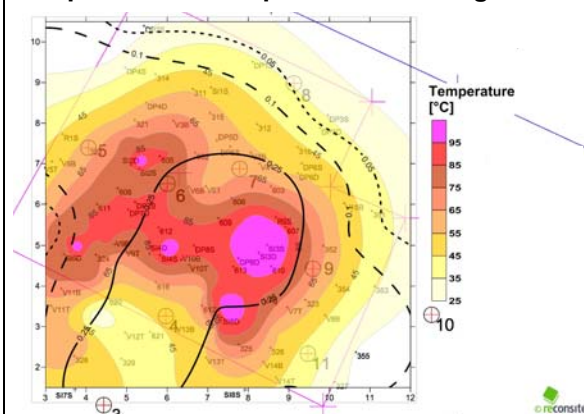
VOC Konzentration im 2. Aquifer nach 80 Tagen



Temperatur im 2. Aquifer nach 50 Tagen



Temperatur im 2. Aquifer nach 80 Tagen



Kurzbeschreibung:

Der Standort gliedert sich in drei Schichten, die aus dem 1. und 2. Aquifer und dem dazwischen befindlichen Stauer bestehen. Die beiden Aquifere wurden mit dem TUBA-Verfahren, der Stauer mit dem THERIS-Verfahren aufgeheizt. Zum Einsatz kamen Dampfinjektionspegel sowie 3 m und 6 m lange Heizelemente. Der Schadstoffaustrag erfolgte mittels Zwei-Phasen-Extraktionsbrunnen (Aquifer) bzw. Bodenluftpegeln (Stauer). Zur Abluftreinigung wurde Luftaktivkohle eingesetzt. Zuvor wurde die Flüssigphase abgeschieden, gefiltert und über Wasseraktivkohle gereinigt.

Insgesamt wurden aus den beiden Aquiferen ca. 107 kg und aus dem Stauer ca. 145 kg Schadstoff ausgetragen. Die vier Pläne (oben) stellen die Temperaturen und die Bodenluftbelastungen im 2. Aquifer nach 50 bzw. 80 Tagen dar. Deutlich ist eine Abnahme der Schadstoffkonzentration (rechts oben) infolge gesteigerter Temperaturen (rechts unten) zu erkennen.

Das Projekt wurde bei den **Brownfield Briefing Awards 2011** in der Kategorie **Best In-Situ-Treatment** mit einem **highly commended** ausgezeichnet.





TASK Leipzig

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ

Department Grundwassersanierung

Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

kontakt@task-leipzig.info

www.task-leipzig.info