

# 11 THERIS: EFFIZIENZSTEIGERUNG DER BODENLUFTABS- SAUGUNG DURCH FESTE WÄRMEQUELLEN – ENTWICK- LUNGSPOTENTIALE NEUER EINSATZBEREICHE

U. Hiester, H.-P. Koschitzky, A. Färber  
 VEGAS, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61  
 uwe.hiester@iws.uni-stuttgart.de

## 11.1 Einleitung

Bei Verunreinigungen der ungesättigten Bodenzone mit flüssigen organischen Schad- stoffen (engl. NAPL = non aqueous phase liquids) werden häufig Bodenluftabsaugun- gen (BLA) zur Sanierung des Untergrundes eingesetzt. Die Verdampfung von Schad- stoffen aus der Flüssig- in die Gasphase ist bei natürlichen Temperaturen um die 10°C jedoch mäßig. In feinkörnigen Böden kommen Bodenluftabsaugungen zudem aufgrund der geringen Durchlässigkeiten an ihre Einsatzgrenzen. Wenngleich als „Stand der Technik“ bezeichnet, ist bei vielen dieser Anlagen (sog. „kalte“ BLA) auch nach mehr- jährigem Betrieb das nachhaltige, das heißt dauerhafte Erreichen des Sanierungsziels ungewiss [ALTENBOCKUM ET AL. 2001].

Mit der Zufuhr von Wärme lassen sich diese Hemmnisse überwinden [BAKER ET AL. 1999]. Eine thermische Verfahrensvariante ist der Betrieb fester Wärmequellen in Form elektrisch betriebener Heizlanzen, das sog. THERIS-Verfahren (Abb. 11.1). Durch die Aufheizung des Bodenkörpers steigt der Schadstoffaustrag deutlich an.

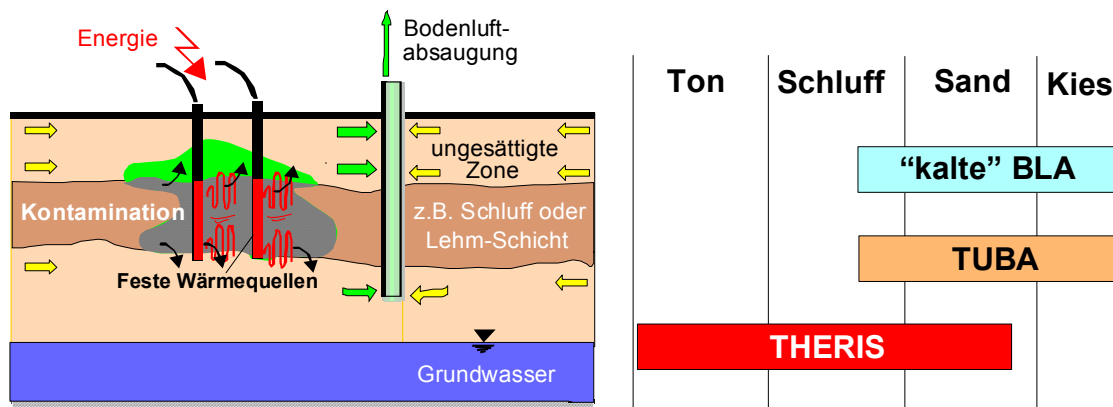


Abb. 11.1: Prinzipskizzen und Anwendungsbereiche des THERIS-Verfahrens

Da im Gegensatz zur Dampf- oder Dampf-Luft-Injektion (sog. TUBA-Verfahren) kein Wärmeträgermedium (Dampf) injiziert wird, können mit dem THERIS-Verfahren auch gering durchlässige Bodenschichten gereinigt werden. Die sich hieraus ergebenden Entwicklungspotentiale für Bodenluftabsaugungen sollen im Folgenden anhand von Untersuchungen im VEGAS-Großbehälter und eines erfolgreichen Einsatz des Verfah- rens an einem Feldstandort verdeutlicht werden.

Ein Schwerpunkt dieses Beitrags liegt hierbei auf der für den Sanierungspflichtigen entscheidenden Verkürzung der Sanierungszeit und dem nachhaltigen Erreichen des Sanierungsziels. Ferner wird der Energieverbrauch des THERIS-Verfahrens im Vergleich zur „kalten“ BLA dargestellt und kritisch bewertet.

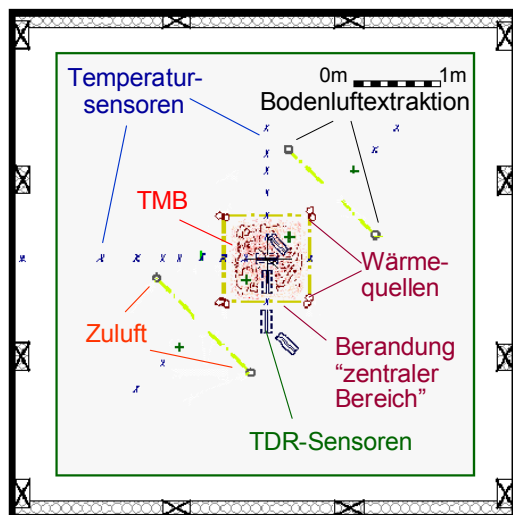
## 11.2 Durchgeführte Sanierungsuntersuchungen

### 11.2.1 Sanierungsexperiment im VEGAS-Großbehälter

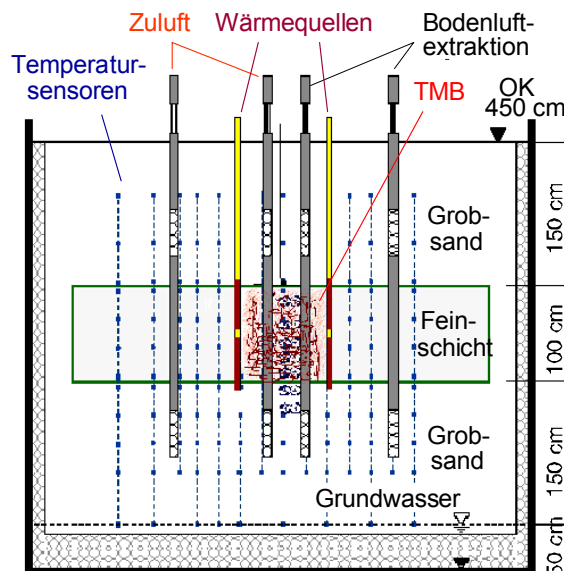
#### Versuchsaufbau und Sanierungskonzept

Im Jahr 2003 wurde in einem VEGAS-Großbehälter ein Sanierungsexperiment mit dem THERIS-Verfahren durchgeführt. Das Experiment ist ausführlich bei HIESTER ET AL. 2003C beschrieben, weshalb an dieser Stelle nur eine kurze Darstellung erfolgt. Der mit einem geschichteten Bodenaufbau gefüllte 150 m<sup>3</sup> Behälter war mit umfangreicher Messtechnik zu Temperatur- und Bodenfeuchtemessung bestückt (Abb. 11.2) [HIESTER ET AL. 2003D]. In die 1 m mächtige, gering durchlässige, wasserinitialgesättigte Feinschicht, die hinsichtlich Sieblinie und Durchlässigkeit einem Geschiebelehm vergleichbar ist, wurden 30 kg des mittelflüchtigen Aromaten Trimethylbenzol (Siedepunkt TMB = 169°C) so infiltriert, dass eine lokal begrenzte Schadstoffquelle in der Feinschicht entstand.

#### Aufsicht



#### Ansicht



**Abb. 11.2: Aufsicht und Ansicht des Technikumversuchs mit festen Wärmequellen**

Zur Quantifizierung der Leistungsverbesserung der BLA durch das THERIS-Sanierungsverfahrens wurde zunächst für zwei Monate eine „kalte“ BLA betrieben, wobei die Entnahme der Bodenluft in der oberen und unteren Grobsandschicht erfolgte. Anschließend wurden die vier im Quadrat angeordneten festen Wärmequellen im Be-

reich der Feinschicht in Betrieb genommen (Heizelementtemperatur  $T_{HE}=500^{\circ}\text{C}$ ). Die BLA wurde mit konstanter Absaugrate weiter betrieben.

### **Ergebnis der Sanierung**

Wie in vorangegangenen Untersuchungen gezeigt [HIESTER ET AL. 2003b, c], erfolgt durch den Betrieb der festen Wärmequellen eine großräumige Erwärmung des Untergrundes. Damit geht eine Reduktion der Wassersättigung im feuchten Bodenkörper einher. Zeitgleich steigen die Schadstoffkonzentrationen in der entnommenen Bodenluft schnell an (Abb. 11.5).

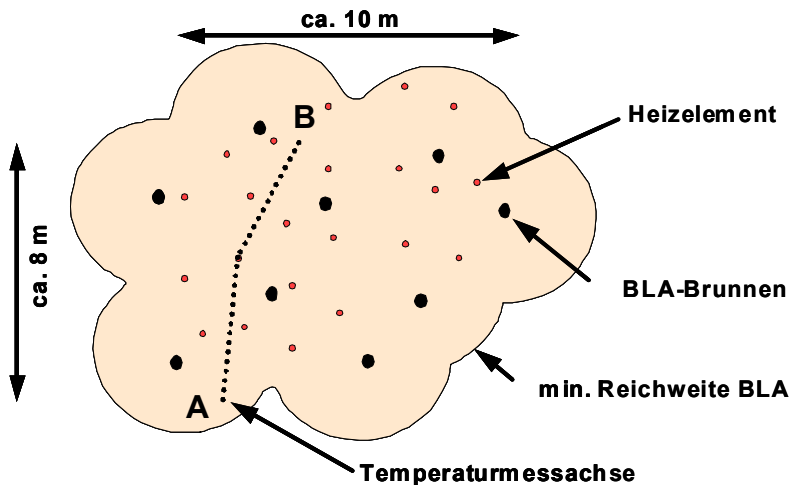
Die Sanierung wurde nach vollständigem Austrag des infiltrierten TMB nach nur 20 Tagen THERIS-Betrieb abgeschlossen, wobei die Temperaturen im Bodenkörper zwischen den Heizelementen bei unter  $100^{\circ}\text{C}$  lagen. Hierbei wurden die Gemischsiedetemperatur von Wasser und TMB gemäß dem Prinzip der Wasserdampfdestillation erreicht. Der Bodenkörper zwischen den Heizelementen war nach Abschluss der Sanierung noch über große Bereiche noch feucht.

Wenngleich technischen mit dem THERIS-Verfahrens die vollständige Trocknung des Bodens und anschließende Erwärmung bis zum Siedepunkt des Schadstoffs möglich ist, ist die Sanierungstechnik unter den gegebenen Randbedingungen nicht erforderlich. Details zum zeitlichen Verlauf des Schadstoffaustrags beim THERIS-Betrieb finden sich in Abschnitt 11.3 dieses Beitrags.

## **11.2.2 Sanierung eines CKW-Schadens mit dem THERIS-Verfahren**

### **Standortbeschreibung und Sanierungskonzept**

In einer etwa 3,5 m mächtigen Lehm-Mergel-Schicht in bis zu 7 m u GOK befanden sich auf einer Grundfläche von ca.  $80\text{ m}^2$  (Abb. 11.3) nach mehrjährigem Betrieb einer konventionellen „kalten“ BLA weiterhin signifikante CKW-Konzentrationen (vornehmlich PCE (Siedepunkt  $121^{\circ}\text{C}$ )). Die Sanierungsarbeiten waren projektbedingt zeitnah abzuschließen. Die umliegende Infrastruktur (u.a. Gebäude, Zufahrtswege) erschwerte technisch Aushubvarianten und machte sie monetär uninteressant.



**Abb. 11.3: Skizze der THERIS-Feldanlage**

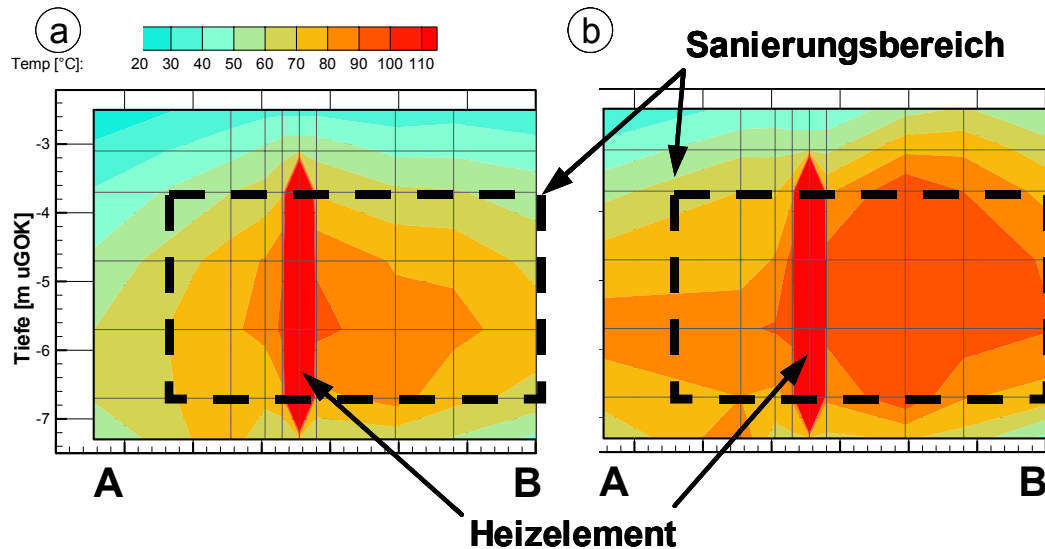
Die bestehende BLA konnte bei der Anwendung des THERIS-Verfahrens zur Extraktion der Schadstoffe genutzt werden, wobei die Schadstoff-Extraktionsrate durch den zusätzlichen Betrieb fester Wärmequellen signifikant zu steigern war. Der Sanierungserfolg in der Lehm-Mergel-Schicht war durch das THERIS-Verfahren binnen weniger Wochen zu erbringen.

Die von VEGAS konzipierte THERIS-Anlage mit 22 Heizelementen konnte einschließlich der erforderlichen Mess-, Regelungs-, Datenerfassungs- und Übertragungstechnik binnen 2 Wochen im Feld betriebsfertig installiert werden. Der begleitend erarbeitete Qualitätssicherungsplan gewährleistete die Dokumentation der Anlageninstallation und des nachfolgenden Betriebs. Letzterer konnte aufgrund des differenzierten Monitorings zudem kontinuierlich überwacht und optimiert werden.

### **Ergebnis der Sanierung**

Nach Installation der Anlage wurde zunächst für ca. eine Woche ausschließlich eine Bodenluftabsaugung betrieben. Aus den ermittelten Daten (Schadstoffaustrag, Energieverbrauch u.a.) lässt sich die standortspezifische Leistungsfähigkeit der BLA darstellen (s. Abschnitt 11.3.2).

Mit der Inbetriebnahme der festen Wärmequellen erfolgte die gleichmäßige, von der geologischen Struktur nur untergeordnet beeinflusste Bodenerwärmung in der Tiefenlage der Heizelemente (Abb. 11.4). Bereits nach einem Monat wurden großvolumig Temperaturen um die 80°C, nach zwei Monaten in weiten Bereichen über 90°C erreicht. Durch die kontinuierliche Auswertung verschiedenster Datensätze konnte die zeitnahe Betriebsoptimierung der Gesamtanlage hinsichtlich einer möglichst schnellen Aufheizung und effizienten Schadstoffextraktion realisiert werden.



**Abb. 11.4: Temperaturentwicklung im Sanierungsfeld entlang der Temperaturmessachse gemäß (Abb. 11.3): a) nach 4 Wochen und b) nach 8 Wochen**

Wenngleich das „interne“ Monitoring bereits früher die Unterschreitung der Sanierungszielwerte dokumentierte, erfolgte die gutachterliche Beprobung erst nach drei Monaten THERIS-Betrieb. Diese Untersuchung dokumentiert den Abschluss der Sanierung und wird daher im Folgenden zur Bewertung herangezogen.

## 11.3 Vergleichende Bewertung der Sanierungsvarianten

### 11.3.1 Charakteristik des Sanierungsverlaufes beim THERIS-Verfahren

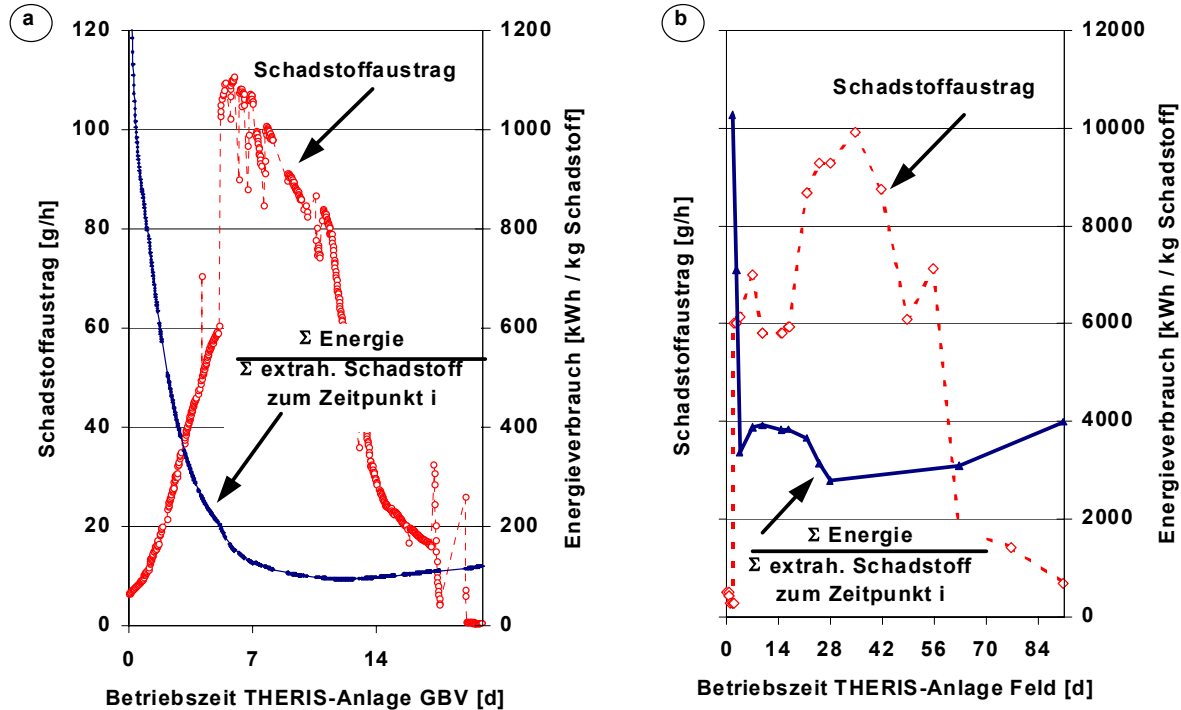
Typischerweise steigt nach Inbetriebnahme einer THERIS-Anlage der Schadstoffaustrag deutlich an (Abb. 11.5). Dieses Verhalten unterscheidet sich grundsätzlich von dem aus der Sanierungspraxis bekannten schnellen Rückgang der Extraktionsraten nach Inbetriebnahme „kalter“ BLA-Anlagen [ALTENBOCKUM ET AL. 1997].

Gründe für den Erfolg des THERIS-Verfahrens sind einerseits eine teilweise Trocknung der Bodenmatrix und damit eine Verbesserung der Gasdurchlässigkeit und der effektiven Diffusion. Zudem werden die Schadstoffe bei höheren Temperaturen schneller von der flüssigen in die Gasphase überführt, da Stoffkenngrößen wie der Dampfdruck und der Henry-Koeffizient exponentiell mit der Temperatur ansteigen [REID ET AL. 1987].

Beim Vergleich unterschiedlicher technischer Verfahren oder Randbedingungen müssen die miteinander verglichenen Kenngrößen, zurückgehend auf die Methoden der Ökobilanzierung, den gleichen Sachverhalt wiedergeben [SCHRENK 2004].

Im Fall der BLA mit verschiedenen Varianten empfiehlt sich die Normierung auf die extrahierte Schadstoffmasse, z.B. als „(standort-)spezifischer Energieverbrauch“ [ALTENBOCKUM ET AL. 2001]. Hierbei wird die eingesetzte Energiemenge durch die Masse

der extrahierten Schadstoffe geteilt. In diesen Wert gehen kumulativ sowohl standort-spezifische Randbedingungen (z.B. Durchlässigkeit, Schadstoffart, Schadstoffdargebot) als auch betriebstechnische Faktoren (z.B. Betriebszeit, Pumpenart, Absaugrate) ein.



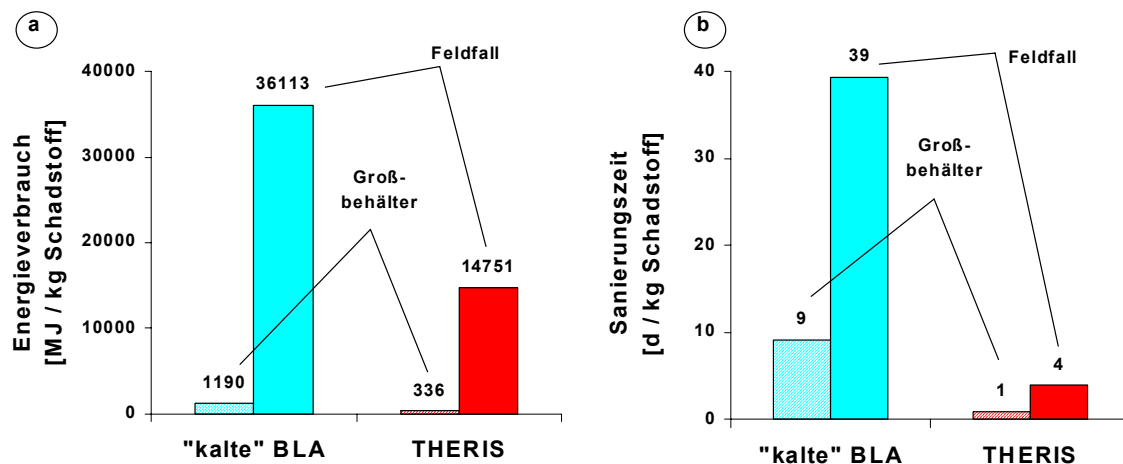
**Abb. 11.5: Entwicklung des Schadstoffaustrags und des (standort-)spezifischen Energieverbrauchs im Verlauf des THERIS-Betriebs: a) VEGAS-Großbehälter (GBV), b) Feldstandort**

Nach Inbetriebnahme einer THERIS-Anlage sinkt der spezifische Energieverbrauch mit zunehmender Bodenaufheizung (Abb. 11.5), da der absolute Energieverbrauch pro Zeitintervall annähernd konstant ist [HIESTER ET AL. 2003C], zeitgleich aber der Schadstoffaustrag exponentiell ansteigt (Abb. 11.5). Mit der Extraktion der Hauptkontamination erreicht der spezifische Energieverbrauch ein Minimum, was einer hohen Effizienz entspricht.

Mit fortschreitendem Betrieb steigt der spezifische Energieverbrauch, bedingt durch die zurückgehenden Schadstofffrachten bei konstantem Energieverbrauch. Aus ökonomischen wie ökologischen Gesichtspunkten ist daher das nachhaltige Erreichen, nicht aber das massive Unterschreiten der Sanierungszielwerte anzustreben, um eine Sanierung zeitnah und kostenoptimiert abschließen zu können. Bei einem unsachgemäßen Monitoring oder mangelnder Projektkoordination kann dieser Zeitpunkt nicht oder nur unzureichend eingeschätzt werden. Wenngleich die Energiekosten bei thermischen In-Situ-Sanierungen generell weniger als 30% der Gesamtprojektkosten ausmachen [US-EPA 2004], setzt ein sanierungsrechtlich und -technisch nicht mehr erforderlicher Weiterbetrieb die Wirtschaftlichkeit einer THERIS-Anlage unnötig herab.

### 11.3.2 Vergleich des Energieeinsatzes und der Sanierungszeit

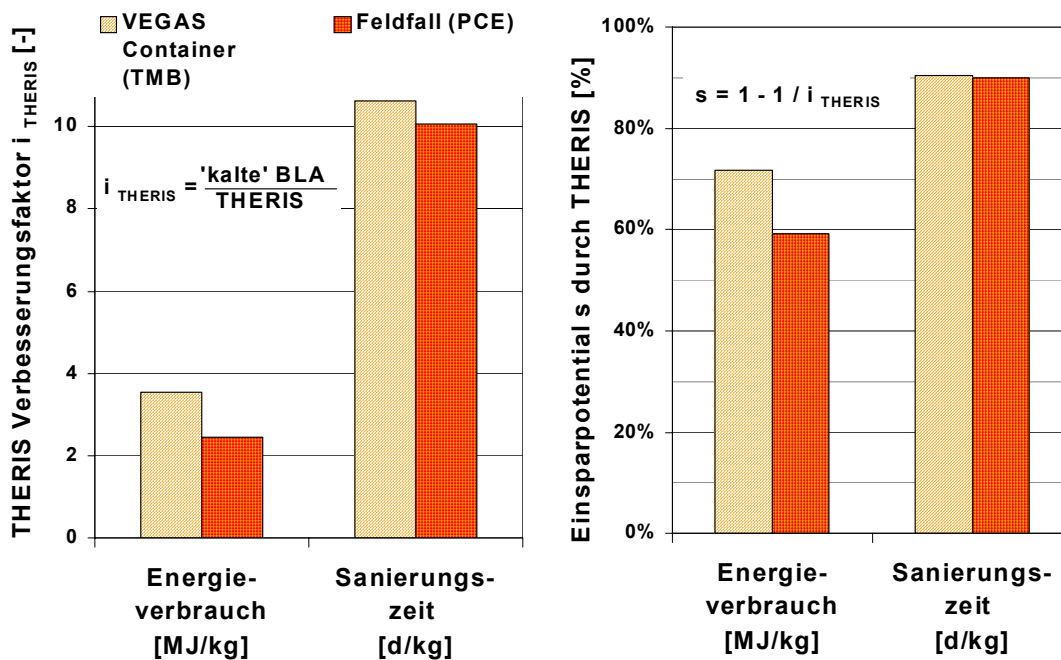
Da an beiden „Standorten“ eine „kalte“ BLA dem THERIS-Betrieb vorgeschaltet war, lassen sich beide Verfahren standortspezifisch miteinander vergleichen. Hierzu wurde die pro Betriebsphase verbrauchte Energiemenge bzw. Betriebszeit durch die in der jeweiligen Betriebsphase extrahierte Schadstoffmenge geteilt. Diese Herangehensweise begünstigt die „kalte“ BLA, da die bekannte, mit fortschreitendem Betrieb einsetzende Abnahme des Austrags [ALTENBOCKUM ET AL. 1997] nicht berücksichtigt wird. Zudem kann diese Methode das THERIS-Verfahren „benachteiligen“, wenn die Anlage bei Erreichen des Sanierungszielwertes nicht (rechtzeitig) abgeschaltet wird.



**Abb. 11.6: Standortbezogene Aufwendungen zur Extraktion eines kg Schadstoffs: a) spezifischer Energieverbrauch, b) spezifische Sanierungszeit**

Trotz dieser methodischen Einschränkungen unterschreiten die THERIS-Anlagen an beiden „Standorten“ deutlich nicht nur die spezifische Sanierungszeit, sondern auch den spezifischen Energieverbrauch der zuvor betriebenen konventionellen BLA (Abb. 11.6). Die Unterschiede in den Absolutwerten zwischen dem Großbehälter und der Feldanwendung sind auf Standortfaktoren wie Geologie, Schadstoffe und deren Verteilung im Untergrund sowie anlagenspezifische Faktoren (Design, Brunnenanordnung, Absaugleistung u.s.w.) zurückzuführen.

Um beide „Standorte“ trotzdem vergleichen zu können, kann man den jeweiligen Wert für die „kalte“ BLA durch den am selben Standort für die THERIS-Anlage ermittelten dividieren. Hieraus ergibt sich für beide Fälle für die „kalte“ BLA ein etwa um den Faktor 3 höherer Energieverbrauch und eine um den Faktor 10 längere Betriebszeit (Abb. 11.7). Aufgrund der oben gemachten Überschätzung der „kalten“ BLA können diese Werte für beide Standorte als „Mindestwerte“ interpretiert werden.



**Abb. 11.7: Spezifischer Verbesserungsfaktor  $i$  (Mehraufwendungen der „kalten“ BLA) und spezifisches Einsparpotential  $s$  (bei der „kalten“ BLA) durch die THERIS-Anwendung**

## 11.4 Zusammenfassung und Ausblick

Wie bereits aus vergleichenden Untersuchungen zwischen „kalter“ BLA und dem TUBA-Verfahren bekannt [HIESTER ET AL. 2003A], können thermische In-Situ-Sanierungen deutliche Vorteile gegenüber der konventionellen „kalten“ BLA haben. Wie gezeigt, ist dem hier vorgestellten THERIS-Verfahren eine schnelle, zuverlässige und nachhaltige In-Situ-Sanierung auch gering durchlässiger Böden binnen wenigen Wochen möglich. Maßgeblich bewirken die durch Trocknung des Bodenkörpers hervorgerufene Erhöhung der Gasdurchlässigkeit und der effektiven Diffusion sowie die durch die Temperaturerhöhung beschleunigte Überführung der flüssigen Schadstoffe (NAPL) in die Gasphase (Henry, Dampfdruck) eine signifikante Leistungssteigerung. Auch bei Überschätzung der Leistungsfähigkeit der „kalten“ Bodenluftabsaugung ist eine Einsparung von 90% der Sanierungszeit und 2/3 der Energie durch Umstellung der konventionellen Anlage auf das THERIS-Verfahren möglich (Abb. 11.7).

Die Robustheit einer THERIS-Anlage ermöglicht neben der schnellen Installation einen sicheren und witterungsunabhängigen Betrieb. Gegenüber einer „kalten“ BLA sind die Installationskosten einer THERIS-Anlage bedingt durch den Einbau von Heizelementen und Monitoringsystemen höher. Diesen Mehrkosten stehen durch die Verkürzung der Sanierungszeit kumulativ geringere Betriebskosten (z.B. Energieverbrauch, Anlagenmiete) und geringere Personalaufwendungen für Überwachungsaufgaben gegenüber.

Durch das zügige und nachhaltige Erreichen des Sanierungsziels nach Einsatz des THERIS-Verfahrens ist zudem eine deutlich schneller Wiedernutzung der sanierten Fläche durch die Immobilienwirtschaft möglich.

Im Laufe der nächsten Monate ist die Dokumentation weiterer Feldanwendungen des THERIS-Verfahrens unter <http://www.reconsite.de> geplant.

## 11.5 Literaturhinweise

ALTENBOCKUM, M.; BÖCKEL, R.; FEIGGE-MUNTZIG, A.; HAUSMANN, R.; REBHAN, A.; SCHELLARTZ, G., 1997: Bodenluftsanierung. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ALTENBOCKUM, M. BLOMQUIST, K.; KÖSSENDROP, R. 2001: Arbeitshilfe Bodenluftsanierung. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

BAKER, R., VINEGAR, H., STEGMEIER, G. 1999: Use of In Situ Thermal Conduction Heating to Enhance Soil Vapor Extraction. Contaminated Soils, Volume 4, Editor Kosteci, P., Calabrese, E., Bonazountas, M., Amherst Scientific Publishers, Massachusetts, USA

HIESTER, U.; SCHRENK, V.; WEISS, T., 2003a: Environmental Balancing of 'Cold' SVE and Thermally Enhanced Soil Vapour Extraction – Practical Support for Decision Makers, Proc. of the ConSoil 2003, ICC, Gent, Belgium, May 12 – 16, 2003

HIESTER, U., THEURER T., WINKLER, A., KOSCHITZKY, H.-P., FÄRBER, A. 2003B: Technical scale investigations for the in-situ remediation of low volatile contaminants by thermal wells. Proc. of the ConSoil 2003, ICC, Gent, Belgium, May 12 – 16, 2003

HIESTER, U., THEURER, T., WINKLER, A., FÄRBER, A., H. KOSCHITZKY 2003C: THERIS: Sanierung der ungesättigten Bodenzone mittels fester Wärmequellen. Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, Editor: Schrenk, V., Batera, K. Barczewski, B., Weber, K. & H.-P. Koschitzky, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 10/2003. - Nr.: 124 - Seiten: 173-183 - ISBN: 3-933761-27-1

HIESTER, U., THEURER, T., WINKLER, A., H. KOSCHITZKY 2003D: Technologieentwicklung zur thermischen In-Situ-Sanierung gering durchlässiger Böden (THERIS). Wissenschaftlicher Bericht Nr. VEG 05, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2003. - Nr.: 2003/14 - Abschlußbericht zur Phase II, [http://www.bwplus.fzk.de/index\\_projekte\\_datenbank.html](http://www.bwplus.fzk.de/index_projekte_datenbank.html)

REID, R.C.; PRAUSNITZ, J.M.; POLING, B.E. 1987: The Properties of Liquids and Gases. 4th Editon, New York, McGraw Hill

SCHRENK, V. 2004: Ökobilanzierung zur Bewertung von Altlastensanierungsverfahren, Mitteilungsheft Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, in Vorbereitung

US-EPA 2004: In Situ Thermal Treatment of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Applications. EPA 542-R-04-010