



Symposium
Ressource Fläche

und

VEGAS – Statuskolloquium 2003

30. September und 1. Oktober 2003

Ort:

**Universität Stuttgart, Bereich Vaihingen
Ingenieurwissenschaftliches Zentrum IWZ
Pfaffenwaldring 7, Hörsaal V 7.02**

21 THERIS:SANIERUNG DER UNGESÄTTIGTEN BODENZONE MITTELS FESTER WÄRMEQUELLEN

Uwe Hiester, Tilman Theurer, Angela Winkler, Arne Färber,
Hans-Peter Koschitzky, VEGAS, Universität Stuttgart

21.1 Einleitung

Die vielfach über mehrere Jahre zu betreibende „kalte“ Bodenluftabsaugung (BLA) ist bei der In-situ-Reinigung von Schadstoffquellen in der ungesättigten Bodenzone Stand der Technik. Thermisch unterstützende Verfahren erhöhen durch die Aufheizung des Untergrundes die Verdampfungsraten der Chemikalien und führen so zu deutlich kürzeren Sanierungszeiten [WINKLER ET AL. 2001]. Für homogene Bodenstrukturen guter Durchlässigkeit und leichtflüchtige Schadstoffe konnte an Feldstandorten sowohl die Effizienzsteigerung der Sanierung durch Dampfinjektionen [SCHMIDT ET AL. 2000, THEURER ET AL. 2000], als auch deren ökologische Vorzüge gezeigt werden [HIESTER ET AL. 2003a].

Feste Wärmequellen in Form elektrisch betriebener Heizlanzen (THERIS-Verfahren) arbeiten bei Temperaturen von mehreren 100°C und ermöglichen aufgrund der von einem Wärmeträgermedium unabhängigen Art des Energieeintrags die In-situ-Sanierung gering durchlässiger Bodenschichten. Durch die gezielte Aufheizung des kontaminierten Bereiches soll ein effizienter Austrag von mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffen aus gering durchlässigen Bodenschichten erzielt werden (Abbildung 21.1).

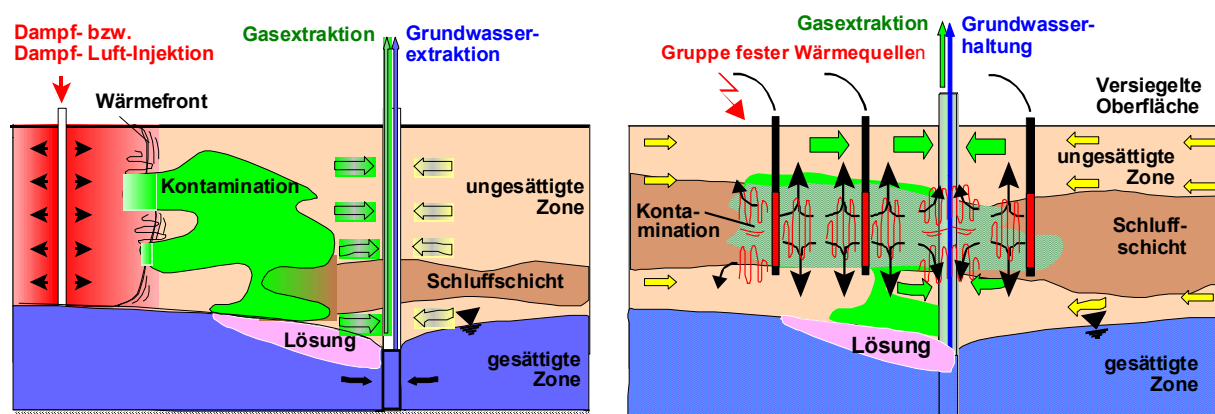


Abbildung 21.1: Prinzipskizzen zur Dampf-(Luft-) Injektion und zu festen Wärmequellen

Aufbauend auf den experimentellen und numerischen Grundlagenuntersuchungen der letzten Jahren [THEURER ET AL. 2002, 2003a, WINKLER 2003] wurde in diesem Jahr in

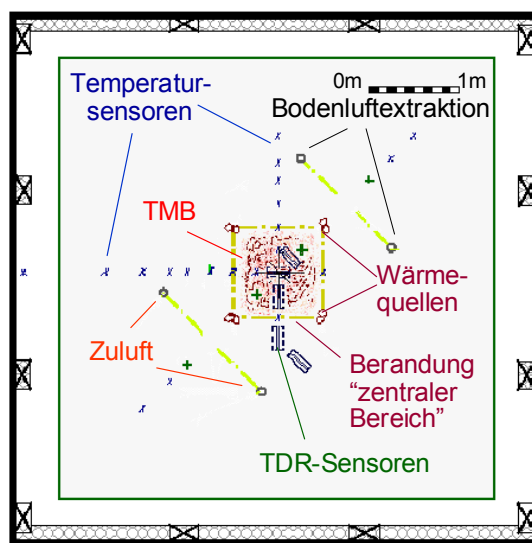
einem VEGAS-Großbehälter ein Sanierungsexperiment zum Nachweis der technischen Einsatzfähigkeit des THERIS-Verfahrens durchgeführt.

21.2 SANIERUNGSEXPERIMENT AUF TECHNIKUMSSKALA

21.2.1 Motivation und Versuchsaufbau

Als Bindeglied zwischen Versuchen auf Laborskala mit Volumina von wenigen Litern und den Bedingungen auf Feldstandorten mit mehreren hundert Kubikmetern verunreinigten Bodens stehen in VEGAS Container für Versuche auf Technikumsskala zur Verfügung. Für entsprechende Untersuchungen zur Entwicklung des THERIS-Verfahrens ist in einem Container mit einer quadratische Grundfläche mit 6 m Kantenlänge und einer Höhe von 4,5 m ein geschichteter Bodenkörper von ca. 150 m³ eingebaut (Abbildung 21.2).

Aufsicht



Ansicht

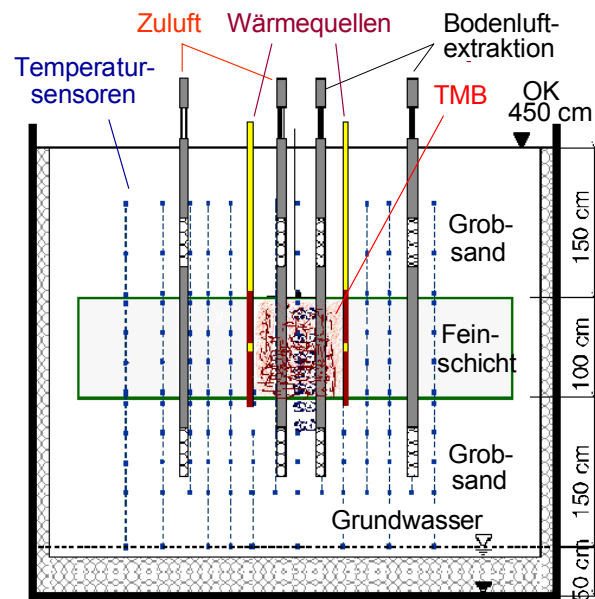


Abbildung 21.2: Aufsicht und Ansicht des Technikumversuchs mit festen Wärmequellen

Die 1 m mächtige, gering permeable Feinschicht ist hinsichtlich Sieblinie und Durchlässigkeit einem Geschiebelehm vergleichbar. Der sie umschließende Grobsand weist eine um den Faktor 100 bessere Permeabilität auf. Im Bodenkörper sind neben den horizontal mittig im Meterabstand angeordneten Heizelementen auch Bodenluft-absaugbrunnen sowie über 300 Temperatursensoren und 35 hochtemperaturresistente Time-Domäne-Reflectometry (TDR) Sonden zur Bodenfeuchtemessung eingebaut.

Der Raum zwischen der Hezelementgruppe wird als „zentraler Bereich“ im folgenden eingehender betrachtet. Die Extraktionsbrunnen befinden sich in der Aufsicht außerhalb dieses Bereiches mit je einem Extraktionshorizont im oberen und unteren Grobsandhorizont (Abbildung 21.2).

Die Wärme- und Stofftransportprozesse im technischen Maßstab wurde 2002 anhand eines Wärmetransportexperiment analysiert [HIESTER ET AL. 2002, 2003b]. Mit der hieraus entwickelten Betriebsweise der Hezelementgruppe wurde zum Nachweis der technischen Anwendbarkeit fester Wärmequellen zur In-situ-Reinigung teilgesättigter Böden in diesem Jahr ein Sanierungsexperiment durchgeführt.

Als Schadstoff wurde Trimethylbenzol (TMB) eingesetzt. TMB wird als wassergefährdend eingestuft und ist über seine Dichte ($0,86 \text{ g/cm}^3$ bei 20°C) und seinen Siedepunkt (169°C) als „mittelflüchtiger LNAPL“ (Lighter than Water Non Aqueous Phase Liquid) charakterisiert. Nach der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) beträgt sein Prüfwert für den Wirkungspfad Boden - Mensch für Kinderspielflächen, Wohn- sowie Gewerbegebiete 200 mg/kg Trockenmasse [STOLLER 2000].

Über ein Infiltrationssystem wurden 30 kg TMB an der Oberkante der wasserinitialgesättigten Feinschicht versickert. In zuvor durchgeführten Visualisierungsexperimenten konnte gezeigt werden, dass der Schadstoff über Kapillarkräfte in die Feinschicht „gesaugt“ wird (Abbildung 21.3).

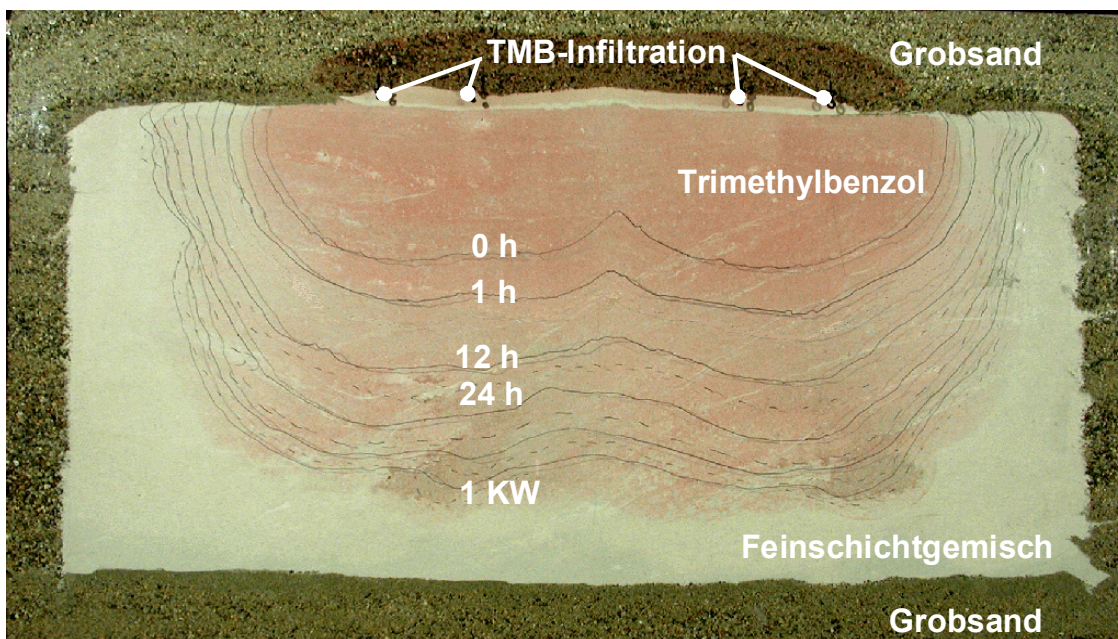


Abbildung 21.3: Visualisierungsexperiment zur Ausbreitung von Trimethylbenzol (TMB) nach der Versickerung in eine mit Wasser initialgesättigte Feinschicht

Im Technikumsversuch verteilt sich das TMB vornehmlich im „zentralen Bereich“ der Feinschicht. Daher überschreiten die Schadstoffbelastung bezogen auf die Trockensubstanz Boden hier den Prüfwert nach BBodSchV etwa um den Faktor 100.

21.2.2 Versuchsdurchführung

Das Sanierungsexperiment gliedert sich in drei zeitlich aufeinander folgende Abschnitte:

- die kalte „konventionelle“ Bodenluftabsaugung (BLA),
- die thermische In-situ-Sanierung THERIS mit festen Wärmequellen und
- die abschließende Kontrolle der erfolgten Sanierung.

Mit dem Betrieb der „kalten“ BLA erhält man für die Bedingungen im Container verlässliche Daten über die Leistungsfähigkeit dieses in der Praxis weit verbreiteten Verfahrens. Diese Daten bilden die Grundlage zum Vergleich der konventionellen mit der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung. Mittels eines mobilen Gaschromatographen erfolgt die kontinuierliche Überwachung der Schadstoffextraktion, die Abluftreinigung im Anschluss daran gewährleistet ein konventioneller Aktivkohlefilter.

Mit Inbetriebnahme der Heizelemente mit einer konstanten Temperatur von 500°C beginnt die thermische In-situ-Sanierung THERIS. Die Bodenluftabsaugung wird hierbei weiter betrieben, um das Austragsverhalten beider Verfahren direkt vergleichen zu können. Schadstoffbilanzierung und Abluftreinigung erfolgen ebenfalls analog der BLA, allerdings wird der warme Extraktionsluftstrom zuvor in einem Rohrbündelkondensator gekühlt. Die Sanierungsphase kann als abgeschlossen definiert werden, wenn die Austragskonzentrationen den Richtwert der TA Luft von 50 mg/m³ [TA LUFT 2002] unterschreiten.

Mit der abschließenden Kontrolle der Sanierung erfolgt eine Qualitätssicherung verbunden mit der Klärung der folgenden Fragen.

- Lässt sich der zentrale Bereich auf den Siedepunkt von TMB von 170°C erhitzen?
- Wird bei einem weiteren Erhitzen des zentralen Bodenkörpers noch nennenswert Schadstoff ausgetragen?
- Welche zusätzliche Energiemenge ist hierfür erforderlich?
- Welche Schadstoffbelastungen im Boden sind im Container nach seiner Abkühlung noch vorhanden?

21.2.3 Sanierungsverlauf und Prozessbeschreibung

„Kalte“ Bodenluftabsaugung“

Physikalisch hängen die Entwicklung der Bodenwassersättigung, der Temperatur im zentralen Bereich der Feinschicht und der Schadstoffaustrag eng miteinander zusammen. Zur Beurteilung der Effizienz des Sanierungsverfahrens sind die Bilanzierung des Schadstoffaustrags und der erforderliche Gesamtenergiebedarf der Sanierungsverfahren von Interesse. In Abbildung 21.4 sind zur Veranschaulichung der gekoppelten Prozesse die wesentlichen Messgrößen zusammenfassend dargestellt.

Zum Beginn der „kalten“ BLA ist die Feinschicht mit Wasser initialgesättigt. Die Sättigung ist über die eingebauten TDR-Sonden quantifiziert (Abbildung 21.4a): am unteren Rand dieser Schicht ist sie aufgrund der Kapillardruck-Sättigungsbeziehung größer als am oberen Rand. Hinzu kommt eine Schadstoffsättigung, welche hier jedoch nicht explizit dargestellt ist. Sie variiert ebenfalls mit der Höhe und liegt etwa zwischen 3 und 10 %.

Über zwei Bodenluftbrunnen mit jeweils einem Absaughorizont im unteren und oberen Grobsand werden insgesamt 35 m³ Bodenluft je Stunde abgesaugt. Geringe Dampfdrücke ergeben sich aus der Temperaturen im Bodenkörper von etwas 20°C (= Labortemperatur), so dass die erzielten TMB-Austragskonzentrationen zwischen 0,1 – 0,2 g/m³ Bodenluft lagen (Abb. 4c) und über zwei Monate nahezu konstant blieben. Insgesamt wurden in dieser Zeit durch die „kalte“ BLA 6,4 kg TMB extrahiert.

Da die Reinigungsleistung dieses Verfahrens, wie aus der Vielzahl an Feldfällen bekannt, zum Beginn am größten ist, überschätzt man seine Leistungsfähigkeit mit der linearen Extrapolation der Anfangsausträge deutlich. Mit diesem sehr optimistischen Ansatz würde die Mindestsanierungszeit mit der „kalten“ BLA unter „Laborbedingungen“ (ca. 20°C) 8 Monate betragen.

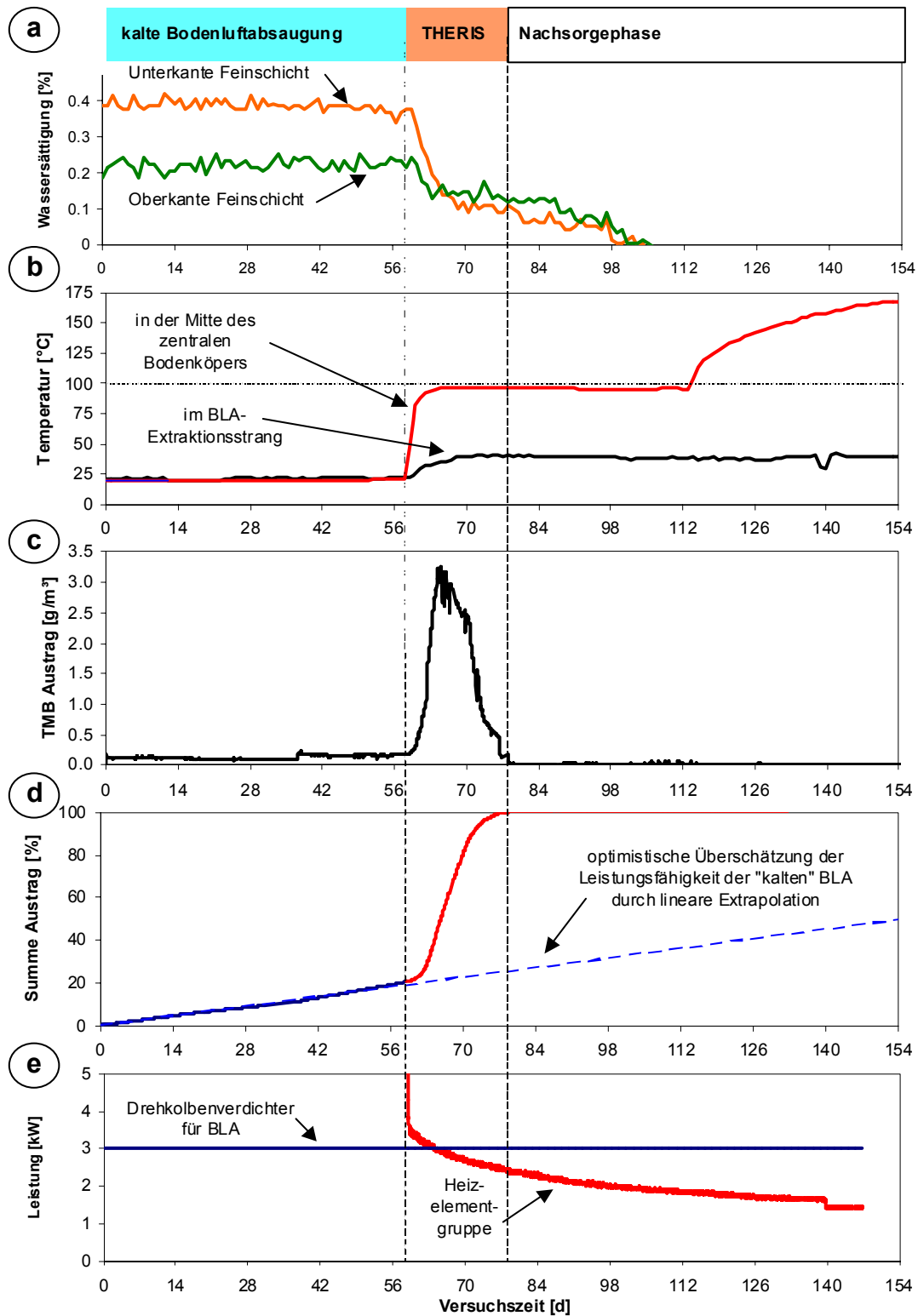


Abbildung 21.4: Zeitlicher Verlauf einiger Messgrößen: a) Wassersättigung in der Mitte der Feinschicht, b) Temperaturverlauf im Boden, am Extraktionsbrunnen und vor dem Kondensator, c) TMB Austragskonzentrationen, d) Austragssummenkurve, e) Leistung der BLA und der Heizelementgruppe

THERIS-Verfahren

Durch die thermische Unterstützung werden in der Umgebung der Wärmequellen Porenwasser und Schadstoff verdampft und strömen mit der Bodenluft entlang des sich von der Wärmequelle zur kälteren Umgebung ausbildenden Temperaturgradienten. Mit dem Gasstrom wird Energie in Form der Verdampfungsenthalpie transportiert, die bei Kondensation in kühleren Randbereichen wieder frei wird und so eine schnelle Aufheizung des Bodenkörpers bewirkt. Gleichzeitig wird Wasser aus den kälteren, feuchten Randbereichen in Flüssigphase entgegen den Temperaturgradienten durch Kapillarkräfte in den bereits heißen Bereich transportiert und dort erneut verdampft. Im Bereich der sich als Heatpipe-Effekt bekannten Zirkulationsströmung [UDELL und FITCH 1985] (Abbildung 21.5) überwiegt durch die Strömung der Gas- und Flüssigphase der konvektive Wärmetransport, in den anderen Bereichen dominiert Konduktion.

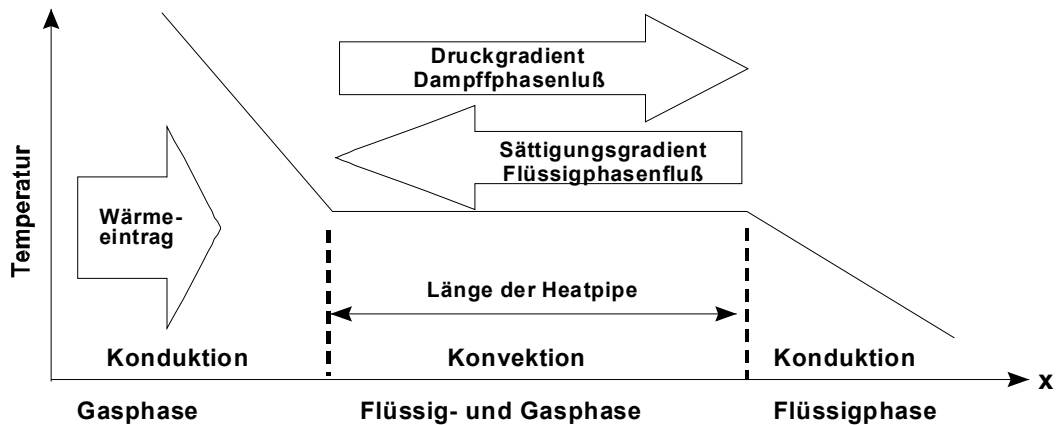


Abbildung 21.5: Prinzip des Heatpipe-Effekts [geändert nach UDELL und FITCH 1985]

Durch die anfänglich schnelle Abnahme der Flüssigphasensättigung, insbesondere im unteren Bereich der Feinschicht, erhöht sich die Gasdurchlässigkeit der Feinschicht. Die Anfangstrocknung der Feinschicht verlangsamt sich durch die sich ausbildende Heatpipe und ist jetzt über die gesamte Schichthöhe ähnlich (Abbildung 21.4a). Durch die vorhandene Restsättigung können die Bodentemperaturen nicht über 100°C steigen (Abbildung 21.4b).

Eine weitere Erhöhung der Temperatur ist für die Sanierung jedoch nicht erforderlich: das stationäre Temperaturniveau von über 90°C im Bereich der hohen Schadstoff-sättigungen zwischen den Heizelementen führt bereits binnen der ersten Woche des Heizanlagenbetriebs zu einer Verzehnfachung der Austragskonzentrationen (Abbildung 21.4c). Hingegen steigen die Temperaturen im Extraktionsstrang durch die räumlich versetzte Absaugung zum zentralen Feld nur mäßig an (Abbildung 21.4b). Die

Mischung von unbelasteter Bodenluft aus den Randbereichen mit der im zentralen Bereich befindlichen stark mit Schadstoff belasteten Bodenluft verhindert die Kondensation und Mobilisation von TMB in Flüssigphase¹⁶.

Die thermische Sanierung konnte nach 20 Tagen mit Unterschreiten der TA Luft-Anforderungen und der Extraktion von über 23 kg TMB abgeschlossen werden.

Sanierungskontrolle

Die Sanierungskontrolle erfolgt in zwei Abschnitten. Zunächst wird die Heizelementgruppe weiter betrieben. Die Trocknung des zentralen Bereiches erfolgt langsam aber stetig. Mit Erreichen der vollständigen Trocknung steigen die Bodentemperaturen über 100°C. Gegenüber der schnellen ersten, konvektiv dominierten Erwärmung von 20°C auf 90°C ist diese zweite, konduktive Erwärmungsphase deutlich langsamer. Durch die räumliche Entfernung der Absaughorizonte der BLA zum zentralen Bereich ist hier kein Einfluss der zusätzlichen Erwärmung auf die Extraktionstemperatur der Bodenluft messbar (Abbildung 21.4b). Erwartungsgemäß findet kein weiterer signifikanter Schadstoffaustrag statt (Abbildung 21.4c). Die von der Heizelementgruppe benötigte Leistung sinkt mit Verkleinerung des von der Heatpipe beeinflussten Bereiches kontinuierlich (Abbildung 21.4e).

Mit Erreichen von über 170°C im zentralen Bereich wurde der Betrieb der Heizelementgruppe eingestellt. Im zweiten Abschnitt der Sanierungskontrolle werden nach erfolgter Abkühlung des Bodenkörpers Bodenproben genommen und auf Schadstoffrückstände hin analysiert. Diese Beprobung steht derzeit noch aus.

21.3 BEWERTUNG DER BEIDEN SANIERUNGSVERFAHREN

Der Einsatz fester Wärmequelle auf Technikumsskala zeigt anschaulich, dass mit dieser Technologie die schnelle und effektive Reinigung einer gering durchlässigen, teilgesättigten Bodenschicht möglich ist. Der für den Betrieb der Heizelemente erforderliche Energiebedarf entspricht dem des für die BLA im Versuch eingesetzten Drehkolbenverdichters. Bei gleichem Gesamtenergieverbrauch ließe sich somit die „kalte“ BLA keine zwei Monate betreiben. Durch den Einsatz eines für den Großversuch energetisch sparsameren Seitenkanalverdichters ließe sich die Betriebszeit der „kalten“ BLA zwar verdoppeln, die zu erwartende Sanierungsleistung läge aber immer noch bei nur etwa einem Drittel der Leistung des THERIS-Verfahrens.

Selbst bei der Vernachlässigung der Halbierung des Dampfdrucks von TMB durch die Umgebungstemperatur von ca. 20°C („Labor“) auf 10°C („Feld“) und der

¹⁶ Sättigungskonzentration für TMB in Luft bei 20°C = 10,5 g/m³

Überschätzung der Reinigungsleistung der „kalten“ BLA durch die Annahme eines linearen Schadstoffaustrags ergibt sich für diese eine Mindestbetriebszeit von über 240 Tagen (im Labor). Diese liegt um den Faktor 12 über der für das THERIS-Verfahren benötigten Sanierungszeit. Der Energieverbrauch für den Betrieb der „kalten“ BLA ist hierbei unter gleichen Randbedingungen in Abhängigkeit vom eingesetzten Verdichter mindestens vier- bis fünfmal höher als beim THERIS-Verfahren. „Effizienter Energieeinsatz“ bedeutet daher, in die Untergrunderwärmung zu investieren, um einen schnellen Schadstoffaustrag zu realisieren.

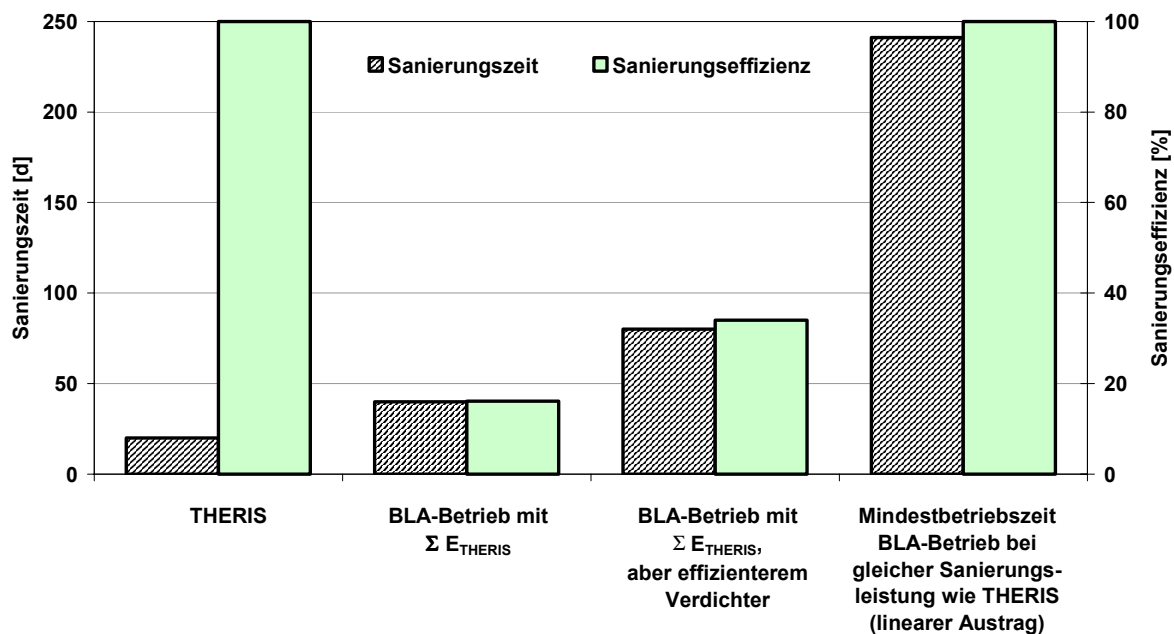


Abbildung 21.6: Sanierungszeit (schr. Balken) und zu erwartender Sanierungserfolg bei optimistischer Überschätzung der Leistungsfähigkeit der „kalten“ BLA durch lineare Extrapolation des Schadstoffaustrags und 20°C (ΣE = Summe Energiebedarf)

21.4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Technikumsversuch konnte gezeigt werden, dass das THERIS-Verfahren bei der In-situ-Reinigung einer TMB-verunreinigten gering durchlässigen, teilgesättigten Bodenschicht der „kalten“ BLA hinsichtlich des Energieverbrauchs beim Betrieb und der erforderlichen Sanierungszeit überlegen ist.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum THERIS-Verfahren sind qualitativ auf die Feldskala übertragbar. Hier wird der Einsatz größerer Hezelementgruppen den Energieverbrauch verringern, da Energieverluste über die Außenflächen des beheizten Bodenvolumens im Verhältnis zu seinem Volumen kleiner sind.

Finanziell weist das THERIS-Verfahren durch den Einbau der Hezelemente höhere

Installationskosten gegenüber der „kalten“ BLA auf. Diese können jedoch durch die geringeren Betriebskosten (Energieverbrauch) und die schnellere Wiedernutzung der sanierten Fläche seitens der Immobilienwirtschaft kompensiert werden.

21.5 Danksagung

Das Forschungsprojekt THERIS wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Projektträger BWPLUS (Baden-Württembergisches Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“) paritätisch gefördert. Ferner danken wir allen hier nicht namentlich aufgeführten Mitwirkenden aus Werkstätten und Datenmanagement sei für ihren unermüdlichen Einsatz.

21.6 Literaturhinweise

- HIESTER, U., THEURER T., WINKLER, A., KOSCHITZKY, H.-P., 2002A: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BWPLUS 2002, 26.03.2002
- 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
- SCHMIDT, R., KOSCHITZKY, H.-P. 1999: Pilothafte Sanierung eines BTEX Schadens an einem ehemaligen Gaswerksstandort mit der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung (TUBA) durch Dampfinjektion, Wiss. Bericht WB 99/5 (HG 262), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- STOLLER INGENIEURTECHNIK GMBH 2000: STARS-Stoffdatenbank für Altlastenrelevante Stoffe, Dresden
- TA LUFT: Erst allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 22.07.2002
- THEURER, T., WINKLER, A., KOSCHITZKY, H.-P., SCHMIDT, R., 2000: Remediation of a landfill contamination by steam injection, Proc. of Groundwater 2000, Kopenhagen, Denmark, June 6.-8., 2000, ISBN 9058091333
- THEURER, T., WINKLER, A., HIESTER, U., KOSCHITZKY, H.-P., 2002: Developing thermally enhanced in-situ remediation technology by experiment and numerical simulation.

In Proc. Groundwater2002, 108-112, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA

THEURER, T., WINKLER, A., HIESTER, U., KOSCHITZKY, H.-P., 2003a: Mathematical and numerical modeling of thermally enhanced in-situ remediation with thermal wells. Proc. of the ConSoil 2003, ICC, Gent, Belgium, May 12 - 16, 2003

UDELL, K.S., FITCH, J.S., 1985. Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Media Considering Evaporation, Condensation and Non-Condensable Gas Effects. 23rd ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Denver, CO, 1985

WINKLER, A., KOSCHITZKY, H.-P., WEISKE, A., GROPPER, H., 2001: Statusbericht "Thermische In-situ-Sanierungstechnologien", Arbeitskreis „Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden“, Schriftenreihe des *altlastenforums* Baden-Württemberg e.V., Heft 4, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

WINKLER, A., 2003: Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen. Mitteilungen, Heft 115, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.