

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

**Technologieentwicklung zur thermischen  
In-situ-Sanierung  
gering durchlässiger Böden  
(THERIS)**

**Abschlussbericht zur Phase II**

Uwe Hiester, Tilman Theurer, Angela Winkler, Hans-Peter Koschitzky,

Universität Stuttgart  
Institut für Wasserbau

Finanzierung:

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Projektträgerschaft Wassertechnologie und  
Entsorgung (PTWT), Forschungszentrum Karlsruhe (50%)

Förderkennzeichen: 1481207 (neu: 02481207/0)

Baden-Württembergisches Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS),  
Forschungszentrum Karlsruhe (50%)

Förderkennzeichen: BWC 20024

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mit-  
teln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Oktober 2003

## **Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden (THERIS)**

### **Kurzfassung**

Die in der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart durchgeführten Untersuchungen zur Entwicklung einer In-situ-Sanierungstechnologie für gering durchlässige Böden haben gezeigt, dass auch im technischen Maßstab ein residualgesättigter, gering durchlässiger Bodenkörper mit festen Wärmequellen auf über 170°C erhitzt werden kann und eine dort vorliegende Kontamination eines mittelflüchtigen Schadstoffs innerhalb weniger Wochen vollständig abgereinigt werden kann. Dieses Ergebnis bestätigt die Erwartung aus umfangreichen Experimenten zum Wärme- und Stofftransport in porösen Medien in der ersten Phase dieses Projektes.

Neben den experimentellen Arbeiten wurden die maßgebenden Prozesse für den auftretenden Stoff- und Wärmetransport mittels numerischer Simulationen mit dem Mehrphasen-Mehrkomponentenmodell MUFTE untersucht und interpretiert, um die Ergebnisse auf andere Skalen und Bodenstrukturen zu übertragen. Dabei zeigte sich, daß aufgrund der komplexeren Verhältnisse bei dreidimensionaler Strömung eine vollständige Übertragung der niederdimensionalen Ergebnisse für eine Feldanwendung nicht möglich ist. Die auf den kleinskaligen Untersuchungen und numerischen Arbeiten aufbauenden Technikumsversuche in einem VEGAS-Großbehälter schließen diese Lücke.

In diesem Bericht werden die Resultate der zweiten Projektphase vorgestellt. Neben den Ergebnissen der beiden Großversuche, deren Gegenstand der großskalige Transport von Wärme als auch die Ermittlung der Sanierungseffizienz war, werden auch numerische Parameterstudien und ausgesuchte Laborexperimente vorgestellt und diskutiert. Durch diese im Rahmen des Forschungsprojekts bisher gewonnenen Erkenntnisse sind erstmals eindeutige Aussagen über Möglichkeiten und Grenzen der festen Wärmequellen als Sanierungsverfahren möglich.

Nach Abschluss des Projekts steht eine In-situ-Sanierungstechnologie zur Verfügung, die im Rahmen von Pilotvorhaben endgültig in die Anwendungspraxis überführt werden kann. Entsprechende Planungen werden bereits durchgeführt.

## **Development of a thermally enhanced in-situ remediation technology for low permeable soils (THERIS)**

### **Abstract**

Remediation experiments on thermally enhanced soil vapour extraction have been conducted at the VEGAS facility, Institute of Hydraulic Engineering, Universität Stuttgart. It was proved that heating of humid soil by thermal wells up to temperatures above 170°C and remediation of semi-volatile compounds is possible. The achievement of this final goal had been anticipated as a consequence of the successful experiments on heat- and mass transfer in porous media on small scale in recent years.

In parallel to the experimental works, the governing processes were investigated with the numerical simulator MUFTE to transfer the results to different soil types and scales. The results showed that it was only partly possible to apply the knowledge from small-scale experiments to the more complex situation of three-dimensional flow at field sites to be remediated. The gap was filled by three-dimensional experimental works on technical scale in one of the large tanks of the VEGAS facility and appropriate numerical modeling.

In this study, the conclusions of both technical scale experiments on heat transport and remediation efficiency and numerical investigations are presented and discussed. After finishing this research work, for the first time clear statements on the potentialities and limitations of the thermal well technique can be made. The in situ remediation technology is ready to be applied in pilot studies to transfer this technology to the market. First plannings are underway.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
1.1 Motivation .....	5
1.2 Projektphasen.....	6
2. Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Projektphase .....	7
3. Vorbereitende Untersuchungen auf Labormaßstab .....	8
3.1. Numerische Untersuchungen zum Wärme- und Stofftransport.....	8
3.1.1. Einfluß verschiedener Faktoren auf die Wärmetransportfähigkeit.....	8
3.1.2. Einfluß verschiedener Faktoren auf den Sanierungsgrad .....	8
3.2. Zweidimensional-ebene Wärmetransport- und Sanierungsexperimente.....	9
3.3. Vorbereitende 2D- Küvettenexperimente für die 3D-Großversuche.....	10
3.4. Radialsymmetrische Wärme- und Stofftransportuntersuchungen .....	11
4. Planung und Durchführung der Grossversuche .....	13
4.1. Anforderungen.....	13
4.2. Aufbau .....	13
5. Ergebnisse des ersten Großversuchs zum dreidimensionalen Wärmetransport in geschichteten Böden.....	15
5.1. Aufheizphase mit vier Heizelementen: .....	15
5.2. Versuchsphase II: Ausbilden eines Heatpipe-Bereiches .....	16
5.3. Versuchsphase III: Zuschalten der Bodenluftabsaugung .....	17
5.4. Versuchsphase IV: Intermittierender Betrieb der Heizelemente.....	17
5.5. Versuchsphase V: Aufheizphase mit acht Heizelementen .....	17
5.6. Versuchsphase VI: Trocknung des zentralen Bereichs .....	17
5.7. Versuchsphase VII: Hochtemperaturbereich.....	18
5.8. Versuchsphase VIII: Steigender Grundwasserspiegel .....	19
5.9. Letzte Versuchsphase IX: Abschluß des Versuchs und Abkühlphase .....	20
5.10. Zusammenfassung der Ergebnisse des ersten Großversuchs.....	20
6. Nachweis der Sanierungseffizienz auf Technikumsskala .....	21
6.1. Anforderungen und Vorbereitung .....	21
6.2. Zusätzliche Messtechnik zur Erfassung des Massenaustrags .....	21
6.3. Phasen der Versuchsdurchführung .....	22
6.4. Vergleich der „kalten“ BLA mit dem thermischen THERIS-Verfahren .....	25
6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse des Sanierungsexperiments .....	26
7. Betrachtungen für den Einsatz fester Wärmequellen im Feld .....	27
8. Zusammenfassung und Ausblick .....	28
Literaturverzeichnis.....	28

**Anlage1:** Hiester, U., Theurer, T., Koschitzky, H.-P., Winkler, A., 2002a: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BW PLUS 2002, 26. Februar 2002, Karlsruhe

- Anlage2:** Theurer, T., Hiester, U., Koschitzky, H.-P., Winkler, A., 2003: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BW PLUS 2003, 11. März 2003, Karlsruhe
- Anlage3:** Theurer, T.; Hiester, U.; Winkler, A.; Koschitzky, H.-P., 2003b: Mathematical and Numerical Modeling of Thermally Enhanced Remediation with Thermal Wells, 8th International FZK / TNO Conference on Contaminated Soil, ConSoil 2003, ICC, Gent, May 12 - 16, 2003
- Anlage4:** Hiester, U., Schmid, G. 2003f: Entwicklung von temperatur- und schadstoffbeständigen TDR-Sonden zur Sättigungsmessung bei der thermischen In-situ Sanierung THERIS, Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Sonderdruck der Zeitschrift „Wasser- und Geotechnologien“, in Druck

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Bei der In-situ-Sanierung von Verunreinigungen der ungesättigten Bodenzone mit mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffen wird oft immer noch die kalte Bodenluftabsaugung (BLA) als Stand der Technik angewandt. Diese ist aber nur bei leichtflüchtigen Schadstoffen und gut luftdurchlässigen Böden wirtschaftlich einsetzbar. Da die Massenausträge von der Flüchtigkeit des Schadstoffs und dem geologischen Bodenaufbau abhängen, sind selbst bei günstigen Randbedingungen meist mehrjährige Sanierungszeiten zu veranschlagen. Durch Erhöhung der Temperatur im Untergrund steigt die Flüchtigkeit der Schadstoffe exponentiell an. Dies führt zu einer Vervielfachung der Massenausträge und ermöglicht daher deutlich kürzere Sanierungszeiten. Nicht abgeschlossene Sanierungen behindern vielfach administrativ wie technisch den Beginn der Wiedernutzung von Industriebrachen, so daß dies insbesondere im innerstädtischen Bereich Folgeprobleme nach sich zieht. Schnelle und zuverlässig arbeitende Sanierungsverfahren zur Extraktion des Großteils der Schadstoffe können hier Wegbereiter für Altlastenbesitzer und Investoren sein.

Das Forschungsvorhaben "*Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden (THERIS)*" zielt auf die Entwicklung eines Verfahrens zur wirtschaftlichen Sanierung der ungesättigten Bodenzone bei Vorliegen einer Kontamination mit mittel- bis schwerflüchtigen organischen Schadstoffen auch bei gering durchlässigem Untergrund. Der Energieeintrag erfolgt dabei nicht durch Einleiten eines Wärmeträgermediums wie z.B. Dampf (z.B. TUBA-Verfahren, Färber, 1997; Betz, 1998, Koschitzky et al., 1999; Schmidt, 2001), sondern durch direkten Energieeintrag über feste Wärmequellen in Form von elektrisch betriebenen Heizelementen und Wärmeleitung im Untergrund (Abb. 1). Gegenüber anderen thermischen Verfahren, wie z. B. dem Radio Frequency Heating (RFH) bietet sich dieser Ansatz wegen seiner einfachen Handhabung und der guten Verfügbarkeit von elektrischem Strom an. Die Gleichmäßigkeit der Aufheizung, die bei allen dieser Verfahren nicht gewährleistet ist, wird bei festen Wärmequellen vor allem durch die Optimierung der Anordnung der Heizlanzen und deren Geometrie erreicht, deren dreidimensionale Untersuchung im Technikumsmaßstab unter anderem Gegenstand des F+E-Vorhabens war.

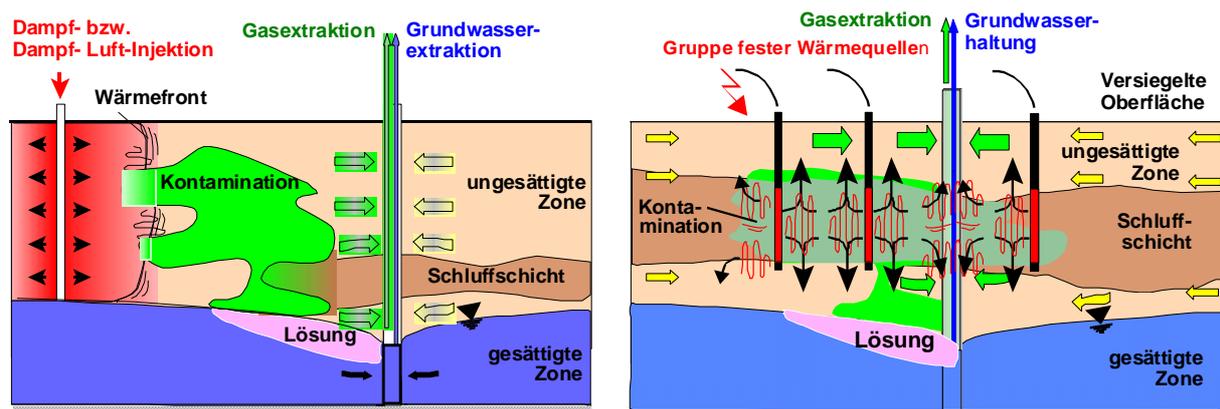


Abbildung 1: Prinzipskizzen zur Dampf-(Luft) Injektion und zu festen Wärmequellen

## 1.2 Projektphasen

In der ersten Projektphase (Förderkennzeichen: BWSB 99009 [BWPLUS], 1481207 [BMBF]) wurden hierzu die maßgeblichen Wärme- und Schadstofftransportprozesse bei hohen Heiztemperaturen ( $\gg 100^\circ\text{C}$ ) experimentell untersucht und analysiert (Winkler et al., 2001d). Die so entwickelten konzeptionellen Modelle wurden in ein numerisches Simulationswerkzeug (Helmig, 1997) implementiert und für die Planung von großskaligen Experimenten genutzt (Theurer et al., 2002, Hiester et al., 2002a). In diesen werden die auf Laborskala gewonnenen Erkenntnisse in eine Technologieentwicklung für die Feldskala umgesetzt. Die numerischen Modelle führen über Parameterstudien zu Sanierungsszenarien für unterschiedliche Böden und Schadstoffe, sowie über die Weiterentwicklung von 3D-Modellierung zur Berechnung komplexer Problemsituationen.

In der zweiten Projektphase (Förderkennzeichen: BWSB 99009 [BWPLUS], 02WT0266 [BMBF]), über die im folgenden berichtet wird, erfolgte von August 2001 bis September 2003 der Übergang vom Labormaßstab auf die Feldskala. Neben der eigentlichen Technologieentwicklung wurde über Großversuche und numerische Studien eine Abgrenzung der Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens ermittelt. Die Großversuche mit dem Ziel der Untersuchung von dreidimensionalem Wärme- und Schadstofftransport bei naturnahen geschichteten Bodenstrukturen wurden auf Basis von 2D-Versuchen und numerischen Berechnungen vordimensioniert und geplant. Um einen Feldeinsatz dimensionieren und die Technik auch erfolgreich anhand eines „echten“ Schadensfalles einsetzen zu können, wurde die entwickelte Meßtechnik sowie die anlagentechnische Peripherie optimiert.

Zur Zeit werden intensiv Kontakte geknüpft, um nach Abschluß des Projektes den Technologietransfer in die Praxis mittels eines Industriepartners vorzunehmen. Eine pilothafte Sanierung eines realen Schadensfalls ist für Ende 2003 / Anfang 2004 in Planung.

## 2. Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Projektphase

In der ersten, sich über 18 Monaten erstreckenden Projektphase wurde anhand umfangreicher Grundlagenuntersuchungen gezeigt, daß das THERIS-Verfahren eine wirkungsvolle thermische Unterstützung der Bodenluftabsaugung auch unter schwierigen geologischen Bedingungen und für Schadstoffe geringer Flüchtigkeit darstellt. Dazu wurden in experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab die Wärmeausbreitung und der Schadstofftransport in einem porösen Medium in Abhängigkeit diverser Größen, z.B. Permeabilität und Wassersättigung, bei Temperaturen bis 300°C untersucht und auch durch numerische Berechnungen nachvollzogen. Zusammenfassend können die Ergebnisse der ersten Phase wie folgt formuliert werden (Winkler et al., 2001d und Winkler, 2003):

- Über Messung der Fluideigenschaften Dichte, Viskosität und Grenzflächenspannung konnten die konstitutiven Beziehungen temperaturabhängig analytisch formuliert und in das numerische Modell MUFTE\_UG (Helmig, 1997) implementiert werden. Damit konnten die 1D- und 2D-Versuche realitätsnah nachgerechnet werden.
- Die Untersuchung des Wärmetransports zeigt eine starke Erwärmung des Bereichs nahe des Heizelements auf Temperaturen weit über 100°C. Die Betriebstemperatur der Wärmequelle bestimmte dabei maßgeblich über den entstehenden Temperaturgradienten die Geschwindigkeit der Erwärmung.
- In allen kleinskaligen Sanierungsexperimenten konnte innerhalb der Versuchsdauer von zwei Tagen eine deutliche Erhöhung des Schadstoffaustrags sowie eine starke Verminderung der im Boden verbleibenden Restkonzentrationen erreicht werden.
- 2D-Untersuchungen zeigten, daß auch Kontaminationen in geschichteten Bodenstrukturen schnell und effektiv saniert werden. Die Gefahr der Mobilisierung von Schadstoff in Phase ist dabei als gering zu beurteilen.
- Die Wassersättigung des Bodens hat bei Temperaturen unter 100°C einen maßgeblichen Einfluß auf die Erwärmung des Bodenkörpers und den Schadstoffaustrag.
- Vorversuche zur Kombination von festen Wärmequellen und Dampfinjektion zeigten Synergieeffekte und eine Erhöhung der Schadstoffaustragsrate. Diese sind auch unter Feldbedingungen zu erwarten.

In der zweiten Projektphase stand vor allem die Frage im Vordergrund, wie sich feste Wärmequellen gezielt einsetzen lassen, um gering durchlässige Schichten im Untergrund aufzuheizen und dort vorliegende Kontamination wirtschaftlich sanieren zu können. Dazu wurden Großversuche durchgeführt, die auf Basis der Ergebnisse der ersten Projektphase sowie weiterführender Vorversuche geplant wurden.

### 3. Vorbereitende Untersuchungen auf Labormaßstab

#### 3.1. Numerische Untersuchungen zum Wärme- und Stofftransport

Im Rahmen von Parameterstudien wurden die experimentell gemessenen Temperaturen und Wassersättigungen den numerisch berechneten Ergebnissen gegenübergestellt. Grundlage war dabei in allen Fällen die in der ersten Projektphase durchgeführten Säulenversuche bzw. die jeweils zugehörigen numerischen Simulationen. Es wurden u. a. die in den Untersuchungen eingesetzten Bodenmaterialien Grobsand, Feinsand, Feinsand-Quarzmehlgemisch sowie Lößlehm verwendet (Winkler, 2003. Hiester et al., 2002a). Es kamen die mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffe Xylol, Mesitylen, DCB und Kerosin zum Einsatz (Winkler, 2003).

##### 3.1.1. Einfluß verschiedener Faktoren auf die Wärmetransportfähigkeit

Bei der Erwärmung eines teilgesättigten porösen Mediums wird Wärme sowohl in der Feststoffphase durch Wärmeleitung, sowie konvektiv mit der strömenden Flüssigphase transportiert (Winkler, 2003). Während der konduktive Anteil bei verschiedenen Böden nahezu konstant ist, hängt die Konvektion stark von der Permeabilität und den Kapillarkräften ab. Daher stellt sich die Frage, wie sich die Gesamtwärmetransportfähigkeit als Zusammenwirken von Konvektion und Wärmeleitung bei verschiedenen Böden darstellt, um das Potential für eine thermische Sanierung durch feste Wärmequellen zu untersuchen. Daher wurde von Theurer et al. (2003b), in Analogie zur Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  basierend auf dem ersten Fourierschen Gesetz, der Parameter „Wärmetransportfähigkeit“  $\lambda^*$  definiert. Dieser enthält alle Informationen über konvektive und konduktive Wärmetransportprozesse. Über  $\lambda^*$  erhält man bei den Säulenexperimenten bzw. in den numerischen Berechnungen Aussagen bezüglich des Beitrags der konvektiven Wärmetransportprozesse, da die Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Böden nur geringe Unterschiede zeigt.

Es wurden sowohl Säulenexperimente als auch numerische Berechnungen hinsichtlich ihrer maximal aufgetretenen Wärmetransportfähigkeit  $\max \lambda^*$  ausgewertet unter der Annahme eines konstanten Energieeintrags und damit einer konstanten Wärmestromdichte  $\varphi$  von  $1000 \text{ W/m}^2$ . Zur Beurteilung des Einflusses verschiedener Parameter auf  $\max \lambda^*$  wurde eine Sensitivitätsanalyse durch Variation verschiedener Parameter vorgenommen. Es zeigt sich, dass für Böden mit einer Permeabilität von etwa  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  bis  $10^{-12} \text{ m}^2$  (Feinsand- bis Schluffkornbereich) die maximale Wärmetransportfähigkeit  $\max \lambda^*$  um einen Faktor von ca. 20 über der Wärmeleitfähigkeit eines teilgesättigten porösen Mediums ( $0,5 - 1,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) liegt. Bei feineren oder grobkörnigeren Bodenmaterialien ist die Wärmetransportfähigkeit niedriger. Festzuhalten ist, dass bestimmte Bodentypen im Feinsand- bis Schluffkornbereich die dissipative Wärmeausbreitung unterstützen, da die Kapillarkräfte bei einer relativ hohen Permeabilität sehr stark sind. Weitere Details des Wärmetransports in diesem Zusammenhang werden bei Theurer et al. (2003b) erläutert.

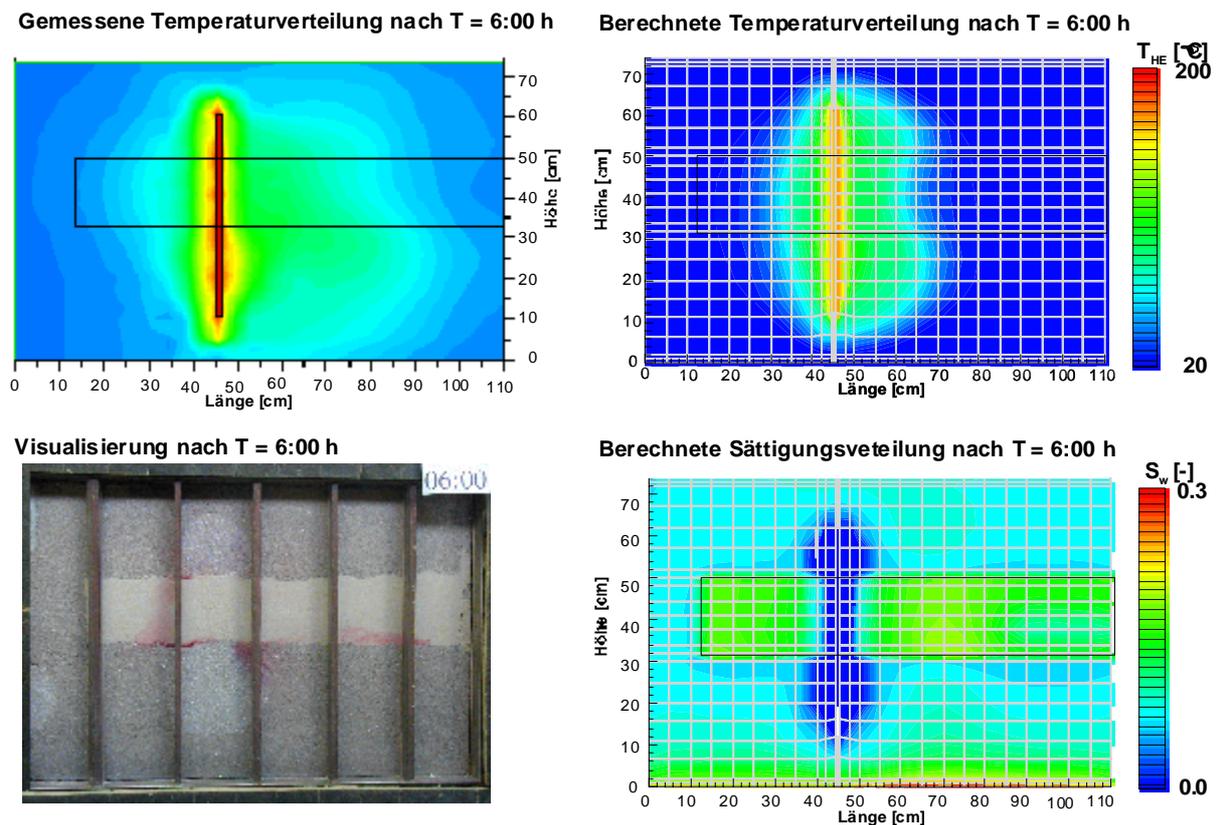
##### 3.1.2. Einfluß verschiedener Faktoren auf den Sanierungsgrad

Zur Bewertung der Einsatzbarkeit des THERIS-Verfahrens ist primär die Frage von Interesse, ob beim Einsatz fester Wärmequellen der Sanierungsgrad stark vom zu sanierenden Bodentyp abhängig ist. Dazu wurden drei Sanierungsexperimente, in denen verschiedene Böden mit dem Schadstoff DCB kontaminiert wurden, ausgewertet, sowie drei Simulationsläufe durchgeführt. In beiden Fällen ist übereinstimmend festzustellen, daß der Sanierungsgrad nicht wesentlich von dem Bodentyp abhängig ist. Daher ist tatsächlich nur der durch den Energieeintrag entstehende Temperaturgradient, der bei verschiedenen Böden keine nennenswerten Differenzen aufweist, für den Sanierungsprozess verantwortlich. Diese wichtige Erkenntnis weist die Eignung der festen Wärmequellen zur Sanierung gering durchlässiger Böden nach.

### 3.2. Zweidimensional-ebene Wärmetransport- und Sanierungsexperimente

In einer 2D-ebenen Edelstahlkuvette mit Frontglasscheibe (Winkler, 2003) wurde anhand einer geschichteten Bodenstruktur aus Grobsand mit eingebetteter Feinsandlinse, Untersuchungen zum Wärme- und Schadstofftransport sowie zur Schadstoffversickerung durchgeführt. Im Vordergrund stand dabei die Frage, ob eine gezielte Aufheizung der gering durchlässigen Schicht möglich ist und ob der verdampfte Schadstoff in den besser durchlässigen Bereich transportiert wird. In einem weiteren Schritt wurde als Vorbereitung für die Versuche auf Technikumsskala anhand eines Versickerungsexperiments visualisiert, wie sich Schadstoff, der am Schichtübergang von gering- zur besser durchlässigen Schicht eingebracht wird, in den feineren Bereich gesaugt wird.

Für die Versuche wurde eine Feinschicht mit einer um den Faktor 100 geringeren Permeabilität in eine Grobsandschüttung eingebaut und mit Wasser primär gesättigt, Anschliessend wurde zur Untersuchung des Wärmetransportverhaltens das mittig angeordnete Heizelement mit 200°C betrieben. Die Erwärmung konnte über 100 Temperatursensoren zeitlich und räumlich aufgelöst verfolgt und dokumentiert werden (Abb. 2). Anschliessend wurde der Versuch durch eine numerische Modellierung analysiert, mit der die Erwärmung und die Trocknung berechnet wurde (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Temperaturverteilung (oben) und Sättigungsverteilungen (unten) bei Experiment (links) und Berechnung (rechts) in einem Kuvettenversuch mit Feinsandlinse

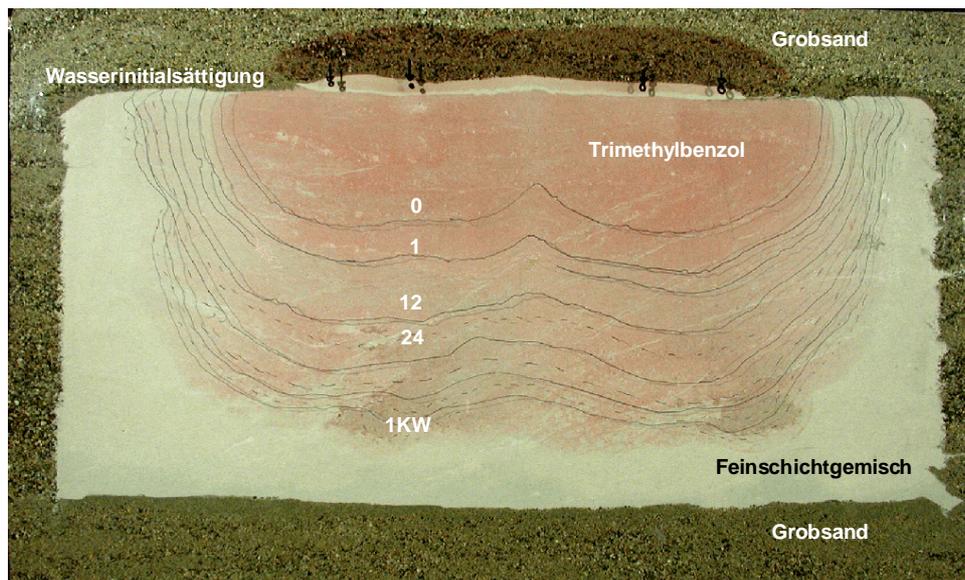
Während im Experiment visuell nur eine allmähliche Trocknung des Bodens in der Nähe des Heizelements beobachtet werden konnte (Abb. 2, Foto unten), konnte mit Hilfe der numerischen Modellierung eine detaillierte Sättigungsverteilung berechnet werden. Umfang-

reiche Untersuchungen in der ersten Projektphase wiesen nach, dass die Wassersättigung eines Bodens den Wärmetransport stark beeinflusst. Dies konnte auch in den numerischen Berechnungen gezeigt werden so dass für die Grossversuche neben der Messung von Temperatur auch die Wassersättigung berücksichtigt werden musste.

### 3.3. Vorbereitende 2D- Kuvettenexperimente für die 3D-Grossversuche

Es wurden insgesamt zwei Grossversuche durchgeführt, deren Resultate in Kap. 5 und 6 näher diskutiert werden. Dabei wurde zuerst ein Versuch zur Betrachtung des reinen Wärmetransports durchgeführt, um anschliessend in einem zweiten Grossversuch die erreichbare Reinigungsleistung in einem Sanierungsexperiment zu ermitteln. Da dieses erst nach Abschluß des Wärmeexperiments durchgeführt wurde, konnte die Schadstoffquelle nicht bei der Befüllung des Behälters mit eingebaut werden, sondern es war eine nachträgliche Kontaminierung des Bodenkörpers erforderlich. Ein Schadstoffdiffusor wurde oberhalb der gering durchlässigen Schicht angeordnet, über den ein definiertes Chemikalienvolumen versickert werden konnte.

Um sicherzustellen, daß der eingetragene Schadstoff sich in der gering durchlässigen Schicht anreichert, wurde das Versickerverhalten der Chemikalie Trimethylbenzol in eine mit Wasser initialgesättigte, gering durchlässige Feinschicht anhand eines 2D-Vorversuchs visualisiert. Dazu wurde in der Kuvette eine dem Grossversuch ähnliche Bodenstruktur eingebaut und mit Wasser initial gesättigt. Insgesamt 1 Liter Schadstoff wurde über einen Zeitraum von einer Stunde über ein Rohr mit mehreren Austrittsöffnungen, einem Diffusor, infiltriert und die Ausbreitung beobachtet. Der zeitliche Verlauf wurde über Begrenzungslinien, wie sie in Abb. 3 für 5 verschiedene Zeitpunkte beschriftet sind, dargestellt.



**Abbildung 3:** Schadstoffversickerung) in eine mit Wasser initialgesättigte Feinschicht

Dieser Versuch bestätigte die Annahme, daß die Chemikalie durch die hohen Kapillardrücke, die in der initial mit Wasser gesättigten Feinschicht herrschen, in den gering durchlässigen Bereich gezogen werden. Es blieb nur wenig Schadstoff in der unmittelbaren Umgebung des Diffusors im Grobsand zurück, so dass auch für das Sanierungsexperiment im Technikumsmaßstab davon ausgegangen werden kann, dass die Kontamination sich in der gering durchlässigen Schicht befindet. Auf Grundlage dieser Ergebnisse war es möglich, den Einbau der Schadstoffquelle in den Grossbehälter vorzubereiten und so zu planen, dass bei der Kontaminierung die Chemikalie in die gering durchlässige Schicht eingezogen wird und sich nicht am Schichtensprung im Grobsandbereich aufstaut und lateral ausbreitet.

### 3.4. Radialsymmetrische Wärme- und Stofftransportuntersuchungen

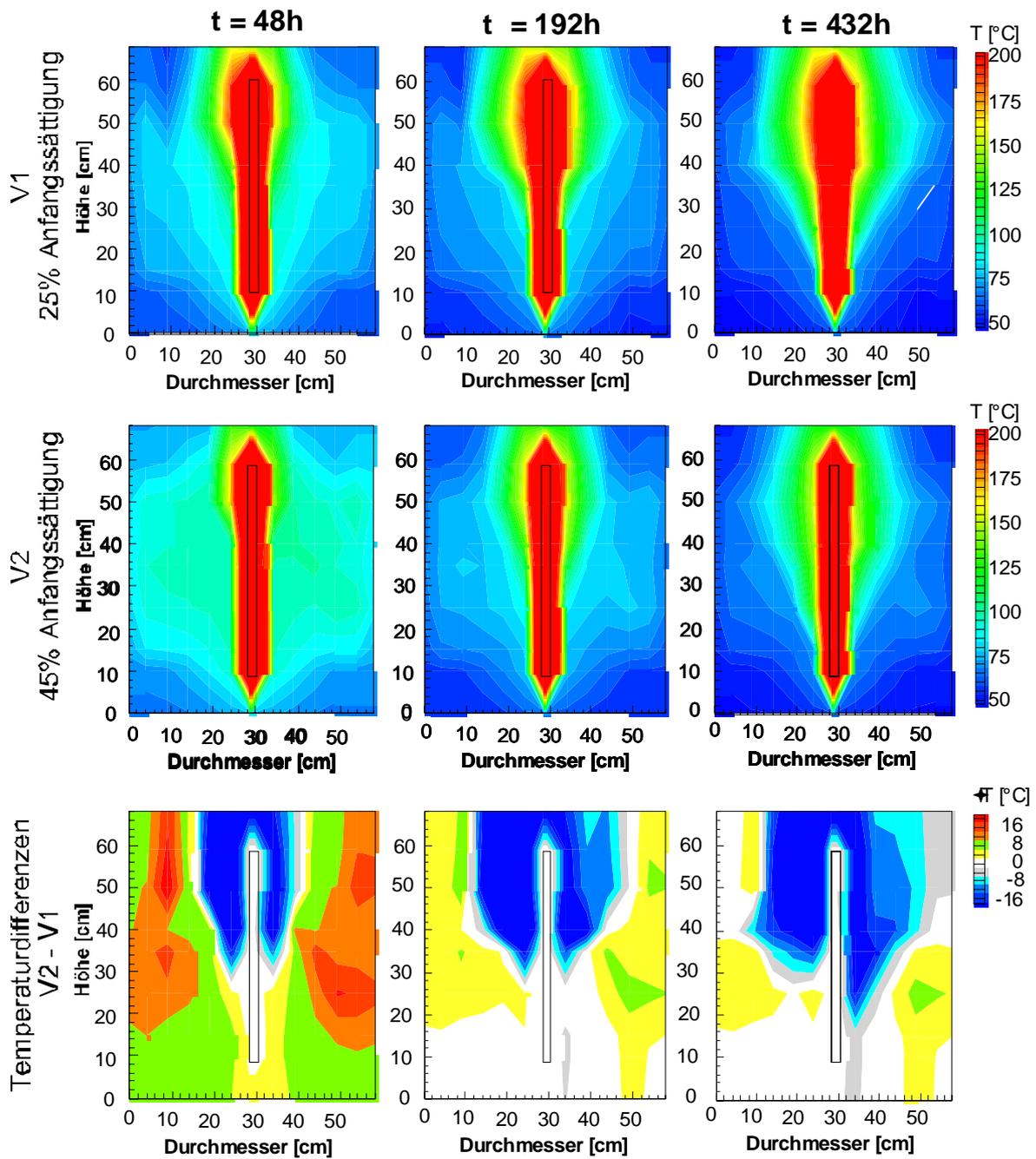
Die in Phase I durchgeführten Säulenexperimente umfaßten ein Bodenvolumen von ca. 3 Liter, der 2D-Versuchsstand (Küvette) 65 Liter. Da die auftretenden Wärmeverluste über die Berandung trotz aufwendiger Isolierung bei beiden Behältern hoch waren, war die Übertragung der Versuchsergebnisse auf Feldskala erwartungsgemäß nur in eingeschränktem Maße möglich. Daher wurden ergänzend radialsymmetrische Experimente in einer Tonne mit einer Höhe von 68 cm und einem Innendurchmesser von 58 cm (Bodenvolumen 180 Liter, s. Abb. 4) zur gezielten Planung der Großversuche durchgeführt. Zur Minderung der Wärmeverluste wurde die Tonne mit Glasfasermatten isoliert. In die Sandschüttung wurde ein Heizelement (Länge 50 cm) zentrisch vertikal eingebaut. Die Temperaturentwicklung wurde über je fünf Profile und fünf Höhenlagen erfaßt.



**Abbildung 4:** Befüllen eines Tonnenversuchsstandes

Da bei höherer Anfangssättigung der Einfluß des konvektiven gegenüber dem konduktiven Wärmetransport zunimmt, wurden Versuche mit unterschiedlichen Anfangswassersättigungen durchgeführt. Beispielhaft sind in Abb. 5 die Ergebnisse zweier Experimente mit einer Feinsandfüllung gegenübergestellt, für die die Anfangswassersättigung 25% (V1) und 45% (V2) betrug. Durch den höheren Wasseranteil findet im Versuch 2 ein ausgeprägter Wärmetransport durch konvektiv bewegtes Wasser statt, und es kommt binnen der ersten 48 h zu einer stärkeren und einheitlicheren Temperaturerhöhung bis zur Berandung. Da sich anschließend durch Trocknung des Bodens der Wärmeübergang vom Heizelement verschlechtert, kann in weiter entfernt gelegenen Bereichen anschließend wieder eine Abkühlung stattfinden. Erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgte die endgültige Aufheizung durch konduktiv nachgeführte Wärme. Dies zeigt, dass in Analogie zu den 2D-ebenen Versuchen der Wassergehalt einen großen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten der Böden hat. Dies wird durch das Entstehen des Heatpipe-Effekts maßgeblich verursacht. Auf dieses Phänomen wird im Rahmen der Diskussion der Großversuche noch näher eingegangen (Kap. 5).

### Temperaturplots nach



**Abbildung 5:** Vergleich der Temperaturentwicklung im Feinsand bei unterschiedlichen Anfangswassersättigungen nach 2, 8 und 18 Tagen (Heizelementtemperatur  $300^{\circ}\text{C}$ )

## 4. Planung und Durchführung der Grossversuche

### 4.1. Anforderungen

Ziel der Versuche im Technikumsmaßstab war die Erstellung und Optimierung der Anlagensteuerung sowie die erforderliche Modifikation des THERIS-Verfahrens auf die definierten, feldähnlichen Bedingungen und Abmessungen. Besonderes Augenmerk wurde auf die Abschätzung der energetischen Effizienz des Verfahrens auf großer Skala sowie die Reichweite der Erwärmung gelegt. Ebenso wurden auf Grundlage der Großversuche Kriterien zur Kostenabschätzung sowie Betriebsempfehlungen bei einer Feldsanierung erstellt.

Damit ergaben sich folgende zentrale Anforderungen an den Großversuchsstand:

- Möglichst homogene Schichtung mit eingebetteter gering durchlässiger Linse zur Beurteilung der Prozesse, vor allem hinsichtlich der Mobilisierung von Schadstoff durch Wärmeeintrag.
- Minimierung der Wärmeverluste über die Berandung des Versuchsbehälters zur Energiebilanzierung und damit Kostenabschätzung für die Praxis.
- Zeit- und raum aufgelöste Beobachtung von Temperaturen und Wassersättigungen, hauptsächlich im Zielbereich der Sanierung.
- Reproduzierbarkeit von Anfangs- und Randbedingungen der Experimente, z.B. Möglichkeit zur mehrfachen Kontaminierung über integrierten Schadstoffdiffusor ohne Ausbau und Wiederbefüllung des Versuchsbehältnisses.
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie zuverlässige Massenbilanzierungen von Schadstoff und Wasser.

### 4.2. Aufbau

Die Grossversuche wurden in einem quadratischen Kompartiment des VEGAS-Grossbehälters mit einer Grundfläche von 6 m x 6 m und einer Höhe von 4,5 m durchgeführt (Abb. 6). Damit waren unter definierten Randbedingungen und Minimierung der Energieverluste Experimente zur Entwicklung und Erprobung der Sanierungstechnik inklusive Ausrüstung und Anlagensteuerung auf feldähnlicher Skala durchführbar.

Um eine naturnahe, geschichtete Bodenstruktur zu erhalten, wurde eine gering durchlässige Schicht aus nichtbindigem Feinmaterial in Grobsand eingebettet (Abb. 7) (Hiester et al., 2002a). Die Anordnung von Heizelementen, Brunnen und Messtechnik wurde über vereinfachte numerische Modellrechnungen unterstützt (Theurer et al., 2002).

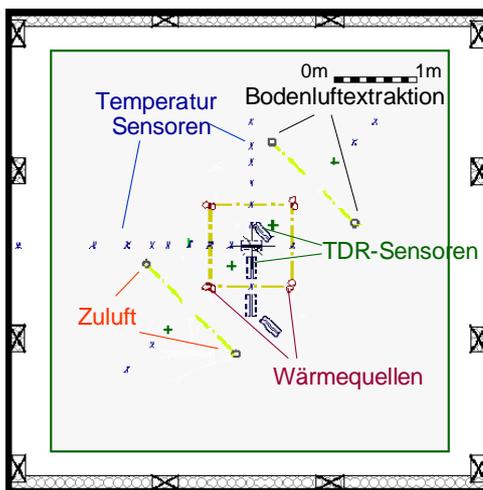
Zur Minimierung der Energieverluste über die Berandung wurden die Heizelemente zentrisch im Großbehälter mit der Kantenlänge von 1,0 m angeordnet. Diese grenzen das im folgenden als „zentralen Bereich“ bezeichnete Zielgebiet der Erwärmung ab, innerhalb dessen die größte Erwärmung erzielt wird und im Sanierungsexperiment auch die Kontamination vorliegt. Die Option zur Vergrößerung dieses Setups auf eine Kantenlänge von 1,5 m wurde durch einen zweiten Satz Leerrohre sichergestellt.



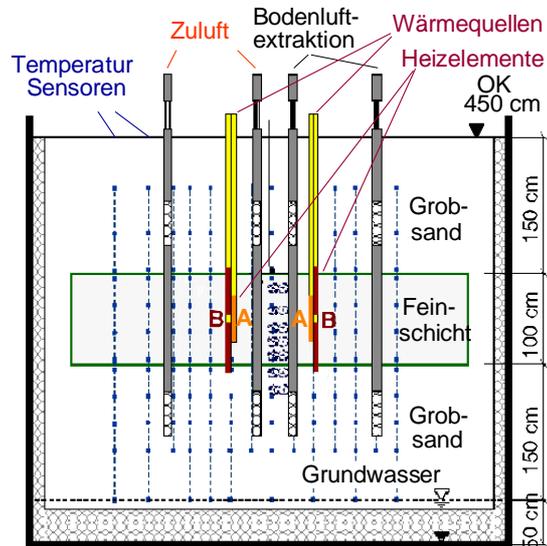
**Abbildung 6:** Blick auf den Großversuchsstand mit dem THERIS-Kompartimenten

Zum diagonalen Durchströmen des Feldes wurden spiegelsymmetrisch je zwei Zuluft- und Bodenluftextraktionsbrunnen eingebaut. Entlang der Hauptdiagonalen sowie in Achsen im 45°-Winkel dazu wurden etwa 300 Temperaturegeber über zwölf Tiefenlagen eingebaut. Speziell für den Einsatz bei hohen Temperaturen am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart entwickelte Time-Domäne-Reflectometry (TDR)-Sonden wurden zur Feuchtemessung innerhalb der Feinschicht und des darunter liegenden Grobsandes eingesetzt (Hiester et al., 2002d; Hiester & Schmid, 2003f).

**Aufsicht**



**Ansicht**

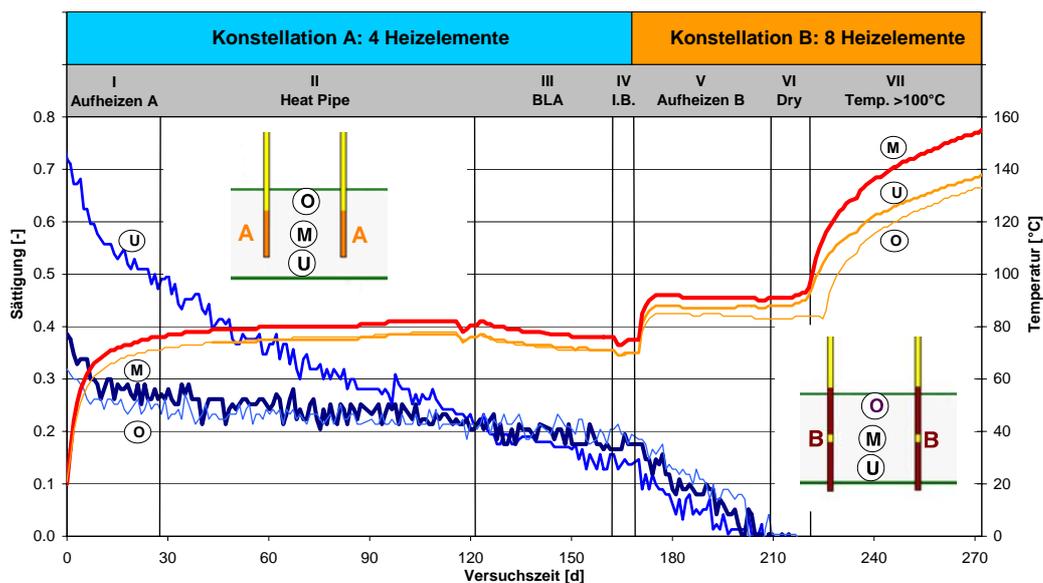


**Abbildung 7:** Aufsicht und Ansicht des Technikumsversuchs mit festen Wärmequellen

## 5. Ergebnisse des ersten Großversuchs zum dreidimensionalen Wärmetransport in geschichteten Böden

Um den Wärmetransport und das Erwärmungsverhalten des Bodenkörpers zu beobachten, waren neben den in Kap 3 beschriebenen Vorversuchen diverse vorbereitende Maßnahmen erforderlich. So musste z.B. eine „natürliche“ Wassersättigung des Untergrundes eingestellt werden, um definierte Anfangsbedingungen zu erhalten und auch die Reproduzierbarkeit der Bedingungen zu gewährleisten. Dies wurde durch Überstauen über die gesamte Höhe und anschließendem 12-wöchigen Drainieren eingestellt.

Vier Wärmequellen wurden quadratisch in der Mitte der ein Meter mächtigen Feinschicht angeordnet. Die dort installierten Heizelemente werden mittels einer Regelung konstant auf 500°C betrieben. Der Wärmetransportversuch auf Technikumsskala gliederte sich in zwei Anordnungsvarianten der Heizelemente (A, B) und neun Versuchsphasen (Variante A: Phase I-IV, Variante B: Phase V-IX). Zu deren Unterscheidung werden die charakteristischen Prozesse am Beispiel der Temperatur- und Sättigungsmessung im „zentralen Feld“, also dem zwischen den Heizelementen befindlichen Raum, nachfolgend erläutert (Abb. 8). Hierbei werden die Messdaten hinsichtlich ihrer Höhenlage in der Feinschicht unterschieden.



**Abbildung 8:** Entwicklung von Temperaturen und Wassersättigungen im zentralen Bereich in den charakteristischen Punkten O, M und U

### 5.1. Aufheizphase mit vier Heizelementen

In der Konfiguration A wurden vier 50 cm lange Heizelemente mittig in der 1m mächtige Feinschicht angeordnet (Abb. 7, Ansicht). Die Wassersättigung im Porenraum ist an der Unterseite der Feinschicht maximal und nimmt mit zunehmender Höhe ab.

Die erste Phase (Aufheizen A, Abb. 8) wird gekennzeichnet durch einen raschen Anstieg der Temperaturen und der damit einhergehenden Trocknung über die gesamte Höhe der Feinschicht. Dennoch stellen sich nur kleine bis mäßige Temperaturgradienten ein, was erwartungsgemäß auf einen vornehmlich konvektiven Wärmetransport hindeutet. Lediglich

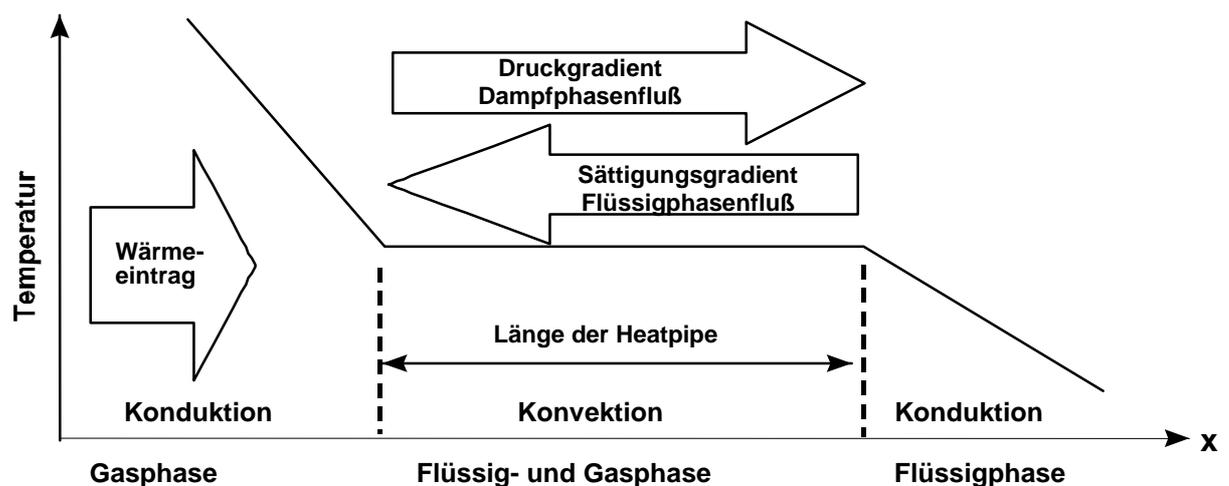
in unmittelbarer Umgebung der Heizelemente ist das Porenwasser direkt nach Versuchsbeginn verdampft, so dass hier konduktiver Wärmetransport vorliegt.

## 5.2. Versuchsphase II: Ausbilden eines Heatpipe-Bereiches

Nach der ersten Erwärmung des Bodenkörpers stagnieren die Temperaturen auf einem Niveau unterhalb des Siedepunkts von Wasser. Die Trocknungs- und der Temperaturgradient verringern sich signifikant. Es bildet sich lokal ein Heatpipe-Bereich aus (Phase II, Abb. 8), auf dessen physikalische Wirkungsweise im folgenden näher eingegangen wird.

Wird ein mit Wasser teilgesättigter Boden lokal über eine Wärmequelle erhitzt, wird nahe des Heizelements das Porenwasser verdampft und in die Gasphase überführt. Durch die Erwärmung bildet sich ein Temperaturgradient aus, entlang dessen der Wasserdampf strömt. Mit ihm wird Energie in Form der Verdampfungsenthalpie transportiert, die bei Kondensation wieder frei wird und zu einer weiteren Aufheizung des Bodens führt.

Gleichzeitig wird kapillar flüssiges Wasser aus den kälteren, feuchten Bereichen entgegen des Temperaturgradienten in den heißen Bereich transportiert, wo wiederum die Verdampfung stattfindet. Es bildet sich eine Zirkulationsströmung aus, die auch als Heatpipe-Effekt (Udell & Fitch, 1985) bekannt ist und die schematisch in Abb. 8 dargestellt ist. Während im Bereich der Heatpipe vorwiegend Wärme konvektiv mit der Strömung in Gas- und Flüssigphase transportiert wird, dominiert die Konduktion den Wärmetransport in den anderen Bereichen. Dies ist schematisch in Abb. 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Prinzip des Heatpipe-Effekts (nach Udell & Fitch, 1985)

Die über die Wärmequellen in den Untergrund eingetragene Energie, die nahezu konstant ist, wird aufgrund des Heatpipe-Effekts konvektiv weiträumig im Großbehälter verteilt. Aus der Feinschicht von außen zuströmendes Wasser verhindert dabei die weitere Aufheizung des zentralen Bereichs, da primär Energie zur Verdampfung des Wassers aufgewendet werden muß. Dagegen ist der vom Heatpipe-Effekt beeinflusste Bereich in vertikalen Richtung durch den Schichtwechsel und damit den Randbedingungen für Sättigung und Temperatur beschränkt. Infolgedessen stellt sich an der Unterkante der Feinschicht eine viel gleichmäßigere Sättigung ein als wenige Zentimeter darüber. Zudem verringern sich die Trocknungs- und der Temperaturgradienten signifikant. Eine Erhitzung des zentralen Bereiches auf über  $100^{\circ}\text{C}$  ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich.

### **5.3. Versuchsphase III: Zuschalten der Bodenluftabsaugung**

Die vergleichsweise hohe Restsättigung limitiert die Trocknung der Feinschicht. Daher wurde zur Erhöhung der Trocknungsrate die Bodenluftabsaugung in den Grobsandhorizonten zugeschaltet. Damit strömt Luft durch die beiden geöffneten Injektionsbrunnen durch den zentralen Bereich und wird über die beiden Extraktionsbrunnen abgesaugt. Die Extraktionshorizonte der BLA-Brunnen befinden sich horizontal ca. 1 m neben dem zentralen Bereich und vertikal versetzt zu diesem im Grobsand.

Der Einfluß der BLA auf die Trocknung der Feinschicht konnte zwar nur geringfügig festgestellt werden. Maßgebend wird jedoch nicht alleine die Sättigungsabnahme, sondern vielmehr das Entziehen von Energie vom System. Dies zeigt sich deutlich an den abnehmenden Temperaturen in der Mitte der Feinschicht.

### **5.4. Versuchsphase IV: Intermittierender Betrieb der Heizelemente**

In dieser Phase wurden die Heizelemente intermittierend betrieben und der Einfluss auf den Wärme- und Stofftransport beobachtet. Nach Ausserbetriebnahme der Heizelemente kühlten diese binnen weniger Stunden von ihrer Betriebstemperatur von 500 °C auf die im Boden herrschende Umgebungstemperatur von ca. 75 °C ab. Als weitere Folge wurde im Anschluß daran auch eine schnelle Abkühlung des zentralen Bodenkörpers beobachtet. Die dort im warmen Korngerüst gespeicherte thermische Energie fließt dem Temperaturgradienten folgend über die Ränder ab.

Für den Fall eines mehrstündigen Stromausfalls muss daher von einer spürbaren Abkühlung insbesondere der heißen Bereiche ausgegangen werden. Dagegen konnte nahezu kein Einfluss auf die Wassersättigungen detektiert werden. Stärkere Auswirkungen sind bei einem mehrtägigen Ausfall durch die kapillare Wiederaufsättigung des vormals erwärmten Bereiches zu erwarten (Abb. 8, Phase IV).

### **5.5. Versuchsphase V: Aufheizphase mit acht Heizelementen**

Um Temperaturen über 100°C im Zielbereich erreichen zu können, muss der energieverteilende Heatpipe-Effekt durch vollständiges Austrocknen des Bodens unterbunden werden. Um daher eine höhere Energiedichte und schnellere Trocknung im zentralen Bereich zu erzielen, wurde die Feinschicht über zwei übereinander liegende Heizelemente (Abb. 8, Anordnung B) über ihre gesamte Höhe beheizt. Der horizontale Abstand der Wärmequellen zueinander blieb erhalten.

Bei weiter betriebener Bodenluftabsaugung stellten sich unmittelbar im gesamten zentralen Bereich höhere Temperaturen ein. Zudem zeigt sich ein Anstieg in den mittleren und oberen Lagen der Feinschicht. Die Trocknung über die Höhe der Feinschicht erfolgte nun mit vergleichbaren Gradienten wie zuvor schon an der von der Heatpipe unbeeinflussten Unterseite der Feinschicht, da dort infolge der hohen Wassersättigungen der Kreislauf verhindert wird. Weder der Heatpipe-Effekt noch die Bodenluftabsaugung konnten differenzierend hinsichtlich des Trocknungsverhaltens wirken. Erst mit Änderung der Heizelementanordnung ist eine schnellere Trocknung im zentralen Bereich möglich (siehe Sättigungsverlauf, Abb.8, Phase V). Durch die erhöhte Wärmestromdichte in der geänderten Heizelementanordnung wird die Heatpipe über die gesamte Höhe der Feinschicht unterbrochen.

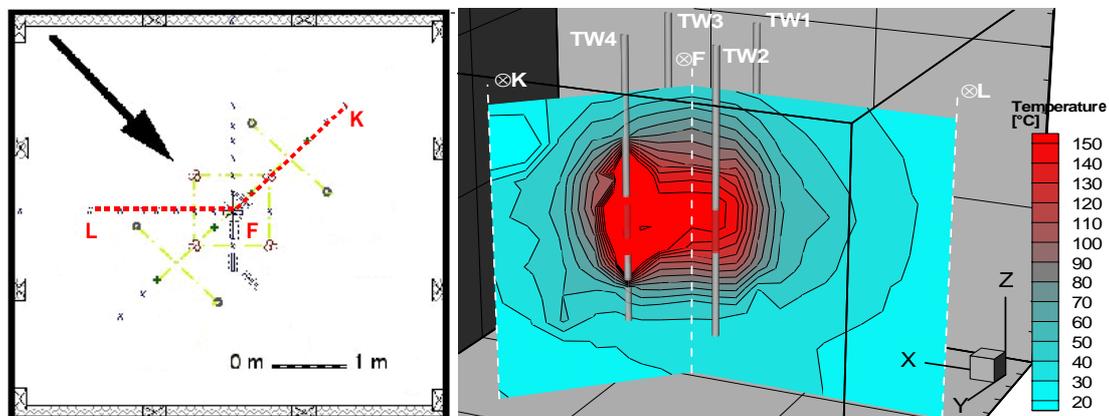
### **5.6. Versuchsphase VI: Trocknung des zentralen Bereichs**

Die vollständige Trocknung im zentralen Bereich, die innerhalb von 6 Wochen erfolgte, ermöglicht die Erwärmung auf Temperaturen über 100°C und unterstützt die Trocknung in benachbarten Bereichen. Hierbei wird durch die Trocknung des zentralen Bereichs auch die Trocknung ausserhalb beschleunigt. Grund hierfür ist die Reduzierung der heatpipe-

wirksamen Querschnittsfläche. Die Konvektion als Wärmetransportprozess ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr maßgebend.

### 5.7. Versuchsphase VII: Hochtemperaturbereich

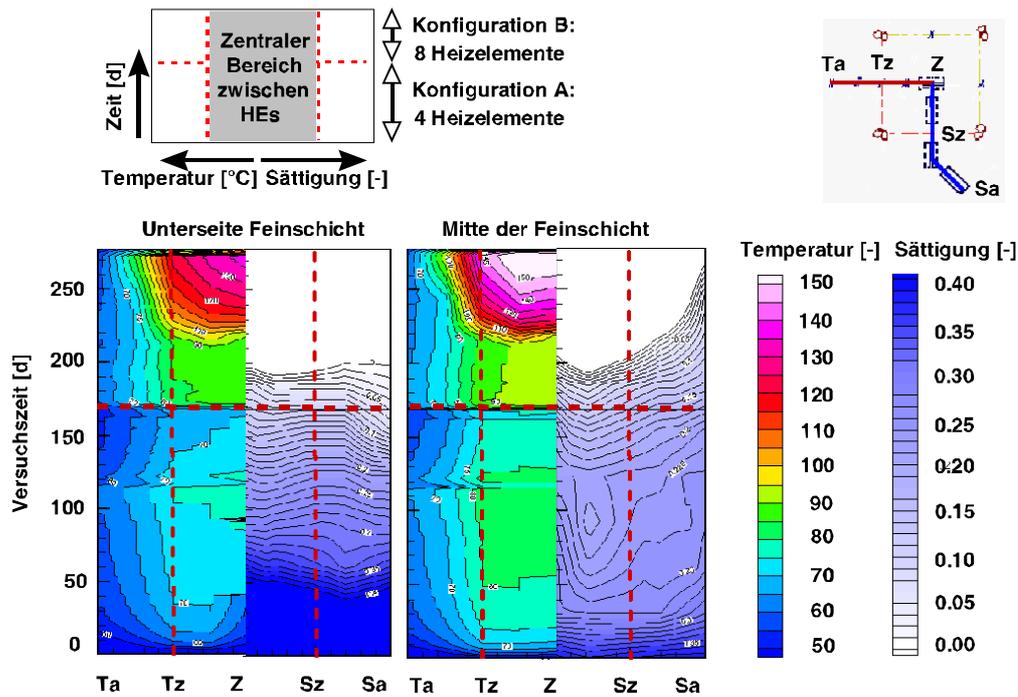
Diese Phase wird von den in der Mitte des zentralen Bereiches über die gesamte Höhe der Feinschicht stark steigenden Temperaturen charakterisiert. Große räumliche Temperaturgradienten bewirken den konduktiven Wärmetransport. Mit Erreichen bzw. Überschreiten der Zieltemperatur von 150 °C in der Mitte der Feinschicht und 140 °C am Rand des zentralen Bereiches (Abb. 10) wurde diese Versuchsphase abgeschlossen, auch wenn zu diesem Zeitpunkt noch kein stationärer Zustand erreicht war. Eine Fortführung des Versuchs hätte zu keinen zusätzlichen wissenschaftlichen Erkenntnissen geführt und wurde daher aus Zeitgründen nicht durchgeführt. Vielmehr lag der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in der verbleibenden Restlaufzeit des Projekts auf der Durchführung eines Schadstoffexperiments, in dem die Sanierungseffizienz von THERIS aufgezeigt wurde und Erkenntnisse über den Schadstoffaustrag auf großer Skala sowie die zu erwartende Sanierungsleistung und –zeitspanne zu gewinnen.



**Abbildung 10:** Temperaturschnitt während Phase VII durch den Großversuchsstand

Die dreidimensionalen Auswirkung der charakterisierten Prozesse sind in Abbildung 11 für die untere und mittlere Höhenlage der Feinschicht dargestellt. Hierbei entspricht die x-Achse einem Horizontalschnitt in der entsprechenden Höhenlage. Von links außen (Abb. 11, Punkt Ta) in den zentralen Bereich hinein (Abb. 11, Punkt Z) sind die Temperaturen dargestellt, um direkt daran anschließend die Isoglichen der Sättigungen vom Mittelprofil im „zentralen Bereich“ (Abb. 11, Punkt Z) nach außen (Abb. 11, Punkt Sa) wiederzugeben. In den Punkten Tz und Sz schneiden die dargestellte Schnittlinie die Grenze des „zentralen Feldes“, welches von diesen Punkten nach innen zum Punkt Z definiert ist. Auf der y-Achse ist die Versuchszeit aufgetragen. Die Werte im Punkt Z entsprechen denen in Abb. 8. Details zu den dreidimensionalen Wärme- und Transportprozessen finden sich in der Dissertationsschrift von Hiester (Hiester 2004 (in Vorbereitung)).

Für die Heizelement-Anordnung A erkennt man in allen Höhenlagen einen flachen Temperaturgradienten nach außen. Die Vergleichmäßigung der Temperatur ist konvektiv bedingt. Die Sättigung in den mittleren Lage nehmen durch die Heatpipe einen nahezu konstanten Wert an. Hingegen erfolgt an dem von der Heatpipe weitestgehend unbeeinflussten Unterseite der Feinschicht eine großflächige Trocknung weit über den messtechnisch erfassten Bereich hinaus (Abb. 11a: x-Achsen parallele Isoglichen).



**Abbildung 11:** Temperaturprofile entlang des Profils Ta-Tm-Z und der Sättigung entlang des Profils Z-Sm-Sa an der Unterseite (a) und in der Mitte (b) der Feinschicht.

Für die Konfiguration B ist die Steigerung der Aufheizung an den höheren und weiter nach außen reichenden Plateautemperaturen zu erkennen. Hierbei bleibt die Trocknung an der Unterseite der Feinschicht konstant, während darüber eine Trocknung von innen nach außen erfolgt. Nach vollständiger Trocknung des zentralen Feldes kumuliert sich die eingetragene Energie und es bilden sich höherer Temperaturen in der Mitte mit steilen Gradienten zur Umgebung aus. Mit zunehmender Trocknung im Umfeld werden auch hier Temperaturen über 100°C erreicht.

### 5.8. Versuchsphase VIII: Steigender Grundwasserspiegel

Bei Sanierungsmaßnahmen im Feld ist der Grundwasserspiegel in der Regel nicht konstant, sondern schwankt saisonal. Dies kann jedoch Auswirkungen auf den Erwärmungsvorgang bei der Sanierungsmaßnahme mit festen Wärmequellen haben und wurde in dieser Phase untersucht. Dazu wurde der Grundwasserspiegel im Großbehälter unter kontinuierlichem Betrieb der Heizelemente um 1,2 m von 0,5 m auf 1,7 m angehoben und lag damit 30 cm unterhalb der Unterkante der Feinschicht. Es zeigte sich, dass die Kapillarkräfte im Grobsand groß genug sind, um Wasser in die heiße, getrocknete Feinschichtzone zu saugen. Zur Verdampfung dieses Wassers wird Energie aus dem Zentrum der Feinschicht an deren Rand transportiert. Dieser Energiefluss bewirkt in der Mitte der Feinschicht eine schnelle Temperaturabnahme, teilweise auf unter 100°C. Allerdings konnte eine Wiederauf-sättigung der Feinschicht bis zum Ende dieser Phase nicht detektiert werden.

Diese Versuchsphase zeigt deutlich die hohe Sensitivität des Aufheizprozesses auf das Dargebot an Wasser in der Bodenmatrix. Ist der Abstand zwischen zu sanierendem Bereich und dem Kapillarsaum des Grundwassers nicht ausreichend, kann der Erwärmungsprozess und so die Sanierungseffizienz beeinträchtigt werden. Dieser Einfluss muss für Feldstandorte individuell sorgsam abgeschätzt und bewertet werden.

### **5.9. Letzte Versuchsphase IX: Abschluß des Versuchs und Abkühlphase**

Mit der Ausserbetriebnahme der Heizelemente kühlt der Bodenkörper rasch aus. Zu Ende von Phase IX wird in der Feinschicht noch vorhandenes Wasser kapillar wieder in Richtung des vollständig getrockneten Bereichs gesogen (Abb. 11).

### **5.10. Zusammenfassung der Ergebnisse des ersten Großversuchs**

Durch dieses Großexperiment wurde erstmals eine kontrollierte und bilanzierte Studie zum Einsatz von festen Wärmequellen vorgelegt. Trotz einer lange dauernden Aufheizphase, die in dem Ausmass nicht im Projekt vorhergesehen werden konnte und daher zu einer zeitlichen Verzögerung des Versuchs und des Zeitplans führte, konnte das Ziel einer Erwärmung des zu sanierenden Bereichs auf bis zu 150°C realisiert werden.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass die Verhältnisse bei dem gewählten Bodentyp ungünstig für eine Aufheizung waren. Grund hierfür ist das Ausbilden einer Heatpipe-Strömung, die den Aufheizprozess im zentralen Bereich bis zu seiner Trocknung dominiert, da durch die Heatpipe eine Rückströmung von Flüssigphase in den bereits erwärmten Bereich erfolgt. Die hier eingetragene Energie muß zum erneuten Verdampfen der Flüssigphase aufgewendet werden und steht damit nicht zur Bodenerwärmung zur Verfügung. Es ist davon auszugehen, dass andere Bodentypen, auch mit geringerer Permeabilität, bei denen sich diese Strömung nicht so dominant ausbilden kann, bessere Voraussetzungen für eine Sanierung mit festen Wärmequellen bieten.

## 6. Nachweis der Sanierungseffizienz auf Technikumsskala

### 6.1. Anforderungen und Vorbereitung

Das im vorangegangenen Kapitel beschriebene Wärmeexperiment führte zu ersten Erfahrungen für den Einsatz fester Wärmequellen auf naturähnlicher Skala sowie einer ersten Abschätzung der Reichweite des Verfahrens. Zum Nachweis der Einsetzbarkeit als Sanierungstechnologie muss jedoch eine Kontamination organischer Schadstoffe in wirtschaftlichen Zeiträumen saniert werden können. Dieser Nachweis wurde über einen zweiten Großversuch vorgenommen, in dem die ungesättigte Zone lokal mit einer definierten Schadstoffmenge verunreinigt (Einbau einer Schadstoffquelle) und über das THERIS-Verfahren wieder dekontaminiert wurde. Über eine detaillierte Massen- und Energieerfassung wurden Aussagen über die Sanierungseffizienz des Verfahrens sowie Kostenabschätzungen für Feldanwendungen abgeleitet.

Vor der lokalen Kontaminierung der gering durchlässigen Feinschicht musste der Bodenkörper, der nach dem vorangegangenen Experiment in großen Bereichen durch die Erwärmung getrocknet war, zunächst wieder mit Wasser teilgesättigt werden. Dies wurde über eine Anhebung des Grundwasserspiegel und anschließendes Absenken auf die ursprüngliche Höhe erzielt.

Als Schadstoff wurde die Chemikalie Trimethylbenzol (TMB,  $C_9H_{12}$ ) gewählt. Auswahlkriterium war neben seiner mäßigen Flüchtigkeit (Siedepunkt  $169^\circ\text{C}$ ) seine geringere Dichte im Vergleich zu Wasser ( $0,88\text{ g/cm}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$ ). Damit wurde sichergestellt, daß keine Verunreinigung der gesättigten Bodenzone auftritt. Der TMB-Prüfwert nach Bundesbodenschutzverordnung für den Wirkungspfad Boden-Mensch liegt für Kinderspielflächen, Wohngebiete sowie Industrie- und Gewerbegrundstücken gleichermaßen bei  $200\text{ mg / kg}$  Trockenmasse (Stars 1999).

Nachdem über Vorversuche (s. Kap. 4) nachgewiesen wurde, dass der infiltrierte Schadstoff TMB sich nicht am Schichtensprung akkumuliert, sondern kapillar in die gering durchlässige, wasserinitialgesättigte Schicht gesogen wird, wurden  $30\text{ kg}$  Schadstoff über einen integrierten Diffusor über einen Zeitraum von  $13,5$  Stunden in den Großversuchsstand infiltriert. Damit sich das TMB weiter in der Feinschicht verteilen konnte, wurden die kalte Bodenluftabsaugung erst  $60$  Stunden nach Ende des Infiltrationsvorgangs in Betrieb genommen. Damit konnte davon ausgegangen werden, dass die „Schadstoffquelle“ den zentralen Feinschichtbereich (zwischen den Heizelementen) kontaminiert hatte.

### 6.2. Zusätzliche Messtechnik zur Erfassung des Massenaustrags

Um eine Massenbilanzierung für den Schadstoff vornehmen zu können, mussten die Austragspfade meßtechnisch überwacht werden. Dies umfasste sowohl den Austrag über die Gasphase mit der Bodenluftabsaugung als auch eine mögliche Mobilisierung der Chemikalie in flüssiger Phase.

Der Schadstoffaustrag in der Gasphase wurde kontinuierlich im Gesamtstrom mit einem portablen Gaschromatographen und ergänzend in den Einzelextraktionssträngen mittels Gaswäsche und anschließender Laboranalyse bilanziert.

### 6.3. Phasen der Versuchsdurchführung

Um die Beschleunigung und Erhöhung des Schadstoffaustrags durch die thermische Unterstützung der Bodenluftabsaugung nachweisen zu können, wurde das Sanierungsexperiment in drei zeitlich aufeinander folgende Betriebsphasen und eine abschliessende Beprobung der Bodenluft und des Bodens unterteilt:

- Phase I: die konventionelle „kalte“ Bodenluftabsaugung (BLA),
- Phase II: die thermische Unterstützung der BLA mit festen Wärmequellen (THERIS-Verfahren)
- Phase III: Erhitzen des zentralen Bodenkörpers auf den Schadstoffsiedepunkt
- Nach Abkühlung des Bodenkörpers: Zusätzliche Sanierungskontrolle über Vor-Ort-Analysen (werden demnächst durchgeführt).

#### 6.3.1. *Versuchsphase I: Die konventionelle „kalte“ Bodenluftabsaugung*

Durch die Bodenluftabsaugung wird im Untergrund ein Austausch der Porenluft hervorgerufen. Dadurch kann Schadstoff in der Gasphase bis zur Gleichgewichtskonzentration ausgetragen werden. Diese ist abhängig vom Dampfdruck des Schadstoffes und damit der Temperatur als auch von der Heterogenität des Untergrundes, da nur die besser durchlässigen Bereiche aufgrund der Brunnenanordnung von der Bodenluft durchströmt werden. Im Falle des Großversuchs wird durch die Bodenluftextraktion ein Luftstrom in den beiden gut durchlässigen Grobsandhorizonten oberhalb und unterhalb der gering durchlässigen Feinschicht erzeugt, während der Bereich der Feinschicht aufgrund seiner deutlich geringeren Permeabilität nahezu undurchströmt bleibt. Da jedoch der Schadstoff sich nahezu ausschliesslich in der gering durchlässigen Schicht befindet, muss dieser diffusiv in den Grobsandbereich transportiert werden, bevor er durch die BLA erfaßt und abtransportiert werden kann. Die Diffusion ist jedoch ein langsamer, temperaturabhängiger Prozess und limitiert dadurch stark die Austragsraten.

Durch die Betriebsphase der „kalten“ BLA erhält man für die Bedingungen im Container Informationen über den Schadstoffaustrag über die Gasphase. Diese Daten bilden die Grundlage zum Vergleich der konventionellen mit der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung. Mittels eines mobilen Gaschromatographen erfolgt die kontinuierliche Überwachung der Schadstoffextraktion im Gesamtstrom, die Abluftreinigung im Anschluss daran gewährleistet ein konventioneller Aktivkohlefilter.

Durch die Bodenluftabsaugung wird aber nicht nur Schadstoff, sondern auch Porenwasser ausgetragen. Physikalisch hängt die Trocknung des Untergrundes, der Temperatur im zentralen Bereich im Falle des Betriebs der festen Wärmequellen (Phase II + III) und der Schadstoffaustrag (Phase I + III) eng miteinander zusammen. Zur Beurteilung der Effizienz des Sanierungsverfahrens sind sowohl die Bilanzierung des Schadstoffaustrags als auch der erforderliche Gesamtenergiebedarf der beiden zu vergleichenden Sanierungsverfahren (Phase I + II) von Interesse. In Abbildung 12 sind die wesentlichen Messgrößen zusammenfassend dargestellt.

Zum Beginn der „kalten“ BLA im unteren und oberen Grobsand mit insgesamt 35 m<sup>3</sup> Bodenluft je Stunde ist die Feinschicht mit Wasser initialgesättigt (Abb. 12a). 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 zwischen 3 und 10 %.

Der Schadstoffaustrag findet an der Grenzschicht Feinmaterial – Grobsand in Gleichgewichtskonzentration statt, welche sich durch Vermischen mit unbelasteter Luft noch verringert. Die geringen Dampfdrücke ergeben sich aus der Temperatur im Bodenkörper von etwa 20°C (= Labortemperatur). Damit liegen die erzielten TMB-Austragskonzentrationen zwischen 0,1 – 0,2 g/m<sup>3</sup> Bodenluft (Abb. 12c). Diese bleiben während der gesamten Zeit-

dauer der „kalten“ BLA über zwei Monate nahezu konstant. Über die kalte BLA konnten insgesamt 6,4 kg TMB oder 21% der ursprüngliche Schadstoffmasse der Kontamination extrahiert werden. Da die Reinigungsleistung dieses Verfahrens, wie aus der Vielzahl an Feldfällen bekannt, zum Beginn am größten ist und dann rasch diffusionslimitiert abnimmt, wird die Leistungsfähigkeit durch eine lineare Extrapolation der Anfangsausträge deutlich überschätzt. Trotz dieses sehr optimistischen Ansatzes beträgt die Mindestsanierungszeit für die im Container verbliebene Schadstoffmenge mit der „kalten“ BLA unter „Laborbedingungen“ (ca. 20°C) ca. 8 Monate.

### **6.3.2. Versuchsphase II: Das THERIS- Verfahren**

Mit Inbetriebnahme der Heizelemente mit einer konstant gehaltenen Temperatur von 500°C beginnt die Phase der thermischen In-situ-Sanierung mit dem THERIS-Verfahren. Da die thermische Unterstützung nur zusätzlich zur konventionellen Bodenluftabsaugung eingesetzt wird, wird mit der Absaugung der Bodenluft fortgefahren. Diese stellt auch einen essentiellen verfahrenstechnischen Bestandteil zur Extraktion der Schadstoffe aus dem Untergrund dar. Vorteilhaft ist auch die direkte Vergleichbarkeit der beiden Verfahren unter gleichen Luftextraktionsraten hinsichtlich ihrer Austragsleistung. Die Massenerfassung des ausgetragenen Schadstoffs sowie die Reinigung der Abluft erfolgen analog der BLA. Durch die Kühlung des Extraktionsluftstroms mit einem Rohrbündelkondensator ist die Schadstoffbeladungskapazität der Aktivkohle größer und reduziert die Abluftreinigung.

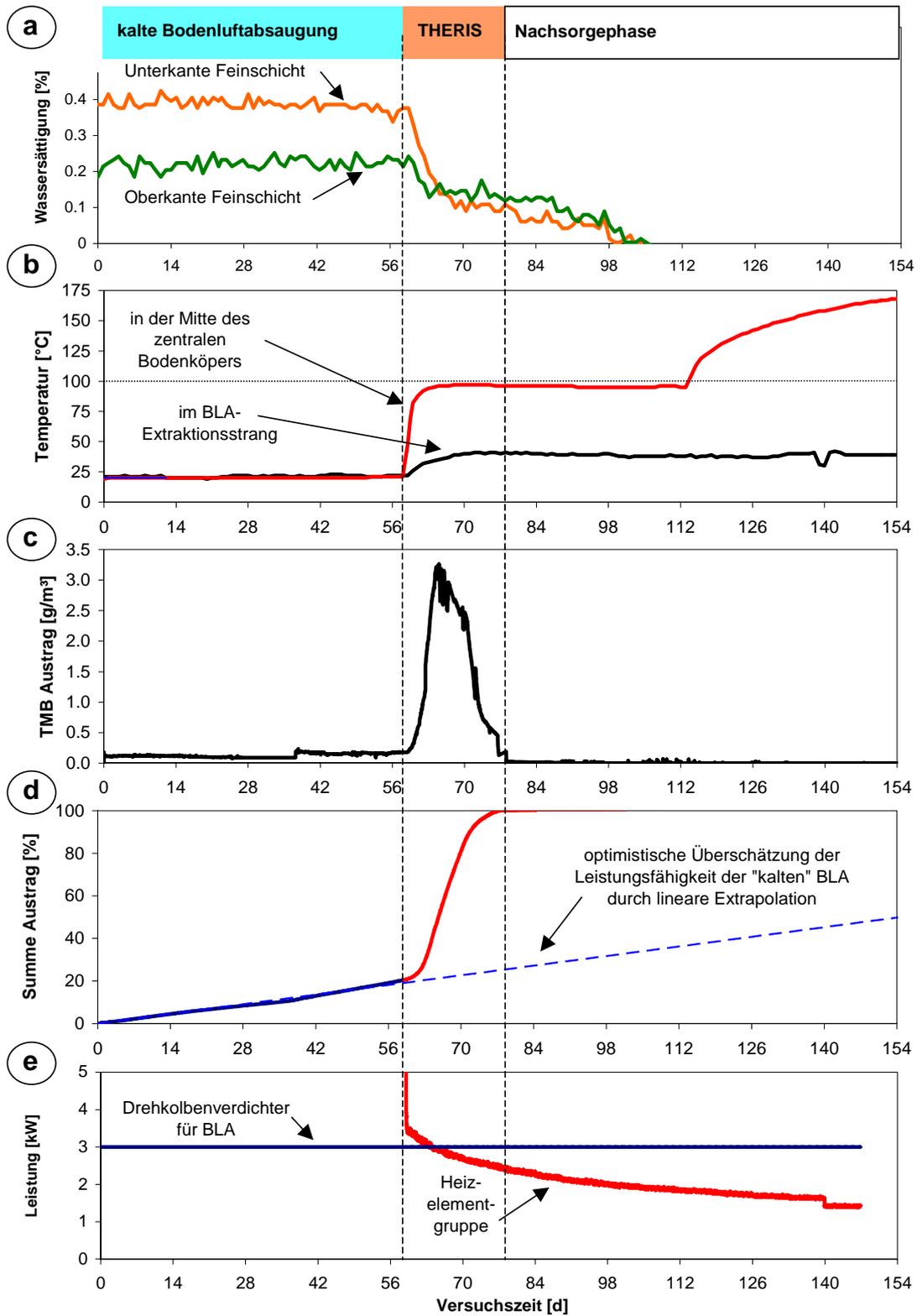
Durch die anfänglich schnelle Abnahme der Flüssigphasensättigung, insbesondere im unteren Bereich der Feinschicht, erhöht sich die Gasdurchlässigkeit der Feinschicht. Die Anfangstrocknung der Feinschicht verlangsamt sich durch die sich ausbildende Heatpipe und ist jetzt über die gesamte Schichthöhe ähnlich (Abb. 12a). Durch die vorhandene Flüssigphasensättigung können die Bodentemperaturen, abgesehen von der direkten Umgebung der Heizelemente, nicht über 100°C steigen (Abb. 12b).

Eine weitere Erhöhung der Temperatur ist für die Sanierung bei dem vorliegenden Schadstoff jedoch nicht erforderlich: das stationäre Temperaturniveau von über 90°C im Bereich der hohen Schadstoffsättigungen zwischen den Heizelementen führt bereits binnen der ersten Woche des Heizanlagenbetriebs zu einer Verzehnfachung der Austragskonzentrationen (Abb. 12c). Hingegen steigen die Temperaturen im Extraktionsstrang durch die räumlich versetzte Absaugung zum zentralen Feld nur mäßig an (Abb. 12b). 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 Flüssigphase<sup>1</sup>.

Die eigentliche Sanierung konnte in Anlehnung an die TA Luft (2002) dann als abgeschlossen betrachtet werden, wenn die Austragskonzentrationen den Richtwert von 50 mg Schadstoff pro extrahierten m<sup>3</sup> Bodenluft unterschreiten. Für den Fall des Großversuchs wurde diese Schwelle schon nach 20 Tagen Betriebszeit der thermischen Unterstützung erreicht. Innerhalb dieser Zeitspanne wurden 23 kg TMB (ca. 77 % der initial eingetragenen Masse) rückgewonnen.

---

<sup>1</sup> Sättigungskonzentration für TMB in Luft bei 20°C = 10,5 g/m<sup>3</sup>



**Abbildung 12:** 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

### **6.3.3. Versuchsphase III: Erhitzen des zentralen Bodenkörpers auf den Schadstoffsiedepunkt**

Nach Abschluß des eigentlichen Sanierungsexperiments wurde in einer dritten Stufe das Aufheizen des Bodenkörpers bis zum Erreichen der stationären Endwerte vorgenommen, um Aussagen über die Reichweite sowie der erforderlichen Erwärmungszeitspanne geben zu können. Zudem musste die Frage geklärt werden, ob sich der zentrale Bereich auf den Siedepunkt von TMB von 170°C erhitzen lässt. Des Weiteren musste untersucht werden, welche Schadstoffbelastungen im Boden nach Abschluß der Sanierungsmassnahme und Abkühlung des Bodenkörpers noch vorhanden sind.

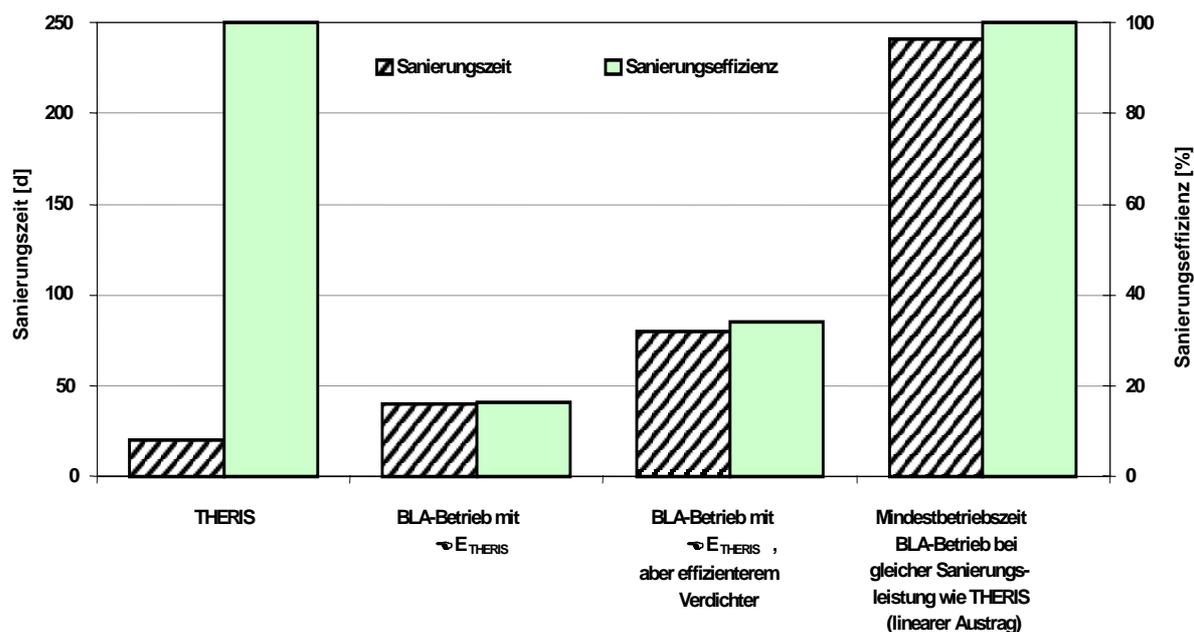
Durch das Weiterbetreiben der Heizelementgruppe schreitet die Trocknung des zentralen Bereiches langsam aber stetig voran. Mit Erreichen der vollständigen Trocknung steigen die Bodentemperaturen über 100°C. Gegenüber der schnellen ersten, konvektiv dominierten Erwärmung des zentralen Bereichs von 20°C 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 (Abb. 12b). Erwartungsgemäß findet kein weiterer signifikanter Schadstoffaustrag statt (Abb. 12c). Die von der Heizelementgruppe benötigte Leistung sinkt mit Verkleinerung des von der Heatpipe beeinflussten Bereiches kontinuierlich (Abb. 12e).

Nach ca. 100 Tagen Betriebszeit wurden im zentralen Bereich Temperaturen von über 170°C und damit oberhalb des Siedepunkts des Schadstoffes erreicht. TMB kann bei diesen Temperaturen nicht mehr flüssig im Porenraum, sondern nur noch in der Gasphase vorliegen, so dass mit Überschreiten der Siedetemperatur im Zielvolumen von der vollständigen Reinigung des ehemals kontaminierten Bereiches ausgegangen werden kann. Diese Annahme wird auch aufgrund der Massenbilanz (Abb. 12d) bestätigt und durch Vor-Ort-Messungen nach Versuchsende sowohl in der Feinschicht als auch im darunterliegenden Grobsandhorizont überprüft. Die Ergebnisse dieser Messungen finden sich bei Hiester (Hiester 2004 (in Vorbereitung)).

### **6.4. Vergleich der „kalten“ BLA mit dem thermischen THERIS-Verfahren**

Der Einsatz fester Wärmequelle auf Technikumsskala zeigt, 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 weniger als 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 Überschätzung der Reinigungsleistung der „kalten“ BLA durch die Annahme eines linearen Schadstoffaustrags ergibt sich für diese eine Mindestbetriebszeit von über 240 Tagen bei 20°C. 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 Untergrund-erwärmung zu investieren, um einen schnellen Schadstoffaustrag zu realisieren.



**Abbildung 13:** Sanierungszeit und zu erwartender Sanierungserfolg bei optimistischer Schätzung der Leistungsfähigkeit der „kalten“ BLA durch lineare Extrapolation des Schadstoffaustrags und 20°C ( $EE =$  Summe Energiebedarf)

## 6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse des Sanierungsexperiments

In diesem Grossversuch wurde der Nachweis erbracht, 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 weit überlegen ist.

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

Finanziell weist das THERIS-Verfahren zwar durch den Einbau der Heizelemente 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. Zudem können gering durchlässige Schichten durch die kalte BLA nicht mehr effektiv und effizient behandelt werden. Gerade aber für diese Schadensfälle bietet das THERIS-Verfahren eine Möglichkeit, die bisher nur schwer zu sanierenden Kontaminationen wirtschaftlich in überschaubaren Zeiträumen sanieren zu können. Details hierzu finden sich bei Hiester (Hiester 2004 (in Vorbereitung)).

## 7. Betrachtungen für den Einsatz fester Wärmequellen im Feld

Im Rahmen des Großversuchs zum Wärmetransport konnten sensitiv wirkende Einflußfaktoren identifiziert werden. Zusammenfassend lassen sich aus den numerischen Simulationen (Theurer et al., 2003b), den Labor- (Winkler, 2003) und Technikumsversuchen (Hiester et al., 2003b) zum derzeitigen Stand folgende, erste Betriebsempfehlungen für die In-situ-Sanierungstechnologie mit festen Wärmequellen ableiten:

- Die im Bodenkörper angestrebte Temperatur zur Sicherstellung eines Sanierungserfolgs („Zieltemperatur“) hängt von der Art der Kontamination (Siedepunkt bzw. Dampfdruck) ab. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass bei Überschreiten von 100°C im Zielbereich die Sanierung abgeschlossen ist.
- Die erforderliche Energie hängt vom Bodentyp, charakterisiert durch die Kapillarkräfte und die Permeabilität, und der Bodenfeuchte ab. Je größer die Bodenfeuchte und desto geringer die Permeabilität, umso stärker beeinflusst der Heatpipe-Effekt den Erwärmungsvorgang, was zu einer Verzögerung der Aufheizung auf hohe Temperaturen führen kann. Jedoch wird der Schadstoffaustrag durch die Erhöhung der Untergrundtemperaturen auf den Bereich von 80 bis 100°C um Größenordnungen beschleunigt, und es kann die zur Reinigung erforderliche Zeitspanne deutlich verkürzt werden.
- Die Energiedichte im Feld, bestimmt durch das Verhältnis der beheizten Länge der einzelnen Wärmequellen und ihrem horizontalen Abstand zueinander ist maßgebend für den ökonomischen Erfolg des Verfahrens. Dem wirken die durch zusätzlich zu installierende Lanzen erhöhten Bohrkosten entgegen.
- Die erforderliche Zeitspanne zum Erreichen der „Zieltemperatur“ hängt von der Heizzeit der Heizelemente, ihrem Abstand zueinander sowie der beheizten Länge ab.
- Ein einfacher Wechsel von Heizelementen und Steuereinheiten kann zu Wartungszwecken und zum Wechsel von ggf. defekten Bauteilen sinnvoll sein. Jedoch hat sich nach insgesamt 70.000 Betriebsstunden der Heizelemente nur ein Ausfall ereignet, so dass dieser Aspekt nur von untergeordneter Wichtigkeit ist.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des Projektes THERIS II erfolgten Untersuchungen wiesen nach, dass die Erhitzung eines gering durchlässigen Bodenkörpers auf über 170°C mit festen Wärmequellen möglich ist. Die generellen Erwartungen aus kleinskaligen Versuchen und numerischen Berechnungen konnten auch im großmaßstäblichen Experiment erfüllt werden, allerdings ist für ein effizientes Aufheizen das schnelle Unterbinden des energiezehrenden Heatpipe-Effektes maßgeblich. Über die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird daher im wesentlichen das Gesamtdesign der Heizelementgruppe (u.a. vertikale und horizontale Abstände untereinander) entscheidend sein. Die Designkriterien für Feldanwendungen werden in den kommenden Monaten anhand der aus dem Sanierungsexperiment resultierenden Erkenntnissen im Rahmen der Dissertationen von Theurer und Hiester dokumentiert.

Durch die Großbehälterexperimente wurde erstmals eine kontrollierte und bilanzierte Studie zum Einsatz von festen Wärmequellen vorgelegt. Trotz einer lange dauernden Aufheizphase konnte das Ziel einer Erwärmung des zu sanierenden Bereichs auf bis zu 170°C realisiert werden. Aus den experimentellen und numerischen Arbeiten sind vorübergehende Entwurfskriterien für Feldanwendungen ableitbar (Hiester et al., 2003b).

Die gewählte Anordnung von nur vier Wärmequellen ist dabei im Vergleich zu Feldanwendungen als ungünstig anzusehen, da eine große Energiemenge über die Ränder zu kälteren Bereichen abströmt. Im Falle einer realen Sanierung würde das für den Großversuch gewählte Raster mehrfach dupliziert und so die Verlustfläche im Verhältnis zum gesamt beheizten Volumen verringert werden. Eine entsprechende Planung für einen Piloteinsatz an einem Feldstandort ist derzeit in Arbeit und soll in den nächsten Monaten realisiert werden.

In einem Sanierungsversuch auf Technikumsskala konnte eindrucksvoll der Vorteil der thermisch unterstützenden Massnahme auf den Schadstoffaustrag und eine deutliche Verkürzung der Sanierungszeiten nachgewiesen werden. Während mit der kalten Bodenluftabsaugung unter optimistischen Annahmen mindestens 8 Monate zur Abreinigung der Kontamination benötigt werden, kann durch das THERIS-Verfahren eine Verkürzung auf drei Wochen Betriebszeit unter vollständigem Austrag des eingebauten Schadstoffs erzielt werden.

Eine detaillierte Darstellung der in diesem Abschlußbericht zusammengefassten Ergebnisse findet sich in zahlreichen Veröffentlichungen, von denen einige wesentliche als Anlage beigefügt sind.

### Danksagung

Das Forschungsprojekt THERIS wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Baden-Württembergischen Projektträger BWPLUS (Baden-Württembergisches Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“) jeweils hälftig finanziert. Hierfür möchten sich die Projektbeteiligten bedanken.

## Literaturhinweise

Udell, K., Fitch, J.S., 1985: Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Media Considering Evaporation, Condensation and Non-Condensable Gas Effects, ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Denver, Co.

Färber, A., 1997: Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungstechnologie, Mitteilungen, Heft 96, Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart

Betz, C., 1998: Wasserdampfdestillation von Schadstoffen in porösen Medien: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungstechnologie, Mitteilungen, Heft 97, Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart

Helmig, R., 1998: „Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung“, Mitteilungen, I Heft 91, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Koschitzky, H.-P., Schmidt, R., Winkler, A., 1999: Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung zur In-situ-Reinigung kontaminierter heterogener Bodenstrukturen, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BWPLUS 1999, internet: <http://bwplus.fzk.de>

Winkler, A., Theurer, T., Schmidt, R., Koschitzky, H.-P., 2000a: Thermal In-Situ Remediation of Low Permeable Soils: Theory and Experimental Results, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Contaminated Soil, 18.-22. September 2000, Leipzig, Vol. 2, 1127 - 1128.

Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Theurer, T., Schmidt, R., 2000b: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BWPLUS 2000, 02. März 2000, internet: <http://bwplus.fzk.de>

Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Theurer, T., Schmidt, R., 2000c: Thermische In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen (THERIS): Grundlagen des Wärme- und Schadstofftransports, Kurzfassungen der Vorträge zum VEGAS Statuskolloquium am 13. Oktober 2000, S.3-7.

Schmidt, R. 2001: Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte, Mitteilungen, Heft 106, Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart

Stoller Ingenieurtechnik GmbH, 2000: STARS-Stoffdatenbank für Altlasten-relevante Stoffe, Dresden

Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Weiske, A., Gropper, H., 2001:a 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., Koschitzky, H.-P., Theurer, T., Hiester, U., 2001b: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BW PLUS 2001, 28. Februar 2001, internet: <http://bwplus.fzk.de>

Winkler, A., Theurer, T., Hiester, U., Koschitzky, H.-P., 2001c: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur thermischen In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen, VEGAS-Statuskolloquium 2001, 12. Oktober 2001, S. 31-37.

Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Theurer, T., 2001d: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Abschlußbericht zur Phase 1, Wiss. Bericht 09/2001 (HG 283), Institut f. Wasserbau, Universität Stuttgart.

Winkler, A.; Class, H.; Helmig, R., 2002: An Efficient Solution Technique for the Numerical Simulation of Thermally Enhanced Soil Vapour Extraction, International Conference Groundwater 2002, Berkeley, USA, March 24-28, 2002, p 534-538.

Theurer, T.; Winkler, A.; Hiester, U.; Koschitzky, H.-P., 2002: Developing thermally enhanced in-situ remediation technology by experiment and numerical simulation, International Conference Groundwater 2002, Berkeley, USA, March 24-28, 2002, p 108-112.

TA Luft, 2002: Erst allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 22.07.2002

Hiester, U., Theurer, T., Koschitzky, H.-P., Winkler, A., 2002a: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BW PLUS 2002, 26. Februar 2002, internet: <http://bwplus.fzk.de>

Hiester, U.; Theurer, T.; Winkler, A.; Koschitzky, H.-P., 2002b: Large-Scale Experiments as a Tool for the Development of an enhanced Remediation Technology, XXVII General Assembly, EGS 2002, Nice, France, April 21-26, 2002.

Hiester, U., Theurer, T., Winkler, A., Koschitzky, H.-P., 2002c: Large-scale Experiments to develop a thermally enhanced Remediation Technology, 3rd International Conference in Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, USA, May 22-26, 2002

Hiester, U., Theurer, T., Winkler, A., Koschitzky, H.-P., 2002d: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie mit festen Wärmequellen mittels großskaliger Versuche und numerischer Modellierung, VEGAS-Statuskolloquium 2002, 10. Oktober 2002, S. 73-81.

Theurer, T., Hiester, U., Koschitzky, H.-P., Winkler, A., 2003a: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Diskussionskreis Abfall und Altlasten beim Statusseminar BW PLUS 2003, 11. März 2003, internet: <http://bwplus.fzk.de>

Theurer, T.; Hiester, U.; Winkler, A.; Koschitzky, H.-P., 2003b: Mathematical and Numerical Modeling of Thermally Enhanced Remediation with Thermal Wells, 8th International FZK / TNO Conference on Contaminated Soil, ConSoil 2003, ICC, Gent, May 12 - 16, 2003

Hiester, U.; Theurer, T.; Winkler, A.; Koschitzky, H.-P., Färber, A., 2003a: Technical Scale Investigations for the in-situ Remediation of Low Volatile Contaminants by Thermal Wells, 8th International FZK / TNO Conference on Contaminated Soil, ConSoil 2003, ICC, Gent, May 12 - 16, 2003

Hiester, U.; Theurer, T., Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Färber, A., 2003b: Thermische In-situ-Sanierung (THERIS) schlecht durchlässiger Böden mit festen Wärmequellen: Ergebnisse großskaliger Versuche und numerischer Modellierungen, ITVA, 08.-09. Mai 2003, S. 65-82.

Hiester, U.; Schrenk, V.; Weiss, T., 2003c: Environmental Balancing of "Cold" SVE and Thermally Enhanced Soil Vapour Extraction - Practical Support for Decision Makers, 8th International FZK / TNO Conference on Contaminated Soil, ConSoil 2003, ICC, Gent, May 12 - 16, 2003

Hiester, U., Schmid, G. 2003d: Entwicklung von temperatur- und schadstoffbeständigen TDR-Sonden zur Sättigungsmessung bei der thermischen In-situ Sanierung THERIS, Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Kolloquium mit Workshop, 03.-04.Juli 2003, Universität Karlsruhe, Tagungs-CD

Hiester, U., Theurer, T., Winkler, A., Koschitzky, H.-P., 2003e: THERIS: Sanierung der ungesättigten Bodenzone mittels fester Wärmequellen, Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, Schrenk, V., Batera, K. Barczewski, B., Weber, K. & H.-P. Koschitzky, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2003. - Nr.: 124 - Seiten: 173-183.

Hiester, U., Schmid, G. 2003f: Entwicklung von temperatur- und schadstoffbeständigen TDR-Sonden zur Sättigungsmessung bei der thermischen In-situ Sanierung THERIS, Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Sonderdruck der Zeitschrift „Wasser- und Geotechnologien“, in Druck

Winkler, A., 2003: Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen, Mitteilungen, Heft 115, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-18-2

Theurer, T., 2004: Entwicklung von Dimensionierungsansätzen für die In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen unter Berücksichtigung des nichtisothermen Fluidverhaltens, Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, (in Vorbereitung)

Hiester, U., 2004: In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen: Technologieentwicklung und Einsatzbereiche, Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, (in Vorbereitung)