

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

U. Hiester, T. Theurer, A. Winkler, H.-P. Koschitzky

Institut für Wasserbau, Lehrstuhl für Hydraulik und Grundwasser, Universität Stuttgart

## **Kurzfassung**

Zur Entwicklung einer Technologie zur In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden wurden bei VEGAS am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart in einer ersten Projektphase umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Wärmeausbreitung und zum Schadstofftransport in einem porösen Medium unter Einsatz von festen Wärmequellen durchgeführt. Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurden die Prozesse durch numerische Simulationen mit dem Mehrphasen-Mehrkomponentenmodell MUFTE studiert und untersucht und die Ergebnisse auf andere Skalen und Bodenstrukturen übertragen. Die Ergebnisse der Projektphase I sind im Abschlußbericht (siehe Winkler, 2001c) dokumentiert.

In der am 01.08.2001 begonnenen Phase II des Projekts ist die Entwicklung der Sanierungstechnologie zur Anwendungsreife und deren Übertragung auf einen Feldstandort angestrebt. Hierzu werden Experimente im VEGAS-Großbehälter mit einem Bodenvolumen von ca. 150 m<sup>3</sup> (Technikumsmaßstab) durchgeführt. Diese wurden durch eine Reihe von experimentellen Voruntersuchungen und numerischen Berechnungen vorbereitet. Zur Beurteilung des Wärme- und Schadstofftransports auf dieser Skala wurden ca. 300 Temperatur- und 35 Feuchtesensoren in den Versuchstand eingebaut. Das durch kleinmaßstäbliche Versuche validierte numerische Berechnungsmodell soll für dreidimensionale Berechnungen ausgebaut, und damit die Großversuche sowie der Technologietransfer in die Praxis begleitet werden.

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

U. Hiester, T. Theurer, A. Winkler, H.-P. Koschitzky

Institute of Hydraulic Engineering, Chair of Hydraulics and Groundwater, University of Stuttgart

## **Abstract**

In search of a remediation technology for the in-situ remediation of low permeable soils, basic studies concerning heat- and mass transport in a porous media under the influence of thermal wells have been conducted at VEGAS, Institute of Hydraulic Engineering, University of Stuttgart. In parallel to the experiments, numerical modelling with the multiphase-multicomponent model MUFTE was used for studying the governing processes involved. The results have been used to transfer experimental results to different scales and soil structures. These results have been documented in the final report ( Winkler, 2001c).

In the current Phase II of the research project, started at Aug. 01, 2001, the transfer of gained knowledge to a field site dimension is planned. Therefore, experiments in the large VEGAS-tank with a soil volume of approx. 130 m<sup>3</sup> (technical scale) will be conducted. They have been prepared through a series of preparatory experiments and numerical computations. For evaluation of heat- and mass transport, approx. 300 temperature- and 35 moisture sensors were distributed in the large-scale setup. The numerical model, which has been validated by small-scale experiments, will be extended for three-dimensional modelling of the large setup to accompany the experiments and the transfer of technology to a field site.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Weitergehende Voruntersuchungen nach Abschluss der Projektphase I .....	3
2.1	Wesentliche Ergebnisse der Projektphase I .....	3
2.2	Zweidimensional-ebene Küvettenexperimente in Phase II .....	4
2.3	Radialsymmetrische Tonnenexperimente .....	5
2.3.1	Versuchsaufbau .....	5
2.3.2	Temperaturausbreitung .....	5
2.3.3	Bodenfeuchte- und Sättigungsmessungen .....	6
3	Anforderungen an den Großversuchsstand .....	8
4	Design des Großbehälterversuchsstandes .....	9
4.1	Verwendete Bodenmaterialien .....	9
4.2	Numerische Vordimensionierung der Brunnenanordnung .....	10
4.3	Gesamtlayout und meßtechnische Schnittführung .....	12
5	Aufbau des Versuchsstandes und meßtechnische Peripherie .....	13
5.1	Befüllung des Versuchsstandes .....	13
5.2	Temperaturmessung .....	14
5.3	Feuchtemessung .....	14
5.4	Schadstoffdiffusor .....	15
5.5	Weitere Anlagentechnik .....	16
6	Geplantes Versuchsprogramm .....	17
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	18
	Literaturhinweise .....	19

# 1 Einleitung

Bei Verunreinigungen der ungesättigten Bodenzone mit mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffen ist die kalte Bodenluftabsaugung (BLA) Stand der Technik der In-situ-Sanierungsverfahren. Diese ist jedoch 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 nimmt die Flüchtigkeit der Schadstoffe exponentiell zu, was eine Vervielfachung der Massenausträge und daraus resultierend kürzere Sanierungszeiten ermöglicht. Nicht abgeschlossene Sanierungen behindern vielfach administrativ wie technisch den Beginn der Wiedernutzung von Industriebrache. Insbesondere im innerstädtischen Bereich zieht dies Folgeprobleme nach sich. 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 schwerflüchtigen organischen Schadstoffen auch bei gering durchlässigem Untergrund. Der Energieeintrag erfolgt dabei über elektrisch betriebene feste Wärmequellen und den Wärmetransport über Wärmeleitung im Untergrund.

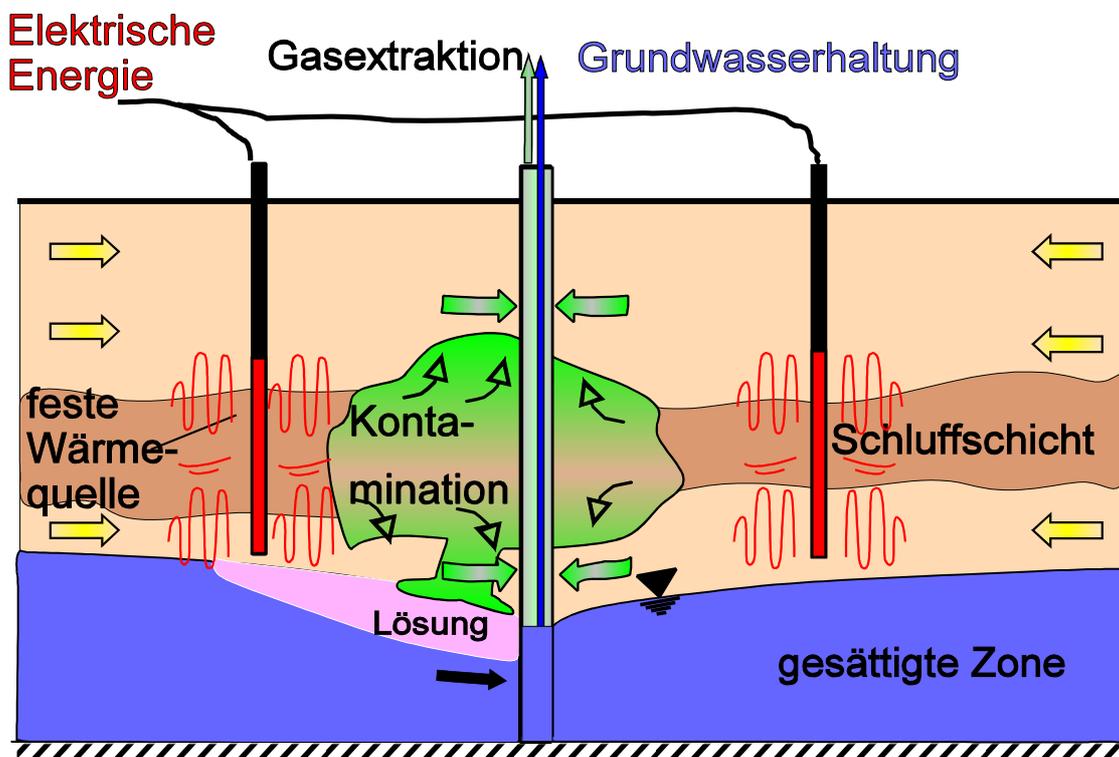


Abb. 1: Prinzipskizze zum Einsatz fester Wärmequellen

## **2 Weitergehende Voruntersuchungen nach Abschluß der Projektphase I**

In der erfolgreich abgeschlossenen ersten Projektphase (Förderkennzeichen: BWSB 99009 [BWPLUS], 1481207 [BMBF]) wurden hierzu die maßgeblichen Wärme- und Schadstofftransportprozesse experimentell untersucht, analysiert und in die Numerik umgesetzt. Die Umsetzung der auf Laborskala gewonnenen Erkenntnisse in eine Technologieentwicklung für die Feldskala erfolgen in der nun angelaufenen zweiten Projektphase (Förderkennzeichen: BWC20014 [BWPLUS], 02WT0266 [BMBF]) über 3D-Untersuchungen im Großbehälter. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung der Anlagensteuerung zur Gewährleistung einer gezielten gleichmäßigen Erwärmung des Bodenkörpers.

## 2 Weitergehende Voruntersuchungen nach Abschluss der Projektphase I

### 2.1 Wesentliche Ergebnisse der Projektphase I

In der abgeschlossenen Projektphase I wurden über 100 kleinskalige 1D-Säulenversuche und 2D-Küvettenversuche sowie begleitende numerische Simulationen durchgeführt. Im Rahmen der BW PLUS-Statuskolloquien 2000 und 2001 wurden die Ergebnisse vorgestellt (Winkler et al., 2000 und 2001b).

Zusammenfassend läßt sich festhalten (Winkler et al., 2001c):

- Über aufwendige Messungen der Fluideigenschaften Dichte, Viskosität und Grenzflächen-spannung war eine temperaturabhängige analytische Formulierung der *konstitutiven Beziehungen* möglich. Diese wurden in das numerische Modell implementiert, so dass mit Hilfe der Berechnungen die 1D- und 2D-Versuche realitätsnah nachgerechnet werden konnten.
- Die Untersuchung des Wärmetransports zeigt eine starke Erwärmung des Bereichs nahe des Heizelements auf Temperaturen weit über 100°C, wobei die *Betriebstemperatur* der Wärmequelle über den entstehenden Temperaturgradienten die Geschwindigkeit der Erwärmung bestimmt.
- Es konnte in allen Sanierungsexperimenten mit festen Wärmequellen innerhalb von zwei Tagen eine deutliche *Erhöhung des Schadstoffaustrags* sowie eine starke Verminderung der im Boden verbleibenden Restkonzentrationen erreicht werden.
- Kontaminationen auch in heterogenen Bodenstrukturen können 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* zeigen, dass unter Feldbedingungen möglicherweise eine Erhöhung der Schadstoffaustragsrate realisierbar ist.

In der zweiten Projektphase stand vor allem die Frage im Vordergrund, wie sich die festen Wärmequellen gezielt einsetzen lassen, um gering durchlässige Schichten im Untergrund aufzuheizen. Zu diesem Zweck wurden Vorversuche durchgeführt, bei denen auf kleiner Skala geschichtete Bodenaufbauten untersucht wurden.

## 2 Weitergehende Voruntersuchungen nach Abschluß der Projektphase I

### 2.2 Zweidimensional-ebene Küvettenexperimente in Phase II

In der zweidimensionalen Küvette aus Edelstahl (Winkler 2000a) wurde in einer heterogenen Bodenstruktur, bestehend aus Grobsand mit eingebetteter Feinsandlinse, Untersuchungen zum Wärme- und Schadstofftransport sowie zur Schadstoffversickerung durchgeführt. Im Vordergrund stand dabei die Fragestellung, ob sich das Feinmaterial gezielt aufheizen läßt und der verdampfte Schadstoff in den gut durchlässigen Grobsandbereich transportiert werden kann. Im Aufbau analog dem Foto in Abb. 2 wurde die Heizlanze auf 200°C erwärmt und eine Luftströmung von links nach rechts angelegt. Der Versuch wurde über eine numerische Modellierung begleitet.

Sowohl in Experiment als auch Berechnung konnte gezeigt werden, daß die Durchlässigkeit des Materials keinen maßgeblichen Einfluß auf den Wärmetransport hat (Abb. 2, oben). Ober- und unterhalb des Feinmaterials wird zwar geringfügig Wärme konvektiv in der Bodenluft von links nach rechts transportiert, aber die bessere Wärmeleitfähigkeit des feuchten Feinmaterials kann diesen negativen Effekt kompensieren. Es wandert eine steile Temperaturfront durch den Boden.

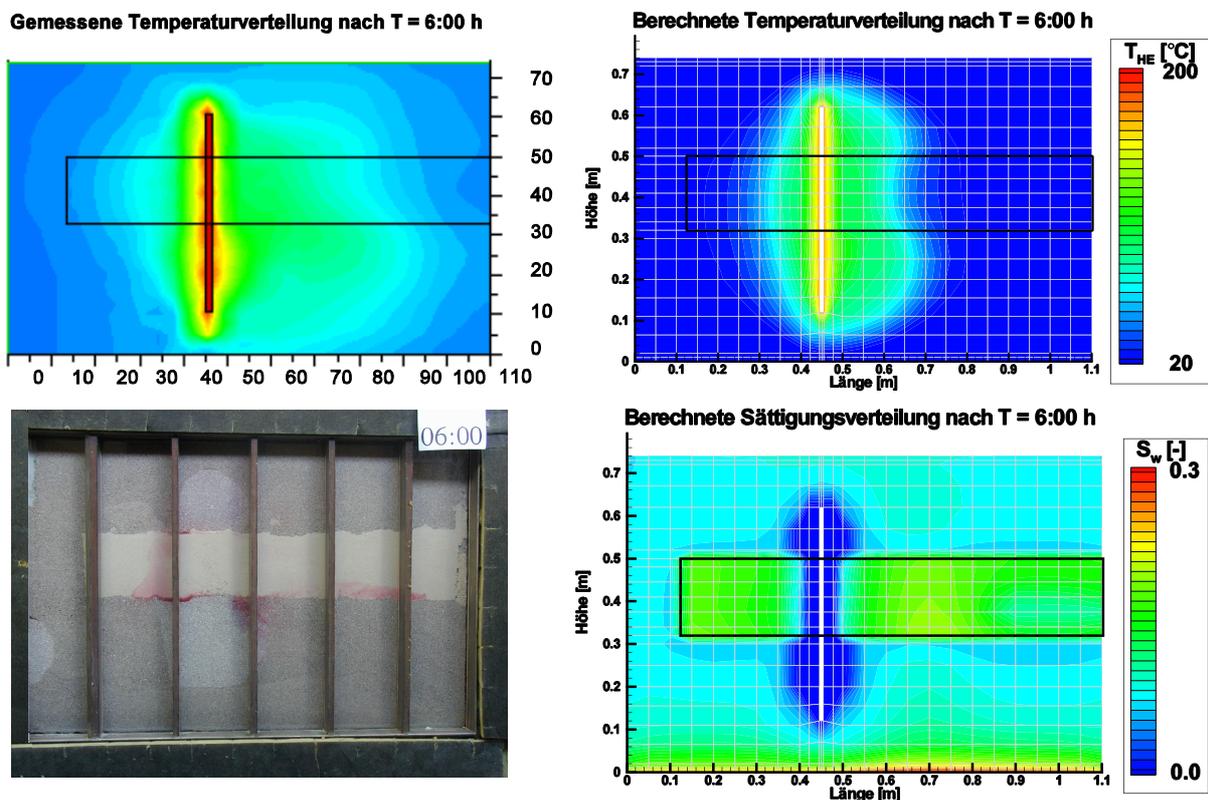


Abb. 2: Temperaturverteilung (oben) und Sättigungsverteilung (unten) bei Experiment (links) und Berechnung (rechts) in einem Küvettenversuch mit Feinsandlinse

Wurde im Experiment die allmähliche Trocknung des Bodens in der Nähe des Heizelements beobachtet (Abb. 2, Foto unten), so ließ sich mit Hilfe der Numerik eine detaillierte Sättigungsverteilung berechnen, die den beobachteten Effekt wiedergab. Da die Wassersättigung den Wärmetransport im Boden beeinflusst, soll sie in den Großbehälterversuchen in VEGAS auch meßtechnisch separat erfaßt werden..

### 2.3 Radialsymmetrische Tonnenexperimente

#### 2.3.1 Versuchsaufbau

In Phase I durchgeführte Säulenexperimente umfaßten ein Bodenvolumen von ca. 3 Liter, der 2D-Versuchsstand (Küvette) 65 Liter. Die auftretenden Wärmeverluste über die Berandung waren trotz aufwendiger Isolierung bei beiden Behältern sehr hoch, da das Heizelement nahe an Außenseiten angeordnet werden mußte. Daher ist eine Übertragung dieser Versuchsergebnisse auf die Feldskala kaum möglich.

Zur gezielten Planung der Großbehälterversuche wurden ergänzende radialsymmetrische Experimente in einer Tonne mit einer Höhe von 68 cm und einem Innendurchmesser von 58 cm (Bodenvolumen 180 Liter) durchgeführt. Sie besitzt eine Bodendrainage und kann am Tonnenkopf wahlweise offen oder geschlossen betrieben werden. Zur Minderung der Wärmeverluste ist sie mit Dämmwolle isoliert. In die Sandschüttung wurde ein Heizelement (Länge 50 cm) zentrisch vertikal eingebaut. Die Temperatúrausbreitung wurde in zwei Schnitten über je fünf Profile und fünf Höhenlagen erfaßt.

#### 2.3.2 Temperatúrausbreitung

Erwartungsgemäß konnten die Ergebnisse aus den Säulenexperimenten hinsichtlich der Wärmeausbreitung in trockenen Böden bestätigt werden. Mit zunehmendem Anfangssättigung wird aber die Bedeutung des konvektiven gegenüber dem konduktiven Wärmetransport deutlich. In Abb. 3 sind vergleichend zwei Experimente mit einer Feinsandfüllung gegenübergestellt, für die die Anfangswassersättigung 25% bei T26 und 45% bei T25 betrug. Beide Versuche wurden mit einer Heizelementtemperatur von 300°C betrieben.

Durch den höheren Wasseranteil findet im Versuch T25 ein ausgeprägter Wärmetransport durch konvektiv bewegtes Wasser statt, und es kommt binnen der ersten 48 h zu einer größeren 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 kann ein Aufheizung durch konduktiv nachgeführte Wärme erfolgen.

## 2 Weitergehende Voruntersuchungen nach Abschluß der Projektphase I

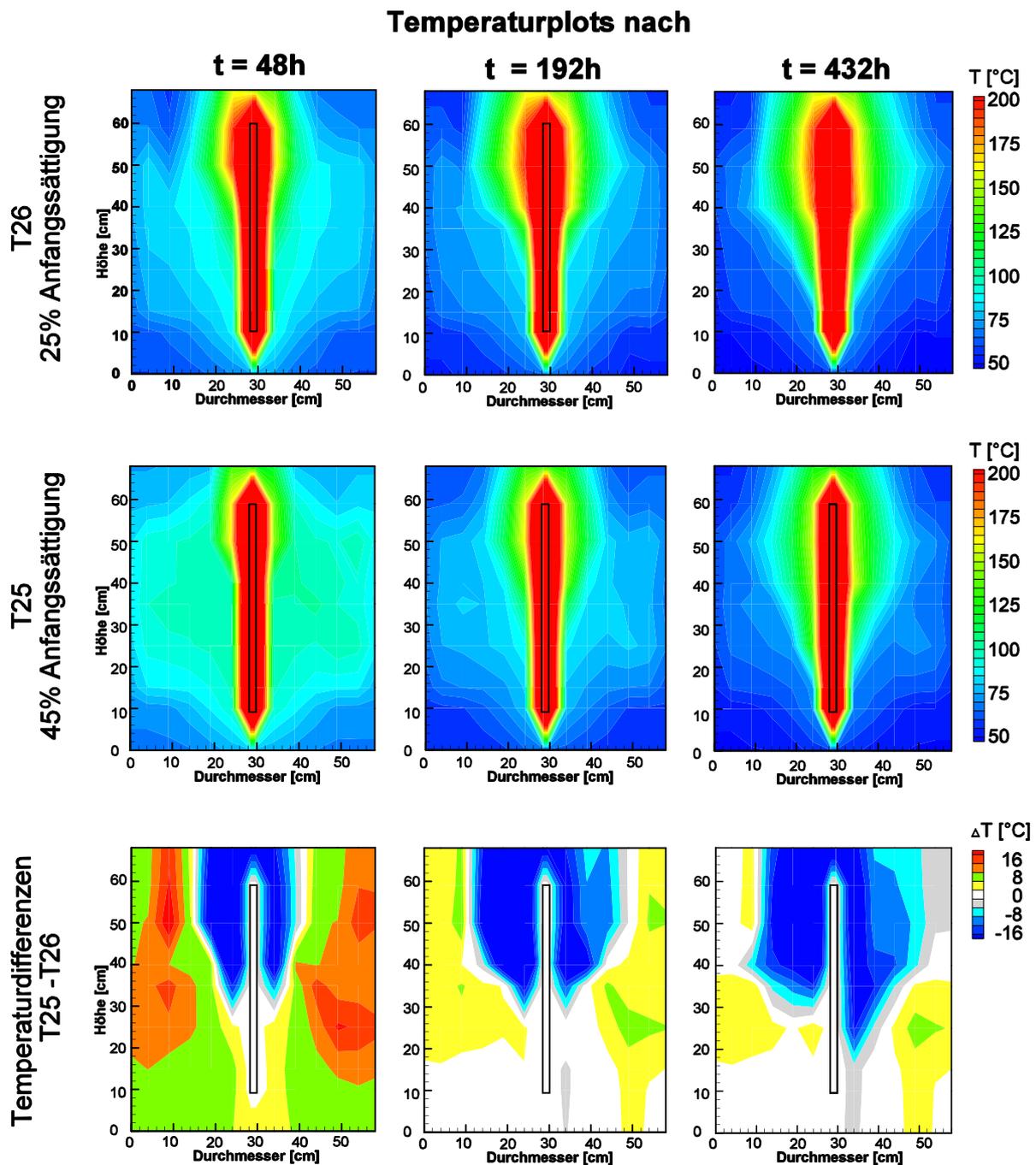


Abb. 3: Vergleich der Temperaturentwicklung im Feinsand bei unterschiedlichen Anfangswassersättigungen nach 2, 8 und 18 Tagen (Heizelementtemperatur 300°C)

### 2.2.3 Bodenfeuchte- und Sättigungsmessungen

Anhand der radialsymmetrischen Experimente konnte der starke Einfluß der Wassersättigung auf den Wärmetransport gezeigt werden. Die Änderung der Wassersättigungen beim instationären Erwärmungsvorgang wurde in der ersten Projektphase bei den Säulenexperimenten über das Verfahren der gamma-Dichtemessung erfaßt. Der zu untersuchende Bodenkörper wurde mit

## 2 Weitergehende Voruntersuchungen nach Abschluß der Projektphase I

gamma-Quanten punktförmig durchstrahlt und die Abschwächung der Intensität gemessen. Da die Abschwächung während des Versuchs nur vom Wassergehalt der Sandschüttung beeinflusst ist, lassen sich hieraus die Sättigungen in der Säule zeitaufgelöst zurückrechnen. Limitierend wirkt die Aktivität der Strahlenquelle und damit der maximal mögliche Probendurchmesser, so daß diese Methode für Sättigungsmessungen in Großversuchsständen nicht eingesetzt werden kann.

Daher wurde im radialsymmetrischen Behälter die Messung über die Time-Domain-Reflectrometry-Technik (TDR) gewählt. Bei der gewählten Meßtechnik durchläuft ein gepulstes Hochfrequenzsignal eine Metallstabsonde und wird am Ende reflektiert. Diese Laufzeit wird durch die elektrische Leitfähigkeit des umgebenden Bodenmaterials und infolge der hohen Dielektrizität von Wasser stark durch den Wassergehalt beeinflusst. Daher kann der volumetrische Wassergehalt und damit die Wassersättigung über die Laufzeit des Signals bestimmt werden. Infolge der besonderen Beanspruchung der TDR-Sonden (hohe Temperaturen, aggressive Umgebungsbedingungen) war der Einsatz konventioneller Sonden aus dem Bereich der Bodenfeuchtemessung nicht möglich. Deshalb wurden Zweistab-TDR-Sonden in den Werkstätten des Instituts für Wasserbau entwickelt und gefertigt (Abb. 4).



Abb. 4: Prototypen der Zweistab-TDR-Sonden zur Bestimmung der Wassersättigung

In den Tonnenversuchen zeigt sich, dass es bei schneller Aufheizung sehr feuchter Bodenkörper zur bereichsweisen Kondensation des Wasserdampfes und so zu einer Zunahme der Sättigung kommen kann. Es ist angestrebt, diese Untersuchungen sowohl in Tonnenexperimenten als auch im Großbehälter (s. Kap. 5.3) fortzuführen.

## 3 Anforderungen an Großversuche zur Technologieentwicklung

Ziel der Versuche im Technikumsmaßstab ist die Erarbeitung einer Anlagensteuerung und Anpassung des Verfahrens unter definierten, feldähnlichen Bedingungen und Abmessungen, so dass eine zuverlässige Sanierung eines Feldstandortes unter Berücksichtigung der Auswirkungen der neuen Technologie auf die Umwelt durchführbar sein wird. Hierbei ist u. a. die Abschätzung der energetischen Effizienz des Verfahrens auf großer Skala wichtig. Bei kleinskaligen Versuchen können durch die hohen Wärmeverluste über die Ränder derartige Abschätzungen fehlerbehaftet sein. Daher sollen auf der Grundlage der Großversuche auch Kriterien zur Kostenabschätzung bei einer Feldsanierung erstellt werden, um das Verfahren in der Praxis wirtschaftlich einsetzen zu können.

Hieraus ergeben sich folgende Anforderungen an einen Versuchsaufbau im Technikumsmaßstab:

- Eine homogene Schichtung von gering durchlässigen Bodenbereichen in besser durchlässigen Böden sollte wiedergegeben werden. Nur so ist eine Beurteilung der Prozesse, vor allem hinsichtlich der Mobilisierung von Schadstoff durch Wärmeeintrag, möglich.
- Die Wärmeverluste über die Berandung des Versuchsbehälters sollten gering sein, um klare Meßdaten zur Energiebilanzierung zu gewinnen und daraus Kostenaussagen für die Praxis ableiten zu können. Hierzu muß das Versuchsvolumen hinreichend groß sein.
- Die Injektion von Schadstoffen im Versuchskörper muß möglich sein.
- Aus Zeit- und Kostengründen muß die Durchführung verschiedener Versuche unter gleichen Versuchsrandbedingungen ohne Ausbau und Wiederbefüllung des Versuchsbehältnisses möglich sein.
- Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Möglichkeit einer Massenbilanzierung muß gegeben sein.
- Die Versuche müssen so dimensioniert werden, dass im Rahmen der Projektlaufzeit mehrere Versuche durchgeführt werden können.

## 4 Design des Großbehälterversuchsstandes

### 4.1 Verwendete Bodenmaterialien

Als gut durchlässiges Bodenmaterial wurden 125 m<sup>3</sup> Grobsand mit einer im Labor ermittelten Permeabilität von  $k_0 = 1 \div 2 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup> (entspricht  $k_f = 1 \div 2 \cdot 10^{-3}$  m/s) verwendet. In diese Grobsandschüttung wurde mittig eine 1 Meter mächtige Linse aus Feinmaterial eingebaut.

Um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse sicherzustellen, wurden für die Materialauswahl gesonderte Experimente durchgeführt, die zum Ausschluß von Bodenmaterialien mit quellfähigen Anteilen führten, da Temperaturen oberhalb von 120°C bei diesen dauerhafte Materialveränderungen bewirken.

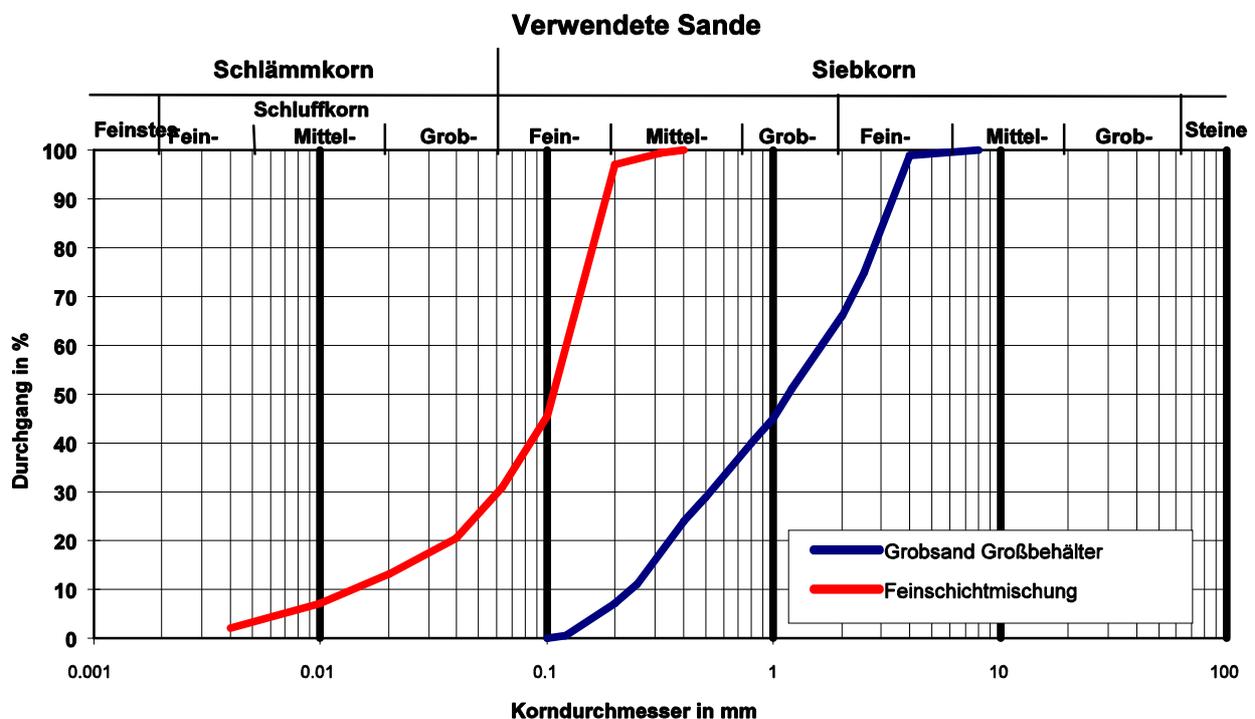


Abb. 5: Sieblinien des eingebauten Grobsandes und des Feinschichtgemisches

Als Feinschicht wurde ein Feinsand-Quarzmehlgemisch hergestellt, wobei Quarzmehl ein gebrochenes Feinsandmaterial ist und in dieser Form nicht in der Natur vorkommt, jedoch nur auf diese Art die erforderliche geringe Durchlässigkeit realisiert werden konnte. Das suffusions sichere Feinschichtgemisch kann als „Feinsand, stark quarzmehlig“ beschrieben werden, ähnelt in seiner Körnungslinie (Abb.5) jener von Geschiebelehmen, Geschiebemergeln oder Auelehmen (nach DIN 18196), enthält aber entgegen diesen natürlichen Böden keine Tonminerale. Gegenüber dem Grobsand wurde eine um den Faktor 100 niedrigere Durchlässigkeit eingestellt.

## 4 Design des Großbehälterversuchsstandes

Für den Einbau im Großbehälter war es zudem wichtig, dass die Materialien mit einer guten Verdichtung eingebaut werden. Zur Abschätzung der Verdichtbarkeit der einzubauenden Materialien wurden Proctorversuche nach DIN 18127-P100X durchgeführt.



Abb. 6: Herstellung des Feinsand-Quarzmehl-Gemisches in einem Transportbetonmischer

### 4.2 Numerische Vordimensionierung der Brunnenanordnung

Zur Vordimensionierung der Anordnung der festen Wärmequellen wurde das nichtisotherme Mehrphasen-Mehrkomponenten-Modell MUFTE (Multiphase Flow, Transport and Energy, Helmig 1998) verwendet. Dieses wurde mit Hilfe kleinskaliger Versuche kalibriert (Winkler 2002) und bereits in vorhergegangenen Untersuchungen zur Prognose und Interpretation eingesetzt (siehe Kapitel 2.2, Winkler 2001a).

Im numerischen Modell wurde der VEGAS-Grossbehälter mit der Größe 6 m \* 6 m durch einen Horizontalschnitt angenähert. Vertikal verlaufende Prozesse konnten hierbei nicht wiedergegeben werden, so dass beispielsweise Aussagen, ob Schadstoff mobilisiert und vertikal verlagert wird, hierüber nicht zu treffen sind. Bei der Modellierung stand die Frage im Vordergrund, ob bei einem gewählten Heizlanzenabstand mit einer bestimmten Temperatur das Erwärmen eines Kernbereichs in einem akzeptablen Zeitraum möglich ist.

Einige Ergebnisse der Modellierung werden in Abbildung 7 dargestellt. Der Temperaturplot links oben im Bild zeigt die Temperaturverteilung nach einer Heizdauer von 14 Stunden. Leicht zu erkennen ist dabei die Lage der Heizelemente in Anordnung eines Quadrates von einem Meter Seitenlänge, obwohl noch keine starke Erwärmung des Bodenmaterials stattgefunden hat.

Angedeutet sind auch die Extraktionsbrunnen, durch die Bodenluft mit einer Rate von jeweils  $10\text{m}^3/\text{h}$  extrahiert wird. Die Bodenluftabsaugung führt aber sehr schnell zur Ausbildung eines Strömungsfeldes (Abb.7, rechts oben). Frischluft kann durch seitlich vertikale Luftschächte nachströmen. Die starke Strömung der Bodenluft führt dazu, dass verdampftes Wasser aus dem erhitzten Bereich abgeführt wird und in der Nähe der Brunnen wieder auskondensiert (Abb.7, links unten).

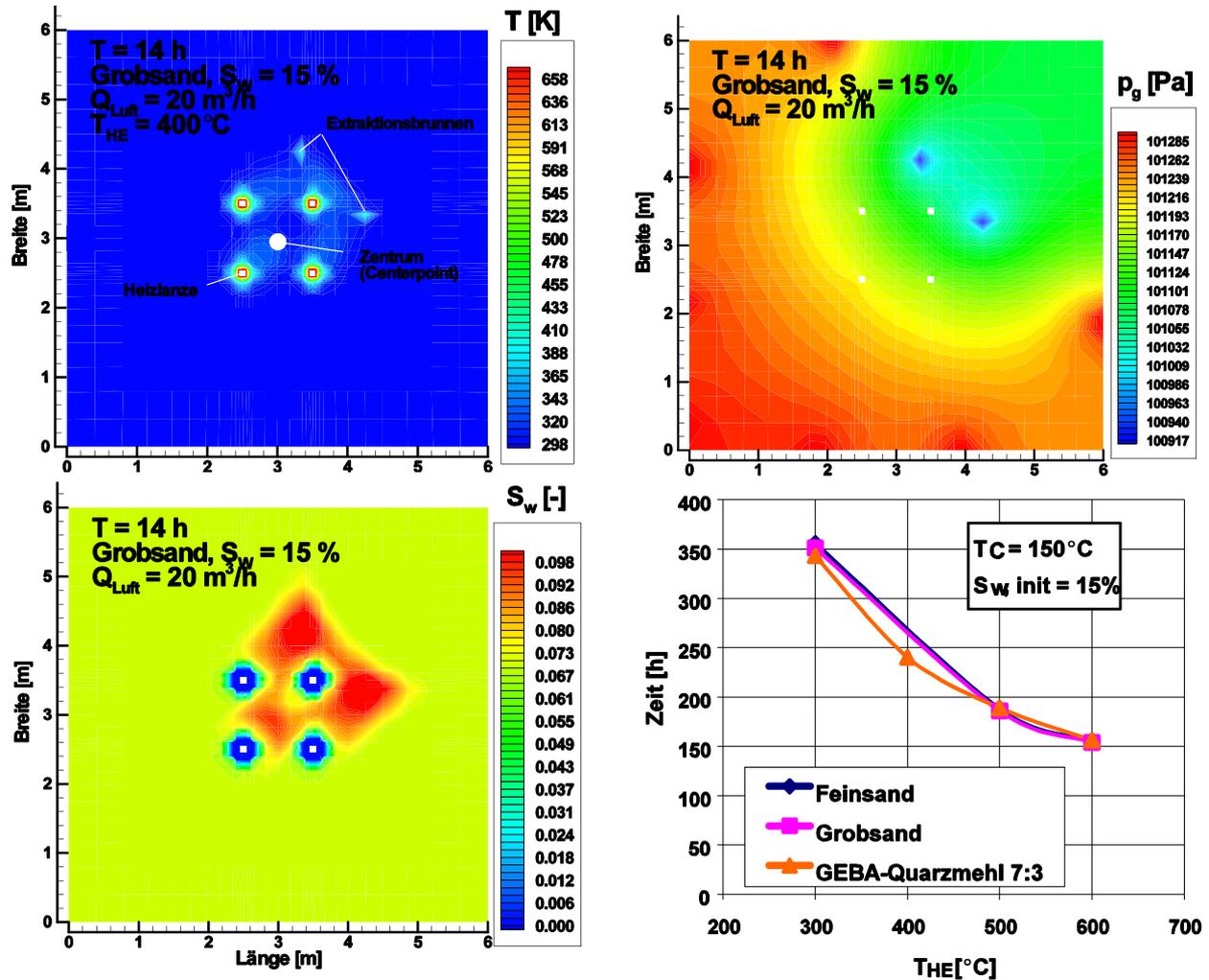


Abb. 7: Numerische Berechnungen zur Dimensionierung des Versuchsaufbaus im VEGAS-Großbehälter: dargestellt sind berechnete Werte in einem Horizontalschnitt nach 14 Stunden Heizbetrieb mit  $400^\circ\text{C}$  an den Heizelementen

In diesem qualitativ sehr zufriedenstellenden Modell wurden systematisch die Bodeneigenschaften und die Heizelementtemperatur variiert, um eine Aussage über die Effizienz der festen Wärmequellen für den gewählten Versuchsaufbau zu bekommen. Ermittelt wurde jeweils der Zeitpunkt, nach dem im Zentrum der Zielzone (Centerpoint, s. Abb. 7) eine Temperatur von  $150^\circ\text{C}$  auftrat. Diese Temperatur wurde als hoch genug eingeschätzt, auch schwerer flüchtige Stoffe effizient sanieren zu können (siehe Winkler, 2001c). Die Ergebnisse sind im Diagramm in Abbildung 7, rechts unten, dargestellt: Erstrebenswert sind demnach im Großbehälter-Versuchsaufbau (und voraussichtlich auch bei einer Feldanwendung) Heizelementtemperaturen von  $500^\circ\text{C}$  und darüber. Dabei hat der Typ des Bodenmaterials nur einen geringen Einfluß, wie auch an anderer Stelle gezeigt wurde.

## 4 Design des Großbehälterversuchsstandes

### 4.3 Gesamlayout und meßtechnische Schnittführung

Aus den Berechnungen und den oben geschilderten Vorüberlegungen ergab sich die in Abb. 8 dargestellte Versuchsanordnung. Die Heizelemente wurden in einer quadratischen Grundfläche angeordnet. Vertikale Hüllrohre in drei Höhenlagen gewährleisten, dass die Heizelemente im Versagensfall ausgewechselt werden können. Der Basisabstand zwischen den Heizelementen kann zudem zwischen 1,0 m und 1,5 m variiert werden, um den Nachweis der Aufheizung auch für größere Abstände zu erbringen.

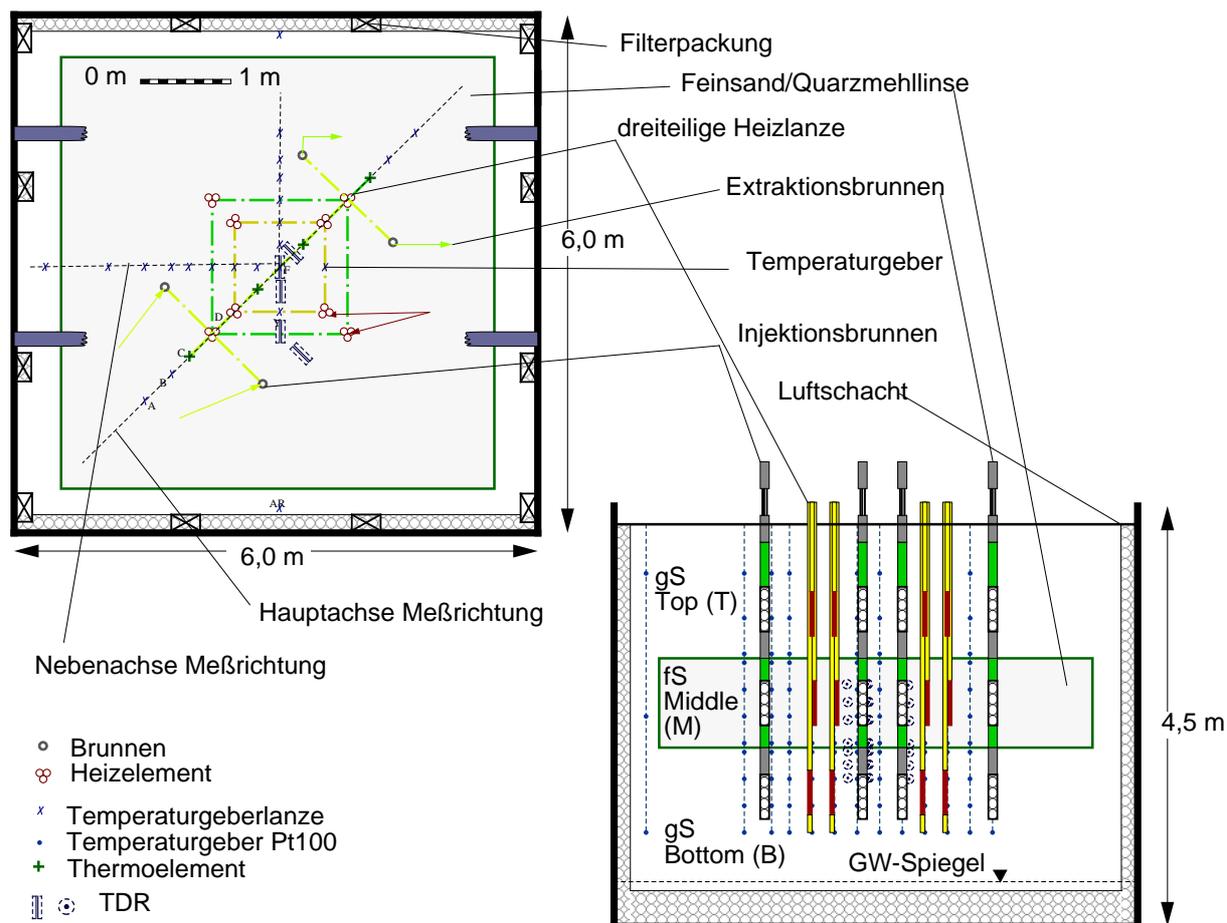


Abb. 8: Aufsicht und Querschnitt des Großbehälterversuchsstandes

Zur Dokumentation der Wärmetransportprozesse wurden drei Schnitte gewählt und mit Temperatursensoren bestückt. Die Hauptachse bildet hierbei ein Schnitt entlang der Behälterdiagonale, so dass das gesamte Feld spiegelsymmetrisch und strömungsparell betrachtet werden kann. Ergänzt wird diese Hauptachse von zwei unter 45° abgewinkelten Nebenachsen, über die in Kombination mit der Hauptachse die radialsymmetrische Wärmeausbreitung bzw. die Detektion der Dampf front erfolgen kann.

Unabhängig von den Temperaturschnittebenen, die eine flächenhafte Betrachtung der Wärmeverteilung im Behälter erlauben, sind die TDR-Sonden (Kap. 5.3) zur Bodenfeuchtemessung angeordnet. Sie dienen nur im zentralen Bereich an exponierten Stellen zur Erfassung der Sättigungsänderungen.

## 5 Aufbau des Versuchsstandes und meßtechnische Peripherie

### 5.1 Befüllung des Versuchsstandes

Die Befüllung des Großbehälters wurde von Mitte Oktober bis Mitte Dezember 2001 in nur acht Wochen realisiert. In dieser Zeit wurden eingebaut:

- 2 Horizontalgrundfilter zur Grundwasserregulierung, 12 Zuluftschächte und 9 Tonnen Filterkies
- 2 Grundwasserpegel
- 2 Dampfinkjektionsbrunnen mit je drei entkoppelten Injektionshorizonten
- 24 Hüllrohre für Heizelemente auf drei Horizonten, angeordnet in zwei Vierergruppen
- 2 Bodenluftextraktionsbrunnen mit je drei entkoppelten Extraktionshorizonten
- 1 Schadstoffinjektor
- 36 Tonnen angemischtes Feinschichtmaterial, manuell eingebaut und verdichtet
- 206 Tonnen Grobsand, manuell eingebaut und verdichtet
- 6 Thermoelementprofile mit je 11 Thermoelementen
- 230 Temperaturfühler (Pt100) mit Teflonkabeln in 23 Profilen auf 12 Horizonten
- 35 TDR-Sonden zur Bodenfeuchtemessung und Sättigungsbestimmung



Abb. 9: Einbauzustand bei Erreichen der Feinschicht (links) bzw. knapp unterhalb der Endhöhe (rechts)

Beim Befüllen des Behälters wurde der Boden lagenweise mit Mächtigkeiten von ca. 10 cm eingebracht und manuell verdichtet. Zur Kontrolle wurden Verdichtungsprüfungen mit dem Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125, Blatt 2 durchgeführt (s. auch Tab. 1).

## 5 Aufbau des Versuchsstandes und meßtechnische Peripherie

Tab. 1: Zusammenstellung der Einbaudichten der Großbehältersande

Größe	Einheit	Grobsand	Feinschicht
Proctordichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,80	1,72
mittlere Einbautrockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,69 ± 0,05	1,58 ± 0,03
mittlerer Verdichtungsgrad	[-]	0,94	0,92
mittlere Porosität	[-]	0,36 ± 0,02	0,40 ± 0,015
Einbauwassergehalte	[-]	0,03 - 0,05	0,09 - 0,10
Einbausättigungen	[-]	0,12 - 0,20	0,28 - 0,40

### 5.2 Temperaturmessung

Für Temperaturbereiche bis 200°C konnte auf vorhandene Pt100-Sensoren mit Teflonkabel zurückgegriffen werden. Die jeweilige Höhenlage wurde einnivelliert, die Position der Geber über Lote ermittelt und die Fühler horizontal eingebaut. Es konnte eine sehr hohe Einbaugenauigkeit von ±0,5 cm erreicht werden. Des weiteren wurden im Nahbereich der Heizquellen mit Temperaturen >> 200°C aufgrund größerer Temperaturbeständigkeit bis 500°C in sechs Profilen vertikale Ni-CrNi-Thermoelementgruppen eingebaut.



Abb. 10: Profilierung der Achsen zum Einbau der Pt100-Temperaturfühler

### 5.3 Feuchtemessung

Wie in Kapitel 2 erläutert, kommt der Betrachtung der Feuchteentwicklung eine wesentliche Rolle beim Prozeßverständnis und bei der Bewertung des Schadstofftransports zu. Andererseits zeigt die Numerik, dass ein Großteil dieser Prozesse zwar qualitativ recht gut zu ermitteln, quantitativ jedoch

## 5 Aufbau des Versuchsstandes und meßtechnische Peripherie

schwierig zu bewerten ist. Um daher nähere Informationen über die Veränderung der räumlichen Feuchteverteilung bei den Großversuchen zu erlangen, wurden in fünf Profilen Zweistab-TDR-Sonden über sieben Horizonte (zwei im Grobsand direkt unterhalb der Feinschicht, fünf über die Höhe der Feinschicht verteilt) angeordnet (s. Abb 11). Die TDR-Messungen ermöglichen an den wesentlichen Stützstellen einen quantitativen Abgleich mit den numerischen Berechnungen.



Abb. 11: TDR-Sonden beim Einbau, rechts vertikales Thermoelementprofil

### 5.4 Schadstoffdiffusor

Der Einbau einer Kontamination für ein Schadstoffexperiment stellte sich in der Planungsphase als schwierige dar, da im Sanierungsexperiment ein „naturähnlicher“ Schadensfall erzeugt und die Massenbilanzierbarkeit gewährleistet sein muß. Vom direkten Einbau eines Schadensherdes beim Befüllen des Großbehälters mußte abgesehen werden, da vor dem Durchführen des Sanierungsversuches die erforderliche Verfahrenstechnik getestet und die Betriebsweise der Heizlanzen anhand diverser Wärmetransportexperimente optimiert werden soll.



Abb. 12: Schadstoffdiffusor beim Einbau auf die gering durchlässige Schicht

## **5 Aufbau des Versuchsstandes und meßtechnische Peripherie**

Des weiteren ist ein nachträglicher manueller Einbau einer Schadstoffquelle oder Injektion über Lanzen aufgrund der hohen Meßtechnikdichte nicht möglich. Es wurde daher ein Schadstoffdiffusor mit einem zentralen Zulauf und acht verzweigenden Öffnungen konstruiert, der direkt oberhalb der gering durchlässigen Schicht eingebaut wurde (Abb. 12). Über Vorversuche konnte gezeigt werden, dass bei Injektion von Schadstoff im Bereich des Schichtwechsels das NAPL kapillar in die feinere Bodenschicht gezogen wird und nicht im gröberen Boden zur Seite abfließt.

### **5.5 Weitere Anlagentechnik**

Die oberirdische Anlagentechnik besteht aus der Meßdatenerfassung, den Anlagenkomponenten zur Temperaturregelung der Heizelemente, zur Bodenluftextraktion und Reinigung sowie zur Dampf-injektion. Letztere Baugruppen sind aus dem abgeschlossenen F+E-Vorhaben TUBA übernommen (Färber, 1997; Betz, 1998; Schmidt, 2001). Die Volumenströme von Luft und Dampf werden über zu- und ablaufseitig angeordnete Blenden gemessen, des weiteren dienen Probenahmestellen zur Massenbilanzierung beim Schadstoffexperiment.

Der Aufbau der oberirdischen Anlagen wird im Januar 2002 abgeschlossen sein. Details zu den hier befindlichen Meßeinrichtungen werden mit der Darstellung der ersten Versuchsergebnisse publiziert.

## 6 Geplantes Versuchsprogramm

Um die Versuchsergebnisse vergleichen und bewerten zu können, sind reproduzierbare Versuchsrandbedingungen erforderlich. Daher wird die Sandschüttung vor Beginn jedes Experiments mit Wasser überstaut und anschließend über den Zeitraum einer Woche drainiert. Hierdurch stellt sich in den einzelnen Schichten eine Sättigung ein, die natürlichen Böden im Grundwasserschwankungsbereich ähnelt. Die Messung der Wassersättigungen erfolgt über die TDR-Sensoren.

Das Versuchsprogramm gliedert sich im wesentlichen in vier Kategorien.

- Zu Beginn werden reine Wärmeexperimente durchgeführt, bei denen der Energieeintrag nur über feste Wärmequellen erfolgt und bei denen die anlagentechnische Regulierung, die Steuerung der Wärmeausbreitung und die Maximierung der effizienten Reichweite des Verfahrens optimiert werden soll. Durch Kombination der festen Wärmequellen mit dem Verfahren der Dampf- oder Dampf-Luft-Gemisch-Injektion soll eine einheitlichere Erwärmung, eine Erhöhung der Wärmetransportraten durch die Wiederbefeuchtung getrockneter Bodenbereiche durch kondensierten Wasserdampf und eine Erhöhung der Reichweite gezielt bewirkt werden. Die daraus resultierenden Verfahrensschemata zum Betrieb der festen Wärmequellen bzw. der Kombination mit Dampf-injektion werden abschließend im vierten Quartal 2002 Grundlage für die Detailplanung und Durchführung eines Schadstoffexperiments sein.
- Parallel zu den experimentellen Arbeiten am Großbehälter wird die bestehende Numerik zur differenzierten Versuchsvorplanung (Wahl der Heiztemperatur, Heizzeit, Bodenluftextraktionsraten etc.) genutzt und sukzessiv durch Abgleich mit den ermittelten experimentellen Versuchsergebnissen verbessert. Das Schadstoffexperiment wird dann mit dem weiterentwickelten numerischen Modell begleitet.
- Die weiterentwickelte Numerik soll für Prognoserechnungen zum möglichen Einsatz von festen Wärmequellen an realen Feldstandorten genutzt werden.
- Die experimentellen Arbeiten an den kleinskaligen Versuchsständen werden fortgeführt.

Ziel ist es, mit Abschluß der Phase II des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens "*Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden*" für die Technologie *THERIS* Anwendungs- und Verfahrenskriterien konzipiert zu haben, die die Akquisition eines Feldstandorts zur pilothaften Sanierung mit *THERIS* ermöglichen.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

In einer ersten Projektphase zur Entwicklung einer Sanierungstechnologie für gering durchlässige Böden wurden über kleinskalige Laborexperimente sowie deren numerische Modellierung die Grundlagenkenntnisse zum Wärme- und Schadstofftransport beim Einsatz fester Wärmequellen erarbeitet.

In der nun angelaufenen zweiten Projektphase soll aufbauend auf den in den vergangenen Jahren gewonnenen Erkenntnisse über den Wärme- und Schadstofftransport über 3D-Experimente im Technikumsmaßstab, Weiterentwicklungen der Numerik und weitere ergänzende kleinskalige Laborexperimente die Technologie THERIS bis zur Anwendungsreife entwickelt werden. Dafür sind folgende Arbeitspunkte vorgesehen:

- Durchführung mehrerer großskaliger 3D-Experimente im VEGAS-Großbehälter.
- Beurteilung des Wärme- und Stofftransports auf dieser Skala durch Temperatur- und Feuchtemessungen.
- Vollständige Massen- und Energiebilanzierung der großskaligen Experimente, um Erkenntnisse über Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erhalten.
- Weiterentwicklung der numerischen Modellierung zur dreidimensionalen Berechnung der nichtisothermen Mehrphasenströmung.
- Einsatz der numerischen Modellierung zur Unterstützung des Technologietransfers.

Es werden nicht nur die festen Wärmequellen als einzige Möglichkeit zum Energieeintrag betrachtet, sondern auch die Kombination mit einer Dampf-injektion untersucht. Gerade bei heterogenen Bodenstrukturen mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten erfolgt dann die Wärmeausbreitung nicht alleine aufgrund reiner Wärmeleitung, sondern wird infolge des Durchströmens des porösen Mediums mit Dampf auch konvektiv transportiert.

# Literaturhinweise

- Betz, C., 1998: Wasserdampfdestillation von Schadstoffen in porösen Medien: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungstechnologie, Mitteilungen, Heft 97, Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- DIN 18121, 1998: Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung.
- DIN 18127, 1993: Proctorversuch.
- DIN 18196, 1988: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- Färber, A., 1997: Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungstechnologie, Mitteilungen, Heft 96, Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Hiester, U., Theurer T., Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Färber, A., 2002: „Large Scale Experiments with Thermal Wells to develop an Enhanced Remediation Technologie“, eingereichter und angenommener Beitrag zur Battelle-Conference May 2002, Monterey, USA
- Schmidt, R., 2001: Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung (TUBA) zur In-situ-Mobilisierung von Schadstoffen in Phase, Mitteilungen, Heft 106, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Theurer, T., Winkler, A., Hiester, U., Koschitzky, H.-P., 2002: Developing thermally enhanced in-situ remediation technology by experiment and numerical simulation. Angenommener Beitrag für die Groundwater 2002, März 2002 Berkley, USA
- Winkler, A., Koschitzky, H.-P., Theurer, T., Schmidt, R., 2000: 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., Weiske, A., Gropper, H., 2001a: 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., Koschitzky, H.-P., 2001c: Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden, Abschlußbericht zur Phase 1, Wissenschaftlicher Bericht 2001/09 (HG 283), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Winkler, A., Claas, H., Helmig, R., 2002: An Efficient Solution Technique for the Numerical Simulation of Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction. Angenommener Beitrag für die Groundwater 2002, März 2002 Berkley, USA