

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

A. Winkler, H.-P. Koschitzky, T. Theurer, R. Schmidt,  
Institut für Wasserbau, Lehrstuhl für Hydraulik und Grundwasser, Universität Stuttgart

### **Kurzfassung**

Zur Sanierung von Kontaminationen mit mittel- bis schwererflüchtigen Schadstoffen sowie gering durchlässigen Bodenbereichen existiert zur Zeit kein anwendungsreifes In-situ-Sanierungsverfahren, welches in der Lage ist, die Schadstoffe in kurzer Zeit aus dem Untergrund zu entfernen. Ein Ansatz zur Entwicklung eines solchen Verfahrens ist der Eintrag thermischer Energie durch elektrisch betriebene feste Wärmequellen, mit denen lokal Bodentemperaturen von weit über 100°C erreicht werden können, wodurch die Schadstoffe verdampft und über die Bodenluft aus dem Untergrund ausgetragen werden.

Um zunächst die Prozesse der Wärmeausbreitung in einem porösen Medium entkoppelt zu betrachten, wurden zahlreiche Säulenexperimente durchgeführt, bei denen gezielt die möglichen Einflußfaktoren variiert und so die physikalischen Prinzipien des Wärmetransports untersucht werden konnten. Dabei wurde sowohl der Einfluß der Permeabilität als auch der Wassersättigung auf die konduktive Wärmeausbreitung untersucht.

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

A. Winkler, H.-P. Koschitzky, T. Theurer, R. Schmidt,  
Institute of Hydraulic Engineering, Chair of Hydraulics and Groundwater, University of Stuttgart

### **Abstract**

Up to date there is no in situ remediation technology available to remediate a contamination of the subsurface with low volatile components as well as low permeable layers within a short period. In order to develop such a technology, one of the possible approaches is the input of thermal energy by electrical local heat sources. With these local heat sources, local soil temperatures high above 100°C can be achieved easily, the contaminants vaporize and can be extracted with the soil air from the subsurface.

In order to regard decoupled the processes of heat transport in a porous medium, numerous column experiments have been conducted for which all eventual influence coefficients have been varied such that the physical principles of heat transport could be studied. The influence coefficients of interest on the conductive heat transport were the permeability and the water saturation.

## 1 Einleitung

Die herkömmliche Technik der Bodenluftabsaugung zur In-situ-Sanierung der mit Schadstoffen kontaminierten ungesättigten Bodenzone ist ein bewährtes Verfahren in der Sanierungsbranche. Sie kann jedoch nur bei leichtflüchtigen Schadstoffen und gut luftdurchlässigen Böden wirtschaftlich sinnvoll angewendet werden, da die Massenausträge von der Flüchtigkeit des Schadstoffs und dem geologischen Bodenaufbau abhängig sind und sich in vielen Fällen über Jahre erstrecken können. Wird jedoch zusätzlich zur normalen (kalten) Bodenluftabsaugung thermische Energie in den Untergrund gebracht, kann die Sanierungszeit erheblich verkürzt werden, da sich mit dem Temperaturanstieg die Flüchtigkeit der Schadstoffe erhöht und so die Massenausträge vervielfacht werden können. Daher können auch Schadstoffe verdampft und durch die Bodenluftabsaugung aus dem Untergrund entfernt werden, die bei normalen Bodentemperaturen von ca. 10°C nicht erfaßt werden.

Ziel des vorgestellten Forschungsvorhabens "*Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden (THERIS)*" ist die Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Sanierung der ungesättigten Bodenzone bei Vorliegen einer Kontamination mit schwerflüchtigen organischen Schadstoffen oder/und gering durchlässigem Untergrund. Im Gegensatz zu dem in VEGAS (Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung) entwickelten TUBA-Verfahren der Dampf-injektion (Betz, 1998, Betz et al., 1998, Färber, 1999 und Koschitzky et al., 1999) werden die dazu notwendigen hohen Temperaturen nicht über ein Wärmeträgermedium (z.B. Wasserdampf) in den Boden eingebracht, sondern direkt im Untergrund selbst erzeugt. Die Ausbreitung der Wärme im Boden erfolgt primär über Wärmeleitung. Um gezielt und kontrolliert Temperaturen weit über 100°C erzielen zu können, wurden feste Wärmequellen in Form von elektrisch betriebenen Heizpatronen gewählt. Der Aufbau und das Wirkprinzip ist schematisch in Abb. 1.1 dargestellt.

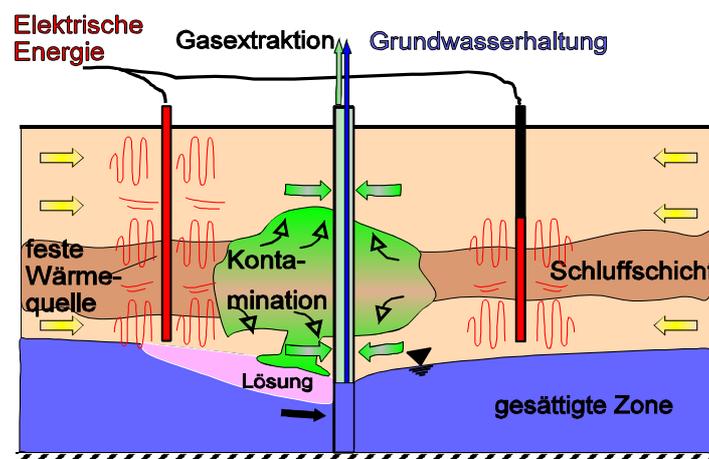


Abb. 1.1: Prinzipskizze zum Einsatz fester Wärmequellen

Im Vordergrund der im folgenden vorgestellten eindimensionalen Untersuchungen stand die systematische Analyse aller am Wärmeeintrag und Wärmetransport beteiligten Prozesse.

## 2 Laborexperimente

## 2 Laborexperimente

### 2.1 Experimenteller Aufbau

Kernstück des Versuchsaufbaus (Abb. 2.1) ist eine 40 cm lange Säule mit einem Innendurchmesser von 10 cm. Als Säulenmaterial wurde DURAN-Glas mit einer Wanddicke von 3 mm gewählt, das sich durch seine Temperaturempfindlichkeit selbst bei scharfen Temperaturgradienten und einem Wärmeleitverhalten ähnlich der eingesetzten Quarzsande auszeichnet. Nur so war es möglich, Experimente auf dem gewünscht hohen Temperaturniveau weit über dem Siedepunkt von Wasser durchzuführen. Um die Zuleitung des Heizelements, das als Energiequelle dient, und den Anschluß der Temperaturfühler an den Meßverstärker zu ermöglichen, wurden Glasgewindebolzen mit der Säule verschmolzen, so daß das Heizelement in Form einer ebenen Spirale über die obere Säulenkappe eingebracht und die Temperaturfühler auf fünf Ebenen angeordnet werden konnten.

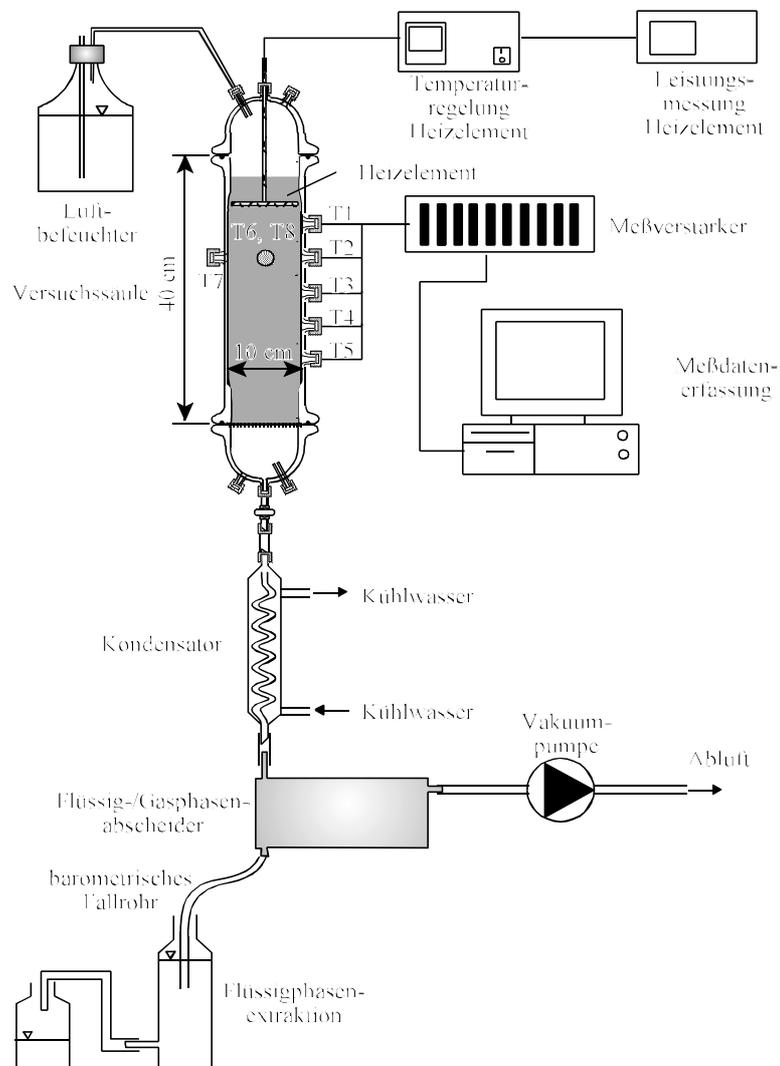


Abb. 2.1: Versuchsaufbau der 1D-Experimente zum Wärmetransport

Die Temperaturverteilung in der Versuchssäule wurde über 8 in der Säule verteilte Temperaturfühler (T1 bis T8) des Typs PT100 gemessen. Der Abstand des obersten Temperatursensors T1 von dem Heizelement betrug 25 mm, darunter wurden die Fühler T2 bis T5 in einem Abstand von 50 mm angeordnet. Alle Fühler wurden dabei mittig in den jeweiligen Meßquerschnitt eingebaut und fixiert. Zusätzlich wurden in der zweiten Meßebeine drei weitere Temperaturfühler (T6 bis T8) in unterschiedlichen Positionen angeordnet, um den Einfluß der Säulenberandung auf die Wärmeverluste abschätzen zu können und so die Annahme der Eindimensionalität der Wärmeausbreitung zu kontrollieren. Zur Fixierung der Sandfüllung und um eine problemlose Flüssig- und Gasphasenextraktion zu ermöglichen, wurde am unteren Säulenende ein Edelstahl-Lochblech sowie ein Drahtgewebe zwischen Kappe und Mittelteil eingespannt. Zur Minimierung der Wärmeverluste an die Umgebung wurde die Versuchssäule mit Glasfaserdämmmatten der Stärke 60 mm umwickelt und mit Draht befestigt. Die Regelung der Temperatur des Heizelements erfolgte über einen externen Regler und wird in 2.2.3 näher beschrieben. Um eine Bodenluftabsaugung zu simulieren, wurde am Säulenfuß eine regelbare Vakuumpumpe angeordnet.

### 2.2 Versuchsdurchführung

Im Mittelpunkt der hier vorgestellten eindimensionalen Untersuchungen stand die Ermittlung der Abhängigkeit des Wärmeeintrags und Wärmetransports bei hohen Temperaturen ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) von den maßgebenden Einflußgrößen wie Korngrößenverteilung, Wassersättigung des Bodens und Manteltemperatur des Heizelements. Um direkt vergleichbare Daten zu erhalten, war es notwendig, alle Experimente in gleicher Weise vorzubereiten, aufzubauen und durchzuführen. Um den Einfluß verschiedener Parameter eindeutig zu erfassen, wurde von Experiment zu Experiment jeweils nur eine Größe verändert, während die anderen konstant gehalten wurden, so daß die ablaufenden Prozesse getrennt erfaßt und eine unnötig hohe Anzahl an Experimenten vermieden werden konnte. Im folgenden wird daher kurz auf die Einflußgrößen und die Berücksichtigung in den Experimenten eingegangen.

#### 2.2.1 Permeabilität

Um den Einfluß der Permeabilität auf die physikalischen Prozesse zu untersuchen, wurden als Säulenfüllungen zwei Sande mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen, die in Abb. 2.2 dargestellt sind, eingesetzt. Der Permeabilitätsunterschied zwischen dem Grobsand und dem Feinsand bewegte sich dabei in der Größenordnung 100. Um hinsichtlich der späteren Untersuchungen zum Schadstofftransport eventuelle Adsorptionseffekte zu minimieren, wurden für alle Untersuchungen gewaschene Quarzsande ohne organische Bestandteile eingesetzt.

## 2 Laborexperimente

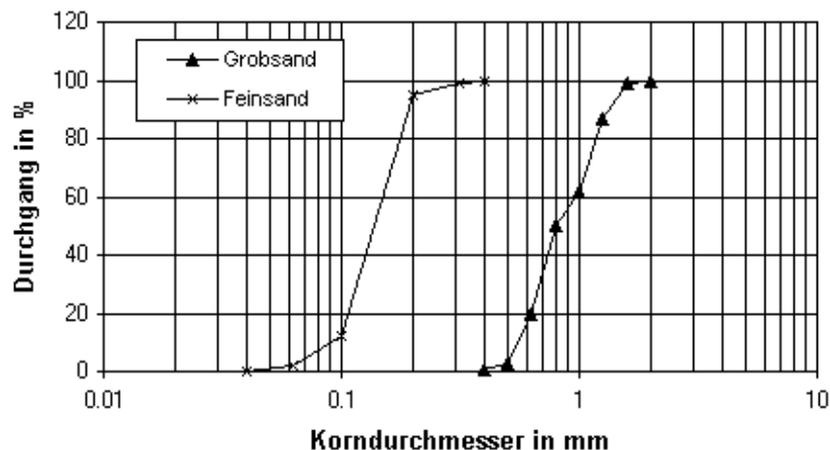


Abb. 2.2: Korngrößenverteilung der eingesetzten Sande

### 2.2.2 Wassersättigung

Zur Ermittlung des Einflusses der Wasserprimärsättigung auf den Wärmetransport wurden Versuche mit zwei unterschiedlichen Anfangswassergehalten durchgeführt. Gewählt wurde zum einen trockener Sand mit einer Sättigung von 0% und zum anderen eine Primärsättigung im Bereich der Residualsättigung des jeweiligen Sandes. Die Sättigung von 0% wurde durch eine Ofentrocknung bei 105°C über einen Zeitraum von mindestens zwei Tagen erzielt. Die Primärsättigung des untersuchten Bodens wurde für den Grobsand als Residualsättigung durch mehrmaliges Überstauen und Drainieren eingestellt. Im Gegensatz dazu war die Erzielung einer Residualsättigung des Feinsandes aufgrund seiner großen kapillaren Saughöhe nicht mit diesem Verfahren möglich, da ansonsten eine vollständige Sättigung des Porenraums vorliegen würde. Daher mußte eine Teilsättigung des Sandes als Primärsättigung über die Injektion von Sattdampf eingestellt werden. Über die Verdampfungsenthalpie und die Masse des zu erwärmenden Sandes konnte dann die Sättigung berechnet werden. Damit ergibt sich eine Anfangssättigung des Bodens in der Versuchssäule zu ca. 8 % beim Grobsand und ca. 16% beim Feinsand.

### 2.2.3 Manteltemperatur des Heizelements

Der Eintrag thermischer Energie wurde durch ein am Kopf der Säule befestigtes Heizelement erzielt. Als Heizelement dienten zylindrische Hochleistungs-Rohrpatronen mit einer Leistung von 500 W, einem Außendurchmesser von 4 mm, einer beheizten Länge von 900 mm und einem am Blindende eingebauten hochtemperaturbeständigem Thermoelement (Ni-CrNi). Die Beheizung erfolgt über einen Heizleiter aus hochhitzebeständigem NiCr, zur Isolierung und Wärmeleitung von dem eigentlichen Heizleiter bis zum Mantel wird Magnesiumoxid verwendet, so daß ein nahezu verlustfreier Wärmetransport gewährleistet wird. Der Mantel der Rohrpatrone ist aus Edelstahl gefertigt.

Um eine möglichst gleichmäßige Erwärmung des oberen Säulenendes zu erreichen, wurden die Rohrpatronen in genau vorgegebener Weise gebogen (s. Abb. 2.3), so daß der Energieeintrag ähnlich einer beheizten Platte eben und gleichmäßig über den gesamten Querschnitt erfolgt. Der Durchmesser des gebogenen Heizelements betrug insgesamt 90 mm, die einzelnen Windungen hatten dabei einen Abstand von 6 mm zueinander.



Abb. 2.3: Hochleistungs-Rohrpatronen als Heizelemente für eindimensionale Säulenversuche

Da die Manteltemperatur während der Experimente so konstant wie möglich auf dem gewünschten Niveau gehalten werden mußte, wurde das Heizelement über einen PID-Regler betrieben. Als Eingangs- und damit Regelsignal wurde die am Thermoelement detektierte Temperatur verwendet, die Solltemperatur war die gewünschte Manteltemperatur. Bis auf die Zeit, die zum Anheizen des Heizelements auf die gewünschte Versuchstemperatur notwendig war und die sich im Rahmen von 5 Minuten bewegte, konnte so die Temperatur über die gesamte Versuchsdauer in einem Bereich von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  konstant gehalten werden.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Um schrittweise den Einfluß der verschiedenen Parameter auf den Prozeß der Wärmeausbreitung erfassen zu können, wurde zu Beginn der Untersuchungen eine einfache Grundkonfiguration gewählt, darauf aufbauend konnten nach und nach alle Größen gezielt variiert werden. Die wichtigsten Ergebnisse sind im folgenden dargestellt.

### 3.1 Ofengetrockneter Sand

Bei diesem Versuchsaufbau bestand die Säulenfüllung aus ofengetrocknetem Grobsand, die Temperatur des Heizelements wurde während des gesamten Versuches konstant auf 300°C gehalten. Die Wärmeausbreitung in der Säule erfolgte alleine durch Wärmeleitung, da keine Säulendurchströmung durch das Anlegen eines Unterdrucks am Säulenfuß betrieben wurde. Die Temperaturen in der Säule sind in Abhängigkeit der Versuchsdauer in Abb. 3.1 dargestellt.

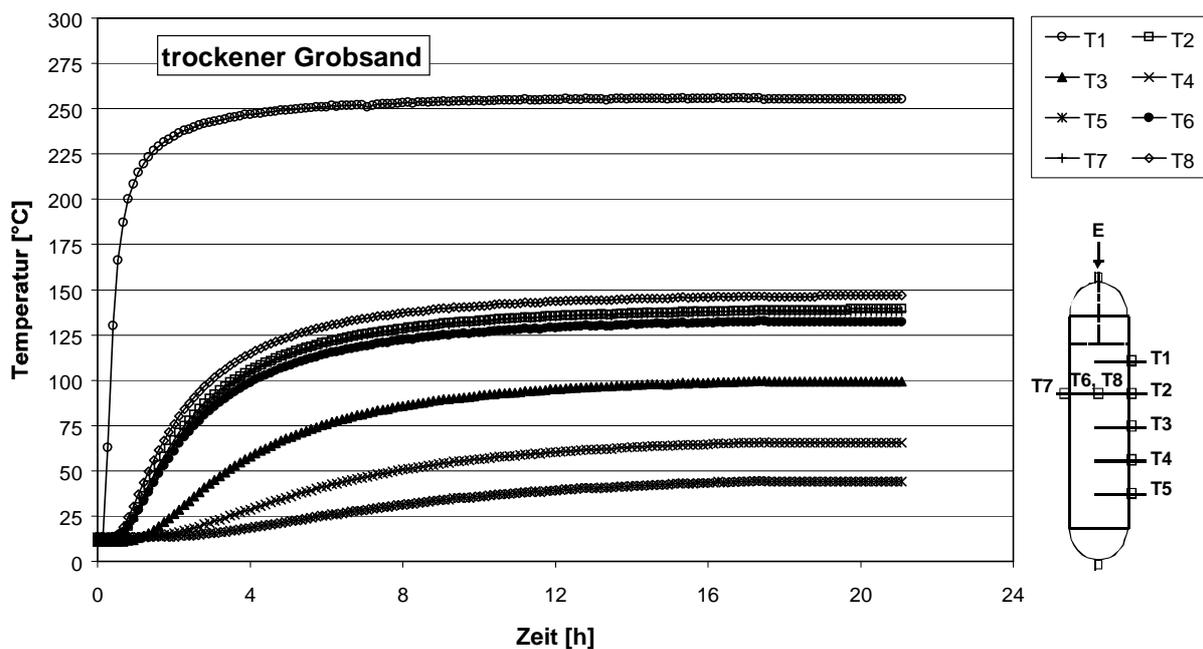


Abb. 3.1: Temperaturverteilung für trockenen Grobsand,  $T_{HE} = 300^{\circ}C$

Zu Versuchsbeginn ist die Temperatur in der Versuchssäule konstant, es liegt überall Raumtemperatur vor. Wird das Heizelement auf die gewünschte Temperatur erhitzt, so stellt sich ein Temperaturgradient  $\Delta T = T_{HE} - T_{Raum}$  vom Heizelement zur Umgebung ein, so daß nach dem ersten Gesetz von Fourier ( $q = -\lambda \partial T / \partial x$ ) ein Wärmestrom von der höheren Temperatur, hier vom Heizelement, zum Bereich der niedrigeren Temperatur, also dem angrenzenden Boden stattfindet und so eine Erwärmung bewirkt. Daher steigen die Bodentemperaturen nahe des Heizelements, hier

### 3 Ergebnisse und Diskussion

durch den Temperaturfühler T1 beispielhaft gemessen, sehr schnell und sehr stark an. Je größer die Entfernung vom Heizelement ist, desto später zeigt der Energieeintrag am Säulenkopf Wirkung und desto langsamer und geringer ist die Erhöhung der Bodentemperaturen. Die zeitliche Verzögerung der Erwärmung ist in der Art des Wärmetransports begründet, da bei Betrachtung der Schicht n erst die benachbarte, näher zum Heizelement liegende Bodenschicht (n-1) erwärmt werden muß, um so einen Temperaturgradienten für die Schicht n zu erzeugen. Gleichzeitig findet aber in der Schicht (n-1) auch ein Wärmeabstrom über die Säulenberandung und damit ein Energieverlust statt, so daß mit größer werdender Entfernung vom Heizelement immer weniger Energie zur Erwärmung zur Verfügung steht. Zusätzlich kann beobachtet werden, daß für jede durch einen Temperaturfühler repräsentierte Ebene die Temperatur zu Beginn stark ansteigt, während mit zunehmender Versuchsdauer die Temperaturerhöhung immer geringer wird und schließlich einem asymptotischen Endwert zustrebt, der durch das Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr und Wärmeverluste hauptsächlich über die Säulenberandung charakterisiert wird.

Zum Vergleich sind in Abb. 3.2 die Temperaturverläufe dargestellt, wie sie bei einem analog durchgeführten Experiment gemessen wurden, wobei die Säulenfüllung dieses Mal aus trockenem Feinsand bestand. Die Manteltemperatur des Heizelements betrug wieder 300°C.

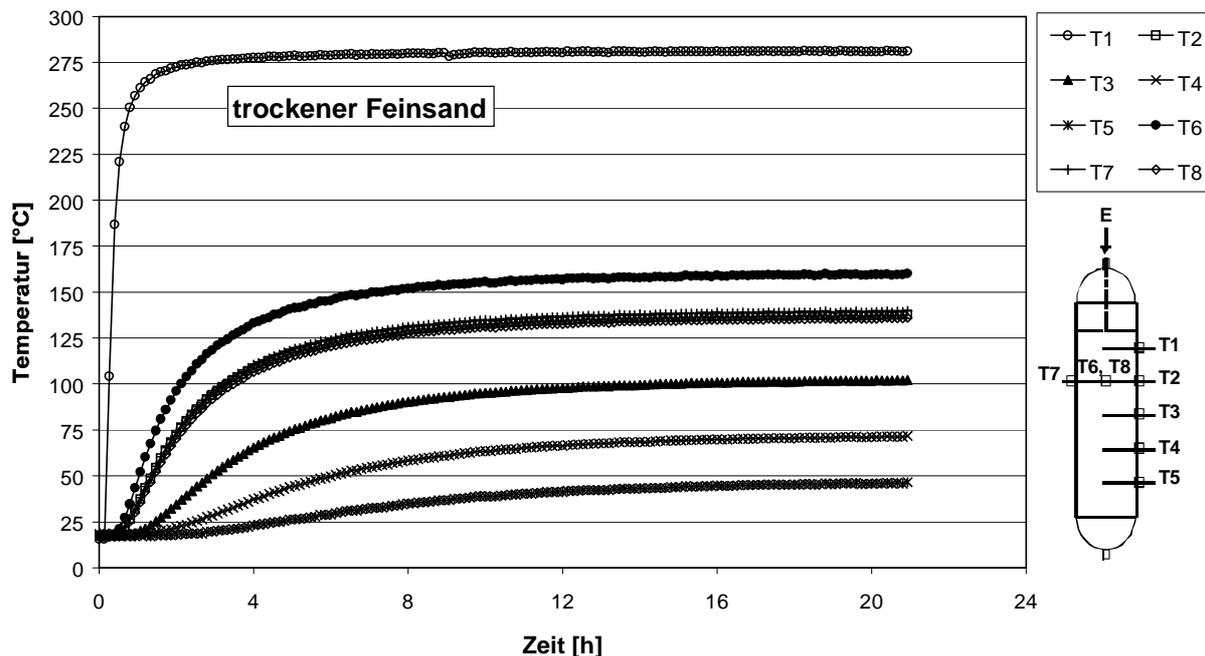


Abb. 3.2: Temperaturverteilung für trockenen Feinsand,  $T_{HE} = 300^{\circ}\text{C}$

Wie schon für Grobsand beobachtet, erfolgt auch für Feinsand der Temperaturanstieg sukzessive mit der Entfernung vom Heizelement und ist am stärksten ausgeprägt für die am nächsten zum Heizelement liegenden Meßebe. Die zu Versuchsende beobachteten Maximalwerte der Temperaturen aller Meßebenen liegen beim Feinsand höher als beim Grobsand. Dieses Verhalten wird

### 3 Ergebnisse und Diskussion

durch eine größere Kontaktfläche der kleineren Körner des Feinsandes bedingt. Unter der Annahme, daß der Wärmetransport nur über die Kontaktstellen der Sandkörner erfolgt und die Wärmeleitung über die im Porenraum vorhandene Luft vernachlässigbar ist, ist dann für den Feinsand die für den Wärmetransport zur Verfügung stehende Fläche größer als beim Grobsand.

#### 3.2 Primärgesättigter Sand

Nachdem die Prinzipien der Wärmeausbreitung in trockenem Sand experimentell erfaßt worden waren, war es notwendig, den Einfluß der Wassersättigung auf den Vorgang der Wärmeausbreitung zu untersuchen. Dazu wurde sowohl der verwendete Grob- als auch Feinsand nach dem Einbau in die Versuchssäule primär gesättigt und dann wiederum über ein Heizelement erhitzt.

Das Versuchsergebnis für residualgesättigten Grobsand ist in Abb. 3.3 dargestellt. Im Gegensatz zu trockenem Grobsand findet kein kontinuierlicher Anstieg der Temperaturen einer Meßebene statt, sondern es bildet sich zunächst ein Temperaturplateau in einem Bereich unterhalb des Siedepunkts von Wasser aus. Dieses Verhalten wird durch das Vorhandensein von Wasser im Porenraum verursacht, da die durch das Heizelement zugeführte Energie nicht mehr alleine der Erwärmung eines bestimmten Bodenvolumens alleine zur Verfügung steht, sondern zusätzlich auch das Wasser verdampft werden muß. Erst wenn der Sand vollständig getrocknet ist, kann ein weiterer Temperaturanstieg erfolgen, dann sind Temperaturen weit über dem Siedepunkt von Wasser möglich.

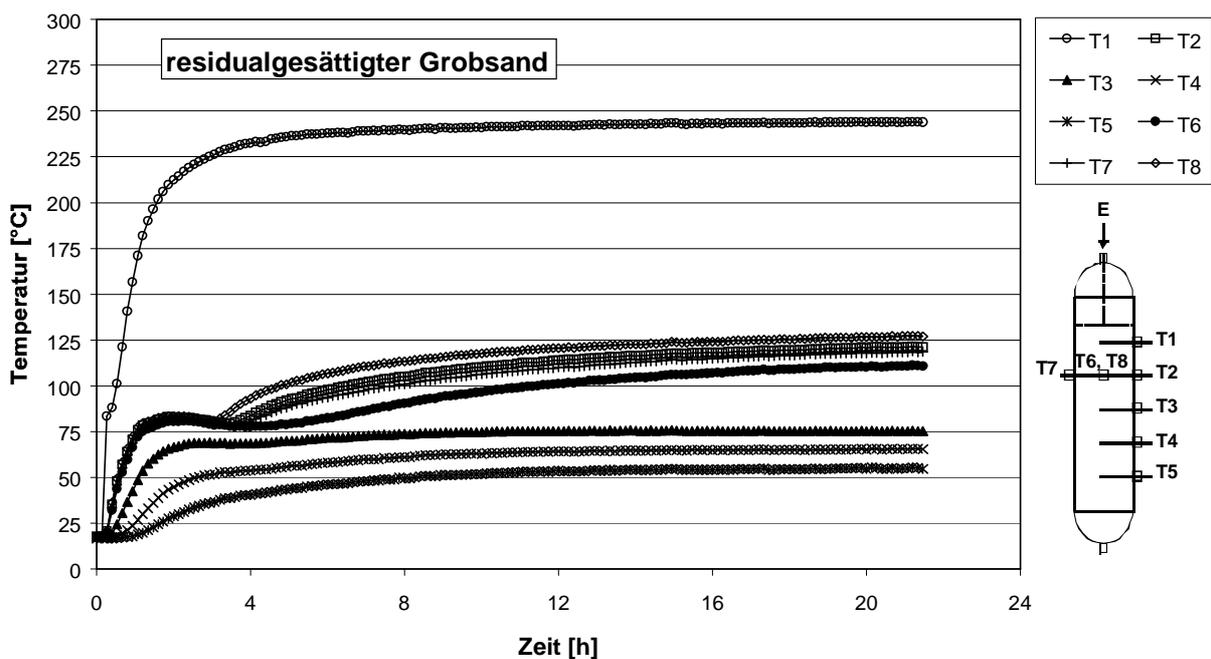


Abb. 3.3: Temperaturverteilung für wasserresidualgesättigten Grobsand,  $T_{HE} = 300^{\circ}C$

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Der Erwärmungsvorgang des mit Wasser teilgesättigten Sandes teilt sich in zwei Phasen. In der ersten Phase, bei der noch die Poren des gesamten porösen Mediums Wasser enthalten, erfolgt der Wärmetransport primär über Wärmeleitung in der zusammenhängenden Wasserphase, da die Wärme schneller und effektiver als das Korngerüst selbst weiterleitet (Wärmeleitfähigkeit von Wasser bzw. trockenem Sand:  $\lambda_w = 0,607 \text{ W/mK}$  und  $\lambda_s = 0,35 \text{ W/mK}$ ). Die eingetragene Energie wird schnell und effektiv über einen großen Wärmestrom vom Heizelement in Richtung unterer Säulenbereich transportiert, wo ebenfalls ein rascher Temperaturanstieg stattfindet. Durch diesen Energieeintrag und die daraus resultierenden hohen Temperaturen nahe des Heizelements wird gleichzeitig aber das Wasser solange verdampft, bis der Sand im oberen Bereich der Säule vollkommen trocken ist. Hier beginnt dann die zweite Phase des Wärmetransports. Da nun im Bereich nahe des Heizelements Wasser nicht länger als „Hauptleiter“ dem Wärmetransport zur Verfügung steht, kann die Wärmeausbreitung nur über die Körner des Korngerüsts erfolgen. Infolge ihrer geringeren Wärmeleitfähigkeit ist dann jedoch nur noch einen geringeren Wärmestrom möglich, so daß die Aufwärmung des unteren, immer noch mit Wasser teilgesättigten Säulenbereichs durch den oberen Säulenbereich limitiert wird. Die Säule teilt sich daher in zwei Bereiche: der obere, jetzt getrocknete Teil der Säule zeigt ein Erwärmungsverhalten ähnlich des schon zu Beginn trockenen Grobsandes (s. erstes Experiment), während der untere, wasserhaltige Säulenbereich noch stark durch das Vorkommen von Wasser beeinflusst wird.

Dasselbe Experiment wurde auch mit wasserprimärgesättigtem Feinsand durchgeführt (s. Abb. 3.4).

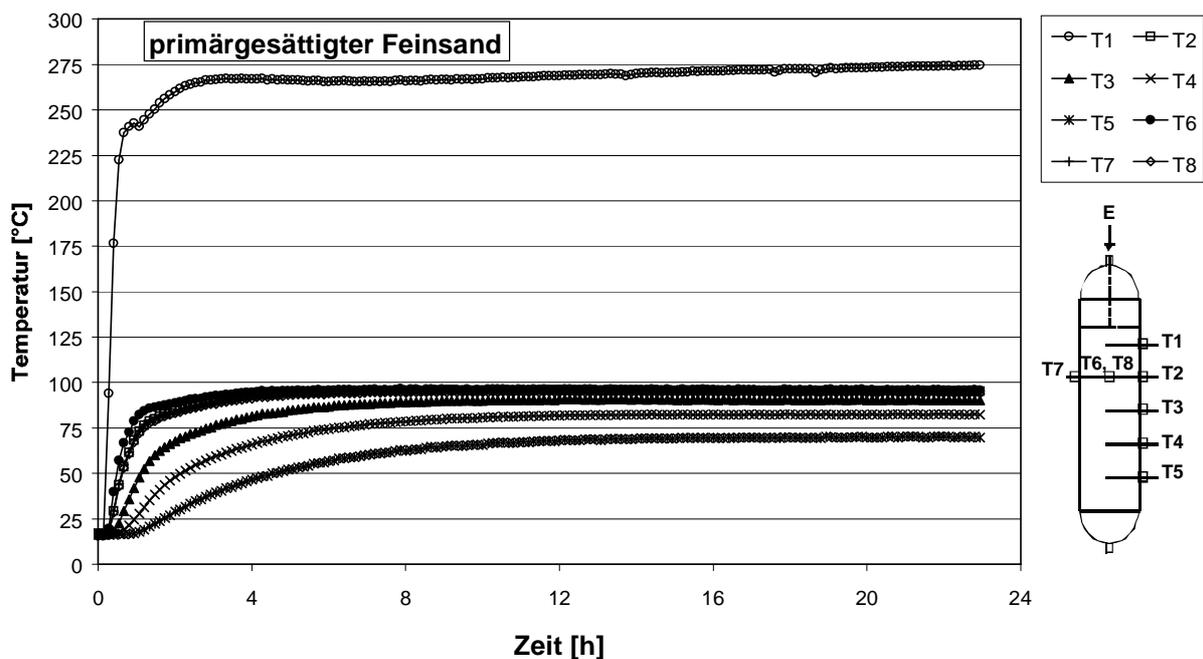


Abb. 3.4: Temperaturverteilung für primärgesättigten Feinsand,  $T_{HE} = 300^\circ\text{C}$

Auch hier zeigt sich, daß sich der Feinsand bezüglich der Wärmeausbreitung ähnlich wie Grobsand verhält. Auch bei Feinsand stellt sich ein Temperaturplateau ein, das jedoch aufgrund des höheren Wassergehaltes, der aber immer noch unterhalb der Residualsättigung liegt, viel ausgeprägter als bei Grobsand ist. Zudem macht sich der Effekt der zusätzlichen Wärmeleitung durch das Porenwasser deutlicher bemerkbar, so daß im Vergleich zu trockenem Feinsand im unteren Säulenbereich (T3 bis T5) ein gleichmäßigeres Temperaturprofil auftritt.

Auffällig ist auch, daß mit Ausnahme der obersten Meßebe T1 für keine Meßebe Temperaturen über 100°C erreicht wurden. In einem Langzeitversuch mit denselben Anfangsbedingungen konnte jedoch festgestellt werden, daß für den hier dargestellten Versuch das Temperaturplateau noch nicht verlassen war und so noch eine gewisse Wassersättigung im Porenraum vorherrschte. Daher war es bis zum Zeitpunkt des Versuchsendes nicht möglich, eine Erwärmung des Sandes oberhalb des Siedepunktes zu erzielen.

#### 3.3 Variation der Manteltemperatur des Heizelements

Von großem Interesse ist auch der Einfluß der Heizelementtemperatur auf die Temperaturverteilung im porösen Medium. Daher wurden zusätzlich Untersuchungen durchgeführt, bei denen für denselben Versuchsaufbau die Experimente mit unterschiedlichen Manteltemperaturen durchgeführt wurden. Abb. 3.5 und 3.6 stellen die Entwicklung der Temperaturen in einer mit trockenem Grobsand gefüllten Säule für eine Heizelementtemperatur von 100°C bzw. 200°C dar.

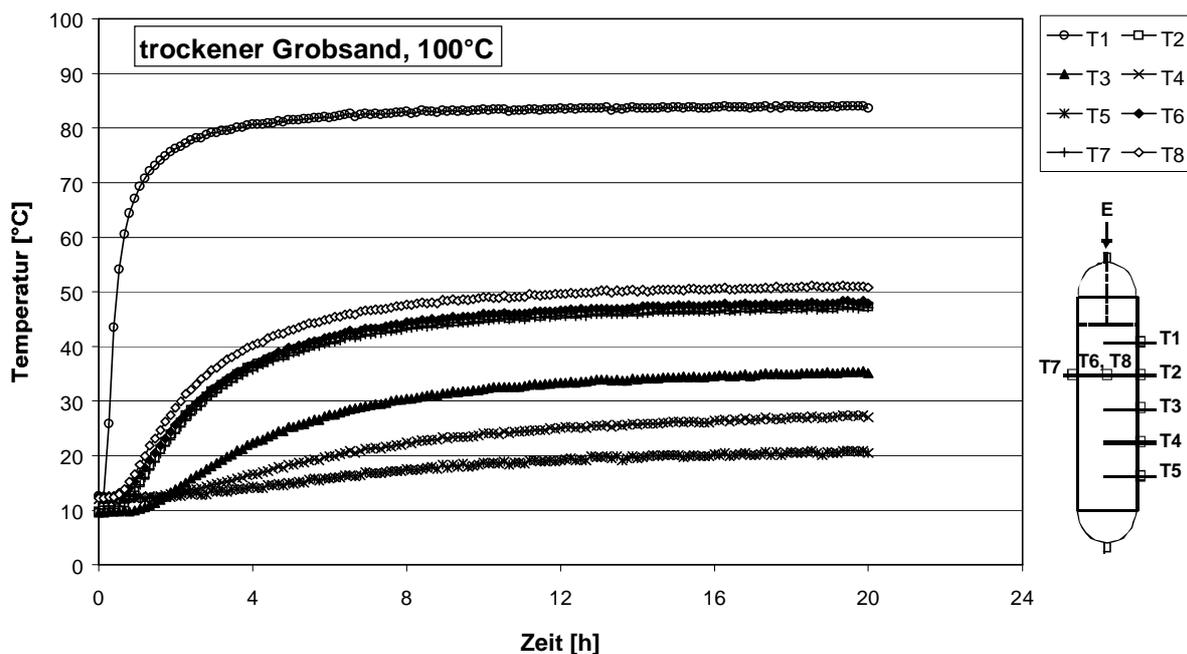


Abb. 3.5: Temperaturverteilung für trockenen Grobsand,  $T_{HE} = 100^\circ\text{C}$

### 3 Ergebnisse und Diskussion

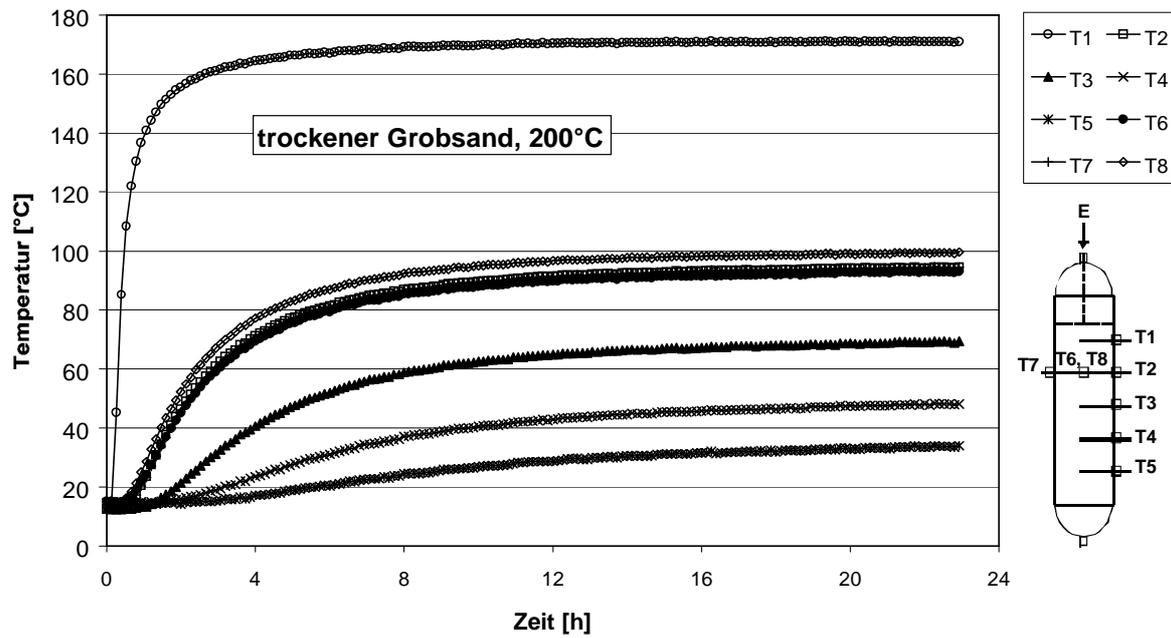


Abb. 3.6: Temperaturverteilung für trockenen Grobsand,  $T_{HE} = 200^{\circ}\text{C}$

Deutlich erkennbar ist, daß sowohl die Charakteristik der Wärmeausbreitung als auch die Zeitspanne, bis näherungsweise ein stationärer Zustand erreicht wird, sich von der Manteltemperatur unabhängig verhält.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In ersten experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab wurde die Wärmeausbreitung in einem porösen Medium in Abhängigkeit der Permeabilität und der Wassersättigung, für den Einsatz von festen Wärmequellen bei Temperaturen bis 300°C untersucht. Anhand der gemessenen Temperaturverläufe zeigt sich, daß nahe des Heizelements Temperaturen weit über dem Siedepunkt von Wasser erreicht werden. Mit zunehmender Entfernung vom Heizelement wird die erreichbare Temperaturerhöhung bezogen auf die natürliche Bodentemperatur immer niedriger, da durch Wärmeverluste über die Ränder sich nach einer gewissen Zeit ein stationärer Zustand einstellte. Es konnte außerdem gezeigt werden, daß der Bodenfeuchtegehalt einen großen Einfluß auf den Wärmetransport und auf die Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung hat. Da Wasser eine hohe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu trockenem Sand besitzt, wird in Bodenbereichen, in denen sich noch Wasser befindet, die Wärme schneller weitertransportiert, was insgesamt zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung führt.

Im Rahmen dieses Projekts sollen durch weitere Experimente der Einfluß der Veränderung der Manteltemperatur des Heizelements während des Aufheizvorganges oder der Absaugrate der Bodenluft hinsichtlich der Wärmeausbreitung und der Aufwärmung untersucht werden. Im Hinblick auf den starken Einfluß des Wassergehaltes auf die Wärmeausbreitung soll auch eine Kombination zweier thermischer In-situ-Sanierungsverfahren betrachtet werden: der gleichzeitige oder sukzessive Einsatz von festen Wärmequellen und die Injektion von Sattedampf, durch die Wasser in Form von Dampf in den Boden injiziert wird und so keine Wärmeausbreitung alleine aufgrund reiner Wärmeleitung, sondern auch ein konvektiver Transport infolge des Durchströmungsvorganges von Dampf durch das poröse Medium stattfinden wird.

Ein weiterer zukünftiger Forschungsschwerpunkt liegt in der Untersuchung des Schadstoffaustrags in homogenen Bodenstrukturen unter Verwendung fester Wärmequellen in Abhängigkeit der hier erörterten Parameter. Dabei werden anhand ein- und zweidimensionaler Untersuchungen nicht nur die Prinzipien des Schadstofftransports erforscht, sondern auch Aussagen über die Sanierungseffizienz von Kontaminationen mit nichtwasserlöslichen Fluiden (NAPL) gemacht. Begleitende numerische Modellrechnungen helfen bei der Interpretation der Ergebnisse und vertiefen dadurch weiter das Prozeßverständnis.

#### Literaturhinweise

Betz, C. (1998): Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie, Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 97, ISBN 3-921694-97-3.

Betz, C., Färber, A., Kaleris, V., Kobus, H., Koschitzky, H.-P., Schmidt, R. (1998): In-situ-Sanier-

## Literaturhinweise

ung verunreinigter Böden durch Injektion von Wasserdampf/Luft-Gemischen, Diskussionskreise "Wasser, Abfall, Boden" (PWAB) beim Statusseminar 1998, internet: <http://bwplus.fzk.de>

Färber, A. (1997): Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie, Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 96, ISBN 3-921694-96-5.

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>