

# Geoelektrisches Monitoring einer thermischen *in situ*- Grundwasser- und Bodensanierung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

**Markus Hirsch, M.Sc.**

aus Mainz

Gutachter:

Herr Prof. Dr. Rudolf Liedl  
Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

Herr Prof. Dr. Peter Werner  
Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

Herr Prof. Dr. Holger Weiß  
Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geowissenschaftliche Fakultät

Tag der mündlichen Prüfung: 07.04.2009

Dresden 2009

## **Erklärung des Promovenden**

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Goelektrisches Monitoring einer thermischen *in situ*-Grundwasser- und Bodensanierung“

wird hiermit bestätigt.

Markus Hirsch

Dresden, 24.09.2009

## Danksagung

Viele Mitarbeiter des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Kollegen und Freunde haben zum Entstehen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Holger Weiß und Dr. Peter Dietrich bedanken, die es mir ermöglicht haben, diese Arbeit am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung anzufertigen. Vor allem Herrn Prof. Dr. Holger Weiß danke ich dafür, dass er mir jegliche Unterstützung zukommen ließ, die zu einem erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit führte.

Herrn Prof. Dr. Rudolf Liedl sowie Herrn Prof. Dr. Peter Werner gilt besonderer Dank für ihre Bereitschaft, als Gutachter zu fungieren und für die Möglichkeit, an der Technischen Universität Dresden zu promovieren.

Ralf Trabitersch danke ich dafür, dass er für jedes entstehende Problem immer eine zielführende Lösung parat hatte.

Dr. Carsten Leven-Pfister möchte ich herzlich danken, da er immer ein offenes Ohr hatte und mir stets mit guten Ratschlägen zur Seite stand.

Den Kollegen von VEGAS der Universität Stuttgart möchte ich danken für die gute Zusammenarbeit. Vor allem Oliver Trötschler gilt hier ein besonderes Dankeschön, da er mit weit überdurchschnittlichem Einsatz den nicht immer einfachen Bedingungen am Standort trotzte und hervorragende Arbeit leistete.

Den Kollegen des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien gilt besonderer Dank für die Verwendung ihrer Sondier- und Messgeräte sowie die spontane Bereitschaft zur Durchführung von Geländearbeiten.

Kai Müller gilt besonderer Dank für die enge Zusammenarbeit und den regen Austausch von Ideen und Konzepten zur Sanierungsproblematik am Standort Zeitz.

Weiterhin möchte ich folgenden Personen für ihren Beitrag zum Erfolg dieses Projektes danken: Adrian Flores-Orozco, Anne Gaffron, Dr. Ulrike Werban, Herrn Prof. Dr. Laurence Bentley, Oliver Thiel, Werner Kletzander, Rosemarie Steudel, Dr. Birgit Daus, Daniel Drößler, Eyk Hasselwander und Gunnar Laudel.

Abschließend möchte ich mich bei all denen bedanken, die im Hintergrund geholfen haben, diese Arbeit erfolgreich beenden zu können.

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>1</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>1. KURZFASSUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>2. VERANLASSUNG UND AUSGANGSLAGE DER SANIERUNG</b> .....	<b>10</b>
GEOLOGISCHER AUFBAU DER REGION ZEITZ .....	13
HYDROGEOLOGISCHER AUFBAU DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES .....	15
<b>3. STANDORT EHEMALIGES HYDRIERWERK ZEITZ</b> .....	<b>17</b>
HISTORISCHE ENTWICKLUNG .....	22
KONTAMINATIONSVERHÄLTNISSE UND -URSACHEN AM STANDORT .....	25
<b>4. AUSWAHL DES SANIERUNGSSTANDORTES AUF GRUNDLAGE VON HYDROGEOLOGISCHEN UND GEOPHYSIKALISCHEN ERKUNDUNGEN</b> .....	<b>30</b>
STRUKTURMODELL UND GEOPHYSIKALISCHE ERKUNDUNG .....	30
OBERFLÄCHENGEOELEKTRISCHE ERKUNDUNG .....	36
GRUNDWASSERBEPROBUNG .....	39
BODENLUFTBEPROBUNG .....	44
FESTSTOFFBEPROBUNG .....	47
STANDORTAUSWAHL IN ABHÄNGIGKEIT DER KONTAMINATIONSVERTEILUNG .....	49
<b>5. THERMISCHE SANIERUNGSTECHNOLOGIEN</b> .....	<b>52</b>
EINFÜHRUNG .....	52
ELEKTRISCHE HEIZLANZEN .....	53
RADIOWELLEN-TECHNIK .....	53
DAMPF-LUFT-INJEKTION .....	54
THERMISCHE EX SITU-VERFAHREN .....	55
AUFBAU DER MOBILEN THERMISCHEN IN SITU-SANIERUNGSANLAGE IN MODULARER BAUWEISE (MOSAM) .....	56
FUNKTIONSWEISE DER MOBILEN THERMISCHEN IN SITU-SANIERUNGSANLAGE IN MODULARER BAUWEISE (MOSAM) .....	60
<b>6. EINFÜHRUNG IN DIE ANGEWENDETEN MESSVERFAHREN</b> .....	<b>63</b>
GRUNDLAGEN GLEICHSTROMGEOELEKTRISCHER MESSUNGEN .....	63
PETROPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN .....	65
GEOELEKTRISCHES MONITORING MIT AN DER ERDOBERFLÄCHE INSTALLIERTEN ELEKTRODEN .....	69
<i>Schlumberger-Konfiguration:</i> .....	70
<i>Wenner-Konfiguration:</i> .....	71
<i>Dipol-Dipol-Konfiguration:</i> .....	71
<b>7. GLEICHSTROMGEOELEKTRISCHES MONITORING DER THERMISCHEN SANIERUNG</b> .....	<b>73</b>
EINLEITUNG .....	73

VORVERSUCH AM TESTSTANDORT LEIPZIG .....	74
LEITFÄHIGKEITSPROFILE.....	79
BOHRLOCHELEKTRODEN .....	81
MONITORING .....	90
<b>8. ELEKTRODENGOMETRIEN AM SANIERUNGSSTANDORT ZEITZ.....</b>	<b>96</b>
<b>9. TEMPERATURMONITORING MIT FEST INSTALLIERTEN MESSFÜHLERN .</b>	<b>102</b>
<b>10. GLEICHSTROMGEOELEKTRISCHES MONITORING DER THERMISCHEN SANIERUNG AM STANDORT INDUSTRIEPARK ZEITZ .....</b>	<b>110</b>
DATENAUSWERTUNG .....	114
ERGEBNISSE 3D-MONITORING .....	117
ERGEBNISSE 2D-MONITORING .....	123
ERGEBNISSE BOHRLOCHGEOELEKTRIK OHNE INVERSION .....	126
<b>11. TEMPERATURMESSUNGEN AUßERHALB DES SANIERUNGSBEREICHES .....</b>	<b>132</b>
2-D DARSTELLUNG DER TEMPERATURAUSBREITUNG AUßERHALB DES SANIERUNGSFELDES .....	135
ENERGIEBILANZIERUNG.....	147
3-D DARSTELLUNG DER TEMPERATURAUSBREITUNG AUßERHALB DES SANIERUNGSFELDES .....	149
<b>12. SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN IM UMFELD DES SANIERUNGSBEREICHES .....</b>	<b>152</b>
<b>13. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>157</b>
<b>14. LITERATUR .....</b>	<b>160</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan Hydrierwerk Zeitz .....	10
Abbildung 2: Geologisches Normalprofil.....	16
Abbildung 3: Lageplan Alt- und Neuwerk .....	17
Abbildung 4: Betriebsanlagen und Gebäude .....	20
Abbildung 5: Anlagen zur Benzolproduktion .....	21
Abbildung 6: Teilbereich des Hydrierwerks Zeitz nach Luftangriffen des Zweiten Weltkrieges.....	23
Abbildung 7: Betriebseinheiten ehemalige Benzolproduktion .....	28
Abbildung 8: EC-Logging mit fahrzeug- und kettenbasiertem Sondiergerät .....	31
Abbildung 9: Leitfähigkeitssonde mit Strom- und Potentialelektroden (Wenner-Konfiguration) .....	31
Abbildung 10: Elektrische Leitfähigkeitsbereiche für verschiedene Bodenmaterialien .....	33
Abbildung 11: EC-Log (Leitfähigkeitsänderung gegen Teufe) .....	33
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen spezifischer elektrischer Leitfähigkeit und hydrogeologischen Parametern (nach Chouker, 1970) .....	34
Abbildung 13: Profillinien der gleichstromgeoelektrischen Oberflächenmessungen (Luftbild der Benzolanlage vor Rückbau).....	36
Abbildung 14: Mess- und Inversionsergebnisse ausgewählter Messungen mit Oberflächenelektroden .....	38
Abbildung 15: Edelstahl- sowie PVC-Filter zur Grundwasserbeprobung mit Schutzgestänge (links), aus dem Sondiergestänge herausgedrückter Filter mit „verlorener“ Sondierspitze (rechts) .....	40
Abbildung 16: Aufbau und Funktionsweise des SP16-Grundwasserprobennehmers .....	41
Abbildung 17: BTEX-Analytik der tiefenhorizontierten Grundwasserbeprobung.....	43
Abbildung 18: Aufbau und Funktionsweise einer Sondierspitze zur Bodenluftbeprobung .....	45
Abbildung 19: Bodenluftanalytik im Bereich der ehemaligen Benzolanlage .....	46
Abbildung 20: Bodenanalytik von Feststoffproben im Bereich der ehemaligen Benzolanlage.....	48
Abbildung 21: Auswahl von Eignungsbereichen für thermische Sanierungsverfahren .....	51
Abbildung 22: Mobile thermische in situ-Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM).....	57
Abbildung 23: Lageplan thermische Sanierungsanlage mit Geländeinstallationen...	58
Abbildung 24: PT100-Temperaturmessfühler .....	59
Abbildung 25: Dampfdrücke verschiedener Schadstoffe in Abhängigkeit ihrer Temperatur .....	60
Abbildung 26: Elektrodengeometrie einer Wenner-Konfiguration .....	64
Abbildung 27: Auswirkungen von Temperaturänderungen auf den spezifischen elektrischen Widerstand (1 – nach Arps (1953), 2 - nach Dachnov (1962), 3 - nach Sen & Goode (1992)).....	66
Abbildung 28: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes .....	68
Abbildung 29: Geometrien der Schlumberger- (oben) , Wenner- (Mitte) und Dipol-Dipol- (unten) Elektrodenkonfigurationen .....	70
Abbildung 30: Bohrprofil einer Grundwassermessstelle im Bereich des Testfeldes .	75

Abbildung 31: Lageplan der Sanierungs- und Messtechnik auf dem Testfeld Leipzig .....	76
Abbildung 32: Oberflächenmessungen mit Dipol-Dipol-Konfiguration (oben), Schlumberger-Konfiguration (Mitte) und Wenner-Konfiguration (unten).....	79
Abbildung 33: Geometrie der Bohrlochelektroden am Testfeld Leipzig .....	83
Abbildung 34: Ergebnisse von Messungen an Bohrlochelektroden mit Wenner-Konfiguration .....	85
Abbildung 35: Ergebnisse von Messungen an Bohrlochelektroden mit Pol-Pol-Konfiguration .....	87
Abbildung 36: Ergebnisse von Messungen an Bohrlochelektroden mit Dipol-Dipol-Konfiguration .....	88
Abbildung 37: Beispiel einer Sensitivitätsverteilung bei Messungen zwischen Bohrlochelektroden .....	89
Abbildung 38: Temperaturentwicklung im Untergrund beim Testbetrieb der thermischen Sanierungsanlage .....	91
Abbildung 39: Relative elektrische Widerstandsänderungen mit Beginn der Dampf-Luft-Injektion (roter Kreis: Dampfdurchbruch).....	92
Abbildung 40: Dampfdurchbruch entlang einer kanalartigen Druckentlastungsöffnung bis zur Erdoberfläche (Durchmesser: 12 cm).....	95
Abbildung 41: Lageplan thermische Sanierungsanlage mit Geländeinstallationen... ..	97
Abbildung 42: Elektrodenspieß für oberflächengeoelektrische Messungen .....	98
Abbildung 43: Steuerungs- und Messcomputer RESECS .....	99
Abbildung 44: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Dampf-Luft-Injektion in ungesättigte Zone .....	104
Abbildung 45: Temperaturentwicklung im Verlauf der thermischen Sanierung am Standort Zeitz .....	105
Abbildung 46: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Dampf-Luft-Injektion in gesättigte Zone .....	106
Abbildung 47: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Dampf-Luft-Injektion in gesättigte und ungesättigte Zone .....	107
Abbildung 48: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Abkühlungsphase gegen Ende der Sanierung .....	109
Abbildung 49: 3-dimensionale Monitoringmessung zu Beginn der aktiven Sanierung .....	119
Abbildung 50: 3-dimensionale Monitoringmessung in der Hauptphase der aktiven Sanierung .....	120
Abbildung 51: 3-dimensionale Monitoringmessung gegen Ende der aktiven Sanierung .....	121
Abbildung 52: Monitoringmessungen mit Wenner-Elektrodenkonfiguration .....	124
Abbildung 53: Abbildung des Ergebnisses einer 3-dimensionalen Messung (Draufsicht).....	125
Abbildung 54: Kombinationsmessungen an ausgewählten Elektrodenpaaren .....	128
Abbildung 55: Relative Änderungen der elektrischen Widerstände an ausgewählten Elektrodenpaaren (1).....	129
Abbildung 56: Relative Änderungen der elektrischen Widerstände an ausgewählten Elektrodenpaaren (2).....	130
Abbildung 57: Relative Änderungen der elektrischen Widerstände an ausgewählten Elektrodenpaaren (3).....	131
Abbildung 58: Messkette zur Temperaturmessung in Bohrlöchern und Messpegeln .....	133

Abbildung 59: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 30.05.07 .....	136
Abbildung 60: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 08.06.07 .....	137
Abbildung 61: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 22.06.07 .....	138
Abbildung 62: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 18.07.07 .....	140
Abbildung 63: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 22.08.07 .....	142
Abbildung 64: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 04.12.07 .....	144
Abbildung 65: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 14.03.08 .....	146
Abbildung 66: 3-dimensionale Darstellung der Temperatursausbreitung im Untergrund im Verlauf der thermischen Sanierung durch Temperaturmessungen außerhalb des Sanierungsbereiches .....	149
Abbildung 67: Entwicklung der BTEX-Konzentrationen im Grundwasser im direkten Umfeld des Sanierungsbereiches .....	154

## Abstract

The work presented here was carried out within a pilot scale soil- and groundwater remediation project at the former industrial area „Hydrogenation plant Zeitz”.

Beneath a former benzene production facility a large scale contamination of soil and groundwater was found. Using modern exploration technologies main spill and infiltration zones for the principal contaminant benzene as well as residual or floating phases could be identified. A variety of methods for sampling of groundwater, soil and soil-air, as well as different geophysical methods allowed for the exact localisation of the contaminant source zone and the contaminant plume emerging from the source zone. The objective of the pilot remediation was the (partial) removal of the contaminant source to prevent further supply to the contaminant plume.

The source area of this pilot remediation was limited to a cubature of about 15 x 9 x 11 meters. Benzene as the main contaminant was assessed with a share of 98%. Additionally low concentrations of toluene, ethylbenzene, as well as xylols were found.

Since the main contaminant benzene is characterised by high volatility, a thermal remediation approach for the saturated as well as unsaturated zone was conducted at the site which allowed for the extraction of about 8 t of benzene. By the help of three wells a steam-air-mixture was injected into the central section of the remediation cubature and a target temperature of 85 °C was reached. This temperature exceeds the boiling point of benzene (80.1 °C) and leads to a complete volatilisation of the contaminant. Six extraction wells surrounding the remediation cubature removed the contaminant from the subsurface and delivered it to a catalytic combustion system.

The exact localisation of the spreading steam front in the subsurface is the main problem of this remediation approach. Preferential flow paths develop due to inhomogeneities in the saturated and vadose zone of the subsurface. These structures inhibit a radial-symmetric spreading of the steam-air-mixture and, hence, prevent the remediation of large sections of the cubature. Additionally a very high loss of energy into sections outside the target area takes place.

To overcome this problem, it was one of the main objectives of this work to perform a geoelectrical monitoring of the remediation approach which allowed the localisation of the steam-air-mixture by measuring electrical resistivity distributions in the subsurface.

In addition, the development of preferential flow paths which led to energy losses of over 60% during the remediation could be explored.

As an innovative concept for this remediation method a 3-dimensional geoelectrical monitoring was conducted; a procedure that combines measurements at surface electrodes with measurements at borehole electrodes installed in the subsurface. With this method a high resolution 3-dimensional imaging could be established which displays the spreading of the steam-air-front during the remediation process. To achieve such an imaging with comparable resolution with standard temperature sensors installed in the subsurface, an unreasonable number of these sensors would have been necessary.

The development of the geoelectrical monitoring system was the only approach that allowed the observation of the treatment process as well as optimisation of the remediation system during active remediation.

Ultimately the remediation procedure could be evaluated with additional measurements outside the remediation zone and information for the enhancement of further applications could be obtained.

## 1. Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer pilotmaßstäblichen Boden- und Grundwassersanierung am Industriestandort „Hydrierwerk Zeitz“. Auf dem Gelände einer ehemaligen Benzolproduktionsanlage wurden großflächige Kontaminationen von Boden und Grundwasser festgestellt. Mittels moderner Erkundungstechnik konnten die Haupteintragsbereiche des dominierenden Schadstoffes Benzol erkundet und eingegrenzt werden. Verschiedene Arten von Grundwasser-, Boden- und Bodenluftbeprobungen sowie geophysikalische Verfahren erlaubten eine exakte Lokalisation des Schadstoffquellbereiches sowie der sich hieraus ausbildenden Schadstofffahne. Ziel der am Standort durchgeführten Pilotsanierungen war die Beseitigung der Schadstoffquelle, um eine weitere Nachlieferung in die Schadstofffahne zu unterbinden. Der Schadstoffquellbereich der hier behandelten Pilotsanierung war auf eine Kubatur von ca. 15 x 9 x 11 Kubikmeter begrenzt. Als Hauptkontaminant lag mit einem Anteil von 98% Benzol vor. Weiterhin wurden Toluol, Ethylbenzol sowie Xylol in geringen Mengen angetroffen.

Aufgrund der hochvolatilen Eigenschaften des vorliegenden Hauptkontaminanten Benzol wurde am Standort eine thermische Sanierung der gesättigten sowie ungesättigten Zone durchgeführt, die eine Extraktion von rund 8 Tonnen Benzol erzielte. Im Zentrum der Sanierungskubatur wurde mit Hilfe von drei Injektionsbrunnen ein Dampf-Luft-Gemisch injiziert und eine Zieltemperatur im ausgewiesenen Sanierungsbereich von 85 °C erreicht. Diese Temperatur übersteigt den Siedepunkt von Benzol (80,1 °C) und führt zu einem vollständigen Übergang des Schadstoffes in die Gasphase. Durch sechs das Sanierungsfeld eingrenzende Extraktionsbrunnen wurde der Schadstoff dem Untergrund entzogen und an der Oberfläche durch eine thermische Nachverbrennungsanlage geleitet.

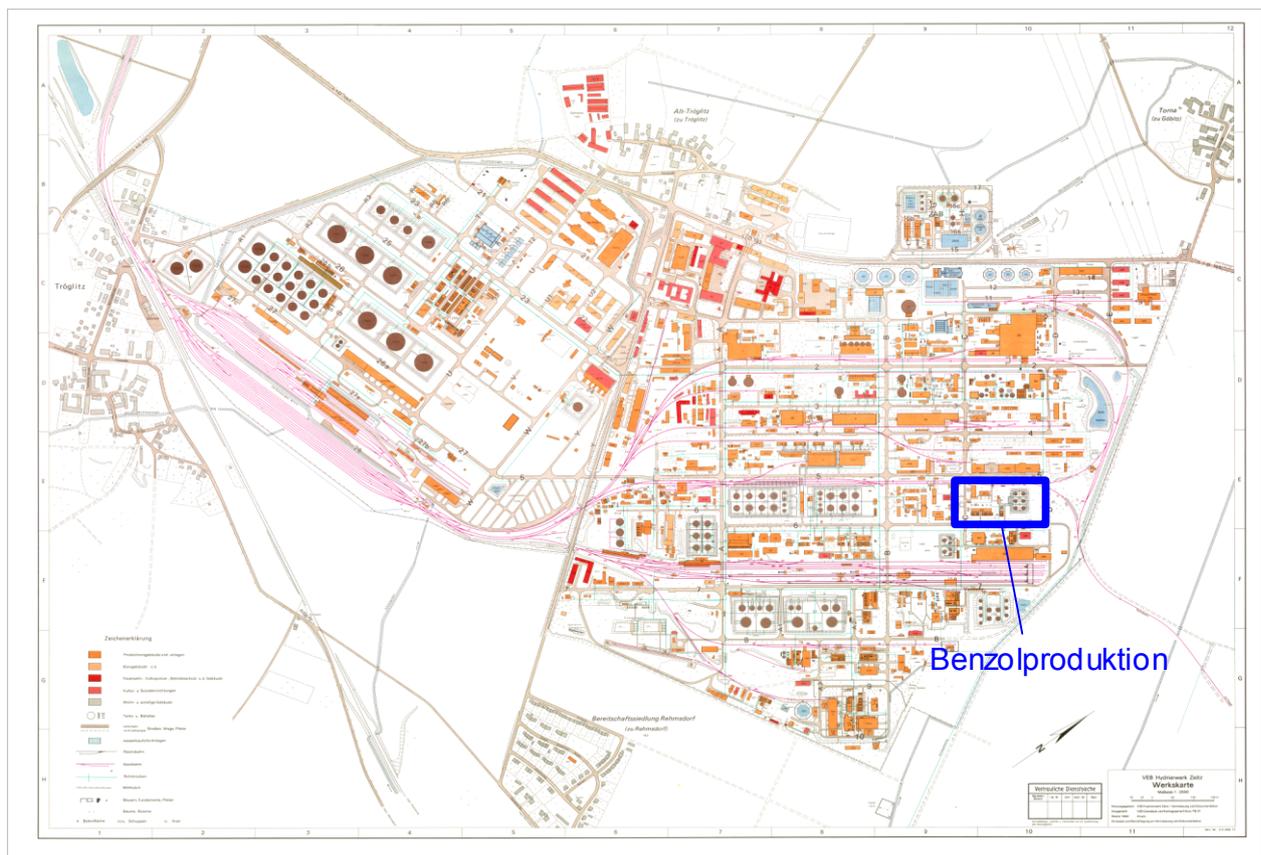
Eine Problematik dieser Sanierungstechnik ist die exakte Lokalisation der sich im Untergrund ausbreitenden Front des Sanierungsmittels. Aufgrund von Inhomogenitäten in gesättigter und ungesättigter Zone kommt es zur Ausbildung von präferentiellen Fließpfaden. Diese Strukturen verhindern eine radialsymmetrische Ausbreitung des Sanierungsmittels und sorgen dafür, dass zum Teil große Bereiche der Sanierungskubatur nicht abgereinigt werden. Weiterhin findet ein sehr großer Energieverlust durch teilweises Austreten des Dampf-Luft-Gemisches in Bereiche außerhalb der Sanierungskubatur statt.

Eines der Hauptziele dieser Arbeit war daher die Durchführung eines geoelektrischen Monitorings, das es erlaubte, durch Messung von elektrischen Widerstands-

änderungen im Untergrund Position und Lage des Sanierungsmittels zu bestimmen und solche Bereiche zu lokalisieren, die keine Abreinigung erfuhren. Weiterhin konnten durch dieses Monitoring präferentielle Fließpfade erkundet werden, die zu Energieverlusten von über 60% im Verlauf der Sanierung führten. Als innovatives Verfahren wurde am Sanierungsstandort ein 3-dimensionales geoelektrisches Monitoring durchgeführt; ein Verfahren, das Messungen an Oberflächenelektroden mit Messungen an im Untergrund eingebrachten Bohrlochelektroden verknüpft. Mit diesem Verfahren konnten hochaufgelöste 3-dimensionale Abbildungen erstellt werden, die die Ausbreitung des injizierten Sanierungsmittels im Verlauf der Sanierung abbildeten. Um eine in dieser Auflösung vergleichbare Abbildung der Temperaturbereiche im Untergrund durch Messungen mit fest installierten Temperaturmessketten zu erlangen, wäre eine unverhältnismäßig große Menge an Sensoren notwendig gewesen. Somit war die Entwicklung eines geoelektrischen Monitoringsystems die einzige Möglichkeit, den Sanierungsverlauf so zu verfolgen, dass während des Betriebes Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden konnten. Abschließend konnte das Sanierungsverfahren in Kombination mit Temperaturmessungen außerhalb des Sanierungsbereiches bewertet und Erkenntnisse für Verbesserungen bei zukünftigen Anwendungen gewonnen werden.

## 2. Veranlassung und Ausgangslage der Sanierung

Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II (**S**anierungsforschung **I**n **R**eional kontaminierten **A**quiferen) wurde die pilotmaßstäbliche thermische Sanierung einer Boden- und Grundwasserkontamination im ehemaligen Hydrierwerk Zeitz durchgeführt. Der Schadensbereich befindet sich am Standort der ehemaligen Anlage zur Benzolproduktion. Umfangreiche Erkundungsarbeiten zur Lokalisierung des Ausmaßes der Kontamination wurden bereits nach dem Rückbau der Produktionsanlagen 1994 durchgeführt. Im Verlauf des Rückbaus wurden alle Fundamenteile dem Untergrund entnommen und ein Austausch von ca. drei Meter Bodenmaterial durchgeführt. Der von Kontamination betroffene Bereich befindet sich im südöstlichen Teil des Standortes und umfasst die ehemaligen Betriebseinrichtungen Benzolproduktion, Bahnverladung und Tanklager (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Lageplan Hydrierwerk Zeitz**

Vielfältige Eintragspfade für den Schadstoff an den entsprechenden Einrichtungen sind dokumentiert (Arndt & Schwarz, 1999; GFE, 2004).

Hauptkontaminant an diesem Standort ist Benzol (Benzen), dessen Herkunft eindeutig auf die ehemalige Benzolproduktion und die damit verbundenen Handhabung

zurückzuführen ist. Weitere Schadstoffe aus der Gruppe der aromatischen Kohlenwasserstoffe sind ebenfalls nachweisbar (vor allem Toluol, Ethylbenzol und Xylole). Deren Konzentrationen liegen jedoch weit unterhalb der des im Grundwasser gelösten und teilweise in Phase vorliegenden Benzols.

Zur Charakterisierung des Schadensfalles wurde im Vorfeld dieser Sanierung eine Reihe von Erkundungsarbeiten durchgeführt. Hierzu zählen wiederholte Boden- und Grundwasserprobennahmen, Bodenluftbeprobungen und mikrobiologische Beprobungen von Boden und Grundwasser. Weiterhin wurden Tracerversuche und geophysikalische Untersuchungen auf dem Gelände mit dem Ziel durchgeführt, ein besseres Verständnis der komplexen geologischen Bedingungen vor Ort zu gewinnen.

Im Rahmen der Vorerkundungsarbeiten konnte zum Teil auf Information aus dem Forschungsprojekt RETZINA zurückgegriffen werden. Dieses Projekt befasste sich mit der Entwicklung von Sanierungsansätzen zum natürlichen und unterstützten Abbau von Schadstofffahnen, die auf die Kontaminationen im Bereich der ehemaligen Benzolproduktion zurückgehen (Gödeke, 2004; GFE, 2004). Im Verlauf dieses und einiger Folgeprojekte sind eine Reihe spezieller Fragestellungen, u. a. zur hydraulischen Charakterisierung des Standorts, zu Schadstoffverteilung und -transport sowie zum Schadstoffabbau unter verschiedenen geochemischen Randbedingungen bearbeitet worden; hier ist zu verweisen auf Fischer *et al.*, 2005; Gödeke *et al.*, 2001; Gödeke *et al.*, 2002 (a,b,c); Gödeke *et al.*, 2003 (a,b,c,d); Gödeke *et al.*, 2004 (a,b); Gödeke *et al.*, 2006; Großmann *et al.*, 2005 (a,b); Knöller *et al.*, 2003; Schirmer *et al.*, 2002; Schirmer *et al.*, 2006; Vieth *et al.*, 2002; Vieth *et al.*, 2005; Vogt *et al.*, 2002; Vogt *et al.*, 2007.

Ziel der pilotmaßstäblichen Sanierung auf dem Gelände der ehemaligen Benzolproduktion war die Entfernung der eigentlichen Schadstoffquelle, die aufgrund ihres Umfangs in einem zeitlich akzeptablen Rahmen nicht durch natürliche Abbauprozesse beseitigt werden kann. Da der Schadstoffherd sich nicht auf Bereiche der gesättigten oder ungesättigten Zone beschränkt, musste ein Sanierungsverfahren gewählt werden, das eine vollständige Abreinigung beider Bereiche ermöglicht. Darüber hinaus musste die Methode geeignet sein, den vorliegenden Schadstoff unter den komplexen (hydro-)geologischen Bedingungen aus der gesättigten und ungesättigten Zone sowie dem Grundwasser nachhaltig zu entfernen.

Nach Durchführung eines Methodenvergleichs stellte sich der Ansatz einer thermischen Sanierung als am erfolgversprechendsten heraus. Hierbei wurde das Konzept einer Sanierung des Schadstoffquellbereiches durch eine Kombination von

Dampf-Luft-Injektion und stationären elektrischen Heizlanzen favorisiert. Auf die genaue Funktionsweise dieses Konzeptes wird in Kapitel 5 detailliert eingegangen.

Diese thermische Sanierungsmethode erweist sich vor allem bei der Beseitigung des vorhandenen Schadensfalles als ideal, da mit dem Hauptkontaminanten Benzol ein hochvolatiler Schadstoff vorliegt, der im Untergrund aufgrund der geringen Temperaturen hauptsächlich in flüssiger Phase oder gelöst in Grundwasser anzutreffen ist. Ein durch Erwärmung verursachter Übergang des Schadstoffes in die Gasphase und die dadurch erleichterte Extraktion aus dem Untergrund erweisen sich als aussichtsreich für eine schnelle und effiziente Sanierung.

Um den Erfolg einer solchen Maßnahme einschätzen und bewerten zu können, ist ein Monitoring des Sanierungsverlaufes notwendig. Da nicht davon auszugehen ist, dass die Ausbreitung eines injizierten Dampf-Luft-Gemisches im Untergrund radial-symmetrisch verläuft, ist damit zu rechnen, dass Teile der Schadstoffquelle vom Sanierungsmedium umgangen und nicht erreicht werden.

Als ideales Monitoringwerkzeug einer thermischen Sanierung bot sich ein geoelektrisches Verfahren an, das mit Hilfe von Messungen der durch eine thermische Sanierung initiierten elektrischen Widerstandsänderungen eine Beobachtung der Ausbreitung des eingesetzten Sanierungsmediums erlaubt. Aufgrund bisheriger positiver Erfahrungen wurde für dieses Monitoring das geophysikalische Instrument der Gleichstromgeoelektrik gewählt (Ramirez *et al.*, 1993; s.a. Kap. 7). Ziel der vorliegenden Arbeit war es somit ein geoelektrisches Monitoringsystem zu entwickeln und soweit zu optimieren, dass es bei vergleichbaren Sanierungsfällen standardmäßig zur Anwendung kommen und automatisch betrieben werden kann.

Ziel dieses Pilotprojektes war es, Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Potentiale des sich noch im Erprobungsstatus befindlichen thermischen Verfahrens zu gewinnen. Folgende Gesichtspunkte sollten mit der beschriebenen Anwendung betrachtet werden (Trötschler *et al.*, 2008):

(1) Bestimmung der „thermischen Reichweite“ des eingepressten Dampf-Luft-Gemisches unter der Vorgabe einer Erwärmung der gesamten Pilotfläche, ca. 15 x 9 m<sup>2</sup>, Teufe ca. 11 m auf Temperaturen größer 80 °C.

(2) Bestimmung der Sanierungseffizienz für den Schadensherd (>95% Schadstoffaustrag). Der Nachweis erfolgt über Bodenluftbeprobung im Pilotfeld. Abschätzend wurde eine Zielgröße von 350 mg/m<sup>3</sup> Benzol vereinbart. Der zu erzielende Wert

wurde entsprechend der Eigenschaften der Boden- bzw. Aquifermatrix und den ermittelten bzw. abgeschätzten Schadstoffgehalten definiert.

(3) Beurteilung des Einflusses der Dampf-Luft-Injektion auf das Grundwasser:

- Rückgang der Schadstoffemissionen im Abstrom der Schadensquelle, d. h. Einfluss auf die Schadstofffahne,
- Erwärmung des Grundwassers (Energieverluste),
- Erfordernis einer hydraulischen Sicherung während großflächigeren Anwendungen.

(4) Aufzeigen von Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens:

- Bestimmung des Kosten- und Zeitrahmens großflächigerer Sanierungen,
- Beurteilung der Sanierungseffizienz (Sanierungsziel).
- Beurteilung der Auswirkungen der (partiellen) Quellensanierung auf die Schadstoffemissionen

### ***Geologischer Aufbau der Region Zeitz***

Das Gelände des heutigen Industrieparks Zeitz liegt regionalgeologisch an einer Schollengrenze. Von Südwesten her trifft die Osterland-(Tief)-Scholle mit mächtigen oberflächennah anstehenden Triasablagerungen auf die Nordwestsächsische (Hoch)-Scholle im Nordosten, auf der meist känozoisches Deckgebirge über Einsturzgebirge des Zechstein lagert. Die Schollengrenze wird durch die Röthaer Störung markiert, die NW-SE streichend zum System der Halleschen Störung gehört (Eissmann & Litt, 1994; Gödeke, 2004).

Paläogeographisch gesehen befindet sich das Gebiet der ehemaligen Benzolanlage an einem nach Osten geneigten Hang einer Senke, die mit Sanden und Kiesen sowie Schluffen, Tonen und Braunkohle aufgefüllt wurde (GFE, 2004).

Regional betrachtet senkte sich das Untersuchungsgebiet blockförmig ab. Im Tertiär fand nach einer fluviatilen Verfrachtung eine Sedimentation der oben genannten Materialien statt. Vor allem die Ablagerung mächtiger Braunkohleschichten spielt für die Region bis heute eine bedeutende Rolle. In der Nähe des Ortes Meuselwitz (ca. 12 km vom ehemaligen Hydrierwerk Zeitz entfernt) begann im 17. Jahrhundert die erste Braunkohlegewinnung im Saale-Elbe-Raum. Die zum Teil flözführende tertiäre Schichtenfolge stellt in dieser Region eine überwiegend grobklastische Beckenrandfazies des Weißelsterbeckens dar.

Die prätertiäre Schichtenfolge wird von einem überwiegend schluffig-tonigen Verwitterungshorizont über den Sand- und Schluffsteinformationen des Unteren Buntsandsteins gebildet. Der Verwitterungshorizont stellt den Übergangshorizont

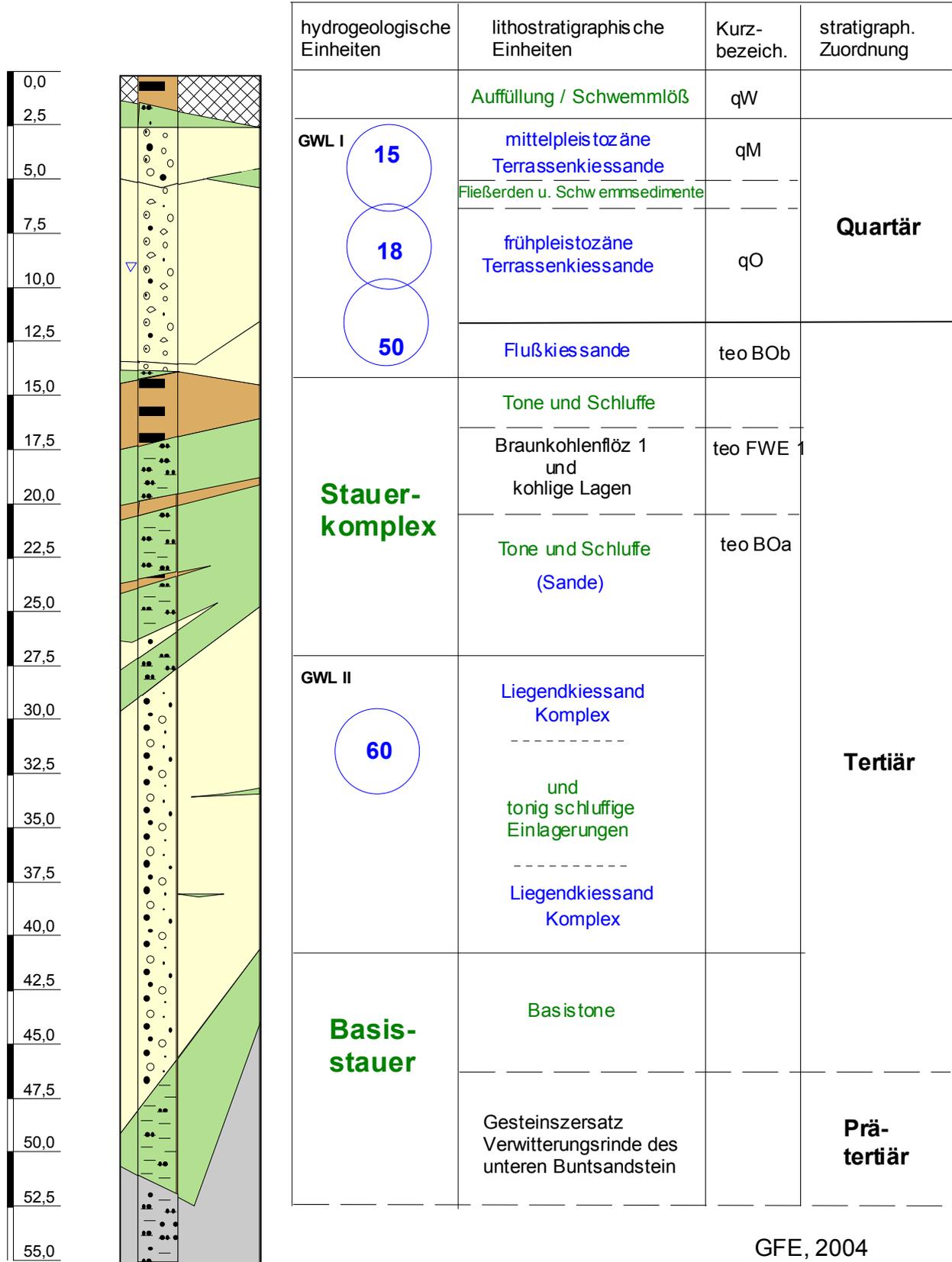
zwischen den känozoischen Lockergesteinshorizonten und den triassischen Sand- und Schluffsteinen dar.

Die erste Kohlebildung fand in dieser Region im Eozän statt. Die Entstehung der ältesten quartären Schichten wird dem Frühpleistozän zugeordnet. Diese werden von isolierten fluviatilen quarzreichen Flussschottern gebildet. Verwerfungen in den stratigraphischen Einheiten wurden vor allem durch unterirdische Salzauslaugungen über alle Zeitstufen hinweg hervorgerufen. Zum Teil fallen die dadurch entstandenen Schichten mit einem Winkel von bis zu 45 Grad ein. Weiterhin sind im gesamten Weißelsterbecken über 150 syn- und postsedimentäre Becken verzeichnet, deren Entstehung auf diese Verwerfungen zurückzuführen sind (Eissmann & Litt, 1994; Gödeke, 2004). Abbildung 2 zeigt ein für den Standort repräsentatives lithologisches Profil (GFE, 2004).

### **Hydrogeologischer Aufbau des Untersuchungsgebietes**

Grundsätzlich können an diesem Standort zwei Grundwasserleiter (GWL) unterschieden werden (Abbildung 2). Der unterhalb einer zwei bis drei Meter mächtigen Auffüllung liegende GWL I setzt sich zum Großteil aus pleistozänen Kiesen und Sanden sowie hydraulisch geringleitenden Einlagerungen von Fließerdern und Schwemmsedimenten zusammen. Unterhalb der Quartärbasis sind tertiäre Flußkiese und –sande zu finden. Am Standort wird der Bereich oberhalb des Braunkohle-Schluffkomplexes (teo FWE 1, teo BOa), aufgrund der meist fehlenden hydraulischen Trennhorizonte zwischen den pleistozänen und tertiären Schottern an der Quartärbasis als GWL I bezeichnet. Der GWL I ist aufgrund fehlender bindiger Sedimente durchgehend hydraulisch ungespannt.

Unterhalb des stockwerkbildenden Braunkohle-Schluffkomplexes liegt der zum Teil gespannte GWL II. Dieser setzt sich im oberen Bereich zu großen Teilen aus Geringleitern wie Tonen und Schluffen sowie einigen Sandeinlagerungen zusammen. Eingelagerte tertiäre Flussskiese und -sande im unteren Bereich bilden durch ihre höhere hydraulische Durchlässigkeit den eigentlichen GWL aus. Ein basaler Geringleiter aus Tonen schließt den GWL II nach unten hin ab. Wie Untersuchungen im Rahmen des RETZINA-Projektes ergaben, weisen die beiden vorhandenen Grundwasserleiter unterschiedliche Druckspiegel auf, was eine größtenteils durchgehende hydraulische Trennung bestätigt. Trotz deutlicher Unterschiede in der lithologischen Zusammensetzung der beiden Grundwasserleiter zeigen beide in den hydraulisch wirksamen Horizonten vergleichbare Durchlässigkeiten. Für GWL I wurde in diesen Horizonten ein Mittelwert von  $2,3 \times 10^{-4}$  m/s, für GWL II ein Mittelwert von  $5,8 \times 10^{-4}$  m/s berechnet (GFE, 2004).



GFE, 2004

Abbildung 2: Geologisches Normalprofil

### 3. Standort ehemaliges Hydrierwerk Zeitz

Das Gelände des ehemaligen Hydrierwerkes Zeitz befindet sich ca. 5 km nordöstlich der Stadt Zeitz in Bundesland Sachsen-Anhalt. Nach dem Rückbau der größtenteils veralteten Anlagentechnik zu Beginn der 90iger Jahre lagen große Teile des Geländes brach. Mit der Umstrukturierung zum Industriepark Zeitz begann im Folgenden eine Neuansiedlung verschiedener Industriezweige auf den ehemals hauptsächlich von der petrochemischen Industrie genutzten Flächen.

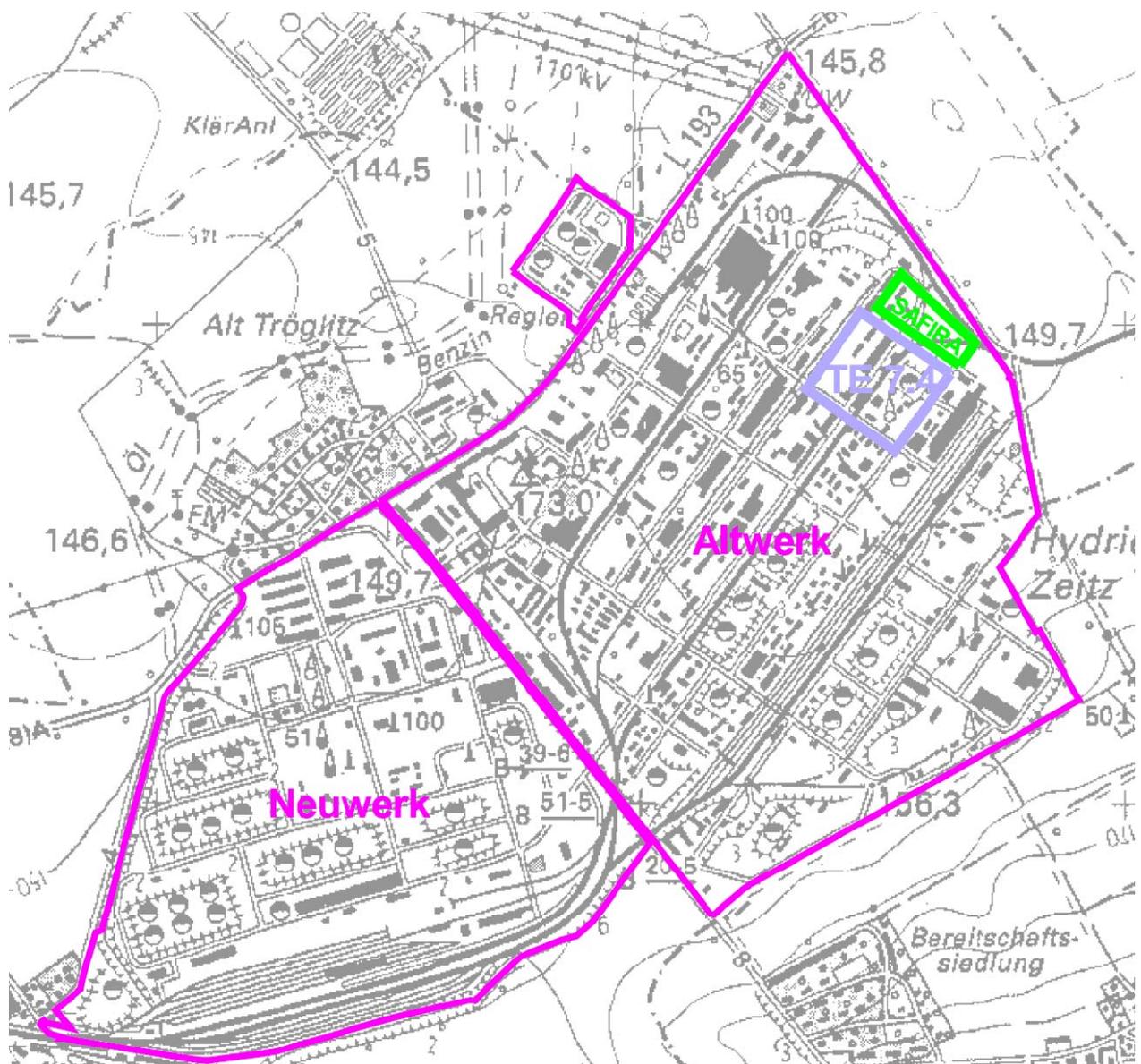


Abbildung 3: Lageplan Alt- und Neuwerk

Das weitläufig angelegte Werksgelände teilt sich in den Bereich des ehemaligen Altwerkes mit einer Fläche von rund 1,8 km<sup>2</sup> im östlichen Teil und den Teil des

ehemaligen Neuwerks im westlichen Teil mit einer Fläche von rund 0,5 km<sup>2</sup> (Abbildung 3). Im Bereich des Altwerkes wurde zu Beginn der 60iger Jahre mit dem Bau einer Anlage zur Benzolproduktion begonnen. Zwischen 1963 und 1990 war die Anlage in Betrieb; es wurden in diesem Zeitraum rund 800.000 Tonnen Benzol produziert. Die Produktion von Reinbenzol wurde bereits 1985 eingestellt. Ein Maximum der Benzolproduktion wurde mit 10 % der Gesamtproduktion (80.000 Tonnen) als Jahresproduktion 1979 erreicht. Danach ging die Produktionsleistung stetig zurück und endete 1990 mit rund 10.000 Tonnen.

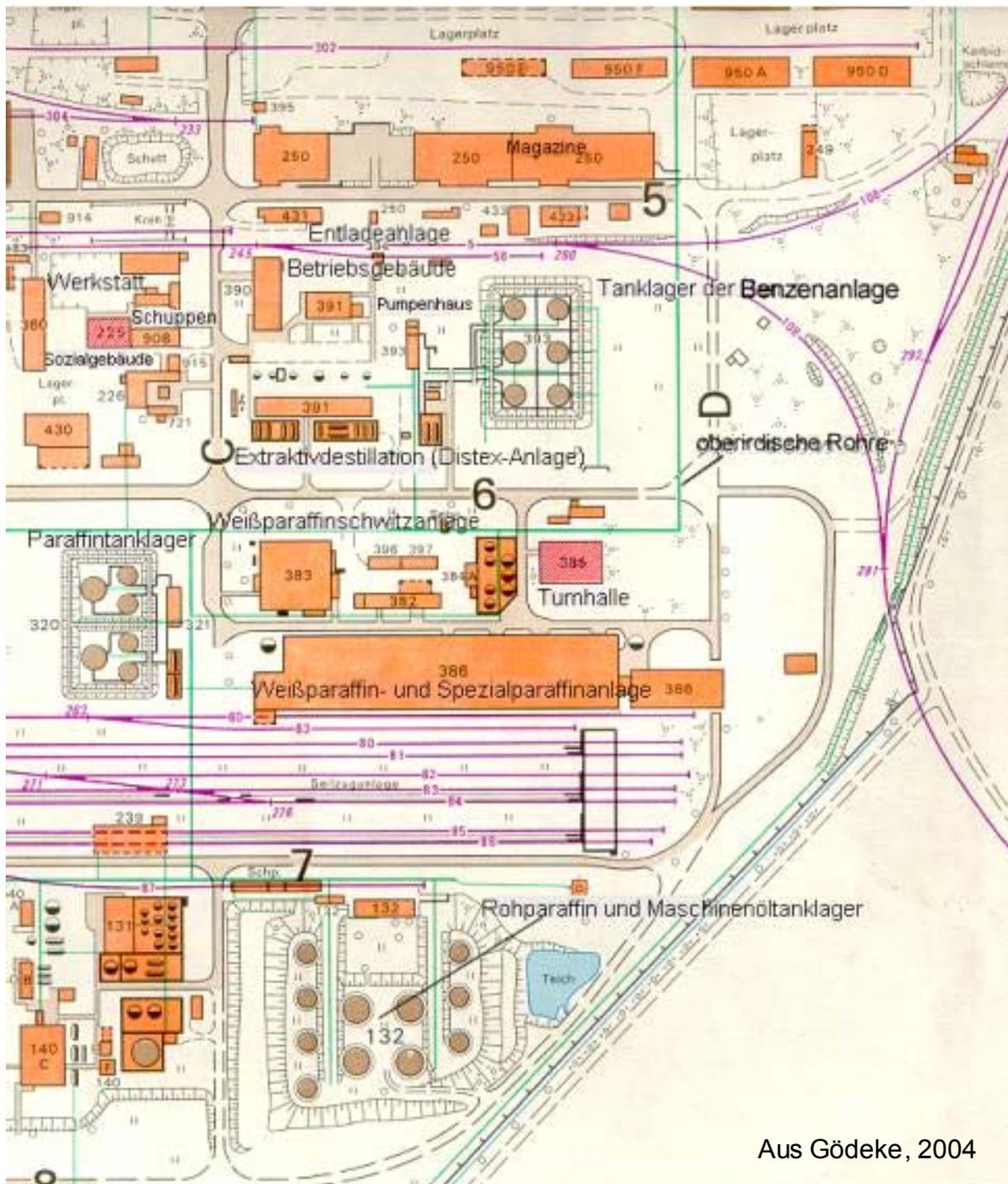
Im Zusammenhang mit den Produktions- und Verarbeitungsabläufen im Bereich der ehemaligen Benzolproduktion kam es zu einer Vielzahl von Zwischenfällen, die einen Eintrag von Benzol und anderen, im Rahmen der Benzolproduktion verwendeten Stoffen in den anstehenden Boden sowie die Grundwasserleiter vor Ort zur Folge hatte. Als für die Benzolproduktion notwendige Lösungsmittel wurden Phenol und Dimethylformamid (ab 1974) verwendet. Diese beiden Stoffe konnten im Grundwasserleiter im Bereich der ehemaligen Benzolproduktion nachgewiesen werden, so dass mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass die gesamten Benzoleinträge auf Vorfälle an oder im Bereich der Benzolanlage zurückzuführen sind.

Nur ein Teil der Vorgänge, die zur Verunreinigung des Untergrundes und des Grundwassers führten, sind ausreichend dokumentiert (Tabelle 1). Zwischen 1970 und 1987 kam es alleine zu drei größeren Havarien im Kolonnenstrakt der Benzolanlage und zwischen 1965 und 1976 zu wenigstens vier weiteren Benzol- und Phenolaustritten. Ein Großteil der Stoffeinträge in den Untergrund ist auf unzureichend oder gar nicht gegen Havarien gesicherte, unterirdisch verlegte Rohrleitungen zurückzuführen. Gerade in diesem Bereich wurden Havarien mit großer Wahrscheinlichkeit sehr spät und kleinere Leckagen gar nicht erkannt.

<b>Datum</b>	<b>Schadensablauf</b>
4.1.1965	Benzenanlage, Phenolatlaugenkühler: Undichte Rohre durch Korrosion, Phenolaustrag
9.7.1965	Benzenanlage: Sumpfvventil und Kettenschieber undicht: Phenolaustritt
12.9.1966	Störung in Benzenanlage: laufende Überflutung von Böden der Destillationskolonne: Abstellen, da Trennwirkung nicht gegeben. Ursache: höhere Olefingehalte im Benzenvorprodukt, Kondensationsprodukte schwer abtrennbar
1.2.1967	Benzenanlage: Undichtigkeiten in Phenolwasserleitung durch Korrosion
4.6.1967	Benzenanlage: Leitung undicht, Benzen spritzte durch das Pumpenhaus
15.7.1967	Zwischentanklager: 2-3 m <sup>3</sup> Benzenvorprodukt ausgelaufen beim Entladen eines Kesselwagens
19.9.1967	Benzintanklager: 300 l Benzen auf Strasse: Undichtetes Ventil eines Kesselwagens
23.2.1970	Benzenanlage (Unfall): Temperaturmessstab wurde herausgedrückt infolge nichttragender Einschraubhülse (defektes Gewinde, Herstellungsfehler): Phenolaustritt, Personenschaden
16.5.1977	Destillation Benzenanlage: Korrosionsschäden im Bereich Produktzulauf u. Dimethylformamid-Zulauf: Anlagenschaden; Schäden durch Zerfall des verwendeten Lösungsmittels Dimethylformamid

**Tabelle 1: Havarien und Unfälle im Hydrierwerk Zeitz mit Kontaminationsfolge**

Augenzeugen zufolge kam es jedoch zu einer weitaus größeren Anzahl von Benzol-einträgen vor allem durch Handhabungsverluste bei der Befüllung von Tankwaggons im Bereich der Bahnverladung und am Pumpenhaus im Bereich des Tanklagers (Abbildung 4).



Aus Gödeke, 2004

**Abbildung 4: Betriebsanlagen und Gebäude**

Der zur Benzolproduktion im Hydrierwerk Zeitz angewendete Distex-Prozeß basiert auf dem Verfahren der Extraktivdestillation (Arndt & Schwarz, 1999). Ausgangsstoff für die Benzolgewinnung waren Leichtöle, Kondensatöle sowie unterschiedliche Benzin-Fractionen. Die Benzolgewinnung selbst fand in Produktionskolonnen durch wechselnde Destillations- und Kondensationsvorgänge statt (Abbildung 5).



**Abbildung 5: Anlagen zur Benzolproduktion**

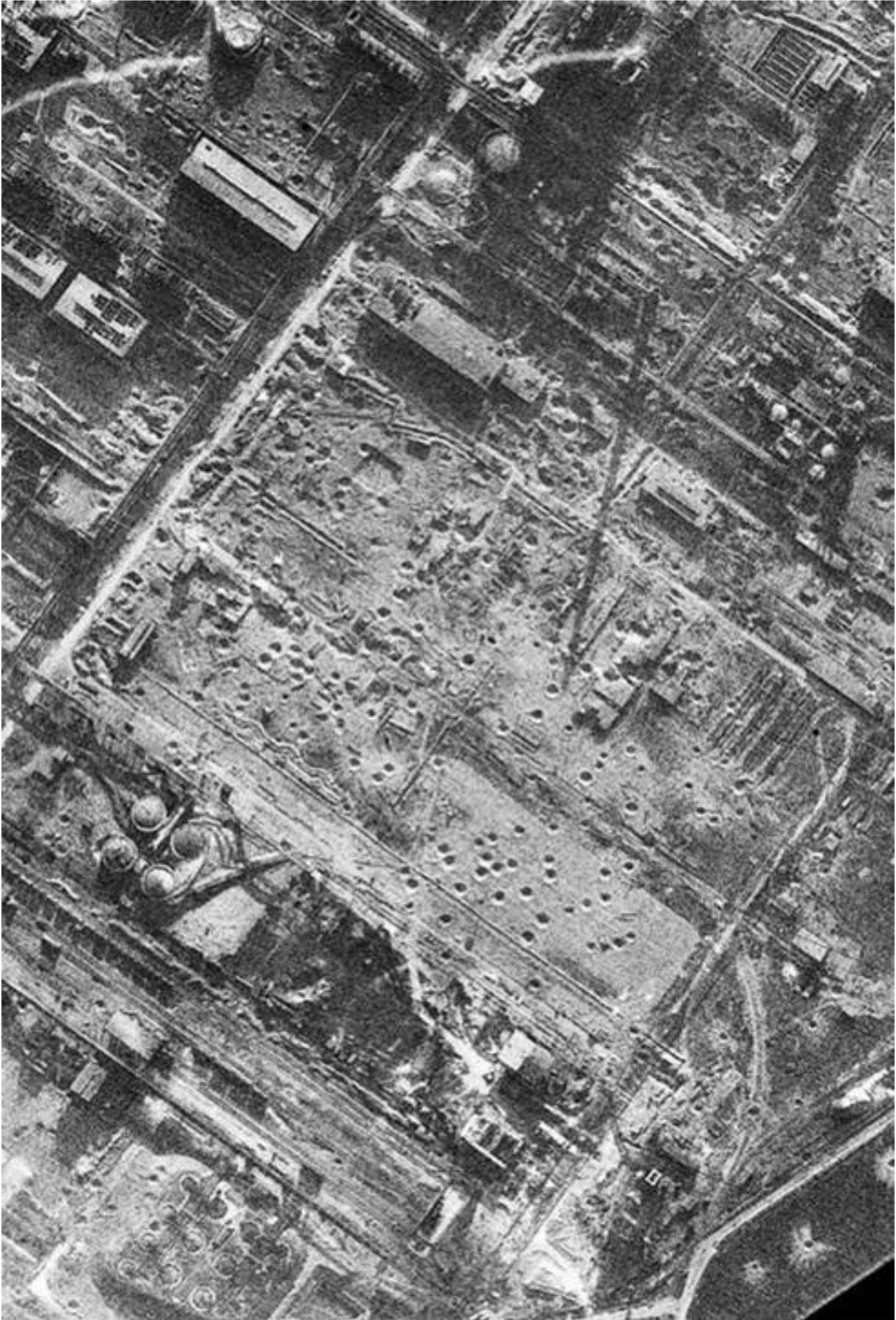
Im Vorfeld der Benzolproduktion fand die Rohölverarbeitung statt, bei der die für die Benzolproduktion nötigen Ausgangsstoffe gewonnen wurden. Hierfür wurden im Neuwerk Anlagen zur Rohöldestillation errichtet. Bei diesem Prozess wurde in Lagertanks bereitgestelltes Rohöl durch ein System aus Wärmetauschern geleitet und dabei auf rund 400 °C erhitzt, damit weitgehend verdampft und in einen Destillationsturm geleitet. Diese Destillationstürme wurden auch als Kolonnen bezeichnet, da sie in verschiedenen Bereichen mit einem horizontalen Zwischenboden aus Lochblechen versehen waren. Die Öffnungen der Lochbleche waren

durch Röhren nach oben verlängert, die wiederum mit glockenförmigen Abdeckungen versehen waren. Die durch das Erhitzen entstehenden Gase konnten durch die Lochbleche hindurchtreten und wurden durch die auf jedem Boden stehende kondensierte Flüssigkeit hindurchgeleitet. Hierbei wurde der schwerer siedende Anteil zum Teil aus dem Gasstrom ausgewaschen, kondensiert und sammelte sich an sogenannten Überlaufwehren an. An den Überlaufwehren anstehendes Kondensat lief über das Wehr herab auf die nächste tiefer liegende Kolonnenebene. Der leicht siedende Anteil wurde bei diesem Vorgang verdampft und stieg in die nächste höher liegende Kolonne auf. Lief dieser Prozess kontinuierlich ab, so sammelten sich leicht siedende Stoffe wie Gase und Leichtbenzine im oberen Teil der Kolonne und schwer siedende wie Heizöl im unteren Teil. Aus jeder Kolonnenstufe konnten die entsprechenden Kondensate durch entsprechende Seitenabzüge entnommen werden. Mit diesem Verfahren wurden die Fraktionen schweres Heizöl, Gasöl, Petroleum, Benzin und Gas aus Rohöl gewonnen.

### ***Historische Entwicklung***

Aus der Betriebsgeschichte des Hydrierwerkes Zeitz geht hervor, dass das Altwerk von der 1934 gegründeten Braunkohle-Benzin AG (BRABAG) aufgrund einer Genehmigung der Reichsregierung zur Errichtung des Hydrierwerkes Zeitz von 1936 ab auf „grüner Wiese“ erbaut wurde. Im Januar 1939 nahm das Werk schließlich die Produktion auf. Das Werk diente in erster Linie der Treib- und Schmierstoffproduktion im Rahmen der Kriegsvorbereitung. Basis für die Herstellung von Benzin- und Dieselkraftstoff sowie Schmieröle und Paraffine war die Hydrierung von Braunkohle und Braunkohleteer.

Umfangreiche Untergrundkontaminationen sind auf die Zeit des zweiten Weltkrieges zurückzuführen. In den Jahren 1944/45 wurde das Werk durch großflächige Luftangriffe der USAF und der RAF zu rund 60% zerstört (Abbildung 6). Rund 4500 Bomben (Sprengbomben, Brandbomben, Minen) trafen das Werksgelände (Tabelle 2). Zerstörte und beschädigte Anlagen, sowie Leitungsnetze führten zum Austritt von rund 250 m<sup>3</sup> meist flüssiger Kohlenwasserstoffe. Der Anteil dieser während des zweiten Weltkrieges entstandenen Untergrundkontamination wird auf einen Anteil von 70 bis 95% an der heutigen Gesamtkontamination geschätzt (GFE, 2004).



**Abbildung 6: Teilbereich des Hydrierwerks Zeitz nach Luftangriffen des Zweiten Weltkrieges**

Datum des Angriffs	Gesamtzahl der Bomben	Einschläge Werk	Einschläge Umgebung	Brandbomben	Minen	Sprengbomben	Erkannte Blindgänger
<b>12.05.1944</b>	<b>1700</b>	800	900	50	0	800	<b>120</b>
<b>28.05.1944</b>	<b>2500</b>	1300	1200	-	-	1300	<b>135</b>
<b>16.08.1944</b>	<b>1100</b>	1000	100	-	-	1000	<b>80</b>
<b>30.11.1944</b>	<b>1750</b>	250	1500	-	-	250	<b>40</b>
<b>16.01.1945</b>	<b>3800</b>	1000	2800	200	20	1000	<b>160</b>
<b>31.03.1945</b>	<b>500</b>	150	900	-	-	150	<b>25</b>

**Tabelle 2: Statistik zu Bombenabwürfen auf das Hydrierwerk Zeitz im Verlauf des Zweiten Weltkrieges**

Die Kraftstoffproduktion konnte im Werk bereits 1945 in kleinem Umfang wieder aufgenommen werden. Nachdem alle Anlagen nach Ende des zweiten Weltkrieges in den Besitz der Sowjetunion übergegangen waren, wurden sie ab 1953 Eigentum der DDR und es wurde ab 1960 mit dem Bau der Anlage zur Benzolproduktion begonnen, die ab 1963 ihren Betrieb aufnahm und bis ins Jahr 1990 in Funktion war. Der Personalbestand stieg seit Aufbau des Werkes stetig an, so dass 1949 rund 5000 Personen im Werk beschäftigt waren. Diese Zahl der Beschäftigten schwankte in den folgenden Jahren zwischen 4000 und 5000, wobei sie ab 1990 rapide abnahm. Mit dem Rückbau der gesamten Anlagen bis zum Sommer 1996 endet die Geschichte des Hydrierwerkes Zeitz.

### **Kontaminationsverhältnisse und -ursachen am Standort**

Die ehemalige Benzolproduktionsanlage befand sich im Osten des Hydrierwerkes Zeitz (Altwerk). Dieser Bereich gehört auch zu den am stärksten von Kontaminationen betroffenen (Abbildung 3).

Die starken Untergrundkontaminationen, vor allem durch Benzol, können nicht auf ein einzelnes Ereignis zurückgeführt werden. Im gesamten Zeitraum der Benzolproduktion auf dem Gelände kam es immer wieder zu Unfällen und Leckagen. Gerade im Bereich der Bahnverladung konnten große Benzolmengen, hervorgerufen durch Unfälle und häufig auch Unachtsamkeit, in den Untergrund und die Grundwasserleiter eindringen.

Da auf dem Gelände schon vor und während des Zweiten Weltkrieges Kraftstoffe und Schmiermittel produziert wurden, kam es gerade in diesem Zeitraum zu umfangreichen Kontaminationen. Das Werksgelände war Ziel mehrerer schwerer Luftangriffe, durch die starke Beschädigungen hervorgerufen wurden (Abbildung 6).

Prinzipiell lassen sich zwei Grundwasserleiter auf dem Gelände unterscheiden (s. Kapitel 2). Von einer Benzolkontamination ist sowohl der quartäre, als auch der tertiäre Grundwasserleiter betroffen. Die Benzolkonzentrationen im tiefer liegenden tertiären Grundwasserleiter sind jedoch erheblich geringer, da die beiden Aquifere zum größten Teil durch den Braunkohle-Ton-Komplex hydraulisch getrennt sind. Da diese bindige Trennschicht jedoch nicht vollständig durchgängig ist und an einigen Stellen Unterbrechungen aufweist, konnte es zum Schadstoffeintrag in den unteren Grundwasserleiter kommen, zumal in den vergangenen Jahrzehnten durch bergbaubedingte Wasserhaltungsmaßnahmen in der Umgebung starke (bis 10 m) Grundwasserstandsschwankungen aufgetreten sind. So konnte es zum gravitativen Transport leichter Phasen in mittlerweile wieder (wasser-)gesättigte tiefere Aquiferbereiche kommen. Die ursprünglich aufschwimmenden (Leicht-)Phasen wie Benzol liegen somit als sog. überströmte Phasen vor. Die maximalen Benzolkonzentrationen liegen hier bei 100 mg/l. Im stärker betroffenen oberen Grundwasserleiter liegen Maximalwerte von 1500 mg/l vor, was der Löslichkeit des Benzols entspricht. Hohe Schadstoffkonzentrationen sind vor allem im Bereich des ehemaligen Benzin- und Teertanklagers zu finden.

Auf den kontaminierten Flächen wurden verschiedene Untersuchungskampagnen durchgeführt. Im Jahre 2004 kam es zu einer umfangreichen Untersuchung der beiden Grundwasserleiter auf deren Schadstoffgehalt (Gödeke, 2004). Hierbei wurden Proben auf dem gesamten ehemaligen Produktionsgelände entnommen und auf einen Großteil der Stoffe untersucht, die im Rahmen der Benzolproduktion zum

Einsatz kamen. Tabelle 3 zeigt in Massenanteilen die Ergebnisse dieser Untersuchung.

<b>Komponente</b>	<b>Masse %</b>
Benzen	82,86
Methylcyclopentan	8,11
Cyclohexan	2,93
n-Hexan	1,23
Cyclopentan + 2,3- u. 2,2-Dimethylbutan	0,92
2-Methylhexan	0,56
1 trans 2-Dimethylcyclopentan + 2,2,4-Trimethylpentan	0,53
3-Methylhexan	0,48
2-Methylpentan	0,42
1 cis 3-Dimethylcyclopentan	0,39
3-Methylpentan	0,37
n-Heptan	0,35
3-Äthylpentan + 1 trans 3-Dimethylcyclopentan	0,31
2,3-Dimethylpentan + 1,1 Dimethylcyclopentan	0,21
Isopentan	0,07
Toluen u.a.	0,07
n-Pentan	0,06
Methylcyclohexan	0,06
n-Butan	0,03
1 cis 2-Dimethylcyclopentan	0,03
Äthylcyclopentan	0,02

**Tabelle 3: Charakteristische Zusammensetzung des Rohproduktes für die Benzolgewinnung (Gödeke, 2004, nach Henning *et al.*, 1979)**

Die Analyse der Grundwasserbeprobung im Jahre 2004 zeigte, dass einige der während der Benzolproduktion verwendeten Stoffe tatsächlich im Grundwasser nachgewiesen werden konnten. Hierzu gehören vor allem Cyclopentan, Methylcyclopentan und Cyclohexan, welche auch bei der Benzolproduktion die größten Massenanteile aufweisen. Die starken Toluolkonzentrationen von über 50

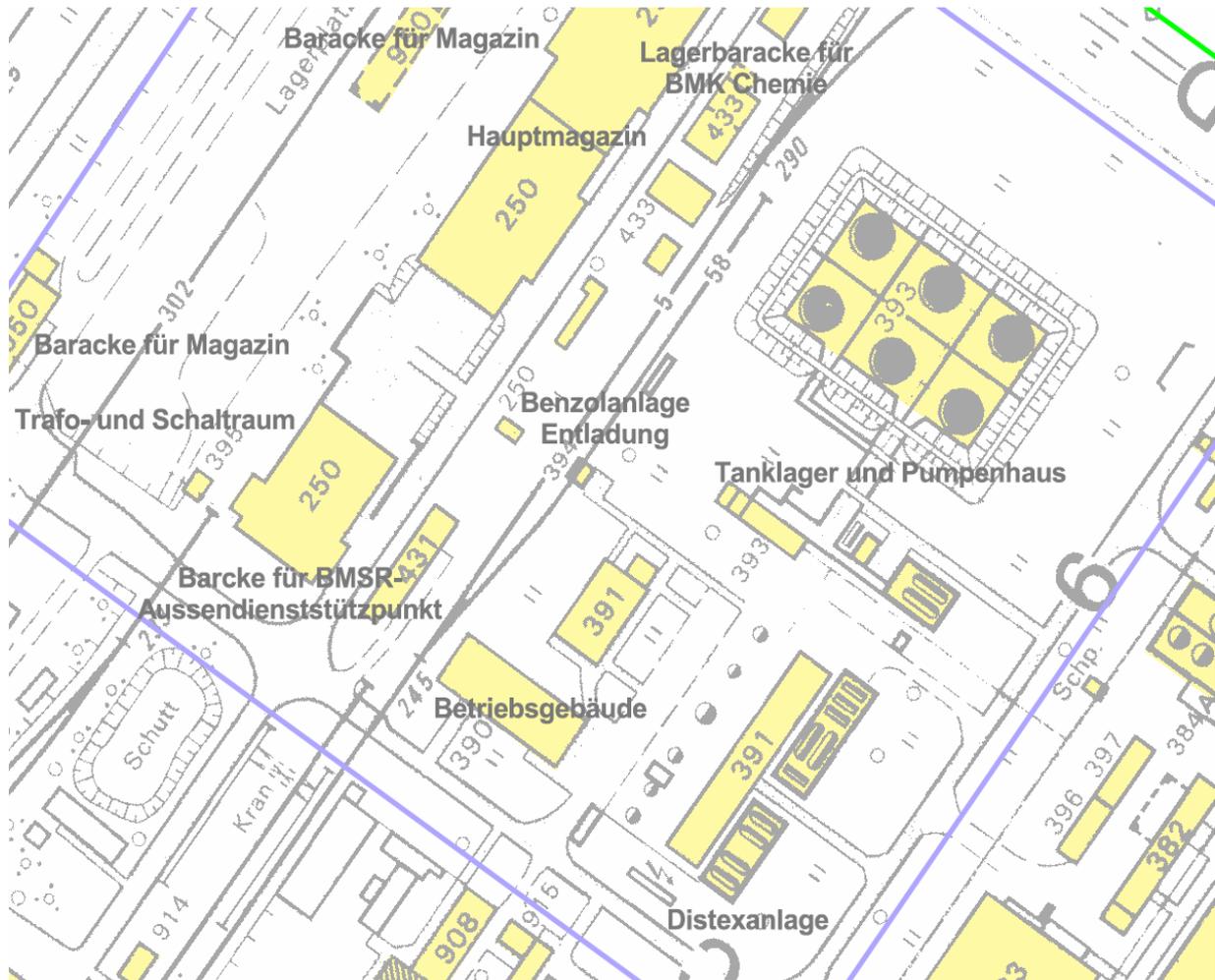
mg/l im Grundwasser konnten hingegen zunächst nicht erklärt werden, da der Anteil von Toluol bei der Benzolproduktion nur 0,07 Massen-% beträgt. Im Rahmen des Extraktivdestillationsprozesses kam es jedoch zur Anreicherung von Toluol im untersten Teil der Destillationskolonnen, als sogenanntes „Sumpfprodukt“, dessen selektiver Eintrag die erhöhten Konzentrationen erklären kann.

Ein oberflächlicher Bodenaushub im Bereich der ehemaligen Benzolproduktion wurde im Rahmen der Rückbaumaßnahmen im gesamten Hydrierwerk zu Beginn der 90er Jahre vorgenommen. Hierbei wurde eine Schicht bis in eine Tiefe von 2,5 Metern unter Geländeoberkante (m u. GOK) abgetragen, was einer Masse von ca. 9600 Tonnen Bodenmaterial entspricht.

Wie die von dem ehemaligen Produktionsgelände entnommenen Proben zeigten, hatte der Bodenaushub nur sehr geringen Einfluss auf die lokale Kontaminationssituation, da der Großteil der Schadstoffe in tiefere Bereiche abgesunken war. Feststoffanalysen des Bodenmaterials ergaben in einem Bereiche von 4 bis 6 m u. GOK Benzolkonzentrationen von bis zu 2900 mg/kg. Im grundwassergesättigten Bereich lagen Konzentrationen von bis zu 3000 mg/kg vor.

Allen Angaben nach wurden Fundamente und Anlagenteile entfernt und die Fläche mit Recyclingmaterial und Bodenaushub neu verfüllt. Wie sich im Rahmen einer geophysikalischen Erkundung und bei Bohrarbeiten in den Jahren 2006/07 herausstellte, sind jedoch noch Fundamenteile, Leitungen und andere Infrastruktur im Untergrund verblieben.

Nach Durchführung einer historischen Erkundung für den Teilbereich des ehemaligen Altwerkes durch die Zeitzer Standortgesellschaft (ZSG), wurde auf dem Gelände der ehemaligen Benzolproduktion der Untergrund im Bereich der Entladeanlage sowie der Distexanlage als kontaminiert eingeschätzt (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Betriebseinheiten ehemalige Benzolproduktion**

Der gesamte Aufbau der Benzolanlage erfolgte unter hohem Zeitdruck. Sehr wahrscheinlich ist, dass bei diesem Projekt eher die rasche Fertigstellung als die Einhaltung seinerzeitiger Konstruktions- und Baurichtlinien im Vordergrund stand. Wie sich zeigte, sind umfangreiche Schadstoffaustritte im Bereich der Benzolanlage vor allem an ober- sowie unterirdischen Rohrleitungen aufgetreten. Die Entwässerung der Produktionskolonnen wurde ebenfalls mittels unterirdischer Leitungen durchgeführt. Hier wurden täglich ca. 20 m<sup>3</sup> benzolhaltige Wässer durchgeleitet. Eine Dichtigkeitskontrolle der vorhandenen Leitungen gab es nicht. Nur offensichtliche Leckagen wurden erkannt, da kein Detektionssystem installiert war. Ein weiteres Problem, das zu der umfangreichen Untergrundkontamination beigetragen hat, ist die annähernd durchgängig fehlende Untersichersicherung. Es wurde beim Bau der Anlagen und Rohrleitungen auf Versiegelungen verzichtet, wodurch austretende Schadstoffe ungehindert ins Erdreich versickern konnten. Bei den großen Produktionsmengen der Anlage, den fehlenden Kontrolleinrichtungen und Untersichersicherungsmaßnahmen, konnten die nun offenkundig werdenden großen Schadstoffmengen unbemerkt in den Untergrund gelangen.

Vor allem vor 1974, als Phenol als Lösungsmittel bei der Benzolproduktion verwendet wurde, kam es durch die korrosiven Eigenschaften des Phenols zu häufigen Leckagen (Lehmann *et al.*, 2001). Als problematisch stellte sich weiterhin die oberirdische Rohrleitungsführung heraus. Durch unzureichende Untergrundverdichtung kam es zu Erdreichsetzungen, welche direkten Einfluss auf die Leitungsnetze hatten. Auch hier kam es zu Schäden, die zu Undichtigkeiten und Leckagen führten.

Da der Großteil der Produktionsanlagen auf Betonfundamenten ohne jegliche Abdichtung errichtet wurde, führte dies dazu, dass austretende Flüssigkeiten leicht durch den porösen Beton hindurch in den Untergrund eindringen konnten. Vor allem im Bereich der Destillationskolonnen und der Distex-Anlage fehlten Sicherungstassen, die im Falle einer Havarie die austretenden Stoffe auffangen und so einen Eintrag in den Untergrund verhindern sollten. Anlagenteile wie das Tanklager, mit einem Fassungsvermögen von 3000 m<sup>3</sup>, sind mit Sicherungstassen ausgestattet worden. Diese waren jedoch vermutlich unterdimensioniert und konnten im Havariefall nicht die nötige Stoffmenge aufnehmen.

## **4. Auswahl des Sanierungsstandortes auf Grundlage von hydrogeologischen und geophysikalischen Erkundungen**

### ***Strukturmodell und geophysikalische Erkundung***

Nach Durchführung einer historischen Erkundung auf dem Werksgelände des ehemaligen Hydrierwerks Zeitz Mitte der 90er Jahre (Böhme, 1999) und weiterführenden Untersuchungen im Jahre 2004 (GFE GmbH, 2004), wurden in den Jahren 2005/06 im Rahmen der vorliegenden Arbeit weitere, umfangreiche Erkundungskampagnen realisiert. Ziel dieser Erkundungskampagnen war es, einen „idealen“ Einsatzort für eine pilotmaßstäbliche thermische Sanierung zu identifizieren. Zur Anwendung sollte je ein System basierend auf Dampf-Luft-Injektion sowie als Alternative eine Technik gelangen, die auf dem Prinzip der radiowellen-gestützten Bodenerwärmung beruht. Für beide Ansätze galten unterschiedliche Bedingungen bezüglich der Untergrundstruktur und Grundwasserverhältnisse.

Im Rahmen dieser Erkundungsarbeit wurde ein 3-dimensionales Struktur- und Belastungsmodell erstellt, aus welchem sich unter unterschiedlichen Grundwasserstandsszenarien Bereiche die für die jeweilige Methode als geeignet oder ungeeignet ableiten ließen. Zur Erstellung dieses Modells wurde unter anderem auf Informationen aus der Aufschlusssdatenbank des Ökologischen Großprojektes (ÖGP) Zeitz zurückgegriffen. Das ÖGP Zeitz umfasst das gesamte Alt- und Neuwerk des ehemaligen Hydrierwerkes mit insgesamt 2,3 km<sup>2</sup>; in diesem Rahmen werden die jeweils optimalen Sanierungsmethoden für die unterschiedlichen Schadensschwerpunkte ermittelt. Da der Bereich der ehemaligen Benzolanlage einen solchen Schwerpunkt bildet, fließen die Erkenntnisse aus den Sanierungspilotversuchen in die Arbeit des ÖGP mit ein (<http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/index.php?id=2504>).

Aus dem für das gesamte ehemalige Hydrierwerk erstellte 3-dimensionale hydrogeologischen Modell wurde der Untersuchungsbereich „ehemalige Benzolanlage“ ausgekoppelt und durch zusätzliche Erkundungsarbeiten modelltechnisch angepasst. Das Modell wurde vor allem durch lithologische und stratigraphische Informationen aus Bohrlochdaten erweitert. 3-dimensionale Flächendaten wie Horizontgeometrien und Mächtigkeitsverteilungen sowie 2- und 3-dimensionale Punktdaten fanden Eingang in das Modell.

Einen Schwerpunkt der weiteren Erkundungsarbeiten stellten umfangreiche Leitfähigkeitsuntersuchungen dar. Hierbei kam unter Verwendung eines Direct-Push-Gerätes (Abbildung 8) ein geophysikalisches Messgerät (EC-Probe) zum Einsatz. Eine Vierpunkt-Elektrode (Wenner-Sonde) (Abbildung 9) wurde hierbei an einem

Sondiergestänge montiert und kontinuierlich an festgelegten Ansatzpunkten in den Untergrund eingebracht. Das Abteufen des Sondenstrangs wird durch die Auflast des Eigengewichtes des Sondiergerätes ermöglicht. Ist die Sonde in größere Tiefen eingedrungen und reicht die Auflast nicht mehr für ein weiteres Vordringen aus, so wird mit Hilfe eines Perkussionshammers zusätzliche Energie auf das Sondiergestänge gebracht. Mit diesem Verfahren konnte im Bereich der ehemaligen Benzolanlage bis in Tiefen von 20 Metern sondiert werden.

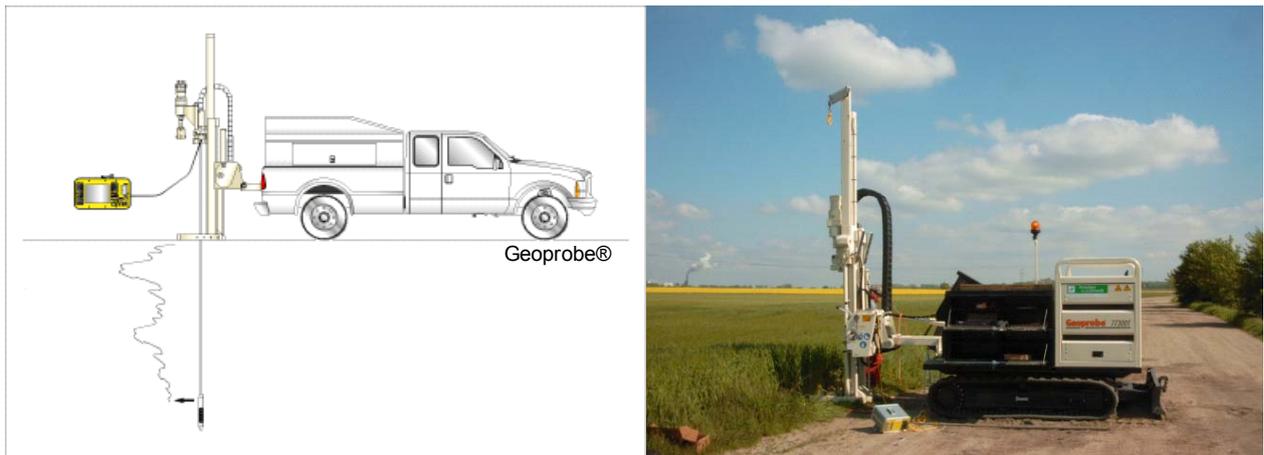


Abbildung 8: EC-Logging mit fahrzeug- und kettenbasiertem Sondiergerät

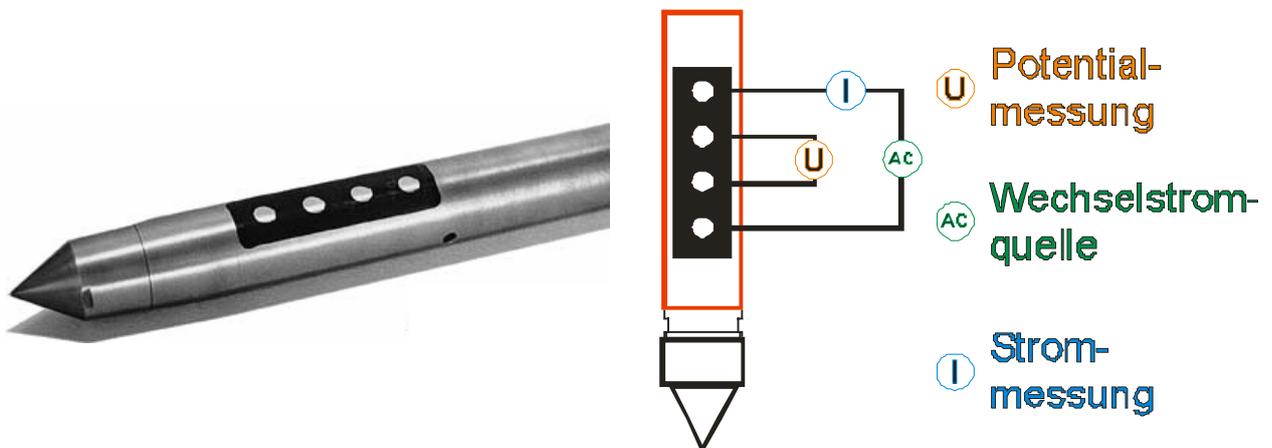


Abbildung 9: Leitfähigkeitssonde mit Strom- und Potentialelektroden (Wenner-Konfiguration)

Die am unteren Gestängestrang montierte Wenner-Sonde besitzt vier über eine innerhalb des Sondiergestänges verlaufende Kabelverbindung an ein Steuergerät an der Oberfläche angeschlossene Elektroden. Während einer Messung wird an zwei dieser Pole ein Strom angelegt, der im Bereich der Sonde zum Aufbau eines elektrischen Feldes im Untergrund führt. Das zweite Elektrodenpaar dient zur Messung des durch den elektrischen Widerstand des Untergrundes erzeugten Spannungsabfalls. Mit diesem Verfahren können somit elektrische Leitfähigkeitsmessungen im Untergrund durchgeführt werden. Aus den Daten der elektrischen

Leitfähigkeitsmessungen können direkte Schlüsse auf die im Untergrund vorliegenden Materialien gezogen werden, da sich beispielsweise Tone, Silte und Sande durch unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten auszeichnen (Abbildung 10). Es muss jedoch festgehalten werden, dass die gewonnenen Daten nicht die gleichen Informationen liefern wie die geologische Aufnahme von Bohrkernen. Da sich der Untergrund, wie vor allem auch im Bereich des ehemaligen Hydrierwerkes, aus einer Vielzahl verschiedener Materialien zusammensetzt, sind exakte Zuordnungen elektrischer Leitfähigkeitswerten zu einem jeweiligen Material nicht möglich. Dies wird vor allem durch die großen elektrischen Leitfähigkeitsspannen verschiedener Stoffe und deren Überschneidung verdeutlicht (Abbildung 10, Abbildung 12). Weiterhin sind Faktoren wie variierender Tongehalt, Wassersättigung und Schadstoffgehalt ausschlaggebend für einen mit dieser Methode erfassten elektrischen Leitfähigkeitswert. Das Verfahren eignet sich somit vor allem zur Abgrenzung lithologischer Schichten, die starke elektrische Leitfähigkeitskontraste aufweisen.

Im Rahmen der Anwendung der Leitfähigkeitssonde wurden in direkter Nähe von gut dokumentierten Bohrungen Referenzmessungen durchgeführt. Dies ermöglichte eine gewisse Korrelation zwischen den aufgezeichneten Leitfähigkeitswerten und der aufgenommenen lokalen Lithologie. Mit diesen Informationen konnten Horizonte mit prominenten Leitfähigkeitswerten, wie beispielsweise der Braunkohle-Ton-Komplex, der als hydraulische Trennschicht zwischen oberem und unterem Grundwasserleiter am Standort fungiert, an jedem Sondieransatzpunkt identifiziert werden (Abbildung 11).

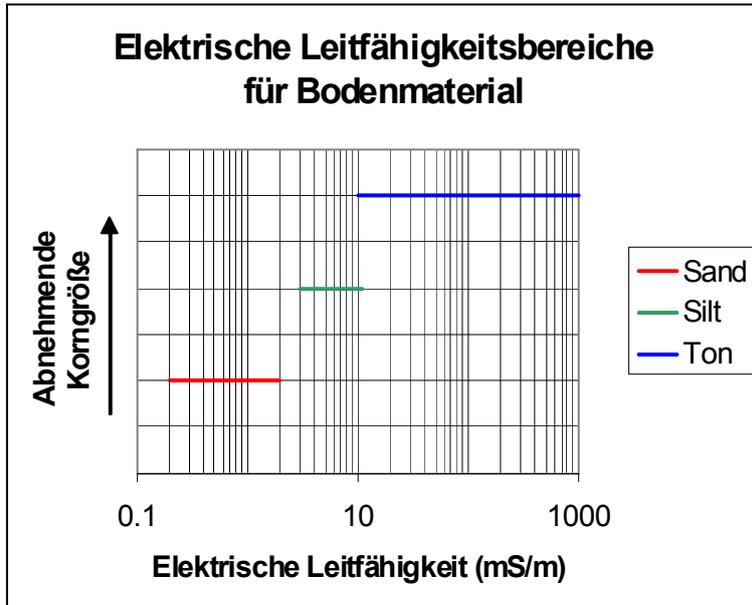


Abbildung 10: Elektrische Leitfähigkeitsbereiche für verschiedene Bodenmaterialien

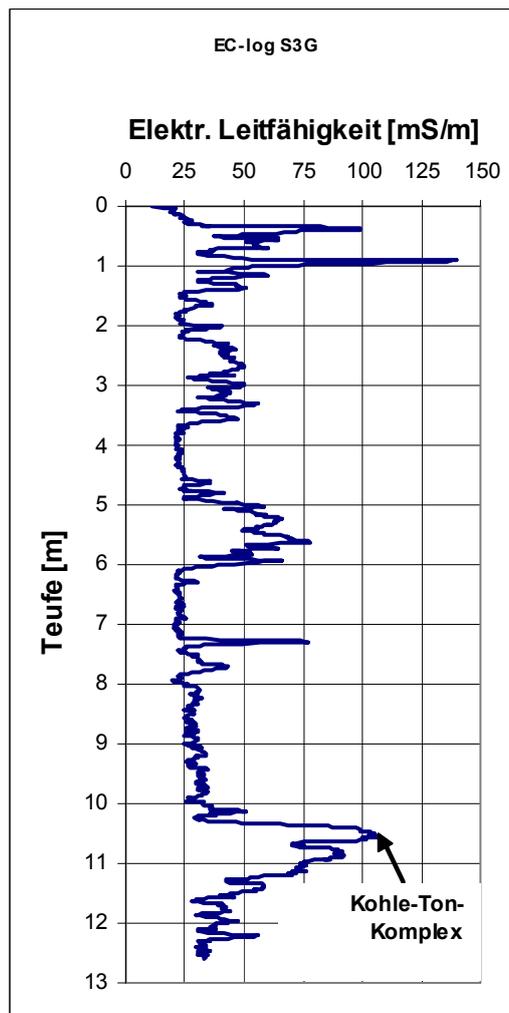
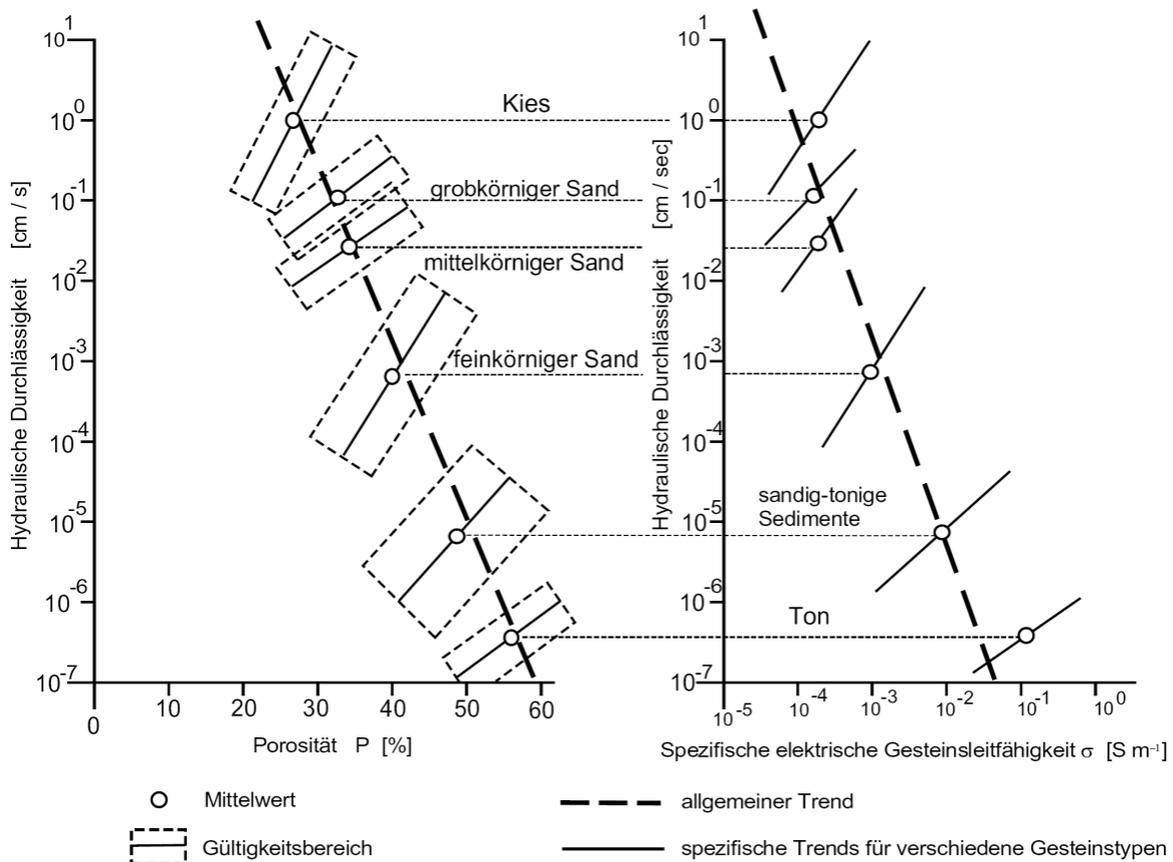


Abbildung 11: EC-Log (Leitfähigkeitsänderung gegen Teufe)



**Abbildung 12: Zusammenhang zwischen spezifischer elektrischer Leitfähigkeit und hydrogeologischen Parametern (nach Chouker, 1970)**

Die Ergebnisse der Leitfähigkeitssondierungen wurden datenbanktechnisch ausgewertet, interpretiert und als zusätzliche Informationen in das vorhandene Strukturmodell eingepflegt. Da es Ziel der Untersuchung war, für die jeweilige Sanierungsmethode die am besten geeigneten Standorte zu finden, wurden den verschiedenen Schichten des Strukturmodells hydraulische Leitfähigkeitswerte ( $k_f$ -Werte) zugeordnet. Informationen über die lokalen  $k_f$ -Werte lagen aus zurückliegenden Erkundungsergebnissen bereits vor (GFE GmbH, 2004). Diese wurden durch Säulenversuche und Pumpversuche gewonnen. Es folgte eine Zusammenfassung der Schichtansprache entsprechend ihrer hydraulischen Durchlässigkeiten in Materialklassen (Tabelle 4).

Kurzbezeichnung	Beschreibung	$k_f$ -Wert-Bereich [m/s], ca.-Angaben
Schotter	Schotter, Steine	$> 5 \cdot 10^{-3}$
Kies	Grobsand, gut sortiert bis Grobkies	$> 5 \cdot 10^{-4}$
Grobsand	Grobsand, normal bis schlecht sortiert oder/und schluffig, tonig	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$
Mittelsand	Mittelsand, grobsandig bis feinsandig-tonig	$1 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$
Feinsand	Feinsand, mittelsandig bis schluffig-tonig	$1 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$
Geschiebemergel	Geschiebemergel, Geschiebelehm, schluffig, tonig	$< 5 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-8}$
Schluff	Schluff (sandig bis tonig), Lehm, Löß	
Ton	Ton, Bänderton	$< 1 \cdot 10^{-9}$
Kohle	Kohle, kohleartige Gesteine	
Festgestein	hier: Basishemmer	

GICON, 2005

**Tabelle 4: Materialklassen und zugehörige hydraulische Durchlässigkeitsbereiche**

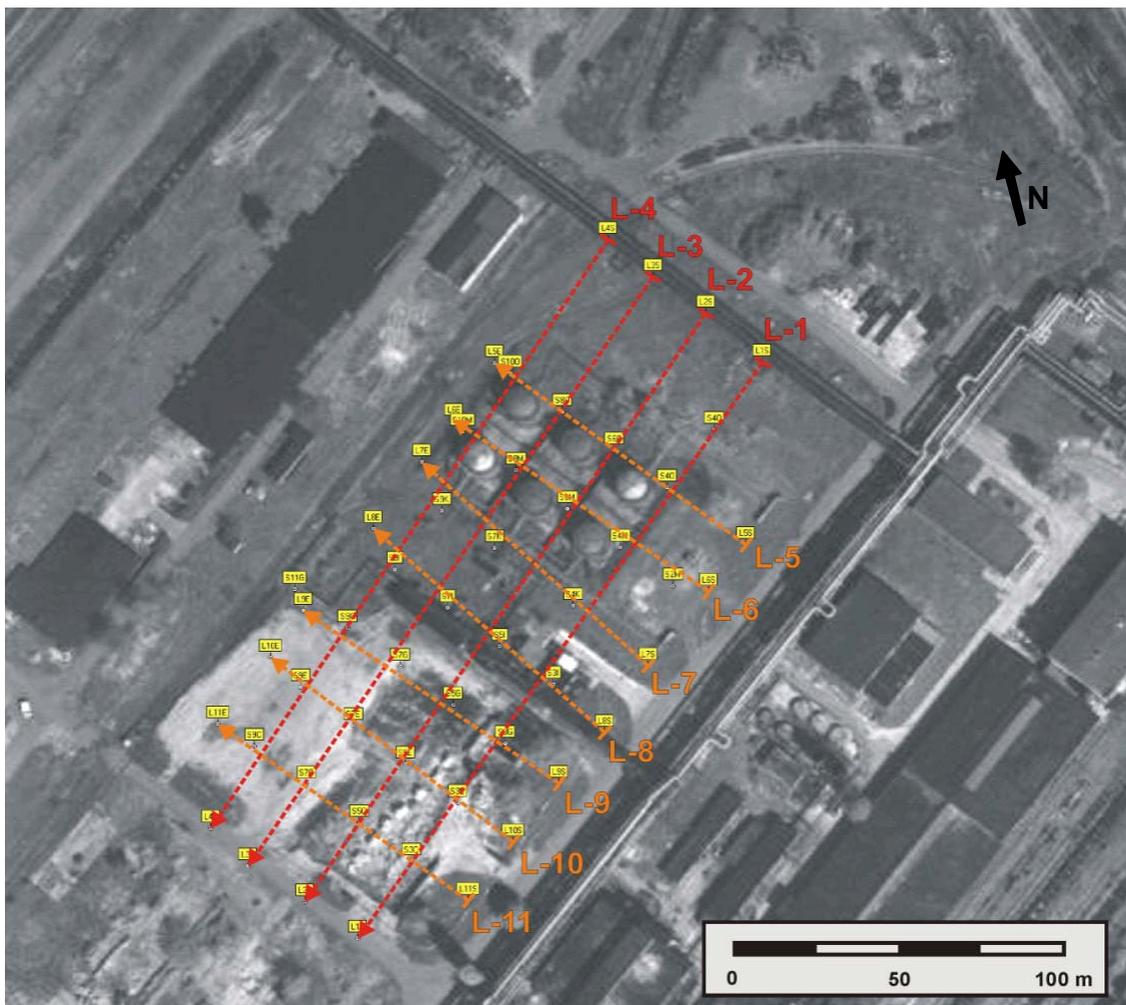
Als Konstrukteur der Dampf-Luft-Injektionsanlage wurden vom Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart Vorgaben für die möglichen hydraulischen Einsatzzonen des Verfahrens gemacht. Bei zu geringen Durchlässigkeiten kann keine Dampfausbreitung stattfinden. Ist der Untergrund hingegen zu durchlässig, so nimmt die Reichweite der Sanierungsmethode stark ab. Der bevorzugte Wirkungsbereich für die Injektion in der gesättigten Zone lag zwischen  $5 \cdot 10^{-6}$  und  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Im ungesättigten Bereich sind hydraulische Durchlässigkeiten von  $5 \cdot 10^{-6}$  bis  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s für ein gutes Ausbreitungsverhalten geeignet. Die Erwärmung des Untergrundes in der ungesättigten Zone ist in hydraulisch geringleitenden Bereichen auch durch elektrisch betriebene Heizlanzen möglich, da die Wärmeausbreitung hier über Konduktion erfolgt. Daher wurde diese Methode für hydraulische Leitfähigkeitsbereiche von  $1 \cdot 10^{-8}$  bis  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s vorgesehen.

Das mögliche Anwendungsfenster für die thermische Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion ist kleiner als beispielsweise das der Sanierung durch Radiowellen (GICON GmbH, 2005). Bei der ersten Methode müssen gewisse Durchlässigkeitsintervalle gegeben sein, die wiederum vom Sättigungsgrad des Untergrundes abhängig sind.

Auch die relative Lage und Mächtigkeit lithologischer Einheiten sind von Bedeutung. Ein weiterer bei der Auswahl eines geeigneten Sanierungsstandortes zu beachtender Aspekt ist der Einfluss sich im Sanierungszeitraum ändernder Grundwasserstände. Hierzu wurden Szenarien für niedrige, mittlere und hohe Grundwasserstände in die Berechnungen mit aufgenommen.

### ***Oberflächengeoelektrische Erkundung***

Zusätzlich zu den geophysikalischen Sondierungen auf festgelegten Rasterpunkten wurden gleichstromgeoelektrische Oberflächenmessungen auf der Fläche der ehemaligen Benzolanlage durchgeführt (Abbildung 13). Das Raster der Sondieransatzpunkte wurde als Stützgitter für die Oberflächenmessungen verwendet. Da es sich bei den Leitfähigkeitssondierungen und den Oberflächenmessungen prinzipiell um das gleiche Messverfahren handelt, war es sinnvoll, möglichst viele Schnittpunkte der beiden Messansätze zu erhalten.

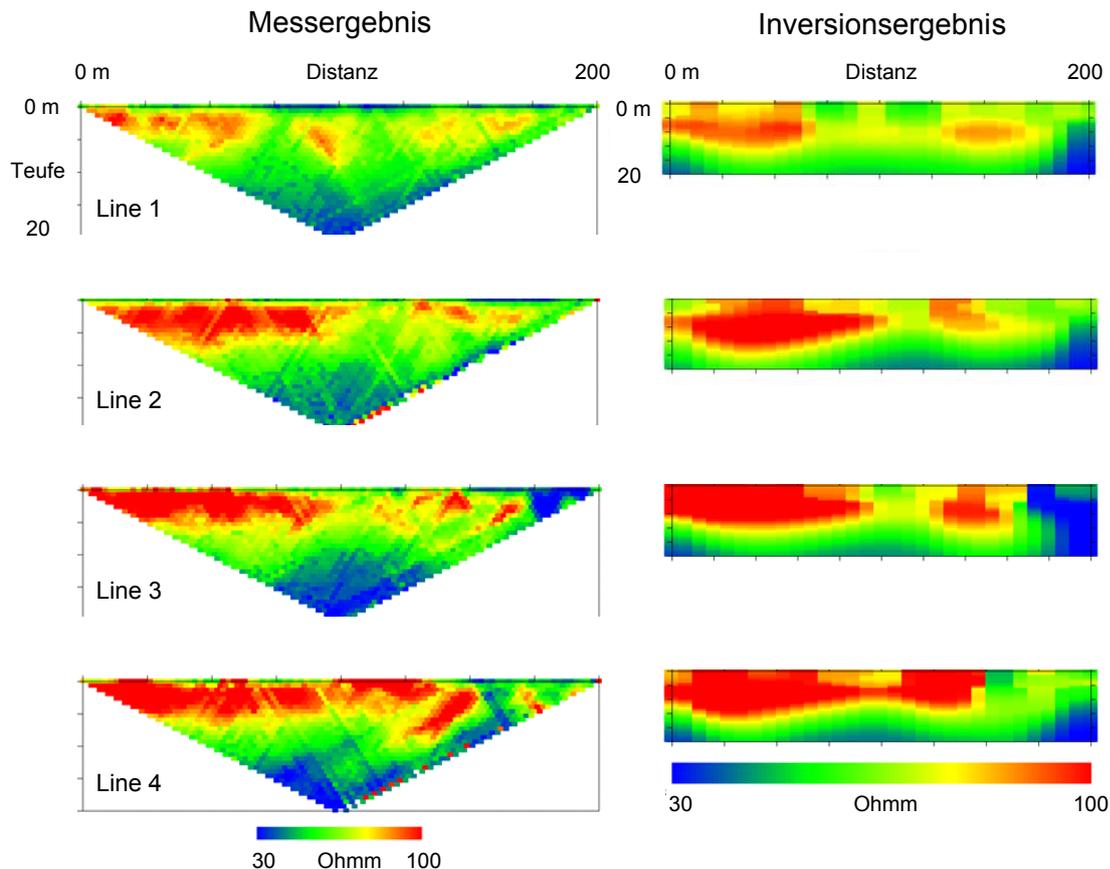


**Abbildung 13: Profillinien der gleichstromgeoelektrischen Oberflächenmessungen (Luftbild der Benzolanlage vor Rückbau)**

Oberflächengeoelektrische Messungen weisen eine deutlich schlechtere Datenqualität in den tieferen Untergrundschichten auf als in den oberflächennahen Bereichen. Daher war angedacht, durch das Einflechten der Leitfähigkeitsdaten aus tieferen Bereichen die Abdeckungsverluste auszugleichen.

Wie sich nach umfangreichen Auswertungsversuchen herausgestellt hat, konnten die beiden gewonnenen Datensätze leider nicht miteinander kombiniert werden. Der Erfassungsbereich der beiden Methoden sowie das innerhalb einer Messung herangezogene Volumen sind zu unterschiedlich. Individuell betrachtet, lieferten beide Messansätze plausible Ergebnisse. Die jeweils erfassten Daten unterschieden sich jedoch um Größenordnungen. Aus diesem Grund wurden die beiden Messansätze einzeln betrachtet und ausgewertet.

Während selbst geologisch aufgenommene Bohrungen nur Punktinformationen enthalten, so liefern geoelektrische Oberflächenmessungen entlang einer Profillinie 2-dimensionale Informationen. Werden entsprechende 2-dimensionale Profile parallel zueinander in nicht zu weiten Abständen vermessen, so erhält man „quasi 3-dimensionale“ Untergrundinformationen. Nach diesem Prinzip wurden auf dem Gelände der ehemaligen Benzolanlage oberflächengeoelektrische Messungen durchgeführt, die das Ziel hatten, weitere Informationen über die flächenhafte Verteilung der unterschiedlichen sedimentären Schichten zu erlangen (Abbildung 14).



**Abbildung 14: Mess- und Inversionsergebnisse ausgewählter Messungen mit Oberflächen-elektroden**

In Abbildung 14 sind die Pseudosektionen sowie die entsprechenden Inversionsergebnisse (nach Bearbeitung der Messdaten mit einer Processing-Software) von vier Längsprofilen dargestellt. Die Messungen decken mit einer Elektrodenauslage von 200 Metern annähernd die gesamte Länge der ehemaligen Benzolanlage ab. Bereits in den Abbildungen der Pseudosektionen treten beim Vergleich der nordöstlich zu den südwestlich gelegenen Bereichen deutlich unterschiedliche elektrische Widerstandsverhältnisse hervor. In den Inversionsergebnissen stellt sich ein ähnliches Bild dar. Gerade im hinteren (südwestlichen) Teil der Profile zeigen sich höhere elektrische Widerstände, was hier auf grobkörnigeres Material wie Sande und Kiese hinweist.

Betrachtet man die vier Längsprofile in ihrer Gesamtheit, so fallen nicht nur die Änderungen entlang der einzelnen Profile ins Auge, sondern auch eine quer zu den Profilen verlaufende elektrische Widerstandsentwicklung wird deutlich. Von Südosten nach Nordwesten gewinnt ein hochohmiger Bereich ( $> 100$  Ohmm) an Mächtigkeit.

Ist im Inversionsergebnis des ersten Profils noch ein niederohmiger Bereich (bis 60 Ohmm) zwischen 60 und 120 Metern auf dem Profil deutlich zu erkennen, so verkleinert sich diese Zone mit jeder weiteren Profilmessung Richtung Nordwesten. Die Abbildung von Profil 4 zeigt schließlich einen durchgängig hochohmigen Bereich auf der gesamten Profilstrecke zwischen 0 und 140 Metern. Dieser Bereich zeigt eine Mächtigkeit von 10 bis 15 Metern ab GOK. Lediglich im nordöstlichsten Teil von Profil 4 ist bis in eine Tiefe von 20 Metern nur Material mit geringen elektrischen Widerständen zu finden. Die elektrische Widerstandsverteilung lässt hier direkte Schlüsse auf die hydraulischen Verhältnisse auf dem Gelände der ehemaligen Benzolanlage zu. Somit ist in den nordwestlichen Teilen aufgrund der deutlich höheren Widerstandswerte mit grobkörnigeren Materialien zu rechnen, die sich in der Regel auch durch höhere hydraulische Leitfähigkeiten auszeichnen. In den südöstlichen Bereichen, vor allem in großen Teilen von Profil 1, zeigen sich geringe elektrische Widerstände, die meist durch feinkörnigeres Material mit höherem Schluff- und Tonanteil erzeugt werden und somit geringe hydraulische Leitfähigkeiten besitzen.

### ***Grundwasserbeprobung***

Eine Betrachtung des Strukturmodells unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Aspekte führte zur Auswahl von Teilflächen, auf denen die jeweilige Sanierungsmethode bevorzugt angewendet werden konnte. Das Verschneiden dieser Bereiche mit Zonen, die eine besonders hohe Schadstoffbelastung (hot spots) aufwiesen, führte dann zur Auswahl eines geeigneten Standortes für die thermischen Sanierungssysteme.

Informationen zu Schadstoffbelastungen im Bereich der gesättigten und ungesättigten Zone wurden durch verschiedene Erkundungskampagnen gewonnen. Wie bereits erwähnt, wurden als Informationsquelle historische Erhebungen der Zeitzer Standortgesellschaft (ZSG), Untersuchungen des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung im Rahmen des SAFIRA-Projektes und umfassende eigene Erkundungsarbeiten in den Jahren 2005/2006 genutzt.

Da im Rahmen des thermischen Sanierungsvorhabens vor allem aktuelle Daten von Interesse waren, wurde das Gelände der ehemaligen Benzolproduktion ab Herbst 2005 unter Verwendung moderner Direct-Push-Technologie erneut untersucht. Wie zuvor dargelegt, war es ein Ziel dieser Untersuchung, das Strukturmodell dieses Standorts zu konkretisieren; des Weiteren standen mit Direct-Push-Sondiergeräten neue Möglichkeiten der Grundwasserprobennahme zur Auswahl.

Hierbei war es möglich, *in situ*-Grundwasserproben zu entnehmen. Das traditionelle Vorgehen bei einer Grundwasserbeprobung setzt durch vorhandene Brunnen und Probennahmestellen die Beprobungspunkte fest. Weiterhin muss zur eigentlichen Beprobung in der Regel das Grundwasser durch eine Pumpe an die Oberfläche befördert werden. Hierbei kann bereits durch Druck- und Temperaturänderung sowie Verwirbelungen im Pumpengehäuse und Schlauchsystem eine Veränderung der Vor-Ort-Parameter erfolgen. Ebenfalls sind Verschleppungen beim Einsatz gleicher Ausrüstung an verschiedenen Probennahmepunkten zu befürchten.

Die Grundwasserprobenentnahme unter Zuhilfenahme von Direct-Push-Geräten erlaubt eine direkte Probenentnahme im Aquifer. Hierbei wird ein in einem Schutzgehäuse untergebrachter Edelstahl-Wickeldrahtfilter (SP 16) (Abbildung 15) an ein Sondiergestänge montiert, mit einer Einweg-Sondierspitze nach unten verschlossen und in den Untergrund eingebracht. Im Folgenden wird das Sondiergestänge unter der Eigenlast des Direct-Push-Gerätes in den Untergrund gedrückt. Wird der Bodewiderstand zu groß, so kann unter Einsatz eines im Sondierkopf eingebauten Perkussionshammers die Last vervielfacht werden.

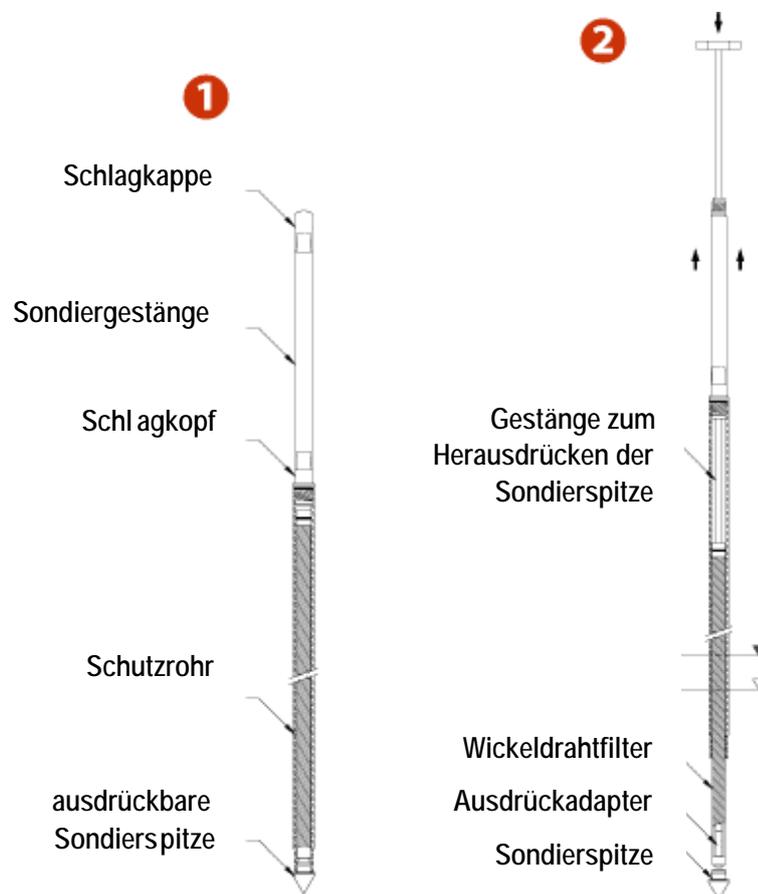


**Abbildung 15: Edelstahl- sowie PVC-Filter zur Grundwasserbeprobung mit Schutzgestänge (links), aus dem Sondiergestänge herausgedrückter Filter mit „verlorener“ Sondierspitze (rechts)**

Der während des Sondiervorgangs geschützte Probennahmefilter wird bis in die gewünschte Zieltiefe eingebracht. Anschließend kann mit einem in den Hohlraum des Sondiergestänges eingeschobenen Klappgestänge bei gleichzeitigem Zurückziehen des gesamten Sondiergestänges die Sondierspitze mit dem darüberliegenden Wickeldrahtfilter am unteren Ende herausgedrückt werden (Abbildung 16). Der Filter hängt nun frei in der gewünschten Formation und kann in der grundwassergesättigten Zone vom Grundwasser durchströmt werden, das gleichzeitig im Inneren des Sondiergestänges aufsteigt. Die Formation wird durch die auf

Materialverdrängung basierende Sondierung zwar gestört, jedoch ist der Umfang der Störung erheblich geringer als bei der Bohrung einer gewöhnlichen Grundwassermessstelle.

Die eigentliche Grundwasserprobenentnahme erfolgt mit einem dünnen Schlauch, der aus einem den vorliegenden Schadstoffen gegenüber resistenten Material besteht. Dieser Schlauch wird nach Entfernen des Klappgestänges in die hohlen Sondierstangen eingebracht. Am unteren Ende des Schlauches befindet sich eine aus Edelstahl gefertigte Fußventilpumpe, mit deren Hilfe durch eine rhythmische Auf- und Abbewegung Grundwasser ohne größere Verwirbelung an die Oberfläche gefördert wird.



**Abbildung 16: Aufbau und Funktionsweise des SP16-Grundwasserprobennehmers**

Alternativ kann bei ausreichendem Flurabstand auch eine an den Probennahmeschlauch angeschlossene Peristaltikpumpe verwendet werden.

Um eine Verschleppung von Schadstoffen zwischen den verschiedenen Ansatzpunkten zu verhindern, sollte der Entnahmeschlauch ausgetauscht oder gereinigt werden. Aufgrund des geringen Materialaufwandes dieser Art der Grundwasserbeprobung ist diese recht einfach und kostengünstig durchführbar.

Da es durch die Sondierung zu einer Kompression des Bodenmaterials gekommen ist, werden die ersten Liter nach Beginn der Probennahme verworfen. Diese haben in der Regel beim Aufstieg im Probennahmeschlauch durch den Temperaturkontrast eine Temperaturänderung erfahren und zeigen eine deutliche Trübung. Während des Abpumpens werden Vor-Ort-Parameter wie die spezifische elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Temperatur, Redoxpotential und pH-Wert gemessen. Sobald diese Parameter einen konstanten Wert erreicht haben, wird eine Probe entnommen und abgefüllt. Je nach vorliegendem Kontaminant kann noch eine organoleptische Ansprache vorgenommen werden.

Die Proben werden schnellstmöglich verschlossen, um Reaktionen mit der Atmosphäre zu vermeiden und bis zur Analyse lichtgeschützt und gekühlt gelagert. Die Schadstoffanalyse wird im Labor mittels Gaschromatographie durchgeführt. Hierbei wird die Probe zum Teil verdampft, d. h. der Schadstoffgehalt der Probe wird nicht direkt in der flüssigen Phase gemessen, sondern in der Gasphase. Da die Transferkoeffizienten der verschiedenen Stoffe bekannt sind, wird die Konzentration in der flüssigen Phase zurückgerechnet.

Bei der Durchführung einer Grundwasserprobennahme an einer regulären Messstelle muss, sofern ein längerer oder mehrere Filterbereiche vorliegen, unter- und oberhalb eines jeden Probennahmeintervalls ein Packer eingebaut werden, um Vertikalströmungen innerhalb des Brunnens zu verhindern. Die direkte Probenentnahme im Aquifer mittels SP16 und Direct-Push-Technik erlaubt hier ein erheblich einfacheres Vorgehen. Der aus dem Sondiergestänge ausschiebbare Filter kann auf seiner gesamten Länge von ca. 100 cm genutzt werden, jedoch kann durch Abdecken des entsprechenden Filterbereiches die Filterstrecke beliebig eingestellt werden. Dies ermöglicht eine tiefenhorizontierte Beprobung, die durch die bis auf den Zentimeter exakt bestimmbare Tiefe des Filters ermöglicht wird. Gerade im Bereich des Grundwasserspiegels ist dies bei vorliegender aufschwimmender Schadstoffphase von Vorteil.

Ein weiterer Vorzug dieser Probennahmetechnik ist die Möglichkeit, im Verlauf eines Sondiervorganges in verschiedenen Tiefenhorizonten Grundwasserproben zu entnehmen. Da beim Zurückziehen des Sondiergestänges im gesättigten Bereich des Untergrundes das Gebirge unterhalb des Sondierstranges aufgrund geringerer



die Probennahmetiefe und die mit einem Farbcode versehene Schadstoffklasse für BTEX dargestellt. Als Schadstoff wird der Summenparameter BTEX angegeben, wobei als Hauptkontaminant in allen Proben Benzol vorliegt (> 95%).

Wie Abbildung 17 zeigt, sind die Schadstoffe recht gleichmäßig über das Gelände der ehemaligen Benzolproduktion verteilt. Zwischen einigen Probennahmehorizonten sind immer wieder Bereiche zu finden, in denen keine Grundwasserproben entnommen werden konnten, obwohl sie sich innerhalb des grundwassergesättigten Bereiches befinden. Der wahrscheinlichste Grund hierfür ist die geringe Ergiebigkeit innerhalb bindiger Schichten wie z. B. Tonlinsen und dem Braunkohle-Ton-Komplex. Die Horizonte, bei denen eine Probennahme möglich war, weisen BTEX-Konzentrationen von wenigstens 500 µg/L auf. Der Großteil der Proben zeigt jedoch Konzentrationen zwischen 1000 und 5000 µg/L und darüber. Vor allem der Bereich des ehemaligen Tanklagers und des Pumpenhauses weist annähernd durchgehend Konzentrationen von über 5000 µg/L auf.

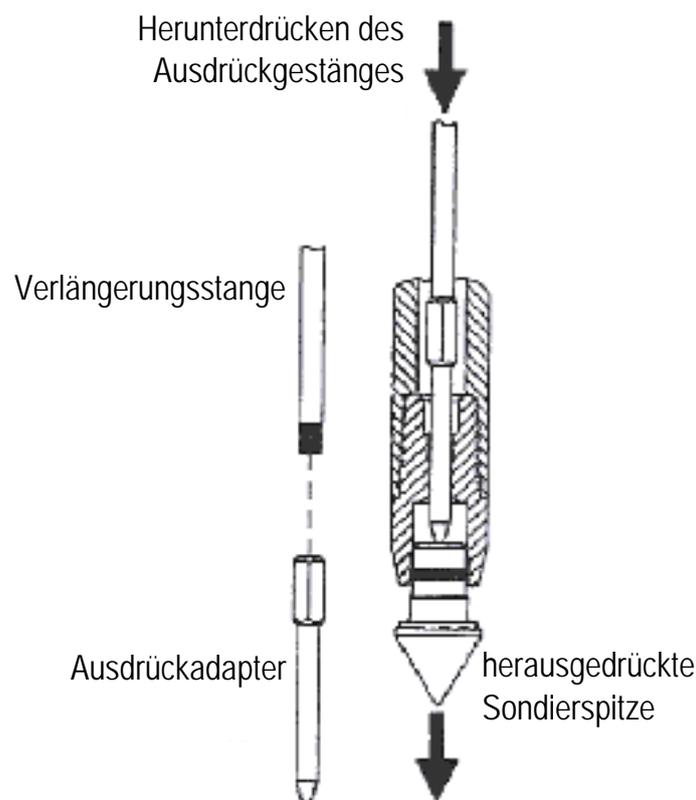
Entscheidend für die Auswahl der Standorte der thermischen Sanierungsanlagen ist jedoch nicht ausschließlich die Schadstoffkonzentration, sondern auch die an die Anlagenkonstruktion geknüpfte Untergrundanbindung. Da es sich bei diesem Projekt um einen Piloteinsatz handelte, sollte ein idealer Standort ausgewählt werden, um mögliche Limitationen der Sanierungsmethode frühzeitig erkennen zu können. Eine nicht optimal platzierte Sanierungsanlage würde möglicherweise nicht klar zu erkennen geben, ob eine unvollständige Abreinigung konstruktionsbedingt oder durch eine schlechte Untergrundanbindung zu erklären ist.

### ***Bodenluftbeprobung***

Die Entnahme von Bodenluftproben kann zusätzliche Informationen zu den Kontaminationsverhältnissen an einem Standort liefern. Hierbei wird in der Regel Luft aus dem Untergrund abgesaugt und an der Oberfläche in speziellen Luftprobenbeuteln aufgefangen. Diese werden dann in einem Labor mittels Gaschromatographie auf die Inhaltsstoffe untersucht. Bodenluftproben sind in der Regel nicht gleichermaßen aussagekräftig wie Grundwasser- oder Feststoffproben, jedoch ein guter Indikator für eine mögliche Boden- und Grundwasserkontamination. In Abhängigkeit von der Probennahmekonfiguration ist es schwer abzuschätzen, aus welchem Untergrundvolumen die eigentliche Probe entnommen wird. Hier sind vor allem die Pumprate und die Durchlässigkeit des Untergrundes entscheidende Faktoren. Bei Vorliegen präferentieller Fließpfade wie zum Beispiel Wurmgänge und Wühlmauslöcher kann die Probe aus zum Teil weiter entfernten Bereichen als zunächst erwartet herangesaugt werden. Prinzipiell gelten die gleichen

Voraussetzungen wie bei einer Grundwasserprobennahme, jedoch weisen die hydraulischen Gegebenheiten in gesättigter und ungesättigter Zone große Unterschiede auf. Die Methode eignet sich daher eher für qualitative als für quantitative Aussagen. Werden Bodenluftproben im Bereich des Grundwasserspiegels entnommen, so kann bei hochvolatilen im Grundwasser gelösten Schadstoffen ein Übergang in die Gasphase erfolgen, was zu erhöhten Konzentrationen in der Bodenluft führt.

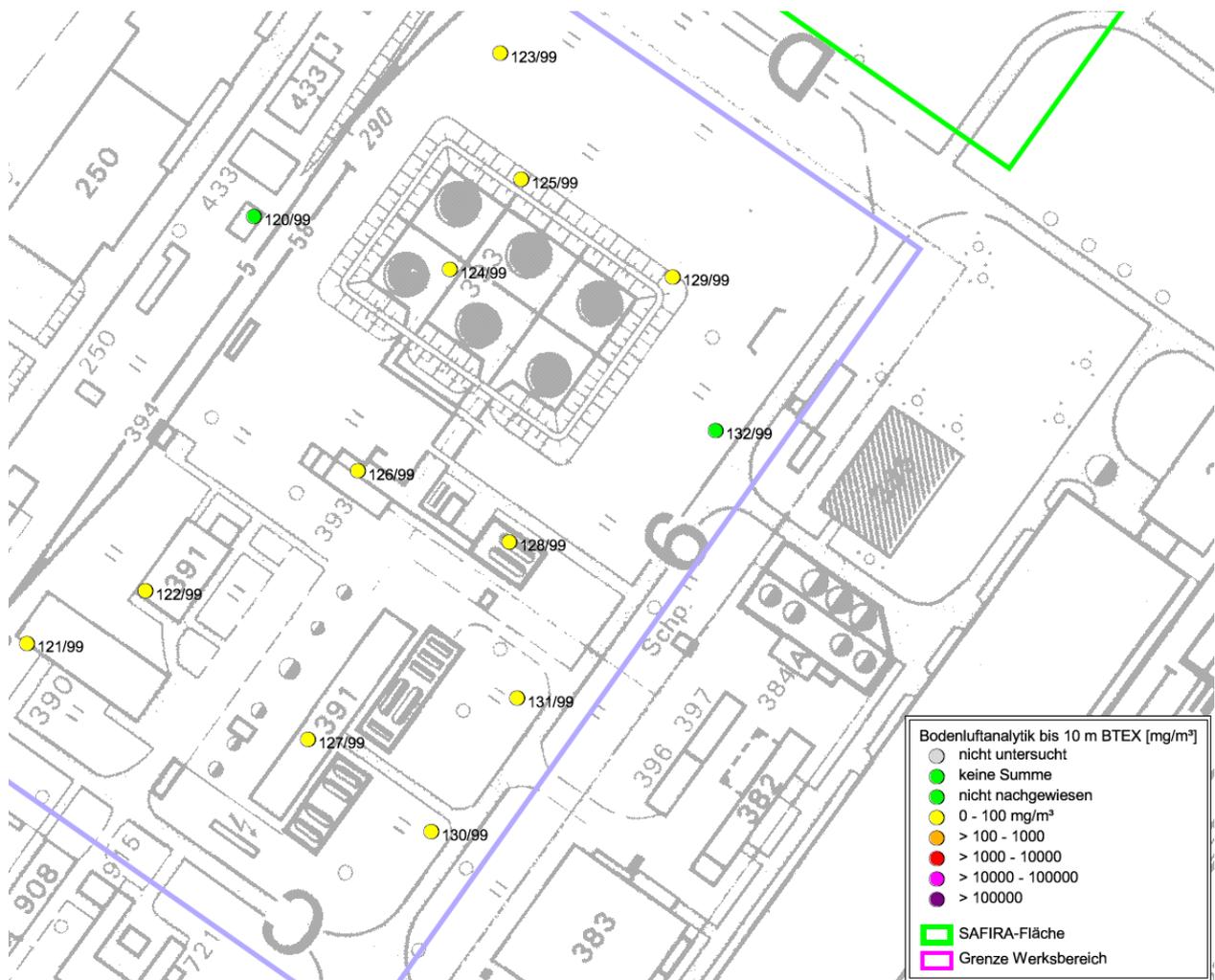
Die Entnahme von Bodenluftproben unter Verwendung von Direct-Push-Technologie bringt ähnliche Vorteile wie die der bereits erwähnten Grundwasserprobennahme. Bei Bodenluftprobennahmen wird ebenfalls ein hohles Sondiergestänge in den Untergrund abgeteuft, das den Zugang zur Sondenspitze erlaubt. Die Sondenspitze besteht aus einem Probennahmeport, der ähnlich dem Vorgang bei der Grundwasserprobennahme mittels Klappgestänge durch gleichzeitiges Zurückziehen des Sondiergestänges herausgeschoben werden kann (Abbildung 18).



**Abbildung 18: Aufbau und Funktionsweise einer Sondierspitze zur Bodenluftbehebung**

Hierbei kann auch die Öffnungsweite des Probennahmeports geregelt werden. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass genau festgelegt werden kann (mit Genauigkeit im Zentimeterbereich), in welcher Tiefe die Probe entnommen wird. Durch die definierte

Öffnungsweite des Ports und das damit verbundene geringe Probennahmenvolumen ist die Gefahr des Heransaugens von Bodenluft aus weiter entfernten Bereichen erheblich geringer als bei Probennahmen in regulären Messpegeln. Bei traditionellen Beprobungsmethoden muss in der Regel, wie auch bei der Grundwasserprobennahme, ein Packersystem verwendet werden. Eine luftdichte Abpackerung ist jedoch nicht immer gewährleistet und schwer zu kontrollieren.



GICON, 2005

**Abbildung 19: Bodenluftanalytik im Bereich der ehemaligen Benzolanlage**

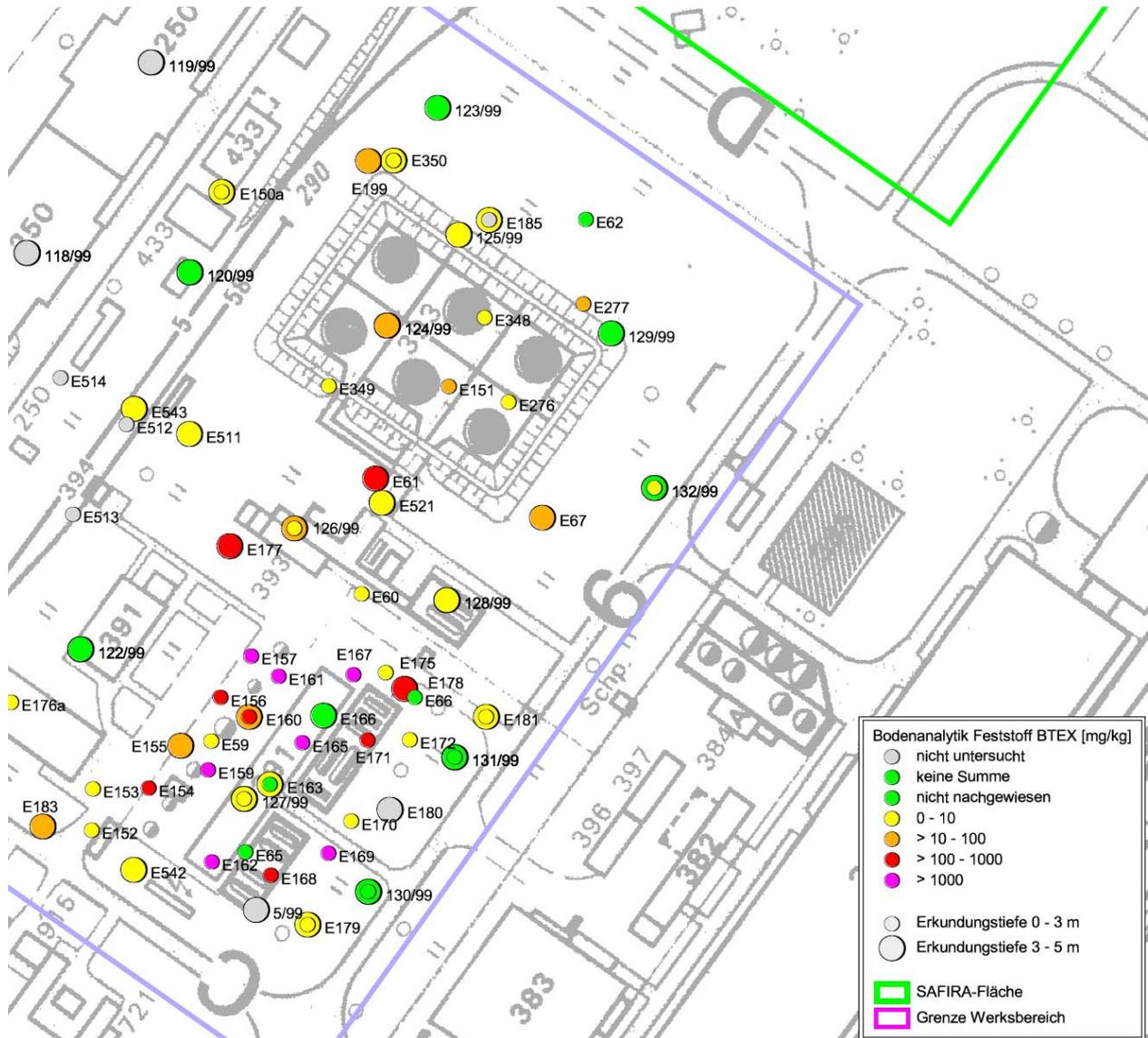
Die Bodenluftproben auf dem Gelände der ehemaligen Benzolproduktion wurden auf traditionellem Weg, also durch Absaugen an vorhandenen Messpegeln und Brunnen sowie mit dem innovativen Verfahren der Direct-Push-Technologie vorgenommen. Aufgrund der unterschiedlichen Entnahmemethoden und damit beprobten Boden volumina sind die gewonnenen Messwerte nur unter Vorbehalt vergleichbar.

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der Beprobung an vorhandenen Messstellen, die auf dem Gelände der ehemaligen Benzolproduktion und im nahen Umfeld lokalisiert sind. Die Messdaten wurden im Rahmen einer großflächigen Erkundung Mitte der 90er Jahre in der Datenbank der Zeitzer Standortgesellschaft erfasst. Die Messwerte der Proben die auf der Produktions- und Lagerfläche entnommen wurden, liegen für die Schadstoffgruppe der BTEX im Bereich zwischen 0 und 100 mg/m<sup>3</sup>. Im Bereich außerhalb konnte mittels Bodenluftbeprobung kein Schadstoff nachgewiesen werden. Wie die Messwerte zeigen, liegt eine durchaus ernstzunehmende Kontamination des Untergrundes vor. Wie zuvor erwähnt, bieten die Methoden der Grundwasser- und Feststoffbeprobung höhere Aussagequalität und wurden daher bei der Testfeldauswahl bevorzugt behandelt.

Weitere Bodenluftbeprobungen wurden im Rahmen der Sanierungskontrolle durchgeführt. Sie sollten den während der thermischen Sanierung fortschreitenden Rückgang der Benzolkonzentrationen in der Bodenluft verifizieren. Hierbei wurde die Schadstoffkonzentration in einem zeitlichen Rhythmus von 1 bis 3 Stunden über einen Prozess-Gaschromatographen mit Photo-Ionisationsdetektor (GC-PID) bestimmt. Der GC-PID wurde in den Steuerungscontainer der thermischen Sanierungsanlage integriert und vollautomatisch gesteuert. Der Bodenluftvolumenstrom (> 300 mL/min) wurde an einer im Sanierungsfeld installierten Probennahmestelle permanent entnommen, überströmte die Messschleife des Gaschromatographen und wurde anschließend in den Hauptstrom der während der Sanierung betriebenen Bodenluftabsaugung zurückgeführt (Trötschler *et al.*, 2008).

### ***Feststoffbeprobung***

Die Untersuchungsfläche kann als grundsätzlich gut erkundet bezeichnet werden. Im Rahmen der zur Gefährdungsabschätzung durchgeführten Untersuchungen der Zeitzer Standortgesellschaft wurde eine Vielzahl von Boden-, Bodenluft- und Grundwasserproben entnommen. Gerade die Untersuchung von Feststoffen aus der ungesättigten Zone, brachte umfassende Erkenntnisse über die Belastungssituation (Abbildung 20).



GICON, 2005

**Abbildung 20: Bodenanalytik von Feststoffproben im Bereich der ehemaligen Benzolanlage**

Bei anschließenden auf dem Gelände durchgeführten Bohrarbeiten konnten durch organoleptische Ansprachen regelmäßig hohe Schadstoffgehalte ermittelt werden. Obwohl der Großteil der Feststoffuntersuchungen bereits einige Jahre zurückliegt, ist den Erkenntnissen der nachfolgenden durchgeführten Ansprachen nach weiterhin eine erhebliche Belastungen des Untergrundes vorhanden. Die Schadstoffe sind im Wesentlichen in bindigen oder auflagernd auf hydraulisch gering durchlässigen Schichten zu finden, beschränken sich jedoch keineswegs auf diese Bereiche.

Während der Bohrmaßnahmen zur Erschließung des Sanierungsfeldes wurden erneut Bodenproben in Form von Mischproben aus den Tiefenbereichen 3-5 m, 5-7 m, 7-9 m, 9-10 m und 9-11 m entnommen und in einem akkreditierten Labor analysiert. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass ein genereller Trend für höhere

Schadstoffkonzentrationen im Bereich des oberen Grundwasserleiters (9-10 m Tiefe) ausgemacht werden kann (Trötschler *et al.*, 2008). Hier lagen die Konzentrationen zwischen < 50 und ca. 400 mg/kg Boden. Generell liegen die Spannweite der Schadstoffverteilung unerwartet hoch und das Niveau der Schadstoffkonzentrationen deutlich tiefer als erwartet. Ein volumengewichteter Durchschnitt der Bodenproben im Sanierungsbereich erbrachte in der Summe BTEX-Konzentrationen von 61 mg/kg. Der Hauptbestandteil lag hierbei mit Benzol bei 54 mg/kg.

Da diese niedrigen Schadstoffkonzentrationen überraschten, wurde vom Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart ein Versuch zur Bestimmung der probennahmebedingten Verlustrate durchgeführt. Weiterhin wurden Lagerungseffekte untersucht. Hierbei wurde der leichtflüchtige Hauptkontaminant Benzol gezielt in Feinsand eingebracht, durchmischt und in Probennahmeflaschen verschlossen. Ein Teil der Probe wurde direkt analysiert, ein anderer Teil wurde zur Minimierung der Ausgasungsverluste mit einer bindigen Schluffabdeckung versehen und ein dritter Teil ohne Abdeckung gekühlt gelagert. Es zeigte sich, dass alleine durch Öffnen, Umfüllen und Vermischen der Probe Ausgasungsverluste von bis zu 75% auftreten können. Die Schluffabdeckung konnte eine Ausgasung ebenfalls nicht verhindern. Hier lagen die Verluste bei 98%. Im Laufe der gekühlten Lagerung gingen rund 90% des eingebrachten Benzols verloren.

Dieses Experiment zeigte, dass die Probenentnahme und Handhabung einen erheblich höheren Einfluss auf die Analyseergebnisse haben als Messungenauigkeiten, die zudem leichter nachvollziehbar sind.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchung wurden in die Ergebnisse der Beprobung am Standort eingebunden. Es wurde von einer Verlustrate durch Benzol ausgasung von 90% ausgegangen, denn dieser Wert entspricht den realistischen Vor-Ort-Bedingungen was die Probennahme (Probe mit Schluffabdeckung) und die anschließende Lagerung (Kühlung) betrifft.

### ***Standortauswahl in Abhängigkeit der Kontaminationsverteilung***

Für die Auswahl eines geeigneten Standorts waren verschiedene Faktoren von Bedeutung. Die Untergrundbedingungen mussten in einem für die thermische Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion anwendbaren Rahmen liegen. Das bedeutet, es müssen entsprechende hydraulische Durchlässigkeitsbereiche jeweils für die gesättigte sowie ungesättigte Zone vorhanden sein. Da es sich bei der Sanierungsmethode um ein Verfahren zur Abreinigung von Kontaminationsquellen handelt, müssen erhebliche Schadstoffbelastungen in den entsprechenden Untergrund-

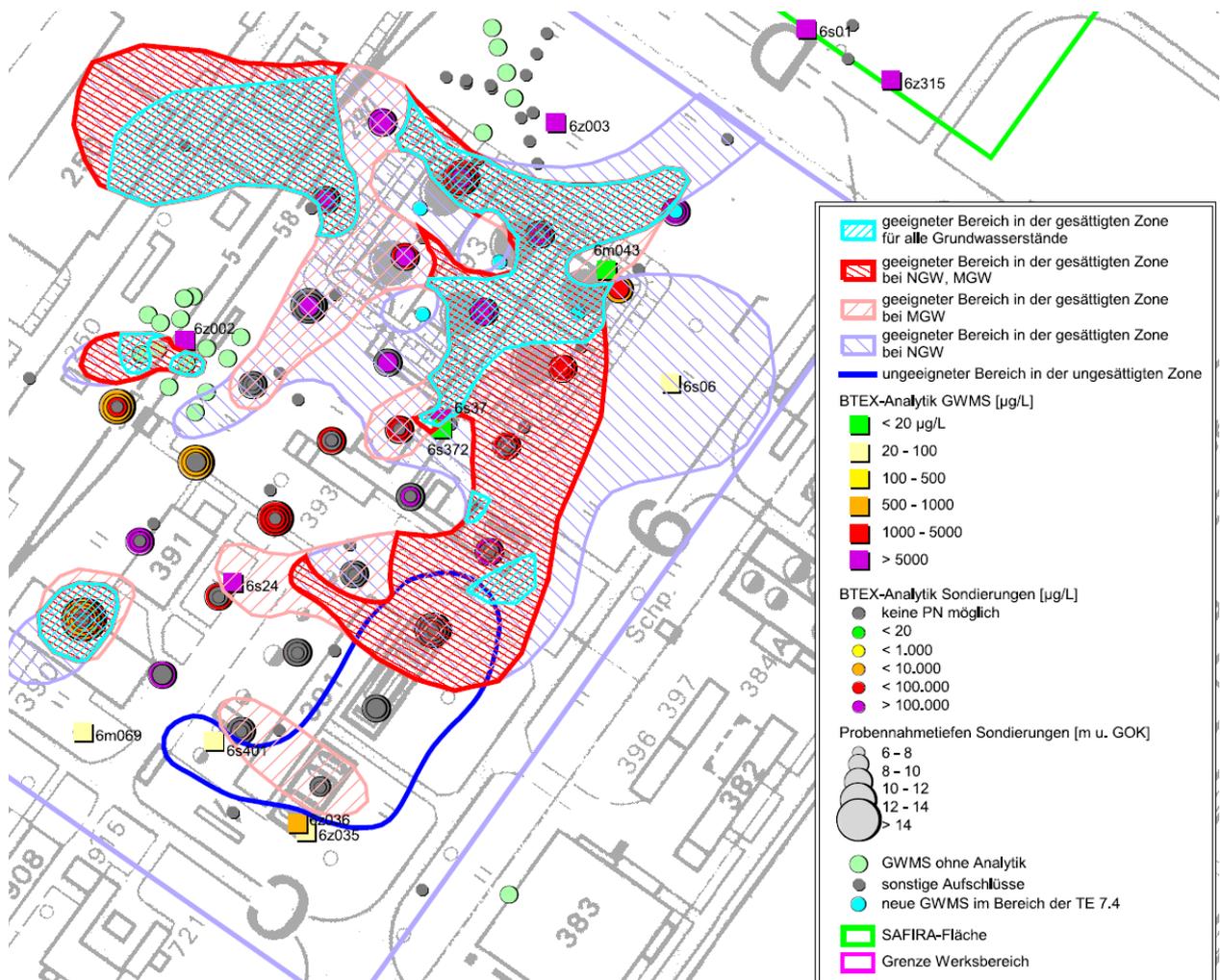
horizonten vorliegen. Weiterhin müssen die örtlichen Grundwasserschwankungsbereiche beachtet werden, da die Installation der Injektions- und Extraktionsbrunnen individuell an die gesättigten und ungesättigten Bereiche geknüpft ist. Folgende Rahmenbedingungen mussten am vorliegenden Standort für den Einsatz der thermischen Sanierungsanlage erfüllt werden (GICON, 2005; Trötschler *et al.*, 2008):

- Durchlässigkeit der gesättigten Zone  $5 \cdot 10^{-4}$  bis  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s
- Durchlässigkeit der ungesättigten Zone  $5 \cdot 10^{-3}$  bis  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s
- Filterlänge der Injektions- und Absaugbrunnen 1 bis 3 m
- max. Einbautiefe der Injektionsbrunnen ca. 12 m u. Gelände
- Filter Injektionsbrunnen bei NGW (Niedriggrundwasser) noch in gesättigter Zone
- Filter Absaugbrunnen bei HGW (Hochgrundwasser) noch in ungesättigter Zone
- Mächtigkeit hemmender Materialien (Schichtmächtigkeiten) max. 1 m
- erhebliche Schadstoffbelastungen im Grundwasser und Boden (Phasenkörper, Grundwasserbelastungen im Bereich der Löslichkeit, Bereiche residualer und / oder überströmter Phasen)
- möglichst oberflächennahe Überdeckung mit hemmenden Materialien

Die Auswahl des Sanierungstestfeldes erfolgte anhand eines 3-dimensionalen Strukturmodells. In das Modell wurden alle verfügbaren Informationen und Daten aus den zuvor erwähnten Untersuchungen integriert. Hierzu zählen Strukturinformationen aus Bohrungen, Leitfähigkeitssondierungen sowie Analysedaten aus Grundwasser-, Feststoff-, Bodenluftproben. Für verschiedene Grundwasserstandsszenarien wurden die räumlichen Einsatzgrenzen der Dampf-Luft-Injektionsmethode bestimmt. Abbildung 21 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung. Bei mittleren und niedrigen Grundwasserständen ist eine Anwendung vor allem im nordöstlichen Teil der Fläche (Tanklager) bis in den Bereich der ehemaligen Distex-Anlage möglich. Die blau markierte Zone im Bereich der ehemaligen Distex-Anlage eignet sich aufgrund hydraulisch geringleitender Schichten nicht für diese Sanierungsmethode. In diesem Bereich war keine Grundwasserprobennahme möglich, so dass Informationen über Grundwasserschadstoffbelastungen nur aus einem benachbarten Brunnen gewonnen werden konnten.

Bei dauerhaft mittleren Grundwasserständen vergrößert sich der Anwendungsbereich der Sanierungsmethode auf die nordwestlichen Teile des ehemaligen Tanklagers und schließt weitere Teile im Zentrum des Geländes ein. Der bevorzugte Einsatzbereich für die Sanierungsmethode liegt in einer Zone, die unter allen wahrscheinlichen Grundwasserständen eine erfolgreiche Sanierung zulässt. Hierzu

zählt vor allem eine Zone im Bereich des ehemaligen Pumpenhauses. Die hydrogeologischen Gegebenheiten und die aus den Erkundungen hervorgegangene Schadstoffbelastung weisen diesen Bereich als favorisierbar gegenüber alternativen Lokationen aus. Im nordöstlichen Teil des Geländes sind ebenfalls Bereiche zu finden, die als Standort in Frage kommen; jedoch ist hier bereits ein Pilotversuch für eine Air-Sparging-Sanierungsanlage geplant. Um während der Sanierung eine gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Sanierungskonzepte zu verhindern, bietet sich der zuvor genannte Standort im Bereich der ehemaligen Distex-Anlage an. Ein weiterer Vorteil dieses Standortes ist die hier bereits vorhandene Medienanbindung. Die in den Leitungstrassen der angrenzenden Dr.-Pier-Straße vorhandenen Strom-, Wasser-, Abwasser- und Telefonleitungen können relativ leicht an das Containersystem der Sanierungsanlage angebunden werden.



GICON, 2005

Abbildung 21: Auswahl von Eignungsbereichen für thermische Sanierungsverfahren

## 5. Thermische Sanierungstechnologien

### **Einführung**

In vielen Fällen der *in situ*-„hot-spot“-Sanierung ist eine technisch und finanziell kurzfristig aufwändige Sanierungsmethode oft attraktiver als lang andauernde Methoden. Zu letzteren zählen Ansätze wie Natural Attenuation, Enhanced Natural Attenuation, Pump and Treat, Air Sparging, reaktive Wände und Soil-Vapour-Extraction. Diese und ähnliche Prozesse sind vor allem bei kleinräumigeren Kontaminationsfällen mit geringeren Schadstoffbelastungen erfolgreich. Da diese Methoden technisch einen meist geringeren Aufwand darstellen, erscheinen sie oft günstiger. Erfahrungen beim Einsatz solcher Anlagen haben jedoch oft gezeigt, dass der mit der jeweiligen Methode verbundene Arbeitsaufwand in Kombination mit der langen Anwendungsdauer oft höhere Kosten verursacht als eine kostenintensive, aber schnelle Sanierung (Finkel *et al.*, 2007). Des Weiteren bilden lang andauernde Sanierungsmethoden oft ein Hindernis für die Neuansiedlung von Gewerbe und Industrie, da kein Investor das Risiko des Kaufes einer Fläche mit kontaminiertem Untergrund eingehen will.

Bei thermischen Sanierungsmethoden handelt es sich um Ansätze, die durch eine aktive Untergrunderwärmung Schadstoffe mobilisieren, verfrachten und eine Extraktion an der Oberfläche erleichtern. Häufig weisen Boden, Sedimentschichten, Aquifer und das Grundwasser selbst eine hohe Wärmekapazität auf, d. h. es sind große Energiemengen nötig, um diese zu erwärmen. Daher handelt sich bei thermischen Sanierungen meist um energieintensive und damit kostenaufwändige Verfahren.

Aus diesem Grund finden thermisch unterstützte Sanierungen in der Regel nur an Standorten mit hinreichend bekannten Informationen der Untergrundkontamination statt. Dies bedeutet, es müssen umfassende Kenntnisse über Umfang, Ausmaß und Kontaminationsgrad sowie das Schadstoffspektrum vorhanden sein. Weiterhin sind Informationen zur Standortgeologie und Aquifercharakteristik zur Auswahl der effizientesten thermischen Sanierungsmethode notwendig.

Verschiedene Ansätze zur thermischen Einflussnahme auf den Untergrund und das Grundwasser sind verfügbar (Altlastenforum Baden Württemberg e.V., 2001). Gemeinsam ist allen das Ziel, den Untergrund so weit zu erwärmen, dass es zu einer deutlichen Mobilisierung der Kontaminanten und deren Übergang in die Gasphase kommt. Die jeweilige zu erreichende Temperatur ist dabei abhängig von der Untergrundstruktur, dem Grundwasserregime und den Eigenschaften des vorliegenden Schadstoffes.

### **Elektrische Heizlanzen**

Eine der technisch einfacheren Methoden ist die Verwendung von Thermolanzen. Hierbei werden elektrisch beheizbare Metallgestänge in den Untergrund eingebracht. Dadurch können Temperaturen von 500 °C erreicht werden. Ein Vorteil dieser Methode ist ihr einfacher Aufbau und die simple Steuerung. Es werden oberflächlich ausschließlich Anschlussleitungen für die Heizlanzen benötigt, die mit einem Steuerungsgerät verbunden werden. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist die beschränkte Anwendbarkeit in der gesättigten Zone. Befinden sich Heizlanzen im Grundwasser, so wird der Großteil der eingebrachten Gesamtenergie zur Erwärmung des Grundwassers verwendet, welches dann verdampft, aufsteigt und wieder kondensiert. Eine weiträumige Erwärmung kann auf diese Weise nicht stattfinden. Die Methode wird daher in der Regel nur in der ungesättigten Zone angewendet; hier vor allem auch als Vorbereitung einer Dampf-Luft-Injektion, die aufgrund von ungünstiger Untergrundcharakteristik sonst nicht ideal durchgeführt werden kann. Um eine Dampf-Luft-Ausbreitung im Untergrund zu ermöglichen, sind gute hydraulische Verhältnisse nötig. Befinden sich bindige Schichten wie Ton- und Kohlelagen im Untergrund, so behindern diese eine Ausbreitung aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit. Kommen bindige Lagen in der ungesättigten Zone vor, so können diese durch das Einbringen und Betreiben von elektrischen Heizlanzen durchgängig gemacht werden. Da selbst in der ungesättigten Zone Materialien einen gewissen natürlichen Wassergehalt aufweisen, kann dieser mit Hilfe der Heizelemente verdampft werden. Hierbei kommt es vor allem bei Tonen zu Schrumpfungsvorgängen, die zur Bildung von Rissen führen. Diese Risse können dann in einer zweiten Sanierungsphase von den im Untergrund verdampften Schadstoffen als Wegsamkeit genutzt werden und gasförmiger Schadstoff kann in darüberliegende, hydraulisch besser durchlässige Schichten vordringen.

### **Radiowellen-Technik**

Eine weitere thermische Sanierungsmethode, die sich jedoch noch in der Entwicklungsphase befindet, ist die Untergrunderwärmung mittels Radiowellen. Auch hier ist das Ziel die Mobilisierung und das Austreiben leicht- und mittelflüchtiger Schadstoffe. Bei diesem Verfahren erfolgt der Energieeintrag und damit die Erwärmung durch das Erzeugen von Radiowellen im Untergrund. Es ist dem Funktionsprinzip einer Haushaltsmikrowelle vergleichbar, bei der die Wassermoleküle durch den Eintrag von Mikrowellen zu Schwingungen angeregt werden. Diese Bewegungsenergie wird in Wärme umgewandelt. Das Verfahren kann in der gesättigten sowie ungesättigten Zone Anwendung finden. Für die beiden Zonen ist aus energetischen Gründen das Erzeugen von verschiedenen Radiowellenfrequenzen nötig. Der gleichzeitige Betrieb ist jedoch möglich. Da durch die Erwärmung kein Druckgradient erzeugt wird,

welcher eine Mobilisierung und Verfrachtung bewirken würde, muss dieser durch den Betrieb einer herkömmlichen Bodenluftabsaugung erzeugt werden. Wird dieses Verfahren in bindigen Untergrundbereichen angewendet, so ist eine Erwärmung bis 100 °C vorteilhaft, da es durch das Verdampfen des Porenwassers zu einem Austrag von Schadstoff und der Bildung von hydraulischen Wegsamkeiten kommt.

Ein für die Wärmeausbreitung entscheidender Faktor ist die Homogenität des Untergrunds, da diese ein proportionales Verhältnis bilden. Die Verteilung der Bodenfeuchte ist hierbei von ausschlaggebender Bedeutung. Daher müssen die zu sanierenden Bereiche der ungesättigten und gesättigten Zone technisch getrennt behandelt werden. Ein Abstand von ca. 2 Metern zwischen ungesättigter und gesättigter Zone ist hierbei nötig, um einen zu hohen Energieverlust durch Wärmeabfluss in die gesättigte Zone zu verhindern.

### ***Dampf-Luft-Injektion***

Die Dampf-Luft-Injektion gehört neben der Radiowellen-Technik zu den technisch aufwändigeren Methoden. Umfangreiche technische Installationen und eine gute Medienanbindung sind für den Aufbau eines solchen Systems nötig.

Die Kernelemente eines Dampf-Luft-Sanierungssystems sind Injektions- sowie Extraktionsbrunnen. Durch die innerhalb der Schadensquelle installierten Injektionsbrunnen wird ein Dampf-Luft-Gemisch in den Untergrund eingebracht, das sich unter anhaltendem Injektionsdruck ausbreitet. Wie auch bei den zuvor beschriebenen Verfahren kommt es durch die Erwärmung zu einer Mobilisierung der Schadstoffe im Untergrund. Weiterhin können mit dieser Methode beim Erreichen eines vom Kontaminanten individuell abhängigen Dampfdruckes volatile Schadstoffe in die Gasphase überführt werden. Der zu behandelnde Sanierungsbereich wird von Extraktionsbrunnen umschlossen, die je nach Anwendungsfall nur zur Absaugung der kontaminierten Bodenluft oder auch zusätzlich zur Grundwasserextraktion genutzt werden können. Es findet im Prinzip eine Durchspülung des Untergrundes mit einem Dampf-Luft-Gemisch statt, bei der Temperaturen von über 100 °C erreicht werden können. Damit das Verfahren angewendet werden kann, muss eine ausreichende Durchlässigkeit des Untergrundes gegeben sein, da sonst keine gleichmäßige Dampf-Luft-Ausbreitung im Untergrund gewährleistet ist. Da bei diesem System eine Dampf-Luft-Injektion unter hohen Drücken in den Untergrund erfolgt, ist die homogene Verteilung des Injektionsmediums von entscheidender Bedeutung. Kommt es zur Ausbildung von präferentiellen Fließpfaden, so werden möglicherweise große Bereiche der kontaminierten Kubatur nicht erfasst und somit nicht abgereinigt. Sollte es zu Dampfdruckbrüchen bis an die Erdoberfläche

kommen, so ist dies als besonders kritisch zu betrachten, da solche Fließpfade nur schwer bis in ihre Entstehungstiefe abzudichten sind. Ein weiterer Aspekt ist der kontinuierliche Betrieb der Dampf-Luft-Injektion. Die mobilisierten Kontaminanten werden im Untergrund mit der fortschreitenden Dampf-Luft-Front zu den Extraktionsbrunnen bewegt. Sollte es zu einer längeren Unterbrechung der Injektion und dem Kollabieren des damit verbundenen Gradienten kommen, so tritt eine Rückkondensation der gasförmigen Schadstoffe auf. Große Energiemengen sind anschließend nötig, um die Druckverhältnisse im Untergrund wieder aufzubauen. Der kontinuierliche Betrieb einer solchen Anlage ist somit von besonderer Priorität.

Diese Art der thermischen Bodensanierung besitzt je nach Anwendungsfall eine hohe Adaptivität. Sollte es nicht zu einer idealen Ausbreitung des injizierten Dampf-Luft-Gemisches kommen, so kann das Ausbreitungsverhalten der Untergrundcharakteristik durch einen versetzten oder zusätzlichen Einbau von Injektions- und Extraktionsbrunnen angepasst werden. Ebenfalls kann die Menge und der Druck des Injektionsgemisches im Verlauf der Sanierung variiert werden. Die Methode ermöglicht eine getrennte Sanierung der gesättigten sowie der ungesättigten Zone. Dies kann durch gezielte Injektionssteuerung gleichzeitig, oder in zwei getrennten Stufen erfolgen, wenn beispielsweise Massenbilanzen zu den Schadstoffgehalten der gesättigten und ungesättigten Zone erstellt werden sollen.

### ***Thermische ex situ-Verfahren***

Eine Vielzahl weiterer Verfahren zur thermischen Behandlung kontaminierten Untergrundes ist verfügbar. Im Gegensatz zu *in situ*-Verfahren ist es teilweise jedoch wirtschaftlicher, den schadstoffbelasteten Boden auszukoffern und an der Oberfläche zu sanieren. Dies ist vor allem der Fall, wenn der belastete Anteil nur wenige Meter unterhalb der Erdoberfläche liegt. Die aufwändige Installation von Injektions- und Extraktionsbrunnen kann dann eingespart werden und man hat immer die Gewissheit, dass der gesamte Schadstoffgehalt erfasst wird.

Ein Beispiel für eine solche Behandlungsmethode ist die Behandlung kontaminierten Untergrundmaterials durch beheizbare Schaufeltrockner in Kombination mit Kondensatoren (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002). Hierbei wird der kontaminierte Untergrund über Bandförderer in Schaufeltrockner-Anlagen eingebracht. In einem ersten Behandlungsschritt wird das Material getrocknet. In dem anschließenden zweiten Behandlungsschritt werden durch Anlegen eines Vakuums innerhalb einer zweiten Heizphase die Kontaminanten aus dem Untergrundmaterial desorbiert. Die gasförmigen Schadstoffe werden an Kondensatoren wieder verflüssigt und

anschließend aufbereitet. Das gereinigte Material wird wieder befeuchtet und kann schließlich zur Rückverfüllung verwendet werden.

Diese und vergleichbare Methoden eignen sich jedoch nicht, wenn kein sinnvolles Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen dem Aufwand für das mechanische Abtragen des Erdreiches und den Kosten einer *in situ*-Sanierung besteht. Weiterhin ist ein Entfernen von kontaminiertem Untergrund nicht immer technisch möglich, falls beispielsweise der Kontaminationsherd zu tief liegt, oder durch darüberliegende Bauwerke nicht zugänglich ist.

Da ein Schwerpunkt dieser Arbeit auf der thermischen *in situ*-Sanierung liegt, werden die Themen der *ex situ*-Verfahren hier nur angeschnitten und nicht weitergehend erläutert.

### ***Aufbau der MObilien thermischen in situ-SAnierungsanlage in MOdularer Bauweise (MOSAM)***

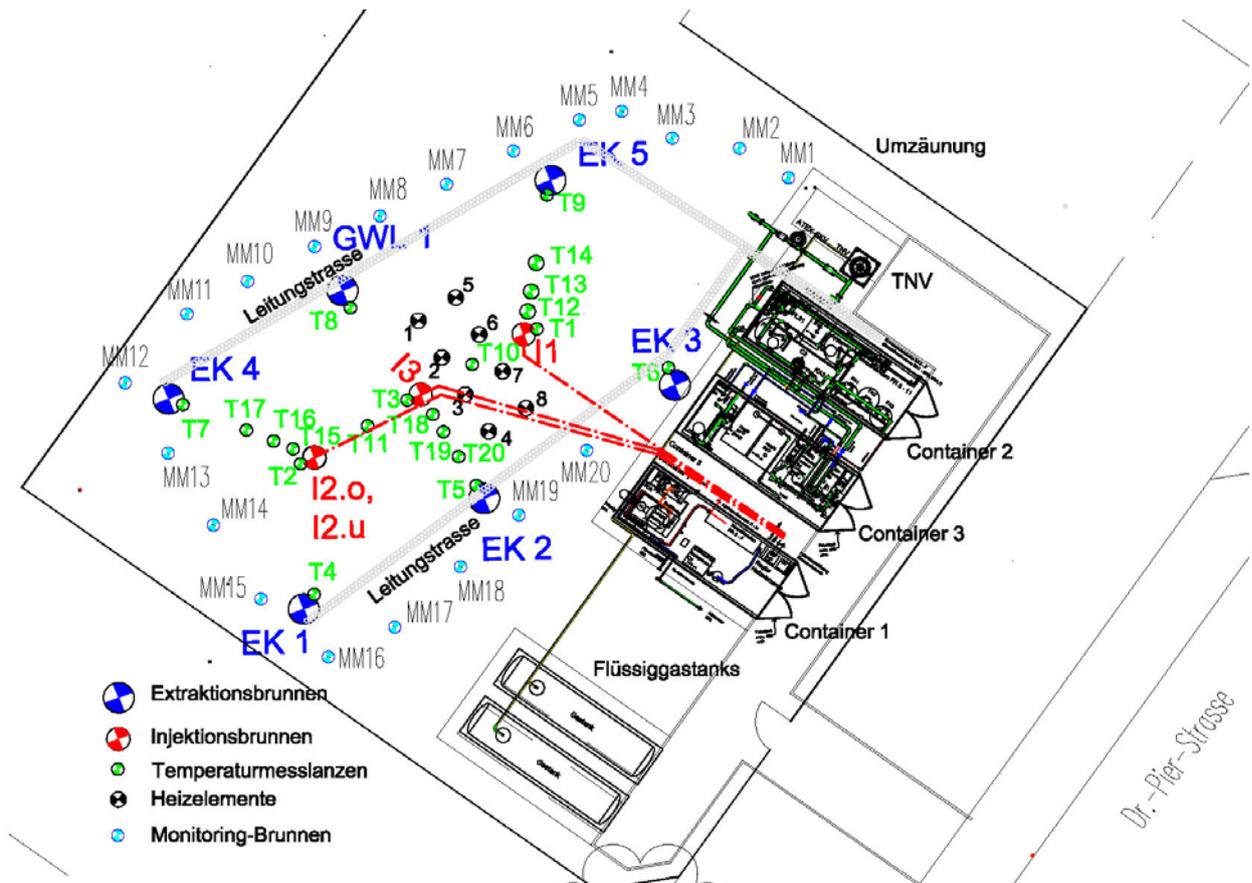
Am Standort der ehemaligen Benzolanlage im Industriepark Zeitz wurde im Rahmen einer Pilotsanierung ein System zur thermischen Sanierung einer Benzolkontamination eingesetzt. Hierbei war es Ziel, die Kontaminationsquelle einer durch den Pilotmaßstab definierten Kubatur vollständig aus dem Untergrund zu entfernen. Technische und ökonomische Bewertungen der Effektivität und Effizienz des Verfahrens sollten mit anderen, im Quellenbereich der Benzolkontamination durchgeführten pilotmaßstäblichen Sanierungsverfahren verglichen werden. Mit der Konstruktion, dem Aufbau und Betrieb wurde das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart beauftragt, das mit seiner **Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)** umfassende Erfahrungen auf dem Gebiet der thermischen Untergrundsanierung sammeln konnte.

Auf dem Gelände der ehemaligen Benzolproduktionsanlagen wurden umfangreiche Erkundungsarbeiten zur Lokalisierung des Schadstoffquellbereiches durchgeführt (s. Kapitel 4). Aufgrund der Ergebnisse dieser Erkundungen konnte der „Hot Spot“, der für die kontinuierliche Nachlieferung von Schadstoff in die Schadstofffahnen verantwortlich war, lokalisiert und eingegrenzt werden. Nach ersten Testläufen auf dem Gelände des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ in Leipzig, wurde die mobile thermische *in situ*-Sanierungsanlage zum Pilotstandort im Industriepark Zeitz gebracht und die einzelnen Segmente montiert (Abbildung 22).



**Abbildung 22: Mobile thermische *in situ*-Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM)**

Die Anlage besteht aus drei Seecontainern (20 ft), in denen die gesamte Anlagen- und Steuerungstechnik untergebracht ist. Verschiedene Bohrarbeiten innerhalb und außerhalb der zur Sanierung anstehenden Kubatur wurden durchgeführt. Hierbei wurden drei Dampf-Luft-Injektionsbrunnen, sowie die dazugehörigen Extraktionsbrunnen (Bodenluft-Grundwasser-Kombibrunnen) installiert (Abbildung 23).



Trötschler, 2008

**Abbildung 23: Lageplan thermische Sanierungsanlage mit Geländeinstallationen**

Im Bereich der Injektionsbrunnen wurden acht elektrische Heizlanzen (Abbildung 23) installiert, die vor Beginn der Dampfinjektion für die Entstehung von Wegsamkeiten in einer sich in der ungesättigten Zone befindlichen bindigen Schicht sorgen sollten. Weiterhin wurden 12 Hüllrohre in den Untergrund eingebracht. Innerhalb der Hüllrohre wurden PT100 Temperaturfühler (Abbildung 24) in verschiedenen Horizonten eingehängt, um Informationen über die Wärmeausbreitung im Untergrund zu erlangen. Zusätzlich wurden Temperaturfühler in die Extraktionsbrunnen eingebaut. Im direkt angrenzenden Außenbereich des Sanierungsfeldes wurden 20 Grundwassermessstellen bis in eine Tiefe von 12 Metern abgeteuft. Diese wurden zur kontinuierlichen Grundwasserbeprobung verwendet, mit dem Ziel, während der Sanierung die Schadstoffabnahme zu verfolgen. Im Bereich zwischen den Injektionsbrunnen wurden Elektrodenketten für ein geoelektrisches Monitoring der thermischen Sanierung installiert (s. Kapitel 6 / 7).



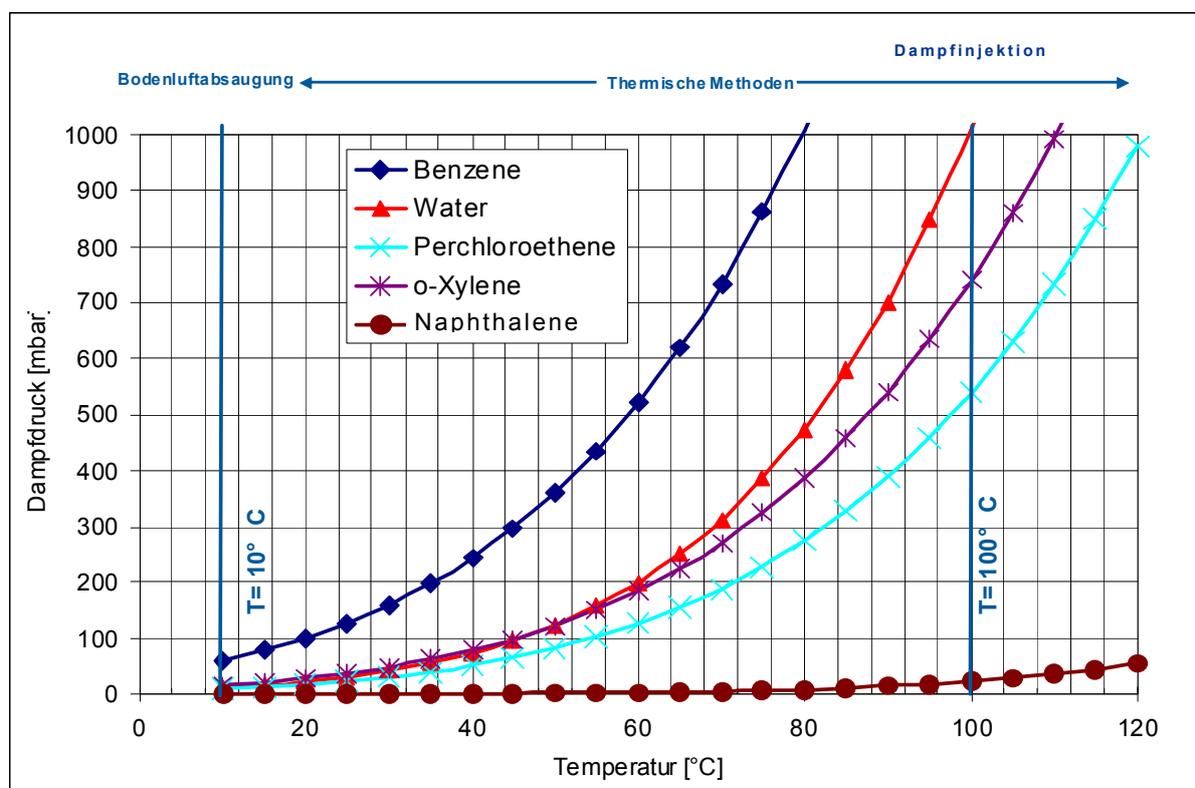
**Abbildung 24: PT100-Temperaturmessfühler**

Zusätzlich zu den Bohrlochelektroden wurden Oberflächenelektroden innerhalb und außerhalb des Sanierungsbereiches verlegt. Diese wurden in Kombination mit den Bohrlochelektroden ebenfalls für das geoelektrische Monitoring verwendet.

Die Dampferzeugung wurde vor Ort mit Hilfe eines Gasbrenners realisiert. Die Energieversorgung hierfür wurde durch zwei Flüssiggastanks sichergestellt. Die Wasser- und Stromversorgung der Anlage konnte aufgrund der vorhandenen Infrastruktur leicht vorgenommen werden. Nordöstlich der Anlagencontainer wurde eine thermische Nachverbrennungsanlage installiert, die ebenfalls mit Flüssiggas betrieben wurde. Aufgrund von Emissionsschutzbestimmungen war es nötig, die in Gasform aus dem Untergrund extrahierten Schadstoffe an der Oberfläche zu behandeln. Aufgrund des Hauptkontaminanten Benzol, bot sich hier eine stützgasbefeuerte Verbrennung bei ca. 700 °C an.

Der Sanierungsbereich und die für den Betrieb notwendige Infrastruktur wurden eingezäunt und durch eine Einbruchmeldeanlage gegen unbefugten Zutritt abgesichert. Diese Maßnahmen waren nötig, da es sich bei den vorliegenden Schadstoffen um hochtoxische Stoffe handelt.

## Funktionsweise der Mobilen thermischen in situ-Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM)



Trötschler, 2007

Abbildung 25: Dampfdrücke verschiedener Schadstoffe in Abhängigkeit ihrer Temperatur

Durch das Einbringen eines Dampf-Luft-Gemisches in den Untergrund wird eine Mobilisierung des Hauptkontaminanten Benzol erreicht. Zum Einen wird der Schadstoff durch Aufbau eines künstlichen Gradienten zu den Extraktionsbrunnen bewegt. Zum Anderen wird durch die Temperaturerhöhung eine Dampfdruck-erhöhung des Kontaminanten erreicht, wodurch dieser in die Gasphase überführt und leichter extrahiert werden kann (Abbildung 25).

Die Technologie der Dampf-Luft-Injektion basiert auf dem Einbringen des Dampf-Luft-Gemisches unterhalb der Kontaminationsquelle in die gesättigte Zone. Bei der Anwendung vor Ort wird das Gemisch zusätzlich in den Grundwasserschwankungsbereich (8 bis 10 Meter u. GOK) und in die ungesättigte Zone eingebracht. In den erwärmten Bereichen wird der hauptsächlich in Phase vorliegende, jedoch hochvolatile Schadstoff Benzol verdampft und bewegt sich theoretisch radial-symmetrisch von den Injektionsbrunnen ausgehend zu den Extraktionsbrunnen in der ungesättigten Zone. Da in der gesättigten Zone mit der Erwärmung eine Mobilisierung des Schadstoffes einhergeht, kommt es auch zu einem erhöhten

Transfer des teilweise in Phase vorliegenden Schadstoffes ins Grundwasser. Um einen Abstrom dieses kontaminierten Grundwassers in den Bereich außerhalb des Sanierungsfeldes zu verhindern, wird eine kontinuierliche Grundwasserhaltung betrieben. Das durch Abpumpen gewonnene kontaminierte Grundwasser wird über einen Phasenabscheider geleitet, um in Phase vorliegendes Benzol abzutrennen. Im Anschluss wird das kontaminierte Grundwasser durch Aktivkohlefilter geleitet, wo der Schadstoff adsorbiert wird.

Eine Problematik der Anwendung an diesem Standort ist der hohe Schadstoffgehalt des in ca. 12 Metern u. GOK liegenden Braunkohle-Ton-Komplexes. Durch sein großes Adsorptionsvermögen bietet dieses Material beste Speichermöglichkeiten für Schadstoffe.

Eine Dampf-injektion unterhalb dieses Komplexes ist technisch zwar möglich, jedoch würde diese Schicht eine stark abschirmende Wirkung haben und eine Ausbreitung des Dampf-Luft-Gemisches in den oberen Teil des Aquifers verhindern. Ein Austrocknen und das Erzeugen von künstlichen Wegsamkeiten in diesem Bereich sind nicht möglich, da er dauerhaft wassergesättigt ist. Eine geringe Erwärmung kann daher nur durch die sich darüber befindlichen Dampf-Luft-Injektionslanzen erfolgen.

Die durch die Temperaturerhöhung hervorgerufene Verdampfung des Schadstoffes Benzol beginnt bei seiner eutektischen Temperatur von 69 °C und liegt damit unterhalb der Dampftemperatur von 100 °C (Wasserdampfdestillation). Wird die gesamte Kubatur über einen längeren Zeitraum von einem Dampf-Luft-Gemisch durchströmt, so wird der gesamte Schadstoff verdampft und diese Bereiche können theoretisch als saniert betrachtet werden (Betz, 1998).

Durch Diffusion von Schadstoff ins Korngefüge und Adsorptionsvorgänge im organischen Anteil der Bodenmatrix können jedoch höhere Temperaturen für eine vollständige Sanierung erforderlich sein.

Die Dampfausbreitung findet in der gesättigten Zone nicht nur horizontal, sondern durch Auftriebseffekte auch vertikal statt. Dieser Effekt hat zwar eine limitierende Wirkung auf den Erfassungsbereich eines jeden Injektionsbrunnens, jedoch wird hierdurch eine Sanierung der oberhalb des jeweiligen Injektionsbrunnens liegenden ungesättigten Zone ermöglicht. Durchdringt die Dampf-front den Grundwassergrenzbereich, so werden die in der ungesättigten Zone vorhandenen Schadstoffe ebenfalls verdampft und von Extraktionsbrunnen abgeleitet.

Unterhalb von bindigen Schichten und Körpern wie Ton- und Schlufflinsen kommt es zum Anstauen des Dampfes. Da der Dampf Stauerschichten gar nicht oder nur sehr langsam durchdringen kann, findet hier ein Wärmeübertrag durch Konduktion statt. Auf diese Weise werden gebundene Schadstoffe ebenfalls in die Gasphase überführt und können extrahiert werden.

Wie das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart berechnet und experimentell untersucht hat, beträgt die thermische Reichweite eines Injektionsbrunnens am Standort Zeitz bei einer Injektionsrate von 120 kg Dampf pro Stunde in der gesättigten Zone ca. fünf Meter. Dieses Ergebnis wird durch Versuche an anderen Standorten untermauert (Trötschler *et al.*, 2006).

Die am Standort Zeitz vorliegenden Ton- und Schluffschichten bilden eine hydraulische Barriere für die Ausbreitung des Dampf-Luft-Gemisches. Wie bereits zuvor erwähnt, könnten diese Schichten mittels konduktiver Aufheizung erwärmt und saniert werden. Dies wurde zu Beginn durch den Einsatz elektrischer Heizlanzen mit einer Temperatur zwischen 200 und 500 °C durchgeführt. Der Betrieb der Heizelemente konnte bereits nach ca. zwei Wochen wieder eingestellt werden, da aufgrund der geringen Mächtigkeit der lokalen Stauerschicht eine Erwärmung durch die fortschreitende Dampffront die konduktive Aufheizung durch die Heizlanzen übertraf. Weiterhin lagen die Kosten zur Erzeugung thermischer Energie in Form von Dampf weit unterhalb der zur Erzeugung von elektrischer Energie.

Da bei diesem Pilotprojekt eine Massenbilanzierung der in der gesättigten sowie ungesättigten Zone jeweils vorhandenen Schadstoffmenge von Interesse war, wurden diese Zonen im Sanierungsverlauf getrennt behandelt. Der erste Teil der Sanierung betraf ausschließlich die ungesättigte Zone, der anschließende die gesättigte. Wie zuvor erwähnt, ist es möglich, die gesamte Kubatur durch Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone zu sanieren, da die Dampffront durch den Grundwassergrenzbereich und den anschließenden Kapillarsaum hindurch tritt und die Schadstoffe im darüber liegenden ungesättigten Bereich ebenfalls verdampft. In diesem Pilotversuch hat man die durch eine getrennte Behandlung auftretenden Energieverluste an das umgebende Erdreich, im Ausgleich zum Informationsgewinn aus der Massenbilanz aber in Kauf genommen.

## 6. Einführung in die angewendeten Messverfahren

### *Grundlagen gleichstromgeoelektrischer Messungen*

Gleichstromgeoelektrische Messungen sind traditionelle geophysikalische Verfahren zur Erkundung des Untergrundes. Mit Beginn der 90er Jahre und der Verbreitung von Multikanalmessgeräten haben sich die Anwendungsfelder dieser Methode erweitert. Zuvor lag das Haupteinsatzgebiet in der Rohstoffexploration, vor allem in der Erkundung von Erzlagerstätten. Die Verwendung moderner Computertechnik und Auswertungssoftware hat die Verbreitung dieser Methode vor allem auf das Gebiet der Hydro- und Ingenieurgeologie erweitert.

Gleichstromgeoelektrische Messungen erlauben eine Erkundung der Untergrundstruktur und deren stoffliche Zusammensetzung im Vergleich zu anderen aufwändigeren Methoden in verhältnismäßig kurzer Zeit. In Kombination mit Lithologieinformationen aus Bohrlöchern und Aufschlüssen handelt es sich um eine Methode, die es ermöglicht, große Flächen mit hohem Informationsgrad zu kartieren (Loke, 2001; Milsom 2003).

Die Methode nutzt die unterschiedlichen elektrischen Widerstände verschiedener Untergrundmaterialien. Das Verhältnis zwischen dem elektrischen Widerstand (R), der Länge (l) und dem Querschnitt (A) eines elektrisch leitfähigen Körpers kann als spezifischer elektrischer Widerstand ( $\varphi$ ) formuliert werden:

$$\varphi = \frac{R * A}{l}$$

Elektrische Widerstandsmessungen basieren gewöhnlich auf der Injektion eines elektrischen Stromes (I) durch zwei Stromelektroden und der Messung der hierdurch aufgebauten Potentialdifferenz (P) mit Hilfe eines Potentialelektrodenpaares.

Das Verhältnis zwischen der Länge (l) und der Querschnittsfläche eines Körpers (A) kann durch einen Geometriefaktor (k) ersetzt werden, woraus sich in Kombination mit dem injiziertem Strom (I) und der Potentialdifferenz (P) folgende Gleichung ergibt:

$$\varphi = \frac{k * P}{I}$$

Der Geometriefaktor (k) ist von der gewählten Elektrodenanordnung abhängig und muss entsprechend der im Rahmen einer Messung verwendeten Anordnung



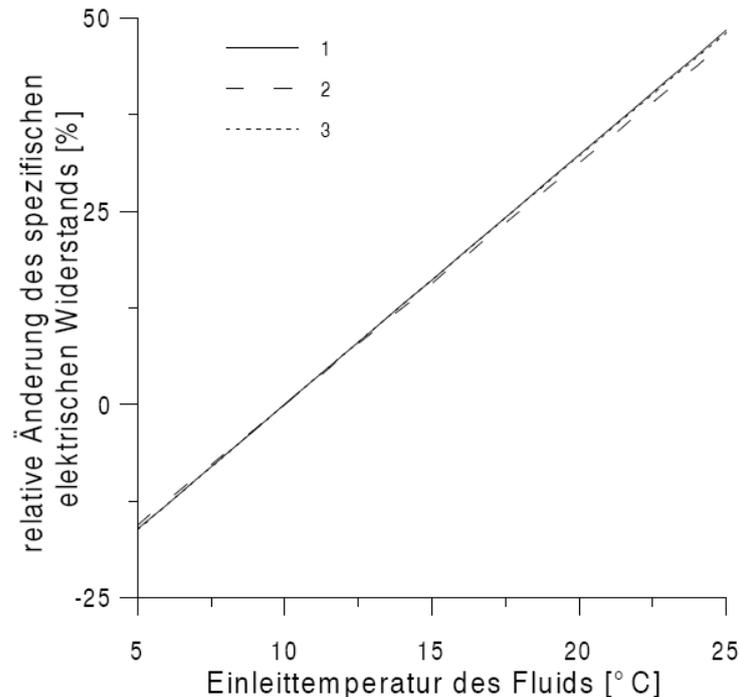
### **Petrophysikalische Grundlagen**

Der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes, der die Ausbildung eines elektrischen Feldes beeinflusst, ist abhängig von der Materialzusammensetzung des Sediments. Für die Betrachtung der Auswirkungen einer thermischen Sanierung auf den spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho_s$  kann unter Vernachlässigung des Tongehalts folgende Formel verwendet werden:

$$\rho_s = \frac{F}{S_w^n} \times \rho_f$$

wobei F dem Formationsfaktor (fasst alle für die Stromleitung wichtigen Gesteinseigenschaften zusammen),  $S_w$  der Wassersättigung, n dem Sättigungsexponenten ( $n \leq 2$ , empirisch bestimmte Sättigungsabhängigkeit der Gesteinsleitfähigkeit) und  $\rho_f$  dem spezifischen elektrischen Widerstand des Porenfluids entspricht. Durch die thermische Sanierung kann eine Veränderung von  $\rho_s$  insbesondere durch eine Änderung der Wassersättigung (Dampfausbreitung) oder die Veränderung des spezifischen elektrischen Widerstands des Porenfluids erfolgen. Die Veränderung des spezifischen elektrischen Widerstands des Porenfluids kann zum einen durch die Änderung der Temperatur und zum Anderen durch die Änderung der Schadstoffkonzentration verursacht werden.

Wie verschiedene Untersuchungen (z. B. Rein *et al.*, 2004; Gruhne, 1999) belegen, wirkt sich die Veränderung der Schadstoffkonzentration nur signifikant aus, wenn mehrere Volumenprozent entfernt werden. Der für das geoelektrische Monitoring von thermischen Sanierungen entscheidende Faktor ist die Temperaturveränderung. Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes des Porenfluids wurde u. a. von Arps, 1953; Dachnov 1962 und Sen & Goode, 1992 mit empirischen Studien untersucht.



**Abbildung 27: Auswirkungen von Temperaturänderungen auf den spezifischen elektrischen Widerstand (1 – nach Arps (1953), 2 - nach Dachnov (1962), 3 - nach Sen & Goode (1992))**

Abbildung 27 zeigt, dass die in den verschiedenen Studien gefundenen Beziehungen vergleichbar sind und dass die Temperatur sich signifikant auf den spezifischen elektrischen Widerstand auswirkt.

Die Tatsache, dass verschiedene Einflussgrößen zur Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes beitragen, führt dazu, dass nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann, welchen Anteil jeder einzelne Faktor auf die absoluten elektrischen Widerstandsverhältnisse hat. Bezüglich der Interpretation der Veränderung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes sind zwei Grundansätze möglich, nämlich die Interpretation über die absolute und über die relative Änderung (Dietrich, 1999).

Die absolute Änderung  $\rho_{abs}$  lässt sich aus den für zwei Zeitpunkte ermittelten Werten für den spezifischen elektrischen Widerstand,  $\rho_{s2}$  und  $\rho_{s1}$  mit folgender Formel berechnen:

$$\rho_{abs} = \rho_{s2} - \rho_{s1} = F \times \left( \frac{\rho_{f2}}{S_{w2}^n} - \frac{\rho_{f1}}{S_{w1}^n} \right)$$

Beispiele für diesen Interpretationsansatz sind u. a. bei Daily & Ramirez, 1997 und Ramirez *et al.*, 1993 zu finden. Diese Gleichung zeigt, dass der Wert der absoluten Änderung auch vom Formationsfaktor  $F$  abhängt. Da in der Regel auch von einer räumlichen Heterogenität des Formationsfaktors auszugehen ist, lässt sich die absolute Änderung nicht quantitativ in Bezug auf eine Änderung der Wassersättigung oder des spezifischen elektrischen Widerstands des Porenfluids interpretieren.

Wird hingegen die relative Änderung zwischen zwei Werten für den spezifischen elektrischen Widerstand betrachtet, so findet der dem jeweiligen Sedimenttyp zugehörige Formationsfaktor keine Berücksichtigung:

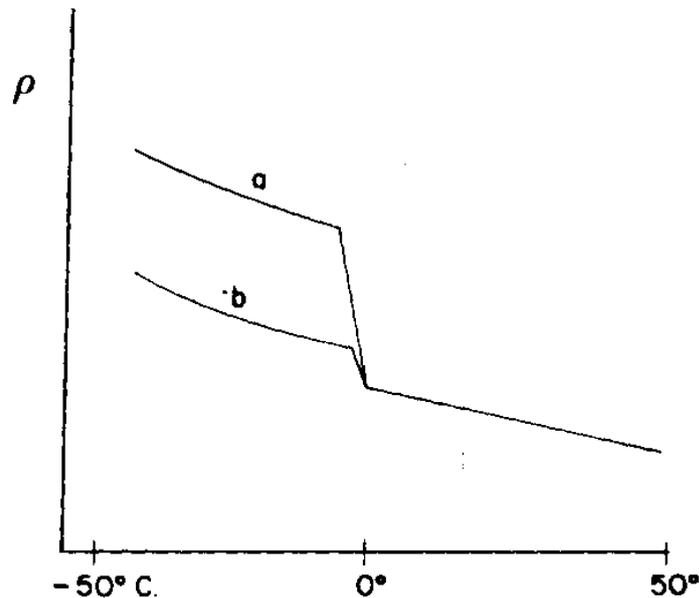
$$\frac{\rho_{s2}}{\rho_{s1}} = \frac{\rho_{f2}}{\rho_{f1}} \times \left( \frac{S_{w1}}{S_{w2}} \right)^n$$

Die Betrachtung der relativen Änderung der spezifischen elektrischen Widerstände erlaubt nunmehr die Beobachtung der durch die thermische Sanierung verursachten Veränderungen. Eine Unterscheidung, ob die Veränderung durch eine Änderung der Wassersättigung (Dampf) oder durch eine Änderung des Porenfluids (Verminderung der Schadstoffkonzentration) verursacht wird, ist nicht möglich (Dietrich, 1999).

Zusammenfassend ist auf Grund der petrophysikalischen Betrachtungen festzustellen, dass mit dem geoelektrischen Monitoring nur eine Lokalisierung der Auswirkungen einer thermischen Sanierung möglich ist. Eine Quantifizierung der Auswirkungen würde die Einführung von etlichen Annahmen (Art der Änderung, konkreter Wert des Sättigungsexponenten, Leitfähigkeit des Porenfluids vor der Sanierung, etc.) voraussetzen.

Ein geoelektrisches Monitoring der elektrischen Widerstandsänderungen im Untergrund aufgrund von Dampfinjektionen fand bereits bei anderen Studien Anwendung. Hier kamen reine Oberflächenmessungen (Wayland *et al.*, 1987) sowie auch Bohrlochmessungen (Ranganayaki *et al.*, 1990, Ramirez *et al.*, 1993), zum Einsatz. Teilweise war es Ziel der Untersuchungen, eine Korrelation zwischen den in Bohrlöchern gemessenen Leitfähigkeitswerten und Temperaturofzeichnungen herzustellen, teilweise standen Bohrlochtomographien zwischen verschiedenen Bohrlöchern im Vordergrund.

Die Untersuchungen zeigten, dass eine Temperaturänderung durch Dampf-injektion mit einer elektrischen Widerstandsänderung einhergeht. Abbildung 28 zeigt dieses Phänomen (Orellana, 1972).



**Abbildung 28: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes**

Der elektrische Widerstand fällt mit steigender Temperatur deutlich ab. Bis ca. 0 °C unterschieden sich die gemessenen elektrischen Widerstände für grobkörnige Gesteine (a) deutlich zu den in feinkörnigen Gesteinen (b). Bei Temperaturen oberhalb der 0 °C-Grenze sind die elektrischen Widerstandsentwicklungen für beide Materialien gleich.

Die elektrische Widerstandsänderung ist im Falle einer Dampf-Luft Injektion jedoch nicht nur auf eine Temperaturänderung zurückzuführen. Weitere Prozesse, wie beispielsweise Sättigungsänderungen, haben deutlichen Einfluss auf das elektrische Widerstandsgefüge. Daher kann in Abhängigkeit der lokalen Untergrundparameter nicht immer vorhergesehen werden, ob bei einer Dampf-Luft-Injektion die zu messenden elektrischen Widerstände gegenüber einer Nullmessung steigen oder fallen (Ramirez, 1993). Selbst gegensätzliche Verläufe sind möglich.

**Geoelektrisches Monitoring mit an der Erdoberfläche installierten Elektroden**

Ein geoelektrische Monitoring kann mit einer Vielzahl von Messkonfigurationen durchgeführt. Zu den einfachsten zählten hierbei Messungen mit an der Erdoberfläche angebrachten Elektroden. Das für das Monitoring verwendete Steuerungs- und Messgerät RESECS erlaubte den Ablauf von automatisch hintereinander durchgeführten Messungen. Hierzu konnten bereits auf dem Gerät vorinstallierte Messkonfigurationen genutzt werden. Drei der bei geoelektrischen Messungen häufig verwendeten Konfigurationen kamen hierbei zum Einsatz. Anwendung fanden Schlumberger-, Dipol-Dipol- und Wenner-Konfigurationen. Diese drei Konfigurationen weisen sich durch unterschiedliche Auflösungscharakteristika aus und finden somit in Abhängigkeit von Zielstellung einer Untersuchung Anwendung. Die Auswahl der Messkonfiguration kann von entscheidender Bedeutung für die Lösung der Aufgabenstellung sein. Deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen bestehen vor allem in der jeweiligen horizontalen sowie vertikalen Schichtauflösung (Ward, 1990). Weiterhin sind die durch die verschiedenen Geometrien hervorgerufenen Erkundungstiefen unterschiedlich (Roy & Appararo, 1971). Im Folgenden wird kurz auf die Charakteristik der drei Konfigurationen eingegangen (Abbildung 29). Ausführliche Erläuterungen sind beispielweise im Handbuch *Geophysik*, (Knödel *et. al.* 2005) zu finden.

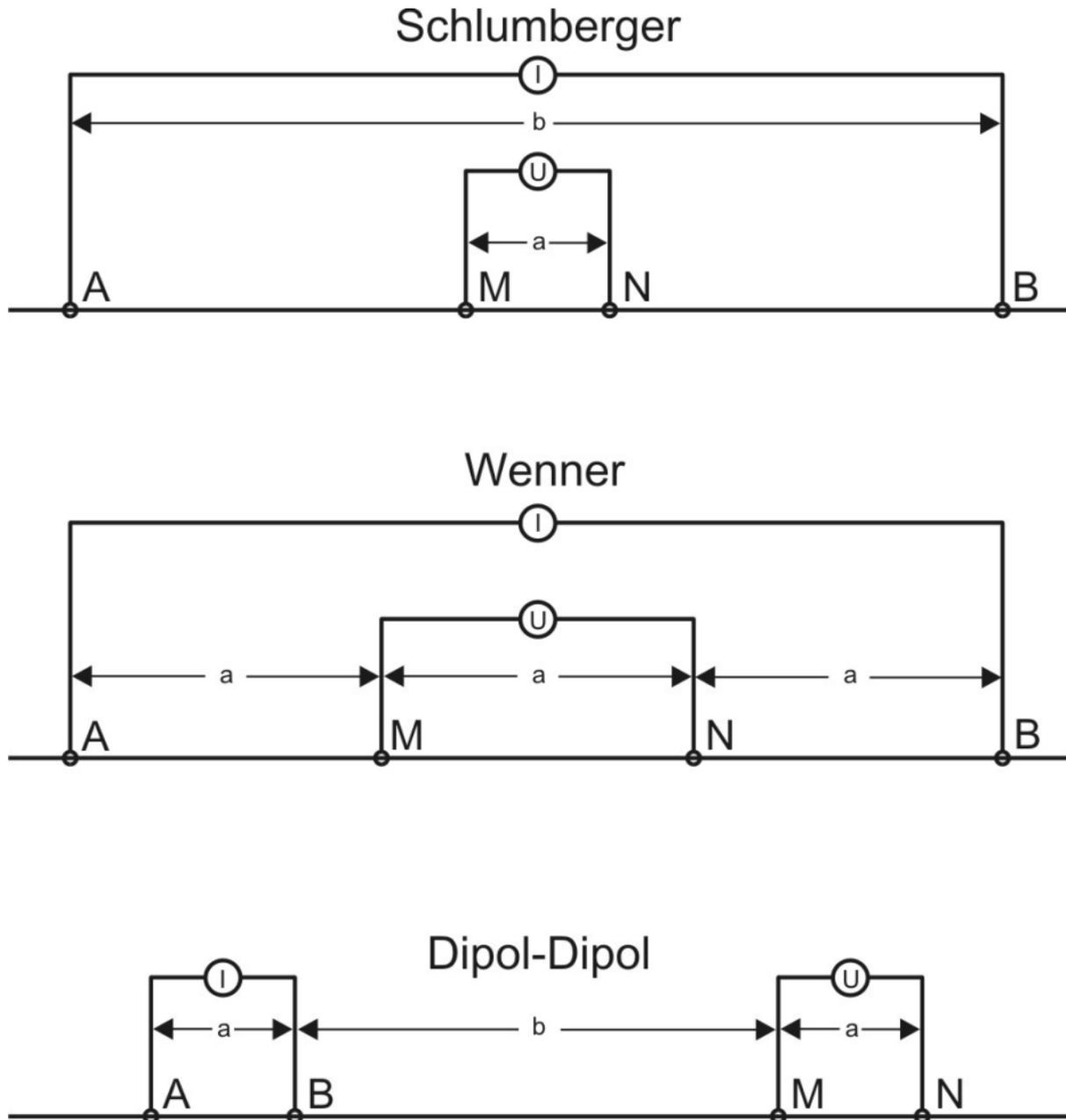


Abbildung 29: Geometrien der Schlumberger- (oben) , Wenner- (Mitte) und Dipol-Dipol- (unten) Elektrodenkonfigurationen

### Schlumberger-Konfiguration:

(Abbildung 29 oben)

Diese Konfiguration besteht aus einem Elektrodenpaar zur Stromeinspeisung ( $A, B$ ) sowie einem Paar zur Potentialmessung ( $M, N$ ). Der Abstand  $a$  des Elektrodenpaares  $M, N$  wird hierbei für jede Messung beibehalten, das Elektrodenpaar  $A, B$  hingegen vergrößert mit jeder Messung symmetrisch den Abstand  $b$  zu den Potentialelektroden. Ist die maximale Auslagenweite erreicht, wird der Abstand  $a$

zwischen den Elektroden  $M,N$  vergrößert und es läuft mit jeder Messung die Abstandserweiterung  $b$  der Elektroden  $A,B$  analog zur zuvor beschriebenen ab.

Diese Art der Elektrodenkonfiguration eignet sich vor allem zur Erkundung von zumeist horizontal geschichtetem Untergrund, da sie eine gute vertikale Auflösung besitzt. Die laterale Auflösung ist hingegen relativ schlecht, was aus ihrer symmetrischen Aufstellungsgeometrie resultiert (Ward, 1990; Apparao, 1991).

### **Wenner-Konfiguration:**

(Abbildung 29 Mitte)

Bei dieser Konfiguration finden ebenfalls Stromeinspeisungen am Elektrodenpaar  $A,B$  sowie Potentialmessungen am Elektrodenpaar  $M,N$  statt. Im Unterschied zur Schlumberger-Konfiguration wird der Abstand  $a$  zwischen allen Elektroden für das Durchlaufen der gesamten Elektrodenauslage konstant gehalten. Nachdem die Elektrodenauslage vollständig durchgemessen wurde, wird der Elektrodenabstand  $a$  erhöht und es folgt ein weiterer Durchlauf auf der gesamten Elektrodenauslage. Auf diese Weise werden fortschreitend mit der Abstandserweiterung  $a$  tiefere Untergrundbereiche erfasst.

Wenner-Konfigurationen sind gut zur Auflösung von horizontal geschichtetem Untergrund geeignet. Ebenso wie bei Schlumberger-Konfigurationen begründet sich dies durch die symmetrische Elektrodengeometrie. Das Auflösungsvermögen für steil stehende Grenzflächen wie Schichtstufen und gangförmige Strukturen ist allerdings vergleichsweise schlecht.

### **Dipol-Dipol-Konfiguration:**

(Abbildung 29 unten)

Bei Messungen mit Dipol-Dipol-Konfigurationen findet eine Stromeinspeisung über das Elektrodenpaar  $A,B$  statt. Die Potentialmessung erfolgt über das Elektrodenpaar  $M,N$ . Der Abstand  $b$  zwischen den Elektrodenpaaren wird mit jeder Messung erweitert, bis die gesamte Elektrodenauslage durchgemessen wurde. Um die Investigationstiefe einer Dipol-Dipol-Konfiguration zu erhöhen, wird der Abstand  $a$  zwischen den einzelnen Elektrodenpaaren vergrößert. Diese Messkonfiguration begünstigt vor allem Messungen bei denen steil stehende und vertikale Strukturen erwartet werden. Das horizontale Auflösungsvermögen ist aufgrund der asymmetrischen Elektrodenkonfiguration relativ schlecht.

Die drei beschriebenen Elektrodenkonfigurationen unterscheiden sich in ihrer jeweiligen Erkundungstiefe. Diese liegt für eine Schlumberger-Konfiguration ca. bei dem 0,125-fachen Abstand der Elektroden  $A,B$ . Für Wenner-Konfigurationen liegt die Erkundungstiefe mit dem 0,11-fachen Abstand dieser Elektroden etwas darunter. Dipol-Dipol-Konfigurationen weisen im Verhältnis zu ihrer maximalen Auslagenweite mit dem 0,195-fachen Abstand der Elektroden  $A,N$  die größte Erkundungstiefe auf.

## 7. Gleichstromgeoelektrisches Monitoring der thermischen Sanierung

### *Einleitung*

Das Monitoring im Sinne einer Überwachung des Erfolges einer thermischen Sanierung erfordert die zeitliche und räumliche Erfassung des Sanierungsmediums „Wärme“. Gleichstromgeoelektrische Verfahren bieten hier ein großes Potential. Da Temperaturänderungen im Untergrund einen signifikanten Einfluss auf den spezifischen elektrischen Widerstand ( $\rho_s$ ) haben, bietet sich das geoelektrische Monitoring als Alternative zur räumlich kontinuierlichen Überwachung von thermischen Sanierungen an.

Bei der geoelektrischen Erkundung des Untergrundes unterscheidet man die sogenannte **Sondierung**, bei der die Untergrundstruktur direkt unterhalb des Sondierungspunktes dargestellt wird und die **Kartierung**, die den Untergrund flächenhaft abbildet. Eine Art der Kartierung ist die 3D-Geoelektrik, wobei hier der Untergrund 3-dimensional erfasst und dargestellt wird. Ein Monitoring, also in zeitlicher Abfolge durchgeführte Messungen, erlaubt das Beobachten der elektrischen Widerstandsentwicklung im Untergrund. Wird ein solches Monitoring in Verbindung mit einer 3D-Geoelektrik durchgeführt, so handelt es sich um eine 4D-Geoelektrik. 4D-gleichstromgeoelektrische Messungen sind seit einiger Zeit ein erfolgreicher Ansatz zur Beobachtung von Sanierungsmaßnahmen (Ramirez *et al.*, 1993; Spies & Ellis, 1995; Newmark *et al.*, 1998; Gruhne 1999). Ihre Vorteile liegen in ihrer im Vergleich zu anderen geophysikalischen Verfahren relativ geringen Instrumentierung und ihrem minimal-invasiven Charakter. Im Folgenden werden Grundlagen für den Einsatz der 4D-Geoelektrik zur Überwachung und Optimierung einer thermischen Boden- und Grundwassersanierung dargestellt. Die Anwendung wird anhand eines Fallbeispiels an einem Standort im ehemaligen Hydrierwerk Zeitz illustriert.

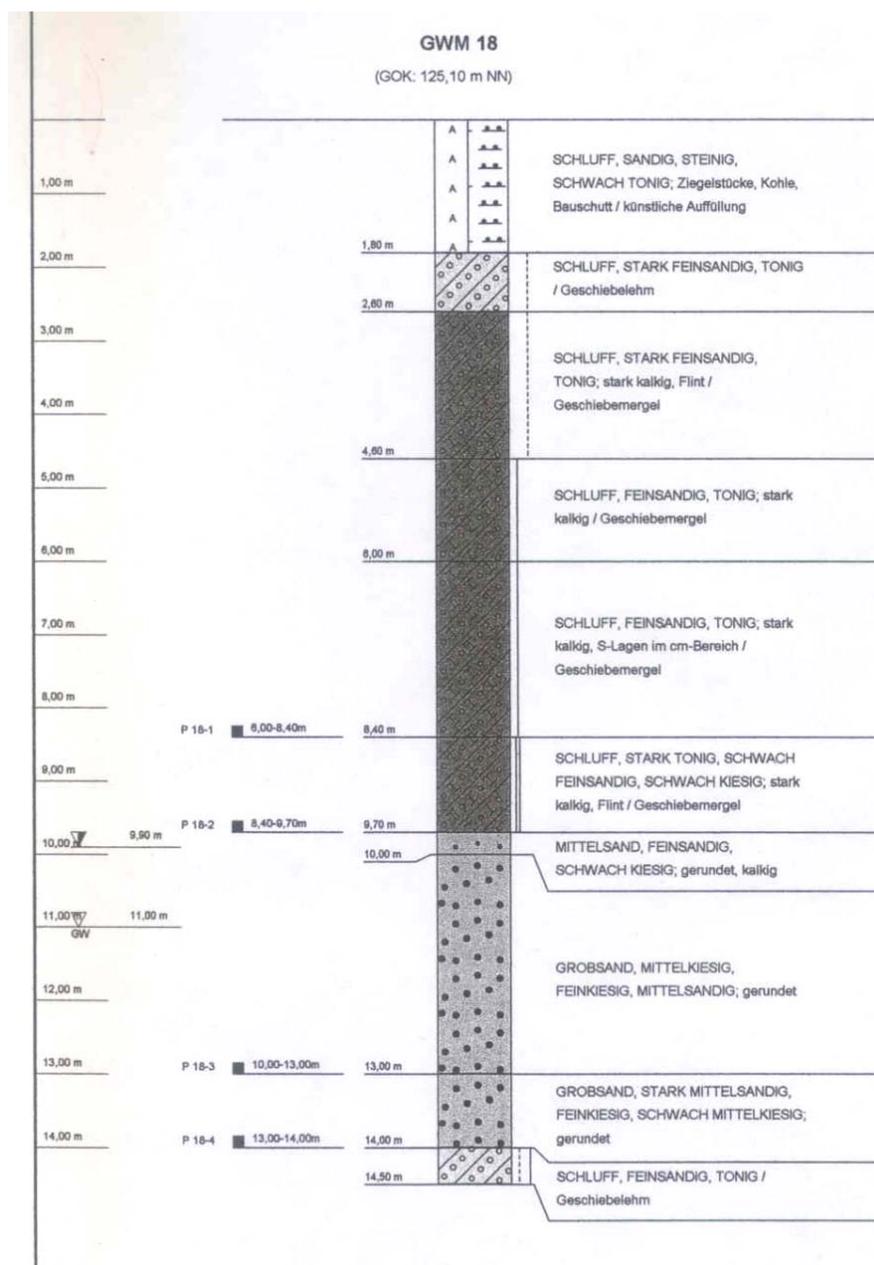
Der Ablauf einer thermischen Boden- und Grundwassersanierung wurde ausführlich in Kapitel 5 beschrieben. Durch den Dampf-Luft Eintrag in den Untergrund kommt es zu einer Erwärmung, die zur Folge hat, dass Schadstoffe im Untergrund mobilisiert und teilweise verdampft werden. Je nach vorliegendem Schadstoffspektrum sind verschiedene Temperaturen notwendig, um den Dampfdruck der Kontaminanten für einen Phasenübergang ausreichend zu erhöhen. Die hier beschriebene Anwendung sieht eine Erwärmung der Untergrundkubatur auf 80 bis 90 °C vor. Dieser Temperaturbereich bewirkt ein nahezu vollständiges Verdampfen der vorliegenden

Schadstoffe in der ungesättigten Zone. Im gesättigten Bereich ist ein größerer Energieeintrag notwendig, da Wasser durch seine hohe Wärmekapazität einen Großteil der eingebrachten Energie aufnimmt und diese nicht direkt in die von Schadstoff belasteten Bereiche vordringen kann. Weiterhin wird durch die natürliche Grundwasserströmung ein Teil der injizierten Energiemenge in Bereiche außerhalb des Sanierungsbereiches getragen. In der grundwassergesättigten Zone in reiner Phase vorliegender Schadstoff hat somit einen geringeren Mobilitätsgrad als in der ungesättigten Zone.

Durch die heterogene Untergrundstruktur ist nicht mit einer radialsymmetrischen Wirkung der thermischen Sanierung zu rechnen. Des Weiteren ermöglichen präferentielle Fließpfade es dem Sanierungsmittel Dampf, kontaminierte Bereiche, die eine geringe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen, zu umgehen. Diese Bereiche würden dann nur in einem geringen Maße oder gar nicht abgereinigt. Weiterhin ist damit zu rechnen, dass nicht die gesamte durch den Dampf eingebrachte Energie zur Sanierung des Schadstoffquellbereiches genutzt werden kann. Um die Wirksamkeit der Sanierung unter diesen Bedingungen beurteilen zu können, bietet sich ein Monitoring der Temperaturverteilung im Sanierungsbereich an. Zu diesem Zweck wird standardmäßig beim Einbau der Injektions- und Extraktionsbrunnen eine Vielzahl von Temperaturmessfühlern installiert. Diese Art der Temperaturkontrolle hat den Nachteil, dass ein großer technischer Aufwand nötig ist, um die Temperaturmessfühler zu installieren und anzubinden. Des Weiteren sind Temperaturmessungen nur an den Messpunkten möglich, deren Lage auf Grundlage der erwarteten Temperaturentwicklung festgelegt wurde. Ein nachträglicher Einbau von Messfühlern innerhalb des Sanierungsbereiches ist nur unter hohem Aufwand möglich.

### ***Vorversuch am Teststandort Leipzig***

Das containerbasierte Dampf-Luft-Sanierungssystem (MOSAM) wurde vor seinem eigentlichen Einsatz am Standort Zeitz auf dem Gelände des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig für einen Testeinsatz installiert. Bei dieser Anwendung lag keinerlei Sanierungsbedarf vor; es sollte hier lediglich Montage und Funktion aller Komponenten des Sanierungssystems unter Feldbedingungen getestet werden. Der Untergrund an diesem Standort ist im Übrigen für eine Dampf-Luft-Injektion ungeeignet, da er zu großen Teilen aus bindigem Material wie Geschiebemergeln besteht (Abbildung 30).

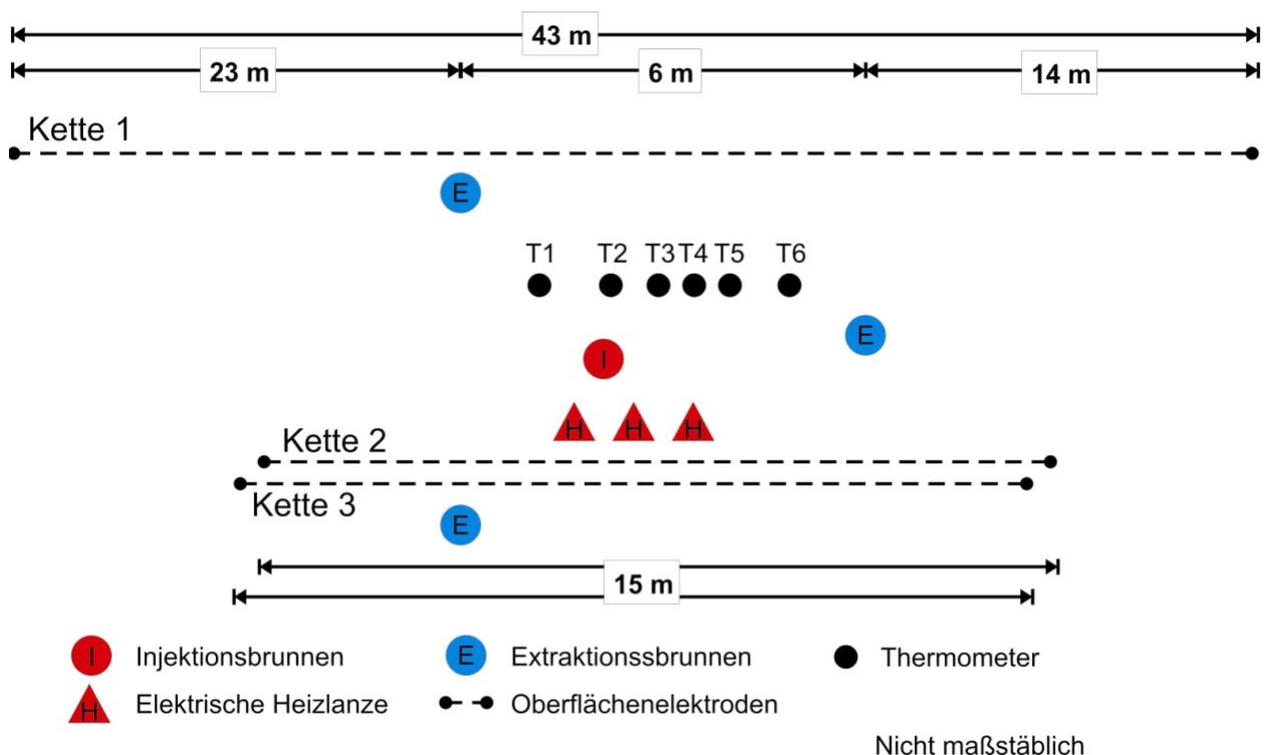


**Abbildung 30: Bohrprofil einer Grundwassermessstelle im Bereich des Testfeldes**

Im Rahmen des Funktionstests der Sanierungsanlage bot es sich an, das für den eigentlichen Standort Zeit geplante geoelektrische Monitoring ebenfalls zu testen. Der Umfang der Messungen sowie der Zeitraum waren erheblich geringer als der für die eigentliche Anwendung.

In dem am Standort Leipzig durchgeführten Monitoring sind die Bedingungen nicht vergleichbar mit denen am Sanierungsstandort Zeit. Zum Einen ist die Untergrundzusammensetzung sehr unterschiedlich, zum Anderen wurde die Dampf-Luft-Injektion in Leipzig ausschließlich in der ungesättigten Zone durchgeführt.

Das Messfeld bestand aus einer Kombination von Oberflächen- und Bohrlochelektroden. An der Erdoberfläche wurden im Bereich der Dampf-Luft-Injektions- und Extraktionsbrunnen Elektrodenketten mit einer Gesamtlänge von 44 Metern eingesetzt. Das Profil war von Ost nach West orientiert und hatte einen Elektrodenabstand von einem Meter. Da bei diesem Testversuch die Dampf-Luft-Injektion sehr kleinräumig angewendet wurde, war es sinnvoll, zwei weitere Elektrodenketten mit einem Elektrodenabstand von 0,25 Metern einzusetzen. Dies verbesserte die oberflächennahe Auflösung deutlich. Diese beiden Profile waren parallel angeordnet, hatten eine Länge von 15 Metern und waren leicht zueinander versetzt. Durch den Versatz sollten Information über die Vergleichbarkeit der Messungen gewonnen werden. Bei gleichen Messparametern und zeitnah hintereinander ausgeführten Messungen, sollten beide Profile die gleichen Messergebnisse liefern, die sich horizontal nur um den Elektrodenversatz verschieben. Abbildung 31 zeigt einen Plan des Testfeldes mit der Lage der verschiedenen Brunnen, Oberflächen- und Bohrlochelektroden.



**Abbildung 31: Lageplan der Sanierungs- und Messtechnik auf dem Testfeld Leipzig**

Ziel dieses Monitorings war es, neben der Beobachtung der Auswirkung der Dampf-Luft-Injektion weitere Erkenntnisse über die idealen Elektrodenabstände und –geometrien zu erlangen. Hierzu wurden nicht nur geoelektrische Messungen an der Oberfläche vorgenommen, sondern auch an in geringem Abstand zu den

Injektionsbrunnen installierten Bohrlochelektroden. Weiterhin wurden Messungen zwischen den Oberflächen- und den Bohrlochelektroden durchgeführt.

Um den Einfluss unterschiedlicher geoelektrischer Messgeometrien auf das Endergebnis beurteilen zu können, wurden bei den Oberflächenmessungen drei verschiedene traditionelle Konfigurationen verwendet. Hierzu zählten die Wenner-, Schlumberger- und Dipol-Dipol-Konfigurationen. Alle drei haben sich in einer Vielzahl von Anwendungen bewährt, jedoch sind die Ergebnisse von Messungen auf gleichem Untergrund aufgrund unterschiedlicher Sensitivitätsbereiche meist recht unterschiedlich.

Bevor das Sanierungssystem am Standort Leipzig installiert wurde, konnten bereits einige Nullmessungen vorgenommen werden. Hierdurch waren Störeinflüsse durch elektrisch gut leitfähige Brunneninstallationen, Kanäle und Leitungen ausgeschlossen. Unter diesen Bedingungen konnte ein Vergleich der unterschiedlichen Messkonfigurationen am besten durchgeführt werden. Wie erwartet, zeigten sich zum Teil deutliche Unterschiede. Der von den drei unterschiedlichen Messkonfigurationen erfasste elektrische Widerstandsbereich war vergleichbar und lag zwischen 1 und ca. 200 Ohmm, jedoch war die Verteilung innerhalb der vermessenen Kubatur recht unterschiedlich. Nachdem die Rohdaten mit Hilfe des Inversionsprogrammes SensInv2D invertiert wurden, zeigte vor allem die mit Dipol-Dipol-Konfiguration durchgeführte Messung große Unterschiede zu den Messungen mit Wenner- und Schlumberger-Konfiguration (Abbildung 32). Die Schlumberger- und Wenner-Datensätze zeigen beide einen relativ homogenen Bereich zwischen 2 und 10 m u. GOK mit elektrischen Widerstandswerten zwischen 1 und 50 Ohmm. Oberhalb dieses elektrisch gut leitfähigen Bereiches zeigen beide Messungen eine teilweise durchbrochene Lage von gering leitfähigem Material mit Widerstandswerten zwischen 50 und 80 Ohmm. Die Dipol-Dipol-Messung zeigt ab einer Tiefe von ca. 2 Metern kein Material mit horizontal orientierter Verteilung. Im gesamten Bereich zwischen 2 und 10 Metern wechseln hier elektrische Widerstände zwischen 1 und 200 Ohmm.

Die Eindringtiefe der drei Methoden ist im Zentrum der Auslage vergleichbar und liegt zwischen 10 und 12 m u. GOK. In den Randbereichen der Auslage ist sie wegen der schlechteren Elektrodenabdeckung geringer und reicht hier bis in Tiefen von 5 bis 6 Meter. Aufgrund der geringeren Datendichte in diesen Bereichen ist die Gefahr von Störeinflüssen hier größer. Die Sensitivität aller Konfigurationen nimmt in den Randzonen deutlich ab, was sich auch in den Inversionsergebnissen durch das gehäufte Auftreten von Anomalien zeigt. Aus diesem Grund sollte den Randbereichen der Auslagen keine zu große Beachtung bei der Auswertung geschenkt werden.

Unterschiede zeigen sich auch in der Messzeit, die für die jeweiligen Konfigurationen benötigt wurde. Mit nahezu dem gleichen Informationsgehalt konnten die Messungen der Wenner-Konfiguration in etwa der halben Zeit der Schlumberger-Konfiguration durchgeführt werden.

Aufgrund von vorliegenden Bohrlochinformationen aus unmittelbarer Nähe des Messfeldes konnten Vergleiche mit den geoelektrischen Untersuchungen vorgenommen werden. Hierbei zeigte sich, dass die Wenner- und Schlumberger-Konfigurationen bei dieser Anwendung die besten Ergebnisse lieferten.

Das geologisch aufgenommene Bohrprofil (Abbildung 30) zeigt nach einer ca. 1 Meter mächtigen künstlichen Auffüllung aus Bauschutt, Sand und Ziegelstücken einen stark feinsandigen Bereich bis ca. 2,5 Meter u. GOK. Bis in diese Tiefe bilden vor allem die Wenner- und Schlumberger-Konfigurationen die lateral ungleichmäßige Verteilung des künstlich aufgeschütteten und inhomogen zusammengesetzten Materials ab. Darunter ist bis in eine Tiefe von ca. 10 Metern stark toniger bis kalkiger, homogen verteilter Geschiebemergel anzutreffen. Dieser stellt sich vor allem durch seinen elektrisch gut leitfähigen Tonanteil im Inversionsergebnis als eine durchgehend niederohmige Zone bei den Wenner- und Schlumberger-Konfigurationen im Bereich von ca. 2,5 bis 10 Metern im Zentrum der Auslage gut dar. Die höheren elektrischen Widerstandswerte in den Randbereichen sind als Anomalien zu bezeichnen, deren Entstehen wie oben beschrieben erklärt werden kann.

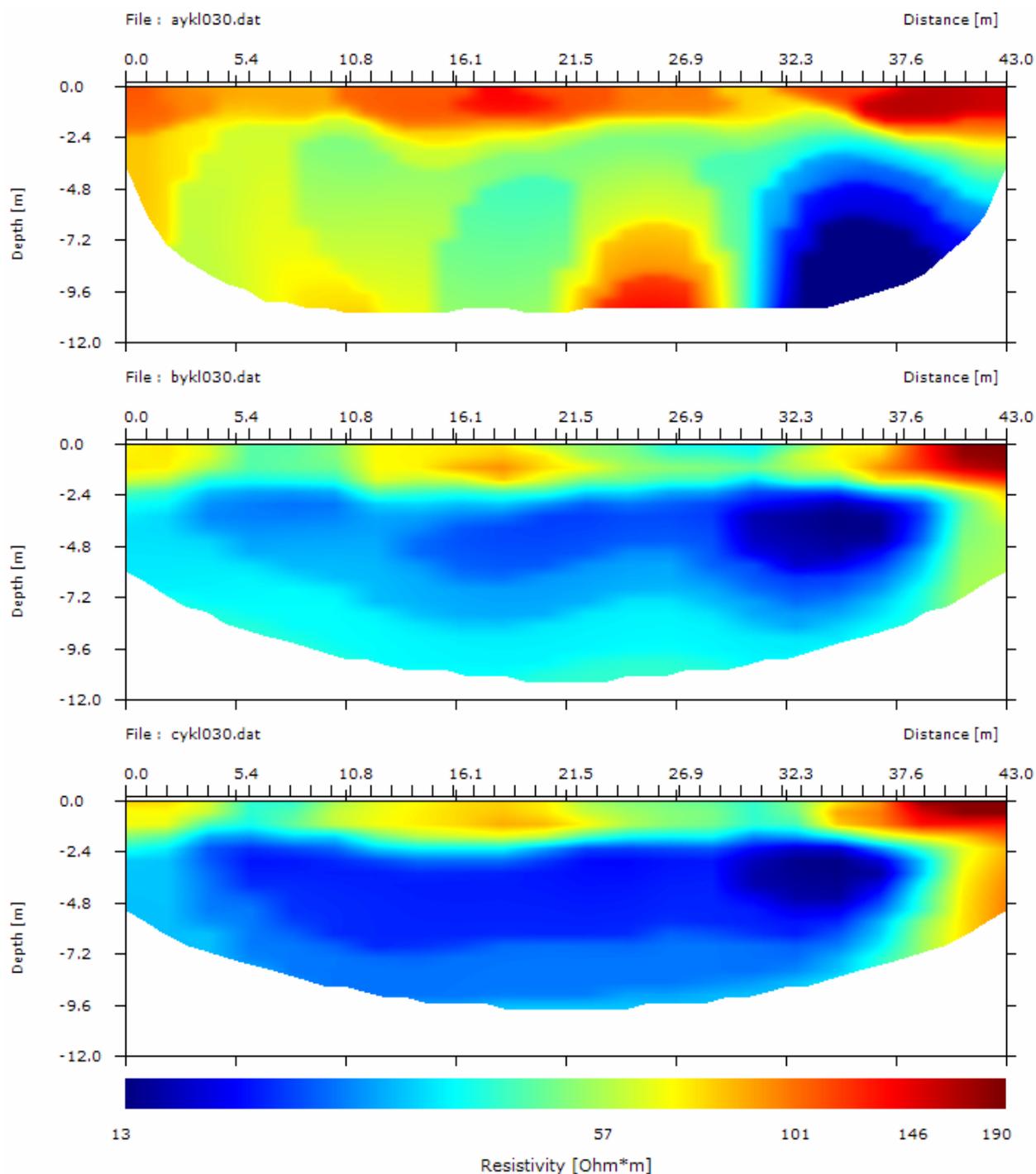


Abbildung 32: Oberflächenmessungen mit Dipol-Dipol-Konfiguration (oben), Schlumberger-Konfiguration (Mitte) und Wenner-Konfiguration (unten)

### **Leitfähigkeitsprofile**

Zusätzlich zu den geoelektrischen Oberflächen- und Bohrlochmessungen wurden am Standort Leipzig zu Vergleichszwecken vertikale Leitfähigkeitssondierungen durchgeführt. Hierzu wurden im Bereich der Injektions- und Extraktionslanzen vier Ansatzpunkte ausgewählt, an denen Leitfähigkeitsmessungen vorgenommen wurden.

Der bei dieser Art der Untersuchung gemessene Parameter ist die elektrische Leitfähigkeit, welche sich als Kombination der elektrischen Leitfähigkeiten des Grundwassers, anderer Fluide wie z.B. Schadstoffe und der Feststoffe im Untergrund zusammensetzt. Bei Bohrlochmessungen und Oberflächenmessungen werden hingegen elektrische Widerstände erfasst. Die beiden Parameter elektrische Leitfähigkeit ( $\sigma$ ) und elektrischer Widerstand ( $\rho$ ) sind über die folgende Formel miteinander verknüpft und lassen sich durch einfaches Umrechnen miteinander vergleichen:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Für die Erfassung der Leitfähigkeitsprofile wurde eine Wenner-Sonde des Herstellers Geoprobe (Abbildung 9) verwendet. Diese Wenner-Sonde besitzt eine vergleichbare Symmetrie wie die Elektrodenauslagen an der Erdoberfläche, d.h. zwei Strom-einspeiseelektroden sowie zwei Elektroden zur Messung des durch den elektrischen Widerstand des Untergrundes erzeugten Potentialabfalls. Die Ansteuerung der Sonde wird durch eine innerhalb eines Sondenstranges laufende Kabelverbindung gewährleistet. Die Messsonde wird an der Spitze des Sondenstranges montiert und mit Hilfe eines Direct-Push-Sondiergerätes in den Untergrund eingebracht. Die Leitfähigkeitsmessung findet in Echtzeit während des kontinuierlich durchgeführten Sondiervorganges statt.

Das während der Leitfähigkeitsmessung erfasste Volumen ist aufgrund der geringen Elektrodenabstände von ca. 2 cm erheblich kleiner als das einer geoelektrischen Widerstandsmessung mit Oberflächen- oder Bohrlochelektroden. Vergleiche zwischen Leitfähigkeitssondierungen und den oben genannten geoelektrischen Widerstandsmessungen waren nur sehr schwer durchführbar. Aufgrund des großen Unterschiedes der von beiden Messansätzen erfassten Untergrundvolumina sind die Einflüsse, die bei der Messung eines elektrischen Widerstandswertes durch Oberflächenmessungen zum Tragen kommen, erheblich größer. Der Messwert entspricht in diesem Fall dem Durchschnittswert des gesamten von der Messung erfassten Untergrundbereiches. Gerade bei großen Elektrodenabständen kommt der Faktor der Untergrundheterogenität immer weniger zum Tragen. Bei der Leitfähigkeitssondierung ist die Schichtauflösung erheblich feiner. Selbst kleine Tonschichten- und Linsen, die möglicherweise einen großen Kontrast zu dem hangenden und liegenden Material bilden, werden erfasst. Bei Oberflächen- und Bohrlochmessungen tragen solche Einlagerungen und Schichten zu einer leichten

Absenkung des elektrischen Gesamtwiderstandes bei, werden jedoch selbst nicht hinreichend aufgelöst. Aufgrund dieser Faktoren lieferten die Leitfähigkeitssondierungen Daten mit einer Auflösung bis in den Zentimeterbereich. Obwohl jede Methode für sich verlässliche Ergebnisse lieferte, waren die jeweiligen Resultate jedoch nicht direkt vergleichbar.

Dennoch konnten die Ergebnisse der Leitfähigkeitssondierungen im Rahmen der Schichtabgrenzung und zur Kontrolle der im Zusammenhang mit den Brunnenbohrarbeiten erstellten lokalen Stratigraphie genutzt werden.

Ein besseres Ergebnis lieferten Vergleiche von geoelektrischen Oberflächmessungen mit den vor Ort durchgeführten Bohrlochmessungen. Das von den jeweiligen Verfahren erfasste Volumen ist hier vergleichbar und variiert bei beiden Methoden mit der Auswahl der für eine Messung verwendeten Elektroden und deren Abstände.

### ***Bohrlochelektroden***

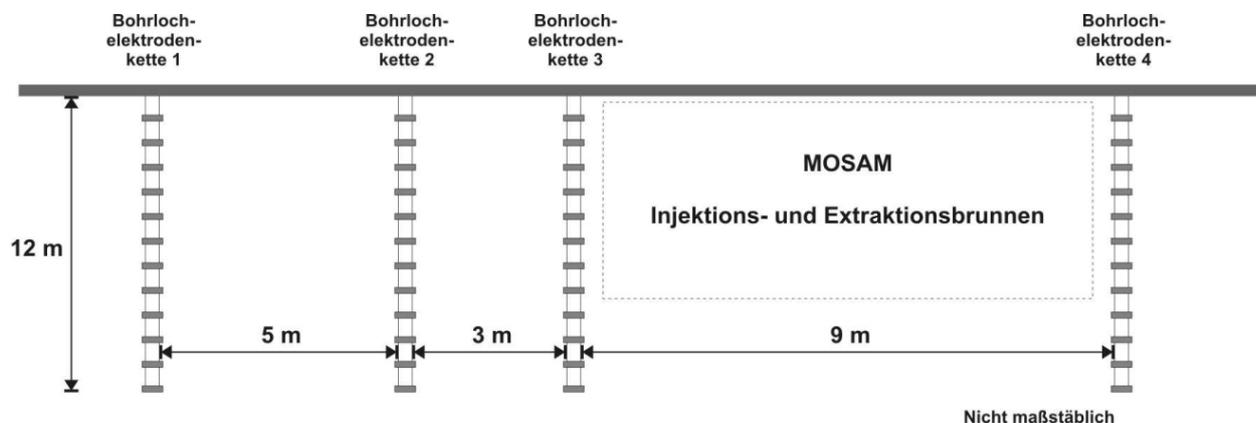
Zusätzlich zu den oberflächengeoelektrischen Messungen und den Leitfähigkeitssondierungen wurden am Teststandort Leipzig Bohrlochelektroden für geoelektrische Bohrlochmessungen sowie Kombinationsmessungen mit Oberflächenelektroden installiert. Gerade geoelektrische Messungen mit an der Erdoberfläche eingesteckten Elektroden haben den Nachteil eines mit der Tiefe sich stark verschlechternden Auflösungsvermögens. Dies liegt in der in diesen Bereichen schlechtere Elektrodenabdeckung und der damit verbundenen geringeren Sensitivität begründet. Da bei einer an der Oberfläche durchgeführten Stromeinspeisung verschiedene Zonen des Untergrundes von Strom durchflossen werden und die Messung des Potentialabfalls ebenfalls an der Oberfläche durchgeführt wird, ist es möglich, dass Bereiche im Untergrund mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen nicht einzeln aufgelöst, sondern als eine Art Mittelwert erfasst werden. Der gemessene elektrische Widerstand kann sich somit aus einer Kombination unterschiedlicher Schichten mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften oder nur einer Schicht zusammensetzen. Die Problematik dieser Mehrdeutigkeit tritt im Bereich der Geoelektrik und auch anderen geophysikalischen Methoden häufig auf (Hoffmann & Dietrich, 2004). Ein Weg, der es erlaubt, die Zusammensetzung eines an der Erdoberfläche gemessenen Widerstandswertes zu beurteilen, ist eine exakte Schichtenauflösung, beispielsweise mit der Methode der Leitfähigkeitssondierung wie in Kapitel 4 beschrieben. Die hieraus gewonnenen Informationen können dann für ein Startmodell der bei der Auswertung von geoelektrischen Messungen häufig durchgeführten Dateninversion genutzt werden.

Eine weitere Methode, die Nachteile der geoelektrischen Oberflächenmessungen zu umgehen, ist die Verwendung von Bohrlochelektroden. Hierbei wird ein Elektrodenstrang in eine Bohrung oder Sondierung in den Untergrund abgeteuft. In definierten Abständen sind Elektroden am Elektrodenstrang befestigt und durch an die Oberfläche geführte Kabel ansteuerbar. Da ein hinreichend guter Kontakt der Elektroden zum anstehenden Untergrund nicht immer gegeben ist, werden einige Modelle dieser Elektroden vertrieben, die sich, ähnlich einem Packer, an den Elektrodenpositionen aufblasen lassen. Auf diese Weise werden die jeweiligen, frei in der Bohrung hängenden Elektroden an die Formation gedrückt und so ein guter elektrischer Kontakt sichergestellt. Diese aufwändige Konstruktion der Bohrlochelektroden ist vor allem in der ungesättigten Zone hilfreich, da die Formation nach dem Ausbau eines Bohr- oder Sondiergestänges meist nicht kollabiert.

Bei den geoelektrischen Untersuchungen auf dem Testgelände in Leipzig kamen aufgrund der geringen Sondierungstiefe von 12 Metern selbst konstruierte Bohrlochelektroden zum Einsatz. Als Stützgestänge für die Elektroden und die Ansteuerungsleitungen kamen PVC-Installationsrohre zum Einsatz. Die Elektroden bestanden aus Edelstahlgeräten, die in Abständen von einem Meter am Stützgestänge befestigt wurden. Die Elektroden wurden mit Hilfe eines Direct-Push-Gerätes und Hohlsondiergestänge (2,125“) im Untergrund verbaut. In der gesättigten Zone kollabierte die Formation wie erwartet selbstständig und sicherte damit eine gute elektrische Anbindung der Elektroden in diesem Bereich. In der ungesättigten Zone konnte eine Ankopplung durch Einbringen von Verfüllmaterial gewährleistet werden. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass das eingesetzte Verfüllmaterial keinen zu großen Leitfähigkeitsunterschied zur umgebenden Formation bildet, da es hierdurch zu einer Beeinflussung des natürlichen elektrischen Widerstandsgefüges kommen kann. Daher wurde bei dieser Anwendung mittelfeiner Quarzkies verwendet. Um einen Eintrag von Regenwasser in die verfüllte Sondierung zu verhindern, wurden die obersten 20 Zentimeter jeder Elektrodenkette mit Bentonitpellets abgedichtet. Dies diente auch als Abdichtung für das bei der Sanierung injizierte Dampf-Luft-Gemisch, für das die verfüllte Sondierung sonst einen präferentiellen Fließpfad dargestellt hätte.

Die Messabläufe an den Bohrlochelektroden sind denen der Oberflächenelektroden vergleichbar. Es wird jeweils ein Elektrodenpaar für die Stromspeisung und ein zweites für die Messung des Potentialabfalles genutzt. Die Messkonfigurationen können ähnlich beliebig wie an der Oberfläche gewählt werden. Aufgrund der vier getrennt ansteuerbaren Elektrodenstränge sind nicht nur Messungen innerhalb eines Elektrodenstranges möglich, sondern auch zwischen den Strängen, d.h. es kann

eine Stromeinspeisung beispielsweise an Strang 1 und gleichzeitig Potentialmessungen an den Strängen 2, 3 und 4 vorgenommen werden (Abbildung 33).



**Abbildung 33: Geometrie der Bohrlochelektroden am Testfeld Leipzig**

Die Dampf-Luft-Injektionsbrunnen befinden sich zwischen den Bohrlochelektroden, wobei diese wiederum asymmetrisch zu den Injektionsbrunnen angeordnet sind. Aufgrund der Asymmetrie lässt sich der Erfassungsbereich der einzelnen Elektrodenstränge beurteilen, die noch über eine für die Anwendung ausreichende Messsensitivität verfügen. Die Abstände der Elektroden an den einzelnen Strängen liegen daher für alle vier Stränge bei einem Meter.

Innerhalb der einzelnen Elektrodenstränge wurden Messungen mit Wenner-Konfiguration durchgeführt. Zwischen den Elektrodensträngen wurden weiterhin Messungen mit Dipol-Dipol sowie Pol-Pol Konfigurationen durchgeführt. Um die Elektrodenabdeckung im oberen Bereich der Bohrlochelektroden zu optimieren, wurde eine Kombination von Messungen von Bohrloch- mit Oberflächenelektroden vorgenommen. Tabelle 5 zeigt in einer Übersicht die durchgeführten Messungen.

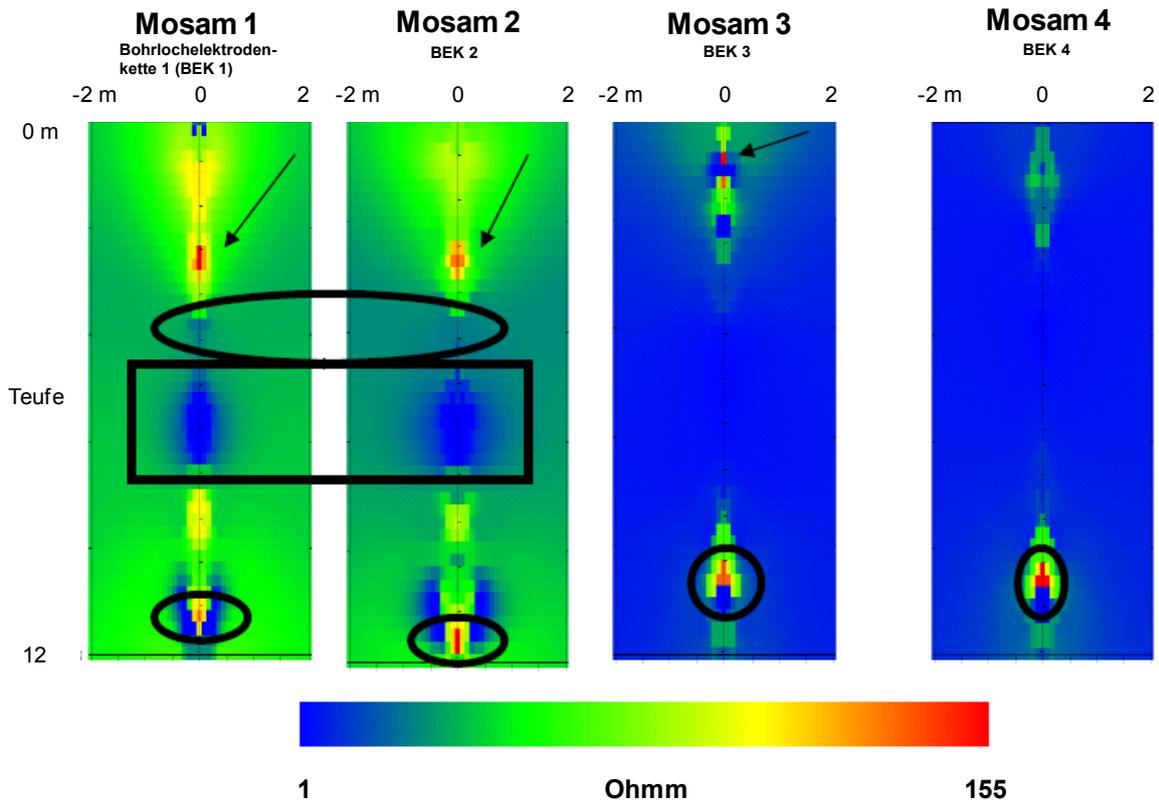
Elektrodenart	Messkonfiguration	Anwendung	Qualität/ Verwertbarkeit
Oberflächen- elektroden	Wenner	Monitoring/Nullmessung	+++
	Schlumberger	Nullmessung	++
	Dipol-Dipol	Nullmessung	+
Bohrloch- elektroden	Wenner	Nullmessung (Einzelstrang)	+++
	Dipol-Dipol	Nullmessung (Tomographie)	++
	Pol-Pol	Nullmessung (Tomographie)	+++
Electric- Conductivity- Logging	Wenner	Korrelation mit Oberflächenelektroden	+
	Wenner	Schichterkundung	+++

**Tabelle 5: Übersicht über die am Teststandort Leipzig durchgeführten Messungen und deren Verwertbarkeit**

Messungen mit Wenner-Konfiguration am einzelnen Elektrodenstrang haben den gleichen Verlauf wie Oberflächenmessungen. An zwei der Bohrlochelektroden wird ein Strom in den Vollraum eingespeist, wobei an einem zweiten Elektrodenpaar der durch den elektrischen Widerstand der Formation hervorgerufene Spannungsabfall aufgezeichnet wird. Um radial vom Elektrodenstrang entfernte Bereiche zu erfassen, wird der Abstand zwischen Strom- und Spannungselektroden erweitert. Im Unterschied zu reinen Oberflächenmessungen wird bei dieser Methode nicht nur der Halbraum, sondern der gesamte Vollraum erfasst. Die Gesamtlänge der Bohrlochelektroden ist mit 12 Metern kürzer als die Oberflächenauslagen, daher ist der vertikale Erfassungsbereich relativ begrenzt. Da Wenner-Konfigurationen an der Erdoberfläche meist eine gute laterale Auflösung aufweisen (Knödel *et al.*, 2005) sollte bei dieser Art der Bohrlochmessung eine gute vertikale Schichtenauflösung möglich sein. Im Allgemeinen liegt das Auflösungsvermögen dieser Anordnung beim halben Elektrodenabstand (Knödel *et al.*, 2005); somit sollten also Schichten und Körper mit 50 cm und größeren Durchmesser deutlich hervortreten. Die Auflösung ist jedoch deutlich geringer als die der zuvor beschriebenen Leitfähigkeitssondierungen.

Die Problematik der schlechten Abdeckung in den Anfangs- und Endbereichen der Elektrodenketten ist analog zur Problematik bei Oberflächenelektroden zu sehen.

Deutlich wird dieses Phänomen in Abbildung 34.



**Abbildung 34: Ergebnisse von Messungen an Bohrlochelektroden mit Wenner-Konfiguration**

Hier sind die Ergebnisse von Messungen mit Wenner-Konfigurationen in den vier separaten Bohrlochelektrodenketten abgebildet. Deutlich tritt ein niederohmiger Bereich im Zentrum aller Ketten hervor. Der starke Schwankungsbereich am Anfang und Ende der Elektrodenketten Mosam 1 und Mosam 2 ist durch die zuvor beschriebenen Randeffekte zu erklären. Die hochohmigen Bereiche von 100 bis 150 Ohmm treten ebenfalls bei diesen beiden Elektrodenketten in einer Tiefe von ca. 2,5 Metern auf (s. Pfeile). In den Abbildungen der Elektrodenketten Mosam 3 und 4 ist ein ähnlicher Effekt zu erkennen, jedoch liegen die hochohmigen Bereiche hier mit einer Tiefe von 0,5 bis 2,0 Metern etwas höher. Da diese Zone mit höherohmigem Material in den Messungen aller vier Elektrodenketten deutlich zu erkennen ist, kann davon ausgegangen werden, dass es sich nicht um eine Anomalie, sondern um eine Schicht mit hervortretendem elektrischen Widerstand wie beispielweise Kiese oder Sande handelt. Diese Schicht tritt vor allem in der Elektrodenkette Mosam 1 prominent auf und scheint in ihrer Mächtigkeit Richtung Osten (Elektrodenkette Mosam 4) abzunehmen und dabei leicht anzusteigen. In den Leitfähigkeitsprofilen tritt diese Schicht ebenfalls im Bereich zwischen 2 und 4 Metern in den westlichen drei Profilen in relativ dünnen Zonen mit geringer leitfähigem Material hervor. Die

Daten der Bohrlochelektroden sind somit in der Lage, diese nur relativ geringmächtigen Schichten abzubilden. Eine gute Übereinstimmung ist zwischen dem Leitfähigkeitsprofil und den Messungen an der Elektrodenkette Mosam 4 zu finden, da in beiden der Bereich zwischen 2 und 4 Metern keine erhöhten elektrischen Widerstände aufweist. Eine weitere Zone mit erhöhtem elektrischem Widerstand ist bei Mosam 1 und 2 in etwa 8 Metern Tiefe zu erkennen. Hier steigt der elektrische Widerstand auf Werte über 100 Ohmm an. Als Grund hierfür kann ebenfalls eine hochohmige Schicht genannt werden, die auch in den entsprechenden Leitfähigkeitsprofilen abgebildet wird.

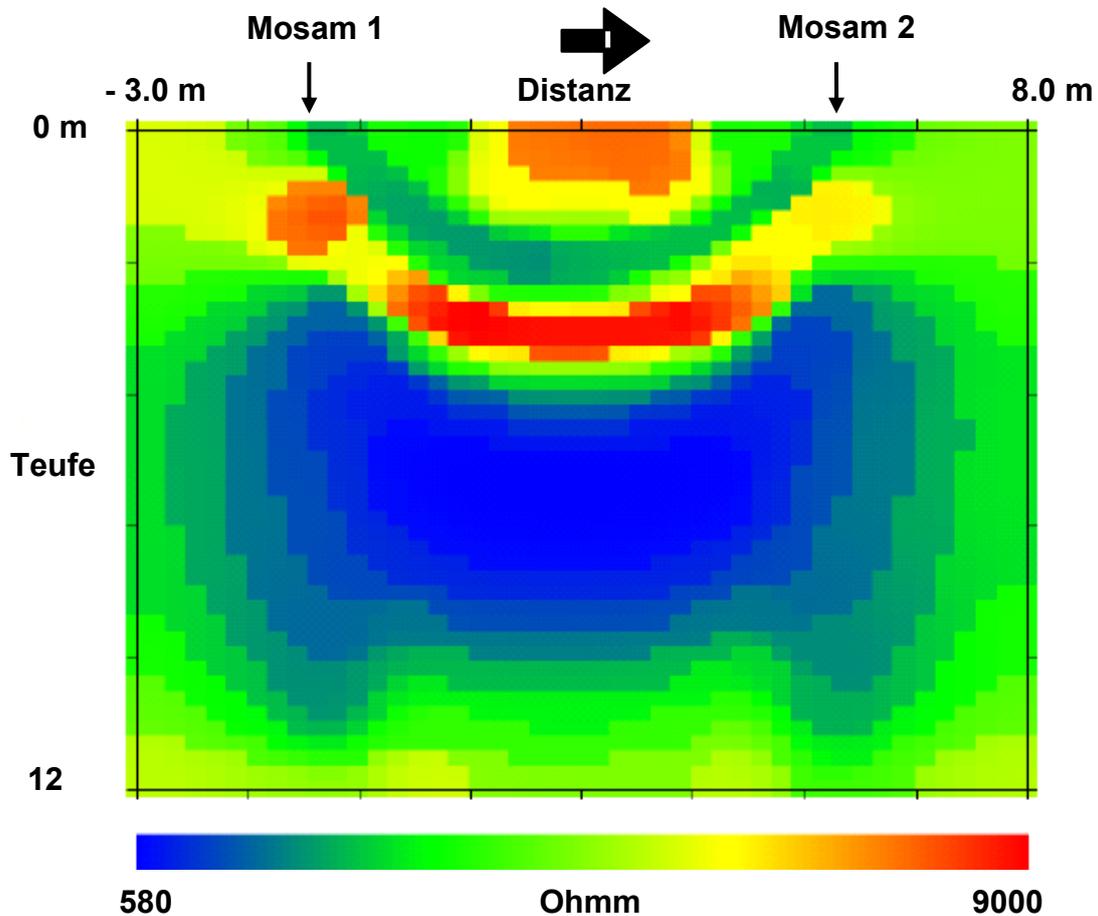
Neben den Wenner-Konfigurationen wurde am Standort Leipzig eine große Anzahl an Dipol-Dipol-Konfigurationen gemessen. Durch die unterschiedlich wählbaren Elektrodenabstände sowie Kombinationsmöglichkeiten der Bohrlochelektrodenketten standen viele Messoptionen offen.

Wie die Messungen zwischen den verschiedenen Elektrodensträngen zeigten, ist der horizontale Abstand der genutzten Bohrlochelektroden von großer Bedeutung. Gerade bei den Messungen zwischen den Elektrodenketten Mosam 1 und 4 zeigte sich, dass viele Messfehler aufgrund einer geringen Stromspeisung auftraten, die bei näher gelegenen Elektrodenketten noch ausreichend waren. Weiterhin nahm der Sensitivitätsbereich deutlich mit der Entfernung vom Strom- und Potentialdipol ab. Die erfolgreichsten Messungen konnten daher zwischen den jeweils benachbarten Elektrodenketten durchgeführt werden. Ebenso zeigte sich, dass das Auflösungsvermögen auch bei den Bohrlochelektroden mit größeren Elektrodenabständen innerhalb einer Elektrodenkette deutlich abnahm.

Wie zurückliegende Untersuchungen gezeigt haben, können mit Pol-Pol-Konfigurationen bei geoelektrischen Messungen zwischen Bohrlöchern zum Teil deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden als mit Dipol-Dipol-Konfigurationen (Dietrich, 1999). Bei dieser Messkonfiguration wird jeweils ein Pol des Strom- und Potentialpaares in großem Abstand zu den sich im Messfeld befindlichen Strom- und Potentialpolen platziert. Im Messverlauf werden somit die Positionen von je nur einem Strom- und Potentialpol variiert. Hieraus ergibt sich eine erheblich größere Anzahl von möglichen Messkombinationen als bei Dipol-Dipol-Messungen.

Zur Kontrolle wurde bei den Pol-Pol-Messungen nach Beendigung eines Messdurchlaufes derselbe Durchlauf mit reziproken Elektrodenkombinationen durchgeführt. Hierbei wurden bei gleichem Messablauf die Strom- und Potentialpole vertauscht. Beide Ansätze sollten schließlich die gleichen Messwerte liefern. Diese Methode wurde bereits zur Verifikation von Messungen empfohlen (Daily, 2004).

Aufgrund der vielen möglichen Messkombinationen wird im Weiteren nur auf die erfolgreichsten eingegangen.



**Abbildung 35: Ergebnisse von Messungen an Bohrlochelektroden mit Pol-Pol-Konfiguration**

Wie Abbildung 35 zeigt, können die Bereiche der oberflächlichen Aufschüttung durch höhere elektrische Widerstände deutlich von den ab ca. 2,5 Metern anstehenden Mergelschichten unterschieden werden. Es zeichnet sich jedoch wiederum der Effekt höherer Sensitivitäten in der Nähe der Bohrlochelektroden ab. Daher entspricht das Absinken des hochohmigen Bereiches im Zentrum bis unter vier Meter Tiefe wohl nicht der Realität, sondern ist ein Inversionseffekt.

Ein größerer Bohrlochelektrodenabstand scheint einen geringeren Effekt auf die Datenqualität als bei Dipol-Dipol-Konfigurationen zu haben. Dies wird beim Vergleich der Abbildungen 35 und 36 deutlich.

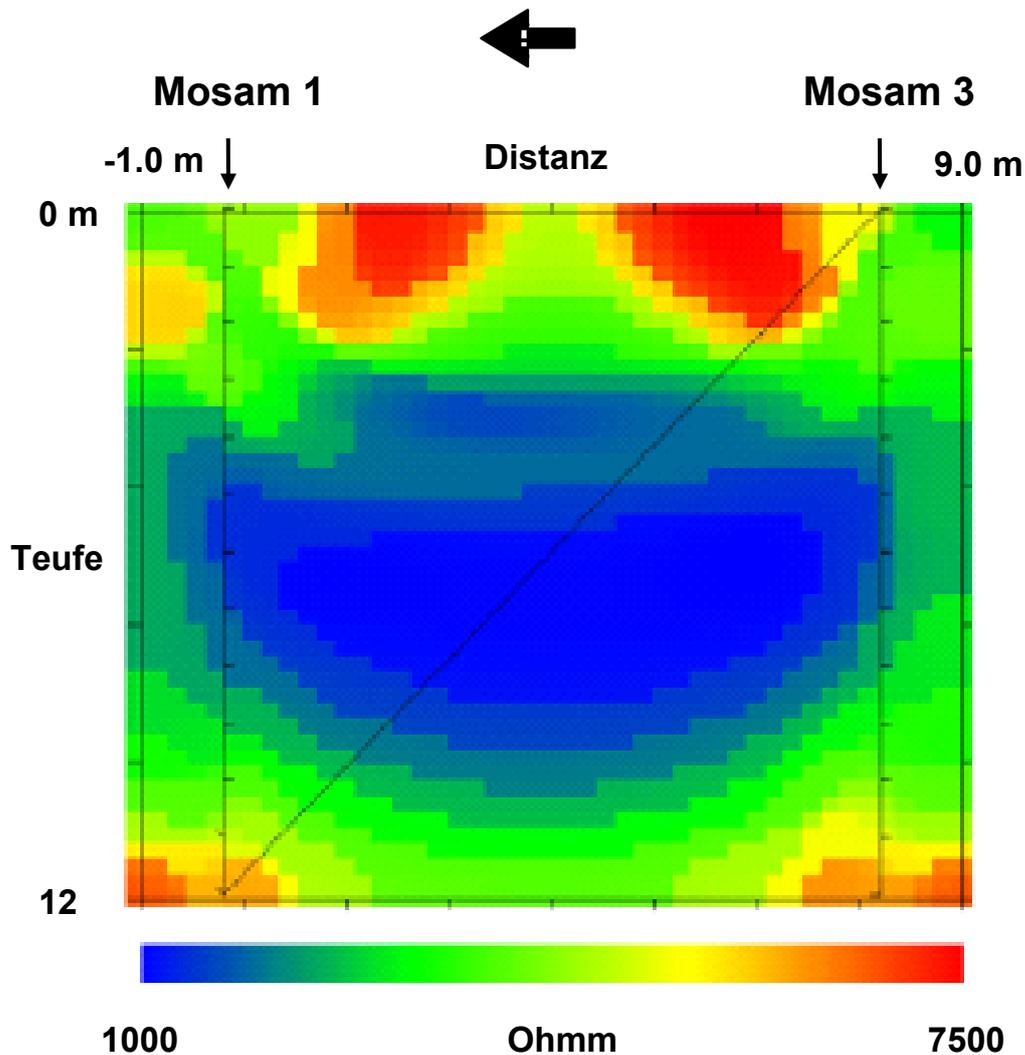
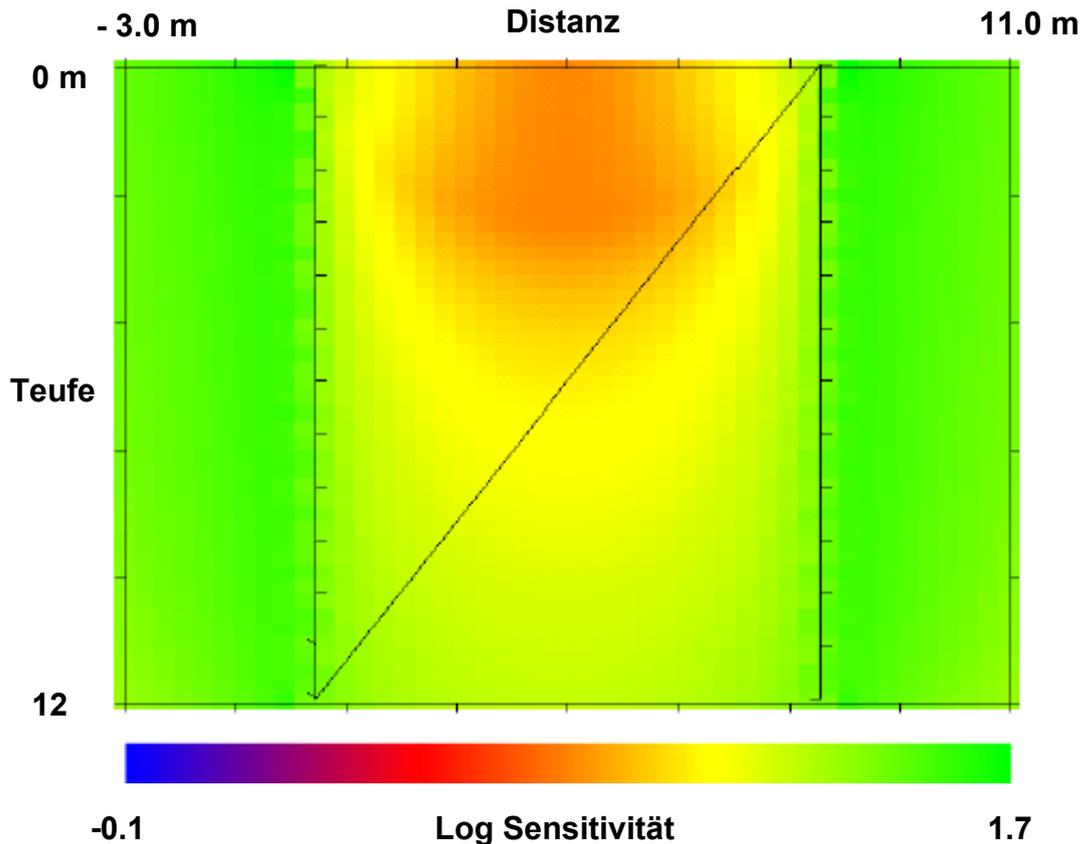


Abbildung 36: Ergebnisse von Messungen an Bohrlochelektroden mit Dipol-Dipol-Konfiguration

Die Bohrlochelektrodenabstände vergrößern sich hierbei von fünf auf acht Meter. Da die Schichtlagerung am Standort als weitgehend horizontal angesehen werden kann, ist davon auszugehen, dass es sich bei den Strukturen, die im Zentrum der Abbildungen des Inversionsergebnisses hervortreten, um Randeffekte, hervorgerufen durch schlechtere Elektrodenabdeckung, handelt. Mit einem Startmodell, das weitgehend horizontale Schichtung beim Inversionsprozess vorgibt, könnten entsprechende Modellrechnungen wahrscheinlich deutlich verbessert werden.



**Abbildung 37: Beispiel einer Sensitivitätsverteilung bei Messungen zwischen Bohrlochelektroden**

Die Sensitivität von Elektrodenkombination ist ein entscheidender Faktor für die Verwertbarkeit von Messungen. Sie ist ein Maß für den Einfluß einer geringen Änderung bzw. Störung in der geoelektrischen Parameterverteilung des Untergrundes auf den Meßwert für eine gegebene Elektrodenanordnung. Die Sensitivität ist abhängig von den Elektrodenpositionen einer konkreten Meßanordnung und der Verteilung der geoelektrischen Parameter ohne Berücksichtigung möglicher Störeinflüsse (Dietrich, 1999). Wie in Abbildung 37 deutlich wird, ist die Sensitivitätsverteilung, die als Grundlage für die elektrische Widerstandsverteilung im Inversionsprozess genutzt wird, maßgeblich für das in diesem iterativen Verfahren erreichbare Ergebnis. Die geringsten Sensitivitäten sind im Zentrum zwischen den Bohrlochelektroden im oberflächennahen Bereich zu finden. Dies bestätigt die Effekte im Inversionsergebnis der Messungen zwischen den Bohrlochelektroden Mosam 1 und Mosam 2 & 3 (Abbildung 35 und 36).

Die Messungen mit Pol-Pol-Konfigurationen zwischen den anderen Bohrlochelektroden lieferten ähnliche Ergebnisse wie die hier beschriebenen, daher wird auf diesen Teil nicht weiter eingegangen.

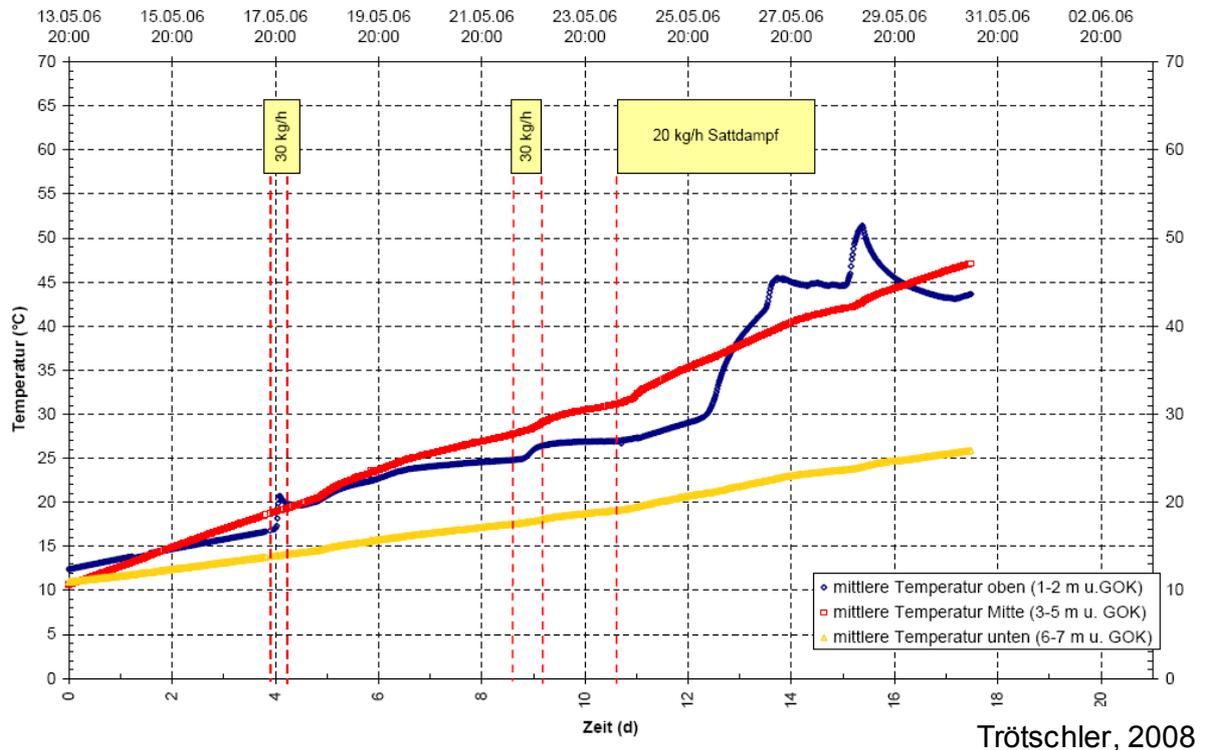
## **Monitoring**

Das geoelektrische Monitoring der Dampf-Luft-Injektion wurde im Anschluss an die Nullmessungen auf dem Testgelände in Leipzig durchgeführt. Ziel war es, hierdurch Erkenntnisse für den Aufbau des Monitoringsystems am Sanierungsstandort Zeitz zu gewinnen. Die beiden Anwendungen sind aufgrund der lokalen Untergrundstruktur nicht in allen Punkten vergleichbar. Am Standort Leipzig steht zum großen Teil bindiger Geschiebemergel an, der nur schlechte Bedingungen für eine Dampf-Luft-Ausbreitung liefert. Weiterhin findet die Dampf-Luft-Injektion hier nur in der ungesättigten Zone statt, wobei am eigentlichen Sanierungsstandort Zeitz die Sanierung von kontaminiertem Grundwasser zu einem der Hauptziele der Pilot-sanierung gehört.

Am Standort Leipzig war es dagegen Ziel, die technische Funktion aller Bauteile des Sanierungssystems zu testen und erste Erfahrungen mit dem geoelektrischen Monitoring unter Realbedingungen zu sammeln.

Die zuvor beschriebenen Messungen mit Bohrlochelektroden wurden zu Testzwecken durchgeführt. Im weiteren Verlauf der Anwendung und des Monitoring wurde auf Messungen durch Oberflächenelektroden zurückgegriffen. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die Erkenntnisse zu den Bohrlochelektroden noch nicht ausreichend, um etwaige Änderungen in den Messergebnissen auf Dampf-Luft-Injektion oder andere mögliche Phänomene zurückführen zu können. Aus diesem Grund wurde für den Monitoringversuch der 43 Meter lange Oberflächenelektrodenstrang genutzt. Wie die zuvor durchgeführten Nullmessungen zeigten, erwiesen sich die Messungen mit Wenner-Elektrodenkonfigurationen am erfolgreichsten und wurden daher für das anstehende Monitoring genutzt. Bevor die Dampf-Luft-Injektion gestartet wurde, kamen die am Standort installierten elektrischen Heizlanzen mit einer Temperatur von ca. 500 °C für einen Zeitraum von sechs Tagen zum Einsatz. Die Aufgabe und Funktionsweise dieser Elemente wird ausführlich in Kapitel 5 beschrieben. Während die Dampf-Luft-Injektion betrieben wurde, blieben die elektrischen Heizelemente in Betrieb, zeigten jedoch aufgrund durchgeschmorter Isolationskabel viele Ausfälle.

Die Dampf-Luft-Injektion konnte aufgrund technischer Probleme ebenfalls nicht kontinuierlich betrieben werden. Abbildung 38 zeigt den Verlauf der durch im Untergrund verbauten Temperaturfühler erfassten Temperaturentwicklung in drei definierten Untergrundzonen während des Dampf-Luft-Injektionsprozesses.



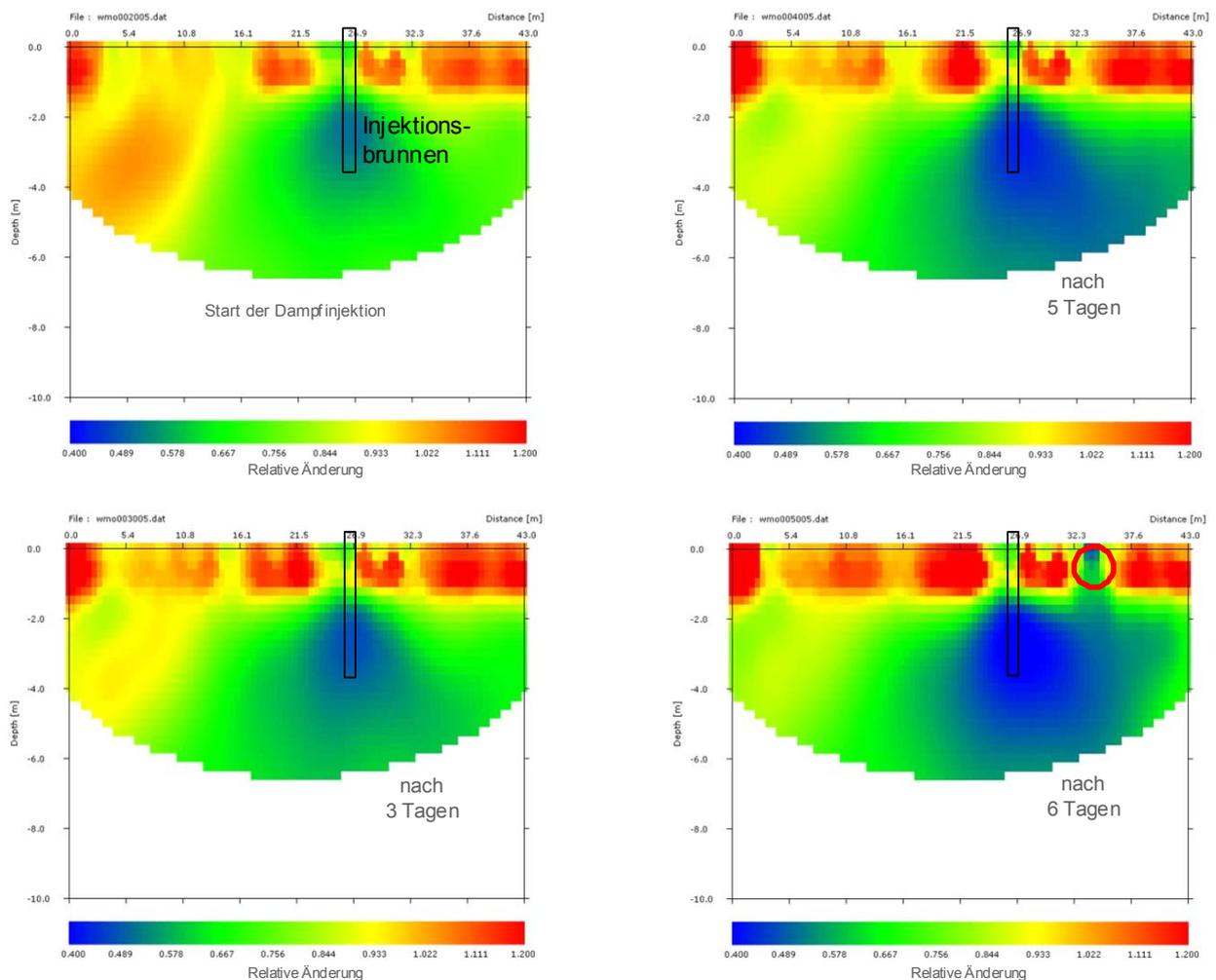
**Abbildung 38: Temperaturentwicklung im Untergrund beim Testbetrieb der thermischen Sanierungsanlage**

Vor Beginn der Dampf-Luft-Injektion sind die Temperaturanstiege durch den Wärmeübertrag der elektrischen Heizlanzen zu erklären. Abbildung 38 zeigt über die Zeit des Erwärmungsprozesses keinen linearen Temperaturanstieg. Die drei Tiefenzonen erfahren eine individuell unterschiedliche Erwärmung. Vor allem während des Betriebes der Dampf-Luft-Injektion zeigt die oberste Zone (1-2 m u. GOK) durch sprunghaften Temperaturanstieg die stärkste Reaktion. Die beiden tiefer liegenden Zonen werden zu Beginn des Anlagenbetriebes hauptsächlich durch die elektrischen Heizlanzen erwärmt und zeigen einen eher kontinuierlichen Temperaturanstieg. Aufgrund von Konvektionseffekten werden die beiden Zonen bis 5 Meter Tiefe stärker durchwärmt als die Zone zwischen 6 und 7 Metern. Ein interessanter Effekt ist im Bereich bis 2 Meter u. GOK zu erkennen. Hier findet auch während des alleinigen Betriebes der elektrischen Heizlanzen keine lineare Untergrunderwärmung statt. Dies ist vor allem durch starke Niederschlagsereignisse, die während des Testes auftraten, zu erklären. Durch eindringendes kaltes Oberflächenwasser kam es zu einer verzögerten Erwärmung des Untergrundes bis in zwei Meter Tiefe. Da sich dieser Bereich vor allem aus aufgeschüttetem Material zusammensetzt, ist hier ein besonders leichtes Eindringen von Oberflächenwasser

möglich. Der Einfluss auf die bindigen Geschiebemergelschichten ist hingegen vernachlässigbar.

Während des gesamten Prozesses der Untergrunderwärmung wurden täglich geoelektrische Widerstandsmessungen durchgeführt und diese mit den Ergebnissen der zuvor vorgenommenen Nullmessung abgeglichen. Ein optischer Abgleich der Inversionsergebnisse der einzelnen Messungen ist nicht sinnvoll, da vor allem kleine Änderungen nicht erfasst werden können. Ebenso ist die Betrachtung von Differenzen aus zwei Messungen nicht zweckmäßig, da hierbei die Formationsfaktoren des Untergrundmaterials Beachtung finden müssen.

Die Betrachtung der relativen Änderung der elektrischen Widerstandsverhältnisse ist daher die sinnvollste Art zur Auswertung des Monitoring.



**Abbildung 39: Relative elektrische Widerstandsänderungen mit Beginn der Dampf-Luft-Injektion (roter Kreis: Dampfdurchbruch)**

Der Einfluss der Dampf-Luft-Injektion wird in den Zeitreihen von Abbildung 39 deutlich abgebildet. Eine relative Änderung der elektrischen Widerstände ist vor allem im Bereich der Filteröffnung des Injektionsbrunnen gut zu erkennen. Bei dieser Anwendung zeigt sich, dass in der vom Dampf-Luft-Gemisch durchströmten Zone die elektrischen Widerstände deutlich abfallen. Bereits mit Beginn der Injektion ist am ersten Tag eine elektrische Widerstandsveränderung deutlich zu erkennen. Welche Faktoren ausschlaggebend für eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes sind, kann im Voraus nicht immer sicher angegeben werden. Es können beim Dampfeintrag Effekte auftreten, die zu einer Erhöhung oder Absenkung der elektrischen Widerstände im Untergrund führen. Ebenso sind sogar gegenläufige Effekte möglich (Ramirez *et al.*, 1993). Eine Absenkung des elektrischen Widerstandes kann beispielsweise erfolgen, wenn in einem vom Dampf-Luft-Gemisch infiltrierten Bereich die Kationenmobilität aufgrund von Temperaturerhöhung steigt. Dies ist vor allem in Zonen mit erhöhtem Tonmineralgehalt möglich. Die Kationenmobilität in diesen Zonen steigt mit einer Temperaturerhöhung bis zum Siedepunkt (im grundwassergesättigten Bereich) kontinuierlich an. Eine Verdrängung von Porenwasser in der gesättigten sowie ungesättigten Zone durch Dampf-Luft-Injektion steht diesem leitfähigkeitssteigernden Phänomen entgegen. Da selbst unkontaminiertes Grundwasser eine Leitfähigkeit im Bereich von 500 bis 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aufweist, wirkt sich die Verdrängung dieses elektrischen Leiters negativ auf die Gesamtleitfähigkeit des Untergrundes aus, d. h. der messbare elektrische Widerstand nimmt zu.

Beim Monitoring der Dampf-Luft-Ausbreitung in dieser Anwendung scheinen die Effekte, die leitfähigkeitserhöhend wirken, deutlich im Vordergrund zu stehen (Abbildung 39). Weiterhin fällt deutlich auf, dass sich innerhalb der ersten fünf Tage der Dampf-Luft-Ausbreitung die elektrische Widerstandsänderung nahezu radialsymmetrisch darstellt. Dies ist bei der Anwendung des Sanierungssystems unter inhomogenen Untergrundbedingungen nicht zu erwarten. Da am Standort Leipzig jedoch ab ca. 2 m u. GOK hydraulisch gering durchlässiger Geschiebemergel ansteht, ist das Entstehen von präferentiellen Fließpfaden des Dampf-Luft-Gemisches eher unwahrscheinlich. Findet die Injektion kontinuierlich statt, so ist ebenfalls nicht mit einem Kondensieren des unter Druck eingebrachten Gemisches bis zu den Extraktionsbrunnen hin zu rechnen. Ein kontinuierliches Aufsteigen des Dampf-Luft-Gemisches innerhalb des Aquifers und der ungesättigten Zone ist aufgrund von Dichteeffekten an optimal geeigneten Standorten zu erwarten. Dies wird durch die geringe hydraulische Durchlässigkeit am Standort Leipzig unterbunden, so dass eine Infiltration der Zone unterhalb der Injektionsöffnung erfolgt. Das Ansteigen der elektrischen Widerstände in der oberflächennahen Schicht kann durch Austrocknungseffekte erklärt werden. Vor allem hier kommt es durch den

Einfluss der elektrischen Heizlanzen zu einem Verdampfen des Porenwassers, das zuvor durch die natürliche Feldkapazität des Bodens für niedrigere elektrische Widerstände gesorgt hatte. Dies erklärt weiterhin, warum es beim Einsatz einer kombinierten thermischen Sanierungsmethode in einigen Teilen des Untergrundes zu einem Absinken und in anderen Teilen zum Ansteigen der elektrischen Widerstände kommen kann.

Da die obersten zwei Meter der behandelten Kubatur aus Aufschüttungsmaterial bestehen, wird durch die geringere Kompaktion dieses Materials ein Verdampfen von Porenwasser erleichtert.

Die elektrische Widerstandsverteilung in der Aufschüttung stellt sich diskontinuierlich dar (Abbildung 39). Da dies ein oberflächennaher Bereich ist, kann hier mit den höchsten Sensitivitäten der Elektrodenauslage gerechnet werden. Daher kann mit großer Wahrscheinlichkeit festgestellt werden, dass die elektrischen Widerstandsänderungen in diesem Bereich nicht auf Anomalien zurückzuführen sind. Vielmehr wird hier im Bereich der Heizlanzen eine starke elektrische Widerstandserhöhung deutlich, welche sich durch die oben genannten Effekte erklärt (z. B. Porenwasserverdampfung, Temperatureinfluss). Das Absinken der elektrischen Widerstände in anderen oberflächennahen Bereichen ist durch Infiltration von Regenwasser zu erklären, welches eine Erhöhung des Porenwassergehaltes und die damit verbundenen elektrischen Leitfähigkeitsänderungen hervorruft.

Ein besonderer Effekt, der durch die Dampf-Luft-Injektion auftritt, ist am sechsten Tag nach Beginn der Injektion festzustellen. Im oberflächennahen Bereich kommt es bei ca. 34 Metern Profildistanz zu einem kleinräumigen, deutlichen Absinken der elektrischen Widerstände. Dieser Vorgang wird offensichtlich beim Betrachten von Abbildung 39 und Abbildung 40.

Nachdem sich im geringdurchlässigen Untergrund durch das kontinuierlich eingebrachte Dampf-Luft-Gemisch hoher Druck aufgebaut hatte, entstand eine Entlastungsöffnung in Form eines Kanals, mit einem Durchmesser von etwa 12 cm, der sich bis zur Erdoberfläche ausbildete. Die Entstehung dieser Öffnung ist deutlich beim Betrachten der relativen Änderung der elektrischen Widerstände von Tag 5 zu Tag 6 nach Beginn der Injektion zu sehen. So negativ sich dieses Ereignis wegen der damit verbundenen Druckverluste für die weitere Dampfausbreitung im Untergrund darstellt, so kann man es vom Standpunkt des geoelektrischen Monitoring aus als positiv betrachten, da sich hierdurch das gute Auflösungsvermögen der Methode, vor allem im elektrodennahen Bereich, bestätigt.



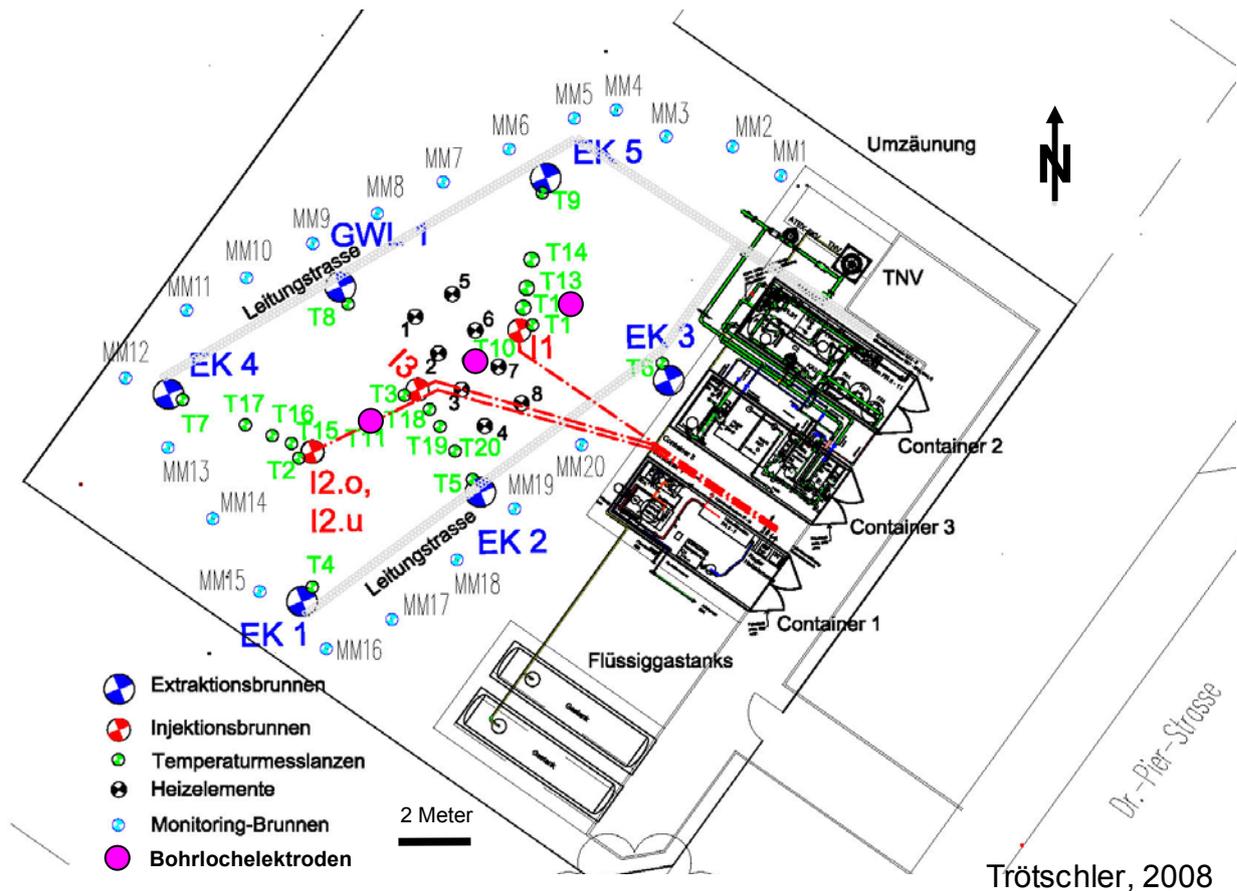
**Abbildung 40: Dampfdurchbruch entlang einer kanalartigen Druckentlastungsöffnung bis zur Erdoberfläche (Durchmesser: 12 cm)**

## 8. Elektrodengeometrien am Sanierungsstandort Zeitz

Die Anordnung der Elektroden am Sanierungsstandort hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Monitorings. Eine zu kleinräumig angelegte Auslage kann dazu führen, dass vor allem in den Randbereichen der Auslagen Zonen, die von dem injizierten Dampf-Luft-Gemisch zwar durchströmt, durch das geoelektrische Monitoring aber nicht erfasst werden. Da nur eine begrenzte Anzahl von Elektroden mit dem Steuerungs- und Messcomputer verbunden werden kann, ist das Platzieren von Elektroden bis weit außerhalb des Sanierungsbereiches jedoch ebenfalls nicht möglich. Die für die unterschiedlichen Messungen gewählten Elektrodenabstände sind entscheidende Faktoren für das Auflösungsvermögen des Monitoring. Nach einigen Testmessungen und der Auswertung der Vorversuche am Standort Leipzig wurde ein Elektrodenabstand von 1,5 Metern für die Oberflächenelektroden festgelegt. Am Standort Zeitz stellt dieser Elektrodenabstand einen guten Kompromiss zwischen abzudeckender Kubatur und Auflösungsvermögen dar.

Bei der Konstruktion der Bohrlochelektroden trafen ähnliche Rahmenbedingungen wie für die Oberflächenelektroden zu. Auf jeder Elektrodenkette sollten aus Ansteuerungsgründen nicht mehr als 16 Elektroden verbaut werden. Andererseits musste eine Elektrodenabdeckung deutlich unter der Einbautiefe der Injektions- und Extraktionsbrunnen gewährleistet werden. Da der Einbau von Bohrlochelektroden und deren elektrische Ankopplung nicht unkompliziert ist und mit größerer Elektrodenlänge immer komplizierter wird, wurde eine Zieltiefe von 16 m u. GOK für die tiefsten Elektroden festgelegt. Hieraus ergab sich dann ein Abstand von einem Meter für alle weiteren auf dem PVC-Stützrohr angebrachten Elektroden.

Zwei der Bohrlochelektroden wurden im Rahmen der Bohr- und Sondierungsarbeiten auf dem Sanierungsfeld mit Hilfe von Hohlschneckenbohrungen mittig zwischen die Injektionsbrunnen I2 und I3 sowie I3 und I1 eingebaut (Abbildung 41).



**Abbildung 41: Lageplan thermische Sanierungsanlage mit Geländeinstallationen**

Die dritte Bohrlochelektrode wurde nordöstlich des Injektionsbrunnens I1 eingesetzt. Da sich die Bohrarbeiten aufgrund der komplexen geologischen Standortverhältnisse als recht aufwändig erwiesen, hatte dies auch Einfluss auf den Einbau der Bohrlochelektroden. Es kam zu einem geringen Höhenversatz zwischen den einzelnen Elektrodenketten von wenigen Zentimetern. Dieser Versatz konnte jedoch genau bestimmt werden und floss in die Geometriedatei für das Datenprocessing mit ein. Wie sich nach dem Einbau der Bohrlochelektroden durch elektrische Durchgangsmessungen herausstellte, wurden während des Einbaus keinerlei Kabelverbindungen beschädigt. Eine im Anschluss durchgeführte Messung der elektrischen Kontaktwiderstände zeigte jedoch, dass vor allem im oberen Bereich der Bohrlochelektrodenketten einzelne Elektroden keine gute elektrische Ankopplung fanden. Mit der Vermutung, dass ein weiteres Konsolidieren des Bohrloches eine Verbesserung hervorbringen würde, wurden alle Elektroden im vorgegebenen Messprogramm belassen. Leider trat bis zum Ende des Sanierungsmonitorings keine Verbesserung der elektrischen Ankopplung ein, so dass die Messungen in denen diese Elektroden integriert waren, während des Datenprocessing herausgefiltert werden mussten.

An der Geländeoberfläche wurden vier parallele Elektrodenketten verlegt, die den gesamten Bereich zwischen Injektions- und Extraktionsbrunnen abdeckten. Wie bereits erwähnt, lag der Elektrodenabstand hier bei 1,5 m. Für die Anbindung an den Untergrund wurden Edelstahlspeise von ca. 50 cm Länge verwendet (Abbildung 42). Um eine gute Ankopplung zu gewährleisten, wurden die Speise mindestens 20 cm im Boden versenkt. Die Verbindung zu den Decodern der Elektrodenketten wurde über vergoldete Bananenstecker an den Edelstahlspeisen vorgenommen.



**Abbildung 42: Elektrodenstange für oberflächengeoelektrische Messungen**

Da die Elektrodenauslagen über mehrere Monate im Gelände installiert blieben, musste ein gleichbleibend guter elektrischer Kontakt zwischen allen Komponenten des Monitoringsystems sichergestellt sein. Die Verbindung der einzelnen Elektrodenketten zum Steuerungs- und Messcomputer wurde mit einem hochwertigen und voll geschirmten Datenkabel vorgenommen. Die Stecker und Kupplungen der Kabel waren wasserdicht ausgeführt, wodurch Probleme wie elektrisch schlechte Leitung und Korrosion durch eindringendes Regen- und Kondenswasser oder Staub unterbunden wurde.

Wie zuvor erwähnt, wurde die Ansteuerung der Bohrlochelektroden über Kabelverbindungen vorgenommen. Die 16 Kabelpaare jeder Bohrlochelektrodenkette wurden mit Bananensteckern versehen und mit einer Schaltbox verbunden. Diese wurde wiederum über ein Steuerungskabel mit dem Messcomputer im Container verbunden. Da die Kontakte der Schaltbox nicht wasserdicht ausgelegt waren, wurden die Boxen durch Abdeckhauben vor Feuchtigkeit und Niederschlag geschützt. Eine regelmäßige Kontrolle der elektrischen Kontakte zeigte daher keinerlei Probleme.

Alle Elektrodenketten und die Steuerboxen wurden durch geeignete Kabel mit dem Steuerungs- und Messgerät verbunden. Bei diesem Monitoring kam das Gleichstromwiderstandsmessgerät RESECS zur Anwendung (Abbildung 43).



**Abbildung 43: Steuerungs- und Messcomputer RESECS**

Durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Potentialmessung auf acht Kanälen ist mit diesem Gerät ein schneller Messfortschritt möglich. Das Gerät erlaubt eine Vielzahl von Messkonfigurationen, zu denen unter anderem Standardkonfigurationen wie

Wenner, Schlumberger, Dipol–Dipol und Pol–Pol gehören. Diese Konfigurationen konnten für das Sanierungsmonitoring jedoch nur zum Teil genutzt werden. Aufgrund der komplexen Elektrodengeometrie war es bei dieser Anwendung notwendig, ein *Multichannel file* (MCF) zu erstellen. In dieser Datei wurden alle für die Monitoringmessungen benötigten Elektrodenkombinationen abgespeichert sowie deren zeitlicher Ablauf und die Wiederholungsrate festgelegt. Für jeden Einsatz musste eine individuell an die Elektrodengeometrie angepasste Datei erstellt werden. Da sich bei dem verwendeten Elektrodenumfang eine sehr große Anzahl an möglichen Messkombinationen ergab, war es hilfreich, ein Programm zu schreiben, das unter entsprechenden Vorgaben alle sinnvollen Elektrodenkombinationen in einer Datei ausgibt. Mittels eines FORTRAN-Compilers wurde eine entsprechende Ausgabedatei erzeugt und nach einigen Modifikationen auf das Steuerungs- und Messgerät RESECS geladen.

Das Gerät verfügt über einen Monitoringmodus, d. h. es ist in der Lage, zuvor einprogrammierte Messabläufe vollautomatisch zu starten, zu durchlaufen und abzuspeichern. Problematisch bei der Anwendung des Messgerätes RESECS bei diesem Sanierungsmonitoring war die Tatsache, dass durch manuelles Starten beliebige Messkonfigurationen hintereinander durchlaufen werden konnten, dies im automatischen Monitoringmodus jedoch nicht möglich war. Aus diesem Grund mussten alle für einen Messdurchlauf nötigen Konfigurationen in eine Datei geschrieben werden. Die mit dieser Datei automatisch ausgeführte Messung erzeugte wiederum eine Ausgabedatei, in der alle Messergebnisse aufgezeichnet wurden. Während eines Messdurchlaufes wurden ca. 45000 Messungen aufgezeichnet. Das anschließende Sortieren und Auftrennen dieser Datei in die einzelnen Konfigurationen war ein komplizierter Vorgang. Für diese Problematik liegt bis jetzt leider noch keine einfachere Lösung vor, wodurch die Auswertung erschwert wurde.

Um geoelektrische Messungen ausschließlich mit Oberflächenelektroden ausführen zu können und dabei für die Beobachtung der Dampf-Luft-Ausbreitung ausreichende Eindringtiefen zu erreichen, war eine große Auslagenlänge nötig. Als ideales Profil bot sich hierfür eine Linie an, die die Injektionsbrunnen abdeckt. Hierfür wurden vier Elektrodenketten miteinander gekoppelt und zentral über den mittleren Dampf-Luft-Injektionsbrunnen gelegt. Diese Auslage bestand aus 96 Decoderboxen und den zugehörigen Edelstahlspießen. Die Auslage durchkreuzte das gesamte Messfeld, wobei die Anfangs- und Endelemente weit außerhalb der zu sanierenden Kubatur positioniert waren. Die zentralen zwei Elemente dieser Kettenauslage wurden im Messprogramm so integriert, dass sie auch zu Messungen zwischen Bohrloch- und Oberflächenelektroden genutzt werden konnten. Die Kombination aller vier

Elektrodenketten wurde ausschließlich für Messungen an der Oberfläche genutzt. Hierbei wurden zu Vergleichszwecken Wenner-, Schlumberger- sowie Dipol-Dipol-Konfigurationen verwendet.

Ein Großteil der Monitoringmessungen wurde mittels einer Dipol-Pol-Konfiguration durchgeführt. Bei solch einer Konfiguration ist es nötig, dass ein externer Pol im Verhältnis zur übrigen Elektrodenauslage in großem Abstand positioniert wird. In der lokalen Elektrodengeometrie wurde dies durch einen in ca. 200 m entfernten Pol realisiert, der ebenfalls über einen Edelstahlspieß an den Untergrund angekoppelt war.

Ein Aspekt, der während der Durchführung des Monitorings keine Beachtung fand, jedoch im Rückblick durchaus in die Überlegungen mit einbezogen werden sollte, ist der Einfluss von galvanischen Effekten zwischen den Elektrodenspiessen. Da während des geoelektrischen Monitorings Stromflüsse im Untergrund erzeugt werden, könnte es unter Umständen bei Anwesenheit entsprechender Stoffe (Metalle) in ionarer Form zu elektrochemischen Anlagerungen an den Elektroden kommen. Diese würden die elektrische Ankopplung verschlechtern. In diesem Zusammenhang ist auch die umgekehrte Wirkung, nämlich das Auftreten elektrischer Ströme an den Elektroden, welche durch natürliche galvanische Effekte hervorgerufen werden, zu überdenken. Gerade bei Messkonfigurationen, die aufgrund einer entfernten Stromeinspeisung nur geringe Spannungen liefern, können diese Effekte die Messergebnisse möglicherweise beeinflussen. Da sich die genannten Phänomene zeitlich nicht konstant verhalten, ist mit einer uneinheitlichen Wirkung im Verlauf des Sanierungsmonitoring zu rechnen.

## 9. Temperaturmonitoring mit fest installierten Messfühlern

Der Verlauf der Wärmeausbreitung in der zu sanierenden Boden- und Grundwasserkubatur wurde durch zwei unterschiedliche Methoden überwacht. Zum Einen wurde die Wärmeausbreitung indirekt durch das geoelektrische Monitoring verfolgt. Um diese Methode bewerten zu können, wurden im Rahmen der Installationsarbeiten für die Extraktions- und Injektionsbrunnen sowie der elektrischen Heizanlagen Temperaturmessfühler im Untergrund verbaut. Diese Messfühler wurden in möglichst gleichmäßigen Tiefenintervallen installiert und deckten den größten Teil des Sanierungsvolumens ab. Diese Messmethode hatte den Vorteil, dass sie an jedem Fühler eine direkte Messung des Temperaturniveaus vor Ort erlaubte. Problematisch war hierbei jedoch, dass keine verlässliche Temperaturerfassung in Bereichen stattfand die von den Temperaturfühlern entfernt lag. Der Ansatz des geoelektrischen Monitoring konnte hier neue Lösungsansätze aufzeigen. Ein weiterer Nachteil der in festen Tiefenintervallen installierten Messfühler war der umfangreiche technische und finanzielle Aufwand durch Anschaffung und Einbau. In der Regel können die Messfühler dem Untergrund nach Abschluss der Sanierung nicht zerstörungsfrei entnommen werden.

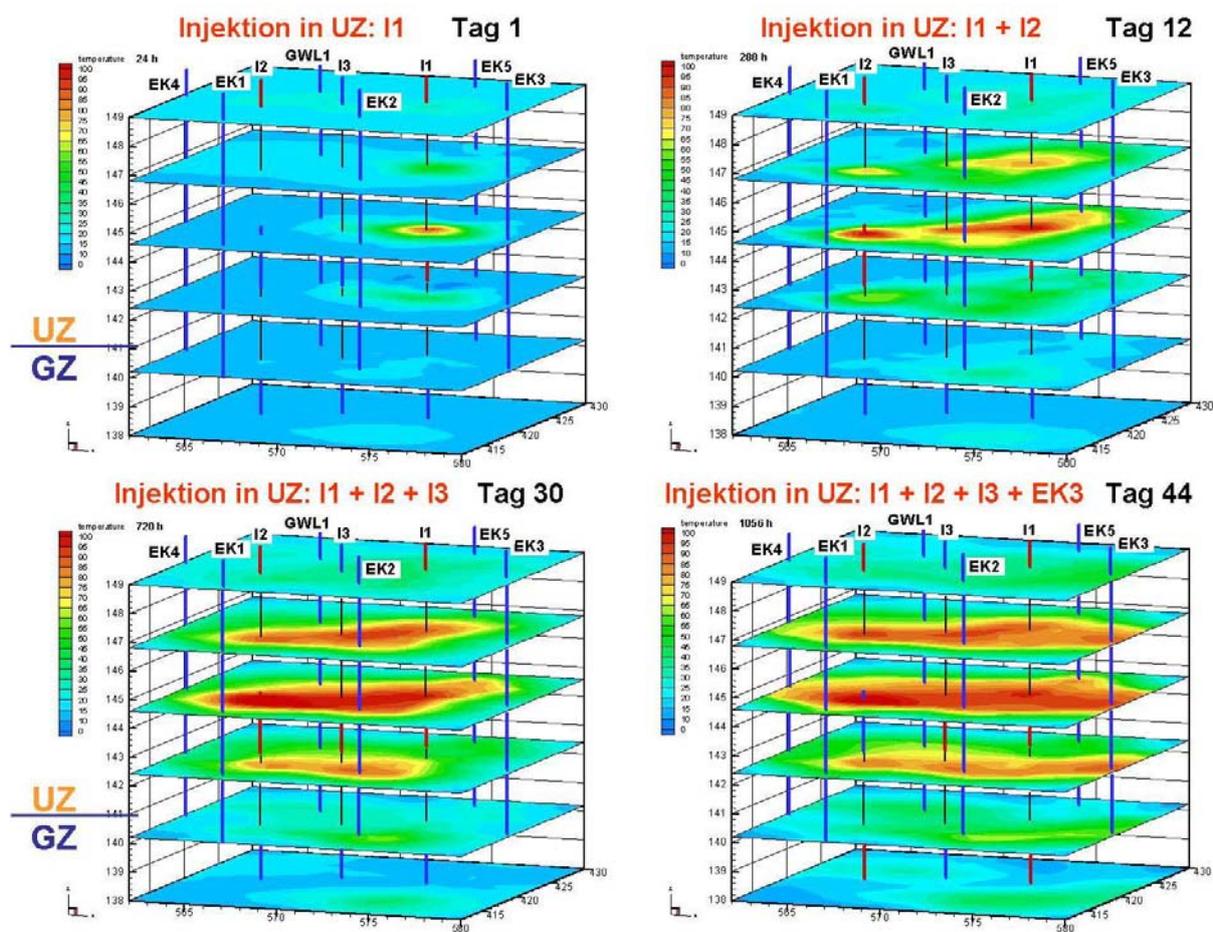
Da sich das geoelektrische Monitoring der Dampf- und Wärmeausbreitung noch in der Versuchs- und Erprobungsphase befand, war es wichtig, etablierte Temperaturerfassungsmethoden für eine Bewertung und zum Vergleich parallel anzuwenden. Bei zuvor durchgeführten thermischen Sanierungen hatte sich diese Art der Temperaturmessung als zuverlässige Methode bewährt.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Temperaturerfassung mittels Temperaturmessfühlern dargelegt. Hierbei werden die einzelnen Abschnitte der thermischen Sanierung betrachtet, da innerhalb dieser die wichtigsten Temperaturveränderungen stattfanden. Die Abschnitte gliedern sich in die Phasen einer kalten Bodenluftabsaugung (1), Air Sparging (2), Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone (3.1), Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone (3.2), Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte und ungesättigte Zone (3.3), Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone (3.4) sowie in die Abkühlungsphase (4). Auf die Phasen 1 und 2 wird nicht näher eingegangen, da innerhalb dieser keine thermische Beeinflussung des Untergrundes erfolgte und nur geringe Temperaturschwankungen, hervorgerufen durch den Transport von Bodenluft und Air Sparging, auftraten. Das Oberflächen-niveau des annähernd horizontal ausgerichteten Sanierungsfeldes liegt bei den folgenden Abbildungen bei etwa 149,5 m ü. NN.

Einige der folgenden Abbildungen zeigen einen Gradienten von teilweise erheblich niedrigeren Temperaturen in den Randbereichen zu hohen Temperaturen im zentralen Sanierungsfeld. Diese Darstellung ist so als nicht realistisch einzuschätzen, da aufgrund der starken Energieeinträge in die Außenbereiche hier eine stärkere Erwärmung zu vermuten ist. Das Betrachten eines größeren Untergrundvolumens ist daher für eine detailgetreuere Darstellung nötig. Aufgrund der nur begrenzten Anzahl von zur Verfügung stehenden fest installierten Temperatursensoren war dies jedoch nicht möglich.

Dampf-Luft-Injektion in ungesättigter Zone (3.1), Abbildung 44:

Zu Beginn der Sanierung fand in dieser Phase keine gleichmäßige Beaufschlagung der Injektionsbrunnen statt. Eine annähernd radialsymmetrische Ausbreitung der Wärme front war nur an den Injektionsbrunnen I2 und I3 zu verzeichnen. Am Brunnen I1 fand eine Ausbreitung vor allem in Richtung der Extraktionsbrunnen EK2 und EK5 sowie dem zur Grundwasserhaltung eingesetzten Brunnen GWL1 statt. Diese ist vor allem durch die heterogenen Untergrundverhältnisse sowie die durch Injektion und Extraktion erzeugten künstlichen Gradienten zu erklären. Um den Wärmeeintrag in den langsamer erwärmten Bereichen des Feldes zu erhöhen, wurde der Extraktionsbrunnen EK3 kurzzeitig zu einem Injektionsbrunnen umgerüstet. 32 Tage nach Beginn der Injektionen wurde EK3 ebenfalls zur Dampf-Luft-Injektion genutzt; so konnte dieser Bereich der Kubatur ebenfalls auf das Temperaturniveau des zentralen Bereiches des bis dahin erwärmten Feldes von ca. 85 °C gebracht werden. Mit der Injektion am Brunnen I2 wurde mit einem zeitlichen Versatz von einer Woche zum Brunnen I1 begonnen. Aufgrund von hohen Injektionsdrücken am Brunnen I2 musste die Injektion hier mit geringerem Druck und einer Injektionsleistung von 20 kW vorgenommen werden. Hieraus resultierte wiederum eine langsamere Ausbreitung der Wärme front im Vergleich zum Bereich des Brunnen I1. Hervorgerufen durch die Injektion an I2 erfolgte der Dampfdurchbruch am Extraktionsbrunnen EK1 innerhalb von 14 Tagen. Der weiter entfernte Brunnen EK4 wurde nach einem Monat Dampf injektion in I2 von der Dampf front erreicht.



Trötschler, 2008

**Abbildung 44: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Dampf-Luft-Injektion in ungesättigte Zone**

Ausgehend von der Siedetemperatur des vorliegenden Hauptkontaminanten (Benzol) an diesem Standort wurde eine Zieltemperatur von 85 °C für die von Schadstoff betroffenen Bereiche festgelegt, d. h. es kann theoretisch davon ausgegangen werden, dass Zonen, die vom Dampf-Luft-Gemisch durchdrungen und dabei über einen längeren Zeitraum auf eine Temperatur von 85 °C erwärmt wurden, als zum Großteil abgereinigt angesehen werden können. Die installierten Temperaturmessfühler zeigten für den ungesättigten Bereich der Sanierungskubatur, dass diese Temperatur nach rund 44 Tagen kontinuierlicher Injektion erreicht wurde. Im Anschluss an die Sanierung der ungesättigten Zone wurde mit der Injektion in die gesättigte Zone begonnen. Um eine Massenbilanzierung der ausgetragenen Schadstoffmengen in beiden Kompartimenten vornehmen zu können, wurden diese zeitlich getrennt behandelt.

Dampf-Luft-Injektion in gesättigter Zone (3.2), Abbildung 46:

Die Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone wurde, vergleichbar mit der Injektion in der ungesättigten Zone, in zwei Schritten durchgeführt. Begonnen wurde die Phase 3.2 mit der Injektion eines Gemisches aus 150 kg/h Dampf und 80 kg/h Luft in den Brunnen I1. Der Injektionsauslass lag hier in einem Tiefenbereich zwischen 9,5 und 10,5 m u. GOK. Direkt unterhalb schließt der hydraulisch schlecht durchlässige Kohle-Ton-Komplex an.

Die Ausbreitung des Sanierungsmittels schritt in diesem Bereich der gesättigten Zone schneller voran als in der ungesättigten, so dass ein Dampfdurchbruch in einer Tiefe von 8 bis 10 m u. GOK an den Extraktionsbrunnen GWL1 und EK2 bereits nach 6 Tagen und an EK3 und EK5 nach 12 Tagen aufgezeichnet werden konnte. Im Laufe der Dampf-Luft-Ausbreitung stiegen die Temperaturen in der gesättigten Zone sehr schnell. Dieser Verlauf ist in Abbildung 45 deutlich zu erkennen.

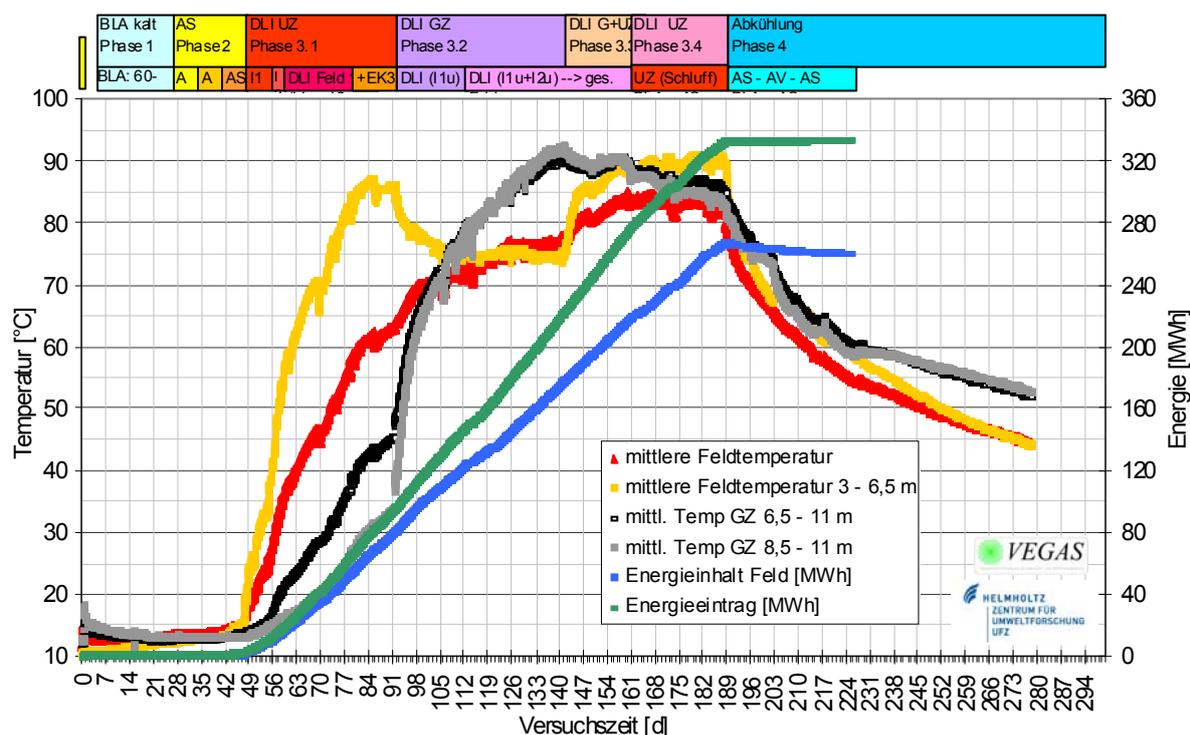
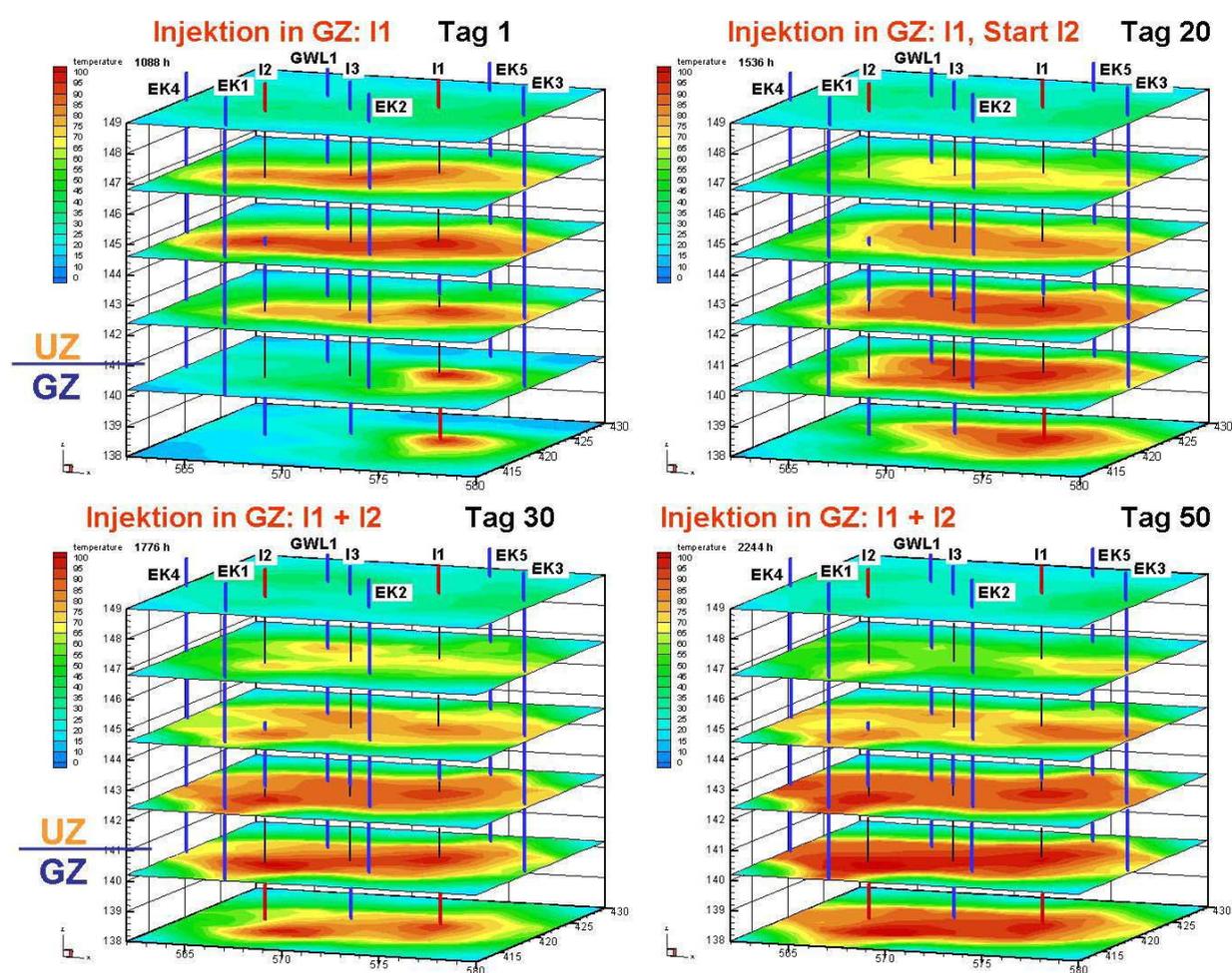


Abbildung 45: Temperaturentwicklung im Verlauf der thermischen Sanierung am Standort Zeit

Die gesättigte Zone erfuhr bereits eine langsame Erwärmung durch konduktive Wärmeleitung aus der ungesättigten Zone bis auf eine Temperatur von etwa 35 °C innerhalb von 44 Tagen. Mit Injektionsbeginn in der gesättigten Zone wurde der Bereich zwischen 8,5 und 11 m u. GOK innerhalb der gleichen Zeit auf rund 90 °C erwärmt. Die thermische Reichweite für die Injektionsbrunnen lag hierbei bei mehr als fünf Metern.

Im weiteren Verlauf der Sanierung wurde nach einer Dauer von 20 Tagen Injektion an I1 der Injektionsbrunnen I2 zugeschaltet und es wurden beide Brunnen mit einer Leistung von 50 kW beschickt (Abbildung 46). Die Ausbreitung des Sanierungsmittels schritt vor allem im Bereich des Kapillarsaumes (ca. 8 m u. GOK) sehr schnell voran und es konnte in dieser Tiefe ein Dampfdurchbruch an EK1 nach zwei Tagen und an EK4 nach vier Tagen festgestellt werden. Die Durchwärmung auf über 85 °C im Bereich von 10 m u. GOK nahm mehr Zeit in Anspruch. Diese Temperatur wurde an EK1 nach 29 Tagen und an EK4 erst nach 34 Tagen erreicht. Da das injizierte Dampf-Luft-Gemisch vorrangig vertikal aufstieg, wurden die vom Injektionsbrunnen weiter entfernten und tiefer liegenden Bereiche schlechter erreicht. Eine Erwärmung fand hier zum großen Teil auch über die im Vergleich zu Advektion / Konvektion erheblich langsamere konduktive Wärmeleitung statt.

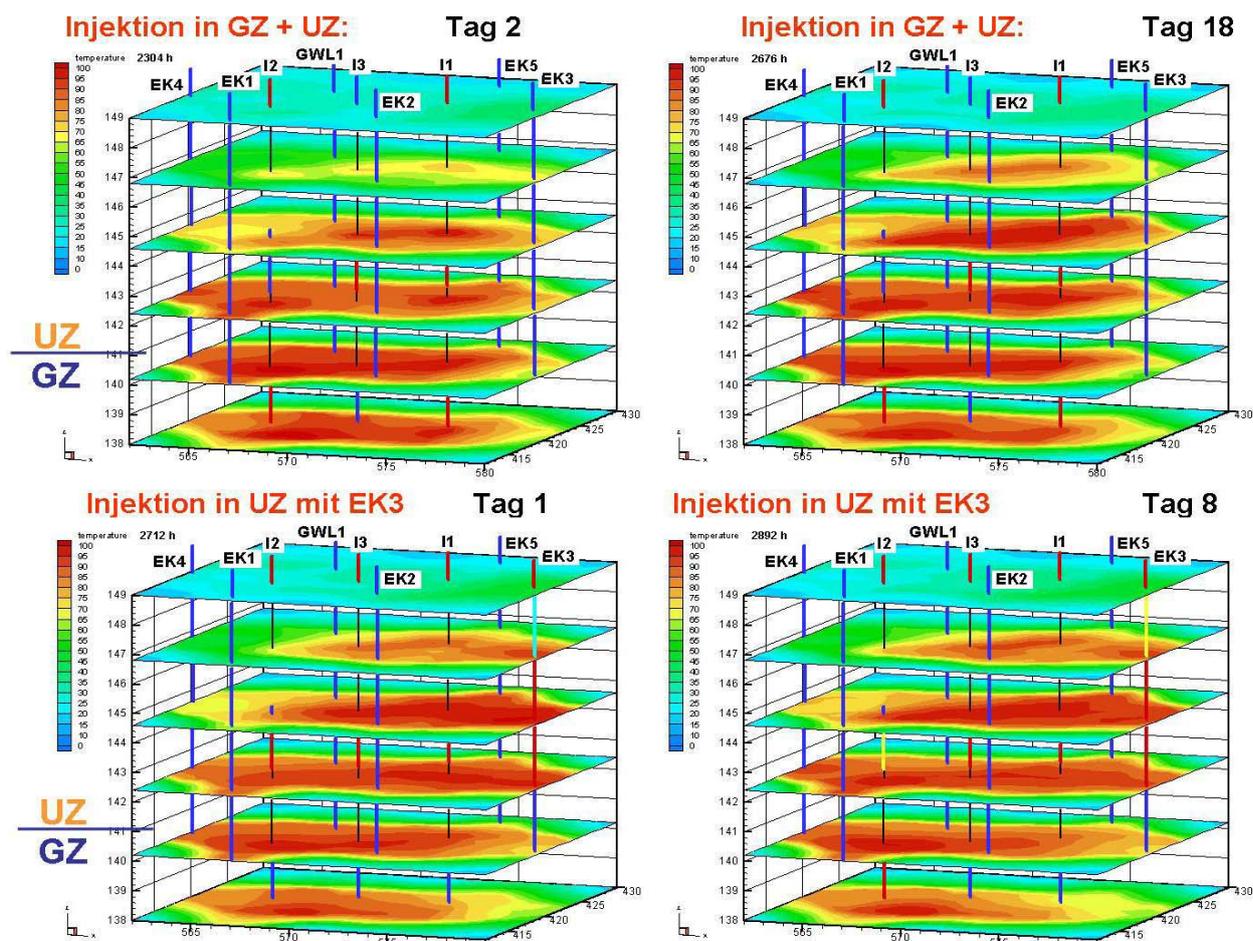


Trötschler, 2008

**Abbildung 46: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Dampf-Luft-Injektion in gesättigte Zone**

### Dampf-Luft-Injektion in gesättigter und ungesättigter Zone (3.3), Abbildung 47:

Im Anschluss an die Injektionsphase in die gesättigte Zone fand eine parallele Injektion in die gesättigte sowie ungesättigte Zone statt. Durch die Oberflächennähe konnte der ungesättigte Bereich des Untergrundes wieder leicht auskühlen, während die Injektion im gesättigten Bereich von statten ging. Vor allem im Bereich der Schluffschicht (ca. 3 bis 7 m u. GOK) und darüber konnte bereits verdampfter und aus den unteren Bereichen aufsteigender Schadstoff durch die Auskühlung zum Teil wieder kondensieren. Aus diesem Grund wurde eine gleichzeitige Injektion des Sanierungsmittels in die gesättigte Zone mit ca. 80 kW und in die ungesättigte Zone mit ca. 40 kW vorgenommen. Die Abbildung 47 zeigt eine erneute deutliche Erwärmung des Bereiches zwischen 3 und 6,5 m u. GOK bei gleichzeitigen Temperaturen von über 85 °C im Bereich von 6,5 bis 11 m u. GOK. Im Verlauf dieser Sanierungsphase konnte die ungesättigte Zone zu großen Teilen auf eine Temperatur von 90 °C erwärmt werden. Auf diese Weise konnten vor allem in den oberen Bereichen der ungesättigten Zone kondensierte Schadstoffe wieder in die Gasform gebracht, extrahiert und an der Oberfläche der thermischen Nachverbrennungsanlage zugeführt werden.



Trötschler, 2008

**Abbildung 47: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Dampf-Luft-Injektion in gesättigte und ungesättigte Zone**

#### Dampf-Luft-Injektion in ungesättigter Zone (3.4):

Im Rahmen der Phase 3.4 wurden Bereiche der ungesättigten Zone durch gezielte Dampf-Luft-Injektion angesprochen, die in den vorhergehenden Phasen keine ausreichende Erwärmung erfahren hatten. Hierzu zählte der Bereich um EK3. Aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit in der ungesättigten Zone am Injektionsbrunnen I1 war dieser Bereich bis dahin nicht bis auf die Zieltemperatur von 85 °C erwärmt worden. Selbst die Erhöhung der Injektionsleistung des weiter entfernt liegenden Injektionsbrunnens I3 und ein Wärmetransport aus der gesättigten Zone hatten zuvor keine ausreichende Erwärmung bewirken können.

Auch im oberen Bereiche der ungesättigten Zone zwischen I2, EK1 und EK4 konnte keine Erwärmung auf die Zieltemperatur erreicht werden. Dies ist auf die maximal zur Verfügung stehende Injektionsleistung von 120 kW bei gleichzeitiger Injektion in I1 und den zur Injektion genutzten Extraktionsbrunnen EK3 zurückzuführen. Hierdurch konnte kein ausreichender Energieeintrag in I2 stattfinden.

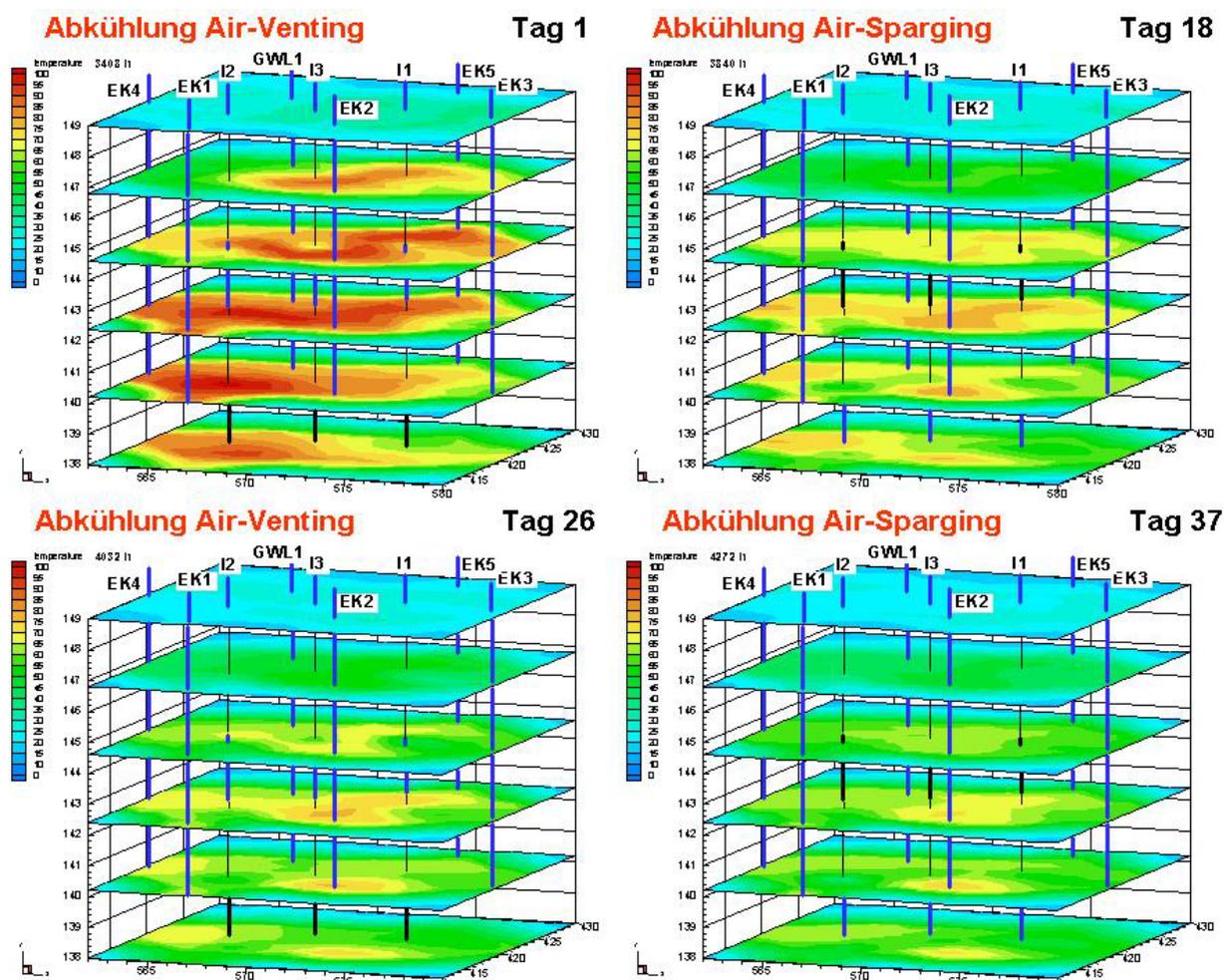
Ein weiterer problematischer Bereich, gekennzeichnet durch geringe hydraulische Durchlässigkeiten, lag in der ungesättigten Zone im Umfeld des Brunnens I2 vor. Die Dampf-injektion wurde daher zum Teil auf den gesättigten Teil dieser Injektionslanze umgelegt. Der Wärmeeintrag in die gesättigte Zone führte im Verlauf der Phase 3.4 zu einem Anstieg der mittleren Temperatur in der ungesättigten Zone im Bereich zwischen 3 und 6,5 m u. GOK. Zusätzlich wurden in der ungesättigten Zone die Brunnen EK3, I1 und I3 angesteuert. Durch diese Vorgehensweise konnte auch der Bereich um den Injektionsbrunnen I2 deutlich erwärmt werden.

#### Abkühlungsphase (4), Abbildung 48:

Die Abkühlungsphase diente in erster Linie dem raschen Austrag der in der Sanierungskubatur gespeicherten Wärme. Eine untergeordnete Rolle spielte hier der Austrag geringer Menge restlicher Schadstoffe. Hierzu wurde eine Kombination von Air-Sparging (kontinuierliche Luft-Injektion) und Air-Venting (Bodenluft-Extraktion) angewendet. Als Zielwert wurde eine mittlere Feldtemperatur von 40 °C gewählt, die innerhalb von sechs Wochen erreicht werden sollte.

Die Abkühlung ging erheblich langsamer von statten als erwartet. Selbst eine zusätzliche Bodenluftabsaugung aus den drei Injektionsbrunnen I1, I2 und I3, die im Bereich der stärksten Erwärmung lagen, führte kaum zu einer Steigerung der Auskühlung. Vergleichbare Anwendungen zeigten eine erheblich kürzere Abkühlungsphase. Gründe können an diesem Standort die vergleichsweise niedrige erzielbare Bodenluftextraktionsrate sowie die äußerst geringe natürliche Durchströmung der Sanierungskubatur durch Grundwasser gewesen sein. Letztere

war vermutlich auch der Grund für die deutlich geringere Auskühlungsrate der gesättigten Zone im Vergleich zur ungesättigten Zone (Abbildung 45). Die aktive Abkühlung wurde nach einer Betriebsdauer von sechs Wochen am 14.12.07 beendet. In diesem Zeitraum konnte die mittlere Feldtemperatur von 85 °C auf 55 °C gesenkt werden.



Trötschler, 2008

Abbildung 48: Temperaturmonitoring durch fest installierte Messfühler. Abkühlungsphase gegen Ende der Sanierung

## **10. Gleichstromgeoelektrisches Monitoring der thermischen Sanierung am Standort Industriepark Zeitz**

Wie in Kapitel 7 dargelegt, hatte das geoelektrische Monitoring am Standort Leipzig einen reinen Versuchscharakter und ist als vorbereitende Arbeit für die Untersuchungen am eigentlichen Sanierungsstandort Industriepark Zeitz zu betrachten. Die geologischen Untergrundbedingungen der beiden Standorte sind nicht vergleichbar. Weiterhin fand die Anwendung am Standort Leipzig ausschließlich in der ungesättigten Zone sowie in einem Boden ohne jegliche Schadstoffbelastung statt.

Der Standort der ehemaligen Benzolproduktionsanlage im heutigen Industriepark Zeitz besitzt Untergrundbedingungen, auf die eine auf Dampf-Luft-Injektion basierende thermische Sanierungsanlage ausgerichtet und eingestellt werden kann. Die geologische Situation und die Schadstoffproblematik dieses Standortes werden in Kapitel 2 respektive Kapitel 3 und 4 dargestellt.

Für die Durchführung eines geoelektrischen Monitorings am eigentlichen Sanierungsstandort wurden die Erkenntnisse der Vorversuche des Standortes Leipzig genutzt. Trotz der aus dem Vorversuch gewonnenen Erfahrungen mussten eine Vielzahl anderer Aspekte am Standort Zeitz beachtet werden. Der Umfang der zu Sanierung anstehenden Kubatur war erheblich größer als im Vorversuch. Weiterhin lag eine umfangreiche Kontamination in der gesättigten sowie ungesättigten Zone vor. Die Geometrie der im Untergrund installierten Brunnen, Messfühler und Heizlanzen war im Vergleich zum Standort Leipzig eine völlig andere. Weiterhin war der Umfang der Installationen unterschiedlich. Am Sanierungsstandort wurden drei Dampf-Luft-Injektionsbrunnen sowie sechs kombinierte Extraktionsbrunnen eingesetzt. Daher musste die Geometrie der Monitoringelemente an die räumliche Ausrichtung der Sanierungsanlagenelemente angepasst werden. Da das zum geoelektrischen Monitoring eingesetzte Messgerät in der Lage war, bei einer Stromeinspeisung gleichzeitig auf acht Kanälen Potentialmessungen durchzuführen, konnte die Anzahl der verwendeten Elektroden im Vergleich zum Vorversuch in Leipzig erheblich vergrößert werden. Die größere Anzahl von Elektroden erlaubte des Weiteren eine Vervielfachung der für die Monitoringmessungen eingesetzten Elektrodenkombinationen. Die am Sanierungsstandort eingesetzten Bohrlochelektroden wurden bis in eine Tiefe von 16 m u. GOK verbaut, um eine ausreichende Abdeckung unterhalb der in ca. 12 m Tiefe installierten Dampf-Luft-Injektionsauslässe zu gewährleisten (Draskovits & Simon, 1992). Weiterhin wurde das Sanierungsmonitoring am Standort Zeitz nicht wie im

Vorversuch in Leipzig ausschließlich mittels Oberflächenelektroden, sondern auch in Kombination dieser mit Bohrlochelektroden durchgeführt. Um Vergleiche zwischen der Kombination Bohrloch-Oberflächenelektroden mit traditionellen Messungen durch Oberflächenelektroden vornehmen zu können, wurden mit einem Teil der Oberflächenelektrodenauslage Messungen mit Wenner-, Schlumberger-, und Dipol-Dipol-Konfiguration vorgenommen.

Ein wichtiger Faktor beim Ablauf dieses Monitoring war die Systemverfügbarkeit. Da die Sanierung kontinuierlich und ohne Ausfälle von statten gehen musste, war es wichtig, ein dauerhaftes geoelektrisches Monitoring zu gewährleisten. Für das Steuerungsprogramm des Monitoring sowie die übrige im Zusammenhang mit dem Monitoring eingesetzte Technik musste daher eine Ausfallfreiheit sichergestellt sein. Im Gegensatz zum Einsatz im Vorversuch in Leipzig war eine tägliche Anlagenbetreuung zum Beseitigen etwaiger Schäden und Ausfälle am Sanierungsstandort Zeitz nicht möglich.

Wurden die Monitoringmessungen beim Vorversuch in Leipzig noch manuell gestartet, so wurde der Ablauf der unterschiedlichen Messkonfigurationen am Standort Zeitz im Messcomputer programmiert, so dass die Messungen vollautomatisch durchgeführt und gespeichert werden konnten. Unterbrechungen und durch Stromausfälle hervorgerufene Systemabstürze wurde mittels einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) entgegengewirkt. Diese musste während der gesamten Sanierung bei kurzen Stromausfällen auch mehrere Male in Anspruch genommen werden.

Das Ziel, die Ausbreitung des Dampf-Luft-Gemisches 3-dimensional zu erfassen, bedurfte zusätzlicher Überlegungen zur Ausrichtungen der Elektrodenauslagen. Um untereinander vergleichbare Messungen durchführen zu können, sollte es möglichst vermieden werden, die Elektrodenauslagen nach dem Start des Monitorings in ihrer Position und Lage zu verändern. Das Ausbreitungsverhalten des Sanierungsmittels konnte jedoch nicht von Beginn an mit Sicherheit vorausgesagt werden. Aus diesem Grund wurde eine großräumige Verteilung der an der Oberfläche eingesteckten Elektroden gewählt. Dies brachte zwar Einbußen bezüglich des Auflösungsvermögens des Monitoringsystems, stellte jedoch ein Erfassen der Dampf-Luft-Ausbreitung während des gesamten Sanierungsvorganges sicher. Die Bohrlochelektroden wurden mittig zwischen den Dampf-Luft-Injektionsbrunnen eingesetzt. Hierbei war vor allem auf eine gute Abdichtung zur Oberfläche hin zu achten, da sich in diesem Bereich, vor allem zu Beginn der Sanierung, große Drücke aufbauen und die Bohrungen der Elektroden als Durchbruchskanal zur Oberfläche hin wirken konnten. Die Verfüllung des Ringraumes der Bohrlochelektroden wurde, wie im

Vorversuch in Leipzig bereits auch, mit Quarzkies vorgenommen, dessen hydraulische Durchlässigkeit in etwa der des Untergrundes entsprach. Um bei einem Elektrodeneinbau bis in 16 Meter Tiefe sicherzustellen, dass sich beim Verfüllen keine Hohlräume bilden konnten und es daher im Anschluss zu Nachsackungen kommen konnte, wurde das Verfüllmaterial teilweise unter Zuhilfenahme von Wasser eingeschlämmt.

Die Ansteuerung der Bohrlochelektroden wurde durch Kabel realisiert, die an der Oberfläche in Verteilerboxen angeschlossen wurden. Um einem Ausfall einzelner Elektroden, beispielsweise durch abreißende Kabel während des Einbaus, entgegen zu wirken, wurden alle Elektroden mit zwei separaten Anschlussleitungen versehen. Durch diese Konstruktion konnte mit einem Durchgangsprüfgerät der Durchgang der beiden Kabelverbindungen zur jeweiligen Elektrode überprüft und somit der Kontakt sichergestellt werden. Durch die direkte Nähe der Bohrlochelektroden zu den Injektionsbrunnen war aufgrund der thermischen Belastung von über 100 °C ebenfalls mit einer Funktionsbeeinträchtigung durch Materialermüdung zu rechnen. Regelmäßige Überprüfungen mittels Durchgangsprüfgerät zeigten jedoch keine Beeinträchtigungen. Lediglich das beim Einbau als Stützrohr fungierende Installationsrohr, an dem die Elektroden und Steuerkabel befestigt waren, hielt den Temperaturen nicht stand und zersetzte sich im Laufe der Sanierung.

Ein großer Teil der Messungen des geoelektrischen Monitorings wurde als Dipol-Pol-Konfiguration ausgeführt. Dies bedeutet, dass ein Pol des Stromeinspeisedipoles in großer Entfernung zur Elektrodenauslage des Monitoringsystems positioniert wird. Hierfür wurde ein Edelstahlspieß in einer Entfernung von ca. 200 Metern zum Sanierungsfeld eingesetzt und mit einer Kabelverbindung an das Messgerät angeschlossen. Die Stromeinspeisung fand nun über den entfernten Pol und jeweils eine Elektrode innerhalb des Messnetzes auf dem Sanierungsfeld statt. Die Messung des Potentialabfalles wurde über ein Dipolpaar der Oberflächenauslage oder der Bohrlochelektroden vorgenommen. Diese Art der Stromeinspeisung wurde aufgrund von Beschränkungen in den möglichen Schaltungsparametern des Messgerätes, in Kombination mit der relativ komplizierten Elektrodengeometrie des Sanierungsfeldes nötig.

Messungen, die ausschließlich an Bohrlochelektroden vorgenommen wurden, fanden vor allem vor und in der Anfangsphase der Dampf-Luft-Injektion statt. Da die Elektroden zwischen den Injektionsbrunnen installiert waren, konnten hier die ersten Einflüsse des Sanierungsmittels auf die elektrischen Widerstandsverhältnisse registriert werden. Da die Dampf-Luft-Ausbreitung vor allem in diesem Bereich der zu sanierenden Kubatur sehr schnell fortschritt, konnte sich bereits innerhalb weniger

Tage in dieser Zone ein Temperaturmaximum etablieren, was zur Ausbildung eines neuen elektrisches Widerstandsgefüges führte. Daher wurden die Messungen innerhalb der Bohrlochelektroden wenige Tage nach dem Start der Dampf-Luft-Injektion eingestellt. Anschließend wurden diese Elektroden für Kombinationsmessungen mit den Oberflächenelektroden genutzt.

Während der Messungen wurden keinerlei elektronische Filter verwendet, d. h. es wurden alle eingehenden Signale unabhängig von ihrer Qualität aufgezeichnet. Das Datenprocessing wurde im Anschluss durchgeführt. Hier kamen dann unterschiedliche Filter zum Einsatz, die Messungen von nicht ausreichender Qualität aus den Datensätzen entfernten. Das Datenprocessing war bei diesem Monitoring ein nicht zu unterschätzender Arbeitsschritt. Die innerhalb eines Messtages aufgezeichnete Datenmenge war immens und vor allem der Tatsache geschuldet, dass zur Messung ein 8-Kanal-Gerät verwendet wurde. Daher konnten mit jeder Stromeinspeisung in acht unterschiedlichen Bereichen der Kubatur Messwerte aufgenommen werden. Aufgrund der großen Anzahl von Oberflächen- und Bohrlochelektroden entstand eine Vielzahl möglicher Elektrodenkombinationen. Nicht alle möglichen Kombinationen lagen für eine Potentialmessung geometrisch günstig zueinander, so dass innerhalb eines Messablaufes auch ein großer Teil qualitativ schlechter Messungen gespeichert wurden.

Bei der hohen Anzahl von Elektroden kam es hin und wieder vor, dass bei Arbeiten die auf dem Messfeld durchgeführt wurden, durch Berührung einzelne Decoderboxen von den Elektrodenspiessen getrennt wurden. Da keine tägliche Kontrolle des Messfeldes möglich war, kam es daher auch auf diesem Wege zu Messfehlern. Problematisch ist hierbei vor allem, dass jeder Decoder immer in Kombination mit einem zweiten entweder zur Stromeinspeisung oder zur Spannungsmessung genutzt wird. Fällt ein Decoder aus, so multipliziert sich dieser Ausfall, da jede Messkombination, in der dieser Decoder genutzt wurde, keine sinnvollen Daten liefern kann.

Ein besonderes Augenmerk musste während des Monitoring auf das Einhalten konstanter Messeinstellungen geworfen werden. Hierbei waren vor allem die Einspeiseströme von Bedeutung. Nur wenn diese bei jeder Wiederholung eines Messvorganges gleich waren, lieferte die entsprechende Potentialmessung auch vergleichbare Ergebnisse.

Es gab einige Ereignisse am Messfeld, die einen ungewollten Einfluss auf die Messungen ausüben konnten. Hier ist beispielsweise der Austausch einiger Decoderketten nach Ausfall einzelner Decoder im Verlauf des Monitoring zu nennen.

Ebenso waren Temperatureinflüsse auf die Decoder selbst nicht auszuschließen. Gegen Ende der Sanierung lagen teilweise Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sowie eine geschlossene Schneedecke am Sanierungsgelände vor. Tests zeigten, dass die Relais einiger Decoder unter diesen Bedingungen erheblich langsamer oder teilweise gar nicht schalteten. Da zum Zeitpunkt dieser Messungen das Monitoring der eigentlichen Sanierung annähernd abgeschlossen war, hatte dies allerdings nur einen marginalen Effekt.

Im Verlauf der Sanierung kam es mehrfach zu Starkregenereignissen. Hierbei wurden die obersten Bodenschichten mit Regenwasser gesättigt, was wiederum einen Einfluss auf die lokalen elektrischen Widerstandsverhältnisse hatte. Da es an der Oberfläche zur Bildung von Stauwasser kam, ist ein elektrischer Kurzschluss bei kurzen Abständen zwischen Strom- und Potentialelektroden ebenfalls denkbar.

Während des Monitoring wurde der Mess- und Steuerungscomputer inklusive aller Verbindungsleitungen von Container 1 in Container 2 des Sanierungssystems umgesetzt. Da die Lufttemperatur in Container 1 aufgrund der Dampferzeugung in den Sommermonaten auf nahezu 60 °C stieg, war dieser Umbau zum Schutz des Systems nötig geworden.

Es kann bei solch einer Anwendung, die umfangreiche komplexe Technik einsetzt, eine gegenseitige Beeinflussung nie völlig ausgeschlossen werden. Obwohl ausreichend abgeschirmte Kabelverbindungen zwischen den Elektrodenketten und dem Steuerungsgerät verwendet wurden, ist immer mit dem Einfluss durch elektromagnetische Störsignale aus Frequenzumformern, Stromversorgungsleitungen, Pumpen und ähnlichem zu rechnen.

### ***Datenauswertung***

Wie die Vorversuche zum Sanierungsmonitoring am Standort Leipzig zeigten, gibt es eine Reihe von Ansätzen zur Auswertung der im Rahmen der geoelektrischen Messungen gewonnenen Daten. Grundsätzlich wurden im Vorversuch Messungen an Bohrlochelektroden und Oberflächenelektroden gesondert behandelt. Für das Monitoring selbst wurden beispielsweise im Vorversuch nur Messungen an Oberflächenelektroden genutzt. Die Kombinationsmessungen mit Bohrloch- und Oberflächenelektroden hatten hier noch experimentellen Charakter.

Am eigentlichen Sanierungsstandort im Industriepark Zeitz stand zu Beginn der Messkampagne ein hochaufgelöstes 3-dimensionales geoelektrisches Monitoring der thermischen Sanierung im Vordergrund. Da es relativ wenige Erfahrungen mit dieser

Art eines Sanierungsmonitoring gab, wurden zwischen den aufwändigen 3-D-Messungen 2-D-Messungen mit erheblich geringerem Datenvolumen durchgeführt. Ziel hierbei war es herauszufinden, welche Art von Messungen für die hinreichende Charakterisierung einer thermischen Sanierung nötig ist. Es stellte sich die Frage, bis zu welchem Grad einfache geoelektrische Messungen an der Oberfläche oder den Bohrlöchern genügen, um die Ausbreitung des Dampf-Luft-Gemisches verfolgen zu können. Weiterhin sollte untersucht werden, ob die aufwändigen Installationen von Bohrlochelektroden und großflächigen Oberflächenelektrodenauslagen einen zusätzlichen Informationsgewinn erbringen und ob dieser den apparativen und messtechnischen Aufwand rechtfertigt (Draskovits & Simon, 1992). Die Datenauswertung sollte ebenfalls optimiert werden, so dass ausgewertete Messergebnisse zeitnah vorliegen, um Optimierungen am Sanierungssystem noch während des Betriebes vorzunehmen.

Bei der Datenauswertung wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt. Zum Einen wurden die in den unterschiedlichen Messungen (2-D sowie 3-D) gewonnenen Daten invertiert. Hierbei wurden die beim Sanierungsmonitoring gewonnenen Daten mit einem elektrischen Widerstandsmodell des Untergrundes abgeglichen. In iterativen Schritten wurde das Modell den Messdaten angepasst, bis eine ausreichende Übereinstimmung vorlag. Das gewonnene Modell spiegelte nun weitgehend die elektrischen Widerstandsbedingungen im Untergrund wider.

Ein prinzipielles Problem bei der Inversion geoelektrischer Daten besteht in der Mehrdeutigkeit, die jeder Modellrechnung zu Grunde liegt, d. h. unterschiedliche Kombinationen von Untergrundmaterial und dessen Mächtigkeit und elektrische Leitfähigkeit können das gleiche Modell zum Ergebnis haben. Weiterhin beeinflusst die Wahl des geoelektrischen Inversionsprogrammes deutlich das Ergebnis. Die verschiedenen kommerziellen sowie nicht-kommerziellen Inversionsprogramme basieren meist auf unterschiedlichen Inversionsalgorithmen, so dass die Auswertung eines identischen Datensatzes mit verschiedenen Inversionsprogrammen deutlich unterschiedliche Modelle zum Ergebnis haben kann. Um den Einfluss eines gewählten Inversionsprogrammes zu testen, wurden im Rahmen der Datenauswertung die kommerziell erhältlichen Inversionsprogramme SensInv2D / SensInv3D, Res2Dinv / Res3Dinv sowie DC2dInvRes / DC3dInvRes vergleichend getestet und das jeweils am besten geeignete für die unterschiedlichen Schwerpunkte der Datenauswertung verwendet.

Problematisch ist in vielen Fällen das bei einem Monitoring auftretende Datenvolumen. Da einzelne Monitoringmessungen zum Teil bis zu 24 Stunden für einen Messdurchlauf benötigen, erzeugen diese ein großes Datenvolumen, welches

zum Teil nicht von allen Inversionsprogrammen verarbeitet werden kann. Vor allem das Berechnen der Sensitivitätsverteilung für den Datensatz einer umfangreichen 3-dimensionalen Messung bringt einige Programme an ihre Grenzen. Oft ist nicht nur das Einlesen der Datensätze problematisch, sondern die Rechenkapazität der zur Auswertung verwendeten Computer ein limitierender Faktor.

Die Datenauswertung der Vorversuche am Standort Leipzig wurde mit dem Inversionsprogramm SensInv2D durchgeführt. Da hier relativ kleine Datensätze erzeugt wurden, ergab sich keine der oben beschriebenen Problematiken. SensInv2D wurde bei den in Zeitz gewonnenen Daten für den Teil der Messungen mit Oberflächenelektroden verwendet, um diese auf Basis der Ergebnisse der Messungen am Teststandort Leipzig beurteilen zu können.

Den zweiten Schwerpunkt bei der Auswertung der am Standort Zeitz gewonnenen Daten bildete ein weitaus simpleres Verfahren. Es wurde hierbei völlig auf eine Dateninversion verzichtet. Da das Ergebnis des Inversionsverfahrens einige Nachteile (s.o.) mit sich bringt, wurde eine andere Herangehensweise gewählt.

Wie in den „Petrophysikalischen Grundlagen“ (Kapitel 7) erklärt, beeinflusst das Einbringen eines Dampf-Luft-Gemisches und die damit verbundene Temperaturänderung des elektrische Widerstandsgefüge im Untergrund und es ist möglich, diese Änderung durch elektrische Widerstandsmessungen zu verfolgen. Bei der Inversion eines Datensatzes wird in die Berechnungen immer ein definiertes Untergrundvolumen eingeschlossen. Finden an bestimmten Stellen dieses Volumens elektrische Widerstandsänderungen statt, so können diese durch die am nächsten gelegenen Elektroden am genauesten erfasst werden. Da im Inversionsprozess jedoch nicht nur die Elektroden, die in direkter Umgebung des thermischen Einflusses liegen in die Berechnungen mit einbezogen werden, sondern auch weiter entfernte, wird der harte elektrische Widerstandscontrast, den die Messwerte eines vom Dampf-Luft-Gemisch erfassten Elektrodenpaares und die eines noch nicht erfassten Elektrodenpaares bilden, in der Regel geglättet. Je nach eingesetztem Inversionsprogramm und den verwendeten Inversionsparametern kann dieser Effekt stärker oder schwächer ausfallen.

Um die Problematik einer Dateninversion vollkommen auszuschließen, wurde bei einem Teil des Monitoring auf eine Inversion verzichtet und es wurden nur die Messwerte verschiedener Monitoringmessungen direkt untereinander verglichen. Zeigte nun ein Elektrodenpaar zwischen einer ersten und einer weiteren Messung mit gleicher Elektrodenkonfiguration keine elektrische Widerstandsänderung, so hatte das Dampf-Luft-Gemisch diesen Bereich im Untergrund noch nicht erreicht.

Trat nun mit weiterem Sanierungsfortschritt und weiteren Monitoringmessungen an genau diesem Elektrodenpaar ein veränderter elektrischer Widerstandswert auf, so hatte das Sanierungsmittel diesen Bereich infiltriert. Diese Art der Betrachtung wurde somit nicht durch Dateninversionen beeinflusst und zeigte bei regelmäßig durchgeführten Messungen die genaue Position der fortschreitenden Dampf-Luft-Front an. Diese Vorgehensweise bei der Datenbewertung konnte jedoch nur durchgeführt werden, wenn eine repräsentative Anzahl von Elektroden im jeweiligen Bereich zur Verfügung stand. Da die Injektion des Sanierungsmittels in bis zu 12 m u. GOK initiiert wurde, war hierfür vor allem die Verwendung der Bohrlochelektroden sinnvoll.

Mit diesem methodisch und auswertungstechnisch simpleren Monitoringansatz war somit ebenfalls ein Monitoring der Dampf-Luft-Injektion möglich, allerdings war hierfür ein häufiges und regelmäßiges Wiederholen von Messungen mit gleichen Konfigurationen nötig. Messkonfigurationen, die weit auseinander liegende Elektrodenpaare verwendeten, waren nicht geeignet, da ein zu großes Untergundvolumen erfasst wurde und somit keine genaue Auswertung für einen kleinräumigen Zielbereich erfolgen konnte. Dies galt vor allem für die speziell für das 3D-Monitoring installierten Elektroden. Ein vollständiger Messdurchlauf unter Verwendung dieser Elektroden dauerte mehrere Stunden. In dieser Zeit liefen insbesondere im Kernbereich der Sanierungskubatur bereits Ausbreitungsphänomene ab, die durch die lange Messdauer nicht erfasst werden konnten.

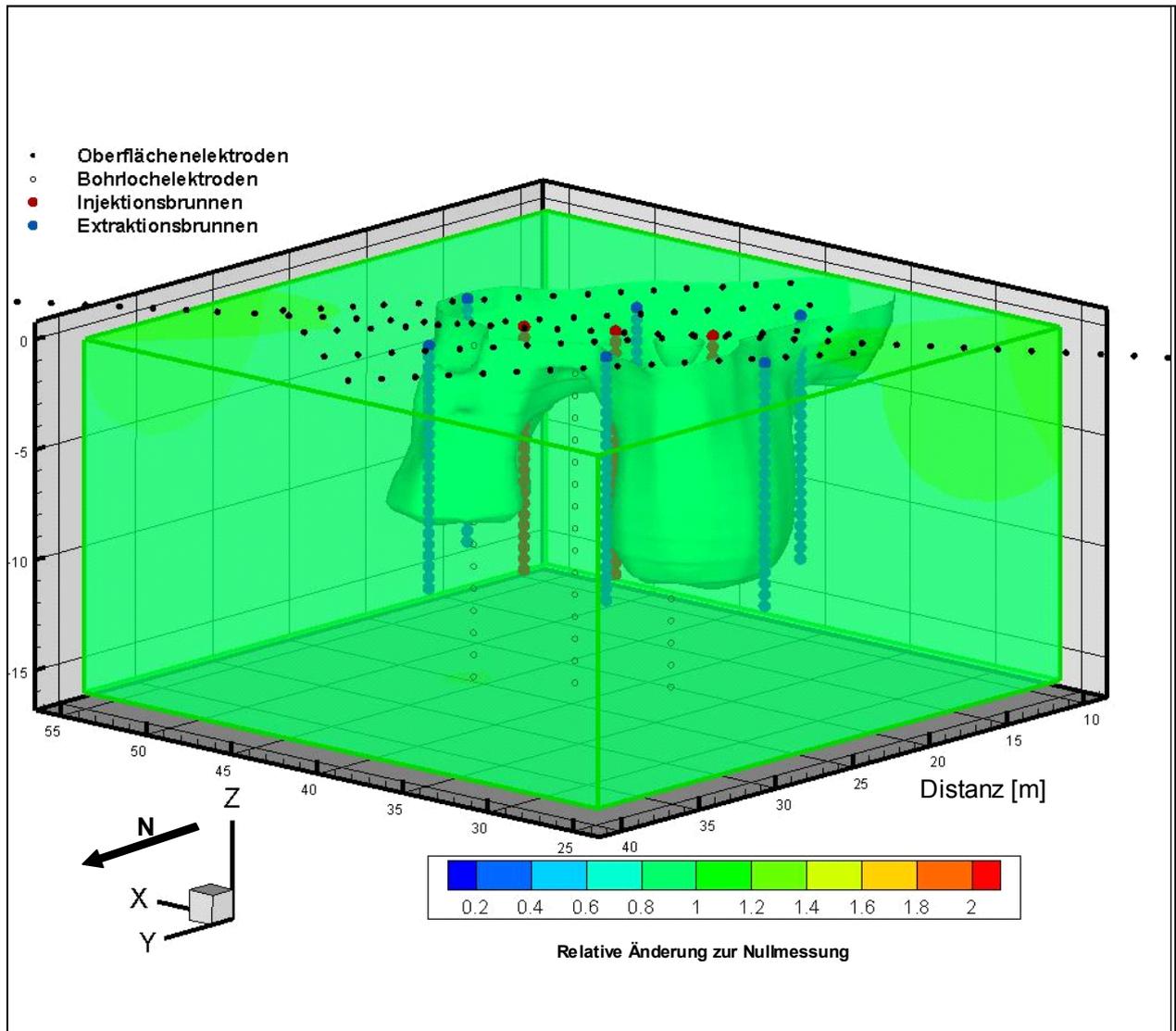
### ***Ergebnisse 3D-Monitoring***

Die Resultate der Untersuchungen zeigen, dass gleichstromgeoelektrische Messungen ein probates Mittel zur Bewertung der räumlichen Wirkung einer thermischen Sanierung sind. Als entscheidend für eine erfolgreiche Datenauswertung und der hieraus folgenden Visualisierung hat sich eine umfangreiche Messdatenfilterung erwiesen. Durch die zuvor beschriebene Problematik der Dateninversion können bereits wenige „Ausreißer“ im Messdatensatz zu einem nicht zufriedenstellenden Inversionsergebnis führen. Entsprechende „Ausreißer“ aus dem umfangreichen Datensatz einer jeden Monitoringmessung herauszufiltern, bedurfte daher besonderer Aufmerksamkeit. Während des Datenprocessing stellte sich heraus, dass einzelne Datensätze zum Teil nur 30 % verwertbare Daten enthielten, was sich bei dem umfangreichen Gesamtvolumen jedoch als unproblematisch erwies.

Durch die Kombination von Oberflächen- mit Bohrlochelektroden konnten auch in den tiefer liegenden Schichten der Sanierungskubatur qualitativ hochwertige Messdaten gewonnen werden. Um das Ausbreitungsverhalten des injizierten Dampf-

Luft-Gemisches realistisch beschreiben zu können, war bei jeder Monitoringmessung eine ausreichende Datenabdeckung in der gesamten Sanierungskubatur gegeben. Da der Datensatz der zum Erzeugen einer 3-dimensionalen Abbildung benötigt wird, über einen Zeitraum von bis zu 24 Stunden aufgezeichnet wurde, kann eine solche Abbildung keine exakte Position der sich ausbreitenden Dampf-Luft-Front darstellen. Hierzu wurde ein anderer Ansatz gewählt, auf den am Ende dieses Kapitels ausführlich eingegangen wird.

In Abbildung 49 ist das Ergebnis der Auswertung eines 3-dimensionalen Datensatzes visualisiert. Die Abbildung zeigt die relative Änderung des scheinbaren elektrischen Widerstandes im Verhältnis zur Nullmessung vor Beginn der Sanierungsaktivitäten am Standort. Die Farbskala beschreibt hier den Grad der Änderung. Ausführlich ist diese Herangehensweise in Kapitel 7 beschrieben. Ein Wert von 1 stellt hier keinerlei Änderung des elektrischen Widerstandsgefüges dar. Werte kleiner als 1 werden als Blautöne dargestellt und zeigen Bereiche die eine Reduzierung des scheinbaren elektrischen Widerstandes erfahren haben. Werte die über 1 liegen zeigen eine entsprechende Erhöhung. Da eine gleichzeitige Erhöhung und Reduktion der elektrischen Widerstände in verschiedenen Bereichen der Kubatur möglich sind, können diese Effekte auch in räumlich angrenzenden Zonen auftreten. Geringe elektrische Widerstandsänderungen sind wie in Abbildung 49 durch Grüntöne dargestellt. Diese Bereiche haben weder eine starke Erwärmung noch eine starke Sättigungsänderung erfahren. Hier ist mit großer Sicherheit davon auszugehen, dass das injizierte Sanierungsmittel diese Bereiche noch nicht erreicht hat.

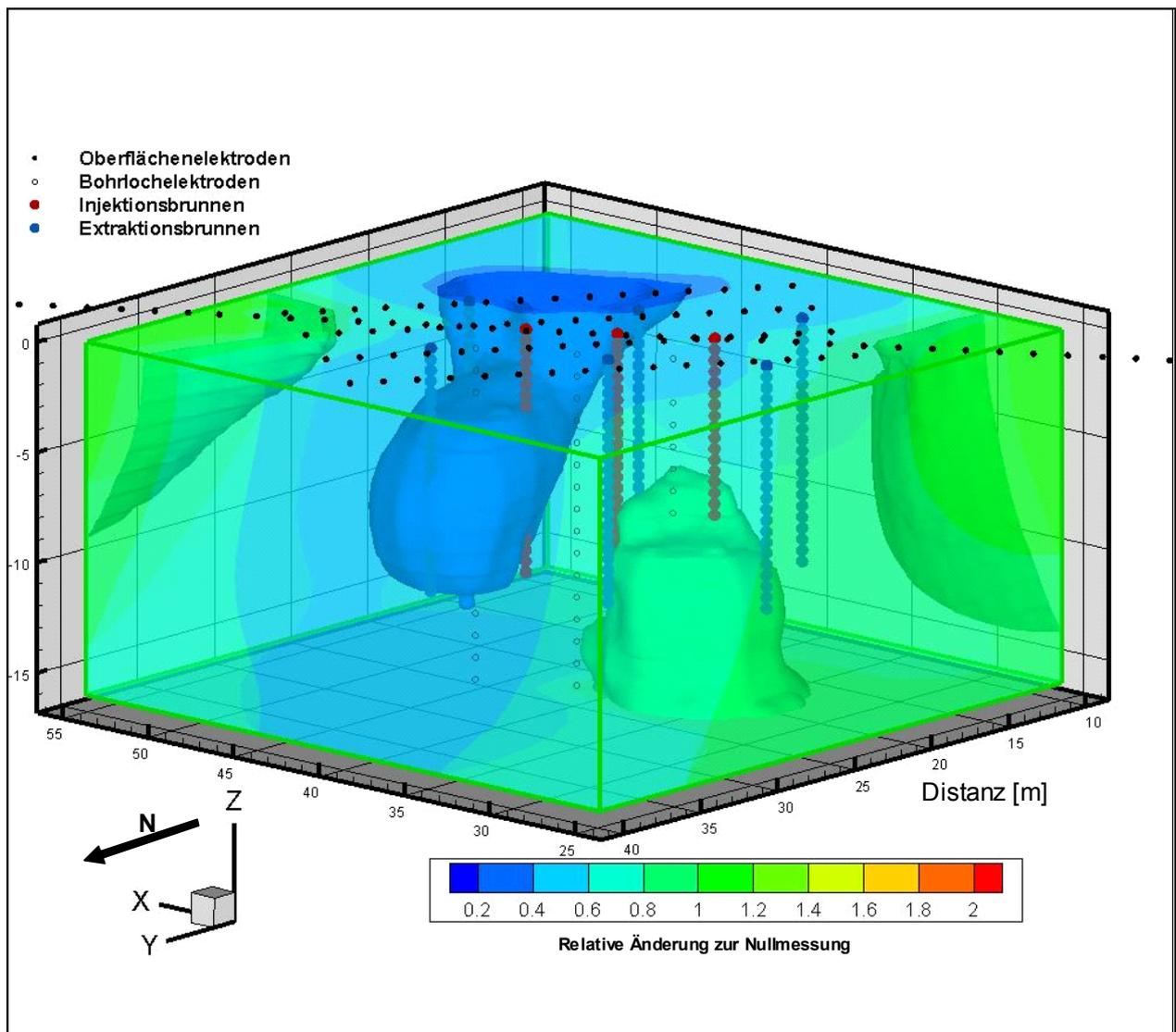


**Abbildung 49: 3-dimensionale Monitoringmessung zu Beginn der aktiven Sanierung**

Die in Abbildung 49 dargestellten elektrischen Widerstandsänderungen sind sehr gering. Die entsprechende Monitoringmessung wurde zu Beginn der thermischen Sanierung und nach der Installation aller im Untergrund verbauten Teile der Sanierungsanlage vorgenommen. Die geringen Änderungen im Vergleich zur Nullmessung weisen auf eine hohe Stabilität der Messungen hin. Starke Schwankungen bei gleichen Messbedingungen zu Beginn der thermischen Einflussnahme würden die Verlässlichkeit dieses Monitoringansatzes in Frage stellen.

Abbildung 50 zeigt die Auswertung einer Monitoringmessung in der Hauptphase der thermischen Sanierung. Eine deutliche Änderung der elektrischen Widerstände im Untergrund ist erkennbar. Es fallen hier insbesondere die turm- und schlauchartigen Strukturen im Inneren des Sanierungsfeldes auf. In einem homogenen Medium wäre das Entstehen solcher Strukturen anzuzweifeln. Da die lokalen

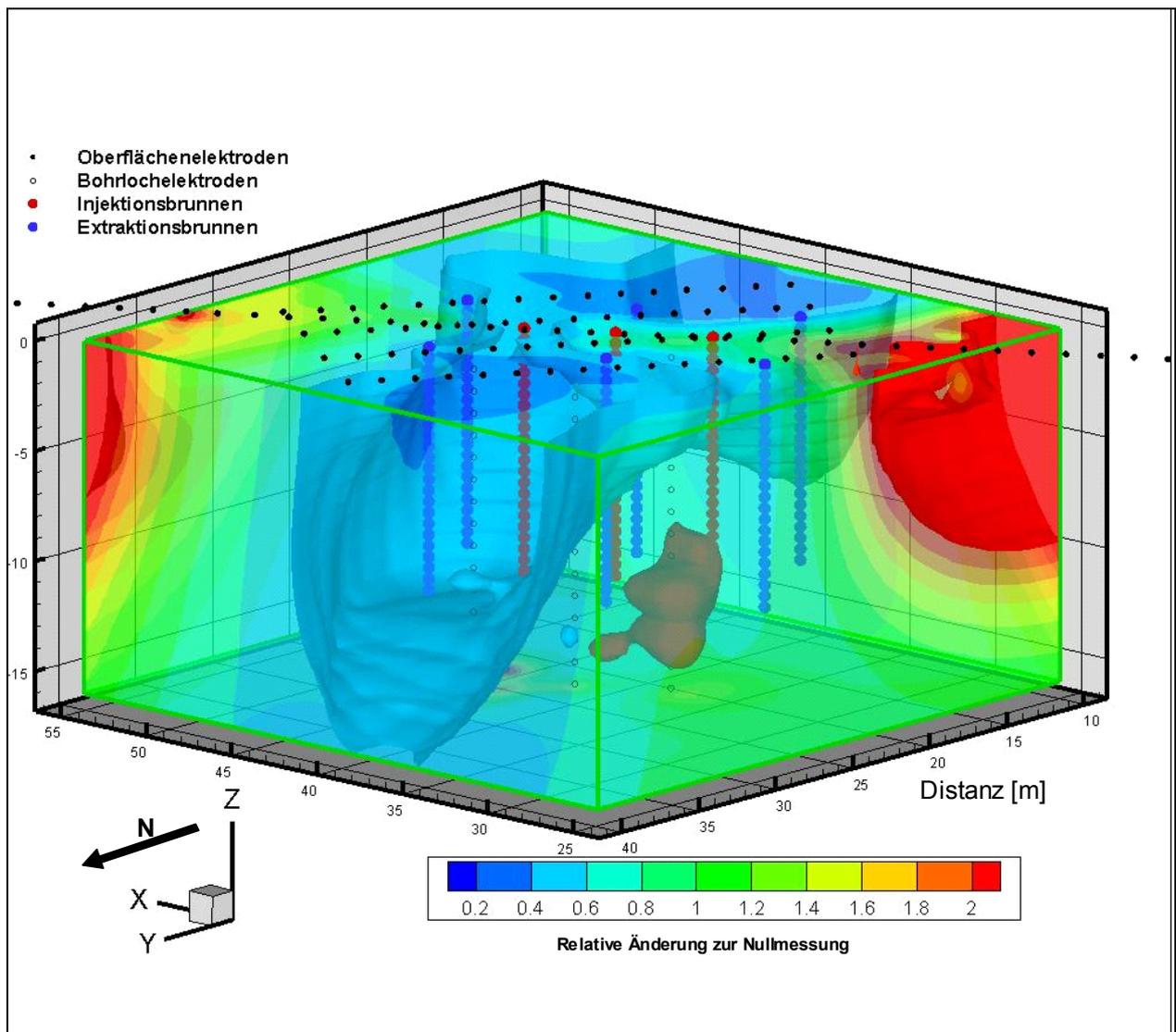
Untergrundbedingungen jedoch stark heterogen sowie anisotrop sind, ist das Entstehen solcher Strukturen sogar sehr wahrscheinlich. Eine direkte Temperaturmessung über im Untergrund installierte Messfühler könnte diese Strukturen nicht erfassen, da die hierfür benötigte Anzahl an Sensoren zu groß wäre. Eine einfache Interpolation zwischen verschiedenen Sensoren, die in ähnlichen Temperaturzonen liegen, würde optisch ein Untergrundvolumen darstellen, welches vollkommen vom Sanierungsmittel infiltriert wurde. Über die wahren Gegebenheiten in den Bereichen zwischen den Sensoren lässt sich jedoch mit dieser Methode keine verlässliche Aussage treffen.



**Abbildung 50: 3-dimensionale Monitoringmessung in der Hauptphase der aktiven Sanierung**

In Abbildung 50 ist ein Bereich mit besonders starken Änderungen des elektrischen Widerstandsgefüges im direkten Umfeld der Injektionslanzen zu erkennen. Da hier die Injektion des Sanierungsmittels in die gesättigte sowie ungesättigte Zone stattfindet, ist gerade in diesem Bereich mit der größten elektrischen Widerstandsänderung zu rechnen. Dieses Verhalten bestätigt die Aussagekraft der

verwendeten Monitoringmethode. Auffällig ist hingegen auch, dass die direkte Umgebung aller drei Injektionsbrunnen nicht die gleiche elektrische Widerstandsänderung zeigt. Durch die unterschiedlichen Dampf-Luft-Injektionsraten an den Brunnen sowie die zum Teil hohen hydraulischen Widerstände, hervorgerufen durch geringe Durchlässigkeiten gerade im Bereich der (un-) gesättigten Zone des Injektionsbrunnens I2 (s. auch Abbildung 44), ist an den drei Injektionsbrunnen mit keiner analogen Ausbreitungscharakteristik des Sanierungsmittels zu rechnen.



**Abbildung 51: 3-dimensionale Monitoringmessung gegen Ende der aktiven Sanierung**

Abbildung 51 zeigt eine Monitoringmessung gegen Ende der Sanierung. Es ist eine deutlich heterogene Verteilung der elektrischen Widerstandsänderung erkennbar. Die Ausprägung von kanalartigen Strukturen tritt hervor, was die Vermutung bestätigt, dass es zu keiner radialsymmetrischen Ausbreitung des Sanierungsmittels kommt. Es ist deutlich erkennbar, dass unterhalb der Injektionsbrunnen liegende

Schichten keine oder nur eine sehr geringe Erwärmung erfahren haben. Große Bereiche der durch die Extraktionsbrunnen eingegrenzten Sanierungskubatur zeigen eine starke Absenkung der lokalen elektrischen Widerstände, d. h. das Sanierungsmittel hat diese Bereiche durchdrungen und zu einer starken Erwärmung geführt. Bei dieser Anwendung überwiegen Effekte, die bei der Infiltration des Dampf-Luft-Gemisches zu einer Reduktion des elektrischen Widerstandes führen. Als maßgeblich wird hierbei die Sättigungsänderung sowie die hierdurch hervorgerufene erhöhte ionare Aktivität von Tonen vermutet.

Abbildung 50 und 51 zeigen in den Randbereichen der Kubatur elektrische Widerstandsänderungen. Diese sind als im Verlauf der Dateninversion entstandene Artefakte anzusehen. Da gerade in den Randbereichen die Datenabdeckung deutlich geringer als in den zentralen Teilen ist, ist das Entstehen solcher Effekte kaum zu vermeiden. Daher sollte den Änderungen in diesen Randbereichen nur geringe Beachtung geschenkt werden.

Die Abdeckung der Sanierungskubatur durch Oberflächen- und Bohrlochelektroden erscheint für diese Art der Anwendung ausreichend. Es konnten alle Bereiche erfasst werden, die für das Monitoring von Interesse waren. Zusätzlich konnten Informationen über die elektrischen Widerstandsänderungen in angrenzenden Bereichen gewonnen werden. Weitere Erkenntnisse zur Entwicklung von kanalartigen Zonen, die präferentielle Fließpfade für das Sanierungsmittel darstellen, waren von großem Interesse. Vergleiche mit dem außerhalb der Sanierungskubatur durchgeführten Temperaturmonitoring zeigten hier deutliche Übereinstimmungen zwischen den geoelektrischen Messungen (indirekte Messungen), die den elektrischen Widerstand als Proxy nutzen und den direkten Temperaturmessungen mittels Temperaturmessketten. Eine feste Korrelation zwischen dem Grad der elektrischen Widerstandsänderung und einer entsprechenden Temperaturänderung, konnte aufgrund der unterschiedlich einwirkenden Effekte im Untergrund jedoch nicht erstellt werden.

Bei dem hier durchgeführten 3-dimensionalen Monitoring handelt es sich um ein aufwändiges Messverfahren. Eine große Anzahl von Oberflächen- sowie Bohrlochelektroden sind für ein verlässliches Erfassen der durch die thermische Sanierung hervorgerufenen elektrischen Widerstandsänderungen nötig. Ebenso sind das aufgezeichnete Datenvolumen sowie der zeitliche Umfang jeder Monitoringmessung nicht zu unterschätzen. Aufgrund dieser Bedingungen ist mit dieser Methode kein zeitnahes Erfassen schneller Änderungen im Untergrund möglich. Zur Bewertung der Ausbreitungscharakteristik und damit dem Erfolg der Sanierung ist diese Monitoringmethode jedoch als ideal zu bezeichnen. Kaum ein

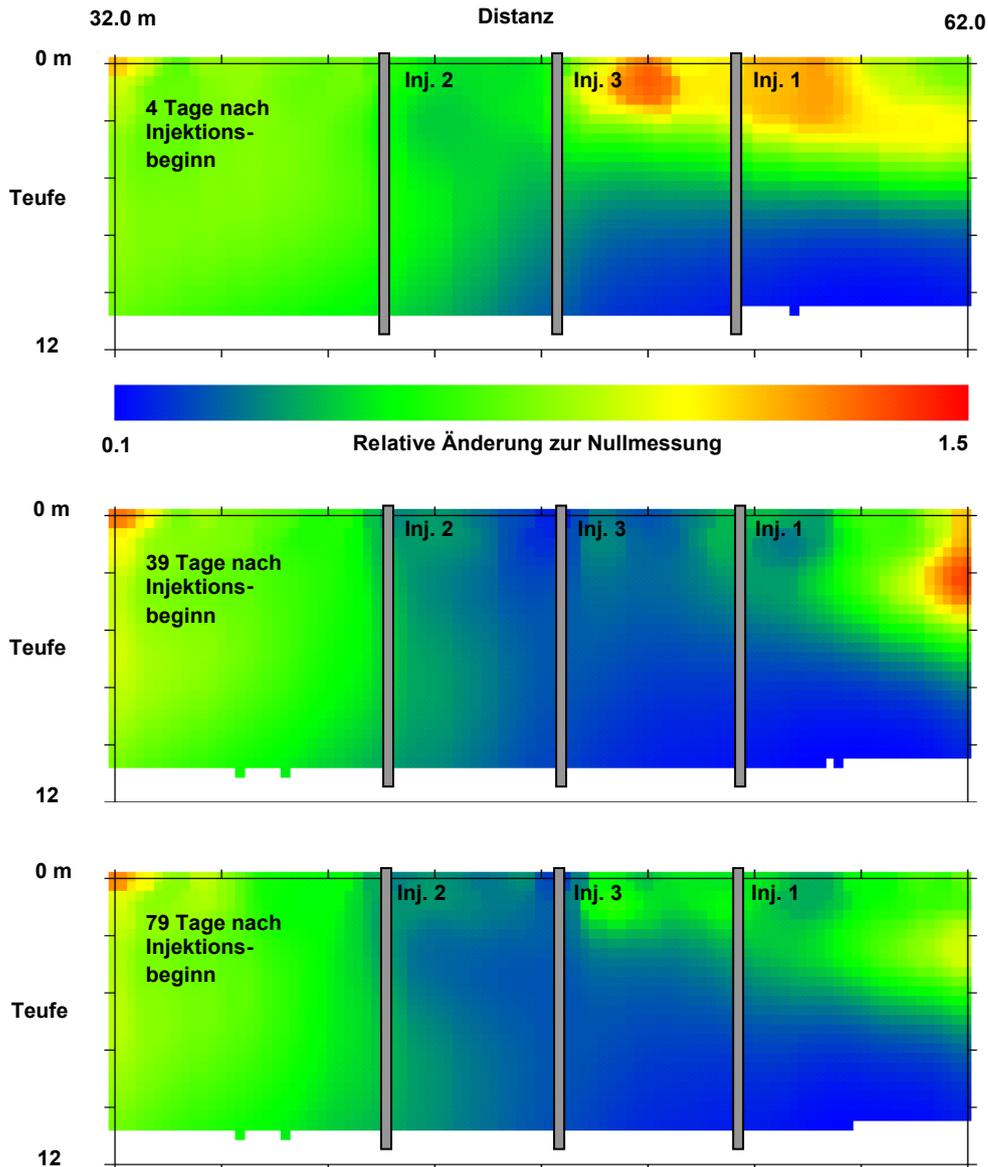
anderes tomographisches Messverfahren lässt eine ähnlich verlässliche Beurteilung der im Untergrund ablaufenden, sanierungsrelevanten Vorgänge zu. Für das Erfassen der rapiden Änderungen gerade zu Beginn der Sanierung, empfiehlt sich das erheblich schneller durchführbare 2-dimensionale geoelektrische Monitoring durch Bohrlochmessungen sowie Oberflächenmessungen.

### ***Ergebnisse 2D-Monitoring***

Parallel zu den Messungen aus Kombinationen von Oberflächen- und Bohrlochelektroden, wurden Messungen unter ausschließlicher Verwendung von Oberflächen Elektroden durchgeführt. Hierbei wurden drei verschiedene Elektrodenkonfigurationen verwendet, die im Rahmen von geoelektrischen Messungen häufig Anwendung finden (Wenner-, Schlumberger- sowie Dipol-Dipol-Konfigurationen). Diese Messungen wurden vorgenommen, um eine vergleichende Bewertung zu Kombinationsmessungen mit Bohrlochelektroden erstellen zu können.

Die Durchführung sowie Auswertung der Messungen mit Oberflächen Elektroden war deutlich einfacher und schneller als die der Kombinationsmessungen. Da nur eine Auslage von Oberflächen Elektroden verwendet wurde, konnten Standardeinstellungen des Messgerätes verwendet werden, was die Vor- und Nachbereitung der Messung erheblich vereinfachte. Die im Verlauf des Monitoring erfassten Datensätze waren von sehr guter Qualität. Vor allem die mit Wenner-Konfiguration durchgeführten Messungen lieferten verlässliche Informationen.

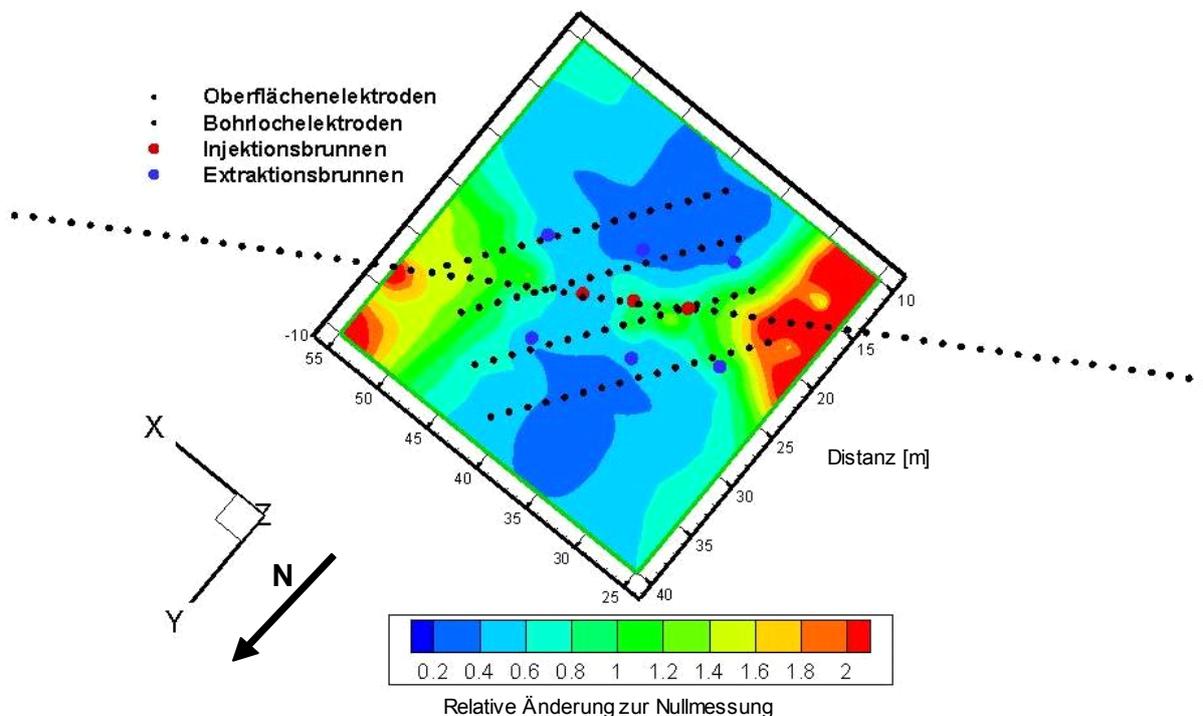
Die Auswertung der gewonnenen Daten konnte mit vorhandener Standardsoftware ebenfalls schnell und unkompliziert vorgenommen werden. Die einfache Geometrie der Elektrodenauslagen und die hohe Datenqualität minimierten den Aufwand des Datenprocessing und lieferten sehr gute Ergebnisse. Da die mit Wenner-Konfiguration durchgeführten Messungen die beste Datenqualität lieferten, wird im Folgenden auf eine Beschreibung der Ergebnisse der Messungen mit Schlumberger- und Dipol-Dipol-Konfiguration verzichtet.



**Abbildung 52: Monitoringmessungen mit Wenner-Elektrodenkonfiguration**

Wie in Abbildung 52 ersichtlich wird, ist über den Zeitraum der thermischen Sanierung eine deutliche Änderung der elektrischen Widerstandsverhältnisse zu erkennen. Analog zu den 3-dimensionalen Messungen sind in Abbildung 52 die Änderungen der scheinbaren elektrischen Widerstände im Untergrund dargestellt. Im Zentrum der Auslage wird mit Beginn und im weiteren Verlauf der thermischen Sanierung eine Änderung der elektrischen Widerstände im Untergrund deutlich. Es lässt sich zunächst feststellen, dass auch mit reinen Oberflächenmessungen die Veränderungen im Untergrund ersichtlich werden. Gerade in der Hauptphase der thermischen Sanierung, die sich durch starke Temperaturänderung im Untergrund

auszeichnet, werden auch die stärksten elektrischen Widerstandsänderungen festgestellt. Problematisch ist jedoch, dass nur im Zentrum der Oberflächen-elektrodenauslage eine ausreichende Eindringtiefe erreicht wird, die eine verlässliche Bewertung zulässt. Die Bewertung der Randbereiche erweist sich durch schlechtere Abdeckung sowie geringere Sensitivitäten als schwierig.



**Abbildung 53: Abbildung des Ergebnisses einer 3-dimensionalen Messung (Draufsicht)**

Ein entscheidender Nachteil des Monitoring mit Oberflächenelektroden ist die Beschränkung der Darstellung auf einen 2-dimensionalen Schnitt durch die Sanierungskubatur. In Abbildung 53 wird diese Problematik anhand einer Draufsicht auf das Sanierungsfeld dargelegt. Ein horizontaler Schnitt durch die Abbildung einer 3-dimensionalen Messung zeigt hier deutlich die räumlich stark unterschiedlichen elektrischen Widerstandsänderungen. Die lange Oberflächenelektrodenauslage kann diese räumlichen Änderungen nicht detektieren. Es werden zwar auch 3-dimensionale Effekte im Halbraum unter der Elektrodenauslage aufgezeichnet, diese lassen sich jedoch ihrer Position in der Sanierungskubatur nicht räumlich zuordnen. Es werden hier beispielsweise elektrische Widerstände aus Bereichen aufgezeichnet, die sich nicht in Falllinie unter der Elektrodenauslage befinden (Randeffekte). Die Einschränkung, diese Messungen nur 2-dimensional darstellen zu können, erweist sich als großer Nachteil bei der Beurteilung 3-dimensionaler Vorgänge, wie sie bei einer Dampf-Luft-Injektion auftreten.

Es lässt sich daher feststellen, dass diese Art des Monitoring geeignet ist, den zeitlichen Verlauf einer thermischen Sanierung zu erfassen, aufgrund der räumlichen Beschränkung und der geringen Abdeckung in tieferen Schichten und Randbereichen jedoch nicht für eine verlässliche Beurteilung der Vorgänge innerhalb der Sanierungskubatur verwendet werden kann.

### ***Ergebnisse Bohrlochgeoelektrik ohne Inversion***

Das 3D-Monitoring stößt insbesondere in Bereichen, an denen die Prozesse im Untergrund sehr schnell ablaufen, an seine Grenzen. Während die 3D-Messungen über viele Stunden andauern, können signifikante Prozesse innerhalb von Minuten ablaufen. Ein Beispiel für einen solchen schnellen Prozess ist die Dampfausbreitung im Nahbereich der Injektionslanzen. Dieser Prozess kann mit einem 3D-Monitoring nicht zufriedenstellend erfasst, sondern ausschließlich über längere Zeiträume hinweg visualisiert werden.

Das 3D-Monitoring eignet sich vor allem zur Prozessbewertung durch den Vergleich der Zustände vor und nach einer thermischen Sanierung. Für eine detaillierte Prozessbeobachtung ist das Monitoring von ausgewählten Messanordnungen zweckmäßiger. Diese Messanordnungen sollten extrem sensitiv für den zu beobachtenden Bereich sein. Besonders empfehlenswert ist für die Beobachtung schneller Prozesse die Verwendung von Bohrlochelektroden. Für Messkonfigurationen entlang einer Bohrlochelektrodenkette gilt eine Reichweite vergleichbar mit der Eindringtiefe von entsprechenden Oberflächenmessungen. Werden Elektrodenkonfigurationen genutzt, die Elektrodenstränge miteinander kombinieren, so ist zu beachten, dass wie bei allen geoelektrischen Messungen der Bereich hoher Sensitivität sehr stark mit der Entfernung vom Strang abnimmt.

Wie bereits zuvor erläutert, liegt der entscheidende Vorteil dieses Monitoringansatzes im Verzicht auf eine Inversion der im Verlauf der Messungen gewonnenen Daten. Das Ergebnis einer Dateninversion ist immer stark abhängig von den gewählten Inversionsparametern und wird nicht zuletzt zu großen Teilen durch die Wahl des verwendeten Inversionsprogrammes selbst beeinflusst. Bei dem hier verwendeten Ansatz entfallen alle die im Rahmen einer Inversion eingebrachten Problematiken.

Gerade zu Beginn der aktiven Sanierung konnte mit diesem Verfahren der exakte Fortschritt der Dampf-Luft-Front detektiert werden. Sobald Elektroden vom Dampf-Luft-Gemisch erreicht wurden, zeigte sich eine deutliche Reaktion in deren Messwerten. Ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Ansätzen konnte dabei nicht festgestellt werden, ob die Reaktion auf die Temperaturerhöhung oder auf eine

Änderung des Grades der Wassersättigung zurückzuführen war. Für eine Beurteilung der Lage der Dampf-Luft-Front war dies jedoch auch nicht notwendig. Einige Elektroden zeigten nach dem Durchgang der Front einen Rückgang in den Messbereich der Ursprungswerte vor Beginn der Sanierung. Im Vorfeld durchgeführte Nullmessungen zeigten an den Bohrlochelektroden konstante Messwerte, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die festgestellten Änderungen eindeutig auf den Einfluss der thermischen Sanierung zurückzuführen sind.

Im Folgenden wird anhand von Messungen an ausgewählten Bohrlochelektrodenkombinationen der Einfluss der thermischen Sanierung durch Dampf-Luft-Injektion auf die lokalen elektrischen Widerstandsbedingungen dargestellt. Die Farbcodierung in den Abbildungen 54, 55, 56 und 57 zeigt die jeweils verwendeten Elektrodenpaare. Ausgefüllte Kreise zeigen die zur Strominjektion genutzten Elektroden, die unausgefüllten Kreise die zur Potentialmessung verwendeten Elektroden. Die mit „EX“ bezeichneten Elektroden stellen die in ca. 200 m Entfernung vom Sanierungsfeld installierte externe Elektrode dar (Dipol-Pol-Konfiguration).

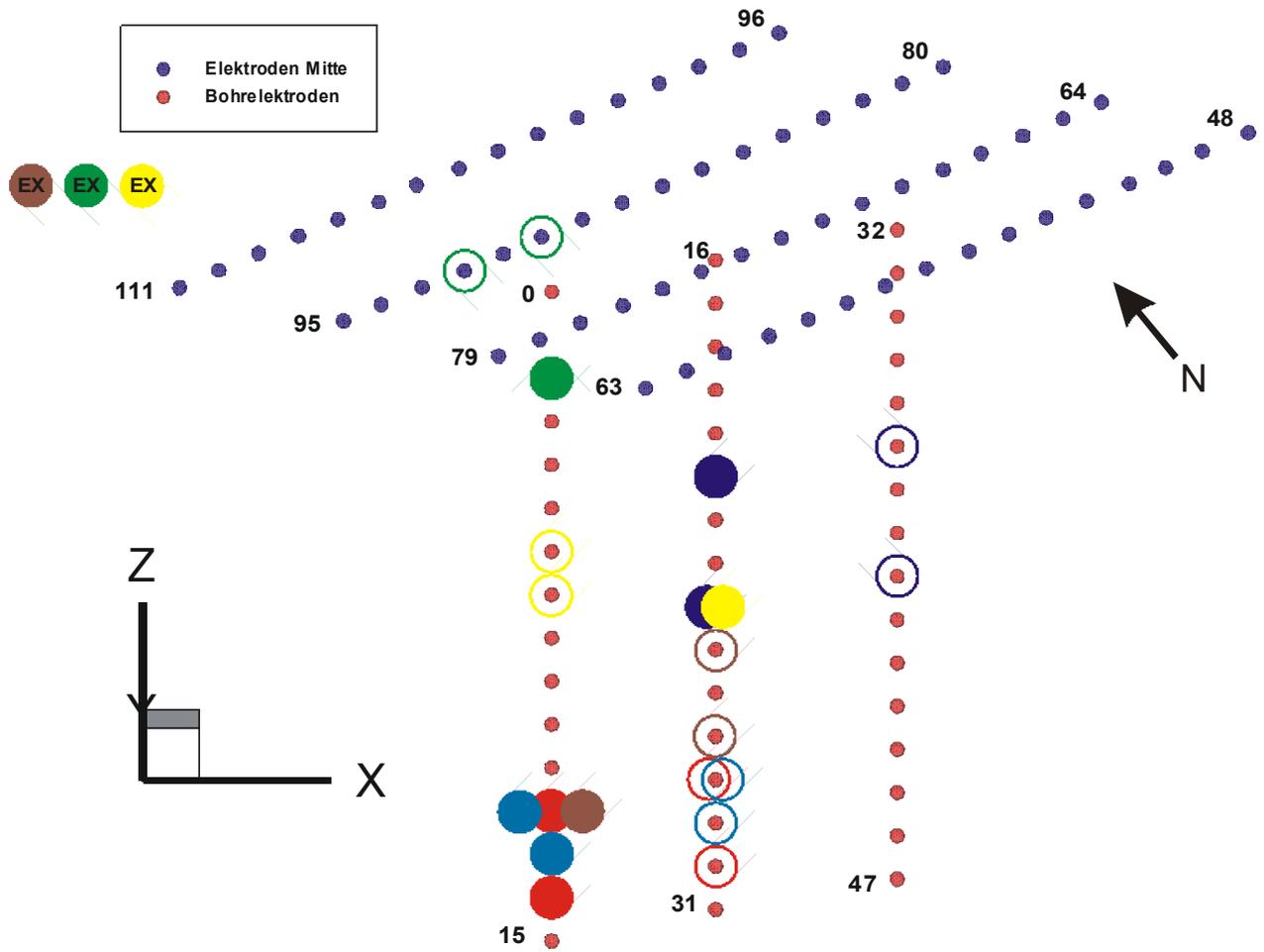
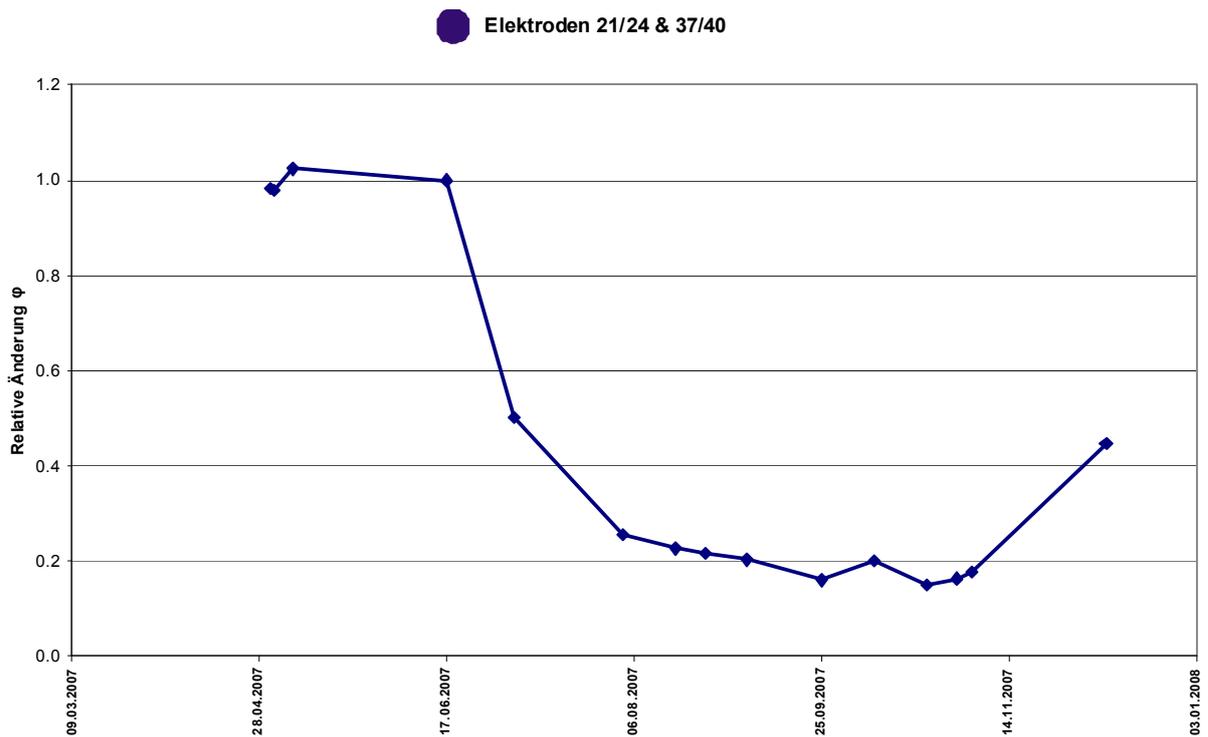
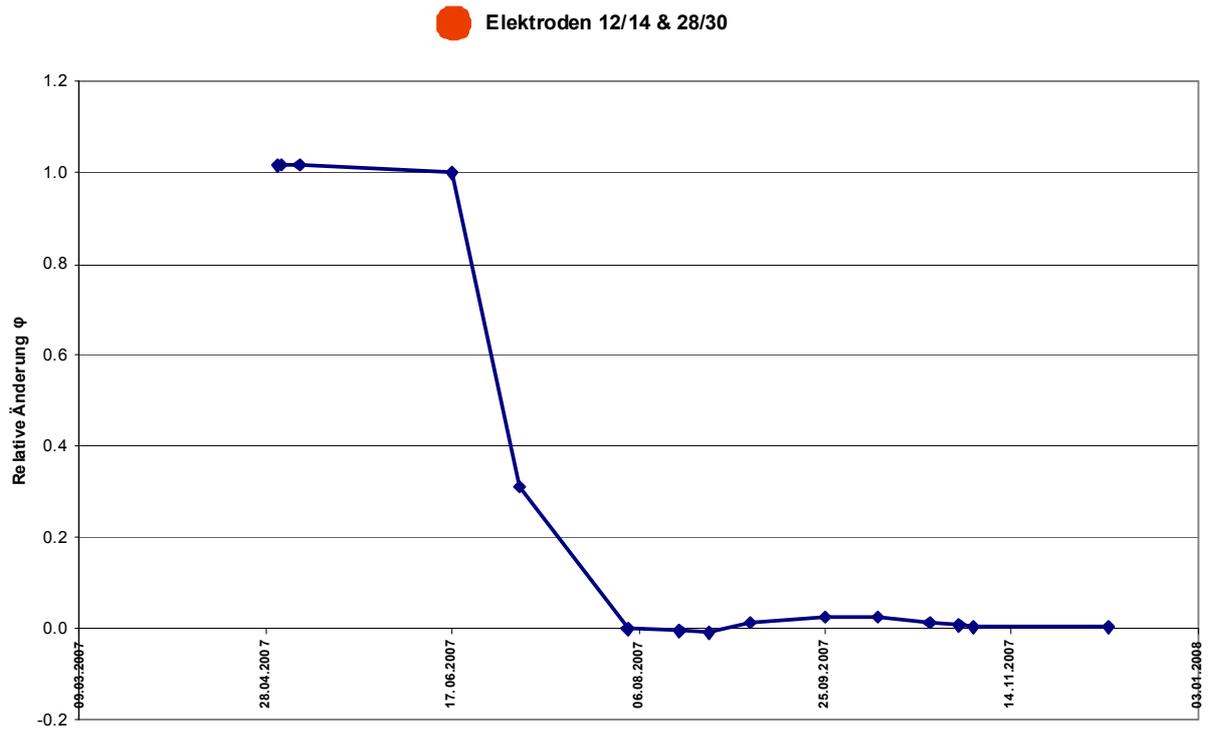
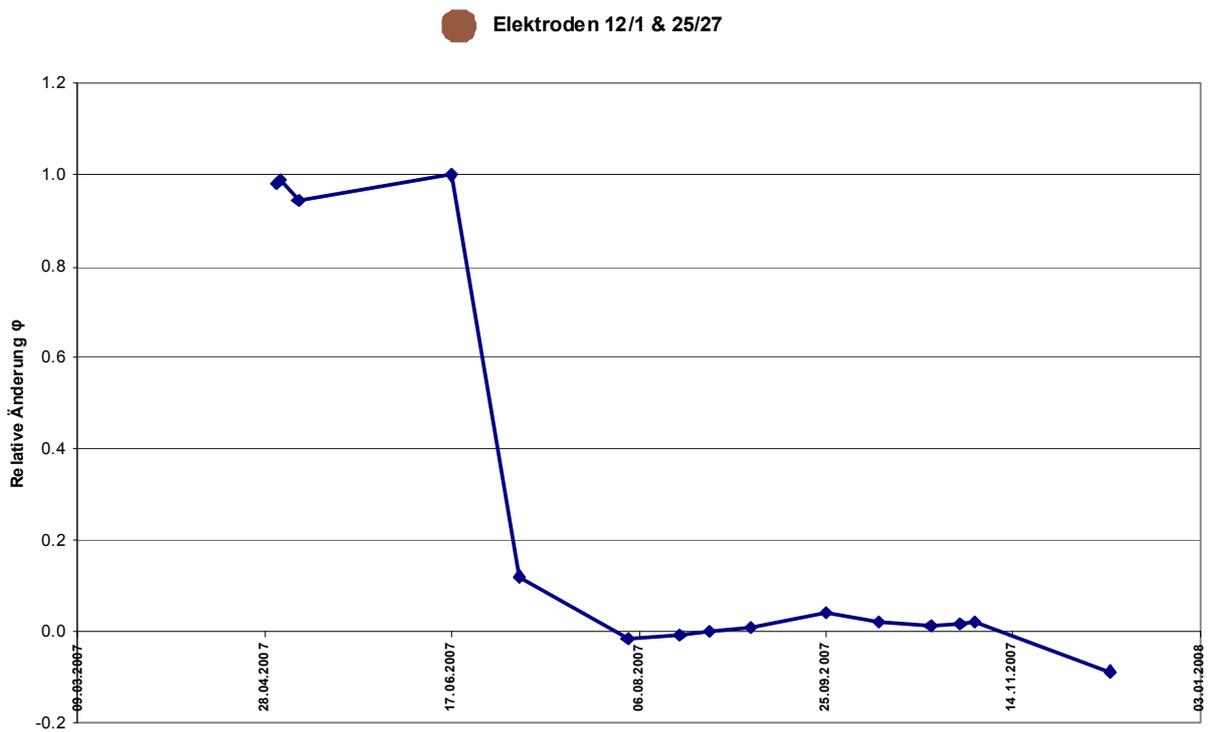
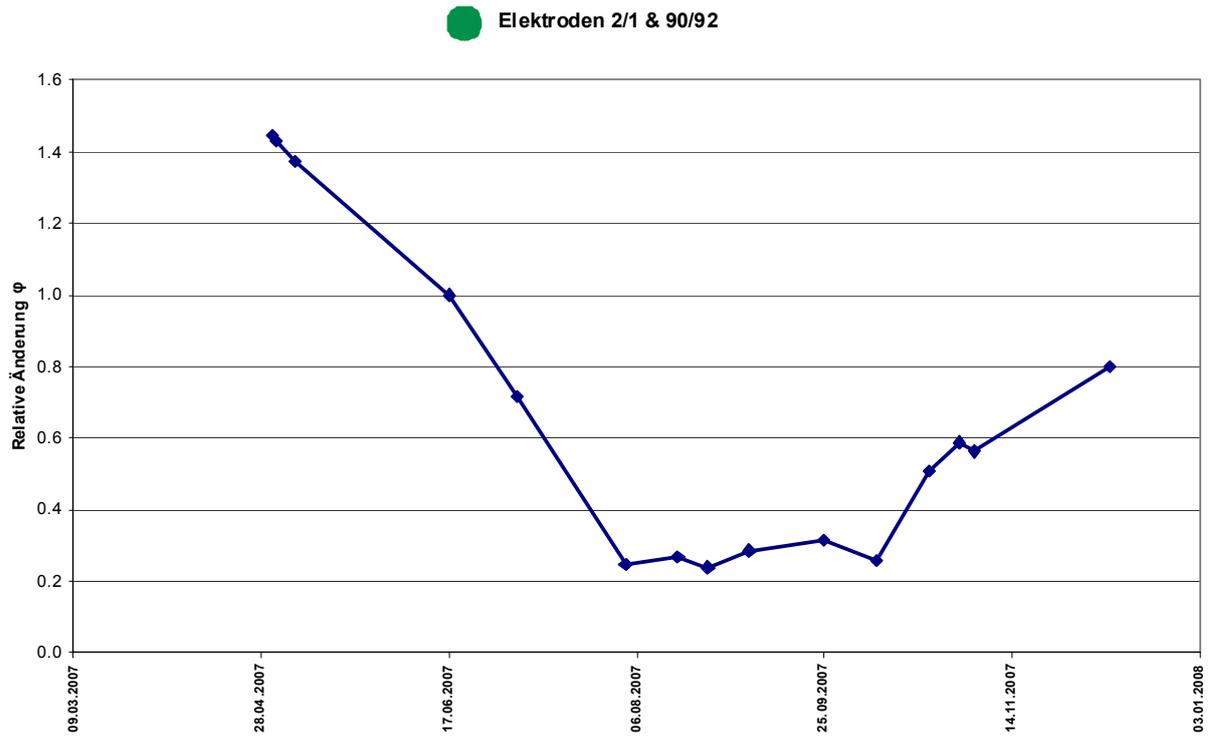


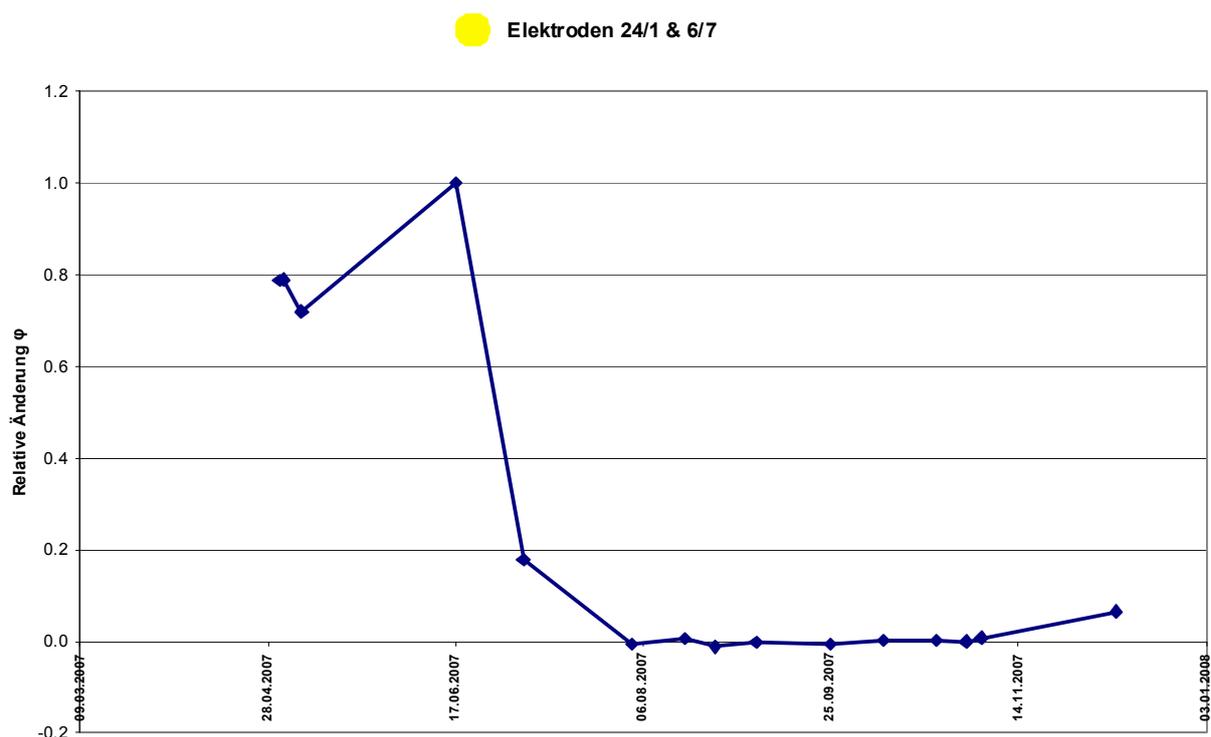
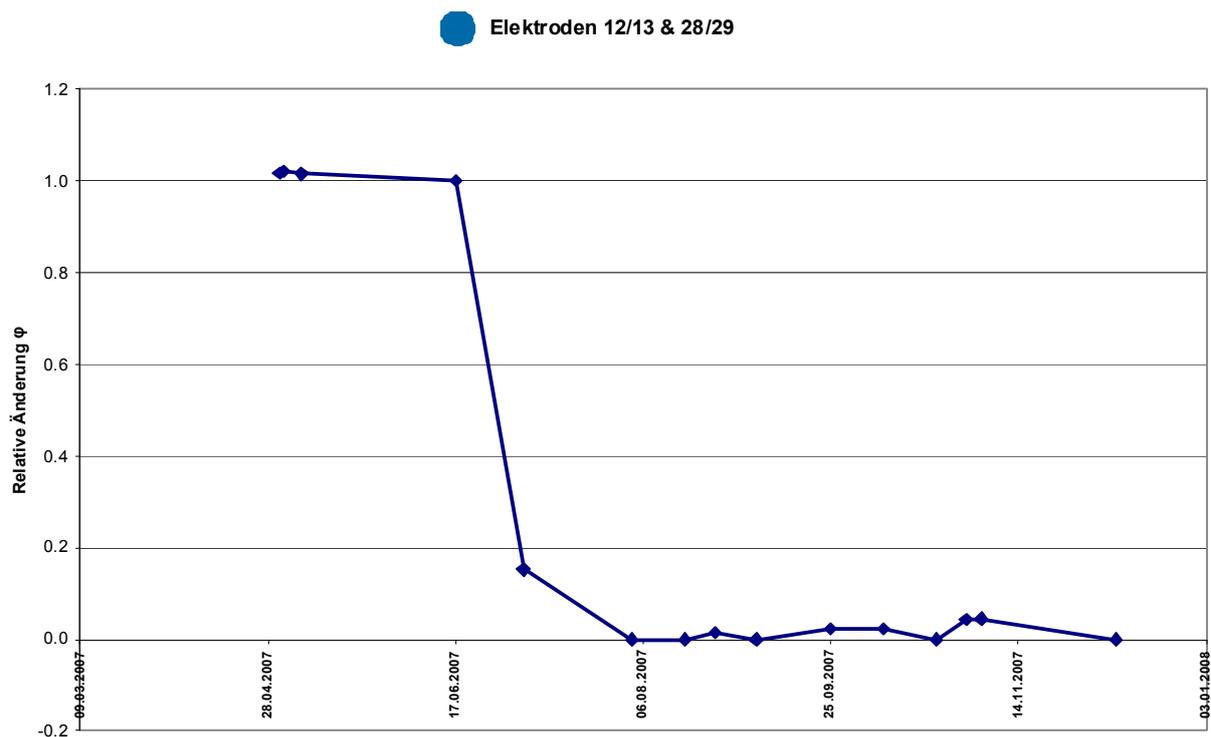
Abbildung 54: Kombinationsmessungen an ausgewählten Elektrodenpaaren



**Abbildung 55: Relative Änderungen der elektrischen Widerstände an ausgewählten Elektrodenpaaren (1)**



**Abbildung 56: Relative Änderungen der elektrischen Widerstände an ausgewählten Elektrodenpaaren (2)**



**Abbildung 57: Relative Änderungen der elektrischen Widerstände an ausgewählten Elektrodenpaaren (3)**

## 11. Temperaturmessungen außerhalb des Sanierungsbereiches

Ziel der thermischen Boden- und Grundwassersanierung am Standort der Benzolanlage des ehemaligen Hydrierwerkes Zeitz war die Extraktion des Hauptkontaminanten Benzol aus der gesättigten sowie ungesättigten Zone des Untergrundes im Pilotmaßstab. Wie in Kapitel 9 beschrieben, wurden unter anderem im Laufe der Sanierung Temperaturmessungen an im Untergrund installierten Temperaturmessfühlern vorgenommen. Alle Fühler waren im Bereich der zu sanierenden Kubatur verbaut, so dass keinerlei Messungen außerhalb des Sanierungsbereiches auf diese Weise vorgenommen werden konnten.

Bei homogenen und isotropen Untergrundbedingungen und somit radial-symmetrischer Ausbreitung des injizierten Dampf-Luft-Gemisches sollte mit keinem größeren Wärmeaustrag aus dem Sanierungsfeld zu rechnen sein. Die Extraktionsbrunnen, die sowohl erwärmte Bodenluft wie auch Grundwasser fördern, sind geometrisch so platziert worden, dass kein durch die Injektion mobilisierter Schadstoff den Sanierungsbereich verlassen sollte. Die Injektions- und Extraktionsraten wurden so aufeinander abgestimmt, dass der aufgebaute Gradient bis zu den Extraktionsbrunnen im Randbereich des Sanierungsfeldes reichte. Während der Sanierung wurde eine ständige Grundwasserhaltung betrieben, die den (in diesem Gebiet allerdings geringen) natürlichen Grundwasserabstrom unterbinden sollte.

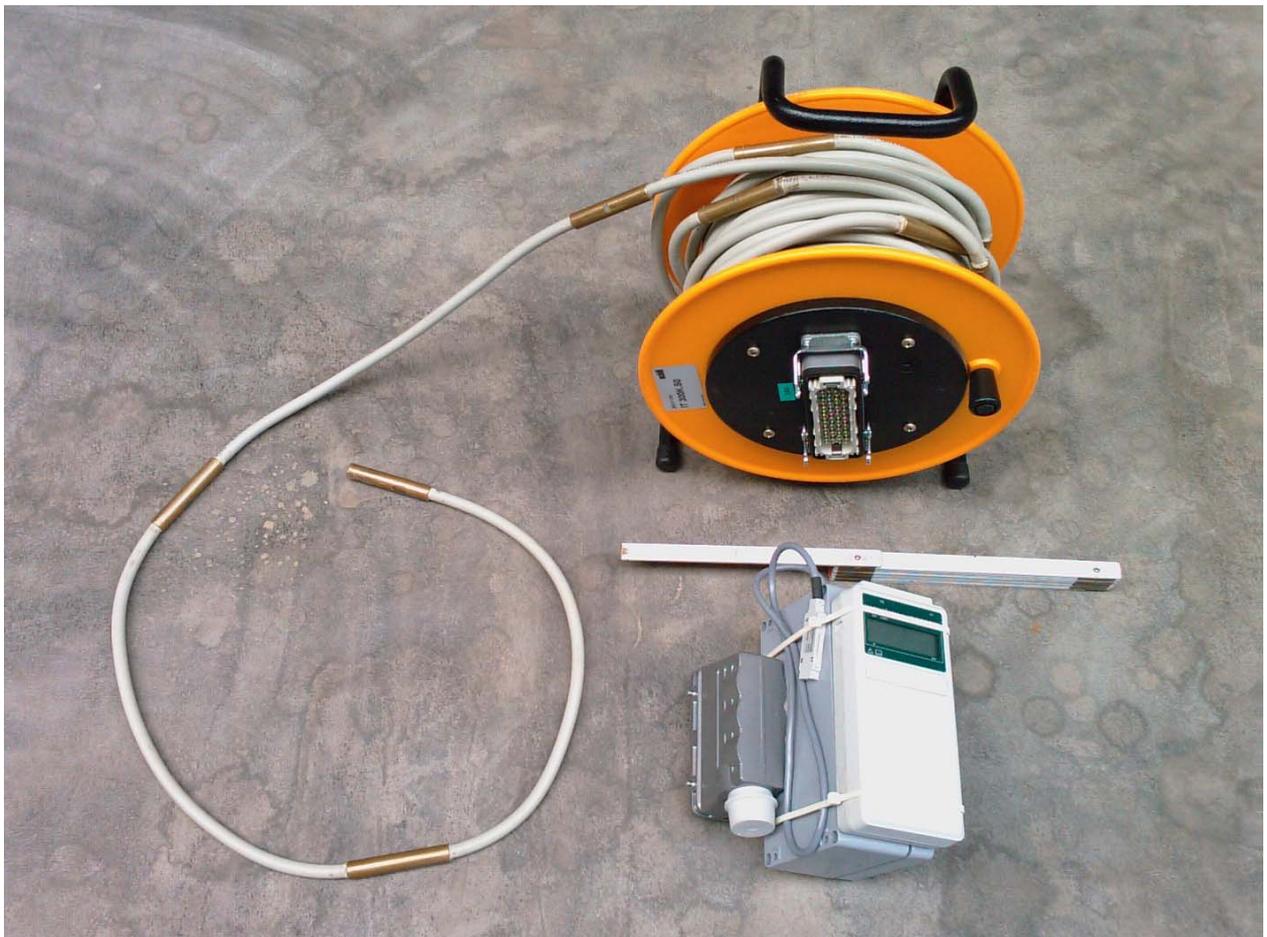
Da am Standort recht heterogene Untergrundbedingungen herrschen, war keineswegs mit einer radialsymmetrischen Ausbreitung des Sanierungsmittels zu rechnen. Weiterhin war mit der Ausbildung präferentieller Fließpfade zu rechnen, die möglicherweise nur zum Teil im Erfassungsbereich der Extraktionsbrunnen lagen.

Aus den zuvor genannten Gründen waren Temperaturmessungen im Untergrund außerhalb des Sanierungsbereiches ein probates Mittel, um Temperaturabflüsse zu beobachten. Im Gegensatz zur Wärmeleitung kann ein advektiver Wärmetransport als Tracer verwendet werden, um Fließwege im Untergrund zu detektieren. Hierzu wurden an anderer Stelle bereits Untersuchungen durchgeführt (Dornstädter, 1992).

Im Rahmen der Installationsarbeiten für die Injektions- und Extraktionsbrunnen wurden am Standort daher 20 Messstellen (MM 1 bis MM 20) in direkter Nähe der Extraktionsbrunnen installiert (Abbildung 40). Für diese Messstellen wurde das bis über 100 °C temperaturbeständige Material Polyethylen (HDPE) mit einem Innendurchmesser von 1“ gewählt. Im grundwassergesättigten Bereich ab 8 m u. GOK

wurden die Messstellen verfiltert ausgebaut, in der darüber liegenden ungesättigten Zone bestanden sie aus Vollrohr.

In erster Linie waren diese Messstellen zur regelmäßigen Entnahme von Grundwasserproben vorgesehen, jedoch konnten sie aufgrund ihres Durchmessers auch sehr gut zur tiefenorientierten Temperaturbestimmung mittels Temperaturmessketten verwendet werden. Hierzu wurden in regelmäßigen zeitlichen Abständen entsprechende Messketten in die Messstellen eingebracht und dort für ca. 30 Minuten zum Temperaturgleich belassen (Abbildung 58).



**Abbildung 58: Messkette zur Temperaturmessung in Bohrlöchern und Messpegeln**

Mit einer Einbautiefe von 11 Metern und einem Abstand der einzelnen Messfühler von 0,5 m konnten die entscheidenden Temperaturbereiche des Untergrundes gut aufgelöst werden.

Es ist hierbei wichtig zu erwähnen, dass diese Art der Temperaturmessung im Vergleich zu den Messungen mit den direkt im Sanierungsfeld installierten Messfühlern sicherlich weniger exakt war. Dies ist vor allem durch die Konvektion in den

zur Messung verwendeten Messstellen zu erklären. Weiterhin kam es beim Einbau der Messketten in die Messstellen zu einer Verwirbelung des Standwassers in den jeweiligen Messstellen, welches zur Vermischung unterschiedlich temperierter Wasserschichten führte. Allerdings konnten selbst bei Berücksichtigung all dieser unerwünschten Effekte deutliche Temperaturdifferenzen an den einzelnen Messfühlern ermittelt werden.

Es muss an dieser Stelle deutlich gemacht werden, dass alle genannten Temperaturmessungen außerhalb des von den Extraktionsbrunnen begrenzten Bereiches lagen. Mit Hilfe dieser Messungen konnte daher keine direkte Aussage über die Temperaturentwicklung innerhalb des Sanierungsbereiches gemacht werden. Vor Beginn der Sanierung wurde nicht mit einer starken Erwärmung dieser Zone gerechnet. Da die Extraktionsbrunnen sowohl Bodenluft als auch Grundwasser aus einem annähernd radialsymmetrischen Bereich fördern, wurde mit einem Gradienten von den Messstellen zu den Extraktionsbrunnen hin gerechnet, der einen Energieaustrag aus dem Sanierungsfeld verhindern sollte. Wie die ersten Messungen zeigten, waren jedoch bald deutliche Temperaturanstiege in den Messstellen zu verzeichnen.

Um die Temperaturentwicklung außerhalb des Sanierungsfeldes weiträumiger verfolgen zu können, wurden im Laufe der Sanierung sieben zusätzliche Messstellen errichtet. Im Unterschied zu den Messstellen in direkter Umgebung der Extraktionsbrunnen wurden die im Anschluss installierten mit einem Direct-Push-Sondiergerät eingebracht. Die Messstellen bestanden aus Sondiergestänge mit einem Außendurchmesser von 1,5“. Der Innendurchmesser war mit 15,8 mm erheblich geringer als der der Messstellen aus Polyethylen (HDPE). Zudem waren sie nicht verfiltert und am unteren Ende mit einer Vollspitze abgedichtet. Hierdurch ergaben sich leicht veränderte Messbedingungen. Innerhalb weniger Tage trat durch die nicht abgedichteten Gewinde der Gestänge Grundwasser in die Messstellen ein, so dass diese ebenfalls bis zum Grundwasseranschnitt gefüllt waren, jedoch im Gegensatz zu den verfilterten Messstellen im Sanierungsbereich keiner dauerhaften Durchströmung mit Grundwasser unterlagen.

Im Verlauf der Sanierung kam es zur Versandung einiger weniger Messstellen in den tieferen verfilterten Bereichen. Dies hatte zur Folge, dass in den betroffenen Bereichen Messungen nicht mehr möglich waren.

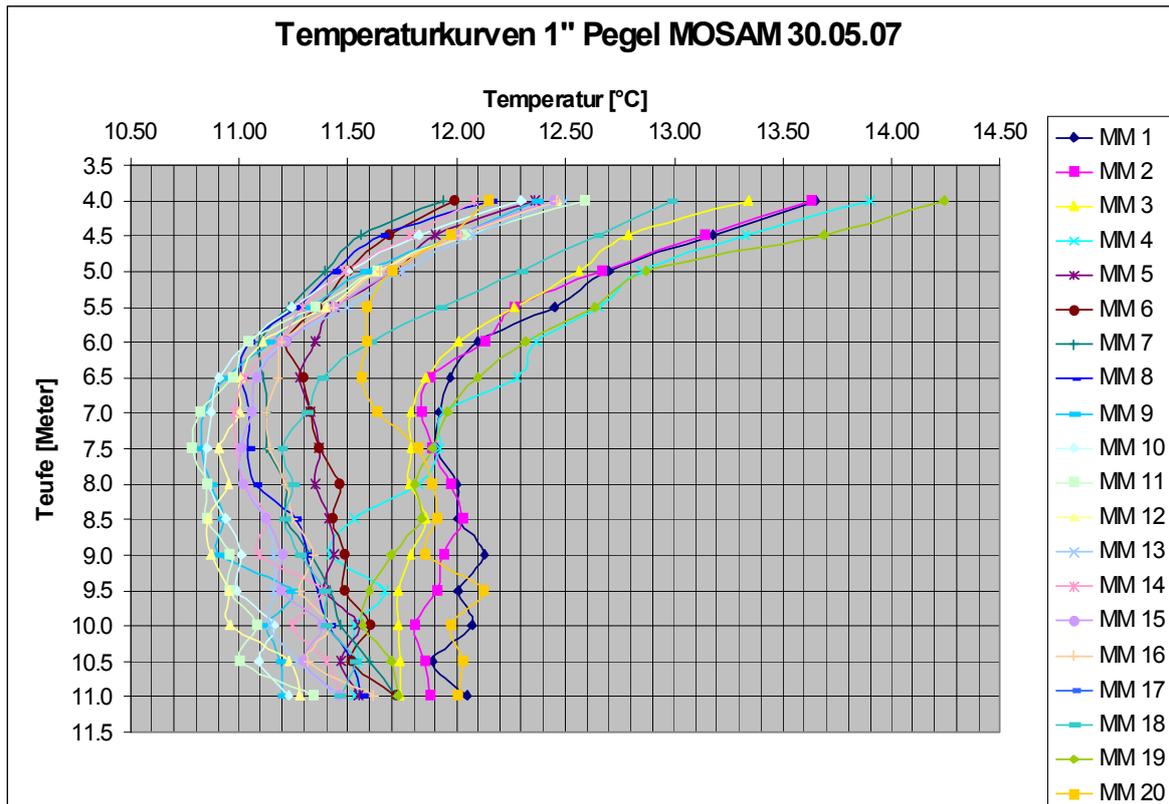
### **2-D Darstellung der Temperaturlausbreitung außerhalb des Sanierungsfeldes**

Wie Abbildung 59 zeigt, ist bereits vor Inbetriebnahme des thermischen Sanierungssystems ein eindeutiger Temperaturgradient mit zunehmender Tiefe hin im Untergrund zu verzeichnen. Wie die Messungen an den 20 im Bereich des Sanierungsfeldes installierten Messstellen zeigen, liegen die Temperaturen in den oberflächennahen Bereichen der ungesättigten Zone relativ hoch. Hier wurden Temperaturen in einer Tiefe von 4,0 m u. GOK von über 14 °C gemessen. Vor allem die Untergrundbereiche im Südosten des Sanierungsfeldes (MM 1 bis MM 4) weisen durchgehend erhöhte Temperaturen auf. Bis in eine Tiefe von 6,5 m u. GOK fallen in allen Messstellen die Temperaturen deutlich ab und erreichen eine Spannweite von 10,75 bis 12,25 °C. Zwischen 6,5 und 11,0 m u. GOK liegen die Temperaturen relativ konstant. Auffällig ist ein leichter Temperaturanstieg zwischen 9,0 und 11,0 m u. GOK. Hier liegt die Spannweite schließlich nur noch zwischen 11,25 und 12,0 °C.

Es fällt weiterhin auf, dass die Messungen vor Beginn der Sanierungsaktivitäten keine deutlichen Temperaturunterschiede im Übergangsbereich (Kapillarsaum) zwischen der gesättigten und ungesättigten Zone aufweisen. Meist ist hier eine deutliche Temperaturdifferenz festzustellen, da die natürliche Grundwasserströmung Einfluss auf das Temperaturgefüge im Untergrund hat. Weiterhin kommt es nach starken Niederschlagsereignissen zur Abkühlung oder Erwärmung der oberen Bodenschichten durch perkolierendes Regenwasser.

Der fehlende Temperatursprung zwischen gesättigter und ungesättigter Zone zeigt auch, dass die systematischen Messfehler durch Vertikalströmung bzw. Konvektion in den Messstellen zwischen ungesättigter und gesättigter Zone relativ gering sind. Hier wären sonst ausschließlich aufgrund der Messung in unterschiedlichen Medien Temperaturdifferenzen zu erwarten.

Die Messstellen MM 1 bis MM 4 zeigen auch in den tieferen Bereichen (6,5 bis 11,0 m u. GOK) die höchsten Temperaturen. Im Vergleich zu den Messungen in den oberflächennahen Bereichen (4,0 bis 6,5 m u. GOK) ist die Temperaturamplitude jedoch erheblich geringer.

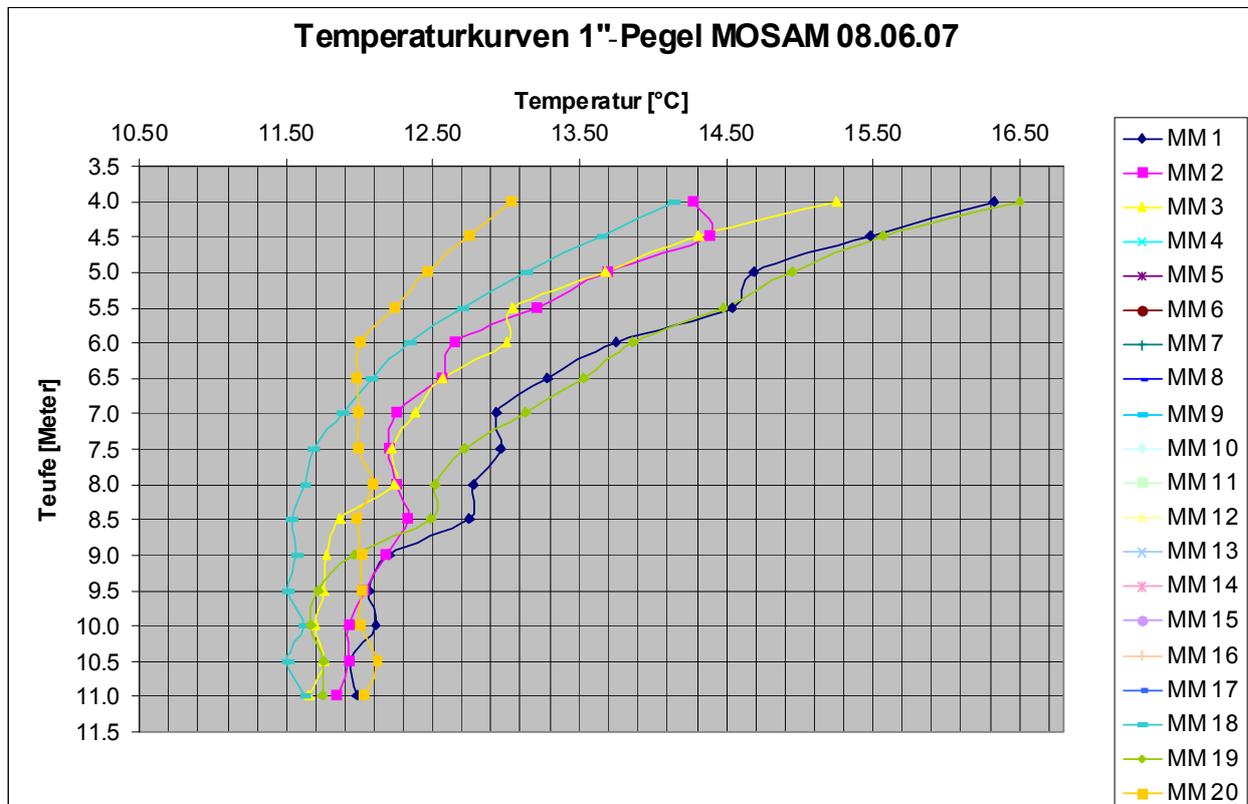


**Abbildung 59: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 30.05.07**

Auffällig bei der Betrachtung der Temperaturprofile in Abbildung 59 ist die schlechte Übereinstimmung der Messwerte der Messstelle MM 20 mit den benachbarten Messstellen MM 18 / 19 und MM 1 / 2. Die im oberen Abschnitt (bis ca. 7,5 m u. GOK) aufgezeichneten Temperaturen liegen deutlich unter denen der nur wenige Meter entfernten Messstellen. Da bei einer jeden Messung Messfehler, beispielsweise hervorgerufen durch defekte Sensoren, nicht ausgeschlossen werden können, wurde an den sich in unmittelbarer Nähe zur Messstelle MM 20 befindlichen Messstellen eine Wiederholungsmessung durchgeführt. Die Messstellen MM 1 bis 3 und MM 18 bis 20 wurden hierbei untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 60 dargestellt.

Bei Betrachtung der Temperaturverläufe der Messstellen MM 19 und MM 20 fällt deren sehr gute Übereinstimmung ähnlich der Messung am 30.05.07 auf. Die abgedeckte Temperaturspanne ist bei der Wiederholungsmessung deutlich höher und liegt mit einer maximalen Temperatur von 16,5 °C an MM 19 mit 2,25 °C über der der ersten Messung. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine thermische Sanierung betrieben wurde, kann die Temperaturerhöhung nur durch die zu dieser Jahreszeit höhere solare Einstrahlung erklärt werden. Diese Vermutung deckt sich auch mit den

im Vergleich zur ersten Messung konstanten Temperaturen in den Bereichen zwischen 8,0 und 11,0 m u. GOK.

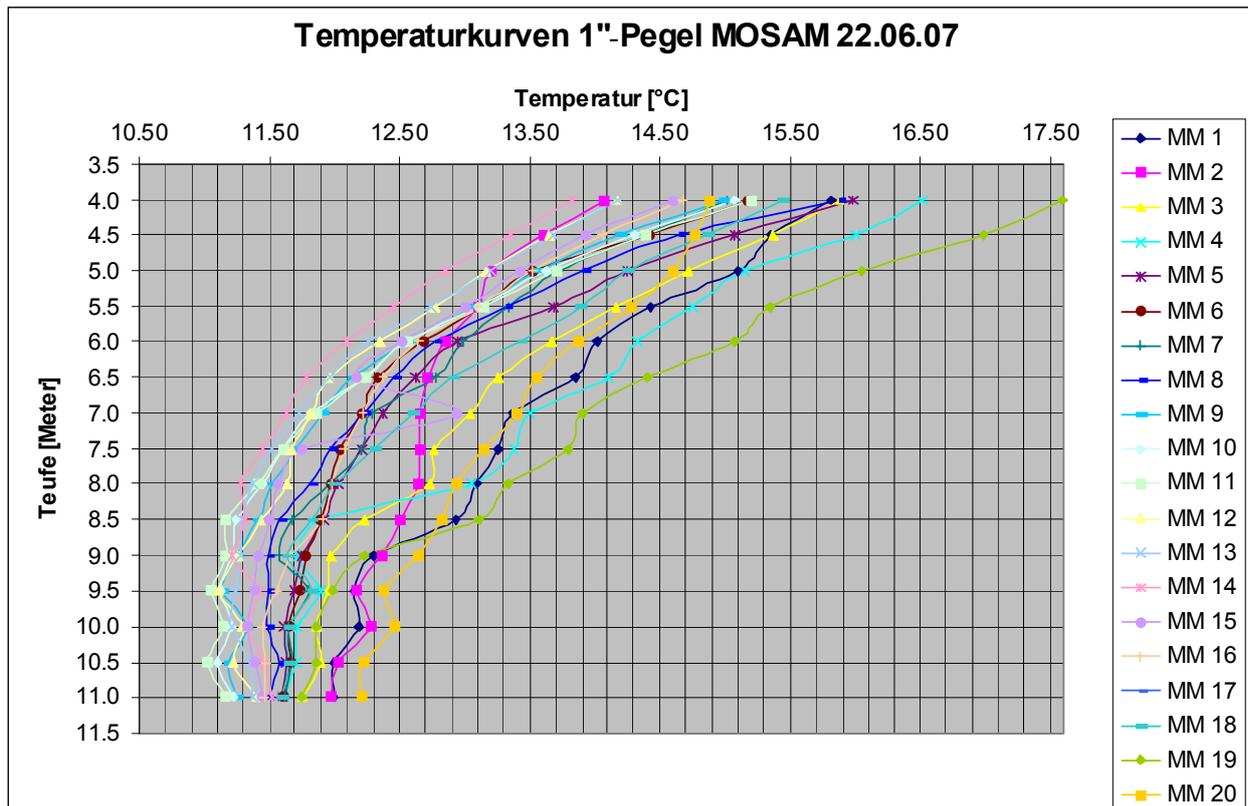


**Abbildung 60: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 08.06.07  
(Dargestellt nur MM 1 – 3 und MM 18 – 20)**

Der eigentliche Zweck dieser Wiederholungsmessung zielte jedoch auf die scheinbar abweichenden Messwerte der Messstelle MM 20. Hier brachte die Wiederholungsmessung erneut vergleichbare Messwerte. Die gemessenen Temperaturen liegen, wie auch die der anderen Messstellen, etwas oberhalb der der ersten Messung, der Trend ist jedoch derselbe. Die Temperaturanomalien der Messstelle MM 20 lassen sich nicht befriedigend erklären. Durch die Wiederholungsmessung unter Verwendung eines zweiten Messkettensatzes sollte zumindest jedoch ein systematischer Fehler auszuschließen sein.

Die in Abbildung 61 dargestellten Temperaturverläufe zeigen die Ergebnisse der Messungen von 22.06.07. Zwei Tage vor diesen Messungen, am 20.06.07, wurde mit der thermischen Sanierung durch Dampf-Luft-Injektion sowie dem Betrieb der im Untergrund eingebrachten elektrischen Heizlanzen begonnen. Da sich die beschriebenen Messstellen außerhalb der eigentlichen Sanierungskubatur befinden, ist mit keinem Einfluss der thermischen Sanierung auf die Untergrundtemperaturen in diesem Bereich zu diesem Zeitpunkt zu rechnen.

Abbildung 61 zeigt auffällig die zunehmende Erwärmung des Untergrundes durch die in den Sommermonaten stärkere solare Einstrahlung. Im oberflächennahen Bereich ergeben sich hieraus Temperaturen zwischen 13,75 und 17,50 °C. Im Vergleich zur Messung am 30.05.07 zeigt sich eine deutlich stärkere Durchwärmung der tieferen Bereiche. Annähernd konstante Temperaturen sind in den Messstellen nun nicht bereits ab ca. 7,0 m, sondern erst ab 9,0 m u. GOK erkennbar.



**Abbildung 61: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 22.06.07**

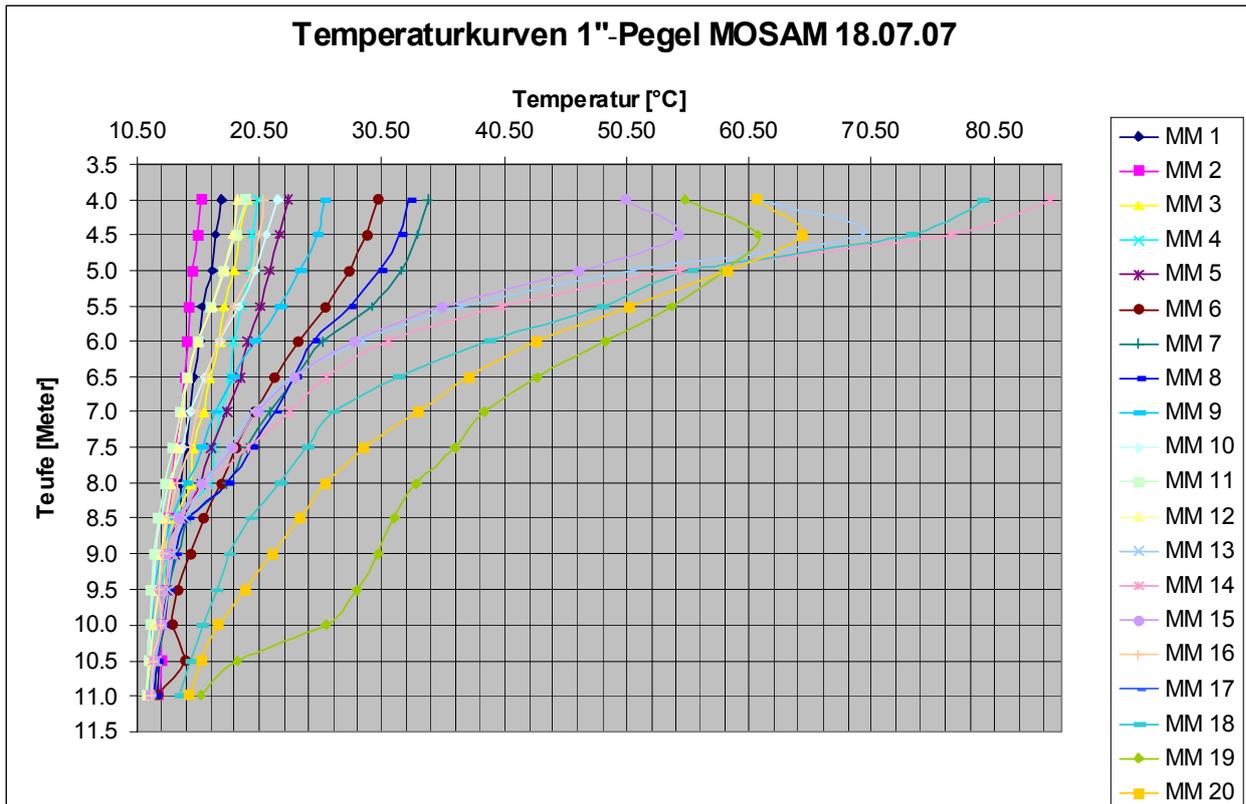
Die Betrachtung der Temperaturentwicklung im Bereich des Sanierungsfeldes vor Sanierungsbeginn ist vor allem wichtig, um die natürlichen Erwärmungsprozesse von induzierten unterscheiden zu können. Auch wenn die natürlichen Temperaturänderungen im Vergleich zu denen, die durch die Dampf-Luft-Injektion hervorgerufen werden, relativ gering sind, so ist zu beachten, dass durch die Geometrie des Sanierungssystems von bereits geringen Temperaturänderungen außerhalb des Sanierungsfeldes auf erheblich größere Temperaturänderungen innerhalb des Feldes zu schließen ist.

Der Vergleich der Messstellen MM 1 und MM 2 in Abbildung 61 zeigt eine deutlich unterschiedliche Erwärmungscharakteristik auf. Auch in Bezug zu den benachbarten Messstellen MM 3 und MM 4 findet an MM 2 eine geringere Erwärmung statt. Die bisher durch eine Anomalie auffallende Messstelle MM 20 fügt sich bei dieser

Messung weiterhin nicht in das Gesamtbild der Temperaturverläufe bei benachbarten Messstellen ein, jedoch sind die Temperaturdifferenzen geringer als zuvor. Die Messstelle MM 19 zeigt in geringer Tiefe eine deutlich stärkere Erwärmung und liegt in 4 m u. GOK mit einer Temperatur von 17,5 °C deutlich über den anderen Messstellen in dieser Tiefe.

Auffällig beim Temperaturmonitoring vor Beginn des thermischen Sanierungsprozesses sind die hierbei außergewöhnlich hohen gemessenen Temperaturen. Wie Erfahrungen aus vielen an anderen Standorten durchgeführten Messungen der Region zeigen, liegen die Temperaturen in den Frühlings- und Sommermonaten um mehrere Grad unterhalb denen, die am Standort zeitlich gemessen wurden. Eine Erklärung für die hohen Temperaturen in der gesättigten Zone könnten die geringen Grundwasserströmungen vor Ort sein, die für einen geringen Abtransport von wärmerem Grundwasser sorgen.

Da aus Untersuchungen im Bereich des Standortes umfangreiche Erkenntnisse aus Betrachtungen zum natürlichen Schadstoffabbau durch mikrobiologische Vorgänge vorliegen (Gödeke, 2004), ist auch im Bereich der Sanierungskubatur mit mikrobiologischem Abbau der Schadstoffe zu rechnen. Wie bisherige Ergebnisse zeigen, kommt es bei vielen dieser Abbauvorgänge durch mikrobiologische Aktivität zu Temperaturerhöhungen im Untergrund. Dies trifft sowohl für die gesättigten wie auch ungesättigten Bereiche zu. Da mit der natürlichen Erwärmung des Untergrundes in den Frühlings- und Sommermonaten auch die mikrobiologische Aktivität erhöht wird, kann es zum Aufbau eines sich selbstverstärkenden Systems kommen, das eine temperaturerhöhende Wirkung auf den Untergrund am Standort haben könnte. Wie Untersuchungen (u. a. Vieth *et al.*, 2005) zeigen, ist der mikrobiologische Abbau vor allem in den Randbereichen von Schadstofffahnen relativ hoch. Eine zu hohe Schadstoffkonzentration wie im Bereich der Schadstoffquelle selbst, lässt meist den Aufbau größerer mikrobiologischer Populationen nicht zu. Verschiedene Labor- sowie Feldversuche zeigten jedoch, dass selbst bei maximalem natürlichem Schadstoffabbau nicht mit einer Temperaturerhöhung von mehr als 1 °C gerechnet werden kann. Der mikrobiologische Schadstoffabbau kann somit nicht zur Erklärung der hohen Untergrundtemperaturen herangezogen werden.



**Abbildung 62: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 18.07.07**

Mit dem Beginn der thermischen Sanierung am 20.06.08 konnte keine direkte Temperaturreaktion an den Messstellen außerhalb des Sanierungsbereiches erwartet werden. Die Messung am 18.07.08 (Abbildung 62), also rund einen Monat nach Sanierungsbeginn, zeigt hingegen bereits deutliche Auswirkungen. Die bis zur Messung durchgeführte Dampf-Luft-Injektion wurde ausschließlich in der ungesättigten Zone vorgenommen. Zeitgleich wurden die elektrischen Heizlanzen betrieben, bis der von ihnen erzeugte Wirkungsradius von der sich ausbreitenden Dampf-Front erreicht wurde. Die Ergebnisse der Temperaturmessungen in den 20 Monitoringmessstellen zeigten eine ausgesprochen deutliche Reaktion. Vor allem in den oberflächennahen Bereichen traten Temperatursprünge von bis zu 65 °C im Vergleich zur letzten Temperaturmessung auf. Die Messstellen MM 9, MM 14, MM 15, MM 18, MM 19, MM 20 lagen in einer Tiefe von 4,5 m u. GOK alle über einer Temperatur von 50 °C. Alle anderen Messstellen zeigten in dieser Tiefe erheblich geringere Temperaturen von maximal 32 °C. Vergleicht man die Positionen der Messstellen auf dem Lageplan (Abbildung 40), so fällt auf, dass die besonders erwärmten Bereiche im Nordwesten, Südosten und Westen des Sanierungsfeldes liegen. Dies ist vor allem durch die vorrangige Nutzung der Injektionsbrunnen I1 und I2 zu erklären, die in der Nähe dieser Messstellen liegen. Auffällig ist die geringe Erwärmung der Messstellen MM 1 bis MM 4, welche zuvor immer die deutlich höchsten Temperaturen aufgewiesen hatten. Aufgrund von hohen Injektionsdrücken

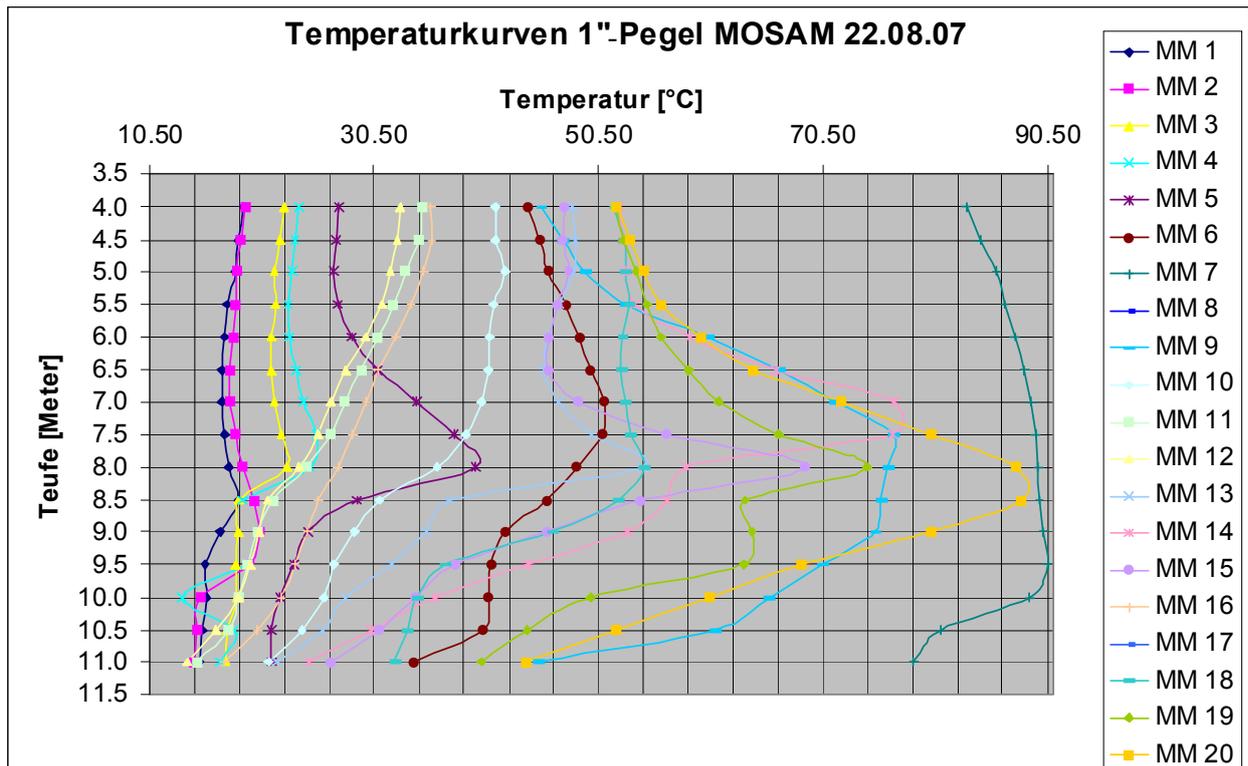
am Injektionsbrunnen I1 konnte auf eine geringere hydraulische Durchlässigkeit in der Umgebung dieses Brunnens im direkten Vergleich zur den Injektionsbrunnen I2 und I3 geschlossen werden. Dies ist mit großer Sicherheit auch ursächlich für die geringe Erwärmung im nordöstlichen Teil des Sanierungsfeldes. Die Temperaturmessungen mit den in diesem Bereich fest installierten Temperaturmessfühlern zeigten ein ähnliches Bild (s. Kapitel 9).

Die starke Erwärmung der zuvor unter diesem Aspekt unauffälligen Messstellen lässt eindeutig auf den Einfluss der thermischen Sanierung schließen. Eine natürliche Erwärmung in diesem Umfang in einer Tiefe von 4,5 m u. GOK ist auszuschließen.

Mit zunehmender Tiefe nimmt die Beeinflussung durch die thermischen Verfahren in der ungesättigten Zone deutlich ab. In der gesättigten Zone zeigen nur die Messstellen MM 18, MM 19 und MM 20 noch eine Reaktion, die übrigen bleiben ohne bemerkenswerte Temperaturänderung. Die Erwärmung der ungesättigten Zone im Südosten des Sanierungsfeldes ist wiederum durch die hydraulisch geringen Durchlässigkeiten im Bereich des Injektionsbrunnen I1 zu erklären. Das injizierte Dampf-Luft-Gemisch kann sich hier nicht auf dem direkten Weg zu den nächstgelegenen Extraktionsbrunnen ausbreiten und infiltriert dadurch auch tiefer liegende Bereiche der Messstellen MM 18, MM 19 und MM 20.

Die übrigen Messstellen zeigen in der ungesättigten Zone ebenfalls eine Reaktion auf die bis zur Temperaturmessung annähernd vier Wochen andauernde Dampf-Luft-Injektion. Wie bereits erwähnt, liegt die Erwärmung auf 15 °C bis 25 °C aber deutlich niedriger als bei den oben erwähnten Messstellen. Mit zunehmender Tiefe fallen bei allen Messstellen die Temperaturen rapide ab. In den tiefsten Bereichen der Messstellen bei 11 m u. GOK ist kein Einfluss durch das Sanierungsmittel mehr festzustellen. Die Temperaturen liegen hier auf dem Niveau der Messung vom 22.06.07.

Die im Rahmen der Messstellenerweiterung im Außenbereich des Sanierungsfeldes zusätzliche bis in eine Tiefe von 12 Metern eingebauten 1,5“-Direct-Push-Sondiergestänge sind in Abbildung 63 nicht aufgeführt. Die Gestänge wurden außerhalb der Umzäunung des Sanierungsfeldes eingebaut (Abbildung 40) und weisen damit den größten Abstand zum thermisch beeinflussten Bereich auf. Aufgrund dieser Distanz konnte bei den Messungen kein erhöhter Temperaturwert aufgezeichnet werden. Die maximale Temperatur lag mit rund 15,5 °C im Bereich der natürlichen Hintergrundwerte auf diesem Gelände, wenn man die saisonale Erwärmung durch Sonneneinstrahlung mit einbezieht.



**Abbildung 63: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 22.08.07**

Die zweite Temperaturmessung nach Beginn der thermischen Sanierung zeigt eine vollkommen andere Charakteristik als die zuvor durchgeführte. Am 22.08.07 war die Sanierungsanlage rund zwei Monate lang in Betrieb gewesen. Die erste Phase der Dampf-Luft-Injektion beschränkte sich ausschließlich auf die ungesättigte Zone. Die Auswirkung dieser Injektion auf die Untergrundtemperaturen geht in Abbildung 62 deutlich aus den Änderungen in den Bereichen oberhalb 8m u. GOK hervor.

In Abbildung 63 werden Überlagerungseffekte durch Injektionen in die ungesättigte sowie in die gesättigte Zone deutlich. Ab Anfang August 2007 wurde die Injektion in die ungesättigte Zone vorübergehend eingestellt. Gleichzeitig wurde mit der Injektion in die gesättigte Zone begonnen. Eine deutliche Erwärmung der tieferen Bereiche zwischen 6,0 und 11,0 m u. GOK ist nun erkennbar.

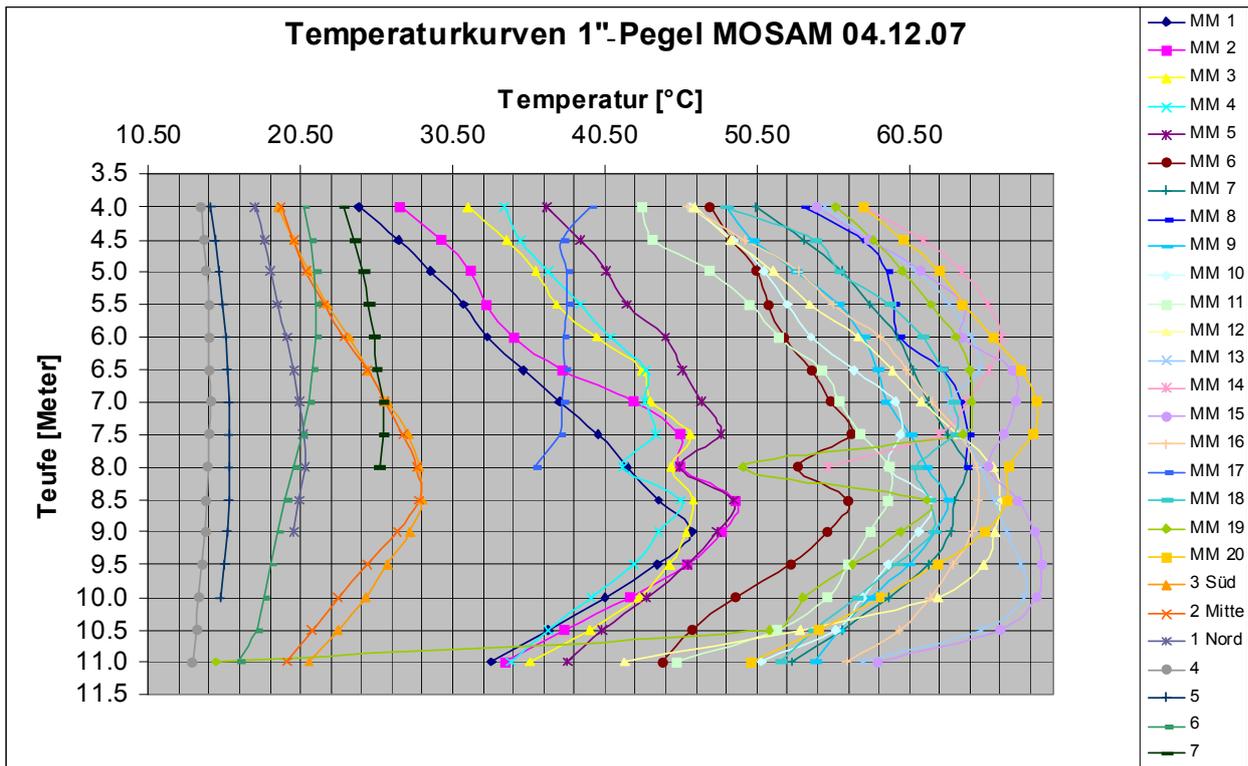
Bei der Betrachtung der Temperaturprofile aus den Messungen an Messstellen außerhalb des Sanierungsbereiches ist zu beachten, dass von diesen nicht grundsätzlich auf die Temperaturverhältnisse innerhalb der Sanierungskubatur geschlossen werden kann. Durch die aktive Grundwasserhaltung und die Bodenluft- und Grundwasserextraktion entsteht ein komplexes Gefüge von Gradienten mit unterschiedlichen Fließrichtungen auf sehr begrenzter Fläche. Bemerkenswert ist daher um so mehr, dass die in den einzelnen Sanierungsabschnitten angesteuerten Injektionsauslässe eine überaus deutliche Auswirkung auf die Temperaturen in den

Messstellen haben, die einen der Dampfausbreitung durch die Extraktionsbrunnen aufgebauten, gegenläufigen Gradienten besitzen.

Abbildung 63 zeigt nach einer Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone über die Dauer von ca. drei Wochen eine Erwärmung der gesättigten Zone außerhalb des Sanierungsbereiches. Vor allem die Messstellen im südlichen Bereich des Feldes wurden im Grundwasseranschnitt bei ca. 8,0 m u. GOK deutlich erwärmt. Auffällig ist hierbei, dass der Bereich mit der größten Erwärmung im Vergleich zu den Temperaturmessungen mit fest installierten Messfühlern nicht in gleicher Tiefe liegt (vgl. Abbildung 46). Die Injektionsauslässe für die gesättigte Zone liegen in einem Bereich zwischen 10,0 und 11,0 m u. GOK. Hier findet die schnellste Erwärmung statt und die durchgehend höchsten Temperaturen werden in diesem Bereich im Inneren des Feldes gemessen. Die starke Erwärmung in der Zone des Grundwasseranschnittbereiches ist hier wahrscheinlich durch eine höhere hydraulische Durchlässigkeit und die Ausbildung von präferentiellen Fließpfaden zu erklären. Ein Temperaturübergang in die ungesättigte Zone ist sicherlich nur in begrenztem Maß vorhanden. Da außerhalb des Sanierungsfeldes keine aktive Dampfausbreitung erfolgt, findet die Temperaturausbreitung hier größtenteils über Wärmetransport im Aquifermaterial und Konvektion im Grundwasser statt.

Die im Vergleich zur letzten Messung gestiegenen Temperaturen in einer Tiefe zwischen 4,0 und 8,0 m u. GOK sind durch die Restwärme der Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone in der vorausgegangenen Sanierungsphase zu erklären. Wie auch die Temperaturmessungen innerhalb des Sanierungsfeldes gezeigt haben, (Abbildung 48) findet hier eine recht schnelle Auskühlung statt, da die Wärmekapazität der Bodenluft deutlich unter der des Grundwassers liegt. Weiterhin kommt es durch die Infiltration von Niederschlagswasser zu einer Abkühlung der oberflächennahen Bereiche.

Die Temperaturentwicklung in den Sondiergestängen, die weiter entfernt vom Sanierungsfeld installiert wurden, zeigte zu diesem Zeitpunkt des Temperaturmonitoring keinen eindeutigen Zusammenhang mit den Vorgängen im Zentrum oder in direkter Nähe der Sanierungskubatur. Es fand hier eine Erwärmung um bis zu 3 °C im oberen Teil der Sondiergestänge statt. Im unteren Teil stiegen die Temperaturen um ca. 1 °C. Diese Erwärmung ist durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Metalls der Sondiergestänge erklärbar. Ob der Temperaturanstieg durch solare Einstrahlung oder bereits durch eine sich aus dem Sanierungsfeld herausbildende Temperaturfahne verursacht wurde, kann abschließend nicht geklärt werden.



**Abbildung 64: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 04.12.07**

Die in Abbildung 64 gezeigten Temperaturverläufe zeigen Messungen, die in der Abkühlphase der Sanierung vorgenommen wurde. Bis Ende Oktober 2007 wurde in verschiedenen Phasen die gesättigte sowie ungesättigte Zone der Sanierungskubatur mittels Dampf-Luft-Injektion behandelt. Nach mehr als einem Monat andauernder Abkühlphase wiesen alle 20 Messstellen in direkter Nähe des Sanierungsfeldes wie auch die in größerem Abstand installierten Messstellen aus Direct-Push-Sondiergestänge durchgehend deutlich erhöhte Temperaturen auf. Die Temperaturmaxima wurden an den Messstellen MM 15 und MM 20 mit etwa 69 °C in einer Tiefe von 9,5 bzw. 7 m u. GOK aufgezeichnet. Diese Werte lagen damit unter den während der aktiven Sanierung aufgezeichneten Temperaturen von über 90 °C.

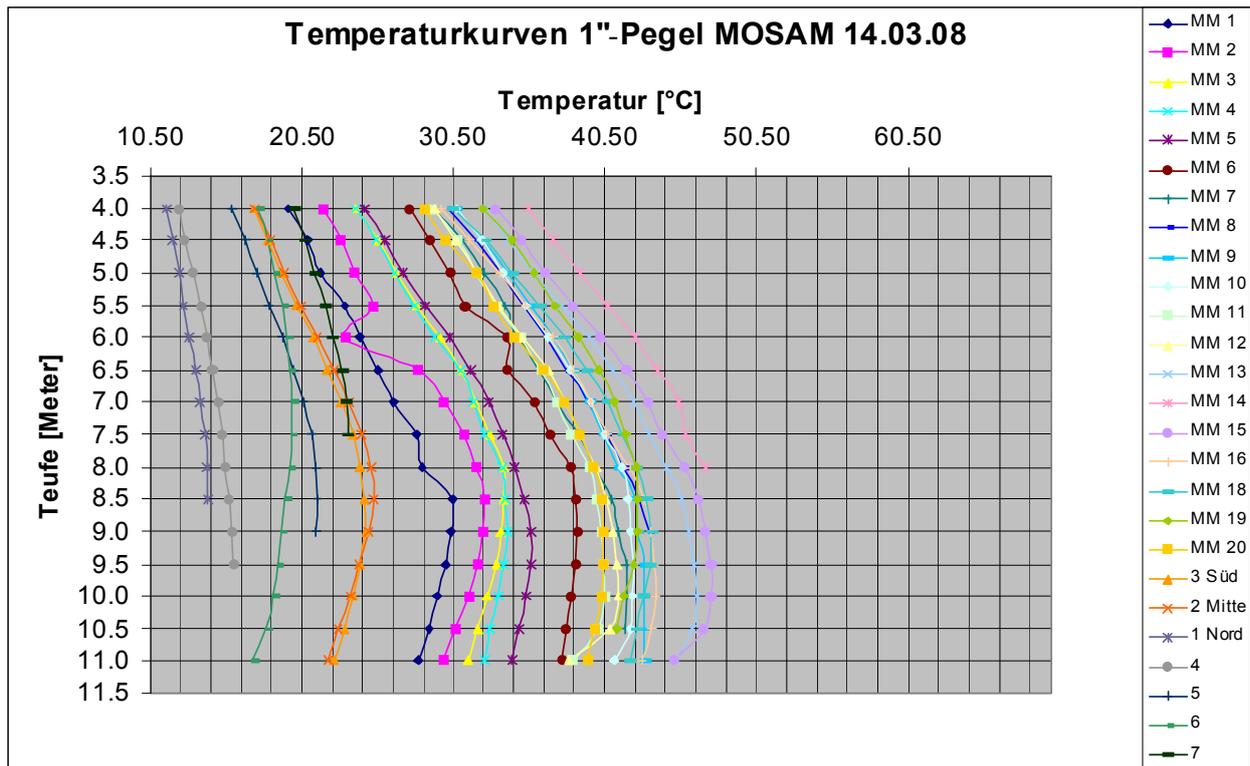
Abbildung 64 zeigt eine deutlich homogenere Temperaturverteilung als die zuvor durchgeführten Messungen. Nach Ende der aktiven Sanierung wurde die Bodenluft-Extraktion noch für einen Zeitraum von vier Wochen weiter betrieben, um eine Abkühlung des Untergrundes zu beschleunigen. Nachdem auch diese aktive Abkühlung eingestellt wurde, fand eine natürliche Homogenisierung der Temperaturverhältnisse innerhalb der Sanierungskubatur statt. Durch die nun fehlenden künstlich aufgebauten Gradienten konnte sich die im Untergrund gespeicherte Wärme leicht über die Grenzen des Sanierungsfelds ausbreiten. Der Wärmetransport fand in der gesättigten und ungesättigten Zone in Form von Wärmeleitung und

Konvektion statt. Dies bewirkte eine stetige Abkühlung im Kern der Kubatur und durch den Energieabfluss eine Erwärmung des Umfeldes.

Es tritt nun auch eine deutliche Erwärmung der in größerem Abstand zum Sanierungsfeld liegenden Messstellen aus Sondiergestänge auf. Die Temperaturen steigen hier zum Teil auf über 28 °C an, was eindeutig auf die Ausbildung einer Temperaturfahne schließen lässt. Die Messstelle 4 mit der größten Distanz zum Sanierungsfeld weist den kleinsten Temperatureinfluss auf.

Die Messstellen MM 1 bis MM 5 zeigen ein ähnliches Verhalten wie im Laufe der aktiven Sanierung. Die hier gemessenen Temperaturen liegen zwischen 10 °C und 20 °C unterhalb der übrigen Messstellen. Hieraus lässt sich schließen, dass dieser Bereich während der Sanierung die geringste Erwärmung erfahren hat. Dies geht wiederum konform mit den durch schlechte hydraulische Durchlässigkeit hervorgerufenen hohen Injektionsdrücken.

Ein Großteil der Messstellen zeigt im Bereich des Grundwasseranschnitts deutliche Temperaturanomalien. In diesem Bereich scheint der größte Wärmeabfluss stattgefunden zu haben. Dieser Effekt kann durch eine schnellere Auskühlung der Grundwasseroberfläche im Vergleich zu dem darunter liegenden Grundwasserkörper und der darüber liegenden ungesättigten Zone erklärt werden. Ein entgegengesetzter Effekt wird bei Betrachtung der Abbildung 63 deutlich. Hier findet in der angesprochenen Tiefe eine stärkere Erwärmung statt. Als ursächlich hierfür wird die zwischen 7,0 und 8,0 m u. GOK liegende Schluffschicht vermutet, die in der ungesättigten Zone eine hydraulisch gering durchlässige Schicht darstellt. Hier kommt es zum Anstau des aus der gesättigten Zone aufsteigenden Dampfes und einer damit verbundenen stärkeren Erwärmung. Aufgrund der geringeren Wärmekapazität des ungesättigten Materials kann in diesem Bereich andererseits eine schnellere Auskühlung erfolgen als in der gesättigten Zone.



**Abbildung 65: Temperaturmessungen im Außenbereich des Sanierungsfeldes am 14.03.08**

Abbildung 65 zeigt die Temperaturverläufe in allen Messstellen außerhalb des Sanierungsbereiches nach mehrmonatiger Auskühlungsphase. Die nachträglich eingebrachten „Direct-Push-Messstellen“ 1 bis 7 sind ebenfalls dargestellt. Im Umfeld der sanierten Kubatur liegen die Temperaturen deutlich höher als erwartet. Die Messungen im Sanierungsfeld bestätigen dies (s. Kapitel 9). Wie auch Erfahrungen bei vergleichbaren thermischen Sanierungen zeigten, ist die Geschwindigkeit der Abkühlung von verschiedenen Faktoren abhängig (Trötschler *et al.*, 2006). Zum Einen ist das Volumen der sanierten Kubatur von Bedeutung. Je größer die erhitzte Kubatur, desto größer ist ihr thermischer Energieinhalt. Die hydraulische Durchlässigkeit des Untergrundmaterials und der Anteil der gesättigten Zone an der Gesamtkubatur haben ebenfalls entscheidenden Einfluss auf den Auskühlungsvorgang. Die lokalen Grundwasserfließverhältnisse sind die an diesem Standort sicherlich bestimmenden Faktoren. Da die lokalen Abstandsgeschwindigkeiten mit bis zu  $3 \times 10^{-7}$  m/s sehr gering sind und eine große Energiemenge durch die hohe Wärmekapazität des gesättigten Bereiches im Untergrund gespeichert ist, können nach mehr als vier Monaten Abkühlungsphase noch Temperaturen von 45 °C in einigen Messstellen außerhalb des Sanierungsfeldes gemessen werden. Die Temperaturen innerhalb des Feldes liegen entsprechend höher (s. Kapitel 9).

Die relative Temperaturverteilung bei der Messung vom 14.03.08 entspricht den Erwartungen. Die gesättigte Zone weist durch ihre große Wärmekapazität durchweg

höhere Temperaturen auf. Die Temperaturmaxima liegen hierbei nicht direkt auf gleicher Höhe mit dem Auslässen der Dampf-Luft-Injektionsbrunnen. Da die Messungen außerhalb des Sanierungsbereiches stattfinden, ist dies auch zu erwarten, denn das injizierte Dampf-Luft-Gemisch hat durch seine geringere Dichte die Tendenz aufzusteigen und erreicht daher eher die über den Auslässen befindlichen Bereiche als die darunter liegenden. Wie zu erwarten, nimmt die Temperatur in den Messstellen mit ihrer Entfernung zum Sanierungsfeld ab. Die nordöstlich des sanierten Bereiches liegenden Messstellen zeigen - wie zuvor - auch bei dieser Messung die niedrigsten Temperaturen. Dies ist auf die geringe hydraulische Durchlässigkeit und damit geringere Erwärmung zurückzuführen.

Von entscheidender Bedeutung bei der Betrachtung der an den Messstellen erfassten Temperaturprofile ist, wie bereits erwähnt, die Tatsache, dass diese außerhalb des Sanierungsbereiches liegen und während der Sanierung eigentlich hydraulisch und damit auch thermisch, von den Vorgängen im Sanierungsfeld abgekoppelt sein sollten.

### ***Energiebilanzierung***

Die hohen Temperaturen, die während der aktiven Sanierung außerhalb des Sanierungsfeldes erfasst wurden, weisen auf einen sehr hohen Energieaustrag aus dem Sanierungsfeld in den unkontaminierten Bereich hin. Diese Beobachtung wird durch eine vom Betreiber der Sanierungsanlage erstellte Energiebilanz gestützt. Diese Berechnung zeigt, dass ein Energieverlust an die Außenbereiche von ca. 63 % vorliegt. Das bedeutet, dass dieser Energieanteil zur Sanierung des Feldes nicht nötig gewesen wäre, oder anders formuliert, dass mit einer optimierten Anlagengeometrie die Sanierung erheblich schneller und damit kostengünstiger hätte ablaufen können. Eine solche Bewertung im Anschluss an die Sanierung lässt sich relativ leicht aufstellen. Aufgrund von Inhomogenitäten und Anisotropien im Untergrund ist eine exakte Planung der optimalen Positionen für die Sanierungsbrunnen jedoch im Voraus nicht möglich. Durch die komplexen lokalen Untergrundbedingungen trifft dies vor allem auf die Anwendung an diesem Standort zu.

Abbildung 45 (Kap. 9) zeigt den Verlauf der Temperaturentwicklung sowie den Energieeintrag und -inhalt innerhalb des Sanierungsfeldes. Bis zum Ende der Dampf-Luft-Injektion wurde demnach ein Betrag von 333 MWh an thermischer Energie in die Sanierungskubatur eingebracht. Der durch die elektrisch betriebenen Heizelemente beigetragene Anteil liegt bei 9,9 MWh. Bis zum Ende der aktiven Erwärmung (Phase 3) wurden über die kontinuierlich betriebene Bodenluftextraktion 53 MWh und

über die Grundwasserhaltung 15 MWh an thermischer Energie wieder entzogen. Zum Ende der Sanierungsphase 3 ergibt sich daraus ein theoretischer Energieinhalt der Sanierungskubatur von 265 MWh. Durch die Bodenluft- und Grundwasserextraktion wurden somit 21% der injizierten Wärmemenge dem Sanierungsfeld wieder entzogen.

Eine Abschätzung des Betreibers der Sanierungsanlage geht von einer sanierten Kubatur mit einem Volumen von  $1500 \text{ m}^3$  aus, die auf eine mittlere Temperatur von  $85 \text{ °C}$  erwärmt wurde. Bei einer mittleren Dichte von  $1,87 \text{ t/m}^3$  und einer mittleren Porosität des Untergrundes von 0,3 ergibt sich hieraus bei Annahme eines Sättigungsgrades von 0,8 eine Masse von 2805 t Bodenmaterial zuzüglich 360 t an Grund- und Porenwasser. Diese Masse trägt bei einer Erwärmung von  $10 \text{ °C}$  auf  $85 \text{ °C}$  einen zusätzlichen theoretischen Energieinhalt von 54 MWh (Annahme von spez. Wärmekapazitäten von  $4,18 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$  für Wasser und  $0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$  für den Feststoff/ Boden). Da rund 333 MWh an thermischer Energie eingebracht wurden, wobei 68 MWh durch Extraktionen wieder entfernt wurden, ergibt sich hieraus eine Verlustdifferenz von 211 MWh. Diese Energiemenge (63 %) wurde über die Grenzen der Sanierungskubatur hinausgetragen (Trötscher *et al.*, 2008). Das oben beschriebene Temperaturmonitoring konnte diesen Prozess verfolgen und die Haupteintragsbereiche während der verschiedenen Sanierungsphasen dokumentieren.

Das Einsparpotential bei zukünftigen Anwendungen einer vergleichbaren thermischen Sanierung ist erheblich. Bei Betrachtung der Gestehungskosten für die Energieerzeugung ausschließlich für die Dampf-Luft-Injektion ergeben sich am Standort Zeitz Kosten von ca. 70 EUR/MWh. Bei einer optimal konzipierten Anlage die einen theoretischen Energieverlust durch Wärmeabgabe an den Außenbereich von 0 MWh hätte, ergibt sich somit ein Einsparpotential von über 50 % bei den Energiekosten.

### 3-D Darstellung der Temperaturousbreitung außerhalb des Sanierungsfeldes

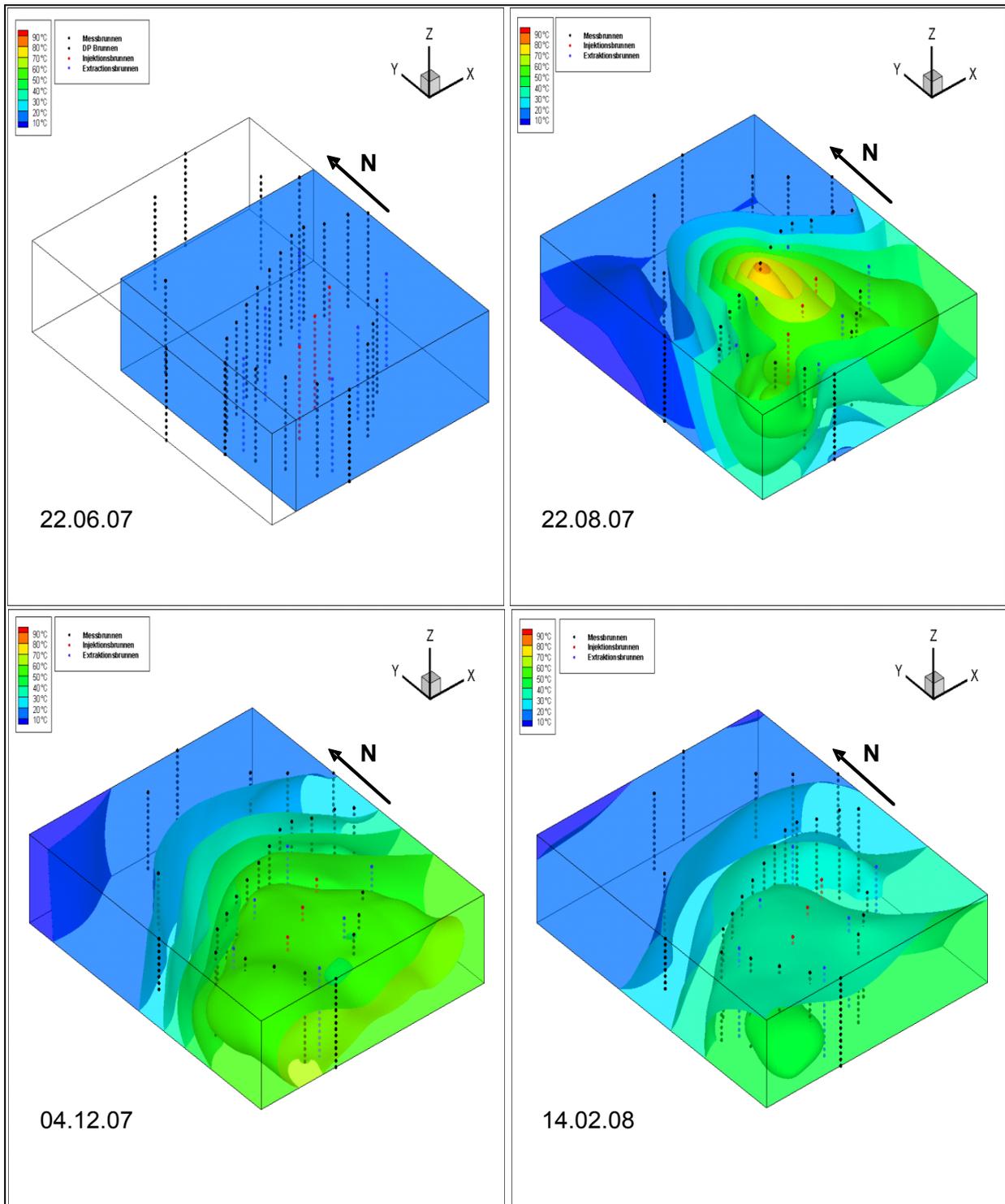


Abbildung 66: 3-dimensionale Darstellung der Temperaturousbreitung im Untergrund im Verlauf der thermischen Sanierung durch Temperaturmessungen außerhalb des Sanierungsbereiches

Die 2-dimensionale Darstellung des während der Sanierung durchgeführten Temperaturmonitorings erlaubte eine genaue Beurteilung der Temperaturentwicklung in den jeweiligen Tiefenhorizonten durch die eingesetzten Messketten. Bei einem Sensorabstand von 0,5 Metern war die räumliche Auflösung für diese Anwendung ausreichend.

Eine schnellere, wenn auch nicht so genaue Interpretation der Wärmeausbreitung außerhalb des Sanierungsbereiches konnte mit Hilfe einer 3-dimensionalen Darstellung definierter Temperaturfronten erzielt werden. Hierbei stand nicht die absolute Temperaturänderung im Vordergrund, sondern die relative Ausbreitungsrichtung der verschiedenen Temperaturfronten. Die Darstellungen in Abbildung 66 umfassen den gesamten Zeitraum der aktiven Sanierung sowie die Abkühlungsphase. Die einzelnen Messstellen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht ausgewiesen. Für die Abstufung der Temperaturfronten wurden jeweils 10 °C gewählt. Diese Abstufung sorgte für eine gute Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen über das gesamte Monitoring hinweg, auch wenn es keine exakte Temperaturbestimmung an den einzelnen Messstellen erlaubte.

Die innerhalb des Sanierungsfeldes dargestellten Temperaturzonen sind durch Interpolation der Messwerte der sich außerhalb befindlichen Messstellen entstanden. Somit ist dieser Teil der Darstellung nicht repräsentativ für die wahren Vorgänge in diesem Bereich. Wie die Messungen mit fest installierten Temperaturmessfühlern zeigten (Kapitel 9), lagen die Temperaturen hier deutlich oberhalb der in Abbildung 66 dargestellten. Gerade im Bereich der Injektionsbrunnen wurde während der Dampf-Luft-Injektion mit einer Temperatur von über 100 °C gerechnet. Dies wird in Abbildung 66 nicht wiedergegeben.

Die Darstellung zur Messung vom 22.06.07 in Abbildung 66 zeigt im gesamten Bereich außerhalb der Sanierungskubatur Temperaturen zwischen 10 und 20 °C. Zu diesem Zeitpunkt waren die weiter entfernt liegenden Messstellen aus Sondiergestänge noch nicht installiert. Zur räumlichen Orientierung sind diese mit abgebildet. Da die im August 2007 dort gemessenen Temperaturen auch in einer Temperaturspanne zwischen 10 und 20 °C lagen, ist zu vermuten, dass die Temperaturen im Juni 2007 einen ähnlichen Bereich abdeckten. Der Beginn der Dampf-Luft-Injektion lag mit dem 20. Juni 2007 nur zwei Tage vor dieser Temperaturmessung, daher ist an keiner der Messstellen eine Temperaturerhöhung zu verzeichnen.

Die Ergebnisse der Temperaturmessung vom 22.08.07 zeigen im Vergleich zu der zwei Monate zurückliegenden Messung ein deutlich ausgeprägtes Bild der neuen, durch die Dampf-Luft-Injektion hervorgerufenen Temperaturverteilung. Eine

Messstelle im Nordwesten des Messbereiches weist maximale Temperaturen zwischen 80 und 90 °C auf. Es ist in dieser Abbildung eine deutliche Ausbildung von drei kanalartigen Strukturen erkennbar, in denen die stärksten Wärmeabflüsse stattfinden. Diese liegen im Norden sowie im Südwesten und Südosten des Bereiches um das Sanierungsfeld. Es wird ersichtlich, dass bereits nach rund zwei Monaten andauernder Sanierungsaktivität im Zentrum der Sanierungskubatur Fronten mit einer Temperatur von über 60 °C außerhalb des Sanierungsbereiches gelangen. Zu diesem Zeitpunkt war im zentralen Sanierungsbereich eine mittlere Zieltemperatur von 85 °C noch nicht erreicht. Bereits hieraus wird der große Energieverlust des Sanierungssystems deutlich. Es kann auf diese Weise zwar nicht quantifiziert werden, welche Energiemengen an welcher Stelle aus dem System ausgetreten sind, jedoch können die drei Hauptaustrittspfade visualisiert werden. Der am stärksten betroffene Bereich liegt im nördlichen Teil des Feldes, da hier in kürzester Zeit die höchsten Temperaturen erreicht wurden. Der Bereich mit den geringsten Wärmeabflüssen liegt, wie die Betrachtung der einzelnen Temperaturprofile bereits zeigte, im nordöstlichen bis östlichen Teil des Feldes. Es kann davon ausgegangen werden, dass für die Ausprägung dieser kanalartigen Strukturen ein Zusammenspiel von präferentiellen Fließpfaden in der Sanierungskubatur und der durch die Extraktionsbrunnen erzeugte Gradient verantwortlich sind. Da keine weiteren Messdaten aus dem Zeitraum der aktiven Dampf-Luft-Injektion vorliegen, kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass sich die ausgebildeten Wärmeabflussstrukturen im Verlauf der Sanierung nicht verändern. Die Folgemessungen lassen jedoch vermuten, dass die Wärmeabflüsse ihre Richtung beibehalten haben, das erwärmte Volumen sich dabei jedoch vergrößert hat.

Die Messung vom 04.12.2007 zeigt im Vergleich zur vorherigen eine fortschreitende Homogenisierung der Temperaturfronten. Zu diesem Zeitpunkt war die Dampf-Luft-Injektion bereits abgeschlossen und das zentrale Sanierungsfeld in der gesättigten sowie ungesättigten Zone vollständig bis zur Zieltemperatur durchwärmt. Es fällt auf, dass alle im direkten Umfeld der Sanierungskubatur installierten Messstellen maximale Temperaturen zwischen 50 und 70 °C besitzen. Die zuvor stark kanalartigen Strukturen haben sich aufgeweitet und es wurden weiter außerhalb liegende Bereiche auf Temperaturen zwischen 20 und 50 °C erwärmt. Vor allem der gesamte südöstliche Bereich des Feldes zeigt durchgehende Temperaturbereiche von 50 °C. Dieser Effekt zeigt sich noch deutlicher in der Messung vom 14.02.2008.

## 12. Schadstoffkonzentrationen im Umfeld des Sanierungsbereiches

Der Verlauf der thermischen Sanierung am Standort der ehemaligen Benzolanlage im Industriepark Zeitz wurde durch verschiedene Monitoringmaßnahmen überwacht. Das durchgeführte geoelektrische Monitoring stellte dabei eine indirekte Messung der Temperaturentwicklung in der Sanierungskubatur durch gleichstromelektrische Widerstandsmessungen dar. Eine Kombination verschiedener Monitoringverfahren erlaubt jedoch erst eine verlässliche Beurteilung. Hierzu gehörten bei dieser Anwendung ebenfalls direkte Messverfahren wie die Entnahme und Analyse von Grundwasserproben. Weiterhin wurden Feststoffproben sowie Bodenluftproben im Verlauf der Sanierung entnommen und analysiert.

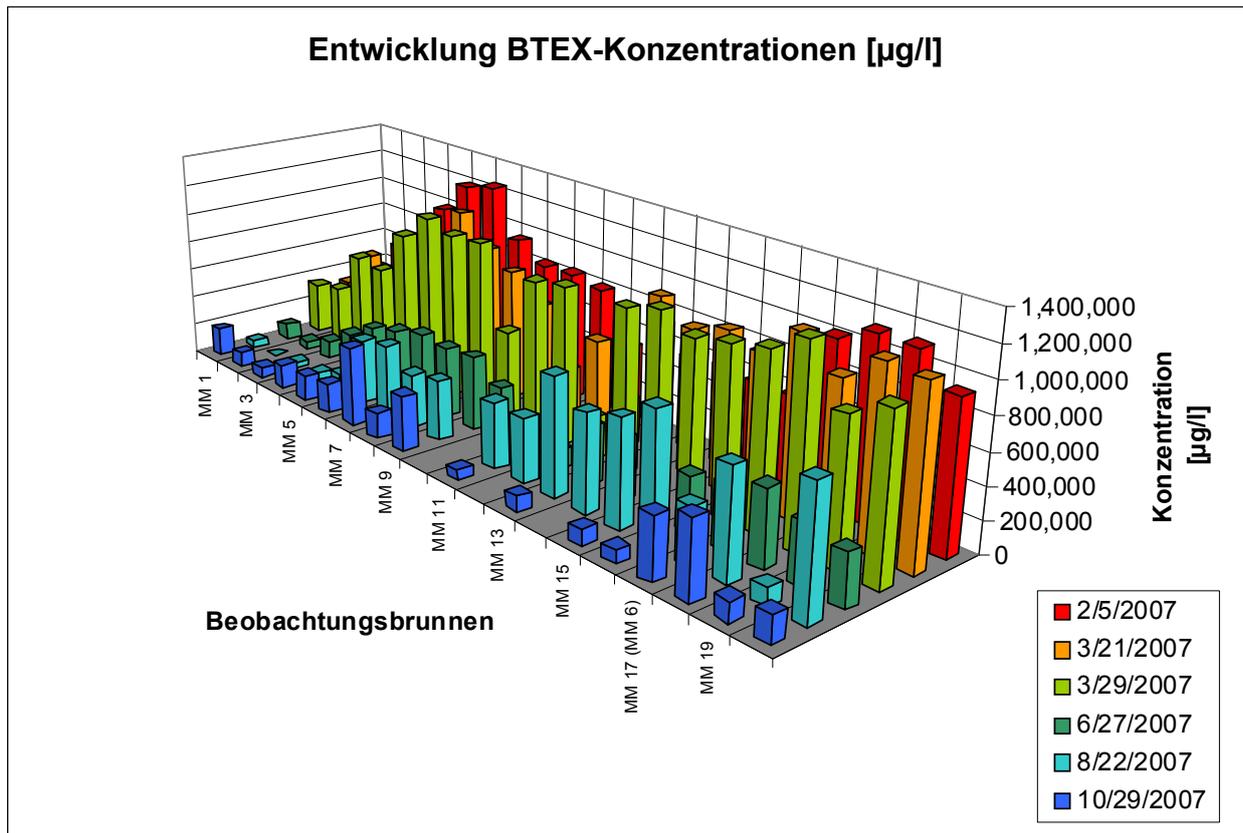
Im Folgenden wird die Grundwasserbeprobung der das Sanierungsfeld umschließenden 1“-Grundwassermessstellen beschrieben (Abbildung 40). Wie bereits erwähnt, grenzen diese 20 Messstellen, die auch für das Temperaturmonitoring genutzt wurden, an die Sanierungskubatur an. Die Abstände zu den Bodenluft- und Grundwasserextraktionsstellen betragen nur wenige Meter. Da vor Beginn der Sanierung in den genannten Messstellen hohe Schadstoffkonzentrationen festgestellt wurden, war es von Interesse, den Einfluss der thermischen Sanierung auf die angrenzenden Bereiche des Sanierungsfeldes zu verfolgen. Die in den 20 Messstellen entnommenen Proben und deren Schadstoffgehalte sind allerdings nicht ausschlaggebend für die Erfolgsbewertung des Sanierungssystems. Hierzu wurden ausschließlich die Werte der Proben betrachtet, die innerhalb der zu sanierenden Kubatur entnommen wurden.

Bei Grundwasserbeprobungen hat eine Vielzahl von Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf den schließlich im Labor gemessenen Schadstoffgehalt einer Probe. Wie Erfahrungen bei bisherigen Beprobungskampagnen gezeigt haben, können die Messwerte der analysierten Proben einen großen Schwankungsbereich besitzen (UM-BW, 1993). Die Art der Probennahme, die verwendete Probennahmeausrüstung, der Probenumfang, der Probentransport und die Lagerung können entscheidenden Einfluss auf den Schadstoffgehalt in der Probe haben. Der große Einfluss einiger dieser Faktoren ist vom Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart mit überraschenden Ergebnissen in einem Kurzversuch untersucht worden (Trötschler *et al.*, 2008). Eine verlustfreie Beprobung ist im Gelände zudem nahezu unmöglich.

Weiterhin sind Einflüsse auf die entnommenen Proben durch die Handhabungsabläufe innerhalb des analysierenden Labors möglich. Wie unsere Erfahrungen durch eigene Vergleichsmessungen sowie Doppelbeprobungen zeigten, hat die exakte Kalibrierung der verwendeten Messgeräte entscheidenden Einfluss auf die Analyseergebnisse.

Ein bei dieser wie auch anderen Untersuchungen festgestellter Effekt ist die zeitliche Veränderung der Schadstoffgehalte der entnommenen Grundwasserproben nach Abschluss der Installationsarbeiten für die Grundwassermessstellen. Durch den Einbau einer Messstelle kann es im Untergrund je nach verwendetem Bohrsystem zur Entnahme von Untergrundmaterial kommen. An anderen Stellen kann es zu Untergrundverdichtung kommen. Wird beim Bohren ein Flüssigkeitsspülverfahren verwendet, so kommt es zum Eintrag von ortsfremden Flüssigkeiten in den Untergrund, die Verdünnungseffekte zur Folge haben können. Durch die Bohraktivitäten in der gesättigten Zone wird die natürliche Grundwasserdurchströmung des Aquifers beeinflusst und es entstehen, wie auch durch den Einbau von Filterpackungen, veränderte hydraulische Zonen. Daher haben sich auch bei den einzelnen Beprobungskampagnen im Rahmen des hier durchgeführten Monitoring starke Schwankungen bei den gemessenen Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser ergeben. Auffallend waren vor allem die im zeitlichen Verlauf nach Abschluss der Bohrarbeiten ansteigenden Schadstoffkonzentrationen. Eine Aussage, welcher der oben beschriebenen Effekte, in welchem Umfang Einfluss auf die dargestellten Messwerte hat, kann allerdings nicht gemacht werden.

Es wurden im Rahmen der Auswertung der Grundwasseranalysen keine direkten Vergleiche zwischen den Proben die außerhalb des Sanierungsfeldes und denen, die innerhalb des Sanierungsfeldes entnommen wurden, angestellt. Die oben beschriebenen Einflussfaktoren lassen keinen quantitativen Vergleich zu. Ein qualitatives Gegenüberstellen der als getrennt anzusehenden Probennahmekompartimente ist jedoch möglich.



**Abbildung 67: Entwicklung der BTEX-Konzentrationen im Grundwasser im direkten Umfeld des Sanierungsbereiches**

Abbildung 67 zeigt die zeitliche Entwicklung der Grundwasserschadstoffgehalte der während der verschiedenen Beprobungskampagnen entnommenen Wasserproben. Es wird hier der Summenparameter BTEX angegeben, wobei der Kontaminant Benzol einen Anteil zwischen 95 und über 99 % hat. Es fällt auf, dass der Trend im Verlauf der thermischen Sanierung eindeutig bei stark abnehmenden BTEX-Konzentrationen liegt. Bemerkenswert ist vor allem die Konzentrationsentwicklung zwischen der ersten Grundwasserprobennahme am 05.02.2007 und der Beprobung vom 29.03.2007. Hier fällt an einem Großteil der Messstellen eine deutliche Schadstoffzunahme auf. Da im Zeitraum zwischen den beiden Probennahmen keine aktive Sanierung sowie keine äußere Einflussnahme auf die Sanierungskubatur stattfand, ist davon auszugehen, dass die oben genannten Aspekte Einfluss auf die Schadstoffgehalte der Grundwasserproben hatten. Vor allem die Störung der Untergrundstruktur durch die Bohrmaßnahmen mittels Schneckenbohrer wird hier als starke Einflussquelle vermutet.

Die deutlich niedrigeren Schadstoffkonzentrationen der Beprobung vom 27.06.2007 sind vor allem durch die ab Anfang Mai 2007 aktive Bodenluftabsaugung und das Air-Sparging in den Injektionsbrunnen zu erklären. Die ab 18.06.2007 begonnene Dampf-Luft-Injektion kann mit großer Wahrscheinlichkeit als Einflussquelle für die

Schadstoffkonzentrationsabnahme ausgeschlossen werden, da innerhalb so kurzer Zeit an den Extraktionsbrunnen noch kein Dampfdurchbruch stattgefunden hatte. Da sich die Grundwasserprobennahmestellen in kurzer Entfernung der Extraktionsbrunnen befinden, ist davon auszugehen, dass hier größere Mengen volatilisierter BTEX-Komponenten durch die Bodenluftabsaugung aus der ungesättigten Zone entfernt wurden. Durch die stetige Nachlieferung von Schadstoff aus der gesättigten Zone kam es auch dort zur Kontaminationsabnahme, die sich auf die Schadstoffkonzentrationen in den jeweiligen Grundwasserproben auswirkt.

Die Analyse der Grundwasserproben vom 22.08.2007 erscheint nur auf den ersten Blick überraschend. Die Schadstoffkonzentrationen liegen hier zum Teil über denen der letzten Beprobung. Vor allem im Nord- und Südwesten des Sanierungsfeldes zeigen die Messstellen MM 7 bis MM 9 und MM 10 bis MM 16 erhöhte Konzentrationen. Diese Erhöhung geht mit einer besonders starken Temperaturerhöhung im Bereich dieser Messstellen einher (s. Kapitel 11). Hieraus lässt sich auf einen direkten Einfluss der seit rund zwei Monaten andauernden Dampf-Luft-Injektion schließen. Hier kommt es zu einem Austrag eines Teiles der mobilisierten Kontaminanten aus der Sanierungskubatur heraus, die nicht durch die Extraktionsbrunnen gefasst werden konnten. Die hierbei festgestellten Schadstoffkonzentrationen liegen jedoch deutlich unter den Ausgangskonzentrationen der Beprobung vom 05.02.2007. Zum Teil kann bereits zu diesem Zeitpunkt der Sanierung eine Halbierung der Ausgangskonzentrationen festgestellt werden.

Im weiteren Verlauf der Dampf-Luft-Injektion konnte durch gezielte Ansteuerung der einzelnen Injektions- und Extraktionsbrunnen das Sanierungsfeld in gesättigter und ungesättigter Zone durchströmt werden. Auch die regelmäßigen Beprobungen im Inneren des Sanierungsfeldes zeigten eine deutliche Schadstoffabnahme, die deutlich über der außerhalb des Feldes lag (Trötschler *et al.*, 2008).

Die Dampf-Luft-Injektion wurde bis Ende Oktober 2007 betrieben. Die Schadstoffgehalte im Sanierungsfeld konnten in diesem Zeitraum in Grundwasser und Bodenluft so stark abgesenkt werden, dass die aktive Sanierung schließlich eingestellt wurde.

Gegen Ende der thermischen Beeinflussung wurden außerhalb des eigentlichen Sanierungsbereiches ebenfalls deutlich niedrigere Schadstoffkonzentrationen festgestellt (Grundwasserbeprobung vom 29.10.2007). Der größte Teil der entnommenen Proben wies Konzentrationen von weniger als 100 mg/l BTEX auf, was gegenüber den Ausgangskonzentrationen mit weit über 1000 mg/l als deutliche Reduktion anzusehen ist. Dass die Schadstoffkonzentrationen außerhalb des

Sanierungsbereiches höhere Werte als innerhalb aufweisen, ist, wie bereits erwähnt, durch den Austritt von mobilisiertem Schadstoff aus dem Sanierungsfeld zwischen den Extraktionsbrunnen zu erklären. Die Temperaturprofile (s. Kapitel 11) bestätigen diese Hypothese. Die Schadstoffkonzentrationen außerhalb der Sanierungskubatur können daher nicht der eigentlichen Bewertung des Sanierungsansatzes dienen. Einerseits wurde nach Abschluss der Dampf-Luft-Injektion noch über einen längeren Zeitraum eine Bodenluftabsaugung mit zwischengeschaltetem Air-Sparging betrieben, was zu einem weiteren Austrag von Schadstoffen führte. Hierbei ist vor allem eine Art „Rücksaugen“ der aus dem Sanierungsbereich herausgetretenen Schadstoffe in Betracht zu ziehen. Zum Anderen liegt im gesamten Umfeld der ehemaligen Benzolanlage eine deutliche BTEX-Kontamination vor. Diese setzt sich vor allem aus diffusen Schadstoffeintritten an verschiedenen Lokationen sowie aus der von der Hauptschadstoffquelle ausgehenden Schadstofffahne zusammen. Mit erhöhten BTEX-Konzentrationen ist daher im gesamten Umfeld der ehemaligen Benzolanlage zu rechnen. Diese Existenz der großflächigen BTEX-Kontamination bestätigte sich auch in den unterschiedlichen Untersuchungskampagnen auf dem Gelände (GFE, 2004).

Da es sich bei diesem Sanierungsvorhaben lediglich um einen Pilotversuch zur Quellensanierung handelte, lag die vollständige Sanierung des Testgeländes nicht im eigentlichen Aufgabenfeld.

### 13. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines Pilotprojektes zur innovativen Quellensanierung wurde am Standort des ehemaligen Industriestandortes Hydrierwerk Zeitz (Hyzet) ein Versuch zur thermischen Boden- und Grundwassersanierung durchgeführt. Neben anderen Verfahren kam eine thermische Sanierung basierend auf Dampf-Luft-Injektion in den Untergrund zur Anwendung. Hierbei wurde eine Kubatur von ca. 1500 m<sup>3</sup> thermisch behandelt. Der am Sanierungsstandort vorliegende Hauptkontaminant Benzol weist bei Erwärmung einen hohen Dampfdruck auf, was die Anwendung eines thermischen Sanierungsansatzes nahe legt. Ziel war es, die zu sanierende Kubatur auf eine durchschnittliche Temperatur von 85 °C über einen längeren Zeitraum zu erwärmen, um den Schadstoff Benzol vollständig in die Gasphase zu überführen. Benzolanteile, die nicht in die Gasphase überführt werden konnten, wurden durch die Erwärmung in der Bodenmatrix mobilisiert. Die Erwärmung von gesättigter sowie ungesättigter Zone wurde mittels Dampf-Luft-Eintrag in drei Injektionsbrunnen realisiert. Eine Extraktion von kontaminiertem Grundwasser, mobilisiertem Schadstoff und Schadstoff in Gasphase wurde über kombinierte Grundwasser- und Bodenluftextraktionsbrunnen durchgeführt.

Problematisch bei der beschriebenen Anwendung war die räumliche Ausbreitung des injizierten Dampf-Luft-Gemisches. Da am Sanierungsstandort stark inhomogene und anisotrope Untergrundbedingungen vorlagen, wurde eine radialsymmetrische Ausbreitung des Sanierungsmittels nur in direkter Nähe der Injektionsbrunnen erwartet. Es musste mit der Entstehung von präferentiellen Fließpfaden aufgrund des inhomogenen Untergrundes sowie den unterschiedlichen Pumpraten der Extraktionsbrunnen gerechnet werden. Weiterhin waren die Extraktionsbrunnen in unterschiedlichen Abständen zu den Injektionsbrunnen installiert, was den Aufbau unterschiedlicher Gradienten zwischen den Injektionsbrunnen und den einzelnen Extraktionsbrunnen im Untergrund bewirkte.

Diese Problematik erforderte es, im Rahmen der Pilotsanierung ein innovatives geophysikalisches Monitoringverfahren zu entwickeln. Ziel war es, durch regelmäßig durchgeführte gleichstromgeoelektrische Messungen die Einflüsse und Bewegungen des Dampf-Luft-Gemisches zu verfolgen. Bei geoelektrischen Messungen werden die elektrischen Widerstände im Untergrund erfasst. Eine deutliche Änderung des elektrischen Widerstandsgefüges durch Erwärmung sowie Sättigungsänderungen im Untergrund wurde erwartet. Da eine Vielzahl von Effekten einen Einfluss auf den elektrischen Widerstand haben kann, konnte im Verlauf des Monitoring nicht sicher festgestellt werden, welcher Effekt zu jedem Zeitpunkt der Sanierung der dominierende war. Es konnte im Laufe der aktiven Sanierung jedoch stets der Einfluss in den verschiedenen Bereichen der Kubatur beobachtet werden. Die vom Sanierungsmittel durchdrungenen Bereiche konnten mittels geoelektrischen Messungen eindeutig erfasst werden. Eine vielen geoelektrischen Verfahren eigene

Problematik ist die deutliche Abnahme der Sensitivität (Maß für den Einfluß einer Änderung in der geoelektrischen Parameterverteilung des Untergrundes auf den Meßwert für eine gegebene Elektrodenanordnung) mit größerem Abstand der verwendeten Elektroden. Um diesem Problem entgegenzuwirken, fanden im Rahmen dieser Sanierung Bohrlochelektroden Anwendung. Dieses innovative Konzept erlaubte ein 3-dimensionales Erfassen und Abbilden der elektrischen Widerstandsänderungen. Vor allem in Bezug auf das Entstehen präferentieller Fließpfade erwies sich das Monitoring unter Verwendung von Kombinationsmessungen zwischen Oberflächen- und Bohrlochelektroden als ideal.

Ein Nachteil dieses Messverfahrens war die lange Zeitdauer, die für eine 3-dimensionale Monitoringmessung benötigt wurde. Diese konnte für eine Monitoringmessung bis zu 24 Stunden betragen und somit schnell fortschreitende Ausbreitungsvorgänge vor allem zu Beginn der Sanierung nicht sicher erfassen.

Die rasch ablaufenden Prozesse im Untergrund wurden daher durch direkte Messungen an Bohrlochelektroden verfolgt. Sobald die fortschreitende Dampf-Luft-Front eine Bohrlochelektrode erreichte, zeigte diese eine deutliche Reaktion in Form einer Änderung des gemessenen elektrischen Widerstandes. Sobald eine Elektrode diese Reaktion zeigte, konnte mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass sie vom Sanierungsmittel umströmt wurde. Neben der schnellen Reaktion der Elektroden im Bereich der Injektionsbrunnen war der Verzicht auf eine Dateninversion bei diesem Teil des geoelektrischen Monitoring von Vorteil. Üblicherweise werden bei 2- und 3-dimensionalen Messungen die Datensätze invertiert, um eine möglichst detailgetreue Abbildung der elektrischen Widerstandsverhältnisse im Untergrund zu erhalten. Hierbei kann es bereits durch einige wenige Messfehler im Datensatz zu einer starken Verschlechterung der Modellanpassung im iterativen Prozess der Inversion kommen. Durch den Verzicht auf eine Inversion konnte diese Problematik umgangen werden und eine genaue Lokalisierung der Dampf-Luft-Front war jederzeit möglich.

Zum Vergleich und zur Bewertung des innovativen 3-dimensionalen Monitoring wurden zusätzlich traditionelle Messungen unter ausschließlicher Verwendung von Oberflächenelektroden durchgeführt. Hierzu wurde eine aus 96 Elektroden bestehende Auslage diagonal über dem Sanierungsfeld und den Injektionsbrunnen positioniert. Die mit dieser Auslage gewonnenen Messungen zeigten ebenfalls, wie erwartet, eine deutliche Änderung der elektrischen Widerstände im Untergrund im Verlauf der Sanierung. Vor allem die Messungen mit einer Wenner-Elektrodenkonfiguration zeigten hier gute Ergebnisse. Die Methode erwies sich jedoch für das Monitoring einer thermischen Untergrundsanie rung in einer größeren Kubatur aufgrund der fehlenden Eigenschaft einer 3-dimensionalen (räumlichen) Erfassbarkeit als nicht aussagekräftig genug. Als Indikator für die Vorgänge in den verschiedenen Phasen der Sanierung ist dieses Messverfahren jedoch gut nutzbar.

Zusätzlich zu dem geoelektrischen Monitoring wurden Temperaturmessungen mittels im Untergrund fest installierten Messfühlern sowie an außerhalb der Sanierungskubatur installierten Grundwassermessstellen durchgeführt. Diese Messungen in Kombination mit Energiebilanzen lieferten überraschende Ergebnisse, was den Energieaustausch aus dem Sanierungsfeld betraf. Es wurde festgestellt, dass bis zu 60 % der eingebrachten Energie das Feld trotz kontinuierlichem Betrieb der Extraktionsbrunnen verlassen konnten. Die hohen Energieverluste wurden als deutliches Zeichen für die Entstehung von präferentiellen Fließpfaden gewertet; was einen direkten Einfluss auf die Sanierungskosten hat.

Im Verlauf der Sanierungsaktivitäten wurden regelmäßig Grundwasser-, Boden- sowie Bodenluftproben entnommen. Es konnte ein stetiges Absinken der Schadstoffkonzentrationen in den Proben festgestellt werden. Das geoelektrische Monitoring erlaubte es, Möglichkeiten, Grenzen und Optimierungspotentiale des eingesetzten thermischen Sanierungsverfahrens quantitativ zu erfassen. Es konnte gezeigt werden, dass kostengünstig und vollautomatisch durchgeführte geoelektrische Messungen, vor allem in Kombination mit Bohrlochelektroden, in der Lage sind, die Sanierungsvorgänge im Untergrund zu detektieren und räumlich detailliert zu lokalisieren. Ein Monitoring unter ausschließlicher Verwendung von fest installierten Messfühlern lässt eine so hoch aufgelöste Darstellung von Änderungen nicht zu, vor allem, da vor Beginn der Sanierung besonders aktive Bereiche wie die präferentieller Fließpfade nicht prognostiziert werden können. Eine optimale Verteilung von Temperaturmessfühlern kann daher vor Sanierungsbeginn auch nicht festgelegt werden.

Das Verfahren des geoelektrischen Monitoring hat sich als äußerst zuverlässig und erfolgreich bei dieser Pilotsanierung erwiesen. Weitere Anwendungen stehen derzeit in Aussicht. Eine weitgehende Automatisierung des Monitoringsystems sollte bei zukünftigen Einsätzen im Vordergrund stehen. Dies betrifft vor allem das zeitnahe Processing und die Auswertung der Messdaten, um in erhöhtem Maße aktiv Einfluss auf die Steuerung und damit Optimierung des Sanierungssystems zu nehmen. Bei der Anwendung in Zeitz zeigte sich, dass die Auswertung der Messdaten und hierbei vor allem das Filtern nach unterschiedlichen Qualitätskriterien maßgeblich für das Ergebnis einer Dateninterpretation und -inversion waren. Dieser Prozess sollte möglichst vollständig automatisiert und am Messgerät vor Ort direkt durchgeführt werden können. Mit den Ergebnissen einer qualitativ hochwertigen Auswertung kann dann zeitnah Einfluss auf die Ausrichtung und Steuerung der Sanierungsanlage genommen werden, wodurch sich eine effektivere, schnellere und günstigere Sanierung realisieren lässt.

## 14. Literatur

- Armbruster H., Dornstädter J., Kappelmeyer O., Tröger I., 1993: Thermometrie zur Erfassung von Schwachstellen an Dämmen. Vol. 83 (4), Wasserwirtschaft, Franckh-Kosmos-Verlag, Stuttgart.
- Arndt, V., Schwarz, H., 1999: Hydrierwerk Zeitz: Die Geschichte eines Chemieunternehmens (1937-1996), Zeitzer innovative Arbeitsfördergesellschaft mbH.
- Arps, J.J., 1953: The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions. Petr. Trans. AIME. 198, 327-330.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002: Bodenbehandlung - Stand der Technik und neue Entwicklungen, Fachtagung Augsburg 2002.
- Betz, C., 1998: Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie, Mitteilungsheft Nr. 97, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Dissertation.
- Böhme, O., Borkert, M., Matthes, P., 1999: Ökologisches Großprojekt Hydrierwerk Zeitz, Bewertung und weitere Nutzung von Brunnen und Grundwassermessstellen für ein künftiges Grundwassermonitoring im ehemaligen Hydrierwerk Zeitz, GFE GmbH Halle.
- Cave, L., Hartog, N., Al, T., Parker, B., Mayer, K. U., Cogswell, S., 2007: Electrical Monitoring of In Situ Chemical Oxidation by Permanganate, Ground Water Monitoring & Remediation 27, no. 2, pp. 77-84.
- Chouker, F., 1969: Methodische und theoretische Untersuchungen für die geophysikalische Grundwassererkundung. Freiburger Forschungshefte C271, 235 S..
- Dachnov, V.N., 1962: Interpretazija rezultatov geofziceskich issledovanij skvazin. 2. Aufl. Moskau, 547 S..
- Daily, W. D., Ramirez, A. L., Johnson, R., 1998: Electrical Impedance Tomography of a Perchloroethylene Release, Journal of Environmental and Engineering Geophysics 2(3): 189-201.
- Daily, W., Ramirez, A., 2004: Electrical resistance tomography - Theory and practice, Near Surface Geophysics, vol.2.
- Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D. J., Nitao, J., 1992: Electrical Resistivity Tomography of Vadose Water Movement. Water Resources Research 28:1429-1442.
- Dietrich, P., 1999: Konzeption und Auswertung gleichstromgeoelektrischer Tracerversuche unter Verwendung von Sensitivitätskoeffizienten. Dissertation, Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), C50, 1999.
- Dornstädter J., 1992: Nachweis von Sickerströmungen mittels Bodentemperaturmessungen. Z. dt. geol. Ges., Hannover Vol 143: p.421-425.
- Dornstädter J., 1997: Detection of Internal Erosion of Embankment Dams. Q.73, R.7, ICOLD 19th Congress, Florence, 1997.

- Draskovits, P., Simon, A., 1992: Application of geoelectric methods using buried electrodes in exploration. *Geophysical Prospecting*, 40, 573-586.
- Eissmann, L., 1975: Das Quartär der Leipziger Tieflandsbucht und angrenzender Gebiete um Saale und Elbe – Schriftenreihe Geol. Wiss., H. 2., 263 S., Berlin 1975.
- Eissmann, L., Litt, T., 1994: Das Quartär Mitteldeutschlands. *Altenburger Naturwissenschaftliche Forschung*, Heft 7, 458, Altenburg, ISSN: 0232-5381.
- Färber, A., 1997: Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ Sanierungstechnologie, *Mitteilungsheft Nr. 96*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Dissertation.
- Fetter, C.W., 1998: *Contaminant Hydrogeology* (2 ed.). London: Prentice-Hall.
- Finkel, M., Bayer, P., Weiske, A., 2007: Technisch-ökonomische Bewertungs- und Optimierungsstrategien für die Grundwassersanierung, *Altlastenforum Baden-Württemberg e.V.*.
- Fischer, A., Bauer, J., Dietze, M., Gödeke, S., Schirmer, M., Weiß, H., Kästner, M., Meckenstock, R., Richnow, H.-H., 2005: Konzept zur Quantifizierung des anaeroben in situ-Schadstoffabbaus in BTEX-kontaminierten Grundwasserleitern mittels Deuterium-markierter Substanzen. *Altlastenspektrum* 1/2005, 5-12.
- Geotomo Software, 2004: *Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method*. Geotomo Software, Penang, Malaysia, 133 pp..
- GFE GmbH, 2004: 4. Dokumentationsbericht Geostandortmanagement Safira Zeitz. Halle, unveröffentlichter Bericht, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH.
- Gharibi, M., Bentley, L. R., 2005: Resolution of 3-D Electrical Resistivity Images from Inversions of 2-D Orthogonal Lines, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics JEEG*, Vol. 10, Issue 4, pp. 339-349.
- GICON GmbH, 2005: *Kurzbericht zur Vorauswahl in Frage kommender Untersuchungsbereiche, Phase 1: Testfeldbeschreibung und Auswahl der Untersuchungsbereiche*.
- Gödeke, S., 2004: *Evaluierung und Modellierung des Natural Attenuation Potentials am Industriestandort Zeitz*, *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA)*, Dissertation, 139 S..
- Gödeke, S., 2001: *Sachstandsbericht Numerische Modellierung des reaktiven Stofftransports zur Quantifizierung des „Natural Attenuation „und“ Enhanced Natural Attenuation Potentials am Standort Zeitz.*- UFZ Leipzig-Halle, Stand Februar 2001.
- Gödeke, S., Schirmer, M., Weiß, H., 2001: *Benzenabbau im Grundwasser durch Sulfatreduktion. 3. DEHEMA Symposium „Natural Attenuation – Umsetzung, Finanzierung, Perspektiven“*, Dez 04-06.2001, Frankfurt/M., S. 167-170. ISBN 3-89746-036-X.
- Gödeke, S., Schirmer, M., Vogt, C., Trabitze, R., Weiß, H., 2002 (a): *SAFIRA Zeitz – Realization and Procedure*. *International Conference on Water Resources and Environmental Research*, Dresden, 22.-25. 07. 2002.

- Gödeke, S., Schirmer, M., Weiß, H., 2002 (b): Natural Attenuation vs. Enhanced Natural Attenuation at a BTEX contaminated site (Former Hydrogenation Plant Zeitz, Germany)-A First comparison. European Conference on Natural Attenuation, Heidelberg, 15.-17. Oktober 2002, S. 36-38, ISBN 3-89746-039-4.
- Gödeke, S., Weiß, H., Trabitze, R., Schirmer, M., 2002 (c): SAFIRA Zeitz – The 'Enhanced Natural Attenuation'. International Conference on Water Resources and Environmental Research, Dresden, 22.-25. 07. 2002, Germany, Vol. III, p. 82-83.
- Gödeke, S., Schirmer, M., Vogt, C., Trabitze, R., Weiß, H., 2003 (a): Stimulating Natural Attenuation at a BTEX-Contaminated Megasite: The SAFIRA Zeitz Project. CONSOIL 2003, Gent, 22.5.-26.5.2003, Tagungsband F&U confirm Leipzig, S. 3550-3559.
- Gödeke, S., Weiß, H., Geistlinger, H., Vogt, C., Schirmer, M., 2003 (b): NA vs. Enhanced NA at a BTEX contaminated Megasite. In situ and On-Site Bioremediation. 7th International Symposium, June 2-5, 2003, Orlando, Florida. Tagungsbeitrag.
- Gödeke, S., Weiß, H., Trabitze, R., Vogt, C., Wachter, T., Schirmer, M., 2003 (c): Benzenabbau im Grundwasser unter verschiedenen Bedingungen. In: Grundwasser 4/2003. Bd. 8, 232-237.
- Gödeke, S., Schirmer, M., Richnow, H.H., Fischer, A., Borsdorf, H., Rämmler, A., Mothes, S., Steffen, J., Kletzander, W., Trabitze, R., Weiß, H., 2003 (d): SAFIRA Standort Zeitz – Multi Spezies Tracerversuch – Planung und Durchführung. 5th DECHAMEA-Symposium Natural Attenuation, 02-03/12/2003, Frankfurt/M..
- Gödeke, S., Weiß, H., Geistlinger, H., Fischer, A., Richnow, H.-H., Schirmer, M., 2004 (a): Strömungs- und Tracer-Transportmodellierung am Natural-Attenuation-Standort Zeitz. Grundwasser 1/2004, 3-11.
- Gödeke, S., Weiß, H., Richnow, H.-H., Borsdorf, H., Trabitze, R., Dietze, M., Schirmer, M., 2004 (b): Tracertest zur Analyse des reaktiven Transports im Aquifer am Industriestandort Zeitz. Altlastenspektrum 4/2004, 181-189.
- Gödeke, S., Richnow, H.-H., Weiß, H., Fischer, A., Vogt, C., Borsdorf, H., Schirmer, M., 2006: Multi tracer test for the implementation of enhanced in-situ biodegradation at a BTEX-contaminated megasite.- J. Contam Hydrol. 87 (3-4) 211 – 236.
- Großmann, J., Hilse, H., Irmischer, N. & Weiß, H., 2005 (a): Beeinflussung von Grundstückswerten durch Grundwasserkontaminationen.- TerraTech 6/2005: TT 9-TT 11.
- Großmann, J., Hilse, H., Irmischer, N., Weiß, H., 2005 (b): Beeinflussung von Grundstückswerten durch Grundwasserkontaminationen. TerraTech 6/2005, TT 9-11.
- Gruhne, M., 1999: Überwachung von Untergrundkontaminationen mit Messungen der komplexen elektrischen Leitfähigkeit. Dissertation, Heft 16 Schriftenreihe Proceedings des DGFZ e.V..
- Henning, R., Ulbrecht, H., Lehmann, P., 1979: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Reinbenzolgewinnung durch Extraktivdestillation mit Dimethylformamid. Wiss. Z. TH Leuna-Merseburg, 21(2), 185-195.

- Hoffmann, R., Dietrich, P., 2004: An approach to determine equivalent solutions to the geoelectrical 2D inversion problem, *Journal of Applied Geophysics* 56 (2), 79-91.
- Hoffmann, R.; Dietrich, P., 2004: Geoelektrische Messungen zur Bestimmung von Grundwasserfließrichtungen und –geschwindigkeiten, *Grundwasser*, Heft 3, Band 9.
- Kappelmeyer O., 1957: The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depth, *Geophysical Prospecting*, The Hague. Vol. 3, p 239-258.
- Kearey, P., Brooks, M., 1991: *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Sciences, Malden, 272 pp..
- Knödel, K., Krummel, H., Lange, G., 2005: BGR, *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Band 3, Geophysik, 2. Auflage, Berlin.
- Knöller, K., Weise, S. M., Vieth, A., Gödeke, S., Weiß, H., Schirmer, M., 2003: Isotopic evidence for biodegradation in a sulfate-rich BTEX-contaminated aquifer. IV South American Symposium on Isotope Geology, Salvador, 24.-27.8.2003, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador, S. 438-440.
- Körner, J., 2002: Ergebnisse der Sondierungsbohrungen im direct push-Verfahren zur Profilierung der elektrischen Leitfähigkeit und zu Grundwasserprobenahme am Standort SAFIRA Zeitz, Bericht.
- Lehmann, R. M., Colwell, F. S., Bala, G. A., 2001: Attached and Unattached Microbial Communities in a Simulated Basalt Aquifer under Fracture- and Porous-Flow Conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(6), 2799-2808.
- Loke, M.H., 2001: *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, User's Manual for Res2dinv.
- Lowri, W., 1997: *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 354 pp..
- Milsom, J., 2003: *Field Geophysics 3rd ed.*, The geological field guide series. Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England, 232 pp.
- Newmark, R. L., Boys, S., Daily, W., Goldman, R., Hunter, R., Kayes, D., Kenneally, K., Ramirez, A., Udell, K., Wilt, M., 1994: Using Geophysical Techniques To Control In Situ Thermal Remediation, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Boston, MA, March 27-31.
- Newmark, R.L., Daily, W.D., Kyle, K.R. & Ramirez, A.L., 1998: Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques. *J. of Environmental & Engineering Geophysics* 3, 7-13.
- Orellana, E., 1972: *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*, Paraninfo, Madrid, España.
- Ramirez, A., Daily, W., LaBrecque, D., Owen, E., Chesnut, D., 1993: Monitoring of an underground steam injection process using electrical resistance tomography. *Water Resources Research* 29, 73-87.

- Ranganayaki, R. P., Akturk, S. E., and Fryer, S. M., 1990: Formation resistivity variation due to steam flooding: A log study: *Geophysics*, 57, 488-494.
- Rein A., Hoffmann R., Dietrich P., 2004: Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. *Journal of Hydrology* 285 (215-232).
- Reynolds, J.M., 1998: An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, Chichester. England, 796 pp..
- Roy, A., Apparao, A., 1971: Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.
- Schirmer, M., Dahmke, A., Dietrich, P., Grathwohl, P., Liedl, R., Ptak, T., Richnow, H., Schäfer, D., Schirmer, K., Teutsch, G., Weiß, H., Zamfirescu, D., 2002: RETZINA (REference Testsite Zeitz for the Implementation of the 'Natural-Attenuation' Concept). Third International Conference on Water Resources and Environmental Research (ICWRER), 22.-26. July 2002 in Dresden, Germany. Vol. II, p. 189-193.
- Schirmer, M., Dahmke, A., Dietrich, P., Dietze, M., Gödeke, S. Richnow, H.-H., Schirmer, K., Weiß, H., Teutsch, G., 2006: Natural attenuation research at the contaminated megasite Zeitz. *Journ. of Hydrol.* 328, 393-407.
- Sen, P.N., Goode, P.A., 1992: Influence of temperature on electrical conductivity on shaly sands. *Geophysics* 57, 89-96.
- Sharma, P. V., 1997: Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 475 pp..
- Spies, B.R., Ellis, R.G., 1995: Cross-borehole resistivity tomography of a pilot-scale, in-situ vitrification test. *Geophysics* 60, 886-898.
- Strobl Th., Conrad M., Aufleger M., Dornstädter J., 2000: Verteilte faseroptische Temperaturmessung als innovative Technik zur Bauwerksüberwachung im Wasserbau, Symposium „Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen“, Graz, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz, Heft 34.
- Telford, W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., 1990: Applied Geophysics, second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 770 pp..
- Teutsch, G., Dietrich, P., 2000: Flächenhafte geophysikalische Messungen zur Erkundung des Untergrundes in einem Teilbereich des ehemaligen Hydrierwerkes Zeitz, März 2000.- Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geol. Inst., Lehrstuhl für Angewandte Geologie.
- Teutsch, G., Dietrich, P., 2000: Geophysikalische Profilmessungen zur Erkundung des Untergrundes im Abstrom eines Benzenschadens auf dem Gelände des ehemaligen Hydrierwerkes Zeitz, März 2000.- Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geol. Inst., Lehrstuhl für Angewandte Geologie.
- Trötschler, O., Haslwimmer, T., Koschitzky, H.-P., Ochs, S.O., 2006: Pilotversuch Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone als Grundlage zur Auslegung der thermischen In-situ-Sanierung des CKW-Schadensfalls ehemalige chemische Reinigung in Karlsruhe Durlach - Abschlussbericht - . Technischer Bericht Nr. VEG 19, 2006/4. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 3/2006.

- Trötschler, O., Koschitzky, H.-P., Ochs, S.O., Denzel, S., Stöckl, K., 2006: Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal, VEGAS-Statuskolloquium 2006, pp. 60 – 70, Eds. Braun, Koschitzky, Stuhmann, Mitteilungen Heft 150, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2006.
- Trötschler, O., Limburg, B., Koschitzky, H.-P., 2008: Abschlussbericht Thermische In-situ-Pilotsanierung ehemaliges Hydrierwerk Zeitz (Testfeld I).
- Truex, M., Powell, T., Lynch, K., 2007: In Situ Dechlorination of TCE during Aquifer heating, *Ground Water Monitoring & Remediation* 27, no. 2, pp. 96-105.
- Umweltministerium Baden-Württemberg, 1993: Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums und des Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen. In: *Gemeinsames Amtsblatt der Ministerien des Landes Baden-Württemberg vom 30.11.1993 Ausgabe A 41. Jahrgang, Nr. 33, 1115-1123.*
- Vieth, A., Kästner, M., Gödeke, S., Weiß, H., Schirmer, M., Richnow H.H., 2002: Assessment of Natural Attenuation Processes at a BTEX-contaminated site (Hydrogenation Plant Zeitz); European Conference on Natural Attenuation, October, 15.-17, 2002, Heidelberg, Germany, S. 76-79, ISBN 3-89746-039-4.
- Vieth, A., Kästner, M., Schirmer, M., Weiß, H., Gödeke, S., Meckenstock, U., Richnow, H., 2005: Monitoring in situ biodegradation of benzene and toluene by stabile carbon isotope fractionation. – *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 24/1, 51-60.
- Vogt, C., Alfreider, A., Schirmer, M., Weiß, H., Babel, W., 2002: Estimation of the microbial degradation potential of an aquifer highly contaminated with benzene (former hydrogenation plant Zeitz). European Conference on Natural Attenuation, October 15-17, 2002, Heidelberg.
- Vogt, C., Gödeke, S., Treutler, H.-C., Weiß, H., Schirmer, M., Richnow, H.-H., 2007: Benzene oxidation under sulfate-reducing conditions in columns simulating in situ conditions.- *Biodegradation*, 18 (5), 625-636.
- Ward, S. H., 1990: Resistivity and induced polarization methods. In: Ward, S. H. (ed.): *Geotechnical and environmental geophysics, I: Review and tutorial.* Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 147-189.
- Watznauer, A. 1989: *Dictionary Geosciences.* Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/ M., Germany, 360 pp..
- Wayland, J. R. Jr., Lee, D. O., and Cole, T. J., 1987: CSAMT mapping of a Utah tarsand steamflood: *Trans., A.I.M.E.*, 283,345-352.
- Weiß, H., Teutsch, G., Dahmke A., 1999: Projektskizze zum Verbundvorhaben Referenz-Testfeld Zeitz zur Implementierung des „Natural-Attenuation“ Ansatzes (RETZINA).- UFZ Leipzig-Halle GmbH, Universität Tübingen, Universität Kiel.