



Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung · VEGAS
Institut für Wasserbau · Universität Stuttgart · Pfaffenwaldring 61 · D-70550 Stuttgart

Universität Stuttgart
Institut für Wasserbau

Wissenschaftlicher Leiter VEGAS
Jürgen Braun, PhD ☎ 685-67018
Technischer Leiter VEGAS
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky ☎ 685-64716

Pfaffenwaldring 61
D - 70550 Stuttgart
Telefon +49 (0) 711 685 -64717
Telefax +49 (0) 711 685 - 67020
E-Mail: vegas@iws.uni-stuttgart.de

Thermische In-situ-Pilotsanierung am Standort des ehemaligen Hydrierwerks Zeitz

Ziele

Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II sollte in einem Teilbereich des Benzolschadens auf dem Gelände des Ökologischen Großprojektes des Landes Sachsen – Anhalt ehemaliges Hydrierwerk Zeitz eine pilotmaßstäbliche thermische In-Situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI) und Fester Wärmequellen (THERIS) bei gleichzeitiger Bodenluftabsaugung (BLA) durchgeführt werden.

Der Schadensherd liegt im Bereich der ehemaligen Benzolfabrik mit angeschlossenen Betriebseinrichtungen, dem Tanklager und der Bahnverladung. Neben Schäden durch Kriegseinwirkung sind Leckagen und Havarien beim Betrieb der Benzolanlage als Ursache des Grundwasserschadens (Benzolkonzentrationen im Bereich der Löslichkeit) zu nennen. Im Rahmen des Rückbaus der Altanlage nach der Wiedervereinigung wurden die oberen Bodenschichten (2 – 3 m) ausgetauscht.

Die primär verfolgte Zielsetzung der Pilotsanierung am Standort Zeitz ist die Verminderung der unterstromigen Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser durch die Entfernung (Reinigung) eines Teilbereichs der Schadensquelle („Partial Source Removal“). Zeitgleich wurden im Rahmen von SAFIRA II, bzw. dem Forschungsvorhaben BEOQUE des UFZ verschiedene In-situ-Technologien (RF-Heating, Air-Sparging) zur partiellen Herdsanierung vergleichend untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sollten unmittelbar im Rahmen der engen Kooperation zwischen dem UFZ und der für die Altlastensanierung im ÖGP zuständigen Behörde, der Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen Anhalt, LAF, in die weitere Entwicklung des Sanierungskonzeptes für das ÖGP einfließen.

Die thermische Sanierung erfolgte mit einer, für derartige Pilotsanierungen konzipierten mobilen thermischen Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM). Die von VEGAS konzipierte und gebaute Anlage ist Eigentum des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH – UFZ,

Leipzig. Die Planung und Durchführung der Pilotsanierung unter Einsatz der MOSAM-Anlage und wurde gemeinsam mit dem UFZ und in dessen Auftrag betrieben.

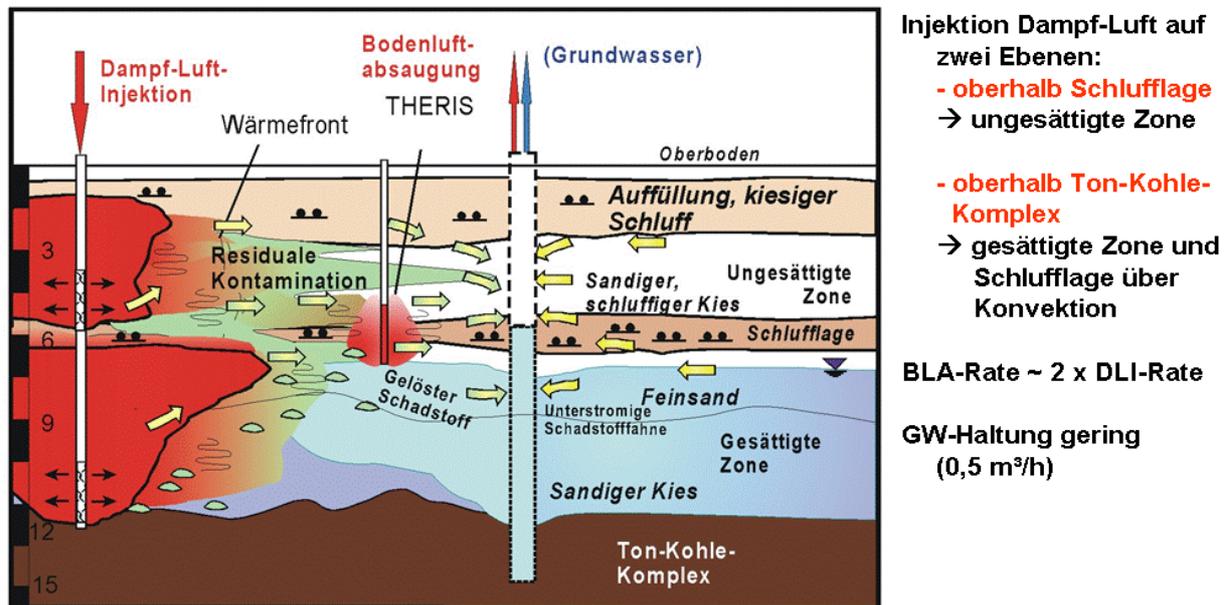


Abbildung 1: Prinzipskizze der simultanen Sanierung der gesättigten und ungesättigten Zone mittels Dampf-Luft-Injektion am Standort Zeit

Die durchgeführte thermische Pilotsanierung sollte ein definiertes Sanierungsziel in einem zeitlich festgelegten Rahmen erfüllen. Eine Reduzierung der Schadstoffmasse und Bodenluftkonzentration um mehr als 95% sollte durch das Überschreiten einer mittleren Temperatur von 75°C im Sanierungsfeld (ca. 1500 m³ Boden) erzielt werden. Hierfür war das Erzielen einer thermischen Reichweite von mehr als 2,5 m Radius in der gesättigten Zone Voraussetzung.

Vorgehensweise

Prüfung der Eignung des Verfahrens

Auf Anfrage des UFZ prüfte VEGAS die Möglichkeit des Einsatzes der Dampf-Luft-Injektionstechnik zur Reinigung des Grundwassers und Bodens am Standort unter den Aspekten:

- Lage, Art und Ausmaß der Kontamination anhand übermittelter Standortgutachten
- Hydrogeologische Charakterisierung des Standortes
- Sicherheits- und verfahrenstechnische Erweiterung von MOSAM (ATEX-Ausrüstung)
- Kosten für die Durchführung, messtechnischen Überwachung und wissenschaftliche Begleitung der thermischen Pilotsanierung mit festgelegten und zu garantierenden Sanierungszielen

Das Verfahren erschien für den mittel durchlässigen sandigen Aquifer und Teile der ungesättigten Zone grundsätzlich geeignet. Eine am Standort in unterschiedlicher Mächtigkeit vorliegende Schluffschicht in der ungesättigten Zone mit einer maximalen Mächtigkeit von 1 – 1,5 m bot die Möglichkeit des Vergleichs von konduktiver Erwärmung (THERIS) über elektrisch betriebene Heizelemente und konvektiv-konduktiver Erwärmung über Dampf-Luft-Injektion. Unter Anwendung einer Methode zur Bestimmung der Dampfausbreitung in der gesättigten Zone (Ochs S.O., 2006) anhand von Typkurven konnte eine thermische Reichweite für isotrope Verhältnisse von 2 m Radius für den Standort ermittelt werden. Auf dieser Grundlage konnte ein erforderliches Sanierungsfeld unter Einsatz der MOSAM Anlage geplant und ein mehrstufiges Sanierungskonzept unter Berücksichtigung der angestrebten wissenschaftlichen Erkenntnisse geplant und vorgeschlagen werden.

Pilotsanierung mittels Dampf-Luft-Injektion

Das Sanierungskonzept sah die Installation von drei Dampf-Injektionsbrunnen mit Verfilterung auf dem Aquiclude (Ton-Kohle-Komplex) und oberhalb einer anzutreffenden Schluffschicht in der ungesättigten Zone vor. Durch diese Konstellation konnte gezielt die gesättigte Zone, die ungesättigte Zone und die Schluffschicht thermisch saniert werden. Umrundet wurde das Sanierungsfeld von sechs Extraktionsbrunnen zur Bodenluft- und Grundwasserförderung. Insgesamt wurden 20 Temperaturmesslanzen, sowie ein Geoelektrisches Monitoring-System (UFZ, Department Grundwassersanierung) zur Temperaturüberwachung installiert. Die Entwicklung der Konzentrationen im Grundwasser konnten über 20 Monitoring-Brunnen (1", PE) bestimmt werden, die in gleichmäßigen Abständen entlang des Rands der Sanierungsfläche mittels Geoprobe-Rammtechnik angeordnet wurden.

Die thermische Sanierung sollte nach sechs Monaten Betriebszeit mit Erreichen der Sanierungsziele abgeschlossen sein. Neben dem Nachweis einer erfolgreichen Anwendung der Technologie am Standort sollte eine Kostenschätzung zur Sanierung der gesamten Schadensfläche erstellt werden.

Einrichtung des Sanierungsfeldes, Anlageninstallation und hydraulische Untersuchungen

Im Herbst 2007 wurde das Pilotsanierungsfeld auf dem Gelände der ehemaligen Benzoldestillationsanlage (Distex) eingerichtet und die mobile Sanierungsanlage in Betrieb genommen. Als erstes wurden im September 2007 die Bohrarbeiten begonnen. Aufgrund des Verdachts auf Kampfmittel nahm die Installation der drei Multilevel-Injektionsbrunnen, der sechs Extraktionsbrunnen, der 20 Temperaturlanzen und von 8 Hüllrohren für die elektrisch betriebenen Heizelemente mehr als 6 Wochen in Anspruch. Das gesamte Sanierungsfeld (140 m² Fläche, ca. 1500 m³ Boden) mit der Anlagenstellfläche wurde aus Sicherheitsgründen umzäunt und alarmgesichert.

Während der Bohrarbeiten wurden 28 Misch-Bodenproben zur Bestimmung der Kontamination im Pilotierungsfeld gewonnen. Ausgehend von dieser Belastung wurde die Betriebsweise der thermischen Sanierung festgelegt und die Sanierungszeit konnte anhand des zu erwartenden Schadstoffaustrags bei fortschreitender Erwärmung des Felds abgeschätzt werden.

MOSAM wurde im November 2007 hydraulisch angeschlossen, entsprechend ATEX explosionsgeschützt umgebaut und mit einer thermischen Nachverbrennungsanlage zur

schadlosen Verbrennung der stark benzolhaltigen Bodenluft ausgestattet. Im Dezember 2007 erfolgte die Inbetriebnahme von MOSAM mit Durchführung von hydraulischen Tests zur Ermittlung der Durchlässigkeit in Sanierungsfeld.

Durchführung der Pilotierung

Vereinbarungsgemäß begann die thermische Sanierung im Mai 2008. Die initiale Bodenluftabsaugungsphase musste aufgrund der anzutreffenden hohen Benzolkonzentrationen auf drei Wochen ausgedehnt werden. Danach folgte eine dreiwöchige Air-Sparging Phase, in der sequentiell die einzelnen Injektionsbrunnen angefahren wurden. Nach deutlichem Rückgang der Benzolkonzentrationen in der Bodenluft wurde mit der thermischen Sanierung begonnen. Diese dauerte insgesamt 19 Wochen. Unterteilt war die thermische Sanierung in vier Phasen:

- Phase 3.1: ungesättigte Bodenzone (6 Wochen Dauer)
- Phase 3.2: gesättigte Bodenzone und Schlufflagen (7 Wochen Dauer)
- Phase 3.3: gesättigte und ungesättigte Zone (3 Wochen Dauer)
- Phase 3.4: ungesättigte Zone (4 Wochen Dauer)

Aufgrund einer thermischen Reichweite der Dampfinjektion in der gesättigten Zone von ca. 5 m Radius mussten lediglich zwei der drei installierten Injektionsbrunnen zeitgleich betrieben werden. Die gewählte Reihenfolge der Sanierung: zunächst ungesättigte Zone, anschließend gesättigte Zone diente der Bestimmung des Schadstoffpotentials und bewirkte eine Laufzeitverlängerung. Zwangsläufig musste während der Sanierung der gesättigten Zone die ungesättigte Zone nochmals erwärmt werden, um die Kondensation der verdampften Schadstoffe zu vermeiden.

Während der Abkühlphase mit dem Ziel der Reduzierung der mittleren Temperatur im Sanierungsfeld unterhalb 35°C wurde die Grundwasserhaltung und Bodenluftabsaugung für eine Dauer von sechs Wochen weiter betrieben. Vier Wochen nach Ausschalten der Dampfinjektion wurde die Bodenluftentnahme für einen Tag ausgeschaltet und zur repräsentativen Bodenluftbeprobung wieder in Betrieb genommen. Die Bodenluftbeprobung diente dem Nachweis des Sanierungserfolgs. Es wurde indirekt die Restkontamination im Boden über einen Gleichgewichtsansatz anhand der Bodenluftwerte bestimmt.

Der Nachweis einer Minderung der Schadstoffbelastung um über 99% konnte während einer abschließenden Boden- und Grundwasserbeprobung im Mai 2009, also fünf Monate nach Ausschalten der Sanierungsanlage und Abkühlung des Untergrunds verifiziert werden.

Rückbau des Standorts und der Pilotanlage

Das Sanierungsgelände wurde Mitte Juni 2008 rückgebaut. Sämtliche Brunnen mussten rückgebaut werden, die Fläche eingeebnet und der Zaun abgebaut werden. Die Dauer der thermischen Pilotanlage lag bei 6 Monaten.

Ergebnisse

Der Standort ehemaliges Hydrierwerk Zeitz

Im Bereich der Benzoldestillationsanlage des ehemaligen Hydrierwerks Zeitz liegt eine massive Kontamination des Grundwassers und Bodens bis zu einer Tiefe von 12 m u. GOK vor. Der Schadensbereich schließt auch die Bereiche des ehemaligen Tanklagers, der Abfällanlagen, sowie dem Bahnverladebereich ein. Insgesamt kann von einer flächenhaften Kontamination des Untergrunds auf mehr als 2 ha Größe und einem Bodenvolumen im Bereich mehrerer zehntausend Kubikmeter ausgegangen werden. Benzolgehalte im Bereich von g/kg Boden sind keine Seltenheit.

Im Rahmen des Rückbaus der Altanlage wurden bereits die oberen Bodenschichten (2 – 3 m) großflächig ausgetauscht. Am Standort steht daher zunächst eine ca. 2 – 2,5 m mächtige Auffüllung an. Darunter folgt eine ca. 2,5 m mächtige fein- bis mittelsandige, leicht schluffige Schicht ($k_f \sim 0,5 \times 10^{-4}$ m/s), s. Abb. 2. Diese wird ab ca. 144,5 m NN von einer Schluffschicht begrenzt wird. Die Mächtigkeit der Schluffschicht beträgt ca. einen Meter. Darunter steht der eigentliche Grundwasserleiter aus sandigem Fein- bis Grobkies ($k_f \sim 5 \times 10^{-4}$ m/s) an, wobei feinklastische Lagen (Mittelsand, $k_f \sim 1 \times 10^{-4}$ m/s) in den Teufen 6,5 – 8,5 m u. GOK angetroffen werden. Die Unterkante des GWL liegt bei 11,5 – 12,5 m u. GOK und wird durch einen sogenannten Ton-Kohle-Komplex gebildet. Der Wasserspiegel liegt etwa bei 8,5 m u. GOK.

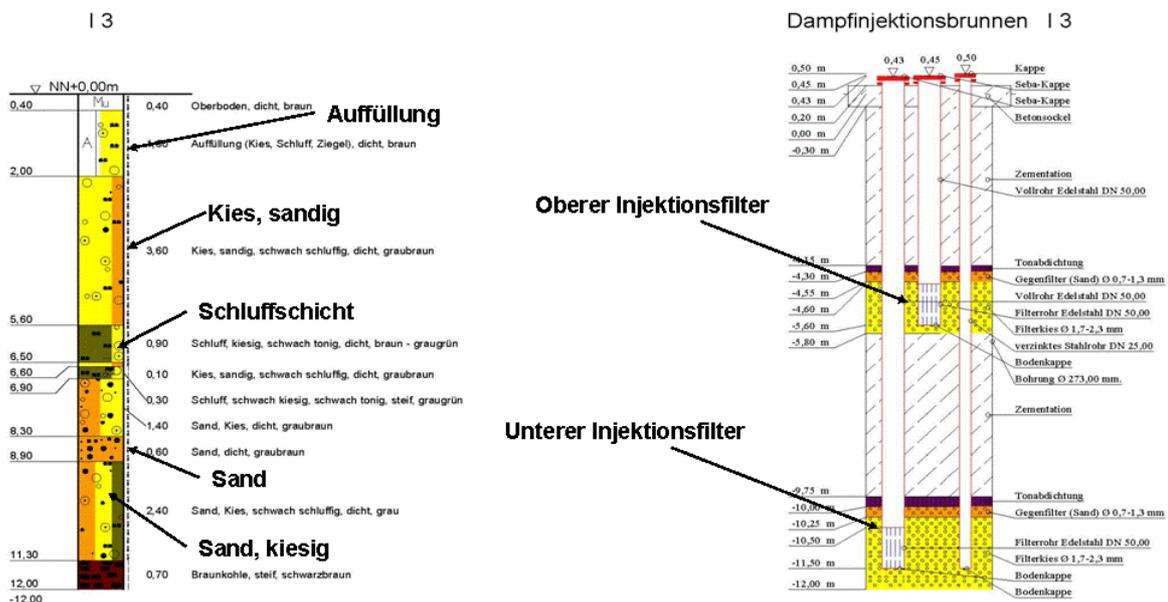


Abbildung 2: Bohrprofil und Brunnenausbau Injektionsbrunnen I3

Am Standort konnten Konzentrationen in der ungesättigten Bodenzone und im Grundwasserwechselbereich im g/kg-Bereich bestimmt werden. Während den Bohrmaßnahmen zur Erschließung des Pilotfelds wurden insgesamt 28 Bodenproben als Mischprobe aus unterschiedlichen Tiefenbereichen gewonnen. Es wurden hohe Konzentrationen im oberen Grundwasserbereich (9 – 10 m Tiefe) festgestellt. An den meisten Brunnenbohrstellen wurden

erhöhte Werte im Bereich der Schluffschichten (5 – 7 m Tiefe) bestimmt. Im Mittel lagen die Benzolkonzentrationen bei ca. 55 mg/kg Boden (BTEX: 61 mg/kg.) Angesichts der verlustbehafteten Probenahme konnte die Schadstoffmasse auf ca. 1.700 kg Benzol im Bereich der Pilotanwendung mit ca. 1.500 m³ zu behandelndem Boden abgeschätzt werden.

Grundwasserproben aus den umliegenden Überwachungsbrunnen zeigten Benzolkonzentrationen zwischen 370 mg/L (oberstromig) und unterstromig der Pilotfläche im Bereich der maximalen Löslichkeit von Benzol von 1,3 g/L.

Erschließung des Sanierungsfelds

Die Pilotanwendung erfolgte auf einem Sanierungsfeld mit einer Grundfläche von ca. 15 x 9 m und einer Tiefe von ca. 11,5 m, s. Abb. 3.

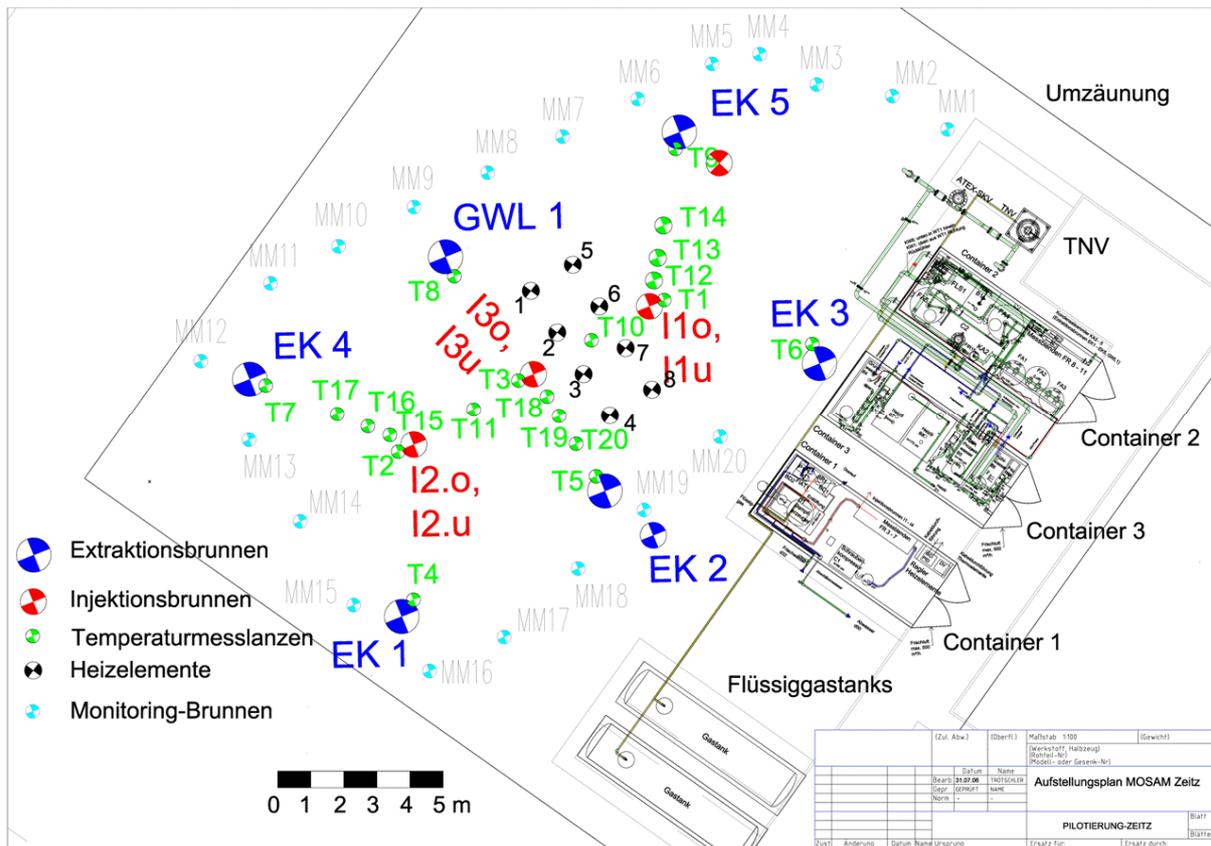


Abbildung 3: Lageplan des Pilotierungsfeldes

Das Sanierungsgebiet war in drei etwa gleichgroße Parzellen unterteilt, die nacheinander thermisch behandelt werden sollten, beginnend im Nordosten (I1), dann ein Wechsel nach Südwesten (I2) und abschließend in der Mitte (I3).

Das Sanierungsfeld wurde erschlossen durch:

- 3 Injektionsbrunnen mit je 2 Injektionsfilter zwischen 4,5 – 6 m und 10 – 11,5 m u. GOK
- 6 Bodenluftbrunnen, teilweise mit leichter Grundwasserhaltung, vollverfiltert 1 – 10 (11) m. u. GOK
- 8 elektrische Heizelemente mit je 1,5 kW-Leistung, beheizte Teufe: 4,5 – 6 m u. GOK.
- 20 Temperaturmesslanzen (Pt100), radialsymmetrisch um Injektionsbrunnen und im Ringraum der Extraktionsbrunnen zur Temperaturüberwachung (121 Messstellen)
- Geoelektrisches Temperatur-Monitoring-System (M. Hirsch, UFZ), 128 Oberflächen- und 48 Bohrlochelektroden (16 m Teufe)

Zusätzlich wurden 20 kleinskalige Überwachungsbrunnen um das Sanierungsfeld zur Kontrolle der Emissionen im Grundwasser angeordnet.

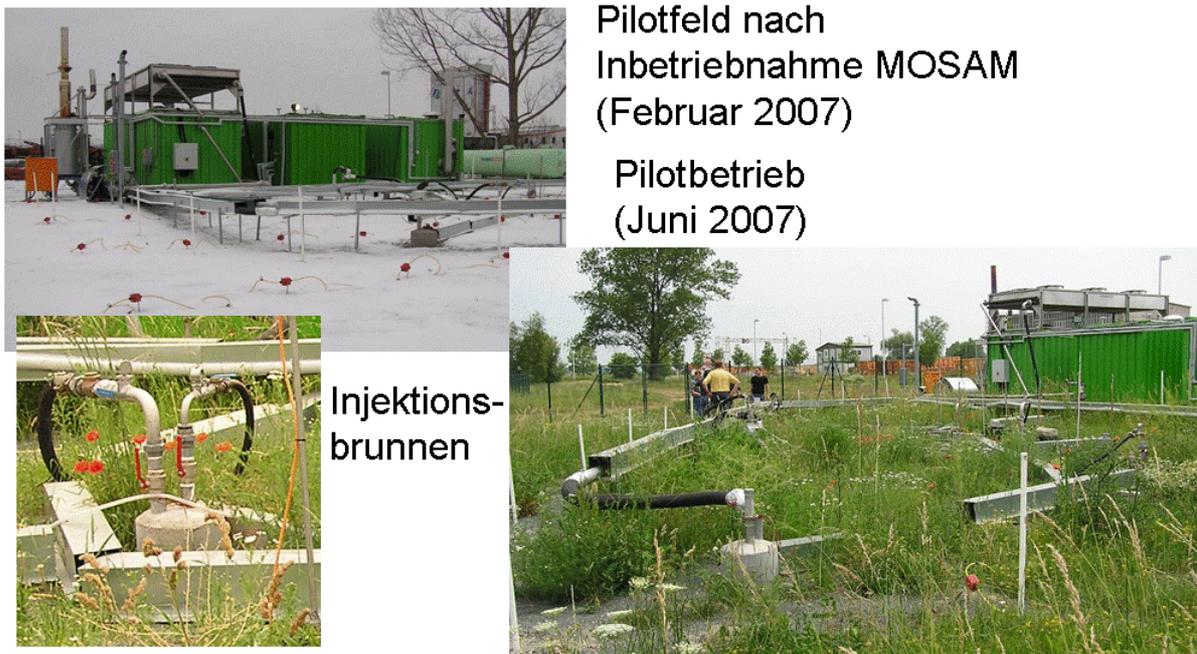


Abbildung 4: Impressionen vom Testfeld

Die Sanierungsanlage (MOSAM) ist mit einem Datenerfassungssystem mit Funkmodem ausgestattet, das eine Online-Überwachung aller kritischen Anlagenparameter, wie Drücke, Temperaturen, Volumenströme (Dampf, Luft, Wasser) und Schadstoffkonzentrationen erlaubt. Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen wurden infolge der Explosionsgefahr bei der Förderung explosibler Gase (benzolhaltige Bodenluft) entsprechend ATEX getroffen. Die Schadstoffkonzentrationen werden online mittels Wärmetönungsmessung (Ex-Schutz), sowie im Stundentakt über einen Prozess-GC bestimmt.

Fachkundiges Personal betreute und steuerte die Anlage 3 x wöchentlich vor Ort. Der Betrieb erfolgte automatisch, die Anlage wurde täglich durch die Online-Überwachung seitens VEGAS kontrolliert. Fehlermeldungen und kritische Betriebszustände wurden per SMS an den Betreiber übermittelt.

Versuchsdurchführung

Die In-situ-Sanierung untergliedert sich in mehrere Phasen:

- Phase 1:* Bodenluftabsaugung und Grundwasserhaltung (3 Wochen Dauer)
Ungesättigte Bodenzone über Bodenluftabsaugung (50 – 200 kg/h), Grundwasser über unterstromige GW-Entnahme an GWL1 und EK5
- Phase 2:* Bodenluftabsaugung, Grundwasserhaltung und Air-Sparging (3 Wochen)
Gesättigte Bodenzone mittels Air-Sparging: 20 Nm³/h, Pulsgabe 10/30 min, über die unteren Injektionsebenen in den Aquifer injiziert.
- Phase 3:* Dampf-Luft-Injektion und THERIS(ca. 19 Wochen Dauer)
Entsprechend der Schadstofflage und zur Klärung der Notwendigkeit einer Sanierung der ungesättigten Bodenzone oberhalb der anstehenden Schluffschicht erfolgte die Injektion des Dampf-Luft-Gemisches
- Phase 3.1: ungesättigte Bodenzone (6 Wochen Dauer):
Injektion zwischen 5 – 6 m u. GOK über den Injektionsbrunnen I1o bis I3o (Abb. 3) mit Raten zwischen 80 – 150 kg/h Dampf (max. 120 kW) und 40 – 70 m³/h Luft.
- Ziel: mittlere Temperatur im Sanierungsfeld > 75 °C
- Phase 3.2: gesättigte Bodenzone und Schlufflagen (7 Wochen Dauer):
zwischen 10 – 11 m u. GOK über die Injektionsbrunnen I1u bis I3u mit maximalen Injektionsraten (120 kW und 70 m³/h Luft).
- Ziel: mittlere Temperatur im Sanierungsfeld > 60°C, radiale Ausbreitung der Dampffront in gesättigter Zone > 2,5 m, Rückgang der Benzolkonzentrationen < 1,5 g/m³ Bodenluft (nach 12 Wochen)
- Phase 3.3: gesättigte und ungesättigte Zone (3 Wochen Dauer):
über die Injektionsbrunnen I1u, I2u, I1o und I3o mit ca. 170 kg/h Sattdampf (120 kW) und 30 – 60 kg/h Luft.
- Ziel: mittlere Temperatur im Sanierungsfeld > 85°C (Siedetemperatur Benzol), Austrag von Benzol aus ungesättigter Zone, das aus Schluffschicht ausdampft, Rückgang der Benzolkonzentrationen < 1,5 g/m³ Bodenluft
- Phase 3.4: ungesättigte Zone (3 - 4 Wochen Dauer):
über die Injektionsbrunnen I1o, I2u, I3o und EK3 mit ca. 170 kg/h Sattdampf (120 kW) und 40 – 60 kg/h Luft.
- Ziel: Austrag von Benzol aus ungesättigter Zone, Behandlung von Randbereich um EK3, Rückgang der Benzolkonzentrationen < 1 g/m³ Bodenluft
- Phase 4:* Abkühlungsphase, ca. 6 Wochen
Zur Intensivierung der Abkühlung wurde Druckluft abwechselnd in die Injektionsbrunnen der gesättigten (Air Sparging) und ungesättigten Zone (Air-Venting) mit 50 – 70 m³/h intervallweise injiziert. Die Abkühlphase wurde bei einer mittleren Temperatur im Pilotfeld von 55°C beendet.

Ergebnisse der Pilotinjektion

Dampfausbreitung

Die Dampfausbreitung in der ungesättigten Zone (Phase 3.1) erfolgte homogen, d.h. radial symmetrisch um den Injektionsbrunnen im Bereich von I2 und I3. Um I1 strömte der Dampf bevorzugt in Richtung EK5, EK2 und GWL1, s. Abb. 5. Über Injektion eines Teils der Dampfmenge in EK3 konnte dieser Bereich in der ungesättigten Zone gezielt auf die angestrebte Temperatur von 85°C erwärmt werden, Abb. 5 (Tag 44) und Abb. 8.

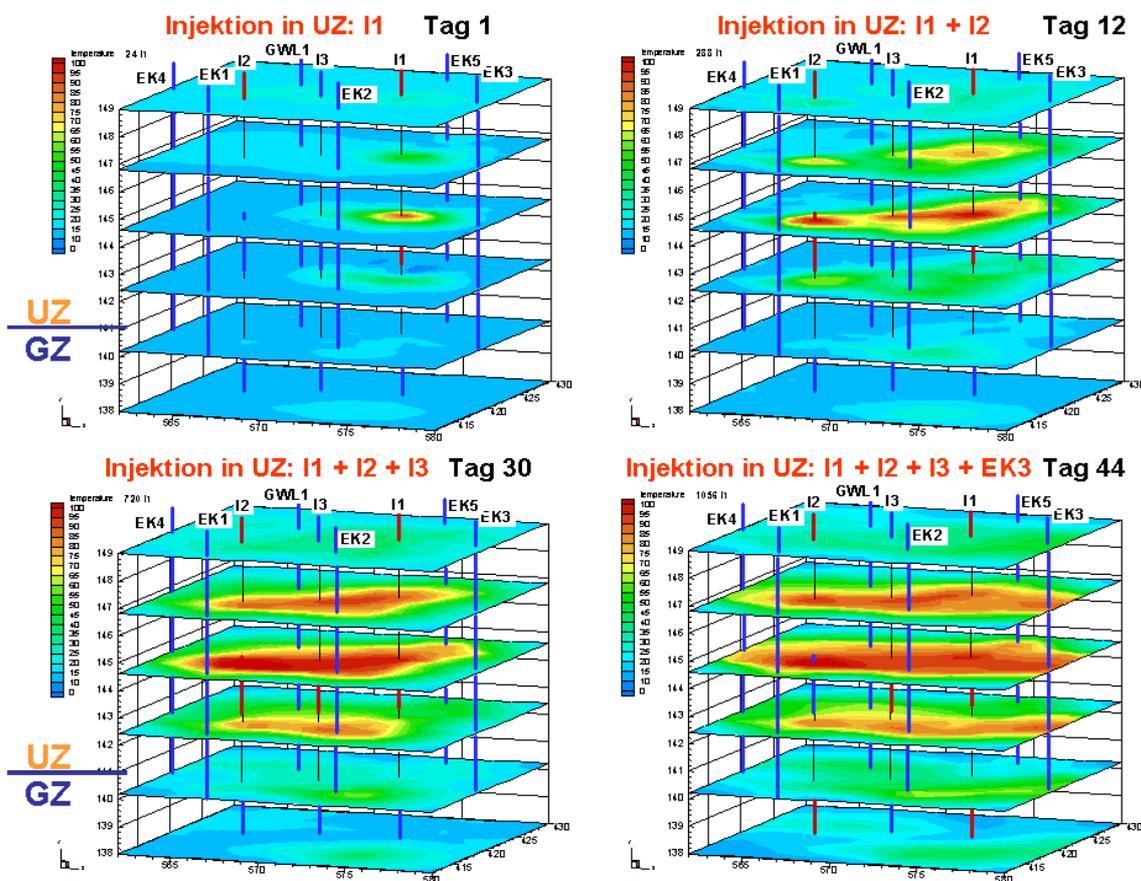


Abbildung 5: Wärmeausbreitung während Phase 3.1 (ungesättigte Zone), GOK bei 149,5 m NN

Zu Beginn von Phase 3.2 wurde das Dampf-Luft-Gemisch (150 kg/h Dampf + 80 kg/h Luft) über I1u in die gesättigte Zone auf Höhe des anstehenden Ton-Kohle-Komplexes (9,5 – 10,5 m u. GOK) injiziert. Innerhalb einer Woche konnte der Dampfdurchbruch auf einer Tiefe zwischen 8 – 10 m u. GOK an den umliegenden Extraktionsbrunnen GWL1, EK2, EK5 und mit niedrigeren Temperaturen an EK3 bestimmt werden (Abb. 6). Die „thermische Reichweite“ lag am Standort um 5,5 m. Die Temperaturen in der gesättigten Zone stiegen steil an (graue Kurve, Abb. 8).

Nach 20 Tagen der Phase 3.2 wurde der Injektionsbrunnen I2u zugeschaltet und jeweils eine Dampf-Luft-Mischung mit 50 kW Leistung injiziert. Die Dampffront breitete sich auch im Bereich um I2 rasch aus, wobei der Dampfdurchbruch auf Höhe des Kapillarsaums (8 m u. GOK) sehr

zünftig erfolgte, die gesättigte Zone im Bereich von 10 m u. GOK wurde in Folge der vergleichsweise geringen Injektionsleistung von 50 kW langsamer auf über 85°C erwärmt: EK1 nach 29 Tagen und EK4 nach 34 Tagen, s. Abb. 6.

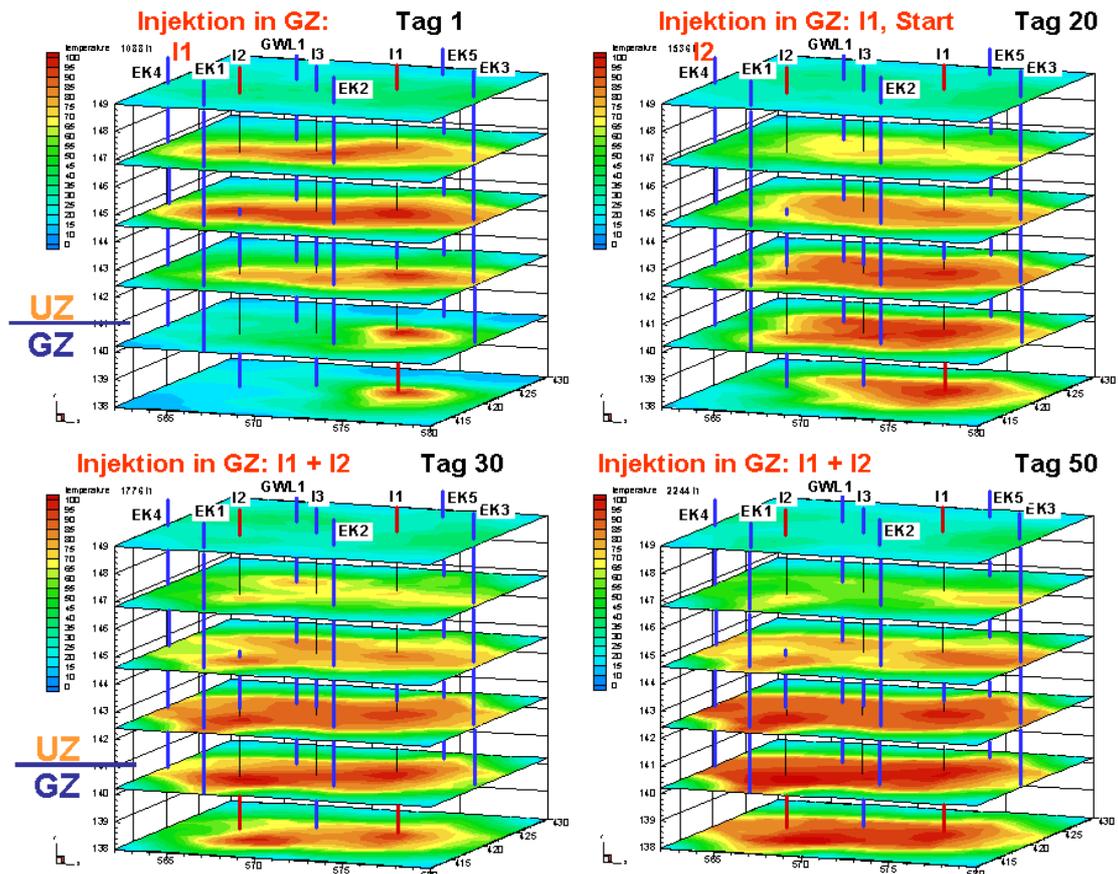


Abbildung 6: Wärmeausbreitung während Phase 3.2 (gesättigte Zone)

Während der anschließenden Phase 3.3 mit einer Injektionsleistung von 80 kW in die gesättigte und 40 kW in die ungesättigte Zone konnte der Schluffbereich auf Temperaturen über 85°C und die ungesättigte Zone auf eine mittlere Temperatur von 90°C erwärmt werden (gelbe Kurve in Abb. 8). Die mittlere Feldtemperatur überstieg die Siedetemperatur von Benzol mit 85°C. Nach 18 Tagen waren die ungesättigte Zone und insbesondere der obere Bereich der ungesättigten Zone (ca. 6 – 3 m u. GOK) über Siedetemperatur des Benzols erwärmt, s. Abb. 7, links.

Während Phase 3.4 sollte gezielt die ungesättigte Zone, insbesondere der Bereich um EK3 über die Siedetemperatur von Benzol erwärmt werden. In Folge der schlechten Durchlässigkeit um I10 musste die ungesättigte Zone in diesem Bereich durch den Wärmetransport aus der gesättigten Zone (Injektion in I2u), sowie einer erhöhten Injektionsleistung an I30 erwärmt werden, s. Abb. 7, rechts.

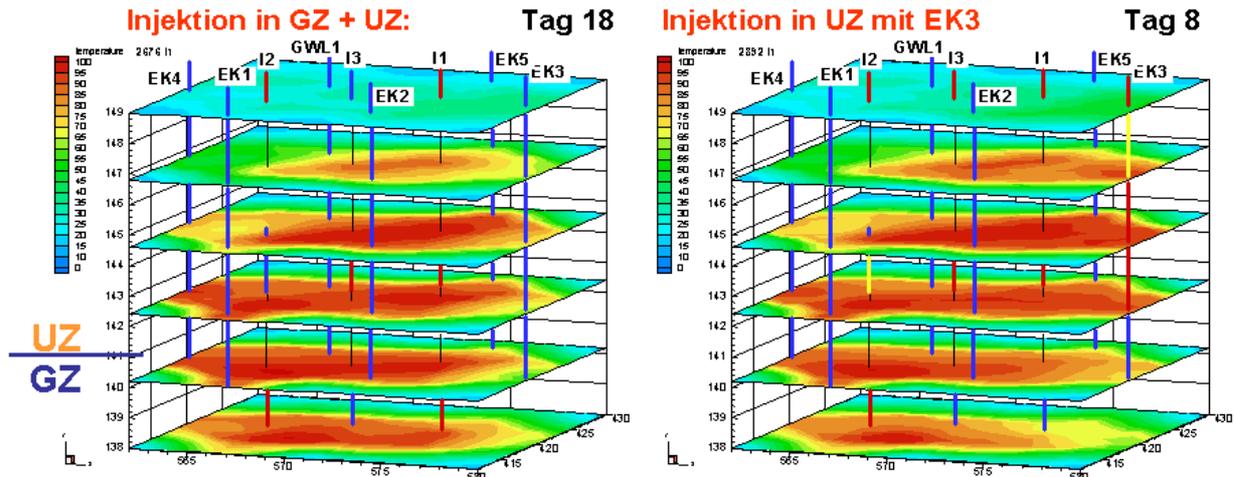


Abbildung 7: Wärmeausbreitung Phase 3.3 und 3.4 (GZ+UZ, nur UZ)

Temperaturentwicklung und Energiebilanz

Zum Ende der Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone (Phase 3.1) wurden ca. 90 MWh an thermischer Energie (Erzeugungskosten: ca. 70 EUR/MWh) eingesetzt, über die Bodenluftabsaugung wurden ca. 10 MWh dem Sanierungsfeld entzogen (Abb. 8: Differenz Eintrag und Feldinhalt). Die mittlere Temperatur in der ungesättigten Zone (gelbe Kurve, Abb. 8) überstieg mit 85°C deutlich den Zielwert von 75°C.

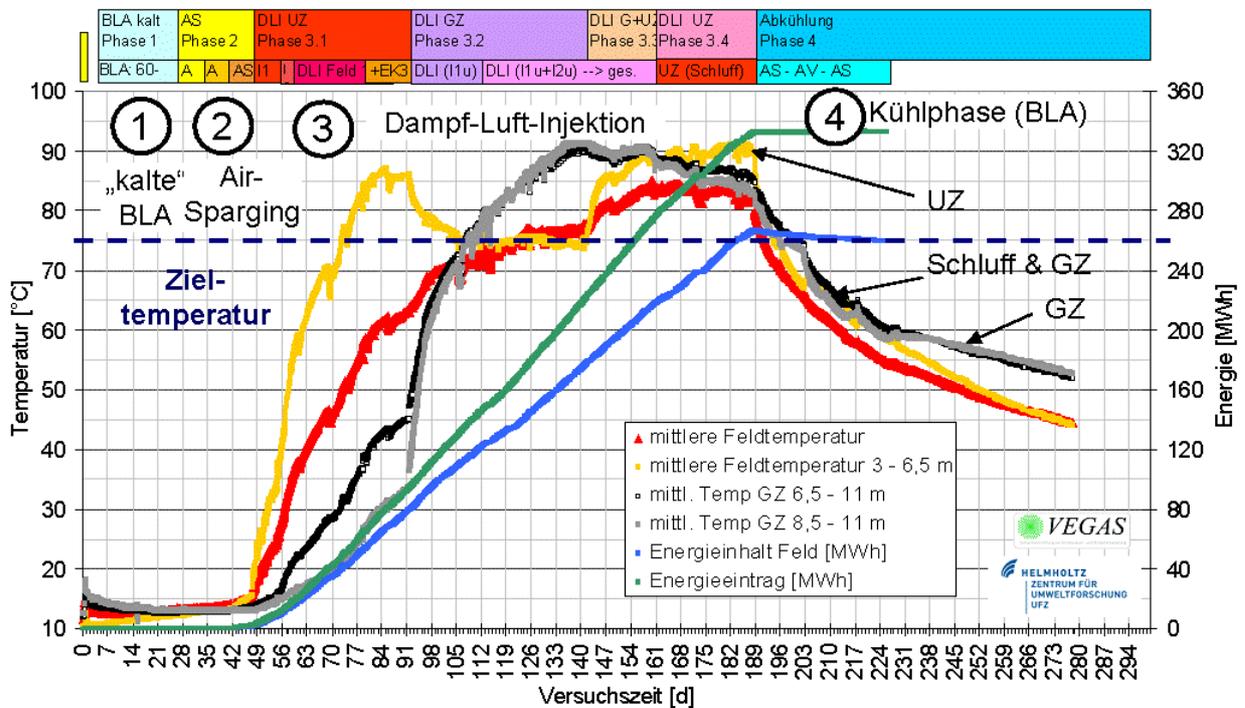


Abbildung 8: Erwärmung des Sanierungsfelds und Energieeinsatz

Aufgrund erhöhter Energieverluste über das Grundwasser mussten weitere 130 MWh Energie für die Aufheizung der gesättigten Zone (Phase 3.2) und den Bereich unterhalb der

Schluffschichten aufgewendet werden. Mit einer mittleren Temperatur im Sanierungsfeld von 77°C und einer Temperatur von über 90°C in der gesättigten Zone (8,5 – 11 m u. GOK, graue Kurve, Abb. 8) konnten die Zielwerte (mittlere Temperatur in GZ: 60°C) deutlich überschritten werden.

Für die Aufheizung der Schluffschicht (Phase 3.3) waren weitere 60 MWh erforderlich. Durch die simultane Erwärmung beider Zonen stieg die mittlere Temperatur im Sanierungsfeld (rote Kurve, Abb. 8) auf etwa 85°C, d.h. der Siedetemperatur von Benzol an. Bis zum Ende der Dampfinjektion wurden insgesamt 330 MWh thermischer Energie injiziert, während 66 MWh über die Bodenluftabsaugung und Grundwasserhaltung entzogen wurden. Bei einer mittleren Temperatur von 85°C und einer abgeschätzten, erwärmten Kubatur von ca. 1.500 m³ ergibt sich eine gespeicherte Energiemenge von ca. 54 MWh. Die Differenz in Höhe von ca. 210 MWh, also ca. 65% der eingesetzten Energie gingen über den Feldrand verloren.

Schadstoffaustrag

Bereits zu Beginn der Pilotierung innerhalb der dreiwöchigen Bodenluftabsaugungsphase (Phase 1) konnte ein hoher Anteil Benzol entfernt werden: 2.130 kg, s. Abb. 9. Dies ist mehr Masse als durch die Bodenproben im Sanierungsfeld erwartet wurde und liegt wohl in der großen Reichweite der Bodenluftabsaugung begründet. Das für eine „kalte“ Bodenluftabsaugung (Phase 1) typische logarithmische Abklingverhalten der Bodenluftkonzentrationen konnte mit Anfangswerten um 70 g/m³ Benzol fallend auf ca. 25 g/m³ festgestellt werden, s. Abb. 9, blaue Linie.

Der Rückgang der Benzolkonzentrationen setzte sich während Phase 2, dem Air-Sparging fort. Bei intervallweiser Luftinjektion und Wechsel der Injektionsbrunnen stiegen die Konzentrationen jeweils für die Dauer einiger Stunden an. Zum Ende von Phase 2 lagen die Werte um 15 g/m³. Insgesamt konnten in 3 Wochen 1.920 kg Benzol extrahiert werden. Das dreiwöchige Air-Sparging zeigte sich hinsichtlich einer Steigerung des Schadstoffaustrags als weniger effizient als erwartet.

Während Phase 3.1 konnte stets zu Beginn der Injektion der Dampf-Luft-Mischung in das jeweilige Sanierungsfeld ein Anstieg der Konzentrationen, teilweise über mehrere Tage festgestellt werden. Prinzipiell fielen die Konzentrationen der Bodenluft weiterhin ab, jedoch wesentlich langsamer als die Extrapolation der logarithmischen Abklingkurve der Phase 1 ergab, s. Abb. 9. Eine deutliche Erhöhung des Austrags ergab die Erhöhung der Luftinjektionsrate (Tag 60). Bis zum Ende der Injektion in die ungesättigte Bodenzone (Tag 91, 6 Wochen Dampfinjektion) konnten ca. 2.280 kg Benzol ausgetragen werden. Die Benzolkonzentrationen in der Bodenluft lagen bei Umstellung auf die Injektion in die gesättigte Zone kleiner 1 g/m³.

Abgeschätzt aus dem „typischen Abklingverhalten“ (blaue Kurve, Abb. 9) und der tatsächlich extrahierten Masse ergab sich seit Beginn der Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone bis zum Schnittpunkt der beiden Kurven (Tag 84) eine theoretisch extrahierbare Masse mittels kalter Bodenluftabsaugung von ca. 1.550 kg Benzol. Dies sind ca. 630 kg weniger als tatsächlich ausgetragen wurden. Aufgrund der Lage des Pilotfelds kann diese Masse der thermischen Sanierung der ungesättigten Zone des Pilotfelds zugeordnet werden.

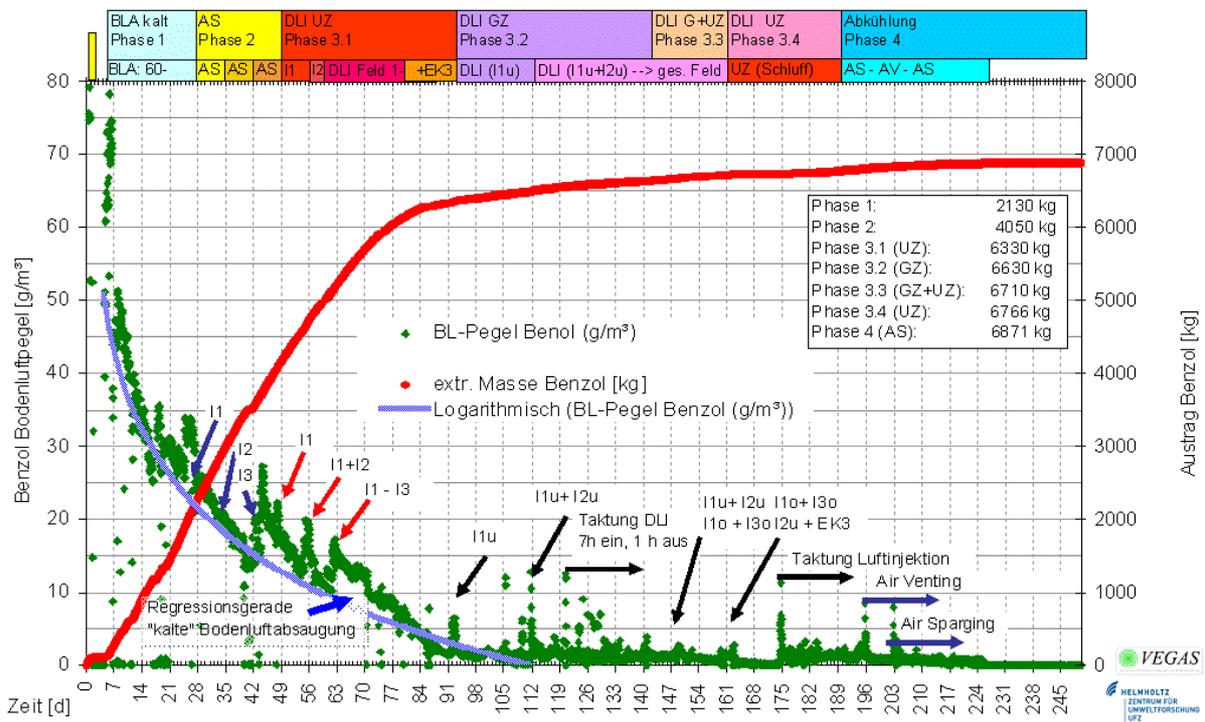


Abbildung 9: Verlauf Benzolkonzentrationen und Massenbilanz

In Phase 3.2, der Injektion der Dampf-Luft-Mischung in die gesättigte Zone, konnten in sieben Wochen lediglich 300 kg Schadstoff entfernt werden. Gegen Ende dieser Phase wurde das erwartete Ausgasen von Benzol aus der Schluffschicht in die ungesättigte Zone beobachtet (ca. Tag 133).

Zur Vermeidung der Kondensation der Schadstoffe und Förderung des Abtransport aus der ungesättigten Zone wurde in der dreiwöchigen Phase 3.3 die Dampf-Luft-Mischung mit einer Leistung von ca. 40 kW in die ungesättigte Zone injiziert, während die weitere Aufheizung der Schluffschicht über „Dampf-Unterströmung der Schluffschicht“ und konduktivem Wärmeübergang aus der gesättigten Zone (80 kW) erfolgte. Mehrtägig erhöhte Benzolkonzentrationen in Peakform ergaben sich bei Änderungen der Injektionsleistung der einzelnen Brunnen (z.B. Tag 140 und 150). Der Schadstoffaustrag ging stark zurück und die Konzentrationen schwankten zwischen 1 bis 2 g/m³ Benzol. Die thermische Sanierung der Schluffschicht konnte aufgrund der Temperaturen zwischen 92 und 95°C als abgeschlossen angesehen werden. Der Benzolaustrag aus der Schluffschicht lag lediglich bei 80 kg.

In der abschließenden Phase 3.4 (Dampf-Luft-Injektion UZ) wurde gezielt die ungesättigte Zone, insbesondere der Bereich um EK3 behandelt. Hier lagen am Ende von Phase 3.3 noch Benzolkonzentrationen um 6 g/m³ in der Bodenluft vor. Zu Beginn der Injektion in EK3 kam es zu einem deutlichen Anstieg der Konzentrationen mit einem steilen Abfallen nach 4 Tagen auf Werte um 400 mg/m³. Durch eine getaktete Zugabe von Luft konnte der Schadstoffaustrag nochmals gesteigert werden (0,8 ↔ 3,3 g/m³ Benzol) und mit Unterschreitung des Zielwerts von 1 g/m³ wurde die Dampf-injektion beendet.

Zu Beginn von Phase 4 wurde zur Förderung der Kühlung der ungesättigten Zone zunächst Luft in diesen Bereich mit hoher Rate (90 m³/h) injiziert (Air Venting), auskondensierender Restschadstoff konnte hiermit gezielt abgeführt werden (Peak-Verhalten, Tag 196, Abb. 9). Die Benzolkonzentrationen pendelten sich auf Werte um 600 mg/m³ Bodenluft ein. Zur weiteren Förderung der Abkühlung der gesättigten Zone wurde die Luftinjektion umgestellt (Air Sparging, Tag 203) und es erfolgte ein kurzzeitiger erhöhter Austrag von Benzol. Ein weiterer Wechsel zum Air Venting zeigte keine Steigerung der Austragsleistungen. Eine Woche vor Ausschalten der aktiven Kühlung lagen die Benzolkonzentrationen bei 200 mg/m³. Insgesamt wurden 6.780 kg Benzol innerhalb 6 Monaten aus dem Schadenszentrum entfernt.

Abbildung 10 verdeutlicht den Rückgang der Benzolkonzentrationen in der extrahierten Bodenluft über die Sanierungsdauer.

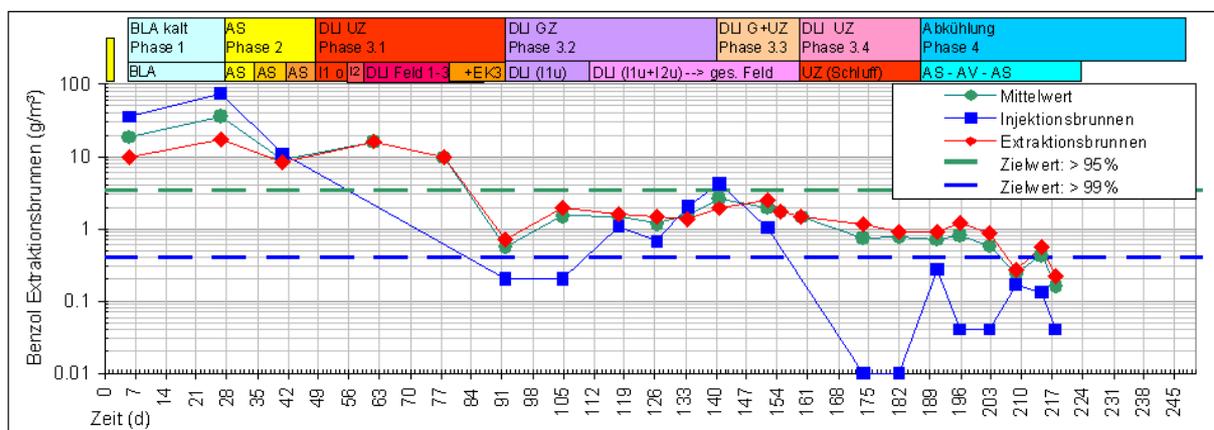


Abbildung 10: Entwicklung der Benzolkonzentration in der Bodenluft

Nachweis des Sanierungszielwerts

Ziel der thermischen Sanierung war die partiellen Schadensherdentfernung (partial source removal). Als Leistungsnachweis der Sanierung des Schadensherds wurde die Entfernung von mehr als 95% der Schadstoffmasse als partielle Schadensherdentfernung vereinbart. Da bereits während Phase 1 und 2 mehr Benzol aus dem Pilotfeld extrahiert wurden als über die naturgemäß fehlerbehaftete Bodenbeprobung vor Beginn abgeschätzt wurde, wurde als Referenzwert für die Schadstoffmasse die extrahierte Masse von ca. 6780 kg Benzol in Bezug zum behandelten Bodenvolumen (ca. 1300 m³) gesetzt und der mittlere Schadstoffgehalt auf 3,3 g Benzol je kg Boden angesetzt.

Entsprechend dem mittleren C_{org}-Gehalt der im Rahmen der Bohrarbeiten gewonnenen Bodenproben erfolgte über einen Massenbilanzansatz (K_{OC}-Ansatz, BUWAL, 1998) die Berechnung der Zielwerte an Benzol in der Bodenluft bei Erreichen des Sanierungszielwerts. Über eine integrale Probenahme und Analyse der extrahierten Bodenluft aus den Extraktionsbrunnen und den Injektionsbrunnen (9 integrale Proben) erfolgte die Berechnung der mittleren Schadstoffkonzentration der extrahierten Bodenluft nach der Sanierung.

Für eine Schadstoffentfernung von 99,9% würde die Restbelastung mit Benzol im Boden bei 3,3 mg/kg liegen. Dies entspricht einer Gleichgewichtskonzentration von Benzol in der Bodenluft von 3,4 g/m³. Der Mittelwert der neun integralen Proben lag bei 0,175 g/m³. Rückgerechnet

bedeutet dies eine Gleichgewichtskonzentration von Benzol im Boden von 0,16 mg/kg. Dies bedeutet eine rechnerische Sanierungsleistung von 99,98%. Das Sanierungsziel mit einer Reinigungsleistung von über 95% konnte somit gesichert erreicht werden.

Zur Verifizierung der Reinigungsleistung wurden fünf Monate nach Ende der thermischen Sanierung zehn Bodenproben im Inliner-Verfahren mit Kühlung der Inliner auf 4°C genommen. Sieben Proben wiesen Gehalte kleiner 0,05 mg Benzol/kg Boden auf. Im Mittel lagen die Gehalte bei 0,5 mg/kg. Für die Proben aus der ungesättigten Zone lag der Mittelwert bei 0,1 mg/kg und bestätigte somit die hohe Sanierungsleistung und die abgeleiteten Werte über den K_{OC} -Ansatz von 0,16 mg/kg. Die Benzolgehalte der Bodenproben aus der gesättigten Zone lagen im Mittel bei 2,2 mg/kg Boden. Die im Vergleich zur ungesättigten Zone erhöhten Werte, die Reinigungsleistung läge bei 99,9%, können auf den Gehalt an gelösten Benzol im Grundwasser mit Werten um 100 mg/L zurückgeführt werden.

Entwicklung der Benzolkonzentrationen im Grundwasser

Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II sollte der Einfluss einer partiellen Schadensherdsanierung auf das Emissionsverhalten untersucht werden. Erste Hinweise auf die Entwicklung konnte durch Beprobung von 20 Grundwassermessstellen, die das Pilotfeld umrandeten, s. Abb. 11, gewonnen werden. Die räumliche Darstellung der Konzentrationen an den Überwachungspegeln verdeutlicht den Einfluss der Dampf-injektion in die gesättigte Zone (Abb. 11, unten links). In Folge der Dampf-injektion an I1 und I2 wird höher kontaminiertes Grundwasser in die Bereiche außerhalb der Extraktionsbrunnen transportiert (EK1, EK4, EK3). Der Effekt ist wohl aufgrund des geringen hydraulischen Gradienten auch in südlicher Ausbreitung, entgegen der Grundwasserströmungsrichtung zu erkennen. Die Verteilung der BTXE im Grundwasser nach Ende der Dampf-injektion (Abb. 11, unten rechts) verdeutlicht den allseitigen Rückgang der Schadstoffkonzentrationen um 75% im Umfeld des Sanierungsbereichs.

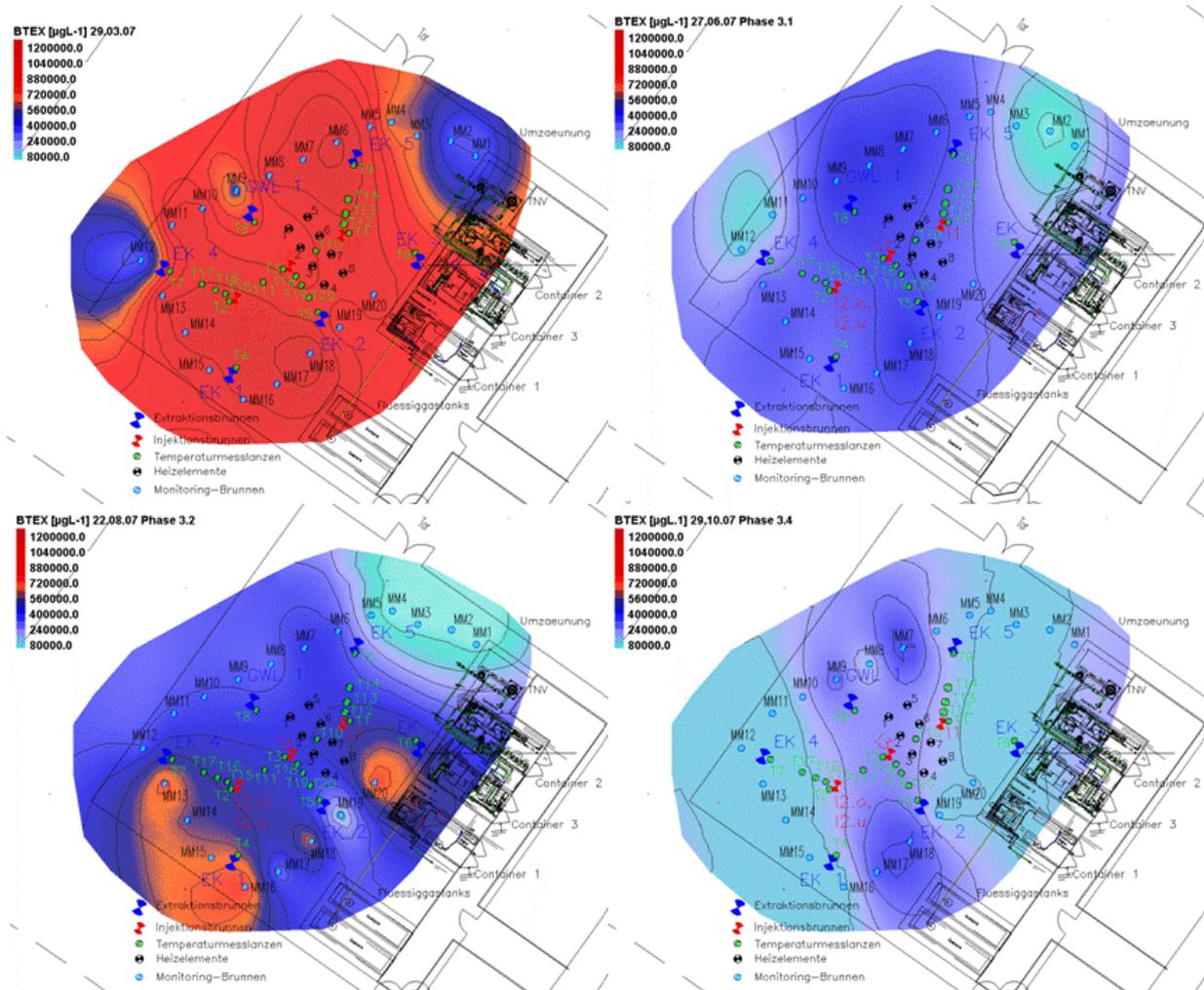


Abbildung 11: Räumliche Darstellung der BTXE-Konzentrationen an den Überwachungspegeln MM

Die Bestimmung der Emissionen aus dem Pilotfeld zur Beurteilung des Einflusses der partiellen Schadensherdentfernung ist problematisch. Entsprechend den großräumigen hydraulischen Bedingungen strömt das Grundwasser im Sanierungsbereich nach NW mit Änderung der Strömungsrichtung im Bereich des Sanierungsfelds über Nord nach NE. Messungen zu Zeiten hoher Grundwasserstände zeigen jedoch eine Grundwasserfließrichtung nach Ost. Vor Beginn der Sanierung konnte lokal eine Fließrichtung nach West bestimmt werden. Eine abschließende Messung der Wasserstände zwei Monate nach Sanierungsende zeigte eine GW-Fließrichtung nach NE. Anhand der gemessenen Gradienten und der hydraulischen Durchlässigkeit kann von einer Abstandsgeschwindigkeit von ca. 2 cm/d ausgegangen werden. Unter Berücksichtigung der wechselnden Fließrichtungen ist eine gesicherte Emissionsbetrachtung nur über lange Beobachtungszeiträume möglich.

Kostenschätzung

Ein weiteres Ziel der Pilotanwendung war die Bestimmung der Sanierungskosten für eine thermische Sanierung im Vergleich zu „klassischen“ Methoden wie Air-Sparging oder Bodenluftabsaugung und Grundwassersanierung.

Zunächst wurden die Kosten zur Sanierung des Pilotfelds ermittelt und verglichen. Mit einem Austrag von ca. 6.420 kg Benzol aus der ungesättigten Zone, d.h. 97% des gesamten Austrags erscheint der Einsatz von Air-Sparging im Grundwasser unter einem Kosten-Nutzen-Aspekt nur beschränkt zielführend. Den geschätzten Mehrausgaben des Air-Sparging in Höhe von ca. 20.000 EUR im Vergleich zur „kalten“ Bodenluftabsaugung steht eine ausgetragene Masse von 300 kg aus der gesättigten Zone gegenüber.

Die Dampf-Luft-Injektion ist mit 431.000 EUR um ca. 195.000 EUR teurer als die kalte BLA (236.000 EUR). Führt man auch hier eine Kosten-Nutzen-Betrachtung durch, so könnte dem finanziellen Mehraufwand ein gesicherter Austrag von ca. 1.060 kg Benzol (Phase 3.1 – 3.3) aus der UZ, GZ und den Schluffschichten sowie die kurze Sanierungszeit durch die Dampf-Luft-Injektion gegenübergestellt werden. Auf der anderen Seite könnte über die Mehrkosten von 195.000 EUR die „kalte“ BLA ca. 15 Monate (jährliche Betriebs- und Anlagenmietkosten von ca. 155.000 EUR) weiter betrieben werden. Bei sehr optimistischer Einschätzung könnte erwartet werden, dass in diesem Zeitraum auch die Schadstoffe aus den ungesättigten, im Falle der DLI thermisch erschlossenen Bereichen ausgetragen werden.

Insgesamt erscheint die Anwendung einer „kalten“ Bodenluftabsaugung mit Grundwasserhaltung und einer entsprechend der Pilotanwendung intensiven Absaugrate als kostengünstigste Sanierungsmethode am Standort. Mit einem gewissen Risiko muss in diesem Falle die Reinigung des Untergrundes auf Zielwerte/Orientierungswerte entsprechend Bundes-Bodenschutzgesetz, bzw. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung angesehen werden. Die entsprechenden Zielwerte könnten jedoch durch die thermische Sanierung erreicht werden.

Basierend auf den Austragsraten, dem Sanierungsverlauf, den hydrogeologischen Voraussetzungen, dem Energieeinsatz und dem Grad der Kontamination wurden für verschieden große Sanierungsflächen die Kosten einer thermischen Sanierung des Grundwasserschwankungsbereichs und der ungesättigten Zone abgeschätzt.

Je nach Feldgröße bewegen sich die Kosten im Bereich zwischen 125 bis 260 EUR/m³ behandelten Bodens. Für eine großflächige Sanierung des Schadenszentrums im Bereich der Tanklager, Abfüll- und Verladeanlagen (ca. 30.000 m³ Boden) entstünden Kosten von maximal 125 EUR/m³ Boden und eine Applikationszeit im Bereich von 2 – 3 Jahren. Die anzusetzenden Energiekosten liegen im Bereich von maximal 25% der Gesamtkosten und wären somit geringer als die technologiespezifischen Kosten (Temperaturmesstechnik, Online-Schadstoffüberwachung, etc.).

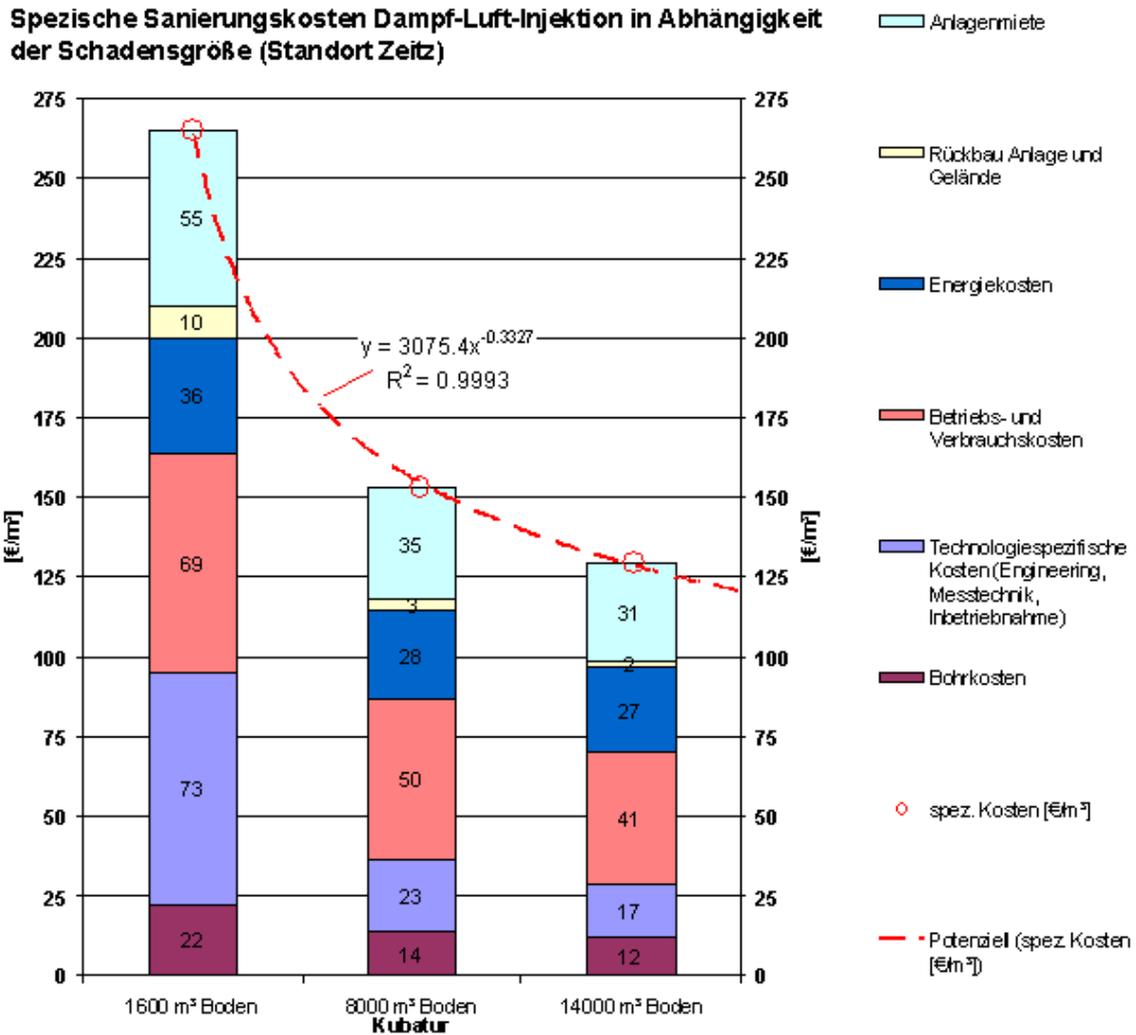


Abbildung 12: Spezifische Sanierungskosten der Dampf-Luft-Injektion am Standort Zeit

Alternative Behandlungsmethoden, wie z.B. ein Aushub der hochbelasteten Bereiche (Benzolgehalte im g/kg Bereich) mit Austausch der Bodens dürfte im selben Kostensegment, ca. 60 EUR/to liegen. Ein Aushub erfordert ein hohes Maß an Baustellensicherung und Arbeitsschutz aufgrund der bestehenden explosiven Atmosphäre im Untergrund während des Bodenaustauschs und der sehr niedrigen maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK, bzw. TRK) für Benzol.

Zusammenfassung und Ausblick

Auf dem Gelände einer ehemaligen Benzolfabrik wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens SAFIRA II eine thermische Pilotsanierung durchgeführt mit dem Ziel, die Auswirkung einer teilweisen Sanierung des Schadensherds („Partial Source Removal“) auf die Schadstoffemission zu untersuchen. Das Schadstoffinventar im Pilotfeld (1.300 – 1.600 m³) wurde zu Beginn der Sanierung anhand der gewonnenen Bodenproben auf 1.700 kg Benzol abgeschätzt.

Die Dampf-Luft-Injektion erfolgte unter fachtechnischer Überwachung, sowie wasser- und immissionsrechtlicher Erlaubnis seitens des Landratsamts Burgenlandkreis. Die Leitung des Pilotversuchs oblag dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, UFZ, Department Grundwassersanierung. Mit der Durchführung und wissenschaftlichen Begleitung war VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart beauftragt.

Eine erste große Schadstoffmenge konnte bereits während Phase 1 (kalte Bodenluftabsaugung: 2.100 kg) entfernt werden. Während Phase 2 (Air-Sparging) konnte eine geringe Steigerung des Austrags erzielt werden (insgesamt 1.900 kg). Insgesamt wurden während Phase 1 und 2 ca. 59% der gesamten Schadstoffmasse ausgetragen. Während der Injektion der Dampf-Luft-Mischung in die ungesättigte Zone wurden weitere 2.300 kg Benzol entfernt. Bei der anschließenden Injektion unterhalb Schluffschicht konnten noch ca. 300 kg Benzol (~ 5%) in 7 Wochen aus dieser Schicht entfernt werden, was im Vergleich zu den anderen Austragsraten als wenig effektiv betrachtet werden kann. Der Schadstoffaustrag durch konduktive Erwärmung der anstehenden Schluffschicht mit einer Dauer von ca. 7 Wochen kann auf 90 – 130 kg beziffert werden und erscheint im Vergleich zu dem anfänglichen Austrag gleichfalls als wenig effektiv. Der Anteil der thermischen Sanierung (Phase 3 und 4) lag bei 2.823 kg (41%).

Die angestrebten mittleren Temperaturen in der ungesättigten Zone (75°C) konnten mit annähernd 90°C deutlich überschritten werden. Auf demselben Temperaturniveau lag die gesättigte Zone, hier waren 60°C angestrebt. Die Dampfausbreitung in der gesättigten Zone übertraf mit über 5 m radiale Reichweite die erwartete Ausbreitung von ca. 2 – 2,5 m deutlich. Die vollständige thermische Erschließung des nordöstlichen Bereichs des Sanierungsfeldes zwischen I1 und EK3 konnte nur über eine zusätzliche Dampf-injektion in EK3 erreicht werden. Ein Betrieb der Festen Wärmequellen zur Erwärmung der anstehenden, gering mächtigen Schluffschicht in der ungesättigten Zone war aufgrund der effektiven Erwärmung durch die Dampf-Luft-Injektion nicht durchgängig erforderlich.

Insgesamt wurden 333 MWh thermische Energie injiziert, davon wurden 68 MWh, also ca. 21% über die Bodenluftabsaugung und Grundwasserhaltung entzogen. Mit einer mittleren Temperatur von 85°C und einer Kubatur von ca. 1.500 m³ ergibt sich eine gespeicherte Energiemenge von ca. 54 MWh. Etwa 63% der eingesetzten Energie wurden über Wärmeleitung über den Feldrand und das Grundwasser an die Umwelt abgegeben.

Die Konzentrationen in der extrahierten Bodenluft zu Beginn der Maßnahme lagen um 60 g/m³, während der Abkühlphase kleiner 200 mg/m³. Über eine abschließende Bodenluftbeprobung während der Abkühlphase konnte eine Sanierungseffizienz von über 99% nachgewiesen werden. Die auf der Bodenmatrix verbliebene Restbelastung wurde anhand einer Massenbilanzierung (K_{OC} -Ansatz) und dem Verteilungsgleichgewicht zwischen wässriger und gasförmiger Phase berechnet. Sie lag bei 0,16 mg Benzol je kg Boden. Der durchschnittliche Benzolgehalt lag vor der Sanierung bei ca. 3 g/kg Boden. Im Rahmen einer abschließenden Bodenbeprobung konnte ein Benzolgehalt von 0,1 mg/kg Boden in der ungesättigten Bodenzone nachgewiesen werden. Im Bereich der gesättigten Zone lag die Restbelastung bei 2,2 mg/kg Boden. Dies korreliert mit dem Benzolgehalt im Grundwasser nach der Sanierung.

Die Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser gingen während der Anwendung stetig zurück. Vor Beginn der Sanierung lagen die Benzolkonzentrationen an den Überwachungsbrunnen außerhalb des Sanierungsbereichs im Mittel bei 816 mg/L. Zum Ende der Sanierung lagen sie im Mittel bei 201 mg/L und somit noch deutlich oberhalb des Prüfwerts für Benzol von 1 µg/L.

Die Grundwasserströmungsverhältnisse am Standort sind komplex. So kam es z.B. in Folge von Grundwasserneubildung und einem Ansteigen des Grundwasserstandes um ca. 45 cm im Januar 2008, also nach Ende der thermischen Sanierung, zu einer Umkehrung der Grundwasserfließrichtung von Westen in Richtung Nordost. Daher ist eine Beurteilung der Wirkung der partiellen Schadensherdsanierung auf das Emissionsverhalten am Standort schwierig und konnte im Rahmen der Pilotanwendung nicht schlüssig geklärt werden.

Basierend auf den Daten und Kosten der Pilotsanierung wurde eine Kostenschätzung zur thermischen Sanierung von 14.000 m³, bzw. 8.000 m³ Boden und einer Fläche von 1.700 m², bzw. 1.000 m² erstellt. Die Laufzeit der Sanierung läge bei 3, bzw. 2 Jahren und könnte mit einer Anlagengröße vergleichbar mit MOSAM durchgeführt werden. Die geschätzten Sanierungskosten lägen bei ca. 1,8 Mio., bzw. 1,2 Mio. EUR. Dies bedeutet spezifische Sanierungskosten von 130 EUR/m³, bzw. 80 EUR/to Boden für die großflächigere Anwendung.

Für größere Anwendungen könnten die Kosten sicherlich weiter minimiert werden, jedoch erscheint es unrealistisch insbesondere für eine erforderliche Ausführung der Anlagentechnik in Explosionsschutz, dass die spezifischen Sanierungskosten von 50 EUR/to unterschritten werden können.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten zur pilothaften thermischen Sanierung wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens SAFIRA II mit finanzieller Unterstützung durch das Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig durchgeführt.

Ein besonderer Dank gilt Thomas Haslwimmer für die Unterstützung beim Bau von MOSAM und der Inbetriebnahme in Zeitz.

Literaturhinweise

Koschitzky, H.P., Färber, A., Trötschler O., Steidinger S., 2003: Thermisch unterstützte In-situ-Sanierung der Untergrundverunreinigung durch Perchlorethylen (PCE) auf dem ehemaligen Betriebsgelände "Werk III" der Mettler-Toledo (Albstadt) GmbH in Albstadt-Ebingen, Zollernalbkreis 12/2003. – Abschlußbericht, Technischer Bericht TB 2004/16, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, VEGAS

Trötschler, O., Koschitzky, H.P., Ochs, S.O., Denzel, S. und K. Stöckl, 2006: Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal. Tagungsband, VEGAS Statuskolloquium 2006 (28. - 29. September 2006, Stuttgart), Editor: Braun, J.; Koschitzky, H.P. & M. Stuhmann, Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2006. Nr.: 150 Seiten: 60 70 ISBN: 3933761530

Koschitzky, H.P., Trötschler, O., Limburg, B., Hirsch, M. Weiß, H.; 2007: Pilotanwendung DLI Zeitz: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion, Tagungsband, VEGAS Kolloquium 2007 (26. September 2007, Stuttgart), Editor: Braun, J.; Koschitzky, H.P. & M. Stuhmann, Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2007. Nr.: 165 Seiten: 52 63 ISBN: 3933761697

Vu-3403-D, BUWAL, 1998: Arbeitshilfe Probenahme und Analyse von Bodenluft, www.umweltschutz-schweiz.ch/publikationen, Code: Vu-3403-D

Ansprechpartner

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky (Projektleiter) +49 (0)711 685 64716

Dipl. Ing. (FH) Oliver Trötschler +49 (0)711 685 67021