



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

Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone:

Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal

Ziele

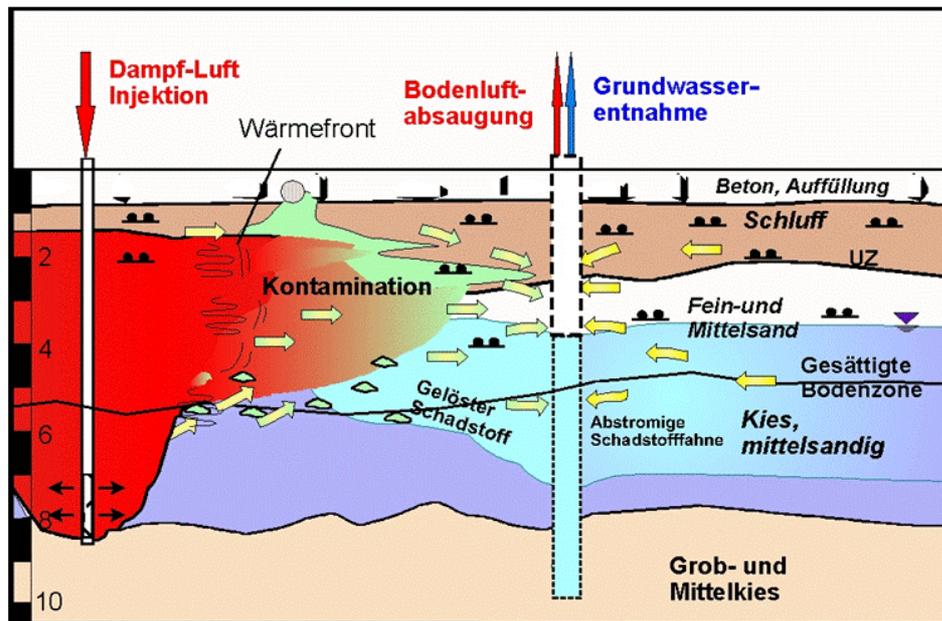
Unter den Räumlichkeiten einer ehemaligen chemischen Reinigung im Altstadtkern von Karlsruhe Durlach, wurde im Rahmen der Altlastenuntersuchung das Schadenszentrum einer Kontamination der ungesättigten und gesättigten Zone mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (vornehmlich PCE) festgestellt. Ein Großteil der Kontamination liegt unter einem denkmalgeschützten, bewohnten Gebäude (ehemalige chem. Reinigung).

Im Auftrag der Stadt Karlsruhe, vertreten durch die Dienststelle für Umwelt- und Arbeitsschutz sollte auf einem Teilbereich des innerstädtischen Standorts eine Pilotanwendung des In-situ-Sanierungsverfahrens der Dampf-Luft-Injektion zur Dekontamination des Grundwasserschadensfalls mit Perchloroethen (PCE) durchgeführt werden. Die Pilotierung erfolgte im Rahmen einer laufenden Sanierungsuntersuchung und wurde über Fördermittel des Altlastenfonds Baden-Württemberg finanziert. Die fachliche und ingenieurstechnische Begleitung der Maßnahme wurde durch das Ingenieurbüro dplan GmbH, Karlsruhe wahrgenommen.

Ziel der Pilotierung war die Bestimmung der Dampf- und Wärmeausbreitung in der gesättigten Bodenzone, sowie der Nachweis der Anwendbarkeit und Effizienz des In-situ-Sanierungsverfahrens am Standort.

Aufbauend auf den ermittelten Daten zur Reichweite, der erforderlichen Dampf-Luft-Injektionsrate und des Zeitraums zur Erwärmung und Dekontamination des Pilotierungsfeldes sollte die Auslegung der Gesamtsanierung einschließlich der Bestimmung der Kosten erfolgen.

Lage im Rheintal: Quartärer, fluvialer Aquifer



DL-Injektion:

7- 8 m u. GOK,
max. 200 kg/h

BL-Absaugung:

100 - 150 m³/h

**GW-Haltung
(Kühlwasser):**

1- 3 m³/h

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

Vorgehensweise

Prüfung der Eignung des Verfahrens

Auf Anfrage des Ingenieurbüros dplan 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
- Bauliche Gegebenheiten am Standort
- Kostenschätzung einer thermischen Sanierung

Das Verfahren erschien für den mittel durchlässigen kiesigen Aquifer grundsätzlich geeignet, wobei die Reichweite der Dampfausbreitung in der gesättigten Zone (thermische Reichweite) die entscheidende Größe bei der Dimensionierung der Sanierung und in Konsequenz der Kosten darstellt. Eine generelle Aussage war zum Zeitpunkt der Planungen nicht möglich. Die thermische Reichweite konnte, anhand als konservativ anzusetzender Berechnungsannahmen, auf 1 – 2 m Radius entsprechend der hydraulischen Durchlässigkeit und der Bodenschichtung, bzw. dem Aufbau abgeschätzt werden.

Die Kostenschätzung ergab selbst bei diesen ungünstigen Annahmen finanzielle Vorteile des thermischen Verfahrens im Vergleich zum Konzept einer hydraulischen Grundwassersanierung mit klassischer Bodenluftabsaugung, die selbst bei optimistischer Annahme viele Jahre in Anspruch nehmen würde.

Pilotsanierung mittels Dampf-Luft-Injektion

Im Herbst 2004 wurde ein Konzept zur Pilotsanierung eines Teilbereichs der Kontamination erstellt. Das Konzept sah die Installation eines Dampf-injektionsbrunnens, von zwei Kombinationsbrunnen zur Grundwasser- und Bodenluftentnahme, sowie eines weiteren Bodenluftabsaugbrunnens zur Entnahme der verdampften Schadstoffe vor. Zur Bestimmung der thermischen Reichweite sollten acht Temperaturmesslanzen in unterschiedlichem, radialem Abstand zum Injektionsbrunnen abgeteuft werden. Die Gesamtdauer der Pilotierung sollte auf 3 Monate begrenzt sein. Aufbauend auf einer detaillierten hydrogeologischen Untersuchung sollte die thermische Reichweite der Dampf-Luft-Injektion numerisch simuliert werden (Ochs S.O., 2006). Die Pilotierung diente der Ermittlung der Kosten für eine thermische Sanierung des Standorts.

Im Frühjahr 2005 wurde VEGAS vom Umweltamt der Stadt Karlsruhe mit der Durchführung der Pilotsanierung beauftragt. Die fachliche Kontrolle erfolgte über das Ingenieurbüro dplan.

Einrichtung des Sanierungsfeldes, Anlageninstallation und hydraulische Untersuchungen

Im Mai 2005 wurden das Pilotfeld über Installation der Brunnen und Temperaturlanzen erschlossen und zeitnah die hydraulische Durchlässigkeitsverteilung über Kurzpumpversuche und Schüttungsmessungen (Flowlog-Messungen) zur Ermittlung der vertikalen Durchlässigkeitsverteilung durchgeführt. Im Juni 2005 wurde eine mobile thermische Sanierungsanlage am Standort aufgestellt, verrohrt und Ende Juni in Betrieb genommen. Die Pilotsanierung erfolgte unter räumlich engen Bedingungen und schloss die Dampf-injektion unterhalb eines denkmalgeschützten Gebäudes ein. Die Räumlichkeiten, bzw. Werkstätten im Gebäude mussten jederzeit ohne Einschränkungen nutzbar sein. Arbeitsplatzmessungen waren zum Nachweis erforderlich. Setzungen am Gebäude mussten vermieden, bzw. kontrolliert werden.

Durchführung der Pilotierung

Nach einer einwöchigen Bodenluftabsaugphase mit Betrieb einer Grundwasserhaltung zur Dokumentation des Ist-Zustandes wurde die einwöchige Air-Sparging Phase Anfang Juli 2005 gestartet. Ziel war die Bestimmung der Sanierungsleistungen dieser Sanierungstechnologie im Vergleich zur Dampf-Luft-Injektion.

Mitte Juli wurde mit der Dampf-Luft-Injektion (200 kg/h Dampf-Luft, 130 kW Leistung) begonnen. In Folge der überraschend schnell erzielten großen thermischen Reichweite musste die Leistung bereits nach zwei Tagen Betrieb auf 140 kg/h Dampf-Luft, bzw. 90 kW reduziert werden. Die gesättigte Zone konnte innerhalb von ca. 10 Tagen thermisch saniert werden (Aufheizphase).

In den folgenden drei Wochen wurde mit nochmals reduzierter Dampfleistung (75 kW) eine anstehende, hoch kontaminierte Schluffschicht im Kapillarsaum und in der ungesättigten Zone über Wärmeleitung infolge der kontinuierlichen Dampf-injektion in die gesättigte Zone (steam-override) thermisch saniert.

An die Dampf-injektion schloss sich eine einwöchige Air-Sparging Phase (Abkühlphase) an. Während der Abkühlphase mit dem Ziel der Reduzierung der mittleren Temperatur im Sanierungsfeld unterhalb 30°C wurde die Grundwasserhaltung und Bodenluftabsaugung für eine

Dauer von fünf Wochen weiter betrieben. Nach insgesamt 80 Tagen Betriebsdauer konnte die Sanierung abgeschlossen werden.

Eine vergleichende Untersuchung der CKW-Gehalte im Boden vor und nach Ende der thermischen Sanierung wurde zum Leistungsnachweis der Unterschreitung der Sanierungsziele entsprechend BBodSchV durchgeführt.

Rückbau des Standorts und der Pilotanlage

Das Sanierungsgelände wurde Mitte September 2005 rückgebaut und die Pilotanlage abtransportiert. Die Dauer der Pilotsanierung lag einschließlich der Erschließung des Sanierungsfelds unter 5 Monaten.

Ergebnisse

Der Standort Durlach

Das Schadenszentrum der Kontamination in der ungesättigten und gesättigten Zone mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (vornehmlich PCE) befindet sich zum Großteil unter einem denkmalgeschützten, bewohnten Gebäudes in der Altstadt von Karlsruhe-Durlach.

Der Grundwasserspiegel liegt im Bereich zwischen 3 - 3,5 m u. GOK. Die Grundwasserfließrichtung schwankt saisonal zwischen westlicher und südwestlicher Richtung. Der Bodenaufbau besteht aus Auffüllungen bis ca. 1,5 m u. GOK, sandigem Schluff mit eingelagerten schluffigen Feinsandschichten ($k_f < 1 \times 10^{-5}$ m/s) bis ca. 2,5 m u. GOK, schluffigem Feinsand bis ca. 4 m u. GOK ($k_f \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s). Darunter stehen Fein- und Mittelsande bis 7 m u. GOK ($k_f \sim 0,8 - 3 \times 10^{-4}$ m/s), Mittel- und Grobsande, kiesig bis 8 m u. GOK: ($k_f \sim 0,5 - 2 \times 10^{-3}$ m/s) und Kieslagen ($k_f \sim 3 - 8 \times 10^{-3}$ m/s) bis zu einer Teufe von ca. 10 m an.

Durch Messungen der Bodenluft konnte in den letzten Jahren das Schadenszentrum in der ungesättigten Zone räumlich eingegrenzt werden. Die Kontamination reicht in westlicher Richtung ca. 5 m außerhalb der Gebäudegrundfläche, in südlicher Richtung sind dies ca. 1 – 2 m (Ort der Pilotinjektion: südwestliche Hausecke, siehe Abb. 2). Die vertikale Ausdehnung der Kontamination konnte durch Grundwassermessungen auf ca. 6 – 7 m u. GOK eingegrenzt werden.

Die im Rahmen der Bohrmaßnahmen zur Pilotsanierung angetroffenen hohen Konzentrationen an PCE in den Bodenproben aus der ungesättigten Zone von bis zu 3.800 mg/kg Boden (1 – 2,5 m u. GOK), aus dem Grundwasserwechselbereich (um 3 – 4 m u. GOK) mit bis zu 850 mg/kg, sowie dem oberen Bereich des Grundwasserleiters (4 – 5 m Teufe) mit 70 mg/kg, bzw. 6 mg/kg (5 – 6 m Teufe) und darunter liegend < 1 mg/kg lassen auf eine vertikale Verteilung der Schadstoffe bis zu einer Teufe von ca. 5 m schließen, wobei der Hauptanteil in der ungesättigten Zone liegt. Konzentrationen von bis zu 40 - 60 mg/l CKW im Grundwasser zu Beginn der Pilotierung sind ein deutlicher Hinweis auf das Vorliegen residualen Schadstoffs in räumlicher Nähe.

Sanierungstechnologie „Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone“

Die Sanierungstechnologie basiert auf der Injektion eines Wasserdampf-Luft-Gemisches in die gesättigte Zone unterhalb des Schadenszentrums. Die Schadstoffe werden infolge der sich um den Injektionsbrunnen ausbreitenden Dampf- und Wärmefronten verdampft (in die Gasphase übergeführt) und in kältere Bereiche transportiert (Kondensation, Mobilisation). Die mit dem Dampf injizierte Luft dient als inertes Trägergas der Vermeidung einer Akkumulation und einer nach unten gerichteten Mobilisierung der CKW und trägt die Kontaminanten gasförmig in Richtung der ungesättigten Zone aus. Die gasseitige Entfernung der Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung. Mit Erwärmung der gesättigten Zone erfolgt auch eine erhöhte Lösung der Schadstoffe im Grundwasser. Der Betrieb einer Grundwasserhaltung sichert hierbei die Entnahme der wassergelösten Schadstoffe und schützt vor einer abstromigen Verfrachtung.

Merkmale der Sanierungstechnologie sind neben einer Temperaturüberwachung im Sanierungsgebiet zur optimalen und zeitnahen Kontrolle und Steuerung der Sanierung die Anlagenkomponenten zur Erzeugung des injizierten Dampf-Luft-Gemischs, zur Grundwasserentnahme und –behandlung und zur Bodenluftabsaugung und –behandlung der heißen Gase.

Der rasche zeitliche Ablauf der thermischen Sanierung bedingt eine tägliche Überwachung des Schadstoffaustrags, der Dampfausbreitung und der wichtigsten Prozessgrößen der Anlagentechnik. Aus diesem Grunde wurde eine Fernüberwachung über ein Datenerfassungssystem mit Gasmesstechnik (GC-PID) und Temperaturmesstechnik eingesetzt.

Verlauf der Pilotanwendung zur thermischen Dekontamination

Einen Überblick über den zeitlichen Ablauf der Pilotsanierung gibt Abb. 4. In Folge der Online-Überwachung konnte die Sanierung der Erwärmung des Sanierungsfelds und dem Schadstoffaustrag angepasst werden.

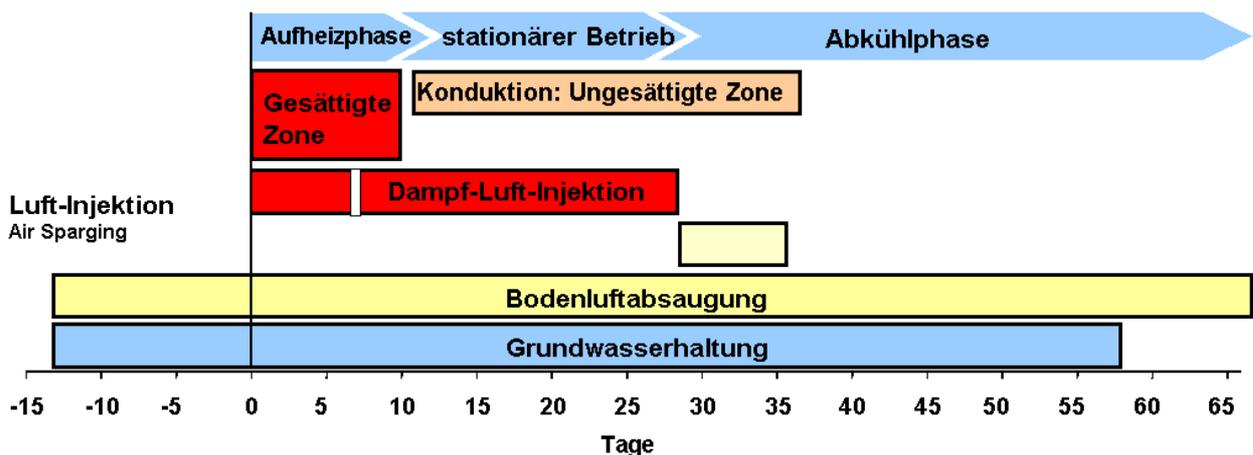


Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf der thermischen Pilotsanierung

Phase 1: Bodenluftabsaugung und Grundwasserhaltung (1 Woche)

Zu Beginn wurde eine Grundwasserhaltung mit insgesamt 1 m³/h betrieben. Über die Brunnen EK2, E8 und Br38 wurde Bodenluft mit einem Gesamtmassenstrom von ca. 60 m³/h gefördert. Insgesamt wurde ca. 70 kg PCE über die Bodenluft entfernt, s. Abb. 5.

Phase 2: Bodenluftabsaugung, Grundwasserhaltung und Air-Sparging (1 Woche)

Zur Bestimmung des maximalen Stoffaustrags mittels Air-Sparging wurde zusätzlich zum Betrieb der Bodenluftabsaugung und der Grundwasserhaltung über den Injektionsbrunnen ein Luft-Volumenstrom von ca. 20 m³/h in den Aquifer injiziert. Während dieser „Air-Sparging Phase“ wurden ca. 33 kg PCE über die Bodenluft entfernt, s. Abb. 5.

Phase 3: Dampf-Luft-Injektion (DLI) (4 Wochen)

Entsprechend der Schadstofflage und den anstehenden Bodenschichten erfolgte die Injektion des Dampf-Luft-Gemisches zwischen 7 – 8 m u. GOK über den Injektionsbrunnen. Die Bestimmung und Kontrolle der Ausbreitung der Wärme front erfolgte über die Temperaturmesslanzen T1 – T8, die mit Temperaturfühlern in unterschiedlichen Teufen (alle 1 m) ausgestattet sind, s. Abb. 2.

Startphase DL-Injektion

Die Injektionsrate lag in den ersten beiden Tagen bei 180 kg/h Sattdampf vermischt mit max. 20 Nm³/h Luft. Die injizierte Leistung lag bei ca. 135 kW. Die Bodenluftabsaugung erfolgte über die drei Extraktionsbrunnen. Zur Deckung des Kühlwasserbedarfs zur Kondensation der extrahierten heißen Bodenluft wurde außerhalb der „thermischen Reichweite“ des Injektionsbrunnens verstärkt Grundwasser aus Br38 gefördert (ca. 1,5 m³/h). Die PCE-Konzentration der extrahierten Bodenluft stieg von anfänglich 1,4 g/m³ auf 2,1 g/m³ an (Abb. 5).

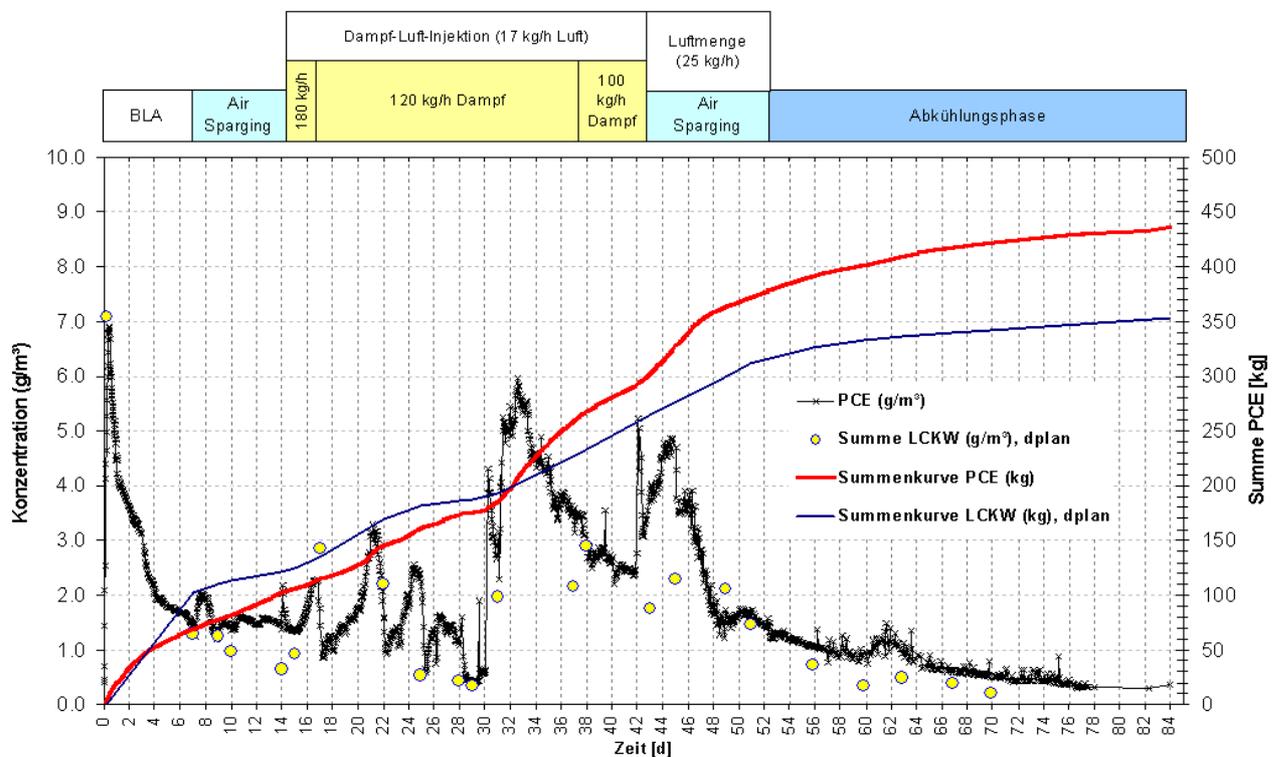


Abbildung 5: Schadstoffaustrag über die Bodenluftabsaugung

Die Dampfausbreitung erfolgte sehr rasch in der gesättigten Zone im Bereich zwischen 8 und 5 m u. GOK, s. Abb. 6.

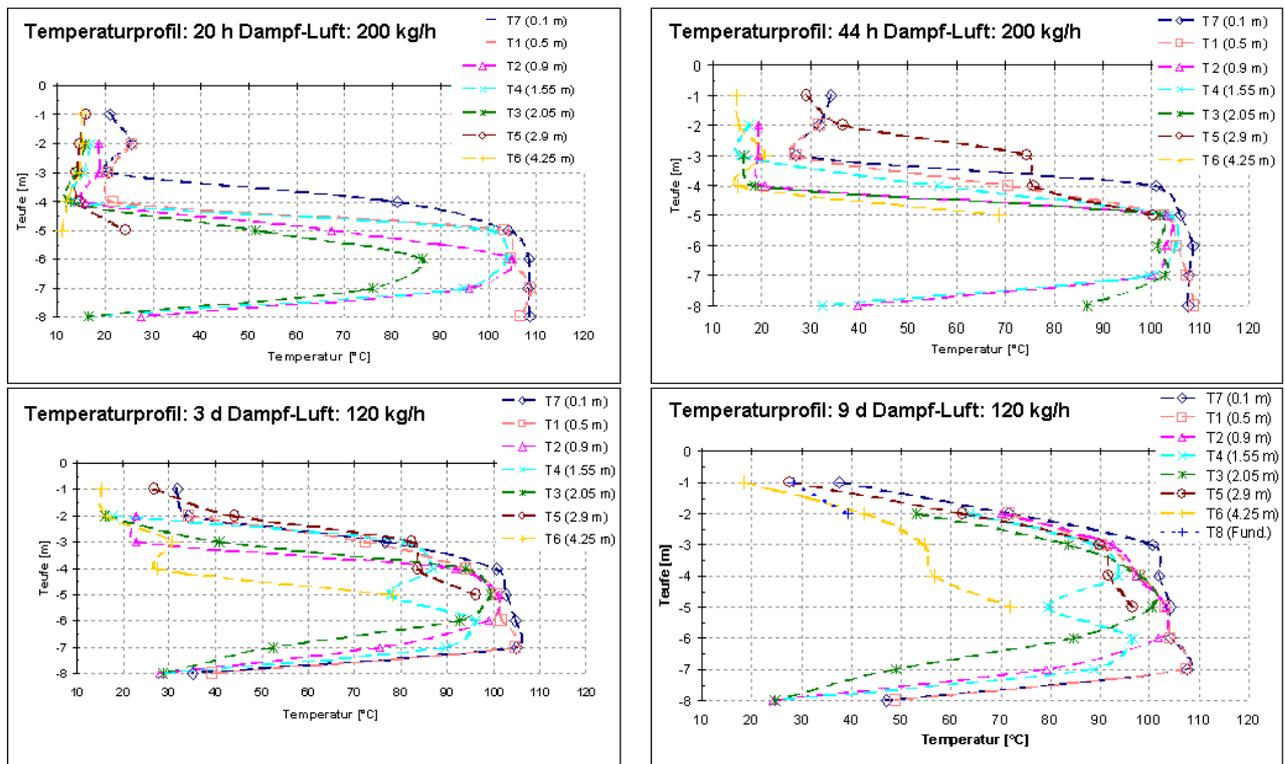


Abbildung 6: Wärmeausbreitung zu Beginn der Dampf-Luft-Injektion

Reduzierung der Injektionsleistung (2 Tage DLI)

Infolge der starken horizontalen Dampfausbreitung zwischen 4 – 8 m u. GOK und einer Reichweite von ca. 4 m Radius (s. Abb. 6, rechts oben) wurde die Dampftrate bereits nach 2 Tagen stark reduziert (100 kg/h Dampf und 25 m³/h Luft). Gleichzeitig wurde die Extraktionsrate an EK2 verdoppelt (PCE-Gehalte bis zu 8 g/m³ Bodenluft). Die Konzentrationen in der extrahierten Bodenluft stiegen auf Werte um 3 g/m³ an (Abb. 5).

Reduzierung Dampftrate (21 Tage DLI)

Nach ca. 14 Tagen lag eine konstante Temperatureausbreitung im Bereich zwischen 3 – 8 m Teufe, also dem sandigen Aquifer vor. Die hohen PCE-Gehalte in der extrahierten Bodenluft (bis 6 g/m³, Abb. 5) resultieren aus der thermischen Sanierung des Übergangsbereichs zwischen gesättigter Zone und der anstehenden Schluffschicht. Die darüber anstehenden Schluffschichten wurden durch konduktive Wärmeleitung infolge der Unterströmung mit Dampf weiterhin erwärmt. Aufgrund der hohen PCE-Austräge aus dem Bereich der Schluffschicht wurde die Dampf-Luft-Injektion mit verringerter Dampftrate (100 kg/h) und konstanter Luftrate weiter betrieben. Während der Dampf-Luft-Phase wurden ca. 194 kg PCE über die Bodenluft entfernt, s. Abb. 5.

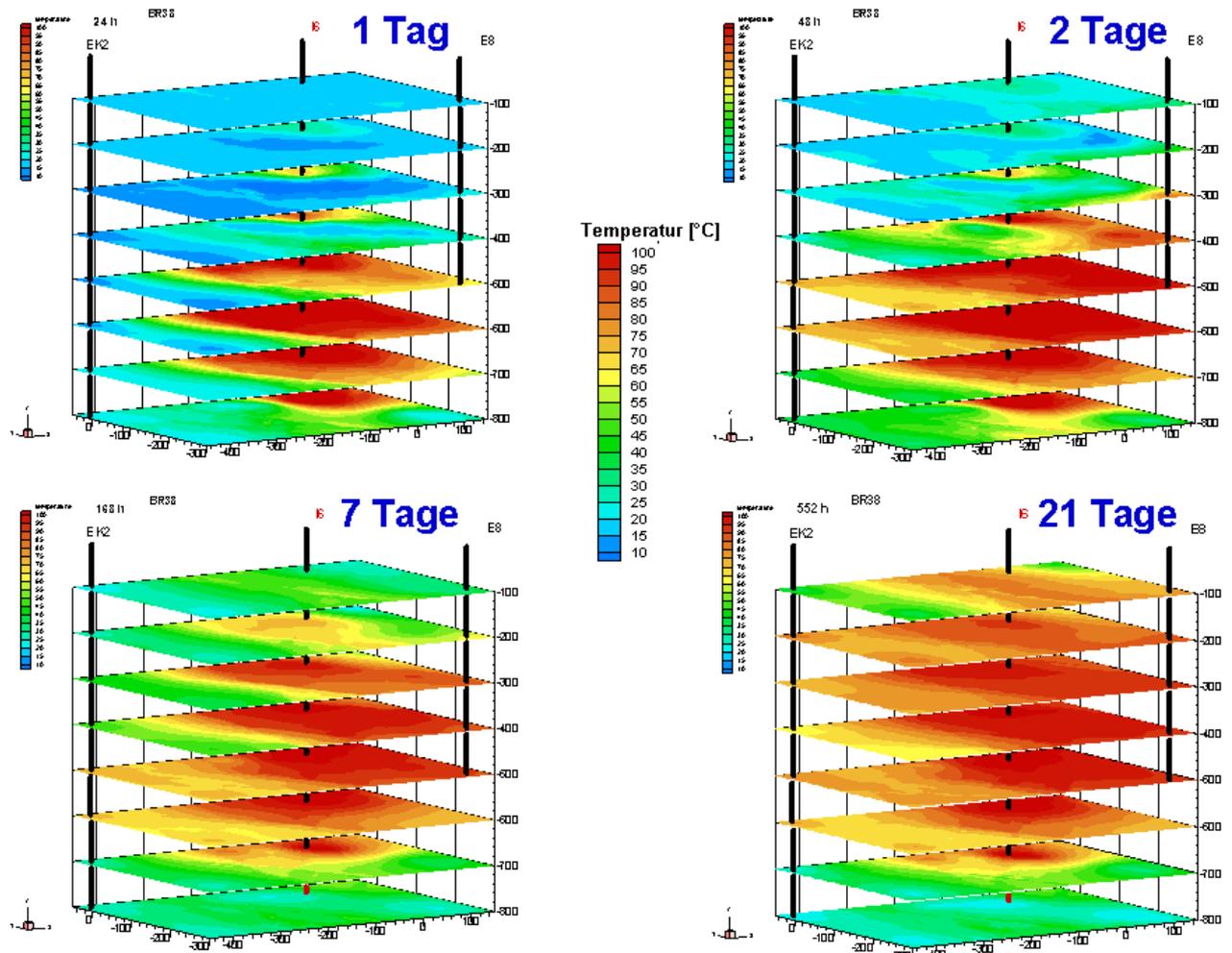


Abbildung 7: Wärmeausbreitung während der Dampf-Luft-Injektion

Phase 4: Abkühlungsphase (ca. 6 Wochen)

Nach Erreichen stationärer Verhältnisse der Wärmeausbreitung im Bereich unterhalb 2 m u. GOK (unterer Bereich, Schluffschichten), bzw. nach 4 Wochen Dampf-Luft-Injektion, wurde die Dampf-Injektion ausgeschaltet (Abkühlphase). Eine Woche lang wurde die Luftinjektion weiterbetrieben, um ggf. auskondensierte Schadstoffe auszustrippen.

Nach vier Wochen Abkühlphase wurde die Grundwasserförderung an EK2 eingestellt. Die PCE-Konzentrationen des Grundwassers lagen zu diesem Zeitpunkt um 1 mg/L, der Anfangswert lag zwischen 30 - 60 mg/L. Zum Ende der Abkühlphase genommene Grundwasserproben zeigten eine weitere Reduzierung der PCE-Konzentration an EK2 mit Werten um 0,7 mg/L, wohingegen die PCE-Konzentrationen in Br38, also einem Bereich, der durch die Dampf-Luft-Injektion nicht erfasst wurde, annähernd unverändert um 0,1 mg/L lagen (Abb. 8).

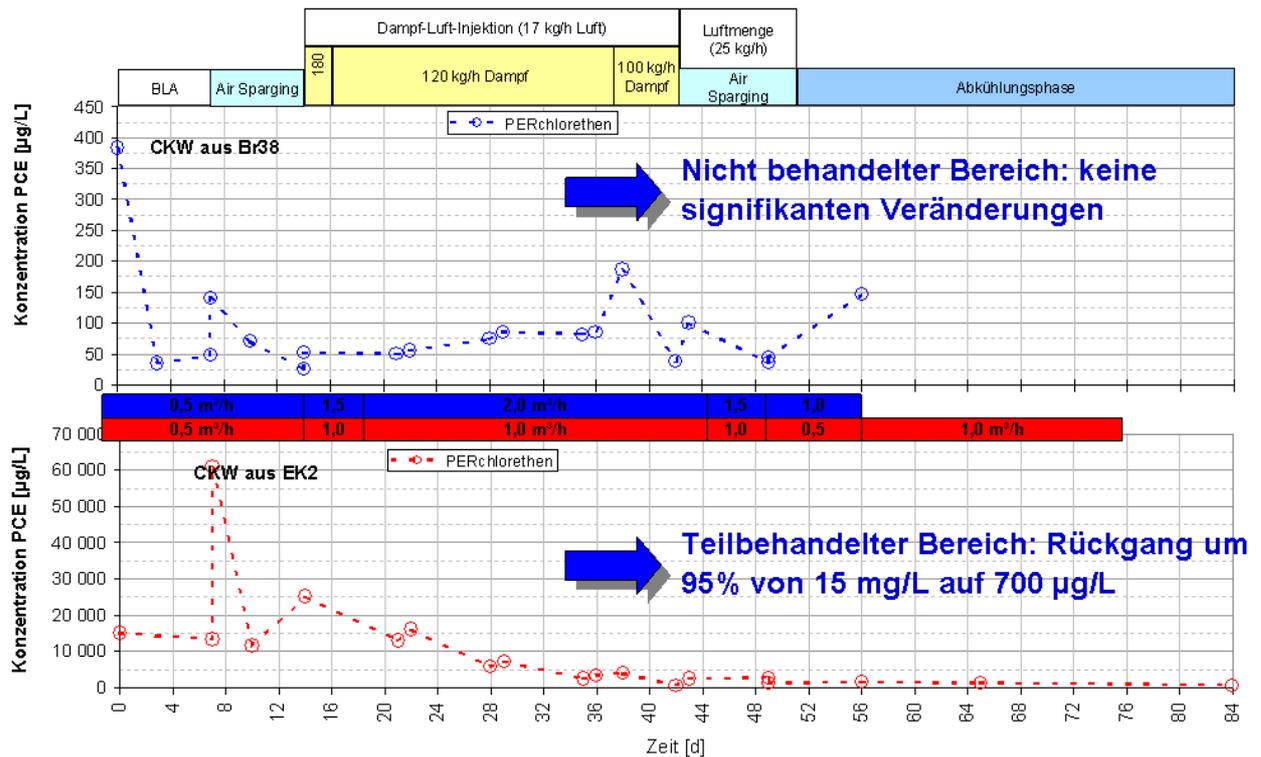


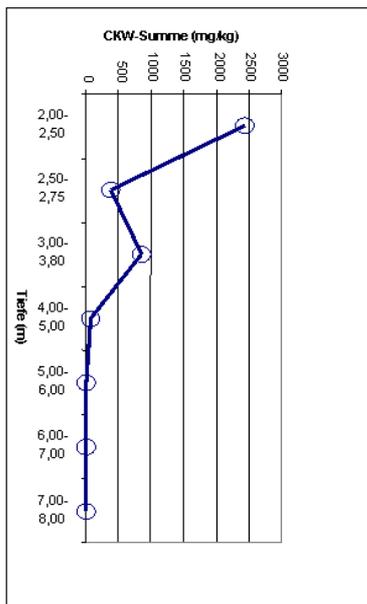
Abbildung 8: Entwicklung der CKW-Konzentrationen im Grundwasser

In der Abkühlphase wurden während der Luftinjektion erhebliche Mengen an PCE, ca. 140 kg, aus der ungesättigten Zone (Schluff mit überlagertem Sand) entfernt, s. Abb. 5. Die vorhandenen Temperaturen oberhalb 55°C im oberen Bereich der Schlufflinsen (1,5- 2,0 m u. GOK) und oberhalb 65°C im unteren Bereich der Schlufflinsen (2,0 – 3,0 m), also in Nähe der Kapillarzone führten zur weiteren Schadstoffverdampfung.

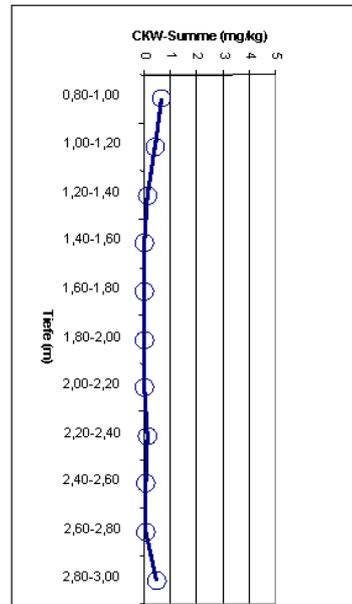
Die Extraktionsleistung und Konzentration an PCE in der Bodenluft fielen während der Air-Sparging Phase auf Werte um 1,5 g PCE /m³ ab. Nach dem Ausschalten der Luftzugabe fielen die Konzentrationen entsprechend der Abkühlung des Sanierungsfeldes auf Werte um 0,3 g/m³ ab.

Nach Ausschalten der Anlage wurden Bodenproben bis 3 m u. GOK im Abstand von 1,5, bzw. 3 m vom Injektionsbrunnen genommen. Diese zeigten Maximalwerte um 5 mg PCE je kg Boden im Bereich bis ca. 1,2 m u. GOK. Die PCE-Konzentration im Boden lag vor Beginn der Maßnahme im Bereich von mehreren „g/kg“, also 1000-fach höher (Abb. 9).

Sondierung Injektionsbrunnen I6 vor Sanierung



Sondierung 1,5 m Abstand zu I6 nach Sanierung



Sondierung 3 m Abstand zu I6 nach Sanierung

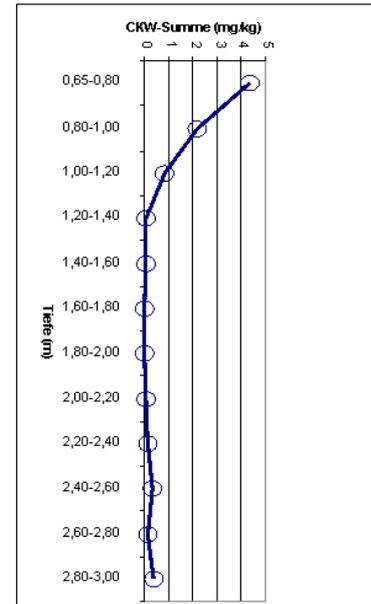
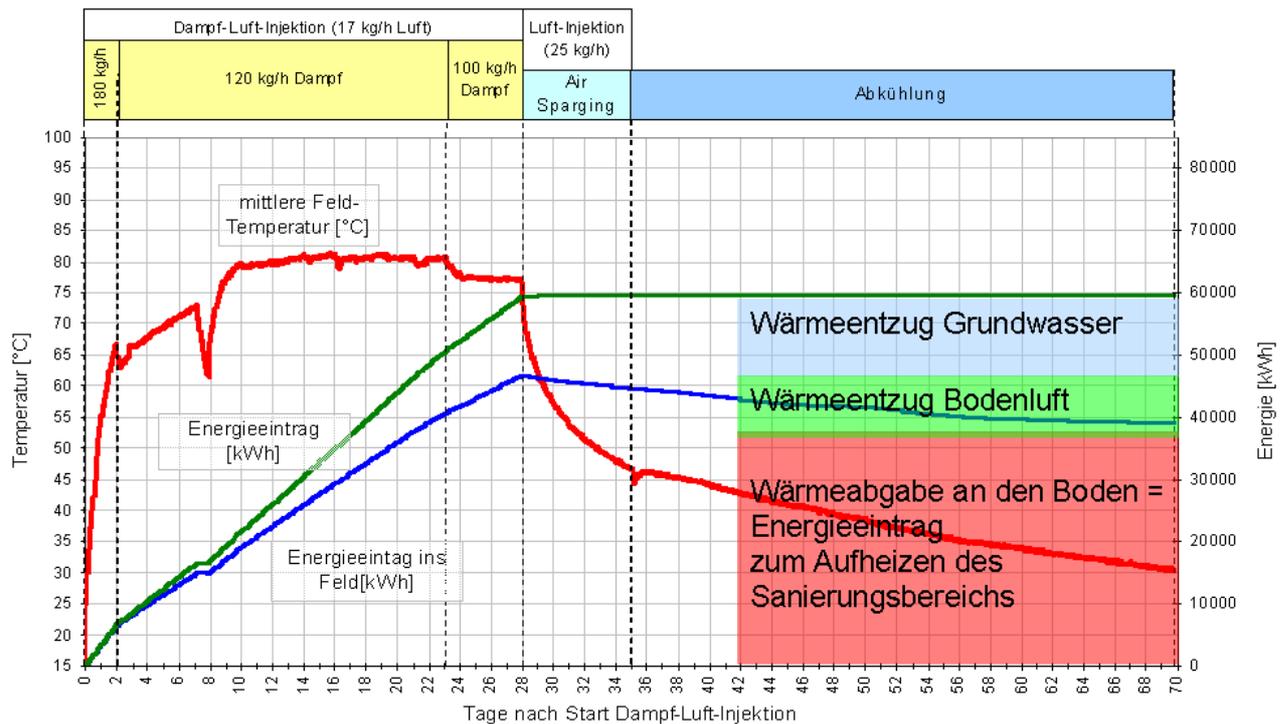


Abbildung 9: CKW-Konzentrationen im Boden vor und nach der Sanierung

Verfahrensbedingt wurde der Großteil der Schadstoffe über die Bodenluft ausgetragen, ca. 440 kg. Der Schadstoffaustrag über das Grundwasser war mit ca. 9,5 kg PCE und einem geförderten Volumen von über 3200 m³ vergleichsweise gering.

Energiebilanz

Nach Bilanzierung der erfassten Energieflüsse kann der Energieeintrag während der Dampf-Luft-Injektion zu 60.000 kWh ermittelt werden. Es wurden ca. 450 m³ Boden behandelt. Der Energieaustrag über die betriebene Grundwasserhaltung lag bei ca. 11.600 kWh, dies sind 19% der gesamten injizierten Energie. Der Wärmeaustrag über die Bodenluftabsaugung lag um 9.000 kWh, dies sind 15% des Energieeintrags. Der Großteil der Energie, über 60% wurde an die Umgebung (Boden, Grundwasser, Atmosphäre) als Wärmeverluste mit gleichzeitiger Verdampfung der erfassten Schadstoffe abgegeben (Abb. 10).



Energieeinsatz: 133 kWh/m³ behandelten Bodens (ca. 6 EUR/m³)

Abbildung 10: Temperaturentwicklung und Energiebilanz der Pilotsanierung

Planung der Gesamtsanierung

Basierend auf der bisherigen Erkundung und den zusätzlich gewonnenen Informationen im Rahmen der Pilotierung hinsichtlich Lage und Ausdehnung der Schadstoffquelle, der Schichtenlagerung und der Durchlässigkeit des Aquifers, konnte nach der erfolgreichen Anwendung der DL-Injektion die Gesamtsanierung des Geländes unterhalb des Gebäudes und westlich davon geplant und die Sanierungskosten abgeschätzt werden.

Ziel der thermischen Sanierung im Schadenszentrum ist:

- die Erwärmung des Untergrunds in einer Tiefe von ca. 5 – 6 m unter GOK auf Temperaturen > 92 °C (Eutektische Temperatur eines PCE-Wasserdampf-Gemischs),
- die Erwärmung der Schluffschichten im Bereich von ca. 1 – 3 m u. GOK auf Temperaturen um 50°C,
- die Entfernung der Schadstoffe in Gasform aus dem Sanierungsfeld auf die behördlich festgelegten Sanierungszielwerte bei gleichzeitiger Grundwasserhaltung.

Grundsätzlich ist aus ökonomischen Gründen eine sequenzielle Dekontamination der gesamten Fläche in Grundwasserströmungsrichtung vorgesehen. Die Zeitdauer der Sanierung jedes der vier Teilabschnitte (DL-Injektion) wird über Bestimmung der Wärmeausbreitung und Verlauf des Schadstoffaustrags festgelegt. Jeder Teilbereich (s. Abb. 11) ist mit zwei Injektionsbrunnen ausgestattet, die als Schrägbohrungen unter dem genutzten Gebäude abgeteuft werden. Neben zehn Bodenluftbrunnen um das Gebäude (Vertikalbrunnen) verteilt soll ein Horizontalbrunnen entlang der Mittelachse des Gebäudes zur gesicherten Schadstofffassung betrieben werden. Zur Überwachung der Wärmeausbreitung im Untergrund unter dem Aspekt der Sanierungs-

steuerung und Visualisierung des Sanierungsverlaufs sollen insgesamt mehr als 100 Temperatursensoren über sogenannte Temperaturlanzen installiert werden.

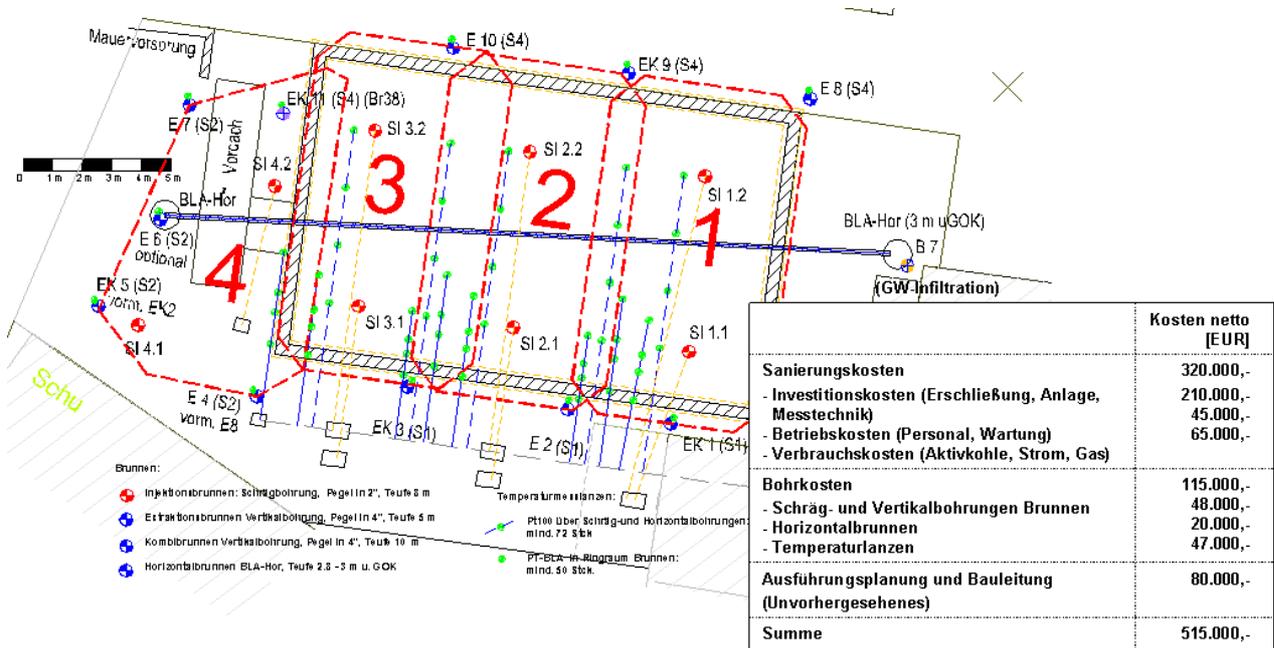


Abbildung 11: Planung Gesamtsanierung mit Kostenschätzung

Als „thermische Reichweite“ wurde eine radiale Dampfausbreitung von vier Metern mit einer Injektionsrate von ca. 160 kg Sattdampf je Injektionsbrunnen angesetzt werden. Die anhand der Pilotierung bestimmte Gesamtdauer für die Sanierung liegt bei ca. 15 Monaten. Die eigentliche DL-Injektion soll über 6 Monate betrieben werden. Die Abkühlphase liegt bei ca. 6 – 8 Wochen. Die Anlagenlaufzeit soll 8 Monate betragen. Die Restzeiten sind für Bohrarbeiten, Vorbereitung des Sanierungsfeldes, Anlagenauf- und -abbau, sowie Wiederherstellen des Sanierungsfeldes in den ursprünglichen Zustand anzusetzen.

Die Kosten für die Bohrmaßnahmen, die Aufstellung, Miete und den Betrieb der Sanierungsanlage wurden durch dplan im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung (SU) ermittelt. Analog konnten die Betriebskosten (Personalkosten, Wartung) abgeschätzt werden. Die Verbrauchskosten (Aktivkohle, Frischwasser, Gas, Strom) wurden entsprechend der Sanierungszeit und den örtlichen Tarifen bestimmt und zusammengefasst (Abb. 11).

Die im Rahmen der SU ermittelten Kosten für eine Grundwassersanierung (Pump&Treat) mit Reinfiltration des gereinigten Grundwassers sowie Kombination mit einer Bodenluftabsaugung betragen bei einer Laufzeit von 20 Jahren rd. 1 Mio. € (Projektkostenbarwert).

Das Risiko des tatsächlichen Sanierungszeitraums von Pump&Treat-Maßnahmen bleibt bestehen. Insofern stellt sich die thermische Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion sowohl zeitlich, als auch ökonomisch als sinnvolle Variante dar, wie auch bereits an andere Stelle schon bestätigt wurde (HIESTER ET. AL. 2005).

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung / Sanierungsvorplanung eines CKW-Schadens wurde eine dreimonatige Pilotanwendung mittels Dampf-Luft-Injektion zur thermischen Dekontamination im Randbereich des Schadenszentrums durchgeführt.

Die standortspezifische Reichweite der Dampfausbreitung mit mindestens 3 m Radius und einer Injektionsrate von ca. 180 kg/h Dampf konnte bestimmt werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer begleitenden numerischen Simulation (Ochs, S.O., 2006) der Dampfausbreitung im anisotrop geschichteten Aquifer.

Über einen Zeitraum von 4 Wochen wurde diese Ausbreitung mit einer Rate von ca. 120 kg/h Satttdampf und 20 kg/h Luft aufrechterhalten, um über Konduktion den stark kontaminierten Kapillarsaum, bzw. die anstehenden Schluffschichten der ungesättigten Bodenzone weitestgehend zu dekontaminieren. Insgesamt konnte ca. 450 kg PCE entfernt werden.

Die Kostenschätzung der erforderlichen Sanierung des gesamten Schadensbereichs ergab finanzielle und zeitliche Vorteile gegenüber einer klassischen Grundwassersanierung (Pump&Treat) mit Bodenluftabsaugung. Die thermische Sanierung des Standorts soll in den Jahren 2009 bis 2010 realisiert werden.

Danksagung

Die Implementierung neuer Sanierungstechnologien ist nur durch eine enge Zusammenarbeit mit der Verwaltung und Ingenieurbüros möglich, die bereit sind, innovative Ansätze zu verfolgen. Hierfür sei den Beteiligten, insbesondere dem Ingenieurbüro dplan und dem Amt für Umwelt- und Arbeitsschutz der Stadt Karlsruhe herzlich gedankt.

Literaturhinweise

Hiester U., Koschitzky H.-P. (2005): Thermische In-situ-Sanierungen: Ökologische und ökonomische Vorteile der Verfahren TUBA und THERIS, Altlastensymposium, GAB, 06.-07. Juni 2005

Trötschler O., Koschitzky H.-P., Ochs S., 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, ISBN 3-933761-53-0

Ochs, S.O. (2006): Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations, Mitteilungen Heft 159, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-63-8

Schmidt, R. (2001): Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte, Mitteilungsheft Nr. 106, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diss., 2001, ISBN 3-933761-09-3

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

Ansprechpartner

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

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