



Erfolgreicher Pilotversuch

Thermische In-situ-Sanierung eines LCKW-Schadens mittels fester Wärmequellen

Joris Ondreka, Florian Hegler,
Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler,
Peter von Schnakenburg, Hermann Josef
Kirchholtes, Phillipe Zanettin

**Im Rahmen des EU-Projekts
CityChlor wurde an einem mit
LCKW kontaminierten Standort
in Stuttgart ein Pilotversuch einer
thermischen In-situ-Sanierung
mit festen Wärmequellen
durchgeführt.**

Autoren: Joris Ondreka und Florian Hegler,
Arcadis Deutschland GmbH, Stuttgart;
Hans-Peter Koschitzky und Oliver Trötschler,
Vegas, Universität Stuttgart; Peter von
Schnakenburg und Hermann Josef Kirchholtes,
Amt für Umweltschutz, Landeshauptstadt
Stuttgart; Phillipe Zanettin, Veolia Umwelt-
service, Schweiz

Der Stuttgarter Pilotstandort ist ein typisches Beispiel für LCKW-Verunreinigungen von Boden und Grundwasser in städtischen Gebieten. Die Sanierung solcher urbanen Standorte wird durch enge Bebauung und intensive Nutzung erschwert. Thermische In-situ-Sanierungstechnologien können hier trotz schwieriger Randbedingungen einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Umweltqualität und damit zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung leisten. Nachfolgend werden der Standort und seine spezifische Belastung vorgestellt, die Ziele des Pilotversuchs und die Versuchsdurchführung beschrieben sowie ein Fazit gezogen. CityChlor wurde im Programm Interreg IVB Nordwesteuropa von der Europäischen Union gefördert (www.citychlor.eu).

Historie

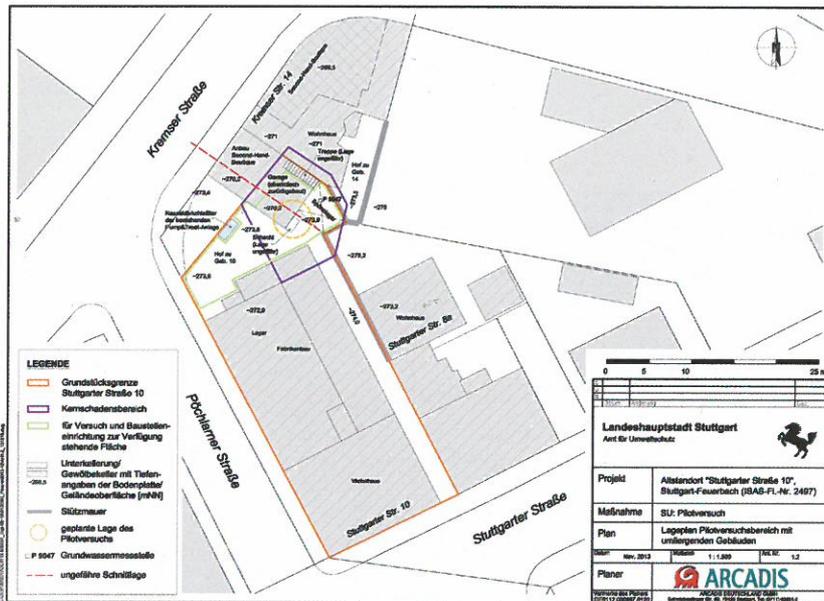
Am Standort waren von 1943 bis 1976 metallverarbeitende Betriebe ansässig. Diese verursachten einen LCKW-Schaden in Boden und Grundwasser. Am Standort wurden in der Metallverarbeitung zur Entfettung hauptsächlich 1,1,1-Trichlorethan verwendet, andere LCKW spielten eine untergeordnete Rolle.

Dem Pilotversuch in Stuttgart ging eine fast 20-jährige Erkundungs- und Sanierungsgeschichte am Standort voraus, die bis dato

nicht zu einem signifikanten Rückgang der hohen Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser führte. Der Kernschadensbereich von ca. 120 m² ist bis in Tiefen von 10,5 m verunreinigt. Angrenzend an den Schadensbereich liegen ein mehrstöckiges Wohngebäude, ein mehrstöckiges Fabrikgebäude und eine Garage.

Der Untergrund am Standort ist in ein sehr gering durchlässiges, schluffig-toniges Lockergestein (Quartär) und einen mäßig durchlässigen Kluftgrundwasserleiter (Mittlerer Gipshorizont, MGH) gegliedert. Der MGH bildet am Standort den ersten Grundwasserleiter, der – abhängig vom Grundwasserstand – teilweise oder vollständig wassererfüllt ist. Hohe Schadstoffgehalte wurden im Quartär und im MGH-Kluftaquifer angetroffen. Es wurden dabei Boden- und Grundwasserproben mit LCKW-Gehalten von bis zu 2700 mg/kg LCKW im Quartär und Grundwassergehalten von bis zu 100 mg/l LCKW nachgewiesen.

Die bisherigen Sanierungsaktivitäten mittels Bodenluftabsaugung und Pump-and-Treat waren nicht effektiv. Dies liegt vor allem an der langsamen Abgabe der in der schluffig-tonigen Bodenmatrix gebundenen LCKW ins Grundwasser. Nach rund 20 Jahren Pump-and-Treat war keine Reduktion der LCKW-Konzentrationen im Grundwasser zu erkennen und eine Sanierung des Standorts nicht absehbar. Eine technische und wirtschaftliche Prüfung alternativer



01 Übersicht über die bauliche Situation am Standort und die Lage des Pilotversuchs

02 Der Untergrund am Standort ist in ein sehr gering durchlässiges, schluffig-toniges Lockergestein (Quartär) und einen mäßig durchlässigen Kluftgrundwasserleiter (Mittlerer Giphshorizont, MGH) gegliedert

Sanierungsvarianten ergab, dass eine thermische In-situ-Sanierung mittels fester Wärmequellen (thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung) die wirtschaftlichste Sanierungsvariante darstellte.

Ziele

Aufgrund der speziellen, sehr schwierigen örtlichen Verhältnisse und Rahmenbedingungen war es erforderlich, die technische Umsetzbarkeit einer Full-scale-Sanierung mit einem vorgeschalteten Pilotversuch zu prüfen und zu verifizieren. Entscheidende Einflussfaktoren am Standort sind dabei der in gering durchlässiges Quartär und MGH-Kluftgrundwasserleiter gegliederte Untergrundaufbau, die Zusammensetzung der Kontamination sowie die Lage des Schadensbereichs teilweise unter der vorhandenen, engständigen Bebauung in Kombination mit einem setzungsempfindlichen Boden.

Die Ziele des Pilotversuchs im Hinblick auf die Full-Scale-Sanierung waren:

- Ermittlung von Auslegungsparametern (z. B. Abstand der Heizelemente, Zieltemperaturen, Schadstoffaustrag über die Zeit, Heizdauer, Bodenluftabsaugbetrieb) für den effizienten Betrieb
- Ermittlung des Setzungspotenzials und möglicher Baugrundsetzungen durch die Austrocknung des Bodens infolge der Aufheizung

- Ermittlung von Steuergrößen (z. B. Temperaturentwicklung, Wassergehaltsänderungen während und nach der Sanierung) zum Schutz der Bestandsgebäude
 - Ermittlung von Zielwerten bzw. Kriterien für die Bestimmung des Sanierungsendes
- Um die genannten Ziele zu erreichen, war es u. a. vorgesehen, den Pilotversuchsbereich auf 90 °C aufzuheizen und diese Temperatur zwei Wochen zu halten.

Durchführung

Der Heizbereich des Pilotversuchs hatte einen Durchmesser von 4,5 m (ca. 16 m²) und eine Tiefenerstreckung von 3,5 bis 10,5 m unter Gelände (Niveau des versiegelten Hofes). Der Versuchsbereich umfasste damit eine Kubatur von rund 110 m³, wovon die obere Hälfte in Quartär und die untere Hälfte im MGH lag.

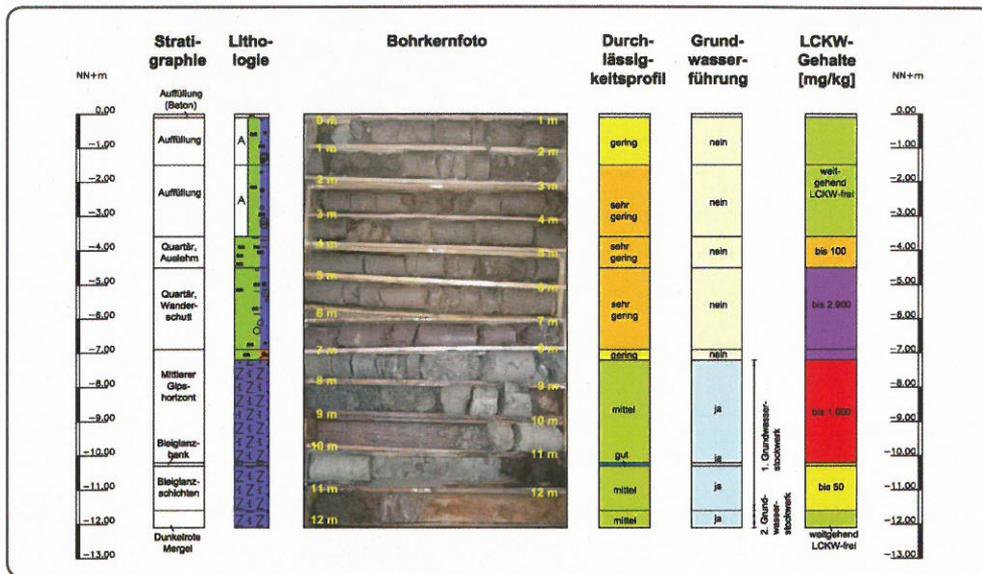
Entsprechend dem geschichteten Aufbau wurde der Untergrund mit vier Heizlanzen im MGH-Aquifer und drei Heizlanzen im Quartär mit ca. 25 kW aufgeheizt. Die Bodenluftabsaugung erfolgt mit vier Absaugbrunnen im MGH und drei Absaugbrunnen im Quartär. Die Heizlanzen wurden elektrisch betrieben und hatten eine Leistung von 1,3 kW/m. Sie waren individuell regelbar, um den Untergrund schichtenbezogen aufheizen zu können. Während und nach dem Pilotversuch wurde eine Grundwas-

serung betrieben, um den Abstrom von ggf. mobilisierten Schadstoffen zu verhindern.

Die installierte oberirdische Sanierungsinfrastruktur bestand aus dem Anlagencontainer, dem Kühlaggregat, einem Auffangbehälter für Phase, den Luftaktivkohlefiltern, den Wasseraktivkohlefiltern sowie der Stromversorgung der Heizlanzen, den Extraktionsleitungen, den Messleitungen, den Steuerkabeln und diversen Messgeräten und musste auf engstem Raum untergebracht werden.

Die Durchführung des Pilotversuchs war in drei Phasen eingeteilt: eine Heizphase, eine Auskühlphase mit Absaugbetrieb und eine Auskühlphase ohne Absaugbetrieb. Für die Heizphase waren die Temperaturziele so festgelegt, dass die Mehrphasengemisch-Siedetemperaturen aller relevanten LCKW-Einzelparame-ter überschritten werden (90 °C). Für das am Standort vorkommende LCKW-Gemisch liegt dieser Wert bei ca. 65 °C.

Darüber hinaus wurde im Zuge des Pilotversuchs die Entwässerbarkeit des wassererfüllten Teils des MGH-Aquifers überprüft. Für die Entwässerung wurde neben der Pump-and-Treat-Maßnahme am Sicherungsbrunnen P9047 der durch die Vakuumpumpe erzeugte Unterdruck genutzt, um mit Absauglanzen das Wasser aus den Absaugbrunnen im Versuchsbereich zu fördern.



03 Zusammenstellung von Stratigraphie, Lithologie, Bohrkernen, Durchlässigkeit, Grundwasserführung und LCKW-Bodengehalten

Überwachung

Begleitend zum Pilotversuch erfolgte die Überwachung von Bodentemperatur, Unterdruck der Absaugung in der Anlage, Grundwasserstand sowie von Setzungen des Bodens. Ebenfalls wurden die Austragsmenge und Austragsrate von LCKW im abgesaugten Gas und im geförderten Wasser bestimmt. Um den Zusammenhang zwischen Austrocknung und Baugrundsetzungen zu erheben, wurden vor und während der Maßnahme Bodenproben gewonnen und der Wassergehalt bestimmt.

An den benachbarten Gebäuden wurde vor Versuchsbeginn eine architektonische Beweissicherung durchgeführt. Während des Versuchs wurden die Gebäude regelmäßig hinsichtlich Risse und Setzungen überwacht. Am Ende des Pilotversuchs wurde der verbleibende LCKW-Gehalt im Boden mit einer Bohrung im Pilotversuchsbereich bestimmt. Da es Hinweise auf einen Sanierungseffekt im besser durchlässigen MGH auch außerhalb des Pilotbereichs gab, wurde auch dort der Boden mit einer zusätzlichen Bohrung auf LCKW untersucht.

Ergebnisse

Im Quartär wurden 95 °C und im entwässerten Teil des MGH 81 °C (Mittelwert aller In-situ-Temperaturmesspunkte) rund zwei-

einhalb Monate nach Versuchsbeginn erreicht und für rund fünf Tage gehalten. Im grundwassererfüllten Bereich des MGH lag die Temperatur deutlich niedriger. Die Temperatur im entwässerten Teil des MGH ist niedriger als im Quartär. Dies ist auf eine höhere Absaugrate zurückzuführen, die im klüftigen Fels einen stärkeren Kühlungseffekt verursachte, als im gering durchlässigen Quartär. Die Temperaturen im Boden waren erwartungsgemäß heterogen verteilt und stiegen im zentralen Heizbereich lokal

Die Geschwindigkeit der Hydrolyse ist temperaturabhängig. Je höher die Temperatur desto schneller läuft dieser Prozess ab. Die Hydrolyse trug am Standort mit mindestens 20 % erheblich zur Schadstoffminderung bei. Die LCKW-Austragsrate über die Bodenluft betrug zeitweise bis zu 500 g/h.

Aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeit des schluffig-tonigen Quartärs wurde dort zunächst nur eine sehr geringe Absaugrate von 20 m³/h realisiert. Ab einer durchschnittlichen Temperatur von ca.

Die LCKW-Austragsrate über die Bodenluft betrug zeitweise bis zu 500 g/h.

auf bis zu 147 °C an. Die Heizung musste zu Anfang des Versuchs aus technischen Gründen zweimal unterbrochen werden.

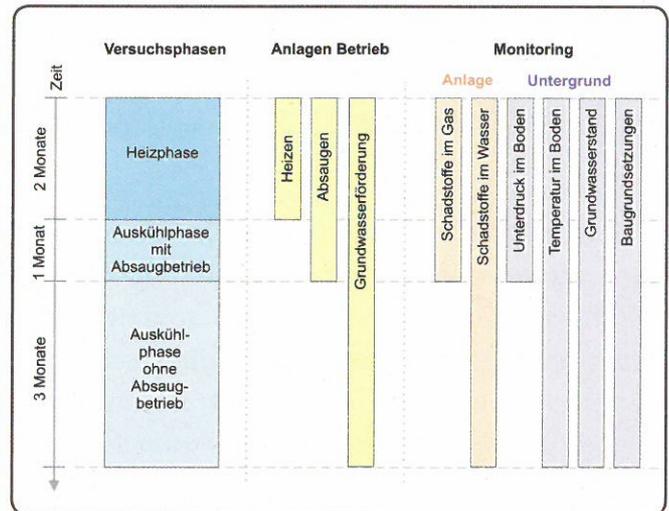
Die Abnahme von LCKW im Boden erfolgt am Standort durch den Austrag über die abgesaugte Bodenluft bzw. das abgepumpte Wasser und durch Hydrolyse (chemische Zersetzung) des Hauptschadstoffs (1,1,1-TCA) zur ungefährlichen Essigsäure (ca. 80 %) bzw. zu 1,1-Dichlorethen (ca. 20 %). 1,1-Dichlorethen siedet unter atmosphärischem Druck bei 32 °C und wird damit unter den gegebenen Bedingungen schnell gasförmig ausgetragen und zur Bestimmung der Hydrolyse in der Bodenluft gemessen.

45 °C konnten aufgrund der fortschreitenden Austrocknung und der damit resultierenden Verbesserung der Durchlässigkeit höhere Absaugraten von 40–60 m³/h realisiert werden. Die Hauptschadstoffmasse war ab einer durchschnittlichen Temperatur von ca. 65 °C ausgetragen. Im Quartär wurden rund 83 kg LCKW ausgetragen und unter Berücksichtigung der Hydrolyse insgesamt ca. 108 kg LCKW entfernt.

Im MGH wurden aufgrund höherer Durchlässigkeiten schon zu Beginn der Absaugung bei noch kaum erhöhten Temperaturen hohe Schadstoffausträge erzielt. Obwohl der Hauptaustag der LCKW aus



04 Der Heizbereich des Pilotversuchs hatte einen Durchmesser von 4,5 m und eine Tiefenerstreckung von 3,5 bis 10,5 m unter Gelände



05 Schematischer Ablaufplan des Pilotversuchs

dem MGH bei niedrigen Temperaturen erfolgte, waren für die nahezu vollständige Schadstoffentfernung erhöhte Temperaturen erforderlich. Hierfür sind wahrscheinlich schluffig-tonig verwitterte Bereiche im MGH verantwortlich, aus denen die LCKW nur durch Aufheizung effektiv entfernt werden konnten. Eine nahezu vollständige Schadstoffentfernung war bei einer durchschnittlichen Temperatur von ca. 50 °C erfolgt. Im MGH wurden ca. 160 kg LCKW ausgetragen und unter Berücksichtigung der Hydrolyse insgesamt rund 200 kg entfernt.

Nebenwirkungen

Zu Beginn wurden im Pilotversuchsbereich bis zu 2000 mg/kg LCKW im Boden nachgewiesen. Nach dem Pilotversuch lagen die LCKW-Bodengehalte bei maximal 2,1 mg/kg. Im Quartär und den tieferen Schichten des MGH waren am Ende des Pilotversuchs keine LCKW nachweisbar.

Der Pilotversuch ermöglichte es, den Heizbereich im Quartär und MGH effektiv zu dekontaminieren. Die Dekontamination kann bei Temperaturen von 65 °C als effizient bezeichnet werden. Die weitere Erhöhung der Temperatur führte nur noch zu sehr geringen zusätzlichen Schadstoffausträgen.

Durch die besseren Durchlässigkeiten wurde der MGH über den Pilotversuchsbe-

reich hinaus zum großen Teil dekontaminiert, wenn auch anzunehmen ist, dass in schluffig-tonig verwitterten Bereichen des MGH außerhalb des Heizbereichs LCKW weiterhin vorhanden sind. Eine Dekontamination im Quartär über den Pilotversuchsbereich hinaus wurde erwartungsgemäß nicht festgestellt. Nach Durchführung des Pilotversuchs wurden im Quartär außerhalb des Heizbereichs unverändert hohe LCKW-Bodengehalte (bis 2700 mg/kg) nachgewiesen.

Schadstofffreiheit

Der grundwasserführende Teil des MGH konnte mit den eingesetzten Mitteln (Grundwasserförderung mit ca. 600 l/h durch Pumpen und Absaugen) nicht entwässert werden. Nach dem Pilotversuch war der untere Bereich des MGH innerhalb und außerhalb des Pilotversuchsbereichs trotz der Grundwasserführung weitgehend schadstofffrei. Dies wurde durch einen Pumpversuch an einer Messstelle im Kernschadensbereich (aber außerhalb des Pilotversuchsbereichs) bestätigt bei dem maximal 500 µg/l LCKW im Grundwasser nachgewiesen wurden (gegenüber 43000 µg/l im Januar 2012 vor Durchführung des Pilotversuchs). Dies bestätigt die über den Pilotversuchsbereich hinausgehende Schadstoffminderung im MGH.

Die Baugrundsetzungen korrelieren mit der Austrocknung des Bodens, die im Zuge von Aufheizung und Bodenluftabsaugung auftritt. Es wurden bis September 2013 maximal 15 mm Setzungen im Zentrum des Pilotversuchsbereiches gemessen. Ab ca. 3 m Entfernung vom Heizzentrum lagen die Setzungen bei <2 mm. Die Setzungsmulde ist somit auf den Heizbereich begrenzt und weist steile Flanken auf.

Der Boden trocknete im Lauf des Pilotversuchs aus. Die Bodenfeuchte des Quartärs lag vor dem Pilotversuch bei ca. 21 % und sank im Zentrum des Pilotversuchsbereichs auf Restfeuchtegehalte von ca. 2,5 % ab.

Fazit

Die Ziele des Pilotversuchs, d. h. die Ermittlung der Auslegungsparameter und Steuergrößen hinsichtlich der effizienten Anwendung der Sanierungsmethode am Standort, der Bestimmung des Setzungspotenzials zur sicheren Durchführung einer Sanierung in unmittelbarer Nähe zu Gebäuden und der Ermittlung von Kriterien für die Bestimmung des Sanierungsendes, wurden erreicht. Auf Basis der Ergebnisse und Auswertungen der Pilotsanierung wurde die Full-scale-Sanierung geplant und die Umsetzung begonnen.