

Dampf-Luft-Injektion (DLI)-SANIERUNG

Von Juli 2012 bis Dezember 2020 erfolgte in der Eppsteiner Straße die thermische In-Situ Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI-Sanierung). Die Anlage wurde von der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart konzipiert, erstellt und betrieben. Die Sanierung wurde gutachterlich zunächst von der Dr. Hug Geoconsult GmbH und ab 2014 durch das Büro CDM Smith Consult GmbH, heute CDM Smit SE betreut.

In einer Pilotphase im Jahr 2013 wurde die Anwendbarkeit des Verfahrens auf dem Grundstück überprüft. Besonderes Augenmerk lagen dabei u.a. auf möglichen Setzungen und der vollständigen Erfassung der verdampften Schadstoffe über die Bodenluftabsaugung. Auf Grundlage der positiven Ergebnisse der Pilotanwendung konnte eine Sanierung des gesamten Standorts mittels DLI empfohlen werden.

Sanierungstechnik und Sanierungsverlauf der DLI am Standort

Die thermische In-situ-Sanierung basiert auf der Injektion eines Wasserdampf-Luft-Gemisches in die Sickerwasserzone unterhalb bzw. auf Höhe des Schadenszentrums. Eine simultane Injektion in den Grundwasser- und Schichtwasserbereich (teilgesättigte Zone bzw. ungesättigte Zone) erfolgte standortbedingt, s. Abbildung 1.

Die Schadstoffe werden infolge der sich um die Injektionsbrunnen (z.B. I8, I5, s. Abb. 1) ausbreitenden Dampf- bzw. Wärmefronten fortlaufend verdampft. Die dem Dampfstrom beigemengte Luft trägt die im Boden verdampften Kontaminanten gasförmig in Richtung der Absaugbrunnen in der ungesättigten Bodenzone. In Folge der Auftriebskräfte werden simultan die (teil)gesättigte und ungesättigte Zone behandelt. Die Entfernung der Schadstoffe erfolgt über die „heiße“ Bodenluftabsaugung (z.B. Extraktionsbrunnen E8, E9, E3, etc., s. Abb. 1).

Mit einer Erwärmung der gesättigten Zone bzw. der Schichtwasserzone erhöht sich die Löslichkeit der Schadstoffe im Grundwasser, so dass eine Grundwassersicherung bei diesem Verfahren dringend erforderlich ist. Hierzu wurden am Standort insgesamt 17 kleinskalige, druckluftbetriebene und speziell entwickelte „Sickerwasserpumpen“ eingesetzt.

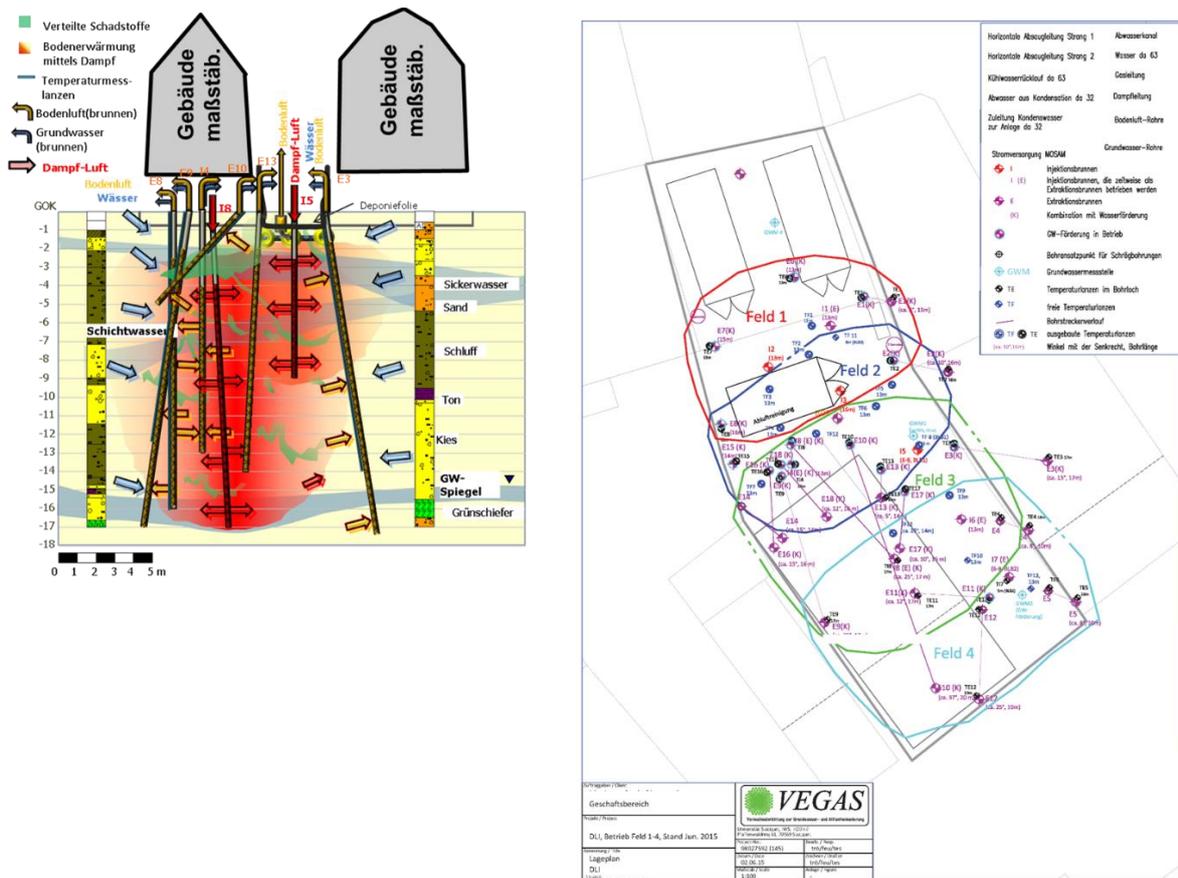


Abbildung 1: links: Querschnitt der DLI am Standort, rechts: Erschließung Sanierungsfeld

Durch die Injektion einer Dampf-Luft-Mischung beginnen die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampf-Siedetemperatur des Wassers von 100 °C, der Gemisch-Siedetemperatur zu siedeln und können gasförmig ausgetragen werden. Im Falle des am Standort anzutreffenden Gemisches verschiedener leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe liegt die Gemisch-Siedetemperatur bei 78 °C.

Bei der Erschließung des Baufeldes im Untergrund stellte die enge Bebauung des Standortes eine Herausforderung dar. Von den 20 abgeteufte Brunnen mussten 15 Brunnen zur Erfassung als Schrägbohrung ausgeführt werden. Die Sicker- und Grundwasserförderung erfolgte in den Absaugbrunnen, die entsprechend als Kombibrunnen ausgebaut wurden. Generell wurde der Untergrund bis zum Antreffen der Felszersatzzone und dem anstehenden Grünschiefer erbohrt.

Die Sanierungsanlage umfasste Komponenten zur Dampf-Luft-Erzeugung, zur Bodenluftabsaugung mit Kühlung sowie zur Kondensat-, Sickerwasser- und Grundwasserförderung.

Die DLI-Sanierung wurde von Norden nach Süden in der Reihenfolge Feld 1 (Pilotanwendung), Feld 1-2, Feld 1-2-3, Feld (1)-2-3, Feld 2-3-4 realisiert, s. Abb. 1. Die Dampf-Luft Zugabe erfolgte entsprechend den Abschnitten in 2 - 5 Injektionsbrunnen der insgesamt errichteten acht Brunnen I1 bis I8 zwischen 3 - 13 m u. GOK mit maximal 0,5 bar Überdruck. Die Bodenluft wurde während der Pilotphase an acht Absaugbrunnen (Ausbau in 2" bzw. 4") im Bereich von 2 - 14 m u. GOK sowie drei Injektionsbrunnen sowie einer flächig verlegten Absaugungsdrainageleitung in 60 cm Tiefe abgesaugt. Nach der Pilotphase und der Errichtung weiterer Absaugbrunnen erfolgte die Absaugung an 18 Brunnen und der Bodenluftdrainage.

Die heiße, abgesaugte Bodenluft, mit Temperaturen zwischen 40 - 85 °C, wurde im Wärmetauscher auf ca. 25 °C abgekühlt und die Schadstoffkonzentration mittels einem Prozessgaschromatographen in der geförderten Bodenluft, nach dem zweiten Luftaktivkohlefilter sowie in der Abluft stündlich bestimmt. Ab 2016 wurde zudem die Bodenluft der einzelnen Absaugstränge analysiert, um das Absaugregime besser optimieren zu können.

Die Reinigung der Abluft erfolgte mittels Luftaktivkohle. Ab 2016 wurde eine dreistufige Adsorptionsanlage mit je 200 kg Luftaktivkohle eingesetzt. Während der Pilotanwendung waren es jeweils 100 kg Aktivkohle.

Zur Kontrolle der Temperaturen im Sanierungsfeld waren alle Kombibrunnen mit Temperaturfühlern (Temperaturmesssonden TML, Pt100) in Tiefen von 1-3-5-7-9-11-13 m u. GOK bestückt. Zudem waren in dreizehn Bohrungen im Feld TML im Untergrund eingebaut. Insgesamt konnte die Wärmeausbreitung mit 217 Temperaturfühlern dargestellt werden.

Schadstoffaustrag

Nachfolgend werden die Betriebsdaten des Schadstoffaustrags, der Dampf-Luft-Injektion sowie der Bodenluftabsaugung über den Betriebszeitraum von Januar 2013 – Dezember 2020 dargestellt.

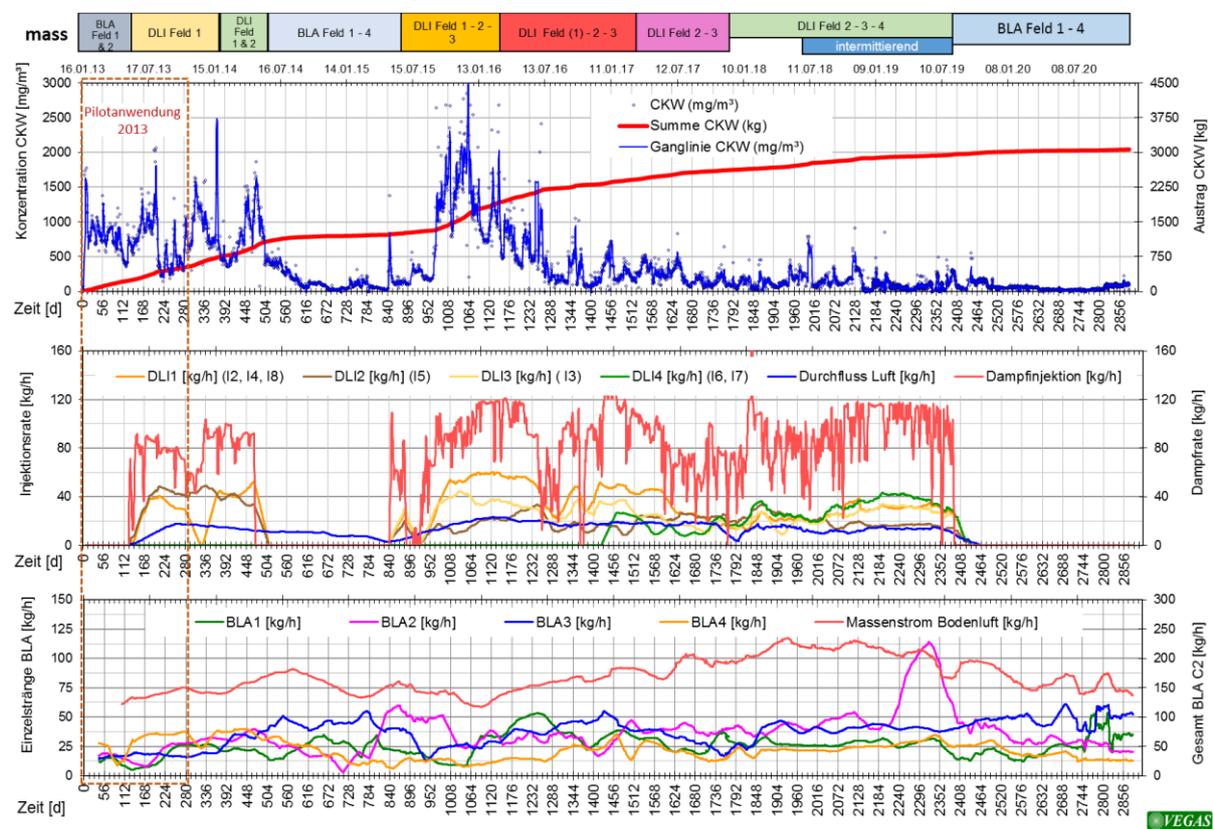


Abbildung 3: Sanierungsprozess

Bereits zu Beginn der Pilotanwendung mit vorgeschalteter Bodenluftabsaugung konnten ca. 250 kg LHKW aus der gesamten Sanierungsfläche entfernt werden (oberes Diagramm, Abb. 3). Zum Ende der Pilotanwendung waren es 750 kg LHKW. Die fortlaufende DLI in Feld 1 steigerte den Austrag mit fortschreitender Wärme-front. Nach Zuschaltung von Feld 2 konnten bis zu einer Sanierungspause im Mai 2014 ca. 1.250 kg LHKW aus ca. 100 m² Schadensfläche entfernt werden. Während dieser Betriebsphase lagen die LHKW-Gehalte in der Bodenluft zwischen 1.000 – 2.000 mg/m³.

Die am höchsten kontaminierten Bereiche, Feld 2 und Feld 3, wurden effektiv ab August 2015 mit Dampf-Luft beschickt (mittleres Diagramm, Abb. 3). Über die betriebenen fünf Injektionsbrunnen wurden ca. 100 kW Wärme in den Boden eingetragen. Mit einer Absaugrate von 150 Nm³/h (unteres Diagramm, Abb. 3) und Konzentrationen um 2.000 mg/m³ betrug der LHKW-Austrag ca. 7 kg/d aus ca. 120 m² behandelter Fläche mit einer Mächtigkeit von 10 m. Zum Jahresende 2016 war der Abschnitt 4 noch nicht erwärmt. Die Brunnen unterhalb des Gebäudes und am westlichen Rand der Sanierungsfläche (E8, E18, E10, E12) zeigten noch LHKW-Werte im g/m³ Bereich. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits 2.500 kg LHKW entfernt worden.

Bereits im Frühjahr 2016 war der Untergrund weitreichend auf über 82 °C erwärmt und die Dampfmenge wurde entsprechend reduziert. Es wurden im Mittel 50 KW Wärme eingetragen.

Die flächige Darstellung der Bodentemperaturen unterhalb der am stärksten kontaminierten Si-ckerwasserzone (3 - 8 m u. GOK) zeigt den abschnittswisen Fortschritt der Sanierung.

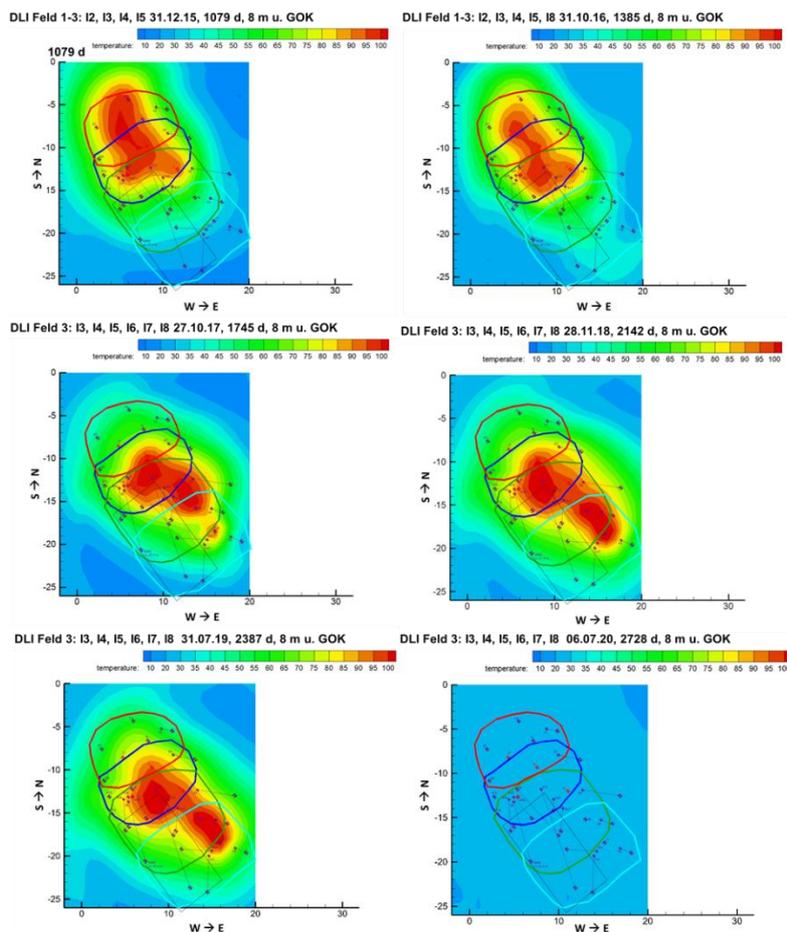


Abbildung 4: Temperaturlausbreitung während der Sanierung auf 8 m u. GOK

Die Austragsleistung ging im weiteren Verlauf auf Werte unter 1 kg LHKW täglich zurück. Nun wurden gezielt Feld 2 und 3 mit einer erhöhten Wärmemenge erschlossen, was zu einem viermonatigen Anstieg des Austrags auf ca. 2 kg/d LHKW führte. Die Sanierung der ehemals am höchsten kontaminierten Feldabschnitte 2 und 3 reichte bis in den Herbst 2017 und wurde danach um das Feld 4 erweitert. Eine deutliche Austragssteigerung konnte (die Austragsraten lagen unter 500 g/d LHKW) mit dem intervallweisen Betrieb der DLI über einen Zeitraum von 4 Monaten erzielt werden. Durch diese Fahrweise sollte sowohl die Temperatur konstant gehalten, die Dampfmenge reduziert und gleichzeitig der Effekt der

Ausbildung eines hohen Unterdrucks durch die Kondensation des Dampfs im Boden genutzt werden. In Folge des hohen Unterdrucks in den Bodenporen wird ein Ansaugen von Restkontamination aus den Porenzwickeln erzeugt. Zum Abschluss der DLI lag der Schadstoffaustrag bei ca. 60 g/d LHKW.

Nach Abschluss der DLI sanken (temperaturbedingt) die Gehalte an allen Brunnen, mit Ausnahme des im südlichen Bereich unter dem Wohngebäude liegenden Absaugbrunnen E11, unter den Sanierungszielwert. In diesem Bereich wurde dann in der Nachsorgephase nach Einstellung der DLI weiterhin die Bodenluft abgesaugt.

Die flächige Darstellung der LHKW-Gehalte in der Bodenluft stellt die Entwicklung der DLI im Sommer 2015, die Restkontamination am westlichen Rand des Sanierungsgebiets sowie in Feld 4 Ende 2017, zum Abschluss der Dampf-Luft-Injektion im Sommer 2019 sowie dem Sanierungsabschluss im Dezember 2020 dar.

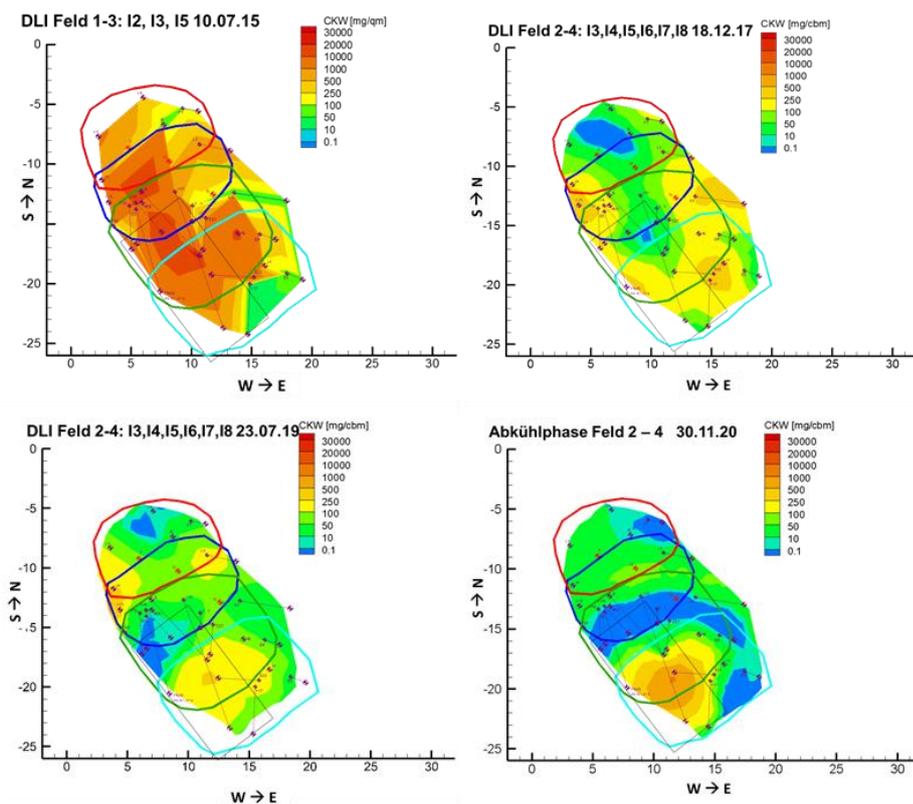


Abbildung 5: Entwicklung der LHKW-Gehalte in der Bodenluft

Insgesamt gesehen wurden mittels der Sanierung rund 4.000 kg Schadstoff aus dem Untergrund entfernt. Mit Schreiben vom 22.12.2020 wurde durch das Regierungspräsidium Darmstadt mitgeteilt, dass „weitere Maßnahmen zur Sanierung unter Einsatz des Dampf-Luft-Injektionsverfahrens nicht zu ergreifen“ sind. Eine nachlaufende Bodenluftabsaugung auf einer Teilfläche wurde im Mai 2022 beendet, nachdem dauerhaft die Sanierungszielwerte unterschritten waren.