

03.25

Lizenziert für Mark Zittwitz.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

34. Jahrgang
3. Quartal 2025
Seiten 77–116

altlasten spektrum

www.ALTLASTENDigital.de

Herausgegeben vom
Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement
und Flächenrecycling e. V. (ITVA)

20565



Organ des ITVA

Einmischungsprognosen zur Gefährdungsabschätzung bei schädlichen Boden- veränderungen

Wilfried Schneider, Andreas Schindler

Grundwasserprobenahme Ringversuch des LfU Bayern 2024

Carmen Jaggi, Frank Küchler,
Felix Geldsetzer

Waldbrände und Munitions- umsetzung: Mögliche Folgen von Wurzelbränden

Heinz Borg, Holger Preetz

Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW- Schadens mit einmaliger Wirkstoffinjektion

Michael Herbst, Peter Martus,
Mark Zittwitz, Gordon Bures, Lars Erpel

Ausschreibung ITVA-Preis

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG



Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW-Schadens mit einmaliger Wirkstoffinjektion

Michael Herbst, Peter Martus, Mark Zittwitz, Gordon Bures, Lars Erpel

1. Einleitung

Die Entwicklung der ehemaligen Pioneer-Kaserne in Hanau war zeitweise das größte Wohnbauprojekt im Rhein-Main-Gebiet [1]. In Vorbereitung der Wohnbebauung war u. a. die Sanierung eines Grundwasserschadens mit leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW), ausgehend von der ehemaligen chemischen Reinigung der Kaserne sowie eines weiteren Schadensherds, erforderlich. Um die Sanierungsbereiche wurden sogenannte Vorhalteflächen festgelegt, die erst nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen bebaut werden können. Zur Erreichung einer zeitnahen Freigabe der innerhalb der Vorhalteflächen gelegenen Baugrundstücke bestand daher Zeitdruck bei der Planung und Durchführung der Sanierungsmaßnahme.

Die Verfahrensauswahl erfolgte anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse. Die Kosten-Nutzen-Analyse wurde mit Hilfe einer Kostenvergleichsrechnung und einer Kostenwirksamkeitsanalyse durchgeführt. In der Kostenvergleichsrechnung wurden sowohl Investitionskosten als auch die zu erwartenden Betriebskosten einer Maßnahme berücksichtigt. Die Kostenvergleichsrechnung diente als Grundlage für die im Anschluss erstellte Kostenwirksamkeitsanalyse. Die Kostenwirksamkeitsanalyse stellte den Nutzwert (z. B. Grad der Gefahrenminderung) der einzelnen Sanierungsvarianten zu den berechneten Kosten ins Verhältnis. Das Ergebnis stellt die eigentliche Effektivität der untersuchten Sanierungsvarianten dar und darauf aufbauend wurde eine Vorzugsvariante vorgeschlagen.

Neben Bodenaustauschverfahren wie Großlochbohrungen bzw. langfristig zu betreibenden Sicherungsmaßnahmen wurden verschiedene in situ-Sanierungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung betrachtet.

Die Implementierung von Zirkulationssystemen wurde u. a. aufgrund negativer Erfahrungen bei früheren Sanierungsversuchen am Standort sowie der erwartbaren langen Behandlungsdauer als nicht zielführend erachtet. Die am häufigsten eingesetzten Wirkstoffe für diesen Zweck, sowohl für die mikrobielle reduktive Dechlorierung von LCKW (z. B. Melasse) als auch die Initiierung einer in situ-chemischen Oxidation (Fentons Reagenz), haben gemeinsam, dass sie im Untergrund rasch verbraucht werden bzw.

dauerhaft nachdosiert werden müssen. Durch die Entwicklung von feststoffbasierten Wirkstoffen und Verfahren zu deren Einbringung können die vorgenannten Einschränkungen der in-situ Sanierung überwunden werden. Mit der Injektion einer Feststoffsuspension mit mehrstufiger Wirkungsweise, langer Wirkdauer und auf den Verlauf der in situ-Maßnahme angepasster Freisetzung der Wirkstoffe ist eine in-situ Sanierung mit lediglich einer einmaligen Wirkstoffzugabe möglich.

Empfohlen wurde die Anwendung in-situ chemische Reduktion (ISCR) in Verbindung mit einer in-situ biologischen Reduktion (ISBR) mit dem Ziel der Unterstützung des bereits stattfindenden natürlichen anaeroben LCKW-Abbaus. In der am Standort vorgesehene Ausführungsvariante sollte die gewünschte Wirkung durch die Einbringung einer EHC-Feststoffsuspension erzielt werden, da diese Variante geeignet erschien, eine Gefahrenabwehr herbeizuführen, in Vorversuchen am Standort erfolgreich getestet wurde, das mildeste Mittel im Vergleich zu den anderen bewerteten Maßnahmen darstellte (geringer Eingriff in die bereits ausgebildeten hydrochemischen Verhältnisse, Stärkung der natürlichen Abbaubedingungen) und darüber hinaus aufgrund der geringeren Kosten im Vergleich zu den anderen bewerteten Maßnahmen als angemessen erschien.

2. Standort

Das Projektgebiet liegt etwa 2 km südöstlich des Stadtzentrums von Hanau. Westlich, in Abstromrichtung grenzen Kleingartenanlagen an den Standort an. Die Schutzzone II des Trinkwasserschutzgebietes „Wasserwerk II“ beginnt ca. 400 m westlich des Standorts. Das Grundwasser fließt nach Westen in Richtung Wasserwerk.

Detaillierte Kenntnisse des Untergrundes und der Schadstoffverteilung am Standort konnten durch umfangreiche Untersuchungen mit hochauflösenden Methoden (MIP-, EC-, und Liner-Sondierungen sowie horizontalisierte Grundwasserprobenahmen) z. T. bis in Tiefen > 30 m erlangt werden.

Die beiden Herdbereiche hatten demnach eine Gesamtfläche von ca. 11.000 m², wobei die davon ausgehende Schadstofffahne über die Liegenschaftsgrenze

Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW-Schadens

hinaus reicht. Eine grobe Abschätzung der Schadstoffmasse im Untergrund ergab eine Gesamtmasse von etwa 3,3 t LCKW.

Die Hauptbelastung liegt im tieferen Teil des quartären Grundwasserleiters zwischen ca. 6 und 12 m u. GOK. Mit bis zu 7 mg/l LCKW wurden die höchsten LCKW-Konzentrationen im Grundwasser des Schadensherds „KF 013“ im Bereich der ehem. chemischen Reinigung festgestellt. Im flachen quartären Grundwasserleiter wurden in beiden Herdbereichen jeweils deutlich geringere Konzentrationen gemessen. Im zweiten Schadensherd (Herd West) lagen die maximalen LCKW-Konzentrationen etwa eine Größenordnung unter denen im Hauptschadensherd. Im Bereich KF 013 ist der tertiäre Grundwasserleiter ebenfalls betroffen.

Der quartäre Grundwasserleiter besteht aus Sanden und Kiesen, die lokal von eingeschaltete Schluffhorizonten untergliedert werden. Der Grundwasserflurabstand beträgt etwa 1,5 bis 3,0 m.

Abbildung 1 zeigt den Standort mit den beiden Schadensherden KF 013 (ehem. chemische Reinigung) und Herd West sowie der Schadstoffverteilung im Grundwasser des tieferen quartären Grundwasserleiters vor Sanierungsbeginn. Außerdem dargestellt sind die im Rahmen der Gesamtsanierung in diesem Tiefenintervall durchgeführten Injektionsbohrungen (grüne Kreise/Injektionsradien). Ausgespart ist im Herd KF 013 das Pilottestfeld, in dem keine weitere Eingabe erforderlich war.

3. Sanierungsziel

Als Sanierungsziel wurde der Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) von 20 µg/l LCKW festgelegt, der im Mittel in den einzelnen Sanierungsbereichen in drei Pro-

benahmen innerhalb eines Jahres eingehalten werden muss.

4. Sanierungsverfahren

Für die Sanierung wurde eine Wirkstoffformulierung mit mehrstufiger Wirkungsweise, langer Wirkdauer und auf den Verlauf der in situ-Maßnahme angepasster Freisetzung der Wirkstoffe gewählt (EHC® Reagent) [2]. Das EHC-Substrat stimuliert durch den Anteil an organischer Substanz (ca. 60 %) sowohl den bereits natürlich stattfinden biologischen Abbau als auch den abiotischen Abbau durch nullwertiges Mikro Eisen (ca. 40 %). Das EHC sorgt dabei auch für die Einstellung eines optimalen geochemischen Milieus im Grundwasserleiter.

Die Wirkstoffformulierung wurde durch horizontgenaue *Direct Push*-Injektionen mit dem *Targeted Solids Emplacement (TSE™)* d.h. „gezielte Feststoff Injektion“-Verfahren in einem geeigneten Bohrraster gleichmäßig in den Untergrund eingebracht [3]. Hauptverfahrensmerkmal des TSE-Verfahrens ist die zielgerichtete Injektion einer hochviskosen Wirkstoffsuspension mittels hydraulischen Drucks über ein Bohrgestänge direkt in den Untergrund. Das Trägermedium verhindert dabei die Entmischung der Wirkstoffe und ermöglicht größere Injektionsradien sowie die Injektion in gering durchlässigen Böden (Schluff, Ton) und sogar Festgestein. Im vorliegenden Fall wurden Ausbreitungsradien von > 5 m erreicht. Zusätzlich wurde eine *Dehalococcoides*-Kultur (Dhc) über kleinkalibrige Infiltrationselemente in den Untergrund eingebracht (Bioaugmentation), um den Aufbau einer ausreichend großen Dhc-Population zu unterstützen.



Abbildung 1: Standortplan mit Sanierungsbereichen, Vorhalteflächen und LCKW-Fahne

Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW-Schadens

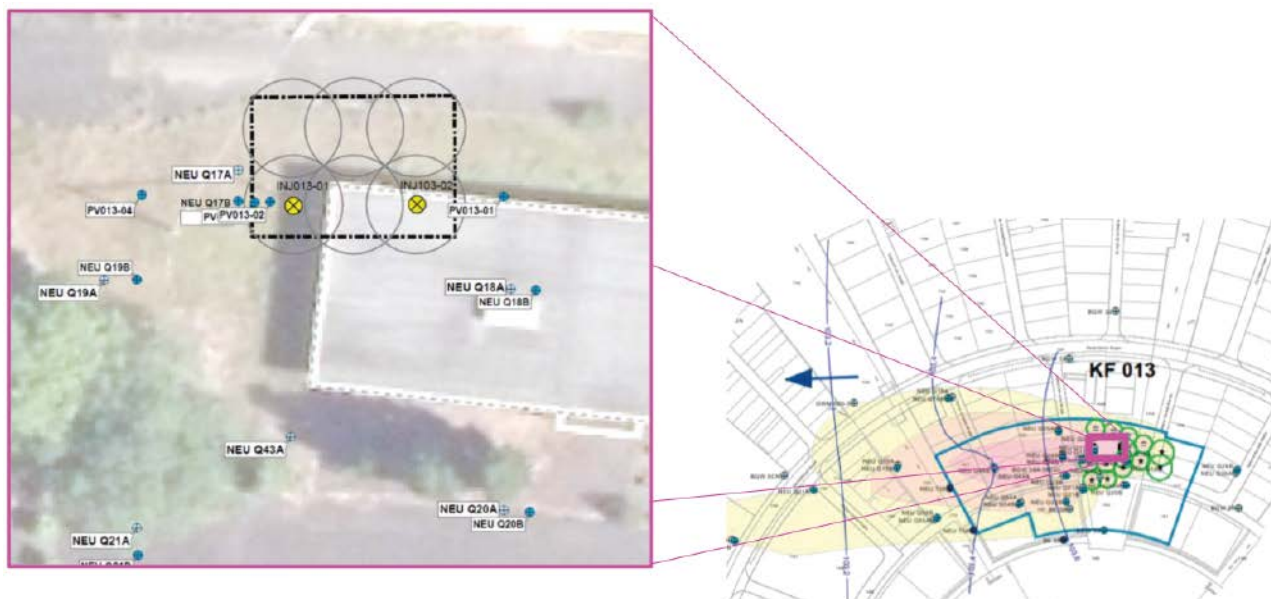


Abbildung 2: Lage des Pilottestfeldes mit Grundwassermessstellen

5. Pilotversuch

Um den Sanierungserfolg abzusichern, die Wirksamkeit des Ansatzes zu verifizieren und die Planung der Gesamtsanierungsmaßnahme zu verfeinern, wurde die Gesamtsanierung durch einen Pilotversuch vorbereitet.

Das etwa 100 m² große Pilottestfeld liegt im Belastungsschwerpunkt des Herdbereichs ehem. chemische Reinigung (KF013, Abbildung 2). Im Rahmen des Pilotversuchs wurden im Juni 2020 5 t EHC[®] über sechs Bohrungen in den tieferen Teil des quartären Grundwasserleiters eingegeben. Zudem wurden 50 L einer Dhc-Kultur in den Untergrund infiltriert.

Das Grundwasser wurde begleitend zunächst monatlich und später in größeren Abständen auf LCKW, Ethen, Eisen, gelösten organischen Kohlenstoff, verschiedene Milieuparameter wie Sulfat und Methan und Dhc untersucht.

6. Gesamtsanierung

Die Substrateingabe im Rahmen der ISCR-Gesamtsanierung der beiden Herdbereiche erfolgte in der ersten Jahreshälfte 2023. Im nördlichen Teil von Herd West

wurde die Sanierung vorgezogen. Die Substrateingabe an sieben Injektionsbohrungen erfolgte hier bereits im März 2021.

Insgesamt wurden im Rahmen der Gesamtsanierung inkl. Pilotversuch und der vorgezogenen Sanierung des nördlichen Teils von Herd West 200 t EHC[®], sowie 400 l einer Dhc-Kultur in den Untergrund eingebracht. Das Foto (Abbildung 3) zeigt die Substrateingabe am Standort.

Die sanierungsbegleitende Grundwasserüberwachung erfolgt in den Herdbereichen sowie in deren unmittelbarem Abstrom vierteljährlich und standortweit halbjährlich.

7. Ergebnisse

Abschließende Ergebnisse liegen für den Pilotversuch sowie die Teilfläche im nördlichen Teil des Herd West, auf der die Sanierung vorgezogen wurde, vor. Für die Gesamtsanierung sind derzeit die Daten der ersten beiden Jahre nach Wirkstoffeingabe der vierteljährlichen sanierungsbegleitenden Grundwasserüberwachung verfügbar.



Abbildung 3: EHC-Eingabe (Bohrgerät links, Mischanlage rechts)

Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW-Schadens

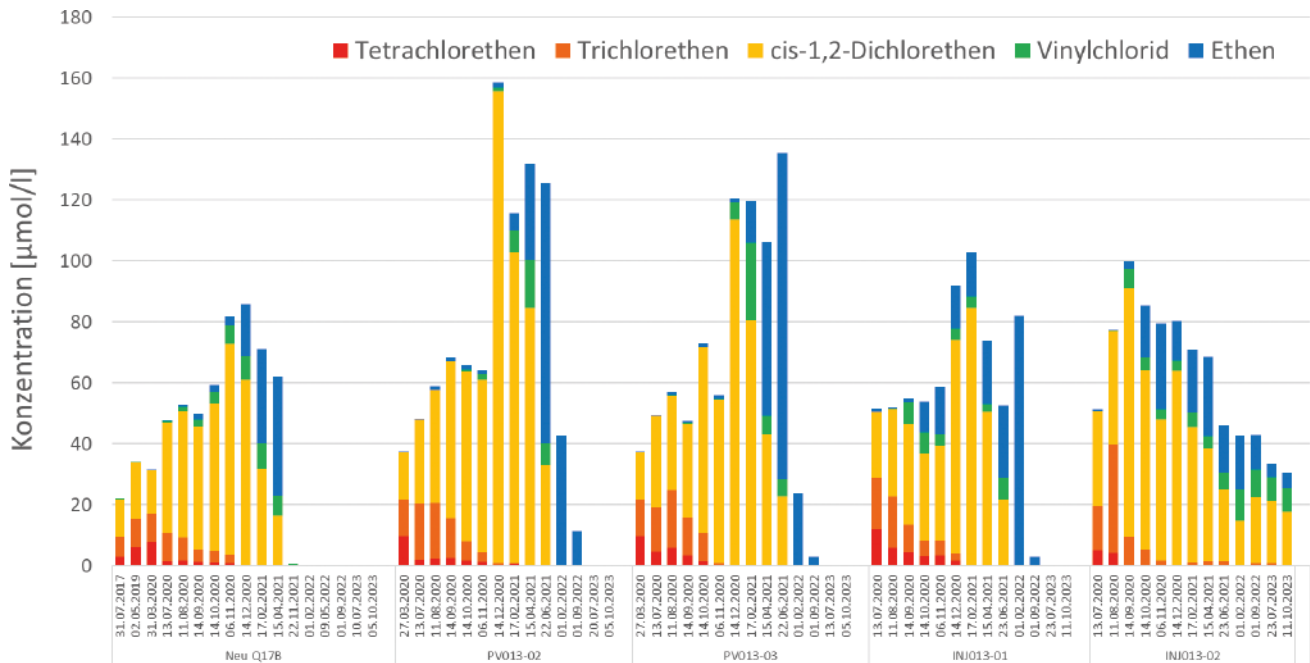


Abbildung 4: Konzentrationsentwicklung im Pilottestfeld, die EHC-Eingabe erfolgte im Juni 2020

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der LCKW- und Ethen-Konzentrationen in den GWM des Pilottestfeldes (Lage der GWM siehe Abbildung 2).

Demnach begann die anaerobe reduktive Dechlorierung unmittelbar nach der Substrateingabe, was durch eine Verschiebung der LCKW-Zusammensetzung zu den niederchlorierten LCKW deutlich wird (sequenzielle Abspaltung von Chloratomen). Gleichzeitig stiegen die LCKW-Konzentrationen infolge einer Mobilisierung durch die Substrateingabe. Vinylchlorid trat dabei stets untergeordnet auf, was auf einen relevanten Beitrag abiotischer Abbaumechanismen hinweist. Der Nachweis von Ethen belegt die vollständige Dechlorierung zu chlorfreien Abbauprodukten.

Spätestens 20 Monate nach Substrateingabe lagen die LCKW-Konzentrationen im Pilottestfeld unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die einzige Ausnahme bildet die am anstromigen Rand des Pilottestfeldes gelegene

Messstelle INJ013-02. Zufließendes belastetes Grundwasser verhinderte hier den vollständigen Rückgang der LCKW-Konzentration im Rahmen des Pilotversuchs. Reboundeffekte wurden auch fast fünf Jahre nach Pilotversuchsbeginn nicht beobachtet.

Ein ähnlicher Verlauf wurde im nördlichen Teil von Herd West beobachtet. Hier bestanden vor Sanierungsbeginn vergleichsweise geringe Belastungen. Für diese Teilfläche (siehe Abbildung 1, hellblau umrandet) ist der Sanierungserfolg bereits behördlich bestätigt worden. Hier konnte das Monitoring eingestellt werden und die Bebauung kann erfolgen.

Für die Gesamtsanierung belegen die vorliegenden Daten einen ähnlichen Verlauf. Die folgende Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der mittleren LCKW-Konzentrationen gemäß Sanierungszielvereinbarung in den behandelten Herdbereichen im Verlauf der Sanierungsmaßnahme. Die einzelnen Mittelwerte

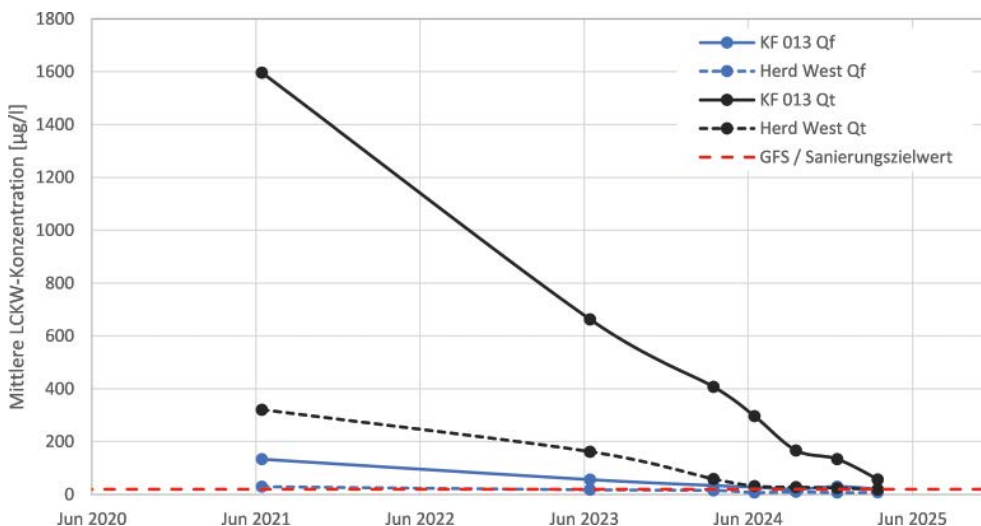


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren LCKW-Konzentrationen in den behandelten Herdbereichen im Verlauf der Sanierungsmaßnahme

Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW-Schadens

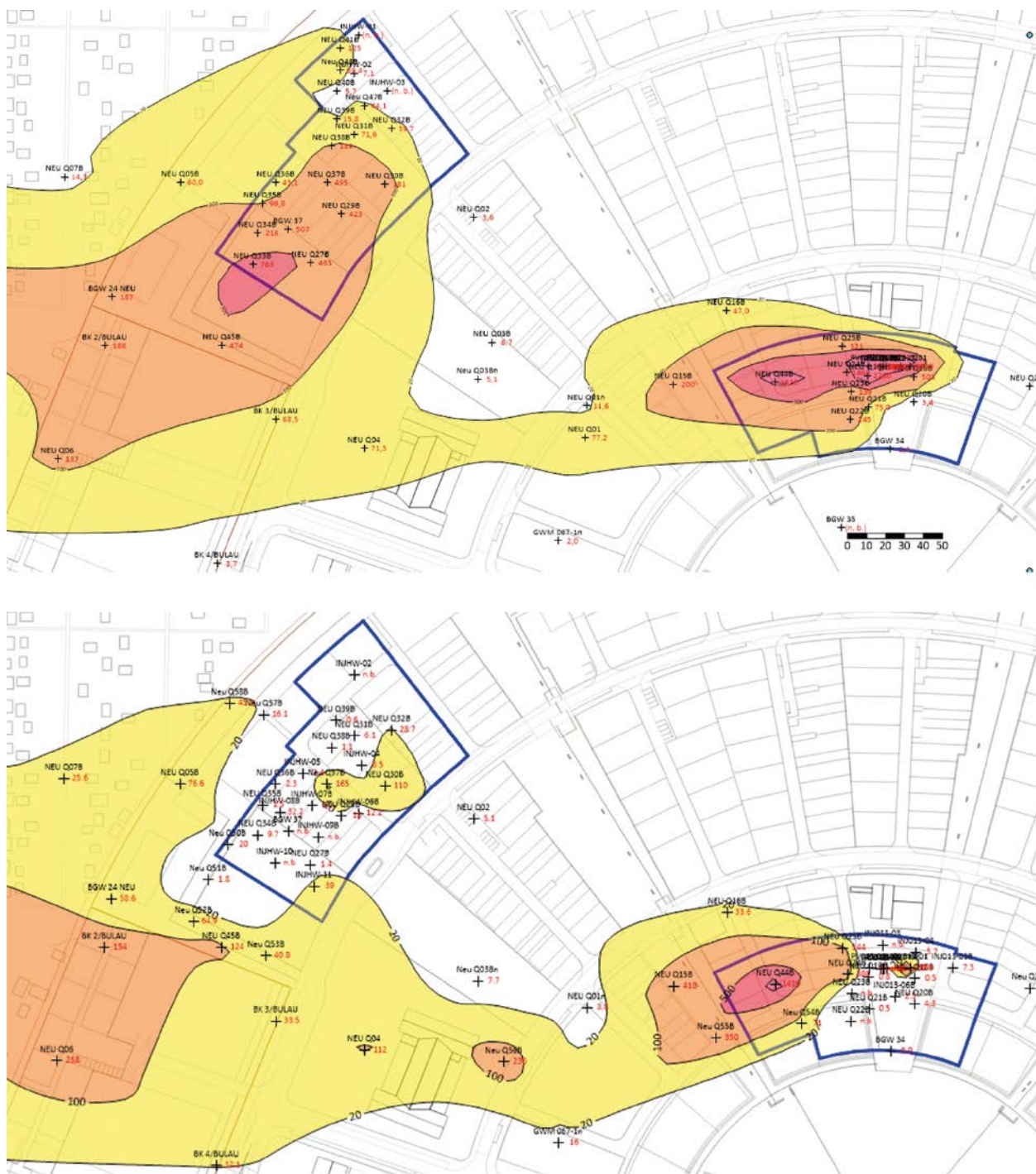


Abbildung 6: LCKW-Verteilung im tiefen quartären Grundwasserleiter vor Sanierungsbeginn und im Januar 2025

werden dabei aus den Messwerten an 12 bis 25 Grundwassermessstellen in den Sanierungsbereichen sowie deren unmittelbaren Abstrom gebildet. Es wird jeweils zwischen dem flachen (Q_f) und tiefen quartären Grundwasserleiter (Q_t) unterschieden.

Es ist ein deutlicher Konzentrationsrückgang, teilweise auf Werte unterhalb der GFS erkennbar. Einzig im tiefen quartären Grundwasserleiter des Hauptschadensbereichs KF 013 war der Sanierungszielwert im April 2025 mit 57 µg/l LCKW noch nicht erreicht oder bereits unterschritten.

Abbildung 6 zeigt die LCKW-Verteilung im tiefen quartären Grundwasserleiter vor Sanierungsbeginn und im Januar 2025, etwa zwei Jahre nach Sanierungsbeginn im Januar 2023. Überschreitungen des GFS-Werts bzw. des Sanierungszielwerts von 20 µg/l LCKW liegen nur noch in einzelnen GWM der Herdbereiche vor. Die Schadstoffnachlieferung aus den Herdbereichen in die Abstromfahne ist bereits unterbunden. Konzentrationsrückgänge in Folge der Sanierungsmaßnahmen sind außerdem bereits im Abstrom der Herdbereiche erkennbar.

Nachhaltige in situ-Sanierung eines großflächigen LCKW-Schadens

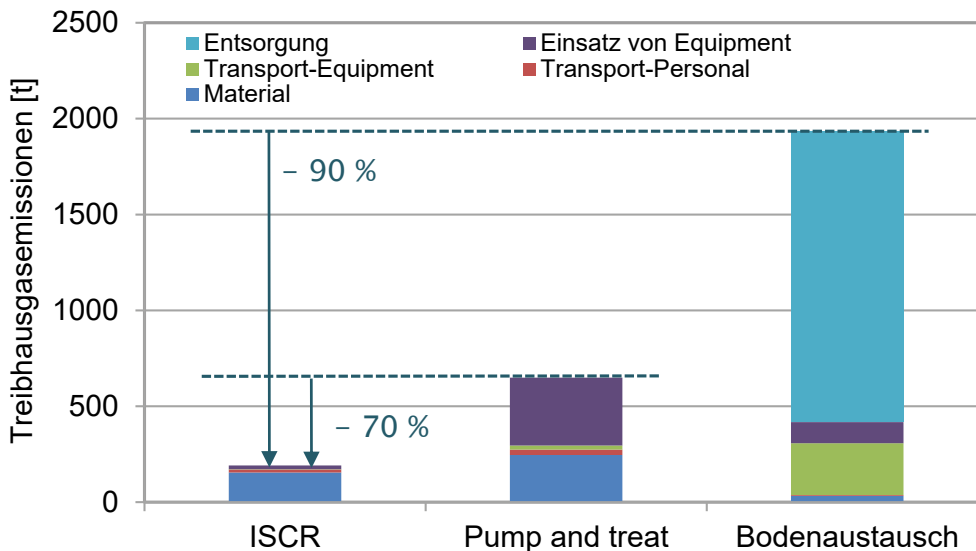


Abbildung 7: Treibhausgasemissionen für verschiedene Sanierungsverfahren

8. Sanierungskosten

In beiden Herdbereichen wurden ca. 77.000 m³ (entspricht ca. 140.000 t) Boden direkt behandelt. Die spezifischen Behandlungskosten (inkl. Planung, fachgutachterliche Begleitung und Monitoring für drei Jahre ab Substrateingabe) beliefen sich auf 20 €/t. Unter der Annahme eines zehnmaligen Austauschs des Porenvolumens im kontaminierten Bereich ergeben sich für das Grundwasser spezifische Behandlungskosten von 18 €/m³. Somit wurden ca. 850 €/kg Schadstoff aufgewendet.

9. Nachhaltigkeitsbewertung

Im Zuge einer Nachhaltigkeitsbewertung wurde eine Energiebilanz für die Maßnahme aufgestellt und die Treibhausgasemissionen abgeschätzt. Die Abschätzung erfolgte mit dem Excel basierten Berechnungstool SiteWise™ [4]. Dabei wurde beispielsweise der Ressourcenverbrauch für die Herstellung der Wirkstoffe, der Kraftstoffverbrauch der Baumaschinen, für An- und Abreise der Mitarbeiter sowie die Anlieferung der Wirkstoffe einbezogen.

Dabei ergibt sich für ISCR ein spezifischer Energieverbrauch von 10,5 kWh/t Boden sowie Treibhausgasemissionen von 1,9 kg CO₂/t Boden. Das verwendete EHC®-Reagenz ist darüber hinaus ungiftig, sicher in der Handhabung und wird aus Recyclingmaterialien hergestellt. Für die zu Vergleichszwecken betrachteten alternativen Sanierungsverfahren Bodenaustausch und P&T ergaben sich deutlich höhere spezifische Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen (Bodenaustausch: 66,1 kWh/t und 15,0 kg CO₂/t Boden, P&T: 46,3 kWh/t und 8,1 kg CO₂/t Boden) bei zudem erheblich höheren Kosten. Die Abbildung 7 veranschaulicht das.

Die Treibhausgasemissionen für das eingesetzte Sanierungsverfahren (ISCR) sind um etwa 90% geringer als für Bodenaustausch und etwa 70% geringer als für eine P&T-Maßnahme. Für den Energieverbrauch ergibt sich ein ähnliches Bild.

10. Fazit

Bei einer Wirkungsdauer von > 20 Monaten können die strengen Sanierungsziele von 20 µg/l LCKW mit einer einmaligen Substratinjektion erreicht werden. Das Verfahren ist minimal invasiv und ermöglicht eine „diskrete“ Durchführung vor Ort. Zudem sind Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bis zu 90% geringer als bei konventionellen Sanierungsverfahren.

Die dargestellte Sanierung im Pioneer Park, Hanau wird sich gemäß der vorliegenden Daten nicht nur als effektiv, sondern auch als kostengünstig und nachhaltig erweisen.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://pioneer-park.de/>
- [2] <https://active-oxygens.evonik.com/de/produkte-und-services/boden-und-grundwassersanierung/ehc-reagent>
- [3] <https://sensatec.de/wp-content/uploads/2022/11/Flyer-Sensatec-TSE-Injektion.pdf>
- [4] U.S. Navy, U.S. Army Corps of Engineers, & Battelle: SiteWise™ version 3.2 users guide. Battelle Memorial Institute, 2018.

Autorenschaft

Michael Herbst (Dipl.-Geoökologe)

Dr. Peter Martus (Dipl.-Geol.)

AECOM Deutschland GmbH

Mainzer Landstraße 181

60327 Frankfurt am Main

michael.herbst@aecom.com

Mark Zittwitz (Dipl.Ing.)

Gordon Bures (M.Eng.)

Lars Erpel (M.SC. Geowissenschaften)

Sensatec GmbH

Tempelhofer Weg 8

12099 Berlin

m.zittwitz@sensatec.de