

ITVA



2022



TAGUNGSBAND

ITVA- Altlastensymposium



11. - 13. Mai 2022
Travemünde

Thermische In-situ-Sanierung eines LCKW-Schadens in Neumünster: Von der Planung zur Ausführung und Erfahrungen aus der Praxis

Oliver Trötschler, Malte Horstmann, Daniel Klopp

1 Standortbeschreibung

In der Stadt Neumünster wurde auf dem Altstandort eines ehemaligen Mineralöl- und Chemiegroßhandels (Betriebszeitraum 1978 – 2008) eine sanierungsbedürftige LCKW-Verunreinigung festgestellt.

Seit dem Jahr 1991 ist der unteren Bodenschutzbehörde durch orientierende Untersuchungen ein Grundwasserschaden durch leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) auf dem betreffenden Grundstück bekannt. In den folgenden Jahren wurden Maßnahmen zur Schadenserkundung durchgeführt, die jedoch zunächst keine eindeutige Klärung der Schadensursache erbrachten.

Erst bei der späteren Befragung von Zeitzeugen stellte sich heraus, dass im Nordwesten des Grundstückes bei einer Havarie rund 1.000 L Lösemittel (Tetrachlorethen) aus einem Lagertank freigesetzt worden sind. Aufgrund von Zeitzeugenberichten gelten darüber hinaus noch weitere Handhabungsverluste während des Betriebszeitraumes als gesichert.

Bislang wurden folgende wesentlichen Untersuchungen und Maßnahmen zum Grundwasserschutz ausgeführt:

- 1994: Erste Orientierende Altlastenuntersuchung
- 1995 – 2002: Betrieb einer P & T-Maßnahme durch den Verursacher sowie diversen Nachfolgegesellschaften bis zum Jahre 2002, LCKW-Austrag ca. 1.200 kg
- 2008 – 2010: Im Zuge von Betriebseinstellung und Grundstücksverkauf Detailuntersuchungen am Standort mit erheblichen LCKW-Befunden im Nordwesten des Grundstückes (ehem. Lagertank und Umfüllstation für Tetrachlorethen).
- 2012 – 2019: Sanierungsuntersuchungen und -planung u. a. In-situ-Sanierung, Wabenverfahren, Großlochbohrungen
- 2012 – 2021: Fortsetzung P & T-Maßnahme durch die Stadt Neumünster, LCKW-Austrag ca. 200 kg

1.1 Geologie und Hydrogeologie

Die Stadt Neumünster liegt im Bereich des schleswig-holsteinischen Geestrückens auf einer weichselkaltzeitlichen Sanderfläche, die den wenige Kilometer nördlich und östlich verlaufenden Endmoränenzügen vorgelagert ist. Die glaziofluviatilen Sande bilden am Standort einen ersten oberflächennahen nicht abgedeckten Grundwasserwasserleiter, der als gut durchlässig und gegenüber eindringenden Schadstoffen als nur gering geschützt zu beschreiben ist. Ein weichselzeitlicher Beckenschluff bildet in einer Tiefe von 16-17 m u. GOK die Basis des ersten Grundwasserleiters. Der Grundwasserflurabstand liegt bei ca. 2,2 bis 3,2 m und die generelle Grundwasserfließrichtung ist nach Südwesten orientiert.

Darunter folgen weitere Grundwasserstockwerke aus pleistozänen Schmelzwasserablagerungen, teilweise von Geschiebemergel und Beckenschluffen unterbrochen. Die insgesamt bis zu 85 m mächtigen Glazialsande gehen direkt in die darunter anstehenden miozänen Braunkohlensande über. Diese werden unterlagert von Glimmertonen. Die bis zu 60 m mächtigen

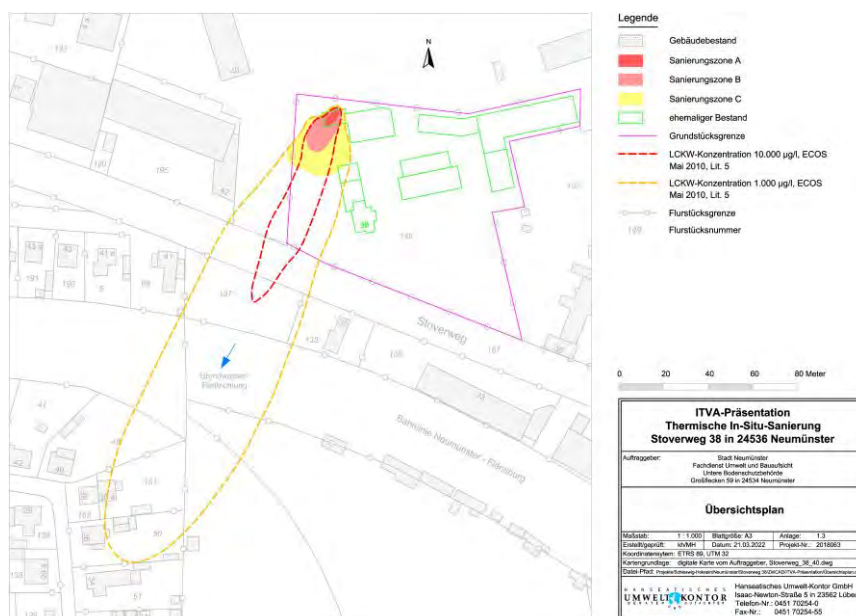
Braunkohlensande bilden den Hauptgrundwasserleiter, der in Neumünster überwiegend zur Trinkwassergewinnung genutzt wird.

Der Untergrund weist im Grundwasserschwankungsbereich bereichsweise geringmächtige Schlufflagen auf. Ab einer Tiefe von 2,5 m im Norden und 5,0 m im Süden treten in den Sanden organische Beimengungen auf, die als Holzkohle bzw. „Braunkohlen“ beschrieben wurden. Meist treten diese fein verteilt in den Sanden auf, bereichsweise werden Lagen von 1-2 dm angetroffen. Aufgrund der hohen Adsorptionskapazität der organischen Bestandteile und der Affinität der LCKW zur organischen Substanz findet eine Akkumulation der LCKW in kohleführenden Sanden statt.

Die hydraulische Durchlässigkeit des ersten Grundwasserleiters variiert innerhalb einer Spanne von $1,1 \times 10^{-4}$ bis $1,7 \times 10^{-3}$ m/s. Das mittlere Grundwassergefälle I liegt bei 0,0005. Die daraus resultierenden Abstandsgeschwindigkeiten liegen bei 15 – 80 m/a.

1.2 Schadstoffverteilung

Im Vorfeld der Sanierungsplanungen wurden von der ECOS Umwelt Nord GmbH, Kiel, umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Kontaminationssituation zu erfassen und zu bewerten.



Es wurde eine Schadstofffahne mit LCKW-Gehalten größer als 100 µg/L auf einer Länge von mehr als 300 m lokalisiert. Während im Schadenszentrum (Bereich A und B) nahezu 100 % PCE auftraten, wurden im weiteren Abstrom überwiegend Abbauprodukte (TCE, cDCE) festgestellt.

Abb. 1: Lageplan mit Grundwasserbelastung durch LCKW (2020)

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die LCKW in der gesättigten Zone in Form von fein verteilter, inkohärenter organischer Phase, am Boden sorbiert und in gelöster Form im Grundwasser vorlagen. Phasenvorkommen traten insbesondere oberhalb bzw. innerhalb der kohleführenden Lagen auf (s. Abb. 2). Die maximalen LCKW-Gehalte lagen bei 8.100 mg/kg im Boden und 49.000 µg/L im Grundwasser (DP-Sondierung).

In der ungesättigten Bodenzone wurden im Schadenszentrum bis zu 8.400 mg/m³ in der Bodenluft gemessen.

Auf Grundlage der 2008 – 2010 durchgeführten Detailuntersuchungen wurden die Schadstoffmassen im Bereich der Sanierungszonen A bis C grob auf einer Fläche von 650 m² mit ca. 800 kg LCKW, primär Perchloroethen (PCE) abgeschätzt, s. Abb. 2.

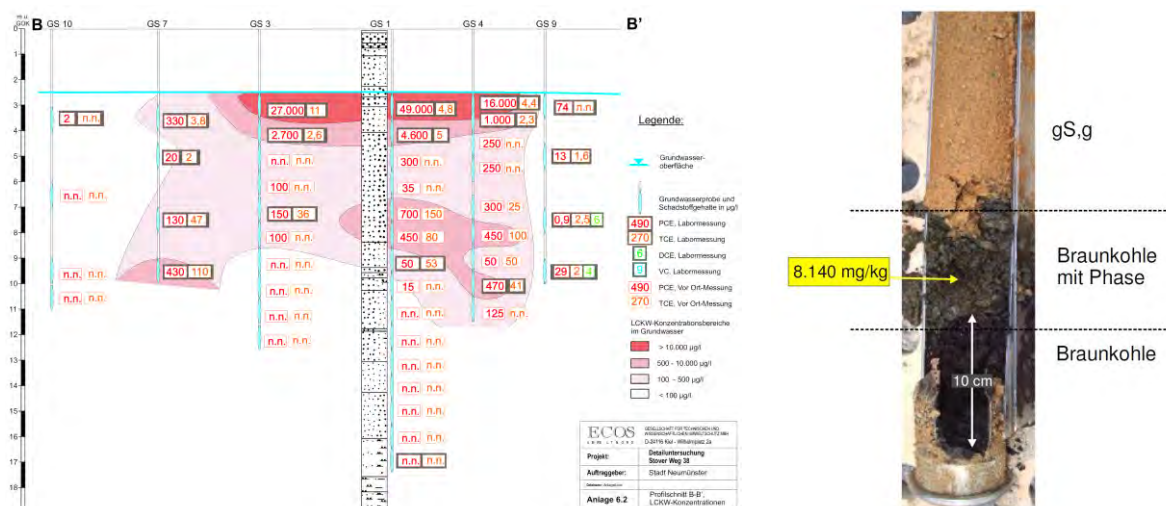


Abb. 2: Vertikale Schadstoffverteilung im Schadenszentrum und Kern der Linerbohrung LB 3 (2,5 – 3,0 m u. GOK), Quelle: ECOS Umwelt Nord GmbH

1.3 Sanierungsziele

Das primäre Sanierungsziel war die Sanierung der Hauptschadstoffquelle, um einen weiteren erheblichen Schadstoffaustrag zu unterbinden. Die Sanierung zielte daher auf den Eintragsbereich (Sanierungszone A) und das unmittelbare Umfeld (Sanierungszonen B und C), in denen die Hauptmasse der Schadstoffe in Tiefen bis max. 6 m u. GOK lokalisiert ist.

Als orientierende Sanierungszielwerte wurden folgende vereinbart:

- Einhaltung einer LCKW-Konzentration von 100 bis 140 µg/L im Grundwasser im nahen Abstrom an der abstromigen Grundstücksgrenze im oberen Bereich des Aquifers (bis 6 m u. GOK).
- Verringerung der vom Sanierungsgrundstück ausgehenden Schadstofffracht (Emission von LCKW_{ges.}) um mindestens 75 %.
- Einhaltung einer LCKW-Feststoffkonzentration.
 - Braunkohle (TOC ca. 10,0 %) 100 mg/kg
 - Schluffe (TOC ca. 1,0 %) 2 mg/kg
 - Sande (TOC ca. 0,1 %) 1 mg/kg

2 Planung der Thermischen In-situ-Sanierung

Auf Anfrage der Unteren Bodenschutzbehörde der Stadt Neumünster wurde 2018 eine Machbarkeitsstudie mit Kostenschätzung für den Einsatz der DLI am Standort erstellt [1].

2.1 Sanierungstechnologie

Die thermische In-situ-Sanierung basiert auf der Injektion eines Wasserdampf-Luft-Gemisches unterhalb bzw. auf Höhe des Schadenszentrums zur Erwärmung auf eine Gemischsiedetemperatur und anschließender Schadstoffverdampfung.

Entsprechend der Schadstofflage soll die gesättigte Bodenzone durch eine tief gelegene Dampf-Luft-Injektion (DLI) zwischen 6 – 8 m u. GOK erfolgen, um die Bereiche oberhalb 5 – 6 m u. GOK zu sanieren. Geplant war, die Verdampfung durch eine zusätzliche flache Injektionsebene im oberen Teil des Grundwasserleiters sowie der ungesättigten Bodenzone auf 4 m Tiefe zu unterstützen.

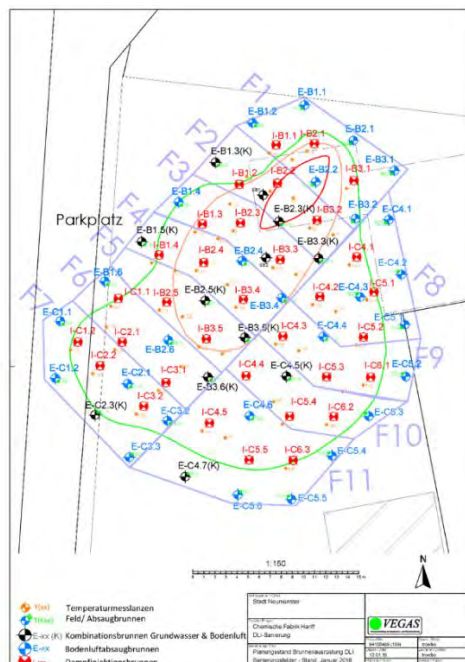
Die Dampf- und Wärmefronten breiten sich radialsymmetrisch um die Injektionsbrunnen aus, wobei die Schadstoffe verdampft werden. Hierbei siedet das Schadstoff-Wasser(dampf)-Gemisch des PCE-Schadens bei einer Gemischsiedetemperatur von 95 °C bzw. 92 °C für das vorliegende Schadstoffgemisch mit ca. 82 % PCE- und 15 % TCE-Anteil. Diese Temperatur muss im Untergrund bis zur kompletten Absaugung der Schadstoffe aufrechterhalten werden (Verdampfungsphase). Die mit dem Dampf injizierte Luft trägt die Kontaminanten dann gasförmig in Richtung der ungesättigten Zone aus, wo sie über eine Bodenluftabsaugung entfernt werden. In Folge der Auftriebskräfte erschließt die Dampffront während der initialen Ausbreitungsphase auch die ungesättigte Bodenzone.

Die Bodenluft sowie Porenwasser und Kondensat können aus Kombinationsbrunnen abgesaugt bzw. abgepumpt werden und über Luft- und Wasseraktivkohlefilter gereinigt und die LCKW entfernt werden. Im Abstrom entfernt eine bestehende Grundwassersicherung die bei hohen Temperaturen verstärkt im Grundwasser gelösten LCKW. Die geförderten Wässer (Grundwasser, Kondensat) werden über Aktivkohlefilter gereinigt und zur Kühlung der heißen Bodenluft verwendet. Das erwärmte Kühlwasser wird mit einer Temperatur von 25 °C – 32 °C in den Regenwasserkanal eingeleitet.

2.2 Dimensionierung der Dampf-Luft-Injektion (DLI)

Die zur Dimensionierung relevanten Parameter konnten den Berichten der Detailuntersuchung (DU) und Sanierungsuntersuchung (SU) entnommen werden. Im Wesentlichen werden zur Planung einer DLI mit Hilfe des rechnergestützten DLI-Tools 2.0 [2] die hydraulische Durchlässigkeiten im Sanierungsfeld, die Grundwasserstände, die Schadstoffart und Menge sowie deren Lage benötigt.

Aufgrund der vorliegenden braunkohleführenden Sande bzw. Braunkohleeinschlüsse wurde der Massenübergangskoeffizient zur Desorption der LCKW in der Berechnung mit dem DLI-Tool halbiert. Hierdurch verlängerte sich die erwartete Sanierungsdauer um ca. 30 %.



Die Reichweite der Dampf-Luft-Injektion wurde für eine Dampfleistung von 500 kg/h auf 2,7 m Radius (Zone A+B) bzw. 3,0 m (Zone C) in einer Tiefe von ca. 5 - 6 m u. GOK je Injektionsbrunnen berechnet [3].

Die Reichweite der Bodenluftabsaugung betrug für einen Unterdruck von 140 mbar ca. 10 m Radius.

Entsprechend dieser Reichweiten wurde die Erschließung des Sanierungsfelds geplant (Abb. 3).

Das Sanierungsfeld wurde in 11 Behandlungsabschnitte mit jeweils 3 – 4 Injektionsbrunnen zur Reduzierung der erforderlichen Dampfmenge aufgeteilt. In der Regel wird die doppelte Anzahl Absaugbrunnen wie Injektionsbrunnen betrieben. Zur hydraulischen Sicherung werden Kombibrunnen eingesetzt.

Zur Überwachung der Bodentemperatur sind sogenannte Temperaturmesslanzen (Messbündel mit Pt-100) in unterschiedlichen radialen Abständen zu den Injektionsbrunnen erforderlich.

Abbildung 3: Sanierungsabfolge Bereich A+B (F1 - F5) und C (F6 – F11)

2.2.1 Zusammenstellung der Dimensionierung

Die Dimensionierung der Sanierung mit der Angabe der Feldausstattung, der Anlagentechnik sowie den Sanierungszeiten ist in Tabelle 1 dargelegt.

Tab. 1: Zusammenstellung Dimensionierung DLI Stoverweg

Ausstattung des Sanierungsfelds, unterirdisch	
• 33 St. Injektionsbrunnen, DLI mit zwei Ebenen • 11 St. Kombinationsbrunnen	• 29 Extraktionsbrunnen Bodenluft • 84 Temperaturmesslanzen
Leistungsgrößen der Anlagen- und Sanierungstechnik	
• 1.000 – 1.500 kW Dampfleistung, Regelbetrieb: 1.100 - 1.250 kW • 100 – 180 m³/h Luftinjektion, Regelbetrieb: 120 m³/h	• 1.800 – 3.200 Nm³/h Bodenluftabsaugung, Regelbetrieb: 2.500 Nm³/h, 140 mbar • 15 – 30 m³/h GW-Förderung, Regelbetrieb: 25 m³/h
Zeitdauer der DLI je Feldabschnitt	
• Wärme- u. Dampfdurchgang: 3 – 4 Tage • Aufheizphase auf Gemischsiedetemperatur: 3 – 5 Tage • Austragsphase LCKW: mind. 6 – 10 Tage	• Zeitbedarf für Schadstoffaustrag: 90 Tage f. max. 2.000 kg LCKW, 75 Tage (Wärmefront) + 15 Tage (Verdampfung) • Abkühlphase mind. 28 Tage (bis auf 45°C), 50 Tage (bis auf 30 – 35°C)
Zeitdauer der DLI	
• Austragsphase: 90 Tage • Sanierungsdauer: 205 Tage gesamt	146 Tage Sanierungsbetrieb: 28 Tage Inbetriebnahme(n) + 90 Tage Austragsdauer + 28 Tage Abkühldauer + 31 Tage Abkühlung zur Abschlussprobenahme + 28 Tage Umbauzeiten

Die mit Marktpreisen hinterlegte Kostenschätzung ergab ein Gesamtvolumen von rund 1,4 Mio EUR zur Sanierung des Schadensherds (Zone A+B) bzw. von rund 2,25 Mio EUR für die Gesamtsanierung (Zonen A+B+C) für 8 m Tiefe mit spezifischen Kosten von 231 EUR/to (A+B) bzw. 236 EUR je Tonne Boden.

Diese Planung wurde 2020 überarbeitet. Das Gesamtvolumen wurde auf 3.700 m³ verringert, bei einer mittleren Tiefe des Sanierungsbereiches von 5,7 m. Die Kostenschätzung belief sich 2020 auf 1,2 Mio € netto = 180 €/t Boden

3 Durchführung der Dampf-Luft-Injektion

3.1 Auftragsvergabe und Umfang

Die Vergabe der Leistungen zur thermischen In-situ-Sanierung des Grundwasserschadens im Stoverweg 38, Neumünster erfolgte seitens der Stadt Neumünster als Auftraggeber im Rahmen einer öffentlichen Ausschreibung an die Züblin Umwelttechnik GmbH, die das wirtschaftlichste Angebotskonzept vorgelegt hatte. Der Auftrag beinhaltete zunächst die Plausibilitätsprüfung des Angebotskonzepts im Vergleich zum Sanierungskonzept und eine Neudimensionierung der thermischen In-situ-Sanierung mit allen Sanierungselementen. Hierbei wurden der Wärmebedarf, die Dampf- und Absaugraten, die Injektions- und Absaugbrunnen sowie deren Anordnung im Sanierungsbereich final festgelegt. Eine Terminplanung stellte den zeitlichen Ablauf der gesamten Sanierung mit den Aufheiz-, Austrags-, Abkühl- und Umbauphasen dar. Die darauffolgende Projektausführung beinhaltete den Bau der Brunnen und die Installation der technischen Anlagen, die Durchführung der thermischen Sanierung sowie den vollständigen Rückbau aller Sanierungselemente nach erfolgreichem Abschluss der Sanierung.

3.2 Erschließung des Sanierungsfelds

3.2.1 Lageplan und Brunnenbau

Der Sanierungsbereich für die thermische In-situ-Sanierung umfasste eine Fläche von rund 650 m². Die drei Sanierungszonen A, B (Schadensherd) und C (Abstrombereich) wurden entsprechend der Neudimensionierung in nunmehr zehn Felder (F1 – F10, Abb. 4) unterteilt. Der Kernschadensbereich (Sanierungszone A) wurde überlappend saniert, um eine längere Ausstragsphase den Schadstoffen zu ermöglichen. Überlappend bedeutet, dass Injektions- und Absaugbrunnen in die darauffolgenden Felder schrittweise integriert wurden (Abb. 4, Abb. 5).

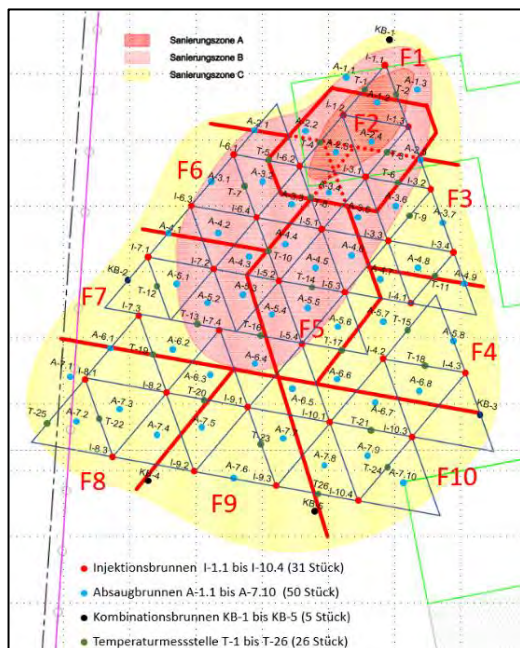


Abb. 4: Lageplan mit Injektions- und Absaugbrunnen und Sanierungsteilfeldern



Abb. 5: Erschließung Sanierungsfläche (rot = Injektionsbrunnen, blau = Absaugbrunnen)

Für die Injektion des Dampf-Luft-Gemisches wurden insgesamt 31 Brunnen bis in eine Tiefe von 7,0 m bis 8,0 m u. GOK errichtet. Im hochbelasteten Bereich der Sanierungszonen A und B sind diese in einem Abstand von 4,0 m und in der Sanierungszone C mit einem Abstand von 5,0 m positioniert. Pro Feld wurden drei bis vier Injektionsbrunnen betrieben. Die Dampfausbreitung wurde entsprechend der Dampfmenge (400 kg/h) mit einer radialen Reichweite von ca. 2,5 m in einer Tiefe von 6,0 m u. GOK berechnet. Für die Erfassung der Schadstoffe wurden zu Beginn insgesamt 50 Absaugbrunnen bis in einer Tiefe von 3,0 m u. GOK errichtet. Die Auslegung ging von einer prognostizierten Absaugreichweite von bis zu 15 m aus, mit einer Anordnung der Absaugbrunnen mit ca. 3,0 bis 6,0 m Abstand war die pneumatische Sicherung gewährleistet. Für die Sanierung eines Teilfeldes waren bis zu 16 Absaugbrunnen in Betrieb.

An den Rändern des Sanierungsbereichs wurden fünf Kombinationsbrunnen bis in eine Tiefe von 11,0 m u. GOK errichtet. Die Brunnen waren für eine kombinierte Grundwasserförderung und Bodenluftabsaugung ausgebaut und dienten neben den bereits vorhandenen Grundwasserbrunnen der hydraulischen Sicherung. Ein Betrieb der GW-Sicherung über die Kombibrunnen war nicht erforderlich, da ein Sanierungsbrunnen zur Verfügung stand.

Innerhalb der Sanierungsfläche wurden 26 Temperaturmessstellen errichtet, um die Bodenerwärmung auf die erforderliche Zieltemperatur von 92 °C für das angetroffene PCE-TCE-Schadstoffgemisch steuern und überwachen zu können. Die Temperaturmessung erfolgte höhendifferenziert in Abständen von 1,0 m. Jede Messstelle lieferte sechs Messwerte (1 – 6 m u. GOK) für eine dreidimensionale Bewertung der Wärmeausbreitung.

Um ein Ansaugen von atmosphärischer Fremdluft und ein Ausgasen zu vermeiden, wurde die gesamte Sanierungsfläche mit einer PE-Folie abgedichtet. Der Anschluss der Brunnen und der Feldmesstechnik erfolgte über oberflur installierte und temperaturbeständige Leitungen. Diese wurden mit einem durchgehenden Gefälle in Richtung der Bodenluftabsauganlage verlegt, so dass stets die Abfuhr des sich bildenden Kondensats gewährleistet war.

3.2.2 Anlagenbau

Jedem Sanierungsfeld wurden drei bis vier Dampf-Luft-Injektionsbrunnen und bis zu 16 zugehörige Absaugbrunnen zugeordnet. Die Dimensionierung gab eine erforderliche Dampftrate von bis zu 1.600 kg/h, eine Drucklufttrate von bis zu 100 Nm³/h und eine Absaugrate von bis zu 2.000 Nm³/h vor. Die Hydrogeologie in Verbindung mit der Injektionstiefe ergab einen erforderlichen Injektionsdruck von 1,5 bis 1,7 bar absolut bei einer Injektionstemperatur von ca. 115 °C.

Die installierte Anlagentechnik für die Dampf-Luft-Injektion bestand aus den Komponenten: Speisewasseraufbereitung mit Enthärtungsanlage, Dampferzeuger mit einer Dampfleistung von bis zu 2.000 kg/h, Kompressor zur Bereitstellung von Druckluft und Mess- und Regeltechnik für die Steuerung der Dampf-Luft-Injektionsraten (Abb. 6, Abb. 7).

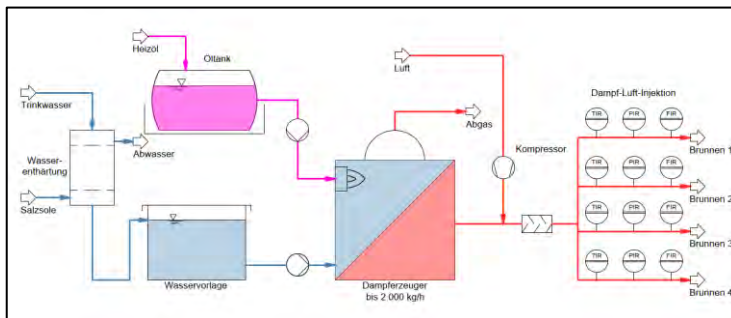


Abb. 6: Grundfließbild der Dampf-Luft-Injektionsanlage

Abb. 7: Dampferzeugeranlage

Heizöl diente als primäre Energiequelle für die Wassererwärmung und Dampferzeugung. Für die Dampferzeugung wurde enthärtetes Trinkwasser verwendet.

Die Anlage zur Bodenluftabsaugung und -reinigung bestand aus den Komponenten Rohluftmessstellen mit Druck-, Durchfluss- und Temperaturmessung, Kondensatabscheider, Wärmetauscher zur Abkühlung der heißen Bodenluft, drei Absaugverdichter mit Frequenzregelung, zwei Luftaktivkohlefilter zur Adsorption der Schadstoffe (Abb. 8, Abb. 9).

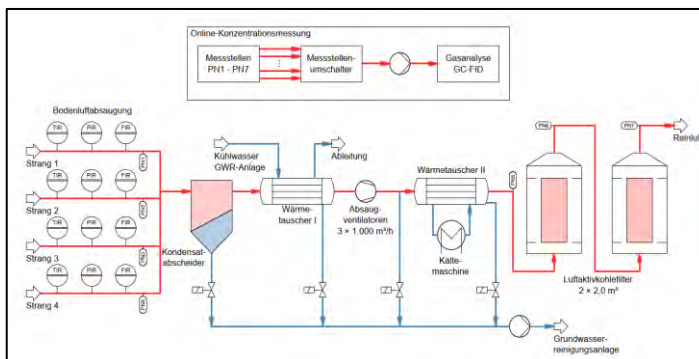


Abb. 8: Verfahrensschema (vereinfacht) der Bodenluftabsauganlage

Abb. 9: Rohluftmesstrecken und Kondensatabscheider der Bodenluftabsauganlage

Ein Online-Gasanalysator (GC-FID) mit Messstellenumschalter analysierte die LCKW-Konzentrationen quasi online. Der Schadstoffaustrag über die Bodenluftabsaugung sowie die Effizienz der Abluftreinigung wurden fortlaufend bestimmt und bewertet.

Der Dampfmasseanteil in der Luft belastet die Absaugverdichter in einem besonderen Maße. Um diesem entgegenzuwirken, wurden drei Verdichter parallel eingebaut, wobei nur zwei den Absaugbetrieb übernahmen und der dritte als Ausfallreserve zur Verfügung stand. Zur Kühlung der heißen Bodenluft und zur Kondensation des mitgeführten Wasserdampfs wurde ein Luft-/Flüssigkeitswärmetauscher installiert und mit dem Kühlwasser aus der Grundwasserreinigungsanlage betrieben. Ein zweiter Wärmetauscher kühlte die Bodenluft auf ca. 25 °C für eine optimale Schadstoffadsorption auf der Luftaktivkohle. Das anfallende Kondensat wurde in der Grundwasserreinigungsanlage (Abb. 10, Abb. 11) aufbereitet. Die Reinigung der abgekühlten Bodenluft erfolgte in zwei hintereinander geschalteten Luftaktivkohlefilter.

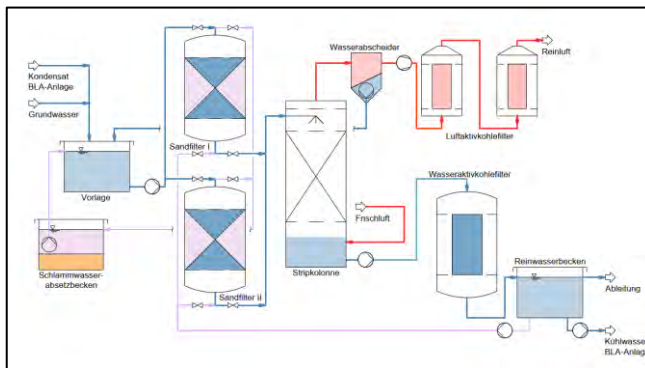


Abb. 10: Verfahrensschema (vereinfacht) der Grundwasserreinigungsanlage



Abb. 11: Sanierungsanlagen mit Grundwasserreinigungsanlage (links)

Als mögliche Abstromsicherung und zur Bereitstellung von Kühlwasser wurde auf dem Standort eine Grundwasserreinigungsanlage für einen Wasserdurchsatz von bis zu 30 m³/h errichtet. Die Anlage umfasste die Verfahrensstufen Enteisung des Grundwassers, Sandfiltration zur Entfernung von partikulären Substanzen, Strippung zur Entfernung von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen, einer Abluftreinigung über Luftaktivkohle und einem Wasseraktivkohlefilter in der Funktion als Sicherheits- und Polizeifilter.

Der Stellplatz für die Sanierungstechnik und der Baustelleneinrichtung lag direkt neben der Sanierungsfläche. Für den Betrieb wurde ein Stromanschluss, ein Trink- und ein Abwasseranschluss sowie eine Heizöltankanlage errichtet.

3.3 Projektablauf

Die Abstimmungen mit allen Projektbeteiligten und die Detailplanung der thermischen In-situ-Sanierung begannen im Februar 2021. In der Folge wurde die Fertigung der technischen Anlagen im Werk der Züblin Umwelttechnik GmbH aufgenommen. Gleichzeitig wurden die erforderlichen Genehmigungsunterlagen und Anzeigen nach Bau-, Arbeitsschutz-, Produktsicherheits- und Immissionsschutzrecht eingereicht. Mit den ersten Vor-Ort-Arbeiten wie dem Brunnenbau konnte im März 2021 begonnen werden. Alle Bau- und Montagearbeiten konnten nach endgültiger Vorlage aller Genehmigungen und behördlichen Freigaben erwartungsgemäß gegen Ende Juli abgeschlossen werden.

Die thermische Sanierung begann nach einer erfolgreichen Testphase am 16.08.2021 auf dem Teilfeld 1 im nördlichen Sanierungsbereich. Danach wurden die Teilfelder abschnittsweise nach Süden bearbeitet. Die Sanierungszeit für einzelne Teilfelder wurde mit zwei bis drei Wochen prognostiziert, wobei jeweils ein bis zwei Wochen Verdampfungsphase projektiert waren. Das erste Sanierungsfeld wurde am längsten betrieben, da hier zum ersten Mal Betriebserfahrungen gesammelt wurden und zum anderen der Schadstoffaustrag aufgrund der Nähe zur

vermuteten Eintragsstelle am größten war. Der westliche Bereich des Teilfelds 8 wurde wiederholt in den Dampfbetrieb aufgenommen, da hier vermutet wurde, dass das austragstechnische Sanierungsziel noch nicht vollständig erreicht war.

3.4 Betriebsstörungen

In den Teilfeldern 1 und 2 war im Verlauf der Sanierung ein deutlicher Rückgang der Absaugleistung zu verzeichnen. Eine Untersuchung der Absaugbrunnen ergab eine beachtliche Vernässung des ungesättigten Porenraums und eine Versandung sowie eine Verockerung der Filterstrecken der Absaugbrunnen.

Durch ein Umschalten auf umliegende Absaugbrunnen konnten die Sanierung in den beiden Feldern erfolgreich durchgeführt werden. Eine spätere Sondierung und analytische Untersuchung bestätigte den Sanierungserfolg. Da in den Bereichen der Teilfeldern 1 und 2 früher Vorversuche für In-situ- chemische und -biologische Sanierungsverfahren sowie ein Teilbodenaustausch ausgeführt wurden, lag der Verdacht nahe, dass diese Felder deutlich sensibler auf eine Kondensatbildung reagieren als die anderen Teilfelder. Diese Vermutung bestätigte sich erfreulicherweise, als keine Vernässung in den nachfolgenden Teilfeldern auftrat.

Die Vermutung, dass die Absaugverdichter das größte Ausfallrisiko darstellen, bestätigte sich. Um den Sanierungsbereich auf die erforderlichen 92°C zu erwärmen und über die Austragsdauer aufrechtzuhalten, war eine hohe Dampfleistung erforderlich, was zum Anfall von Kondensat in den Rohrleitungen feldseitig und in der Anlage führte. Durch Einsatz des als Ausfallreserve installierten dritten Absaugverdichters konnte der Absaugbetrieb auch bei deutlicher Tröpfchenbildung aufrechterhalten werden.

Dennoch mussten auch technische Änderungen an der Absauganlage ausgeführt werden, um den schädigenden Einfluss zu minimieren und das Wasser effektiver aus dem System ableiten zu können. Diese Arbeiten wurden auf die Umbauphase zwischen zwei Teilfeldern geplant, so dass der thermische Sanierungsbetrieb dafür nicht unterbrochen werden musste.

Aufgrund der hohen Anlagenverfügbarkeit konnte die In-situ thermische Sanierung erfolgreich abgeschlossen werden. Der Schadstoffaustrag dauerte etwas länger als ursprünglich geplant, so dass geringe Anpassungen des Zeitplans erforderlich waren.

4 Ergebnisse der Dampf-Luft-Injektion

VEGAS begleitete im Auftrag von Züblin Umwelttechnik die DLI mit der Darstellung der Wärmeausbreitung und der Beurteilung bzw. Beratung des Sanierungsbetriebs im Rahmen von Wochenberichten. Es wurden die Betriebsdaten der Anlagentechnik ausgewertet, um die Anlagenbetriebsweise hinsichtlich des Erreichens der Zieltemperatur, des Schadstoffaustrags und der Dampfausbreitung anpassen zu können. Wesentlich war die Prognose bzw. Festlegung des Sanierungsabschlusses des jeweiligen Sanierungsfelds sowie die Steuerung der Abluft- und Dampfmenen für einen ökonomischen Anlagenbetrieb. Hierbei wurde auf das typische Schadstoffaustragsverhalten, einem deutlichen Anstieg des Schadstoffaustrags nach erfolgtem Dampfdurchgang an den Absaugbrunnen, einer Austragssteigerung nach Erreichen der Gemischsiedetemperatur und einer radialen Dampfausbreitung von mindestens 2,5 m geachtet. Die Aufrechterhaltung der Gemischsiedetemperatur ist die Grundlage der annähernd vollständigen Schadstoffentfernung vom belasteten Bodenkörper. Während der Verdampfungsphase geht der Schadstoffaustrag kontinuierlich zurück, so dass nach Unterschreitung einer LCKW-Konzentration von ca. 20 mg/m³ in der heißen Bodenluft, eine Freisetzung bzw. Lösung von LCKW vom erkalteten Boden durch Sickerwasser bzw. Grundwasser im Bereich von 10 – 20 µg/L zu erwarten ist [4].

In allen Sanierungsfeldern wurde in Folge einer Anlagenverfügbarkeit >97 % dieses Sanierungsziel im Rahmen von 10 – 16 Tagen DLI, mit Ausnahme von Feld 1 mit einem Betrieb von 28 Tagen, erzielt.

Ursprünglich geplant waren 126 Betriebstage der Sanierungsanlage mit 28 Tagen Abkühl-dauer mit zwei Injektionsebenen je Injektionsfilter. Real erfolgte die DLI an 145 Betriebstagen, die Abkühl-dauer lag bei 50 Betriebstagen. Während der Überprüfung des Sanierungskonzepts wurde ein Betrieb der DLI für 147 Tagen und eine Abkühl-dauer von ca. 40 Tagen berechnet. Somit lag die Sanierungsdauer mit real 195 Betriebstagen nur etwas höher als die vor Beginn der Sanierung projektierte Laufzeit von 187 Tagen.

4.1 Anlagenbetrieb

Der Anlagenbetrieb der Dampf-injektion und der Bodenluftabsaugung (Abb. 12) verdeutlicht den Rückgang der Absaugmenge in Folge der Verockerung und Vernässung der ungesättigten Bodenzone in den Felder 1, 2, und 5.

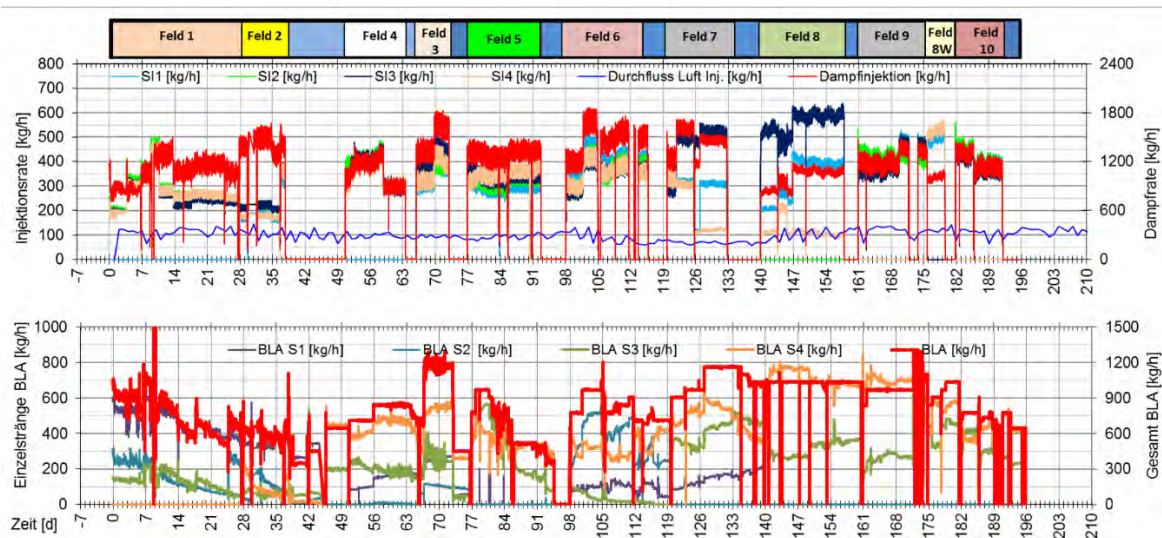


Abb. 12: Dampf-injektionsraten [kg/h] und Bodenluftabsaugraten [kg/h]

Im Mittel lag die injizierte Dampfmenge bei 1.200 kg/h und damit ca. 16 % höher als projektiert. Die Bodenluftabsaugrate betrug im Mittel 860 kg/h, es waren 1.270 kg/h projektiert. Über die Bodenluft wurden im Mittel 250 kg/h Kondensat (190 kW Wärme) aus dem Bodenkörper abgesaugt. Die insgesamt geförderte Kondensatmenge lag bei 480 L/h, ca. 50 % des Dampfs kondensierte bereits in den Absaugleitungen. In der Regel kondensieren ca. 40 % der Dampfmenge im Grundwasser bzw. Boden. Die Kondensatmenge hätte bei 720 an Stelle geförderter 480 L/h liegen müssen. Es kondensierte 50 % mehr Dampf im Bodenkörper als erwartet und befeuchtete die ungesättigte Bodenzone, was zum Rückgang der Absaugrate bzw. der Verockerung der Brunnen führte.

4.2 Wärmeausbreitung

Anhand der Daten der 108 Temperaturfühler in den Sanierungsfeldern und Interpolierung der Werte im dreidimensionalen Raum wurden 2-D Schnitte der sanierungsrelevanten Tiefenlagen zum Nachweis der Dampfausbreitung gebildet (Abb. 13).

Die anfängliche geringe Dampfausbreitung während der Sanierung von Feld 1 und Feld 2 beruhen im Wesentlichen auf der reduzierten Bodenluftabsaugmenge und der damit verbundenen reduzierten Dampfmenge, die bei ca. 300 kg/h pro Injektionsbrunnen lag. Mit einer Dampf-rate von 400 kg/h pro Injektionsbrunnen konnte die Dampfausbreitung auf die gewünschte Reichweite von über 2,5 m Radius ab 5 m u. GOK erzielt werden (Feld 3 – Feld 10).

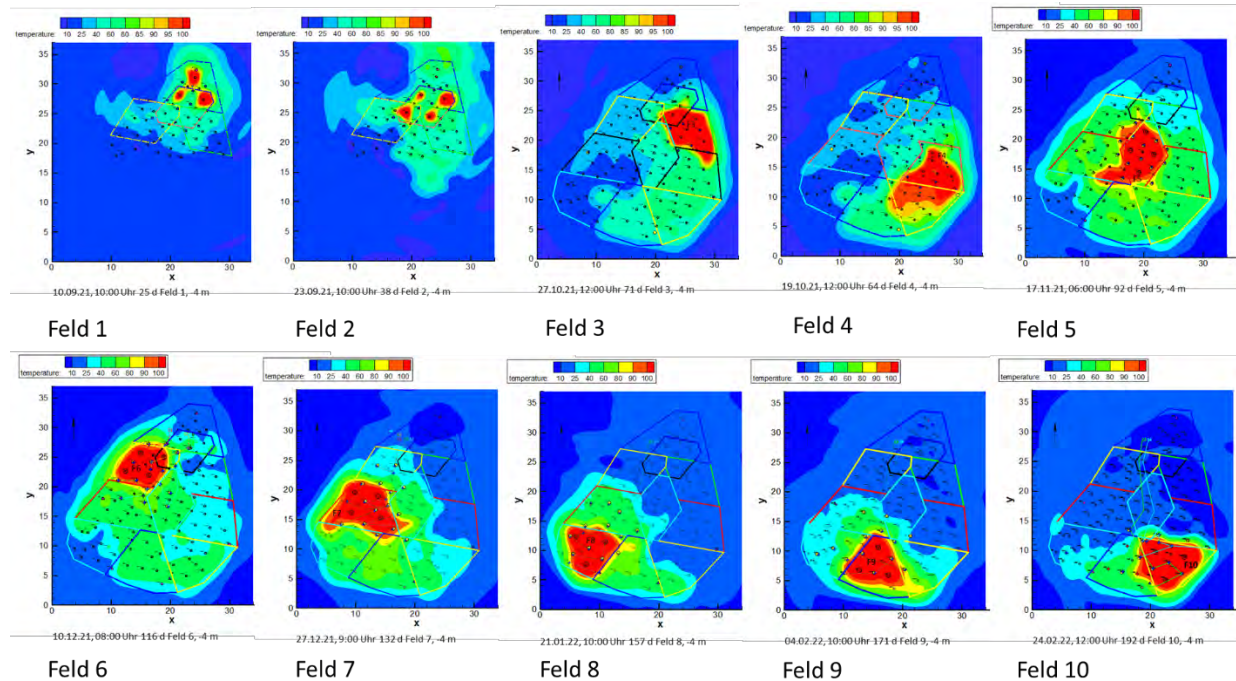


Abb. 13: Temperaturentwicklung auf 4 m u. GOK während der jeweiligen Verdampfungsphase

Neben der Reichweite ist die mittlere Temperatur in den unterschiedlichen Bodenzonen relevant für den Schadstoffaustrag, da die Gemischsiedetemperatur von 92 °C überschritten werden muss (Abb. 14). Von sanierungstechnischer Bedeutung ist der Bereich oberhalb 5 bzw. 6 m u. GOK. Die Gemischsiedetemperatur konnte in allen Feldern ausreichend lange überschritten werden, um die LCKW auszutragen.

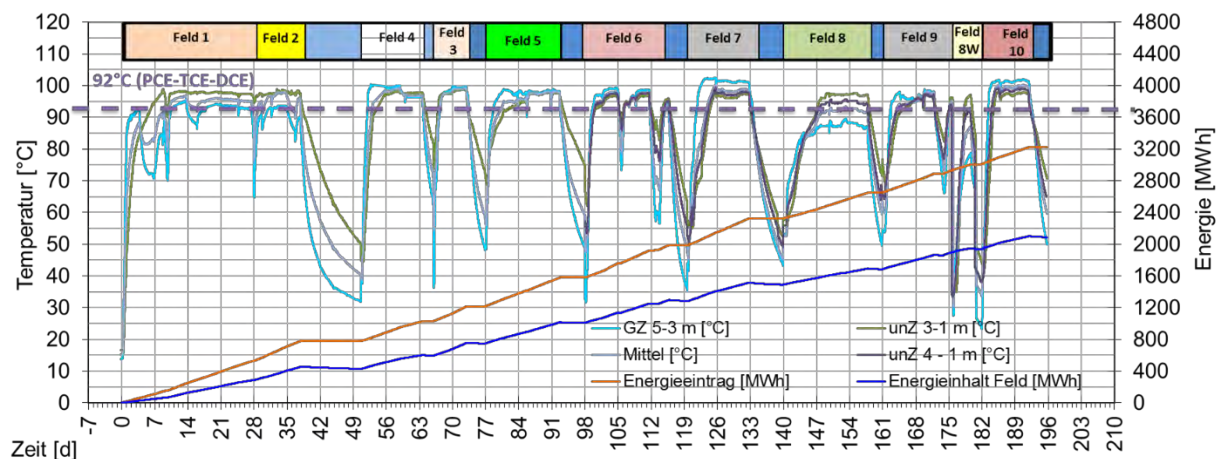


Abb. 14: Temperaturentwicklung und Energiebilanz im jeweiligen Sanierungsfeld

4.2.1 Schadstoffaustrag

Der Schadstoffaustrag erfolgte ca. 3 Tage nach Start der DLI in das jeweilige Sanierungsfeld über einen hohen Anstieg nach dem Dampfdurchgang an den Absaugbrunnen (Abb. 15). In der sich anschließenden mehrtägigen Verdampfungsphase nehmen die LCKW-Gehalte entsprechend dem Schadstoffpotential langsam ab und erreichen zum Abschluss der Behandlung eines Felds den Zielwert von 20 mg/m³ LCKW.

In Summe wurden 280 kg LCKW, zu ca. 82 % aus PCE und 15 % aus TCE zusammengesetzt, mittels der Bodenluftabsaugung entfernt. Etwa 175 kg LCKW stammen aus dem ehemaligen Schadensherd, der Zonen A und B. Aus dem Abstrombereich (Zone B und C) wurden ca.

105 kg LCKW entfernt. Über die Grundwassersicherung wurden 20 kg LCKW, primär PCE sowie TCE und cDCE als Abbau- und thermische Zerfallsprodukte der DLI entfernt.

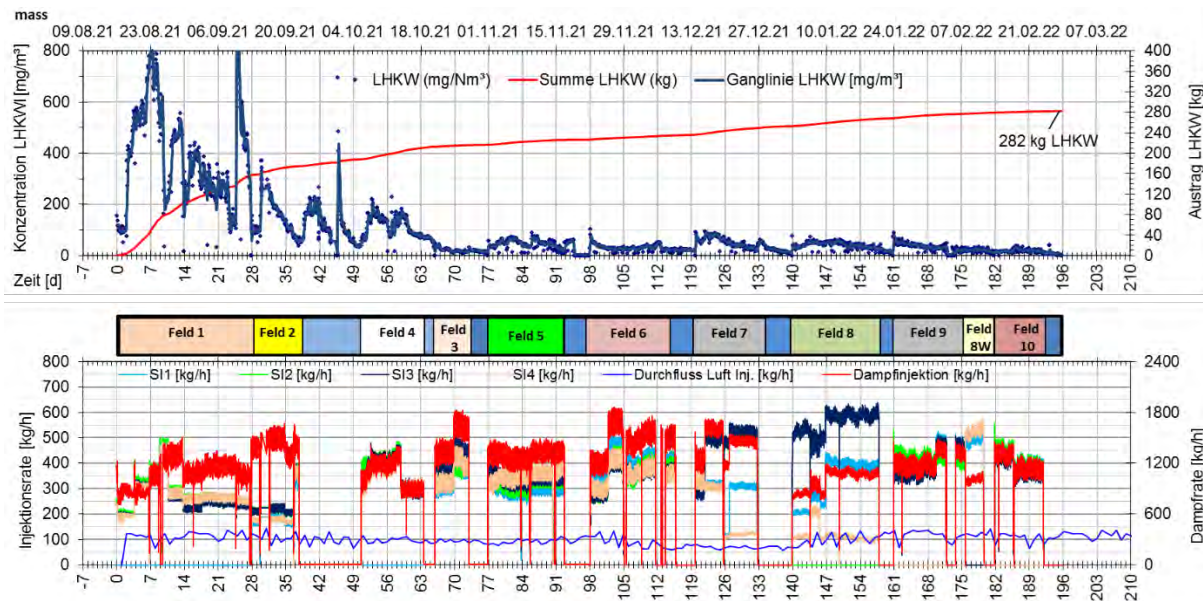


Abb. 15: LCKW-Austrag und Betrieb der DLI

Zum Vergleich, der Gesamtaustrag an LCKW über die seit 2012 betriebene P&T Maßnahme liegt bei 206 kg, wobei die LCKW aus den vollkommenen Sanierungsbrunnen über die gesamte Aquifermächtigkeit entnommen wurden. Vor Beginn der Sanierung lag der jährliche Austrag bei rund 22 kg LCKW.

Von dem 2010 abgeschätzten Schadstoffinventar vom 800 kg PCE wurden über 500 kg LHKW vom Standort entfernt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit leichten zeitlichen Anpassungen beruhend auf dem realen Schadstoffaustragsverhalten und der Befeuchtung der ungesättigten Bodenzone konnte die Sanierung wie geplant mit einer hohen Anlagenverfügbarkeit abgeschlossen werden. Es wurden insgesamt ca. 280 kg LCKW über die Bodenluftabsaugung und ca. 20 kg LCKW über die Grundwasserförderung vom Standort entfernt.

Die Sanierungsziele wurden mit Überschreiten der Gemischtsiedetemperatur, einem typischen Schadstoffaustragsverhalten und der Unterschreitung des Sollwerts von 20 mg/m³ LCKW in der heißen Bodenluft zum Sanierungsabschluss der zehn Sanierungsfelder erreicht. Erste Analysen aus dem ehemaligen Schadensherd (Zone A) indizieren mit LCKW-Gehalten kleiner 1 mg/kg ausgehend von max. 8.100 mg/kg die annähernd vollständige Sanierung und lassen auf keine weitergehende Kontamination des Grundwassers ausgehend von der vermuteten Eintragsstelle schließen.

Angesichts der Projektkosten von 1,2 Mio EUR netto kann der monetäre Einsatz zur Sanierung von 650 m² Fläche und ca. 5,7 m Tiefe auf 180 EUR je Tonne Boden beziffert werden.

5.1 Bodenproben

Die Ergebnisse der zur Sanierungskontrolle entnommenen Bodenproben lagen zur Drucklegung noch nicht vollständig vor, lediglich für die Sanierungszone A (Sanierungsfelder F1 und

F2) konnte die Einhaltung der Sanierungszielwerte für LCKW von 1 mg/kg in den dort betroffenen Sanden mit maximalen LCKW-Gehalten von 0,35 mg/kg bestätigt werden. Unterhalb des Sanierungsbereiches wurden bis 7 m u. GOK max. 0,91 mg/kg gemessen.

5.2 Grundwassermonitoring

Die langfristige Kontrolle des Sanierungserfolges erfolgt im Rahmen der Nachsorge über ein mehrjähriges Grundwassermonitoring. Da es sich bei der Sanierungsmaßnahme um eine Hot-Spot Sanierung der höher belasteten Bereiche handelt, verbleiben Restbelastungen im Untergrund, insbesondere in Abstromrichtung sowie in Tiefen > 6 m u. GOK. Es ist daher nicht von einem sofortigen Schadstoffrückgang mit Einstellung von Gleichgewichtskonzentrationen an der Kontrollebene an der Grundstücksgrenze auszugehen. Gegebenenfalls sind nachfolgende Sanierungsmaßnahmen (z. B. mikrobielle In-situ-Sanierung) erforderlich.

5.3 Folgenutzung

Die Stadt Neumünster plant, die verkehrsgünstig gelegene Fläche wieder in eine neue Nutzung zu überführen. Hierzu kommt insbesondere die Wiederansiedlung von Gewerbe in Frage. Aufgrund der noch in tieferen Bereichen des Aquifers verbliebenen Restbelastungen bestehen im Westteil des Grundstückes zunächst noch Einschränkungen in der Nutzbarkeit.

Literaturverzeichnis

- [1] Trötschler, O., Koschitzky, H.-P. (2018): Machbarkeitsbewertung mit Kostenschätzung Thermische In-situ-Sanierung LCKW-Schaden Stoverweg 38 in Neumünster, Technischer Bericht Nr. 2018/1 (VEG 80), Universität Stuttgart
- [2] Trötschler, O., Koschitzky, H.-P. (2012): DLI-Tool zur Dimensionierung einer thermischen In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI), Vorstellung anlässlich der TASK Praxistage 2012, Workshop TisS, 18.09.2012, UFZ Leipzig
- [3] DLI-Tool 2.0 (2020):
https://www.iws.uni-tuttgart.de/vegas/downloads/Downloads_ordner/DLI-ToolV2.0.zip
- [4] Grathwohl, P., Reisinger, C. (1996): Formulierung einer Verfahrensempfehlung zur Bestimmung der Emission leichtflüchtiger organischer Schadstoffe (LCKW, BTEX etc.) aus kontaminierten Böden (Berechnungsverfahren und Methoden), Abschlussbericht LFU BW, Tübingen

Anschriften der AutorInnen

Oliver Trötschler
VEGAS
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
D-70569 Stuttgart
Tel. +49(0)711 685 67021
Fax +49(0)711 6856 7020
oliver.troetschler@iws.uni-stuttgart.de
<https://www.iws.uni-stuttgart.de/vegas>

Malte Horstmann
Hanseatisches Umwelt-
Kontor GmbH
Isaac-Newton-Straße 5
D-23562 Lübeck
Tel. +49(0)451 70254 11
M.Horstmann@haukon.de
www.hanseatisches-umwelt-kontor.de

Daniel Klopp
Züblin Umwelttechnik GmbH
Zweigstelle Hamburg
Zürnweg 1
D-21217 Seevetal
Tel. +49(0)40 76 11 77 21
Fax +49(0)40 76 96 269
daniel.klopp@zueblin.de
www.zueblin-umwelttechnik.com