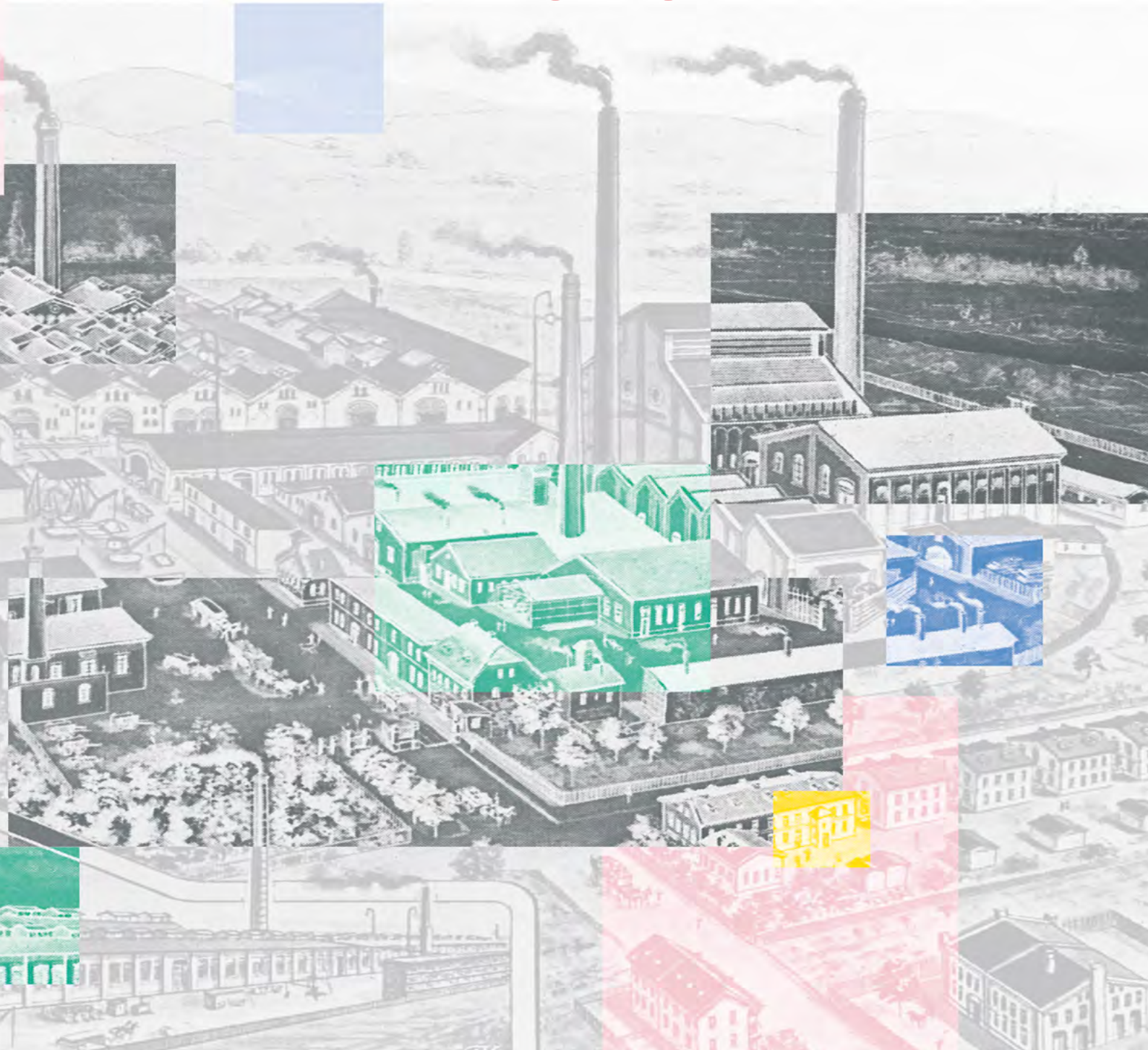




Altlasten- **annual 2016**



Altlasten- **annual 2016**

Wiesbaden, 2017

Impressum

Altlasten-annual 2016

ISBN: 978-3-89531-875-7

Bearbeitung: Redaktionsteam „annual 2016“, Dezernat Boden und Altlasten

Layout: Martina Schaffner

Titelbild: Heddernheimer Kupferwerk und Süddeutsche Kabelwerke AG
Gesamtansicht um 1910, Bildnachweis: Denkmalamt Stadt Frankfurt am Main, Nr. 478

Herausgeber, © und Vertrieb:
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Telefon: +49 (0)611 69 39-0
Telefax: +49 (0)611 69 39-555
E-Mail: vertrieb@hlnug.hessen.de

www.hlnug.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

Inhalt

Marie-Anne Feldmann Stand der Altlastenbearbeitung in Hessen	7
--	---

Brennpunkt

Andrea Schütz-Lermann Die Altflächendatei des Landes Hessen - Das neue FIS AG 2.0	11
---	----

Aktuell

Dieter Binder, Volker Zeisberger & Thomas Ziegelmayr Nachhaltigkeit bei der Altlastensanierung - Bewertungskonzept	19
Jan Brodsky Prüfung der Anwendbarkeit einer Analysenmethode zur Bestimmung der leichter flüchtigen MKW-Fractionen in Bodenproben	27
Aktuelle Informationen im Internet.....	29

Seminar Altlasten und Schadensfälle

Seminar Altlasten und Schadensfälle 2016	31
Heinrich Eisenmann & Anko Fischer Isotopenuntersuchungen zur Abbaubewertung und Quellenidentifizierung von Schadstoffen in Altlasten - 10 Jahre Praxiserfahrung	33
Katja Amstätter, Dieter Baun, Volker Schrenk und Jutta Sextro Praxisorientiertes Verfahren zur Bewertung von Bodenkontaminationen im Hinblick auf die Umwandlung eines ehemaligen chemischen Werksgeländes in verkehrsfähige Grundstücke	41
Karin Teichmann & Nina Menke Beurteilung eines Deponieabstroms mit Hilfe von ökotoxikologischen Testverfahren	49
Uwe Hiester & Michael Wolf Thermische in-situ Sanierung von CKW und BTEX - Konventionelle Sanierung auf dem Prüfstand.....	57
Dieter Hülpiusch, Volker Schrenk & Oliver Trötschler Kleiner Standort – große Herausforderung: Sanierung einer Boden- und Grundwasserverunreinigung unter besonderen Rahmenbedingungen mit Dampf-Luft-Injektion	67
Silvia Paskert Verhältnismäßigkeitsprüfung zweier langlaufender Grundwassersanierungen.....	77
Thomas Portune Teerölinhaltsstoffe im Grundwasser – Sanierung mittels Bio-Air Sparging in Hanau	87
Marion Peine Nachhaltigkeit bei der Altlastensanierung – Bewertungskonzept und Fallbeispiele	93
Sylvia Widmann Der Teufel steckt im Detail – Ein Neuanfang nach 30 Jahren LHKW-Sanierung mittels Pump & Treat.....	97
Anke Uhl Schadstoffe an der Schnittstelle Grund-/Oberflächengewässer - Toxikologie – Akkumulation – Abbau	105

Thermische in-situ Sanierung von CKW und BTEX - Konventionelle Sanierung auf dem Prüfstand

UWE HIESTER & MICHAEL WOLF

1 Sanierungsaudit

1.1 Konventionelle Sanierung seit 1989

Auf einem Industriestandort wurden seit 1949/50 Dichtungsplatten und Armaturen für die Automobilindustrie hergestellt. Auf dem rd. 30.000 m² Betriebsgelände befindet sich heute ein Motorenprüfstand.

In der Produktion kam es zur Anwendung von Trichlorethen (TCE) als Lösemittel und zur Lagerung von Benzin, Toluol u.a. in vier 10-20 m³ großen unterirdischen Tanks. Das TCE wurde in einer Rückgewinnungsanlage recycelt. Im Jahr 1983 wurden im 54 m tiefen Betriebsbrunnen 1 erhebliche TCE-Belastungen mit bis zu 370 µg/l festgestellt, woraufhin dieser Brunnen vom Versorgungsnetz abgetrennt wurde. Von der Unteren Wasserbehörde (UWB) wurde die Notwendigkeit von vertiefenden Untersuchungen gesehen und eine Gefährdung eines 800 m entfernten Trinkwasserbrunnens vermutet. Im Jahr 1988 wurden daher weitere Untersuchungen und Sanierungsmaßnahmen angeordnet.

Zunächst wurden 16 Sondierungen bis 2 m unter Geländeoberkante (m u. GOK) abgeteuft. Sehr hohe Belastungen stellte man in dem Bodenluftabsaugpegel BL 4 mit 136 mg/m³ LCKW am TCE-Abscheider (Rückgewinnung) fest. Im Folgenden wurde die konventionelle Sanierung auf dem Motorenprüfstand eingeleitet:

Wegen der Belastungen mit TCE und BTEX-Aromaten wurde die Bodenluft in vier Absaugbrunnen in verschiedenen Kontaminationsschwerpunkten zwischen 2-10 m u. GOK mit Seitenkanalverdichtern abgesaugt. Am ehemaligen Betriebsbrunnen 1 erfolgte ab 1989 eine Grundwassersanierung. Dieser ist zwischen 14 und 54 m u. GOK alle 2 m verfiltert. Grundwasser und Kondenswasser aus der Bodenluft-

sanierung wurden über einen Stripturm, Bodenluft und Abluft des Stripturms über Aktivkohle gereinigt. Geringe Änderungen an den Anlagen wurden immer wieder vorgenommen, wenn es erforderlich wurde.

Im Jahr 1999 wurden unter Berufung auf die Grundwasser-Verwaltungsvorschrift (Gw-VwV) vom 19.05.1994 von der UWB verbindliche Sanierungsziele festgelegt, so z.B. für die BTEX-Aromaten (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol): 30 µg/l Wasser; 5 mg/m³ Bodenluft und für die LHKW (leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe, u.a. TCE): 10 µg/l Wasser; 5 mg/m³ Bodenluft. Wegen seiner wasserwirtschaftlichen Bedeutung und der Komplexität des Sanierungsfalls wurde dieser im Jahr 2005 von der UWB auf das RP-Darmstadt übertragen.

Die Grundwasserbelastung verringerte sich im Sanierungsverlauf von anfänglich bis zu 1.800 µg/l (1990) auf unter 6 µg/l (2011). Von 1995 bis Ende 2011 wurden über 4.259 kg CKW, 480 kg BTEX und 2.678 kg Kohlenwasserstoffe aus dem Untergrund beseitigt. Die jährlichen Austragfrachten über die Bodenluftabsaugung (BLA) blieben jedoch weitestgehend konstant (Abb. 1+2).

1.2 Nacherkundung der Schadensherde

Der kontinuierliche Schadstoffaustrag über Jahrzehnte deutete auf eine unbekannte Schadstoffquelle mit einem erheblichen Nachlieferungspotential hin. Im Jahr 2011 riet das Regierungspräsidium zu eingrenzenden Untersuchungen. Im Rahmen eines Sanierungsaudits wurde die Effizienz der bisherigen Bodenluftabsaugung und Grundwasserreinigung überprüft.

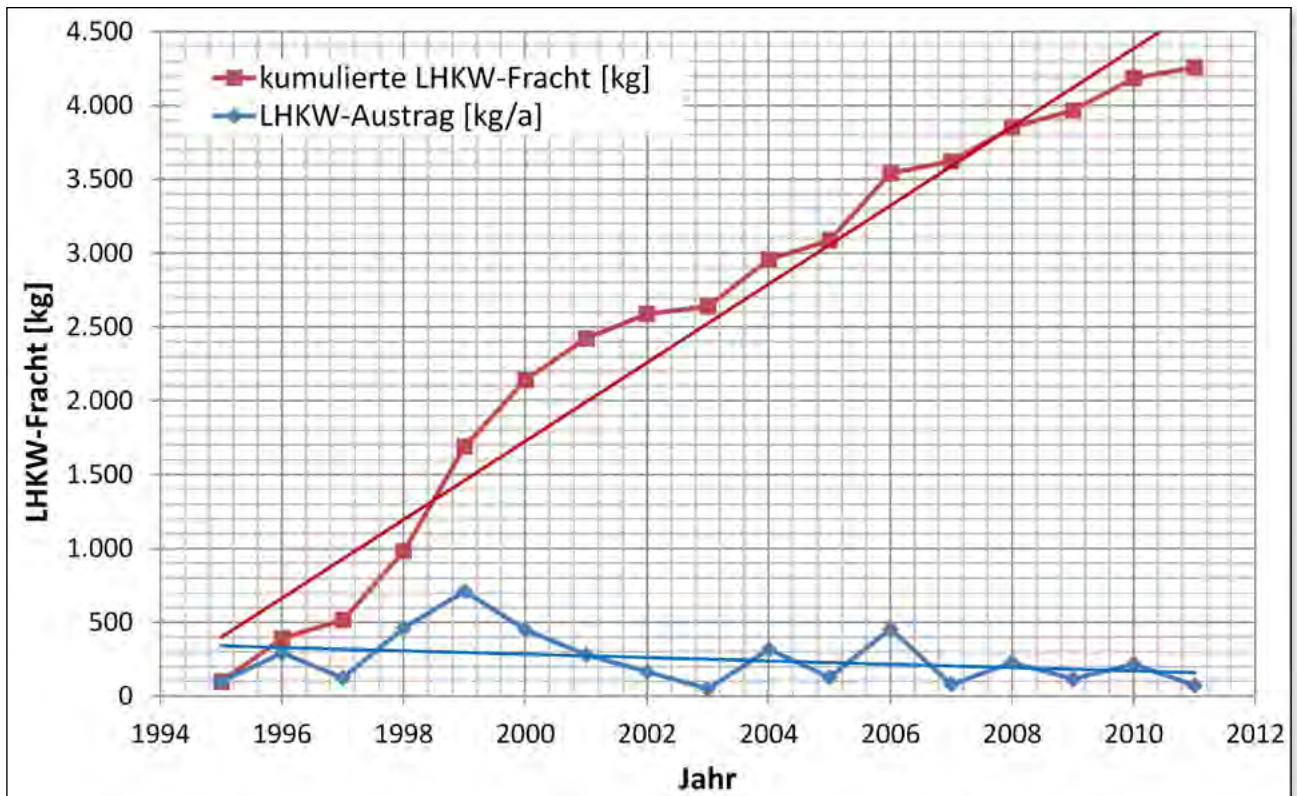


Abb. 1: LHKW-Austrag und kumulierte Fracht

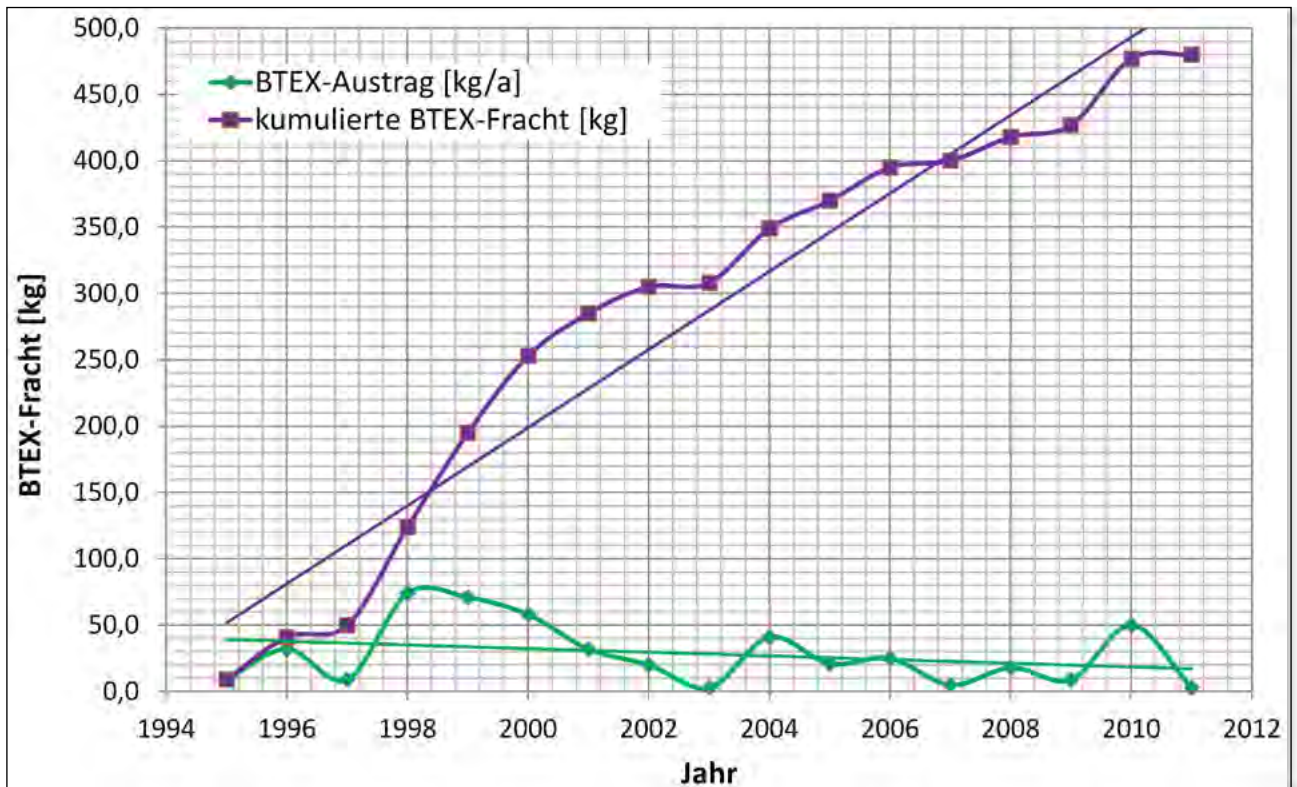


Abb. 2: BTEX-Austrag und kumulierte Fracht

Abb. 3: Lageplan der bisherigen Sanierungseinrichtungen und des bis dato unbekanntes Schadstoffherdes

In einem ersten Schritt wurde der bisherige Schadensherd nacherkundet. Der Bodenaufbau am Standort ist über weite Bereiche sehr ähnlich. Unter der Straßendecke befindet sich eine etwa 3 m mächtige Auffüllung, unterlagert von sandigem Ton, Schluff und Lehm. Ab etwa 13 m beginnt der Verwitterungshorizont des Schiefertons, der ab etwa 20 m in ein Kluftgestein übergeht (Abb. 4). Gespannte, wasserführende Schichten stehen ab etwa 16 m u.GOK alle 2-3 m an. Sie haben eine Mächtigkeit von etwa 0,2-1,4 m und sind durch steife Schluff- und Ton-schichten voneinander getrennt.

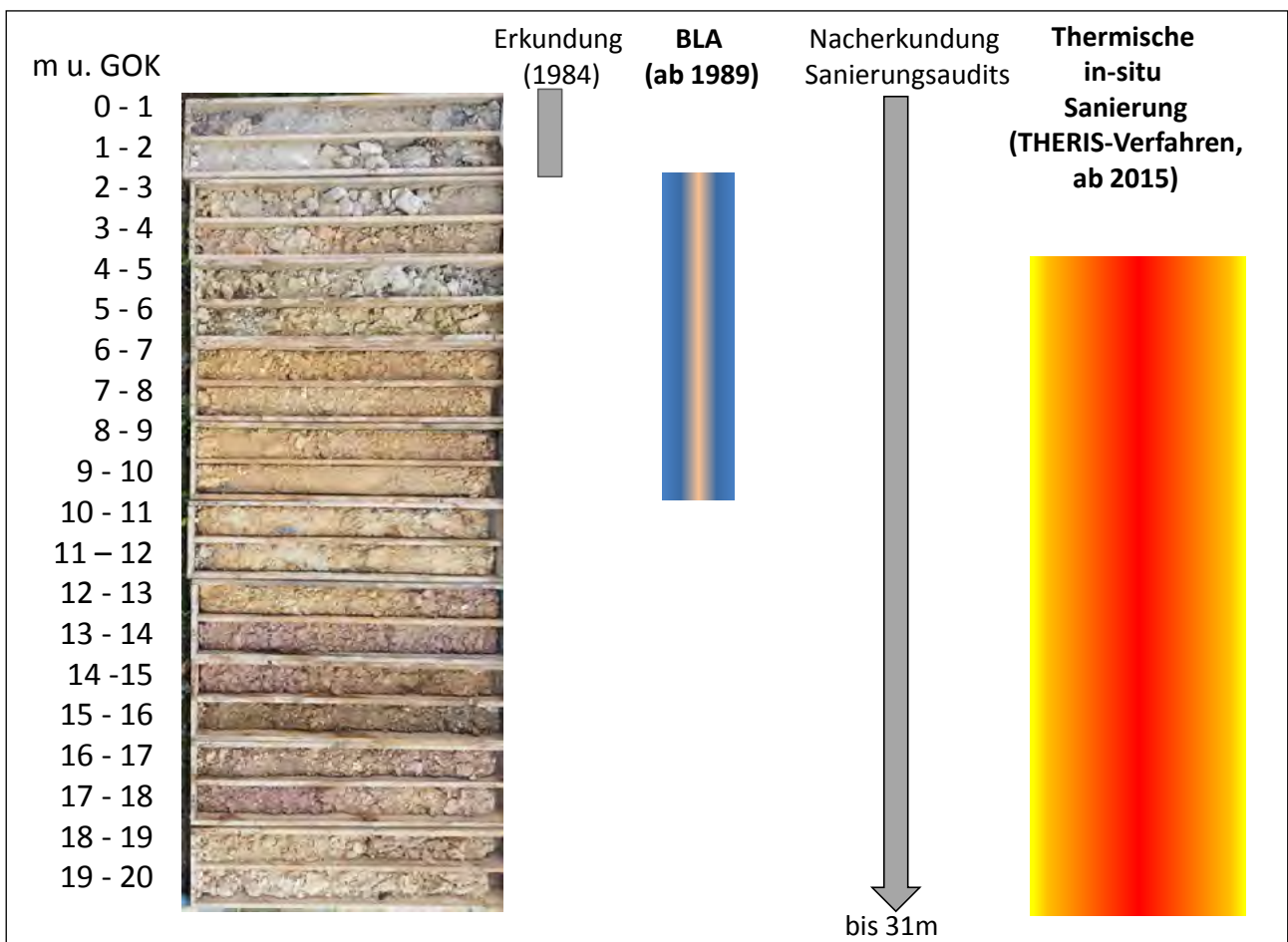
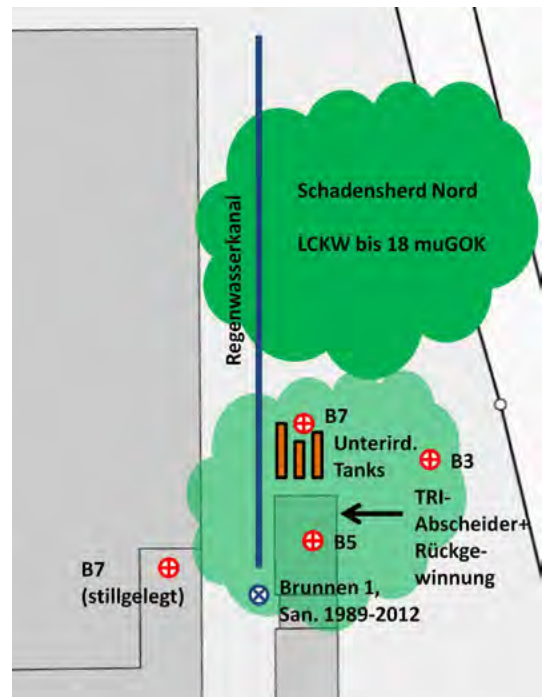


Abb. 4: Bohrkernauslage, Erkundungs- und Sanierungsbereiche

In Kombination von verschiedensten Erkundungsmethoden wie Phytoscreening, Boden-, Bodenluft- und Grundwasserbeprobungen, MIP-Sondierungen (Membrane Interface Probe) und Immissionspumpversuchen ergab sich, dass die laterale und vertikale Ausdehnung der massiven CKW- und BTEX-Verunreinigung größer war als bislang angenommen. Auch im Umfeld der bisherigen BLA-Pegel waren noch hohe Belastungen in der Bodenluft nachweisbar. Dieses deutet auf eine geringe Reichweite der Bodenluftabsaugung mit den Seitenkanalverdichtern im bindigen Boden hin.

Wasserführende Schichten in etwa 16 m unter Gelände waren lokal mit über 300.000 µg/l CKW belastet. Lokale Belastungen in den wasserführenden Schichten wurden bis in 31 m u.GOK nachgewiesen. Die Ursache dieser Verunreinigung kann nicht verifiziert werden. Das RP vermutet eine oder mehrere Havarien im Bereich eines möglicherweise undichten Regenwassersammlers als Quelle der lateralen Schadstoffausbreitung. Damit war auch klar, dass die im Jahr 1999 festgelegten Sanierungszielwerte mit den bisher eingesetzten technischen Mitteln nicht erreichbar waren. Zudem wurde ein zweiter Eintragsbereich ermittelt und in seiner Kubatur abgegrenzt.

In einzelnen Bereichen wurde oberhalb der wasserführenden Schichten eine hohe bis sehr hohe mikrobiologische Aktivität beim CKW-Abbau festgestellt. Von dieser war eine Beseitigung des Schadensherdes in absehbarer Zeit nicht zu erwarten.

2 Thermische in-situ Sanierung

2.1 THERIS®-Verfahren (feste Wärmequellen)

Verfahrensprinzip

Thermische Sanierungsverfahren werden bei kontaminiertem Boden und Grundwasser bei sehr unterschiedlichen Bedingungen erfolgreich eingesetzt. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich von der Verdampfung leicht- und mittelflüchtiger Schadstoffe (z.B. CKW, BTEX) über die thermisch unterstützte

1.3 Neuausrichtung Sanierungskonzept

Das neu ermittelte Schadensbild verdeutlichte, dass mit der installierten Sanierungsanlage eine vollständige Erfassung des Schadens nicht möglich war. Eine Beseitigung oder dauerhafte Sicherung der hochbelasteten Schadensherde ist Voraussetzung, um die Bodenluftabsaugung und die Grundwasserreinigung dauerhaft außer Betrieb nehmen zu können.

Zur Beseitigung der hohen CKW- und BTEX-Belastung wurden unter Berücksichtigung des bisherigen Sanierungsbetriebs sowie der historischen und der neuen Erkundungsergebnisse neue Sanierungskonzepte entwickelt. Nach der Evaluierung der technischen Machbarkeit von mikrobiologischen, chemischen und physikalischen in-situ Sanierungsverfahren wurden die Varianten Bodenaustausch einschl. Großlochbohrungen, konventionelle (kalte) Bodenluftabsaugung (BLA) und thermische in-situ Sanierung (TISS) vertiefend ausgearbeitet. In der Wirtschaftlichkeitsprüfung setzte sich die TISS mit dem THERIS®-Verfahren durch. Zudem weisen TISS in Ökobilanzierungen bei Sachbilanzen und Wirkungskategorien meist geringere Werte als Bodenaustauschmaßnahmen auf [3].

Die Entwurfsplanung wurde im April 2014, die Ausführungsplanung im August 2015 genehmigt. Das Sanierungsziel ist erreicht, wenn nach Erwärmung des Untergrundes eine weitgehende Stagnation der Schadstoffkonzentrationen festzustellen ist. Im Dezember 2015 wurde die THERIS®-Sanierung in Betrieb genommen.

Verbesserung der Ölphasenförderung (Mehrphasenextraktion u.a. MKW, Teeröl) bis hin zur Hochtemperaturanwendung (z.B. PAK, Pestizide). Die Verfahren sind sowohl in-situ als auch ex-situ, sowohl in der ungesättigten Zone als auch im Grundwasser anwendbar. Die Wahl der Heiztechnik bei in-situ Anwendungen wird maßgeblich durch die geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen dominiert [4].

Das THERIS®-Verfahren wird bei in-situ Anwendungen vornehmlich in bindigen Böden mit gerin-

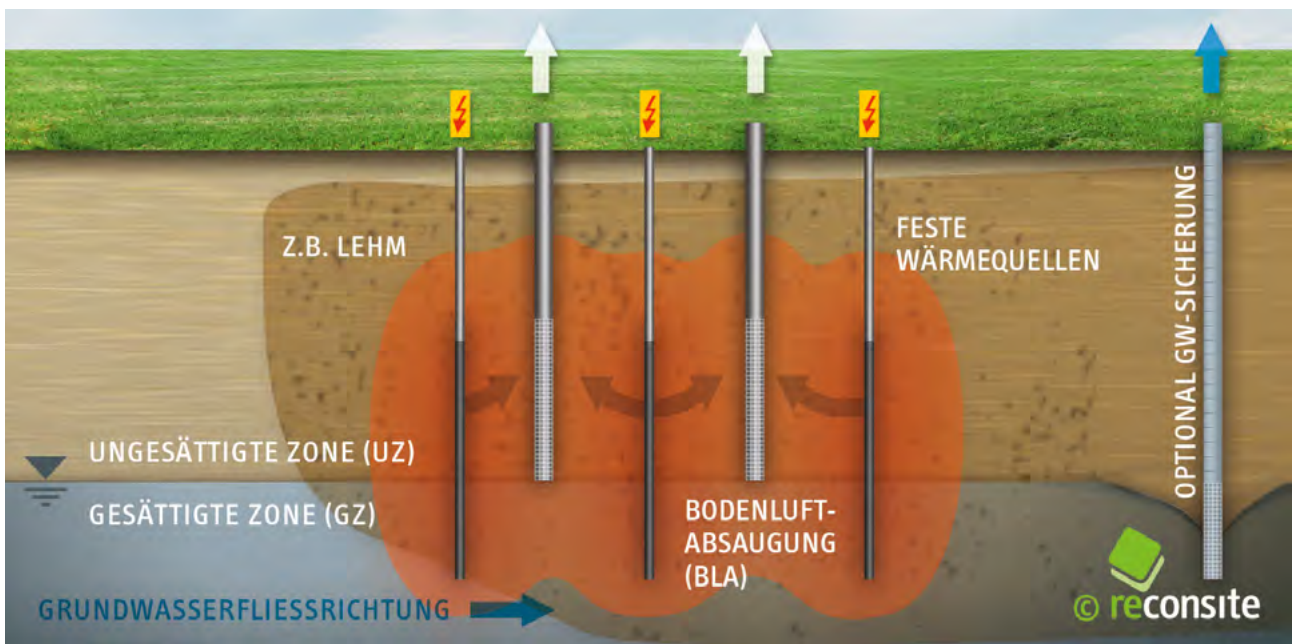


Abb. 5: Schematische Darstellung des THERIS®-Verfahrens (thermische in-situ Sanierung mit festen Wärmequellen zur konduktiven Erwärmung von geringdurchlässigen Böden)

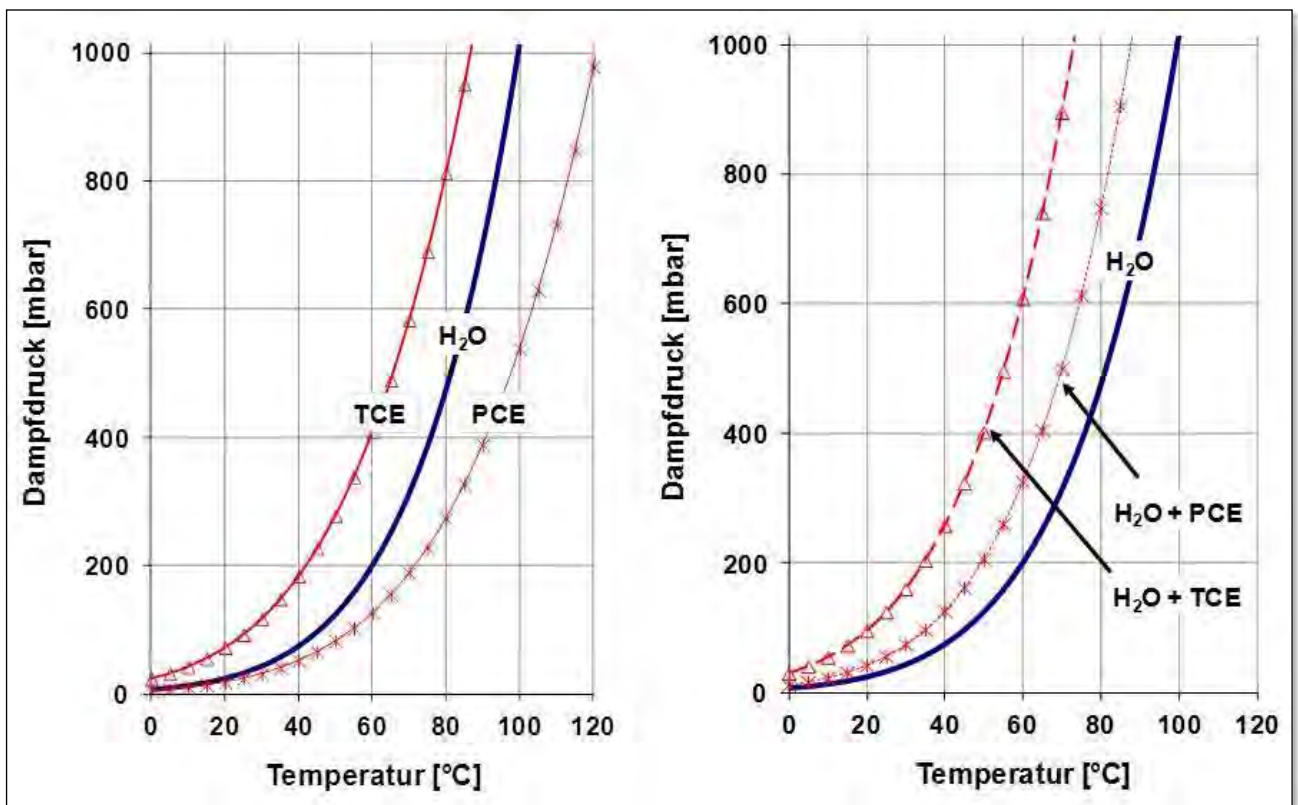


Abb. 6: Dampfdruckkurve von PCE, Wasser und TCE; Gemischsieden von Wasser und PCE bzw. TCE

ger Durchlässigkeit und in gering leitenden Wasserschichten eingesetzt (z.B. Schluff, Lehm, Mergel, Ton). Hierbei werden feste Wärmequellen in den Untergrund eingebaut und auf bis zu 600 °C erhitzt (Abb. 5). Über Wärmeleitung und konvektive Prozesse werden Boden und Wasser zwischen den Heizelementen erhitzt. Da der Dampfdruck exponentiell mit der Temperatur ansteigt (Abb. 6), verdampfen die leichtflüchtigen Schadstoffe etwa 10-20 mal schneller als bei einer Bodenluftabsaugung bei natürlichen Bodentemperaturen (10-15 °C).

Durch die Erwärmung im Schadensherd verdampfen zudem Wasser und Schadstoff (CKW, BTEX) zeitgleich. Dieser Prozess des Gemischsiedens wird Wasserdampfdestillation genannt. Der Siedepunkt des Wasser-Schadstoff-Gemisches liegt unterhalb der Siedepunkte seiner Einzelstoffe (Abb. 6, rechts). Zudem verringert die Bodenluftabsaugung den Absolutdruck im Boden, so dass die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unter 80 °C vollständig in der Gasphase vorliegen. Eine Sanierung der leichtflüchtigen CKW und BTEX erfolgt somit unterhalb des Siedepunktes von Wasser und trocknet den Boden zwischen den Wärmequellen nicht vollständig aus [1].

Typischer Sanierungsverlauf

Mit steigender Temperatur erhöht sich die Konzentration der leichtflüchtigen Schadstoffe in der Bodenluft und infolgedessen der Schadstoffaustrag über die BLA. Dieser Anstieg beträgt bei CKW und BTEX, in Abhängigkeit vom Sanierungsbetrieb, bis zum 20-fachen der Ausgangsfrachten der Bodenluftabsaugung bei natürlichen Bodentemperaturen (Abb. 7) [2]. Durch die Entfernung der CKW und BTEX im Schadensherd wird eine Nachlieferung der Schadstoffe ins Grundwasser dauerhaft unterbunden. Eine nachhaltige Verbesserung der Grundwasserqualität konnte an anderen Standorten schon kurz nach Beendigung von thermischen in-situ Sanierungen gemessen werden [1], [6]. Hierbei war beispielsweise bei CKW-Belastungen eine Reduktion der Grundwasserbelastung auf einige 100ter µg/l CKW zum Ende einer thermischen in-situ Sanierung ausreichend, um nach dem Abkühlen auf natürliche Temperaturen Belastungen unter 10 µg/l zu erreichen.

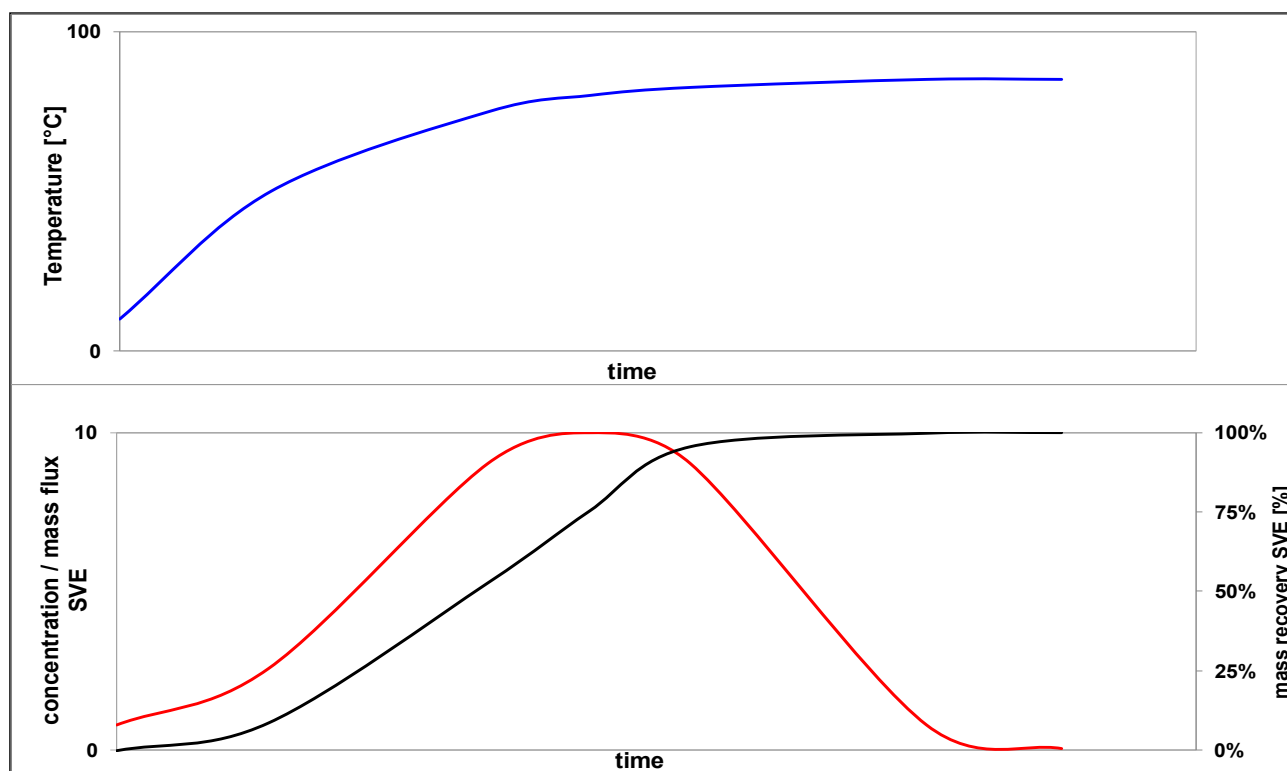


Abb. 7: Schematischer Temperaturverlauf (oben) und Entwicklung der TCE-Konzentration bzw. TCE-Fracht in der Bodenluftabsaugung sowie die sich hieraus ergebende TCE-Summenkurve

2.2 Thermische in-situ Sanierung von CKW und BTEX

Sanierungskonzept

Am Standort wird ein Konzept zur thermischen in-situ Sanierung (TISS) der hoch mit CKW und BTEX belasteten Schadenszentren auf einer Gesamtfläche von etwa 3.000 m² umgesetzt. Aus der Standorterkundung sind ein oberflächennaheres und ein tiefer gelegenes Schadenszentrum zu unterscheiden. Beide Bereiche werden mit Heizelementen und zugehörigen Bodenluftabsaugbrunnen bestückt.

Ergänzend erfolgt eine hydraulische Sicherung aus mehreren Brunnen. Zur Reinigung des belasteten Wassers wird die vorhandene Stripanlage genutzt. Die Sanierungsanlage sowie sanierungsrelevante Parameter werden kontinuierlich messtechnisch überwacht und ingenieurtechnisch ausgewertet.

Aufgrund der Standortgröße ergibt sich eine höhere Wirtschaftlichkeit für die Sanierung durch eine Aufteilung in vier Teilflächen. Entsprechend werden Heiztechnik, Leitungen und Messtechnik nach Sanierung eines Teilfeldes in das nächste umgebaut. Dieses ermöglicht auch eine Reduktion der räumlichen Einschränkungen auf dem Werksgelände durch Bohrarbeiten und oberflur geführte Leitungen auf etwa ein $\frac{3}{4}$ Jahr.

Für die Sanierung sind je Teilfläche etwa sieben Monate veranschlagt. Die Gesamtmaßnahme einschließlich Bohrarbeiten und Umbauten von einer Teilfläche zur nächsten soll in etwa drei Jahren abgeschlossen werden.

Vorbereitende Arbeiten

Um ein zügiges Arbeiten bei den Bohrarbeiten und beim Leitungsbau für die Sanierung zu ermöglichen, wurden in einem ersten Schritt die Sanierungsbereiche für eine anderweitige Nutzung gesperrt. Hierzu mussten auf dem Werksgelände vorhandene Parkplätze und Containerstellflächen umgelegt werden. Ein bewaldeter Streifen wurde auf dem Gewerbegrundstück gerodet, um Baufreiheit für Bohrgeräte und den Leitungsbau zu schaffen. Erdverlegte Leitungen wurden für die Planung aus den verschiedenen Planunterlagen ermittelt und vor Beginn der Bohrarbeiten vor Ort eingemessen.

Installation der Sanierungsanlage

Die Bohrarbeiten wurden in einer Kampagne für alle Teilflächen ausgeführt. Zum Einsatz kamen bis zu vier parallel arbeitende Bohrgeräte, die insgesamt über 7.000 Bohrmeter abteuften. Die Belastungen in der Luft am Bohrloch wurden mit einem mobilen PID überwacht. Insgesamt waren die organoleptischen Auffälligkeiten bei den Bohrarbeiten aufgrund der kühlen Witterung im Herbst 2015 gering.

Nach Fertigstellung der Bohrungen in den ersten Teilbereichen wurde mit der Installation einer Trafostation, den zugehörigen erdverlegten Leitungen, der Heiztechnik, der Messtechnik, der Pumpen, des Leitungs- und Anlagenbaus und der Abluftreinigung begonnen. Die Bohrungen in benachbarten Teilbereichen wurden hierbei fortgesetzt, so dass die Arbeiten zwischen den einzelnen Gewerken fachgerecht koordiniert werden mussten. Zehn Wochen nach Beginn der Bohrarbeiten konnte die Sanierungsanlage in Betrieb genommen werden (Abb. 8a und 8b).

Messtechnische Überwachung

Für einen wirtschaftlichen Sanierungsbetrieb sind die Betriebsparameter für den Heizbetrieb, die Bodenluftabsaugung und die Grundwasserreinigung aufeinander abzustimmen. Da sich die Prozesse im Sanierungsverlauf sehr schnell ändern können [5], sind sowohl der Anlagenbetrieb als auch die sanierungsrelevanten Prozesse im Boden und Grundwasser messtechnisch zu überwachen. Zur Messung von Temperaturen und Stoffströmen in der Bodenluftabsaugung und der Grundwasserförderung ist am Standort ein mobiles Umweltlabor eingerichtet. Die zu analysierenden Proben aus der Bodenluft und dem Grundwasser werden automatisiert aus verschiedenen Messstellen entnommen und vor Ort analysiert. Die Daten werden über Fernüberwachungssysteme ins reconsite-Büro Fellbach übertragen und dort ausgewertet und interpretiert. Besonders die Interpretation der gekoppelten thermodynamischen und hydraulischen Prozesse beim Mehrphasenfließverhalten und ihre Interaktion auf geotechnische und hydrogeologische Fragestellungen erfordert ein detailliertes Prozessverständnis und mehrjährige Erfahrung in der Dateninterpretation bei thermischen in-situ Sanierungen [6].

Bisheriger Sanierungsbetrieb

In der ersten Teilfläche werden aktuell über 100 Heizelemente zeitgleich betrieben. Die Bodenluft wird über Vakuumpumpen abgesaugt und über Luftaktivkohle gereinigt. Grundwasser und Schichtwasser werden kontinuierlich gefördert und über die vorhandene Stripanlage gereinigt. In den ersten neun Monaten wurden rund 1.100 kg Schadstoff aus Boden und Grundwasser mit der thermischen in-situ Sanierung zurückgewonnen (Abb. 8b). Hiervon entfielen rund 90 % auf CKW, rund 10 % auf BTEX. Das aktuell noch vorhandene Restinventar am Standort dürfte mehrere Tonnen Schadstoff betragen.

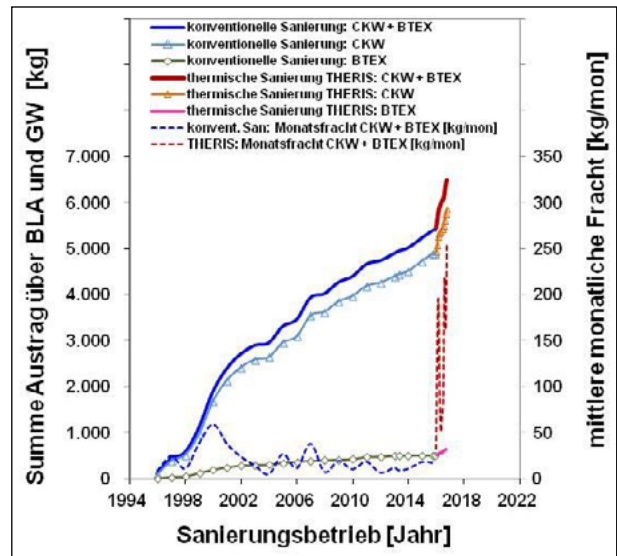


Abb. 8b: Vergleich der konventionellen Bodenluftabsaugung und Grundwassersicherung mit der thermischen in-situ Sanierung (THERIS®-Verfahren): Summe CKW- und BTEX-Austrag und mittlere Schadstofffracht



Abb. 8a: Blick auf eine thermische in-situ Sanierung mit dem THERIS®-Verfahren (feste Wärmequellen)

3 Fazit

Im Rahmen eines Sanierungsaudits wurde die Effizienz einer seit mehr als 20 Jahren betriebenen Bodenluftabsaugung und Grundwasserreinigung analysiert und bewertet. Hierbei stellte sich heraus, dass die Absaugung der BLA mit Seitenkanalverdichtern im bindigen Boden nur eine geringe Reichweite erzielte und die Ausbreitung der CKW und BTEX in den 1980er Jahren nach heutigen Maßstäben unzureichend erkundet waren.

Basierend auf den Ergebnissen des Sanierungsaudits einschließlich Nacherkundung der Schadensherde ergab sich eine Umstellung der Sanierungsstrategie hin zu einer schnellen Herdsanierung.

Hierzu wird eine thermische in-situ Sanierung mit dem THERIS®-Verfahren umgesetzt. Bedingt durch die Erwärmung des bindigen Bodens mit festen Wärmequellen verdampfen die Schadstoffe und werden gezielt über eine Bodenluftabsaugung und eine hydraulische Sicherung gefasst. Der Schadstoffaustrag in den ersten neun Monaten der thermischen in-situ Sanierung überstieg den Austrag der letzten sieben Jahre mit der früheren konventionellen, kalten Bodenluftabsaugung und Grundwassersanierung bei natürlichen Bodentemperaturen.

4 Literatur

- [1] R.S. BAKER, S.G. NIELSEN, G. HERON, N. PLOUG: How Effective Is Thermal Remediation of DNAP Source Zones in Reducing Groundwater Concentrations? *Groundwater Monitoring & Remediation* 36, no.1/Winter 2016/pp. 38-53
- [2] HIESTER, UWE: Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen. Promotionsschrift, Institut für Wasserbau, Eigenverlag (Publ.), Mitteilungsheft Institut für Wasserbau, 9.2009 (178) Universität Stuttgart, ISBN: 978-3-933761-82-8.
- [3] U. HIESTER UND V. SCHRENK: Evaluating sustainable remediation methods for brownfield redevelopment projects (BRPs). *GreenRemediation, Conference-Proceedings*, 11.2009 Copenhagen, Denmark.
- [4] HIESTER, MÜLLER, KOSCHITZKY, TRÖTSCHLER, ROLAND, HOLZER: Leitfaden: Thermische in situ Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. Gefördert v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmbf) u. v. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ). August 2012.
- [5] U. HIESTER UND M. MÜLLER: Complex boundary conditions for in-situ thermal treatments (ISTT) conducted during land recycling and remediation beneath buildings. *AquaConSoil 2015 Copenhagen. Proceedings of the 13th International UFZ-Deltares Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources*, 09.-12. June 2015
- [6] U. HIESTER UND M. MÜLLER: Thermische in-situ Sanierung (THERIS®) unter Gebäuden und Effekte auf die CKW-Belastung im Grundwasser. *Altlastensymposium 2016, GAB (Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH) und altlastenforum BW (Baden-Württemberg)*. Neu-Ulm / Ulm, 22.-23.06.2016, S.110-118