Thermische in-situ-Sanierung unter Gebäuden – wirtschaftlicher und nachhaltiger Grundwasserschutz

Dr.-Ing. Uwe Hiester und Dipl.-Ing. Martina Müller, Fellbach

Thermische in-situ-Sanierungen (TISS) werden erfolgreich zur Beseitigung von Schadensherden im Boden und im Grundwasser eingesetzt. Hierbei können auch Schadstoffe unter Gebäuden und unmittelbar neben Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung beseitigt werden.

Durch den Betrieb einer chemischen Reinigung waren LHKW (leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe) in den Boden und ins Grundwasser unter denkmalgeschützten Gebäuden gelangt. Zur schnellen und wirtschaftlichen Beseitigung der Schadstoffe kam eine Kombination der thermischen in-situ-Verfahren THERIS (feste Wärmequellen) und TUBA (Dampfinjektion) zum Einsatz. Die Wohnnutzung in den Gebäuden wurde während der knapp viermonatigen Sanierung erhalten. Der Sanierungserfolg wurde danach für sechs Jahre im Grundwasser überwacht.

Im Altstadtbereich einer bayerischen Stadt wurde über mehrere Jahrzehnte bis 1995 eine chemische Reinigung betrieben. Das Ladengeschäft befand sich zur Straßenseite, die Reinigungsanlage im Hinterhof. Seit 1989 war eine Verunreinigung im Boden und im Grundwasser durch chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW), vornehmlich durch Tetrachlorethen (PCE), bekannt. Für die Sanierung war eine thermische in-situ-Sanierung (TISS) in Kombination mit einer vor- und nachlaufenden Grundwassersicherung (Pump and Treat) die wirtschaftlichste Variante. Das Sanierungskonzept wurde von der Fa. reconsite GmbH aus Fellbach als Spezialist für thermische in-situ-Sanierungen entwickelt und maßgeblich umgesetzt.

Die Sanierung erfolgte sowohl in gut zugänglichen Flächen neben den denkmalgeschützten Gebäuden als auch unter diesen bei sehr beengten Platzverhältnissen und Erhalt der Wohnnutzung. Die bindigen Bodenschichten (Lehm, Ton) wurden konduktiv mit festen Wärmequellen (THERIS-Verfahren), lokale CKW-Herde im Grundwasser zudem konvektiv mit einer Dampfinjektion mit Luft-Co-Injektion (TUBA-Verfahren) erwärmt. Durch die Erwärmung verdampften die Schadstoffe.

Die schadstoffbelastete Bodenluft wurde kontrolliert mit Pumpen aus Brunnen abgesaugt, wobei der Durchfluss an den Brunnen regelbar war. Der Prozess wurde kontinuierlich fernüberwacht. Eine unkontrollierte Ausgasung von Schadstoffen in die Atmosphäre oder in Gebäude wurde so sicher unterbunden. Ergänzend erfolgte eine hydraulische Abstromsicherung. Vor der Reinigung der schadstoffbeladenen Bodenluft wurde die Wasserphase aus dieser abgeschieden und zusammen mit dem geförderten Grundwasser gereinigt. Die thermische in-situ-Sanierung wurde nach weniger als 3,5 Monaten und einem Austrag von über 0,5 t chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW) beendet. In ihrem Verlauf wurden lokale Setzungen auch unter den Gebäuden im cm-Bereich festgestellt.

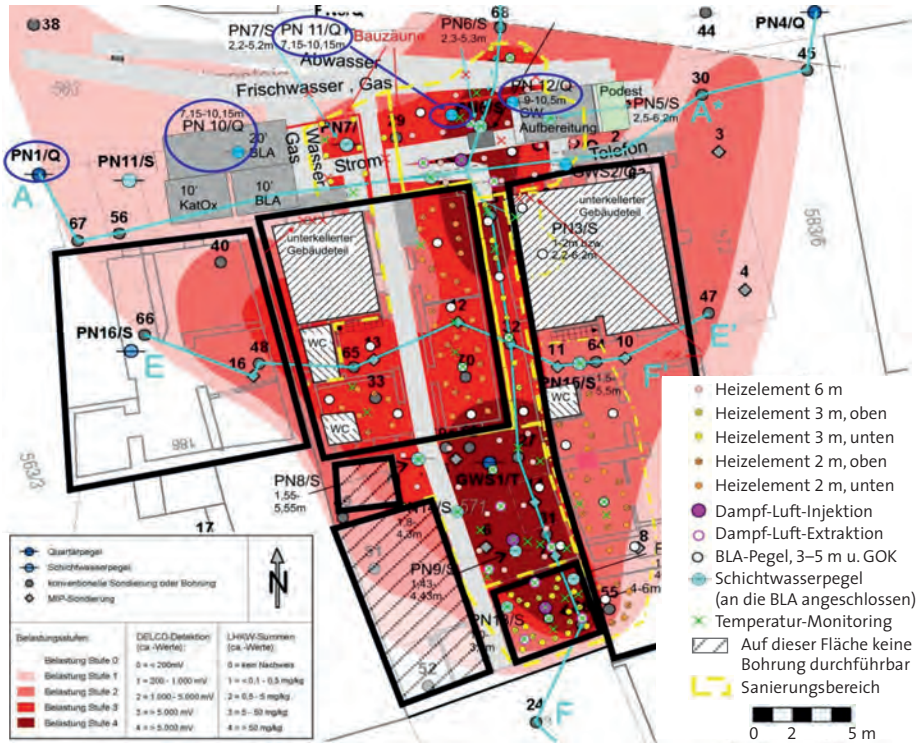
Im Nachgang zur TISS wurde für 3 Jahre eine hydraulische Abstromsicherung betrieben (Pump and Treat), wobei der jährliche CKW-Austrag aus dem Grundwasser von 2 kg/a auf etwa 0,5 kg/a zurückging. Die Grundwasserqualität wurde anschließend weitere 2,5 Jahre überwacht, bevor dieses Monitoring aufgrund der geringen Restbelastung eingestellt wurde.

Beseitigung des CKW-Schadens

Standortbedingungen, Schadstoffzusammensetzung, Geologie und Hydrogeologie

Der Standort liegt im Isartal im Übergangsbereich des tertiären Hügellandes zur quartären Talfüllung. Die tertiäre

Abb. 1: Lageplan mit der Ausgangbelastung und den Installationen für Heizelemente, Dampfinjektions-, Bodenluftabsaug- und Grundwasserbrunnen



Vortrag auf dem Altlastensymposium 2016, 22.–23.6.2016 in Neu-Ulm

Hochfläche der oberen Süßwassermolasse fällt im Bereich des Sanierungsbereichs steil in das Isartal ab (quartäre Kiese). Im Südteil des Grundstücks (Garten) steht ein etwa 9 m mächtiger, geringdurchlässiger Tonmergel an, der von Sanden und Feinkiesen unterlagert ist. Im Nordteil werden bis zu 6 m mächtige Auffüllungen von einem bindigen Kies-Schluff-Gemisch unterlagert (Hanglehme, Rutschmassen). Rutschmassen und Auffüllungen sind nicht gut abgrenzbar und stellenweise miteinander verzahnt.

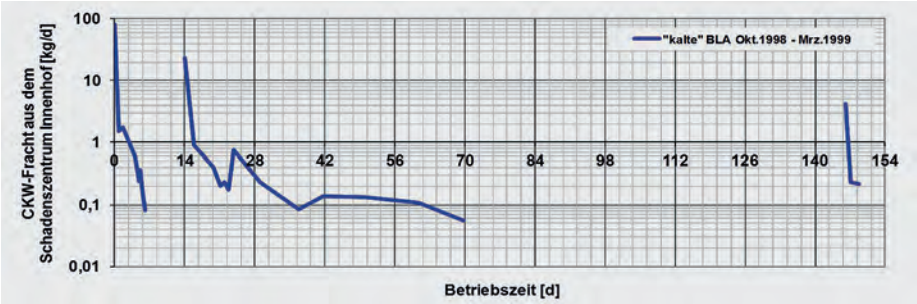


Abb. 2: Bodenluftabsaugversuch im Tonmergel zur Ermittlung des CKW-Austrags

Das darunter anstehende Grundwasser im Quartär ist durch die bindigen Lagen teilweise gespannt. Die quartären Kiese sind in etwas feinkörnigere tertiäre Kiese eingebettet. Die tertiären Kiese setzen sich auch unterhalb der quartären Talfüllungen fort.

Beim Betrieb der chemischen Reinigung wurde Tetrachlorethen (PCE) als Reinigungsmittel eingesetzt. Der PCE-Eintrag erfolgte am Standort der ehemaligen Reinigungsanlage sowie an einem undichten Kanal, in den über einen Straßenablauf PCE-haltiges Abwasser abgeschlagen wurde (Abb. 1: Belastung Stufe 4). Die Bodenbelastungen (Σ CKW) lagen lokal bei über 5.000 mg/kg, das Schichtwasser in den bindigen Schichten war vor dem Gebäude mit über 24.000 µg/l Σ CKW, im Hinterhof mit über 60.000 µg/l Σ CKW belastet. Im quartären Grundwasser lagen die Konzentrationen im Schadenszentrum bei bis zu 14.000 µg/l Σ CKW. Ausgehend von den beiden Eintragsstellen hatten sich im Grundwasser drei CKW-belastete Abstromfahnen ausgebildet. Ein intermittierender Bodenluftabsaugversuch Ende der 1990er Jahre zeigte, dass der stark mit CKW verunreinigte Tonmergel nicht mit einer konventionellen, kalten Bodenluftabsaugung sanierbar war (Abb. 2).

Im Boden und im Grundwasser wurde PCE mikrobiologisch zu Trichlorethen (TCE), cis- und trans-Dichlorethen und Vinylchlorid (VC) abgebaut. Hierbei steigt zunächst das Gesundheitsrisiko: PCE steht im Verdacht, Krebs zu erzeugen (H351), während dies für die Abbauprodukte TCE und VC nachgewiesen ist (H350) [4]. Zudem steigt mit dem fortschreitendem Schadstoffabbau die Mobilität der Abbauprodukte (Siedepunkte bei 1.013 mbar: PCE 121° C, TCE 89° C, cis-DCE 60° C, trans-DCE 48° C, VC –13,4° C), weshalb VC aus dem Boden unkontrolliert ausgaste und in der Raumluft von gering durchlüfteten Räumen nachgewiesen wurde. Bei fortschreitendem Abbau wäre eine weitere Anreicherung von CKW in der Raumluft nicht auszuschließen gewesen. Ein vollständiger Schadstoffabbau von VC zum ungefährlichen Ethen wurde nicht nachgewiesen. Eine Beseitigung der CKW-Belastung ausschließlich durch einen mikrobiellen Abbau war somit nicht zu erwarten.

Sanierungsstrategie und Sanierungsziele

Im Grundwasser wurde im Jahr 2007 eine hydraulische Abstromsicherung mit vier Brunnen im Straßenbereich vor dem denkmalgeschützten Gebäudeensemble in Betrieb genommen, um eine Ausbreitung der CKW im Grundwasser zu unterbinden. Im Bereich der höchsten Belastungsstufe 4 befanden sich über 90 % der gesamten CKW-Masse (Abb. 1). Die CKW-Masse in den randlichen Belastungsstufen 1 und 2 wurde als gering eingestuft, weshalb die thermische in-situ-Sanierung auf die Entfernung der CKW im Schadenszentrum zielte.

Zur Sanierung wurden unter zwei Gebäuden sowie in den angrenzenden Außenbereichen Heiztechnik, Brunnen und Monitoring-Messstellen installiert. Eine Wohnnutzung in unmittelbar an die Sanierung angrenzenden Gebäudeteilen und in den über der Sanierung befindlichen Stockwerken wurde während des TISS-Betriebs erhalten. Nach der thermischen in-situ-Sanierung wurde die hydraulische Abstromsicherung für drei Jahre weiter betrieben, um im Grundwasser gelöste CKW zu fassen. Nach Abschalten der Grundwassersicherung wurden die Grundwasserkonzentrationen über zweieinhalb Jahre messtechnisch überwacht.

Das Ende der thermischen in-situ-Sanierung wurde in Absprache mit dem AG und der Genehmigungsbehörde in Abhängigkeit von der Entwicklung der Untergrunderwärmung und des Schadstoffaustrags bestimmt. Zusätzlich ging die Auswirkung von ergriffenen und noch möglicher Optimierungsmaßnahmen, die Wirtschaftlichkeit und Effizienz in die Bewertung der Gesamtmaßnahme ein.

Sparten-, Arbeits- und Anwohnerschutz

Im Rahmen der Planung wurden qualitätssichernde Arbeits-, Sicherheits- und Monitoringpläne erstellt. Diese definierten die Überwachungsmaßnahmen vor und während der TISS. Temperaturen wurden im Boden und Grundwasser sowie in der abgesaugten Bodenluft und im geförderten Grundwasser überwacht. Zum Schutz

Abb. 3a, b: Bohrarbeiten im Gebäude, Sanierungsfeld

erdverlegter Leitungen im Sanierungsbereich (u.a. Gas, Strom, Telefon, Wasser, Abwasser) wurden spartenspezifische Maßnahmen- und Grenzwerte für eine zulässige Erwärmung definiert. Die Temperaturen an den Leitungen wurden dann automatisiert kontinuierlich erfasst, bewertet und übermittelt. Aufgrund des an die Sparten angepassten Sanierungsdesigns waren die gemessenen Temperaturen während der gesamten Sanierungszeit unterhalb der definierten Maßnahmenwerte und daher ohne Einfluss auf die Nutzung der Sparten oder den Sanierungsbetrieb.

Die Anwohner wurden vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen detailliert über die bevorstehenden Arbeiten informiert. Während der Bohrarbeiten wurden zweimal wöchentlich routinemäßig bzw. bei organoleptischen Auffälligkeiten Kurzzeitmessungen durchgeführt. Der Ringraum der Brunnenrohre (Bodenluft und Grund-/Schichtwasser) und der Hüllrohre für Heizelemente bzw. Temperaturprofile wurde mithilfe von Dämmern verschlossen, so dass aus dem Bohrloch keine LHKW-Belastung in die Raumluft entweichen konnte. Für den nachfolgenden Leitungsbau waren daher keine Innenraummessungen zum Arbeitsschutz erforderlich.

Während des Sanierungsbetriebs wurden Passivsammler über jeweils drei Wochen in den Räumlichkeiten eingesetzt. Punktmessungen erfolgten über Kurzzeitmessungen bzw. über eine Probenanalyse mit dem mobilen Gaschromatographen.

TISS durch eine Kombination von festen Wärmequellen und Dampfinjektion

Zur TISS wurden die bindigen Bodenschichten (Lehm, Ton) konduktiv mit festen Wärmequellen (THERIS-Verfahren), lokale CKW-Herde im Grundwasser zudem konvektiv mit einer Dampfinjektion mit Luft-Co-Injektion (TUBA-Verfahren) erwärmt. Bestehende Installationen wie Brunnen, Pegel oder Oberflächenversiegelung wurden für den Sanierungsbetrieb mit einbezogen. Ergänzend wurden zur Bodenluftabsaugung, zur Dampfinjektion und zur Dampfextraktion neue Brunnen sowie Hüllrohre für Heizelemente im Schadenzentrum installiert. Hierbei stellten die beengten Platzverhältnisse in den denkmalgeschützten Gebäuden besondere Anforderungen an die Bohrarbeiten.

Durch die Erwärmung erfolgt eine Wasserdampfdestillation [3, 7, 8]. Durch das gleichzeitige Verdampfen von Wasser und PCE und den erzeugten Unterdruck durch die Bodenluftabsaugung im Lehm und Ton ist im Schadenszentrum PCE bereits bei

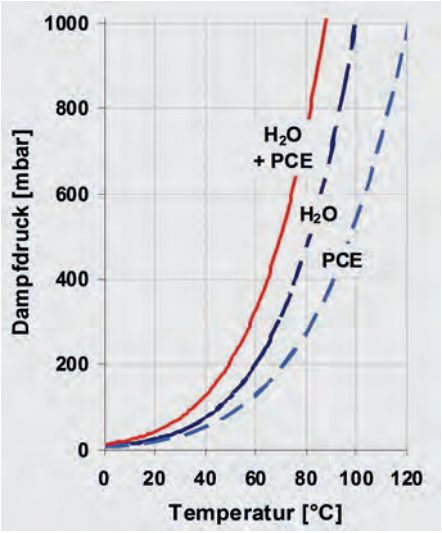


Abb. 4: Dampfdruck von PCE und beim Gemischsieden von Wasser und PCE

Temperaturen um die 80° C vollständig verdampft (Abb. 4, keine PCE-Phase mehr). Zusammen mit dem abgesaugten Dampf aus dem Grundwasserbereich wurde die abgesaugte Bodenluft getrocknet und anschließend in einer katalytischen Oxidation zersetzt. Die hydraulische Sicherung wurde weiter betrieben und das geförderte Grundwasser in einer Strippanlage gereinigt.

Die Erwärmung im Boden und Grundwasser wurde ebenso wie der CKW-Austrag über automatisierte Messsysteme fernüberwacht. Der Schadstoffaustrag bei der vorgeschalteten kalten, konventionellen Bodenluftabsaugung pendelte sich auf etwa 1 kg/d ein (Abb. 5: Zeitraum –20.–0. Tag). Bei fortgesetzter, kalter Bodenluftabsaugung wäre der CKW-Austrag aufgrund der Diffusionslimitierung im bindigen Boden erheblich zurückgegangen (Abb. 2) [8].

Durch die Aufheizung stieg in nur sieben Wochen der CKW-Austrag über die Bodenluftabsaugung auf das 20-fache des Austrags der kalten Bodenluftabsaugung an. Kurzzeitig verminderte CKW-Austräge waren durch Wartungsarbeiten an der Bodenluftabsaugung oder an der katalytischen Oxidation bedingt. Nach der Austragsspitze blieben die Temperaturen im Boden weiterhin hoch. Der CKW-Austrag fiel in den darauf folgenden sechs Wochen unter 1 kg/d und unterschritt die Austragsfracht der anfänglichen, kalten Bodenluftabsaugung.

Nach 102 Tagen wurde der Heizbetrieb eingestellt und eine warme Absaugung bis zur Außerbetriebnahme der TISS weiter betrieben. Die Geschwindigkeit beim CKW-Austrag verdeutlicht, dass zum Sanierungsmanagement neben einer zuverlässigen Messtechnik und Datenaufbereitung ein vertiefendes Prozessverständnis und Erfahrung in der Interpretation von thermodynamischen und mehrphasenhydraulischen Prozessen unerlässlich ist.

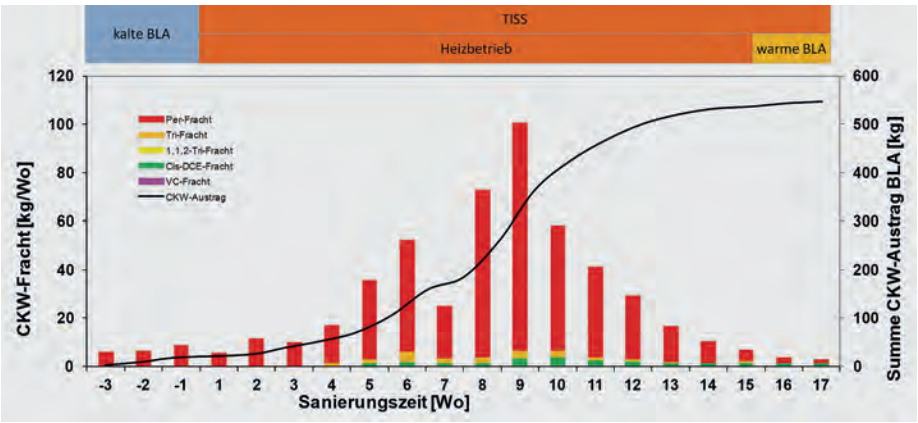
Lessons learned

Setzung des stark organischen Bodens

Zur Qualitätssicherung und Optimierung des Projektmanagements erfolgten regelmäßige Messungen von Parametern im Umfeld der Sanierung. Raumluftmessungen oder Temperaturen an erdverlegten Gasleitungen gaben keinen Anlass zur Besorgnis. Jedoch wurden erste, lokale Setzungen bereits nach Abschluss der Bohrarbeiten gemessen.

Im Sanierungsverlauf wurden mit fortschreitender Erwärmung die organischen Bestandteile (TOC lokal > 10 %) im Boden verschwelt. In Folge der hieraus resultierenden Volumenreduktion ergaben sich kontinuierliche Setzungen auch unter Gebäudeteilen. Setzungen von ca. 2 cm ergaben sich nach etwa 70 Tagen TISS (Abb. 6). Zu diesem Zeitpunkt war mehr als drei Viertel des gesamten CKW über die BLA ausgetragen (Abb. 6, räumliche

Abb. 5: CKW-Austrag der thermischen in-situ-Sanierung



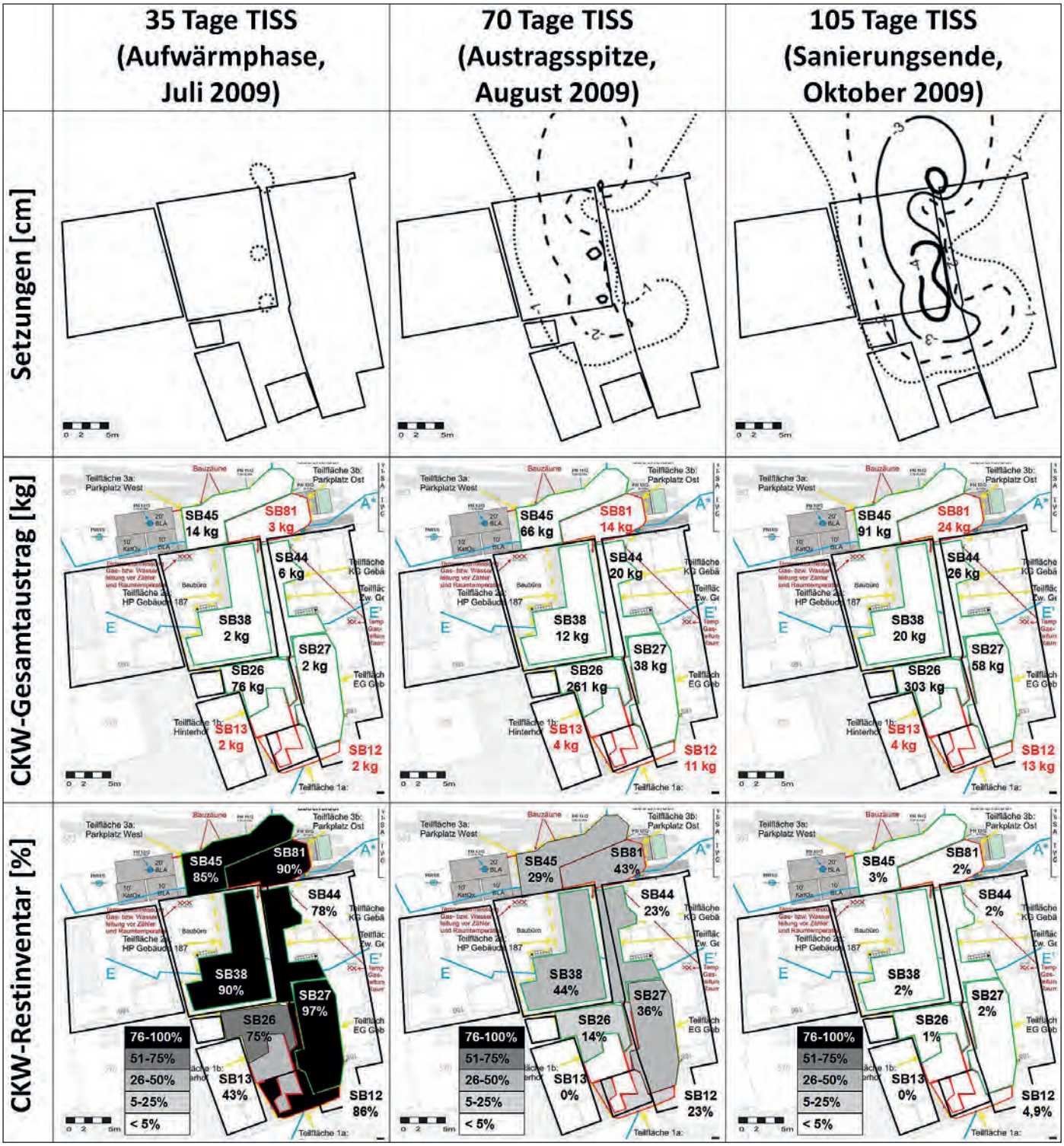
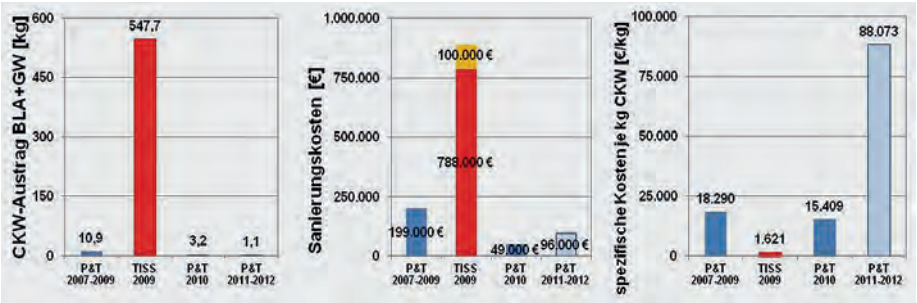


Abb. 6: Setzungen, der CKW-Gesamtaustrag über die Bodenluftabsaugung (BLA) und die CKW-Restbelastung in den jeweiligen Sanierungsbereichen (beim CKW-Austrag: ungesättigte Zone = grüne Umrandung; Grundwasser (Dampfextraktion) = rote Umrandung)

Zuordnung des CKW-Restinventars). Als lokal Setzungen einen Wert von 4 cm überschritten, wurde der Heizbetrieb eingestellt (102. Tag). Der CKW-Austrag betrug jetzt < 1 kg/d. Nach Abkühlung des Bodenkörpers kamen die Setzungen zum Stillstand. Die Setzungen waren für die Statik der Gebäude nicht gefährdend. Nach der Beräumung der Sanierungsanlage waren teilweise Wiederherstellungsarbeiten an den Gebäuden erforderlich.

Abb. 7: CKW-Austrag, Kosten und spezifische Kosten der thermischen in-situ-Sanierung (TISS) und der hydraulischen Abstromsicherung im Grundwasser



Ökonomischer und ökologischer Verfahrensvergleich

Die Gesamtkosten für die CKW-Sanierung beliefen sich auf rd. 1,2 Mio. €. Sie verteilten sich jeweils zu etwa einem Viertel auf die hydraulische Sicherung, die Anlagentechnik TISS und BLA (inkl. Installation, Miete, Wartung und Beräumung), Strom und Sanierungsmanagement (inkl. Messtechnik) sowie vor- und nachlaufende Kosten (Planung, Bohrarbeiten, Bauüberwachung, Wiederherstellungsarbeiten an den Gebäuden). Die Kosten für die Grundwasserabstromsicherung betrugen in den ersten drei Jahren einschließlich Planung, Bohrarbeiten, Anlageninstallation und Raumluftüberwachung ca. 199.000 € und in den letzten drei Jahren ca. 145.000 €. Die Gesamtkosten für die thermische in-situ-Sanierung beliefen sich auf ca. 888.000 € einschl. aller Nebenkosten wie Wiederherstellungsarbeiten an den Gebäuden und in den Außenbereichen nach Beräumung der Sanierungsanlage.

In den Jahren 2007–2009 ergaben sich für die Grundwasserreinigung bezogen auf einen CKW-Austrag von knapp 11 kg spezifische Kosten von rd. 18.300 €/kg CKW, wobei hier die Planungs-, Brunnenbohr- und Installationskosten mit eingingen. Für die TISS ergab sich eine höhere Wirtschaftlichkeit mit spezifischen Sanierungskosten von rd. 1.620 €/kg CKW aufgrund der Steigerung beim CKW-Austrag. In diesen Kosten sind Aufwendungen zur Wiederherstellung an Gebäuden und Außenbereichen bereits mit eingerechnet (Abb. 7). Dieses entspricht einer Kostenreduktion um rd. 92 % durch die TISS. Entsprechend wäre zum Austrag der gleichen CKW-Masse ohne TISS eine hydraulische Abstromsicherung von über 100 Jahren für mehrere Mio. € erforderlich gewesen.

Der spezifische Energieverbrauch wurde durch die TISS gegenüber der Abstromsicherung erheblich verringert (Abb. 8). Die thermische in-situ-Sanierung darf als energiesparend bewertet werden. Diese deckt sich mit Ökobilanzen früherer TISS [8, 9, 10].

Auswirkungen der thermischen in-situ-Sanierung auf die Grundwasserbelastung

Unmittelbar am Schadensherd bzw. bis zu 15 m seitlich dazu versetzt wurde an vier Grundwasserbrunnen eine hydraulische Abstromsicherung betrieben, um eine weitere Ausbreitung der CKW im Quartär zu unterbinden. Bei der Inbetriebnahme der Grundwassersicherung im April 2008 lagen die CKW-Gehalte im direkten Abstrom vom Schadensherd bei 14.000 µg/l (Abb. 9: PN11/Q). Die Durchlässigkeit in den Kiesen wurde mit k_f = 2–6 x 10^{-4} m/s und die Reichweite der Brunnen zu 18 bis 56 m abgeschätzt.

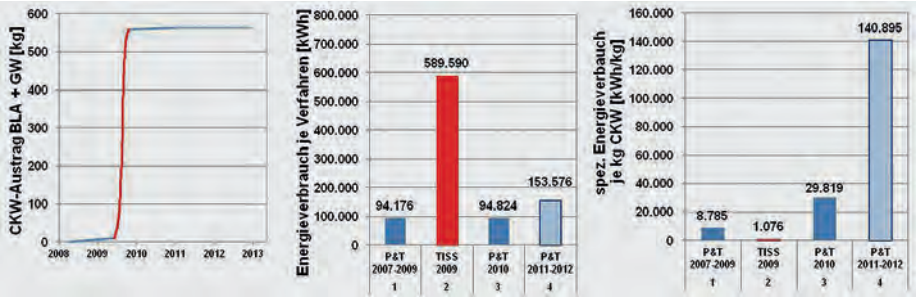


Abb. 8: Sanierungsverlauf, Energieverbrauch und spezifischer Energieverbrauch der thermischen in-situ-Sanierung und der hydraulischen Abstromsicherung im Grundwasser

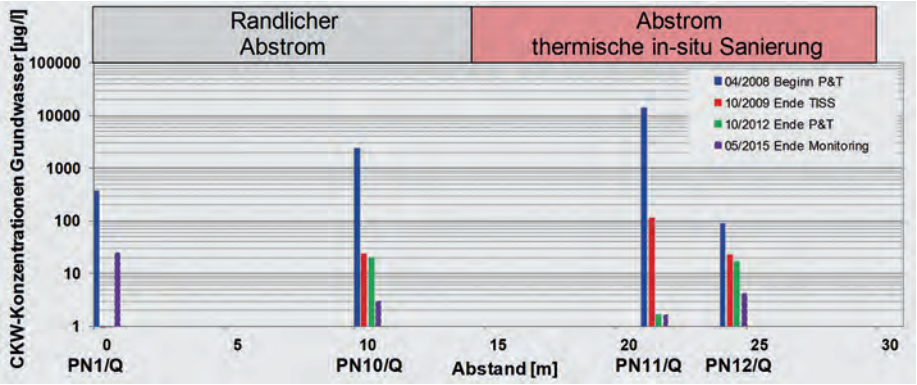
Durch die hydraulische Abstromsicherung wurden vor der TISS 11 kg CKW ausgetragen. Nach der Beendigung der TISS und dem damit verbundenen Austrag von über 0,5 t CKW lagen die Grundwasserbelastungen um ein bis drei Zehnerpotenzen unter den initialen Belastungen (Okt. 2009). Am wenigsten ausgeprägt war die Grundwasserreinigung bei dem initial am geringsten belasteten Brunnen PN12/Q. Die Abstromsicherung nach Abschluss der TISS bewirkte in drei Jahren nur im Brunnen PN11/Q eine weitere deutliche Minderung der Grundwasserbelastung um zwei Größenordnungen. Die Änderung in den anderen Brunnen war gering. Die Grundwasserkonzentrationen von wenigen µg CKW/l wurden im nachfolgenden Monitoring bestätigt. Lediglich im randlich zur TISS gelegenen PN1/Q stiegen die Werte nach Abschalten der Abstromsicherung wieder leicht an, da im Pumpbetrieb die Grundwasserströmung stärker in Richtung PN10/Q ausgeprägt war. Insgesamt sind die Maßnahmenschwellenwerte nach der TISS dauerhaft unterschritten [1], weshalb das Monitoring im Mai 2015 beendet wurde. Diese nachhaltige Verbesserung der Grundwasserqualität nach einer TISS decken sich mit den Erfahrungen an anderen Standorten [2, 5].

Handlungsoptionen und Empfehlungen für künftige Sanierungen

Thermische in-situ-Sanierungen ermöglichen einen schnellen und zuverlässigen Abschluss von Sanierungen im Schadensherd auch unter und neben Gebäuden [6, 9, 11]. Sie sind kosteneffizient und ermöglichen eine zeitnahe Altlastenfreistellung [11, 12]. Beim beschriebenen Projekt wurde die Wirtschaftlichkeit der Sanierung erheblich gesteigert, da die spezifischen Sanierungskosten für die thermische in-situ-Sanierung bei nur 8 % der Kosten für die Grundwassersicherung (P&T) lagen (Abb. 8). Diese erhebliche Kostenreduktion ging einher mit einer Beseitigung der CKW-Quelle in wenigen Wochen. Auch wenn im Leitfaden TISS grundsätzliche Handlungsabläufe skizziert sind [7], ersetzt dieser nicht eine detaillierte, objektbezogene Fachplanung durch erfahrene Spezialisten.

In über 15 Jahren Erfahrung in der TISS sind die hier beschriebenen Setzungen einmalig und nach unserer Kenntnis auch andernorts nicht in der internationalen Literatur beschrieben. An anderen TISS-Standorten in Bayern standen Gebäude auf Auffüllungen und Torfschichten. Unmittelbar unter diesen wurden TISS erfolgreich umgesetzt und lediglich Setzungen von wenigen Millimetern gemessen. Die Erfahrungen im vorliegenden Fall zeigen,

Abb. 9: CKW-Belastungen im Grundwasser an den Sicherungsbrunnen (Lageplan Abb. 1)



dass eine sorgfältige Planung, differenzierte Bodenaufschlüsse und eine vermessungstechnische Überwachung von Setzungen bei TISS unter und neben Gebäuden unerlässlich sind.

Fachgerecht ausgeführte TISS bewirken bei CKW-Belastungen eine schnelle Verbesserung der Raumluft [6]. Bei TISS wird daher oft die Gebäudenutzung erhalten. Eine Raumluftüberwachung sollte vom Projektmanagement mitbedacht werden.

Die thermische in-situ-Sanierung hat die Grundwasserqualität am Standort nachhaltig verbessert. Ähnliche Erfahrungen sind auch von anderen thermischen in-situ-Sanierungen bekannt [2, 5]. Bei langlaufenden Bodenluftabsaugungen oder Pump-and-Treat-Maßnahmen sollte daher geprüft werden, ob eine Verfahrensumstellung ökonomische und ökologische Vorteile bieten könnte [13].

Literaturverzeichnis

[1] Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Untersuchung und Bewertung von Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Grundwasserverunreinigungen. Merkblatt 3.8/1, 31.10.2001

[2] Baker, R. S.; Nielsen, S. G.; Heron, G.; Ploug, N.: How Effective Is Thermal Remediation of DNAP Source Zones in Reducing Groundwater Concentrations? Groundwater Monitoring & Remediation 36, no.1/Winter 2016/ pp. 38–53

[3] Davis, Eva L.: How Heat Can Enhance in-situ Soil and Aquifer Remediation: Important Chemical Properties and Guidance on Choosing the Appropriate Technique. U.S. Environmental Protection Agency, USEPA/540/S-97/ 502, Washington, USA, April 1997

[4] GESTIS-Stoffdatenbank des IFA (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung) http://gestis.itrust.de/nxt/ gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f =templates$fn=default.htm$vid= gestisdeu:sdbdeu$3.0, abgerufen am 5.12.2016

[5] Heron, G.; Bierschenk, J.; Swift, R.; Watson, R.; Kominek, M.: Thermal DNAPL source zone treatment impact on a CVOC plume. Groundwater Monitoring & Remediation 36, no.1/ Winter 2016/pp. 26-37

[6] Hiester, U.; Müller, M.: Complex boundary conditions for in-situ thermal treatments (ISTT) conducted during land recycling and remediation beneath buildings. AquaConSoil 2015 Copenhagen. Proceedings of the 13th Internat. UFZ-Deltares Conf. on Sustainable Use a. Management of Soil, Sediment, Water Resources, June 2015

[7] Hiester, U.; Müller, M.; Koschitzky, H.-P.; Trötschler, O.; Roland, U.; Holzer F.: TASK-Leitfaden: Thermische in-situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum – TASK, Leipzig, August 2012

[8] Hiester, U.: Technologieentwicklung zur in-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen. Inst. Wasserbau 178, Stuttgart

[9] Hiester, U.; Schrenk, V.: Thermally enhanced in-situ remediation beneath buildings during their continued useage-new source removal options for urban sites. ConSoil 2008. Proceedings 10th Internat. UFZ-Deltares/ TNO-Conference on Soil-Water Systems in cooperation with Provincia di Milano, June 2008, pp. 143–150, Italy

[10] Hiester, U.; Schrenk V.: In-situ thermal remediation: Ecological and Economic Advantages of the TUBA and THERIS methods. ConSoil 2005. Proceedings 9th Internat. FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems (Bordeaux, France). FZK Karlsruhe 2005

[11] Schmitz, H. J.; Hiester, U.; Müller, M.: Thermische in-situ-Sanierung – LHKW-Altlast wird während eines Industriehallenbaus saniert. BauPortal, 1/2015, S. 4–7

[12] Woisnitza, M.; Reuter, A.; Hiester, U.: Thermische in-situ-Sanierung (Pilotversuch) am Beispiel „ehemalige Lederfabrik Berninger“ in Idstein. Seminar Altlasten und Schadensfälle 2011 – Neue Entwicklungen, Wetzlar, Mai 2011, Org.: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Altlasten Annual 2011

[13] Wolf, M.; Hiester, U.: Thermische in-situ-Sanierung von CKW und BTEX – Konventionelle Sanierung auf dem Prüfstand. Seminar: Altlasten und Schadensfälle – Neue Entwicklungen, HLNUG, 13.–14.6.2016, Bad Camberg – in Vorbereitung

Autoren:
Dr.-Ing. Uwe Hiester und
Dipl.-Ing. Martina Müller
reconsite GmbH

JEDER MENSCH HAT EINE BERUFUNG.

Ihre könnte Lebensretter sein.

Alle 45 Minuten erkrankt in Deutschland ein Mensch an Leukämie. Viele dieser Patienten sind Kinder und Jugendliche.

Lassen Sie sich jetzt als Stammzellspender und potenzieller Lebensretter für einen Leukämiepatienten registrieren: durch einen Abstrich Ihrer Wangenschleimhaut mit einem Wattestäbchen.

Fordern Sie unter www.dkms.de das Registrierungs-Set und alle wichtigen Informationen an.

DKMS
JEDER EINZELNE ZÄHLT

DKMS Deutsche Knochenmarkspenderdatei gemeinnützige Gesellschaft mbH
Spendenkonto: Kreissparkasse Tübingen, BLZ 641 500 20, Konto 255 556