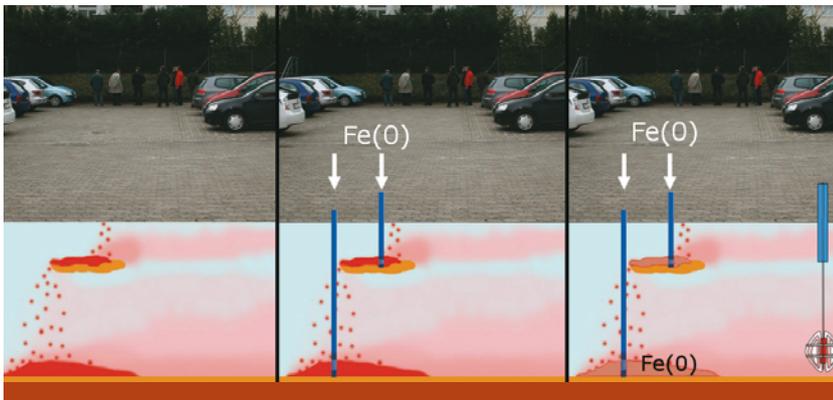


Sauberes Grundwasser

Nachhaltige Sanierung mit innovativen Technologien

Trinkwasser, unser wichtigstes Nahrungsmittel, wird in Deutschland zu 65 Prozent aus dem Grundwasser gewonnen. Diese Trinkwasserressource ist daher zwingend für nachfolgende Generationen zu schützen bzw. wenn notwendig zu sanieren. Die European Environment Agency (EEA) [12] identifizierte im August 2007 in Europa beinahe drei Millionen Standorte mit Aktivitäten, die potentiell zu einer Grundwasserverunreinigung führen können. In der Bundesrepublik stellen die derzeit ca. 14.200 erfassten Altlasten und die mehr als 300.000 Altlastenverdachtsflächen ein erhebliches Gefährdungspotenzial für das Grundwasser dar [13]. Die Entwicklung innovativer In-situ-Sanierungstechnologien und insbesondere auch deren Implementierung stellt eine große Herausforderung dar.



Injektion von Nano-Eisen zur Erzeugung einer reaktiven Zone unter einem Gebäude.

1. Einleitung

Derzeit werden in der Bundesrepublik täglich ca. 110 Hektar Fläche für die Ansiedlung von Industrieanlagen, für Wohnsiedlungen, Straßen etc. „verbraucht“. Eine effiziente Sanierung von Altlastenstandorten ermöglicht eine erfolgreiche Wiedernutzbarmachung von (Industrie-)Brachen und vermindert somit den Flächenverbrauch.

In Baden-Württemberg befinden sich Altlasten oft auf ehemaligen Industrie- und Gewerbeanlagen. Insbesondere chemische Reinigungen (Anteil Schadensfälle sechs PHrozent), Tankstellen und KFZ-Werk-

stätten (31 Prozent) sowie metallverarbeitende Betriebe (18 Prozent) liegen oft in zentralen Lagen. Eine Sanierung ist somit sowohl aus gesundheitspolitischer als auch aus städteplanerischer Sicht unumgänglich.

Grundvoraussetzung einer erfolgreichen Sanierung ist eine umfassende Erkundung des Standorts. Diese muss neben den hydrogeologischen Verhältnissen (Tiefe des Grundwasserleiters, Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, Durchlässigkeit des Bodens etc.) auch die Art der Schadstoffe (leicht-/schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe, Lösungsmittel, Treibstoffe, Pestizide etc.), die Menge, das Alter und die räumliche Verteilung umfassen.

Schadensfälle können klassifiziert werden nach:

- Schadstoffverteilung im Untergrund: Wurde der Schadstoff in der ungesättigten Bodenzone zurückgehalten und emittiert bei Niederschlag ins Grundwasser oder ist er bereits ins Grundwasser gelangt?
- Vorliegen der Schadstoffe: Als Quelle oder Herd werden Bereiche bezeichnet, in denen der Schadstoff als separates Fluid vorkommt. Dieser Schadstoff löst sich im vorbeiströmenden Grundwasser und es bilden sich oft Kilometer lange Schadstofffahnen aus. Oft dauert es Jahrzehnte bis Jahrhun-

derte, bis eine Quelle vollständig in Lösung übergegangen ist und als Fahne abtransportiert wurde.

- Dichte des Schadstoffs: Organische Schadstoffe deren Dichte geringer als die von Wasser ist (z.B. Heizöl oder Treibstoff), werden als LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) bezeichnet. Diese schwimmen auf dem Grundwasser auf, dringen also nicht tief in wasserführende Schichten ein. Organische Schadstoffe deren Dichte größer als die von Wasser ist, werden als DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) bezeichnet. Hierzu zählen z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe. Sie sinken auf Grund ihrer hohen Dichte schnell in tiefe Lagen ab und können damit auch tiefe Grundwasserleiter kontaminieren (01).

In Abhängigkeit der hydrogeologischen Standortsituation, der Art und Verteilung der Schadstoffe und den Vorgaben der Behörden ist zu prüfen, ob eine Sanierung in situ, on site oder ex situ durchgeführt werden kann und welche Sanierungsziele erreicht werden können.

Bei On-site-Sanierungen wird der Schadensbereich ausgekoffert, vor Ort gereinigt und teilweise wieder eingebaut. Bei Ex-situ-Sanierungen wird der ausgekofferte Boden je nach Schadstoffart und -gehalt zu einer Bodenreinigungsanlage, einer Sonderabfalldeponie oder einer Verbrennungsanlage verbracht. Sowohl On-site- als auch Ex-situ-Sanierungen sind meist sehr energieaufwendig, haben eine schlechte Öko-Bilanz (z.B. durch lange Transportwege, hohe CO₂-Emissionen) und erfordern eine Räumung des Standorts.

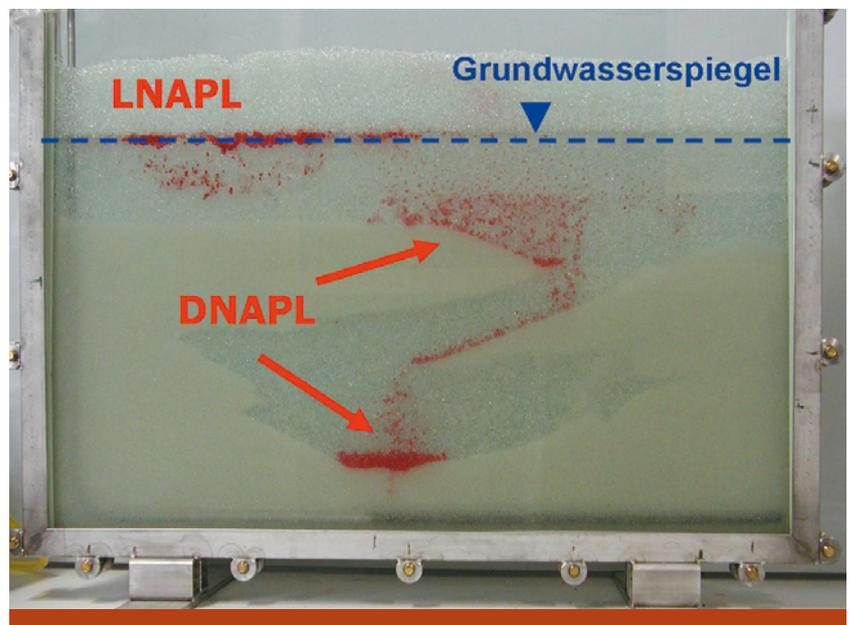
In-situ-Sanierungen erlauben hingegen die Beseitigung von Schadstoffen aus dem Boden und Grundwasser auch unter Gebäuden und laufenden Anlagen, sie haben eine relativ gute Öko-Bilanz (wenige Straßentransporte). Nachteilig bei diesen Sanierungen sind die zum Teil langen Laufzeiten und die manchmal weniger genau voraussagbare Erreichung von Sanierungszielen. Der „Klassiker“ unter den In-situ-Ansätzen ist die so genannte Pump-and-Treat-Technologie (P&T). Hierbei wird kontaminiertes Grundwasser abgepumpt, gereinigt und reinjiziert.

In den letzten Jahren werden zunehmend „innovative“ In-situ-Sanierungsverfahren angeboten, um insbesondere bereits lang laufende und nicht erfolgreiche Sanierun-

SUMMARY

Drinking water, our most important nutrient, is in Germany supplied to 65% from groundwater. Hence, this important drinking water source is to be protected, or if contaminated, to be remediated for coming generations. In August 2007, the European Environment Agency (EEA) identified throughout Europe nearly three million locations with activities which might potentially yield groundwater contamination [12]. In Germany, currently 14.200 recorded and 200.000 potentially contaminated sites pose a substantial risk to the groundwater [13]. The development of innovative in-situ remediation technologies and especially their implementation is a major challenge to be faced at the moment.

gen, die kostenaufwendig mit konventionellen Verfahren durchgeführt wurden, erfolgreich zu beenden [8]. Diese Verfahren machen sich komplexe physikalische, chemische und biologische Vorgänge zu Nutze und stellen hohe Ansprüche an Pla-



01

Demonstrationsrinne zur Sichtbarmachung der Verteilung von LNAPL und DNAPL im Untergrund.

ner und Genehmigungsbehörden. Doch auch sie bieten keine Patentlösungen, vielmehr müssen die Auswahl und der Einsatz in jedem Einzelfall sorgfältig abgewogen werden [8].

2. Innovative Technologien zur Quellensanierung

Forscher an der Universität Stuttgart sind maßgeblich daran beteiligt, Sanierungstechnologien zu entwickeln, zu optimieren und ihre Einsatzmöglichkeiten und -grenzen zu erweitern.

In-situ-Sanierungsverfahren können zur Sanierung in der ungesättigten Bodenzone, im Grundwasserschwankungsbereich und

in der gesättigten Bodenzone (Aquifer) eingesetzt werden. Es handelt sich zum einen um Methoden zur Leistungssteigerung klassischer Verfahren, zum anderen aber auch um weitgehend eigenständige Verfahren zur Schadensherdsanierung oder zur Abstomsicherung. Die nachstehend diskutierten innovativen Technologien zur Quellensanierung fokussieren entweder auf einer Erhöhung des Schadstoffaustrags oder auf einer chemischen Umsetzung der Schadstoffe im Boden.

2.1 Innovative (aktive Verfahren) zur Erhöhung des Schadstoffaustrags

2.1.1 Thermische Verfahren

Zwei unterschiedliche thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIS) zur effizienten Schadensherdsanierung wurden an der Universität Stuttgart weiter entwickelt und über Pilotanwendungen sowie durch die wissenschaftliche Begleitung von Sanierungen erfolgreich in die Praxis überführt: Dampf-Luft-Injektion (TUBA- oder DLI-Verfahren) und der Einsatz fester Wärmequellen (Theris-Verfahren) [6]. Der Fokus der beiden TIS liegt auf der Beseitigung von Schadensherden sowohl aus der ungesättigten Bodenzone, aber vor allem auch aus dem Grundwasser. Durch die Untergrunderwärmung bis zum Erreichen der schadstoffspezifischen Gemischsiedetemperatur werden die flüssigen Schadstoffe gasförmig (Wasserdampfdestillation). Das Gasgemisch wird dann aus dem Untergrund durch eine Bodenluftabsaugung entfernt. Sanierbar sind sowohl Schadstoffe mit einer Stoffdichte kleiner als auch größer als Wasser (LNAPL, DNAPL). Schadensherde mit organischen Schadstoffen, wie beispielsweise chlorierte oder halogenierte Kohlenwasserstoffe (CKW, LHKW), Benzol, Ethylbenzol, Xylol und Toluol (BTEX) oder Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) bis zu einem Siedepunkt von etwa 200°C lassen sich mittels TIS sanieren.

Zum Aufheizen des Untergrunds wird vorzugsweise ein Dampf-Luft-Gemisch in die ungesättigte oder gesättigte Bodenzone injiziert (02). In der ungesättigten Bodenzone bei Lockergesteinen und feinklüftigen Festgesteinen mit guter bis mäßiger Durchlässigkeit kondensiert der injizierte

Dampf an der kalten Bodenmatrix und gibt seine Energie an diese ab. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess – bis der Boden die Dampftemperatur erreicht hat – kann Dampf von der Injektionsstelle an die Dampffront strömen. Es bildet sich entsprechend der injizierten Dampfmenge eine Wärmefront aus, die sich von der Injektionsstelle aus im Idealfall horizontal und radialsymmetrisch ausbreitet. Im erwärmten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffe verdampft und abgesaugt [6].

Bei schlecht durchlässigen Böden können feste Wärmequellen in Form elektrisch betriebener Heizlanzen (03) mit Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius zur Beseitigung von Schadensherden eingesetzt werden. Die Erwärmung des Bodens erfolgt primär konduktiv über Wärmeleitung. Der Wärmeeintrag ist im Gegensatz zur Dampf-injektion nicht auf ein Wärmeträgermedium angewiesen. Die Heterogenität des Untergrundes ist für seine konduktive Aufheizung von untergeordneter Rolle, da die Wärmeleitung unterschiedlicher Bodenschichten nur mäßig variiert [10]. Wie bei der Dampf-injektion ist es unerlässlich, die verdampften Schadstoffe über eine Bodenluftabsaugung abzuführen. Das Verfahren wird zwischenzeitlich an zahlreichen Standorten in Europa eingesetzt.

2.1.2 Alkoholspülung

DNAPL-Schadensherde im Grundwasser können durch Injektion einer Mischung aus Wasser und je einem hydrophilen und lipophilen Alkohol (Alkoholcocktail) entfernt werden. Beide Alkohole setzen die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Schadstoff herab und mobilisieren ihn. Der hydrophile (nicht schwellende) Alkohol ist notwendig damit der lipophile (schwellende) Alkohol wasserlöslich und der Alkoholcocktail hydraulisch kontrollierbar ist. Der lipophile (schwellende) Alkohol dringt dabei in die Schadstoffphase ein und verringert deren Dichte, wodurch der Schadstoff leichter als Wasser wird. Es entsteht ein Einphasengemisch aus Alkoholen, Schadstoff und Wasser, das kontrolliert abgepumpt werden kann. Durch die Dichteänderung wird die Gefahr eines unkontrollierten Absinkens der Schadstoffe vermieden.

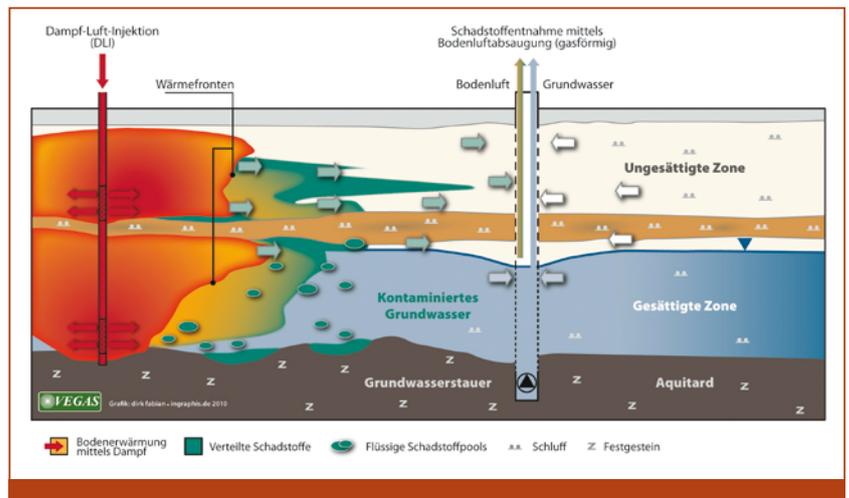
Zur weiteren Sicherung ist bei der Sanierung von DNAPL-Schadensfällen eine aufwärtsgerichtete Strömung notwendig (O4). Ziel einer wirtschaftlichen Sanierung ist der schnelle und kontrollierte Austrag von Schadstoffen entweder in gelöster Form oder als freie Phase. In Abhängigkeit der Schadstoffeigenschaften werden unterschiedliche Alkohole zur Sanierung eingesetzt. Kontaminierte Bereiche werden durchspült und das Alkohol-Schadstoff-Wasser-Gemisch wird abgepumpt. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird ein Großteil des Alkohols aus dem „Abwasser“ zurück gewonnen und kann für weitere Alkoholspülungen eingesetzt werden.

2.1.3 Tenside

Durch die Injektion von Tensiden ins Grundwasser werden die Grenzflächenspannungen zwischen Schadstoffphase und Wasser verringert. Dadurch wird einerseits die Löslichkeit der Schadstoffe im Wasser erhöht und andererseits können kapillar zurückgehaltene Schadstoffe wieder mobilisiert, d.h. fließfähig gemacht und abgepumpt werden. Während die Anwendung von Tensiden bei Schadstoffen die leichter sind als Wasser relativ unkritisch ist, ist bei schwereren Fluiden (z.B. CKW) mit äußerster Vorsicht vorzugehen. Bei diesen Schadstoffen sind die Tenside so auszuwählen, dass sie lediglich als Lösungsvermittler fungieren, da eine mobilisierte Schadstoffphase hydraulisch kaum kontrollierbar wäre und somit eine große Gefahr für tieferliegende Grundwasservorkommen darstellen würde.

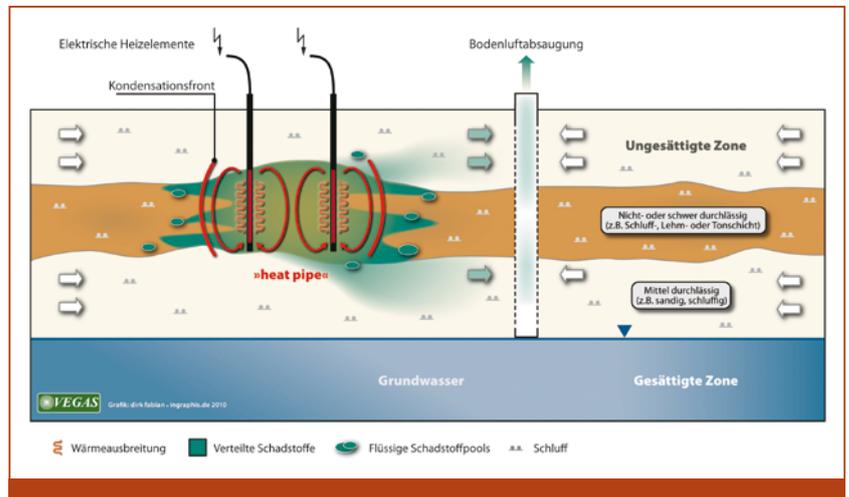
2.2 Innovative (aktive Verfahren) zur Erhöhung des Schadstoffabbaus

Während die oben beschriebenen Technologien den Schadstoff aus dem Boden entnehmen und für die Dauer ihres Einsatzes eine entsprechende Infrastruktur (Verdichter, Kondensatoren, Filter) benötigen, wandeln die nachfolgend genannten Verfahren den Schadstoff im Boden in unschädliche Produkte um. So werden bei der In-situ-chemischen-Oxidation (ISCO) Schadstoffe im Untergrund durch Einleitung eines chemischen Oxidationsmittels (Kalium- und Natriumpermanganat, Fen-



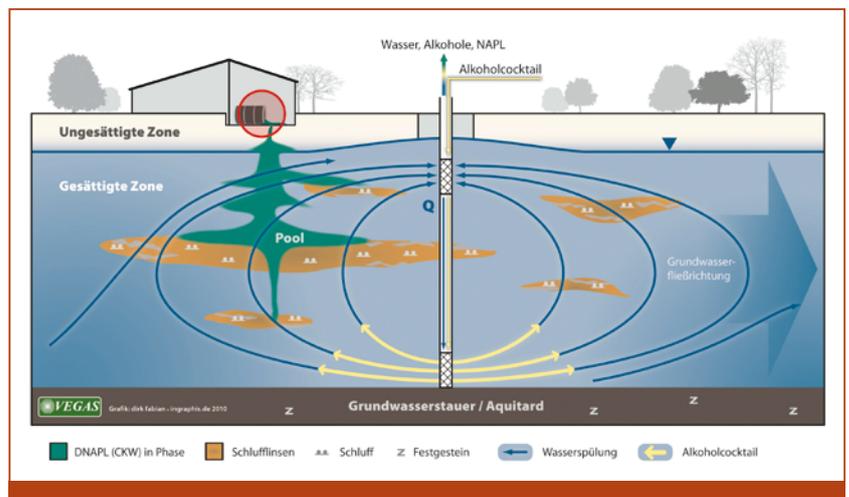
O2

Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte und gesättigte Zone.



O3

Einsatz Fester Wärmequellen (THE-RIS) zur Beseitigung von Schadenherden in der ungesättigten Zone.



O4

Alkoholspülung mit Grundwasserzirkulationsbrunnen.

tons Reagenz, Ozon, Persulfat) nach dem Prinzip einer „kalten Verbrennung“ abiotisch zerstört, wobei eine vollständige Umsetzung zu umweltneutralen Stoffen wie Kohlendioxid und Wasser sowie – bei chlorierten Verbindungen – zu Chlorid angestrebt wird [8].

Prinzipiell können alle organischen Schadstoffe durch Oxidationsmittel zerstört werden. Jedoch sind nicht alle technisch geeigneten und handhabbaren Oxidationsmittel gleichermaßen für alle altlastentypischen organischen Schadstoffe geeignet, so dass der Erfolg einer Maßnahme unter anderem von der Auswahl des am besten geeigneten Oxidationsmittels oder einer Kombination von Oxidationsmitteln abhängt. Die Oxidations-Reaktion selbst erfolgt im Grundwasserleiter sehr schnell sobald ein wirksamer Kontakt zwischen dem Oxidationsmittel und der organischen Verbindung hergestellt ist. Die Geschwindigkeit und Effektivität des Oxidationsprozesses im Grundwasserleiter wird daher maßgeblich vom Transport des Oxidationsmittels zum Schadstoff und der möglichen Kontaktfläche zwischen Oxidationsmittel und Schadstoff limitiert.

Anhand von Labor- und Technikumsversuchen in der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) konnte gezeigt werden, dass die Oxidation des Schadstoffs durch Peranganat sogar vollständig zum Erliegen kommen kann, wenn der Kontakt an der Phasengrenze durch Mangandioxid-Ausfällungen (Braunsteinbildung) unterbunden wird.

Neben dem Schadstoff werden aber auch der oxidierbare Anteil der Grundwasserleitermatrix und die oxidierbaren Grundwasserinhaltsstoffe weitgehend umgesetzt. Aus diesem Grund muss das Oxidationsmittel stets in erheblichem Überschuss eingesetzt werden. Da die Praxis zeigt, dass der Matrixbedarf auch in Böden mit relativ geringen Gehalten an organischem Kohlenstoff sehr erheblich ist, ist der Einsatz von ISCO in der Regel nur für die Sanierung begrenzter Schadstoffherde wirtschaftlich durchzuführen.

Die In-situ-chemische Reduktion erfolgt in der Regel mit Eisen. Dazu werden quer zur Strömung des kontaminierten Grundwassers Reinigungswände (PRB Permeable Reactive Barriers) aus granularem, elementarem Eisen im Aquifer eingebaut [11]. Während der Durchströmung der Wand

findet eine chemische In-situ-Reduktion von beispielsweise chlorierten Kohlenwasserstoffen statt. Diese Bauwerke sind teuer und können auch unter bestehenden Gebäuden nicht errichtet werden. PRB müssen viele Jahrzehnte (bzw. auf Dauer) im Boden verbleiben. Sie benötigen zwar kaum Wartung, können jedoch nur bereits in Lösung befindliche Schadstoffe aus dem Grundwasser entfernen, während die Schadstoffquelle weiterhin Schadstoffe emittiert. PRB werden daher heute als Sicherungsverfahren betrachtet.

Als alternative innovative In-Situ-Sanierungstechnologie steht seit Ende der 1990er Jahre die Injektion von nullwertigen Eisenpartikeln im Nano- und Mikrometerbereich zur Verfügung [1]. Das Fe(0)-Material kann vom Grundsatz her direkt als wässrige Suspension zur Sanierung in einen kontaminierten Aquifer injiziert werden. Zur Injektion ist lediglich ein „Brunnen“ notwendig, wodurch Baukosten drastisch reduziert und auch Einsätze unter Gebäuden und in größeren Tiefen ermöglicht werden. Weiterhin kann diese Technologie, wenn sie direkt in der Quelle angewandt wird, die Lebensdauer einer Schadstoffquelle erheblich reduzieren.

Die gegenüber granularem Eisen viel kleinere Teilchengröße (mikro/nano) verleiht dem Eisen aufgrund der deutlich größeren spezifischen Oberfläche eine hohe Reaktivität. So sollen Nano-Eisen-Partikel um den Faktor 10 bis 1.000 reaktiver sein als konventionelle Eisenpartikel. Die geringe Partikelgröße ermöglicht potentiell den Transport der Nano-Eisen-Partikel als kolloidale Partikelsuspension in den Bodenporen. Diese Möglichkeiten und die Eigenschaften der Eisen-Partikel lassen den Einsatz für eine In-Situ-Sanierung besonders geeignet erscheinen.

Nano-Eisen ist ein moderates, wirksames Reduktionsmittel, das zu Fe(II) oxidiert [2] und sowohl für organische als auch für anorganische Kontaminanten, wie beispielsweise Chrom und Arsen, geeignet ist. Das nullwertige Eisen reagiert im Grundwasser zuerst mit Sauerstoff. Sobald der vorhandene Sauerstoff aufgebraucht ist, wird Wasserstoff erzeugt. Dadurch werden anaerobe Verhältnisse geschaffen, unter denen das Nano-Eisen mit dem Schadstoff reagieren kann.

Reaktivität und Langzeitstabilität der Nano-Eisen-Partikel in porösem Medium sind maßgeblich für eine effiziente und auch

ökonomisch durchführbare In-Situ-Sanierung. Reaktivität und Langzeitstabilität sind jedoch nicht nur von den Nano-Teilchen selbst, sondern in großem Maße auch vom System Boden-Wasser-Schadstoff abhängig. Zu Fragen der Reaktivität, der Langzeitstabilität und auch zur Optimierung der Nano- bzw. Mikro-Eisenteilchen werden derzeit noch Entwicklungsarbeiten durchgeführt.

3. Thermische Verfahren in der Praxis

3.1 Die Situation

In der historischen Altstadt von Karlsruhe-Durlach befindet sich das alte Schlachthaus von Durlach, ein 1547 erbautes, historische und unter Denkmalschutz stehendes Gebäude. Die Lage ist begrenzt von der alten Stadtmauer auf der einen und einem Kinderspielplatz auf der anderen Seite. Im Erdgeschoss wurde bis 1973 eine chemische Reinigung betrieben, heute wird es gewerblich als Kunsthandlung genutzt, das Obergeschoss ist bewohnt. Unterhalb des Gebäudes befand sich das Schadenszentrum eines CKW-Schadens, der sich über die ungesättigte bis in die gesättigte Zone erstreckte und im Grundwasser zu einer mehrere hundert Meter langen Schadstofffahne führte. Die daraus resultierte Gefährdung für Mensch und Umwelt sollte durch geeignete Sanierungsmaßnahmen im Boden und Grundwasser beseitigt werden.

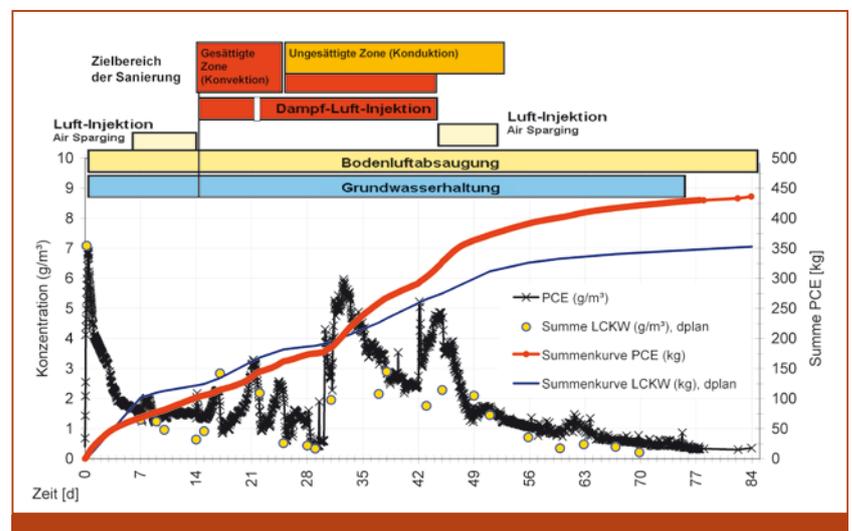
Der Standort befindet sich im Grabenbruchsystems des Oberrheingrabens, welcher mit mächtigen Lockergesteinsserien verfüllt wurde und zum Teil ergiebige Grundwasservorkommen enthält. Im Bereich der Altstadt von Durlach befinden sich grundwasserführende Quartärsedimente, darunter folgen tertiäre Mergel, welche einen Grundwasserstauer in 13 Meter Tiefe darstellen.

Der Bodenaufbau besteht aus anthropogenen Auffüllungen. Diese sind mit Kies und Sandanteilen sowie Bauschutt und einigen Abfallbestandteilen durchsetzt. Der Grundwasserspiegel liegt zwischen 3,5 und vier Metern unter dem Gelände. Die Grundwasserfließrichtung schwankt saisonal zwischen westlicher und südwestlicher Richtung. Die im Rahmen der Erkundung in Bodenproben angetroffenen hohen Konzentrationen an chlorierten

Kohlenwasserstoffen (vorwiegend PCE) aus der ungesättigten Bodenzone, dem Grundwasserwechselbereich und dem oberen Bereich des Grundwasserleiters ließen auf eine vertikale Verteilung der Schadstoffe bis zu einer Tiefe von circa sechs Metern schließen.

3.2 Ziel und Herangehensweise

Auf Veranlassung der Stadt Karlsruhe wurde auf einem Teilbereich des Standorts im Jahre 2005 eine Pilotierung mit dem thermischen In-situ-Sanierungsverfahren der Dampf-Luft-Injektion zur Entfernung der CKW-Schadensquelle durchgeführt. Ziel der Pilotierung war die Bestimmung der Dampfausbreitung in der gesättigten Bodenzone, sowie der Nachweis der Anwendbarkeit und Effizienz des thermischen In-situ-Sanierungsverfahrens am Standort. VEGAS führte die Pilotierung im Zeitraum zwischen Juli und September 2005 durch. Dem Ingenieurbüro dplan, Karlsruhe oblag die Bauleitung und die Überwachung. Der Ort der Pilotinjektion war eine circa 80 Quadratmeter große Fläche an der südwestlichen Hausecke. Das Pilotfeld wurde



Schadstofffaunastrag über die Bodenluft-Absaugung im Verlauf der Pilotierung.

über einen Dampf-Luft-Injektionsbrunnen, zwei Kombibrunnen zur Förderung von Grundwasser und Bodenluft, sowie einen Bodenluftbrunnen erschlossen. Die Überwachung der Dampf-, bzw. Wärmeausbreitung im Untergrund erfolgte mittels circa 120 Temperaturfühlern. Die Sanierungsanlage zur Erzeugung der injizierten Dampf-Luft-Mischung, der Behandlung und Reinigung der extrahierten, heißen Bodenluft und des entnommenen

Grundwassers war in zwei schallgedämmten Anlagencontainern installiert. Die Pilotanlage erlaubte eine Online-Überwachung aller kritischen Anlagenparameter. Die Reichweiten der Messungen erlangten einen Radius bis zu drei Metern und wurden in einem Zeitraum von vier Wochen durchgeführt. Der Schadstoffaustrag von annähernd 450 Kilogramm PCE bestätigte die Effizienz der Dampf-Luft-Injektion am Pilotstandort [5].

Basierend auf der erfolgreichen Pilotsanierung wurde für die Gesamtsanierung des Geländes ein Konzept erstellt. Dabei sollten die Installationen zum großen Teil über Schrägbohrungen unter das Gebäude geführt werden [6]. Insgesamt wurden elf Extraktionsbrunnen sowie ein Horizontalbrunnen unter dem Gebäude geplant. Das Gebäude sollte während der Sanierung ohne Einschränkung genutzt werden, was besondere Anforderungen an Lärm- und Emissionsschutz stellte.

Mit der anlagentechnischen Ausführung der Sanierung wurde eine Sanierungsfirma beauftragt, die wissenschaftliche Begleitung,

das sanierungsbegleitende Temperatur- und Schadstoffmonitoring und die Anlagesteuerung oblag VEGAS. Die verantwortliche Sanierungsbegleitung erfolgte durch ein Ingenieurbüro. Ziel der thermischen In-situ-Sanierung war die Erwärmung des Untergrunds in einer

Tiefe von circa fünf bis sechs Metern auf Temperaturen bis über 92 °C und die möglichst vollständige Entfernung der Schadstoffe.

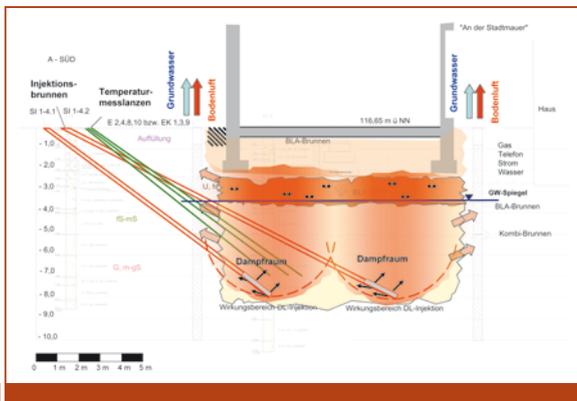
Die Sanierung startete Ende April 2010 mit der Bodenluftabsaugung, der Grundwasserhaltung und der Injektion von Luft in den Grundwasserleiter (Air-Sparging). Mitte Mai 2010 begann die thermische Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone. Die thermische Erschließung des Grundwassers, des Grundwasserschwankungsbereichs und der ungesättigten Zone verlief entsprechend den Pilotarbeiten aus dem Jahr 2005. Die Dampfreaktionen konnten mit dem Erreichen der geforderten Sanierungsziele bereits Ende November 2010 abgeschlossen werden [7, 9].

3.3 Umweltbetrachtungen und abschließende Bewertung

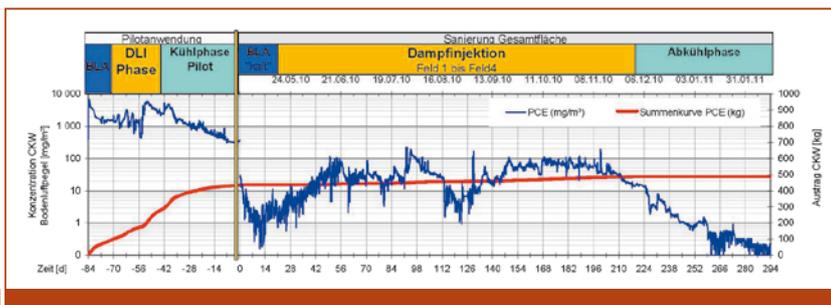
Für thermische Verfahren ist der spezifische Energiebedarf bezogen auf das behandelte Bodenvolumen verfahrenstypisch besonders relevant; die Schadstoffmasse ist dagegen von sekundärer Bedeutung. Der spezifische Energiebedarf lag hier bei rund 470 Kilowattstunden pro Kubikmeter Boden (Summe thermische und elektrische Energie).

Ein Maß für den Umwelteinfluss ist der Energieverbrauch bzw. die spezifische CO₂-Emission. Die spezifische CO₂-Emission ergibt sich aus dem Verbrauch von insgesamt 780 Megawattstunden an thermischer Energie (226,2 t CO₂) und 153 Megawattstunden (91,8 t CO₂) an elektrischer Energie. Der CO₂-Gesamtausstoß der thermischen Sanierung erreicht damit statistisch den jährlichen CO₂-pro-Kopfausstoß von 42 Bürgern (Deutschland, Statistisches Bundesamt, 12/2010, 7,5 Tonnen pro Einwohner).

Die Anwendung innovativer Verfahren gelingt nur mit einem hohen Maß an Einsatzbereitschaft aller Beteiligten. Die im Rahmen der Pilotierung durch VEGAS nachgewiesene Eignung des thermischen In-situ-Sanierungsverfahrens unter den schwierigen baulichen Randbedingungen (Schadstoff unter bewohntem Gebäude, Altstadtlage, enge Wohnbebauung, Denkmalschutz) sowie die damit möglichen zeitlichen und finanziellen Vorteile waren für die Stadt Karlsruhe als Grundstückseigentümerin die Voraussetzung für den Einsatz des thermischen In-situ-Sanierungsverfahrens DLI. Eine Nachkontrolle im Grundwasser zuletzt im Herbst 2011 bestätigte die Nachhaltigkeit der Sanierung.



Installationen unter dem Gebäude durch Schrägbohrungen und einen Horizontalbrunnen zur Boden-Luft-Absaugung.



CKW-Austrag über die Bodenluftabsaugung während der thermischen Standortsanierung.

4. Fazit und Ausblick

Der oben beschriebenen erfolgreichen Sanierung gingen mehrere Jahre intensiver Forschung und mehrere Pilotanwendungen voraus. Bereits im Jahr 1998 wurde in Plauen die ungesättigte Zone unter einer ehemaligen Benzol-Verladestation erfolgreich gereinigt. Einsätze unter einer Sondermülldeponie (Mühlacker, 1998–2000), einem metallverarbeitenden Betrieb (Albstatt, 2004), einer chemischen Reinigung (Durlach, 2005), einer Verladestation (Zeitze, 2008) und einer ehemaligen Verbrennungsanlage (Biswurm, 2011) folgten. An diesen Pilotstandorten wurde die Einsatzfähigkeit der Technologie unter verschiedensten Standortbedingungen (gesättigter/ ungesättigter/geklüfteter Untergrund) sowie für verschiedenste Schadstoffe nachgewiesen. Trotz dieser Erfolgsbilanz ist die letztendliche Implementierung bei der Industrie recht schwierig. Dies liegt vor allem am „third user principle“: jeder möchte der dritte Anwender sein: Der erste Anwender muss die technische Machbarkeit nachweisen, der zweite den ökonomischen Nachweis erbringen. Der dritte Anwender hat den vollen Nutzen. Mit den genannten Pilotanwendungen und dem Feldfall in Durlach wurden die ersten beiden Anwendungen erfolgreich abgeschlossen. Entsprechend groß ist derzeit die Nachfrage von Sanierungsfirmen nach thermisch unterstützten Sanierungstechnologien.

Auch weiterhin sind die Forscher an der Universität Stuttgart auf der Suche nach neuen Pilotstandorten und vor allem Partnern bei Behörden und Industrie, mit denen auch für die anderen Technologien der fachliche und ökonomische Nachweis erbracht werden kann. Parallel dazu werden vermehrt Kombinationen der verschiedenen Technologien betrachtet.

Ein relativ neuer Aspekt ist die Untersuchung der Nutzbarmachung anderer Umwelteinflüsse. So führt zum Beispiel die vermehrte Nutzung der Geothermie zu teilweise erheblichen Erhöhungen der Grundwassertemperatur. Die gezielte Nutzung dieser Temperaturerhöhung könnte vielleicht nicht nur eine ökologische, sondern auch eine ökonomische Grundwassersanierungstechnologie mit sich bringen.

• Jürgen Braun
Hans-Peter Koschitzky
Oliver Trötschler

DIE AUTOREN

JÜRGEN BRAUN, PHD

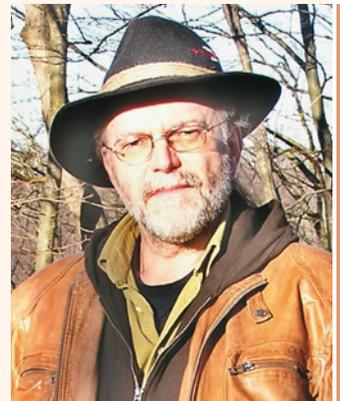
ist seit 1985 wissenschaftlicher Leiter der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS). Er studierte an der FHT Stuttgart Bauingenieurwesen. Nach Tätigkeiten als Bauleiter ging er im Rahmen eines Fulbright-Stipendiums an die Colorado State University. Dort erhielt er 1991 den Master of Science und promovierte 1995 über viskositätskontrollierte Aquifersanierung. Derzeitige Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von Grundwassersanierungstechnologien, vorbeugender Grundwasserschutz und Geothermie.



DR.-ING.

HANS-PETER KOSCHITZKY

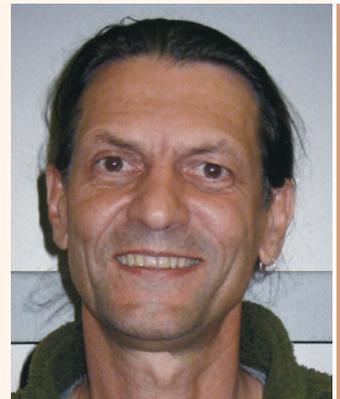
promovierte nach dem Bauingenieurstudium an der Universität Stuttgart und Bearbeitung zahlreicher wasserbaulicher Modellversuche 1987 am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (IWS). Seit 1989 ist er auf dem Gebiet der Grundwasser- und Altlastensanierung tätig, hat VEGAS mit konzipiert und gebaut, ist seit 1993 Technischer Leiter von VEGAS und Projektleiter mehrerer Projekte mit Schwerpunkt innovative In-situ-Sanierungsverfahren und Grundwasserschutz. Seit 2002 ist er zusätzlich Geschäftsführer des IWS. Er ist in zahlreichen nationalen und internationalen Gremien (ITVA, af-BW, NICOLE, ÖVA) tätig.



DIPL.-ING. (FH)

OLIVER TRÖTSCHLER

studierte nach mehrjähriger Tätigkeit als Landwirt an der FH Offenburg Verfahrens- und Umwelttechnik. Seit 1995 ist er als Betriebsingenieur in VEGAS tätig. Seit 2003 beschäftigt er sich mit der Entwicklung und Anwendung von In-situ-Sanierungsverfahren, dabei schwerpunktmäßig mit thermischen Verfahren und deren Einsatz im Rahmen von Pilotanwendungen.



Kontakt

Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung – IWS
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)
Pfaffenwaldring 61
D-70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-64717
Fax 0711/685-67020
E-Mail: Imke.Kaminski@iws.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.iws.uni-stuttgart.de/>

5. Literatur

- **1** Zhang W. (2003): *Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview*. J. Nanopart. Res. 5: 323–332.
- **2** Mueller N. C., Braun J., Bruns J., Cernik M., Rissing P., Rickerby D. and Nowack B. (2011): *Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe*. Environmental Science and Pollution Research.
- **3** Trötschler O., Haslwimmer T., Koschitzky H.-P., Ochs S. (2006): *Pilotversuch Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone als Grundlage zur Auslegung der thermischen In-situ-Sanierung des CKW-Schadensfalls ehemalige chemische Reinigung Roth in Karlsruhe Durlach, (Obj. Nr. 00465) – Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2006/4 (VEG 19)*, Stuttgart: Institut für Wasserbau.
- **4** Trötschler O., Koschitzky H.-P., Ochs S., Denzel S., Stöckl K. (2006): *Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal, VEGAS-Statuskolloquium 2006, pp. 60–70*, Eds. Braun, Koschitzky, Stuhmann, Mitteilungen Heft 150, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2006, ISBN 3-933761-53-0.
- **5** Ochs, S.O. (2006): *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, Mitteilungen Heft 159, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-63-8.
- **6** Koschitzky, H.-P., Trötschler, O. (2008): *Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung*, Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, 55. Aktualisierung, 3. Aufl., Mai 2008, Franzius, Altenbockum, Gerhold (Hrsg.), C. F. Müller Verlagsgesellschaft, München, 5716, pp. 1–47, Grundwerk ISBN 978-3-8114-9700-9.
- **7** Trötschler O., Koschitzky H.-P. (2011): *Thermische In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion des CKW-Schadensfalls ehemalige chemische Reinigung Roth in Karlsruhe Durlach – Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2011/08 (VEG 47)*, Stuttgart: Institut für Wasserbau.
- **8** ITVA-Arbeitshilfe H1–13 (2010): *„Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“*. Erarbeitet vom Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“. Herausgeber: Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin, Juni 2010.
- **9** ÖVA-Sanierungsreport SR001 (2011): *CKW-Boden- und Grundwassersanierung unter einem historischen, bewohnten Gebäude mittels Dampf-Luft-Injektion ins Grundwasser, Oktober 2011*. Österreichischer Verein für Altlastenmanagement, Wien.
- **10** Hiester, Uwe (2009): *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen*. Promotionschrift, Institut für Wasserbau, Eigenverlag (Publ.), Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau, 9.2009 (178) Universität Stuttgart, ISBN: 978-3-933761-82-8.
- **11** RUBIN Handbuch (2006): *Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten, BMBF-Vorhaben-Nummer 0271241*. Universität Lüneburg, Fakultät III (Umwelt und Technik), Campus Suderburg (Hrsg.), Lüneburg. <http://www.rubin-on-line.de>.
- **12** European Environment Agency (2007): *Progress in management of contaminated sites (CSI 015) – Assessment published on line August 2007*.
- **13** UBA 2011: http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/altlast/web1/deutsch/1_3.htm.