

# Grundwasserabstromerkundung

## Immissionspumpversuche verbessern Quantifizierung und Beurteilung einer Grundwassergefährdung

*Hans-Peter Koschitzky, Erwin Stefan Hiesl, Uwe Hekel, Peter Rothschink, Thomas Ptak*

**Die fundierte Beurteilung einer Grundwassergefährdung im Abstrom eines Schadensherdes ist eine der zentralen Aufgaben im Rahmen der Altlastenbearbeitung. Oft erfolgt dies indirekt über die Bestimmung von Schadstoffgehalten aus Bodenproben im Schadensherd oder direkt über Grundwasseranalysen. Beide Methoden können jedoch Unsicherheiten aufweisen.**

**Autoren:** Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, Vegas, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart; Dipl.-Geol. Erwin Stefan Hiesl, Deutsche Bahn AG, DB Immobilien - Sanierungsmanagement, Karlsruhe; Dr. Uwe Hekel, HPC AG, Rottenburg am Neckar; Dipl.-Geol. Peter Rothschink, Klinger und Partner, Ingenieurbüro für Bauwesen und Umweltechnik GmbH, Stuttgart; Prof. Dr.-Ing. Thomas Ptak, Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum, Göttingen

Gründe für Unsicherheiten bei der Anwendung der beiden Methoden sind die Heterogenität des Untergrunds und die unbekannte Schadstoffverteilung im Schadensherd, einhergehend mit Fragen der Repräsentativität der Boden- oder Grundwasserproben. Außerdem besteht das Problem aus den Feststoffgehalten stoffspezifisch und zuverlässig mögliche Sickerwasser- oder Grundwasserkonzentrationen umzurechnen bzw. Eluatkonzentrationen mit den Boden- und Grundwasserkonzentrationen zu korrelieren. Boden- oder Grundwasserproben stellen Punktinformationen dar, die als repräsentative Werte, d. h. als ermittelten Schadstoffkonzentrationen, auf ein größeres Volumen mithilfe plausibler Annahmen „übertragen“ (regionalisiert) werden müssen, um daraus eine Gesamtbelastung im Abstrom und somit eine eventuelle Gefährdung an einem Standort abzuleiten.

Im Gegensatz dazu ermöglicht das Verfahren des Immissionspumpversuches (IPV) zur Grundwasserabstromerkundung eine räumlich integrierende Bestimmung des Schadstoffmassenflusses im Abstrom eines vorhandenen oder potenziellen Schadensherdes. Mit diesem Verfahren wird unter Verwendung von Schadstoff-Konzentrationsganglinien aus Pumpversuchen eine bessere Qualifizierung und Quantifizierung einer Grundwassergefährdung ermöglicht.

Die Grundidee zu dem integralen Erkundungsverfahren fand sich in Baden-Württemberg bereits 1993 im Frachtkonzept in

den Hinweisen zur Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen, wurde konsequent entwickelt und im Leitfaden zur Untersuchungsstrategie Grundwasser der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW, 2008) konkretisiert. Dabei wurde ähnlich wie in der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (Bundesregierung, 1999) der Gedanke des Massenflusses an Kontrollebenen als zusätzliches Kriterium neben der reinen Konzentrationsbetrachtung eingeführt.

Immissionspumpversuche stellen somit eine wichtige Erkundungsmethode als Baustein flächenintegraler Konzepte dar, auf dessen Basis anhand analytischer und numerischer Auswertemethoden zeitlich und räumlich integrierend Konzentrationsverteilungen und Schadstofffrachten ermittelt werden können.

Der Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden im Altlastenforum Baden-Württemberg hat in einem Statusbericht (af, Heft 16, Ptak, Teutsch et al, 2013) den Kenntnis- und Entwicklungsstand der Grundwasserabstromerkundung mithilfe von Immissionspumpversuchen zusammengefasst und den Stand der Technik, die Planung, Implementierung und Anwendungsstrategien dargestellt. Anhand ausgeführter Beispiele aus der Altlastensanierungspraxis werden die Möglichkeiten aufgezeigt.



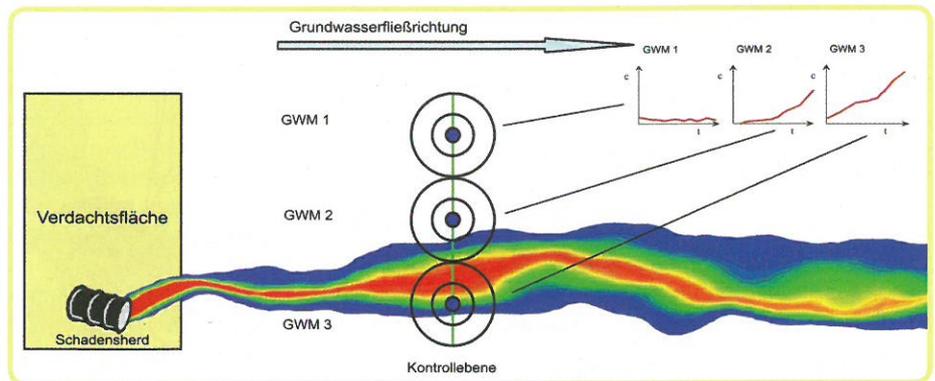
## Verfahrensbeschreibung

Das Grundkonzept des Immissionspumpversuchs basiert darauf, dass räumlich integral der gesamte Schadstoffabstrom einer Verdachtsfläche durch geeignete Pumpmaßnahmen erfasst und über die Inversion von gemessenen Konzentrationsganglinien mögliche räumliche Schadstoffkonzentrationsverteilungen, die mittlere Konzentration und die integrale Schadstofffracht bestimmt werden. Durch eine geeignete Anordnung von IPV-Brünnen entstehen im Aquifer sogenannte Kontrollebenen. Dabei handelt es sich um imaginäre Ebenen innerhalb des Aquifers, im Idealfall senkrecht zur Grundwasserfließrichtung angeordnet.

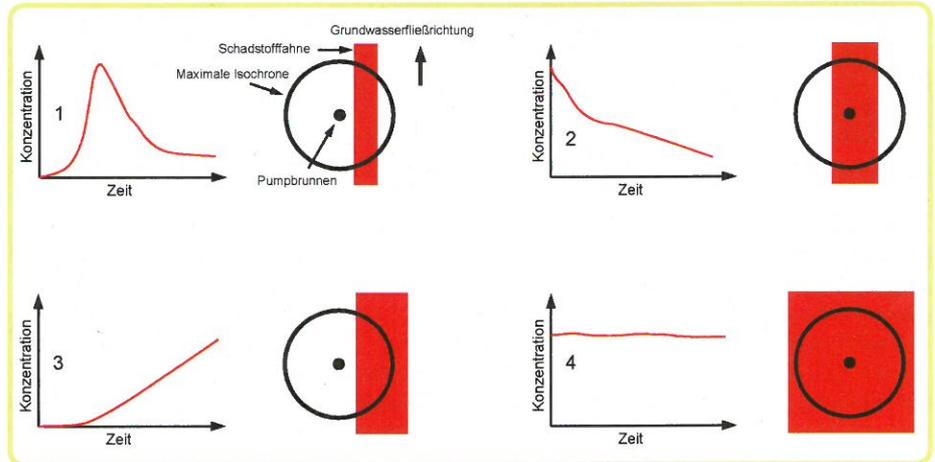
Die Position der IPV-Brünnen, die Pumpzeiten und die Pumpraten werden so gewählt, dass die Schadstofffahne im Idealfall auf Höhe der Kontrollebene vollständig erfasst wird. Die Anzahl der dafür erforderlichen Pumpbrünnen hängt im Wesentlichen von der Breite der zu untersuchenden Kontrollebene und von der erreichbaren Entnahmebreite der Brünnen ab.

Während der Pumpversuche werden zu definierten Zeitpunkten Grundwasserproben entnommen und auf die relevanten Schadstoffe (oder andere Inhaltsstoffe) untersucht. Für jeden Stoff wird eine Konzentrationsganglinie über die Pumpversuchsdauer ermittelt. Das Prinzip der Immissionsmessung beruht auf der Überlegung, dass die während eines Pumpversuchs als Funktion der Zeit gemessene Schadstofffracht von der zeitabhängigen räumlichen Entwicklung des Entnahmebereichs des Pumpbrunnens und der räumlichen Verteilung der Schadstoffmasse im Grundwasserleiter bestimmt wird. In Bild 1 ist das Prinzip der instationären Immissionsmessung dargestellt.

Durch die Entnahme und Untersuchung von Grundwasserproben während des Pumpversuchs erhält man Informationen über die Grundwasserbeschaffenheit innerhalb der zu den jeweiligen Probenahmezeitpunkten erfassten Entnahmebereiche. Im obigen Beispiel liegt der Entnahmebereich von GWM 1 während der gesamten Pumpversuchsdauer außerhalb der Schadstofffahne. Erhöhte Schadstoffkonzentrationen sind deshalb in keiner Probe feststellbar. In GWM 2 wird die Schadstofffahne erst nach einiger Zeit erreicht.



**01** Prinzip der instationären Immissionsmessung (nach Teutsch et al., 2000)



**02** Charakteristische Konzentrationsganglinientypen und zugehörige Schadstofffahnengeometrie (nach Holder und Teutsch, 1999)

Die zu Pumpversuchsbeginn entnommenen Grundwasserproben sind deshalb unbelastet bzw. nur gering belastet. Mit zunehmender Versuchsdauer steigen die Konzentrationen an, da zunehmend belastetes Grundwasser aus dem Fahnenbereich gefördert wird. Da aber gleichzeitig weiterhin auch unbelastetes Grundwasser außerhalb der Fahne erfasst wird, sind die gemessenen Schadstoffkonzentrationen geringer als die tatsächlichen innerhalb des erfassten Fahnenabschnitts. In GWM 3 wird schließlich schon zu Beginn des Pumpversuchs belastetes Wasser gefördert, da der Brunnen innerhalb der Fahne liegt.

Mithilfe von verschiedenen Auswerteverfahren kann aus den Konzentrationsganglinien die mögliche Schadstoffkonzentrationsverteilung im Einzugsgebiet des IPV-Brunnens rückgerechnet werden. Bild 2 zeigt vier charakteristische Konzentrationsganglinientypen und die dazugehörigen möglichen Fahnengeometrien.

Aus der errechneten mittleren Schadstoffkonzentration im Kontrollquerschnitt und der natürlichen Grundwasserströmung resultiert dann die Schadstofffracht über den Kontrollquerschnitt.

Sofern sich die Entnahmebereiche mehrerer Pumpbrünnen überlagern, enthalten die Konzentrationsganglinien Mehrfachinformationen, die - unter günstigen Voraus-

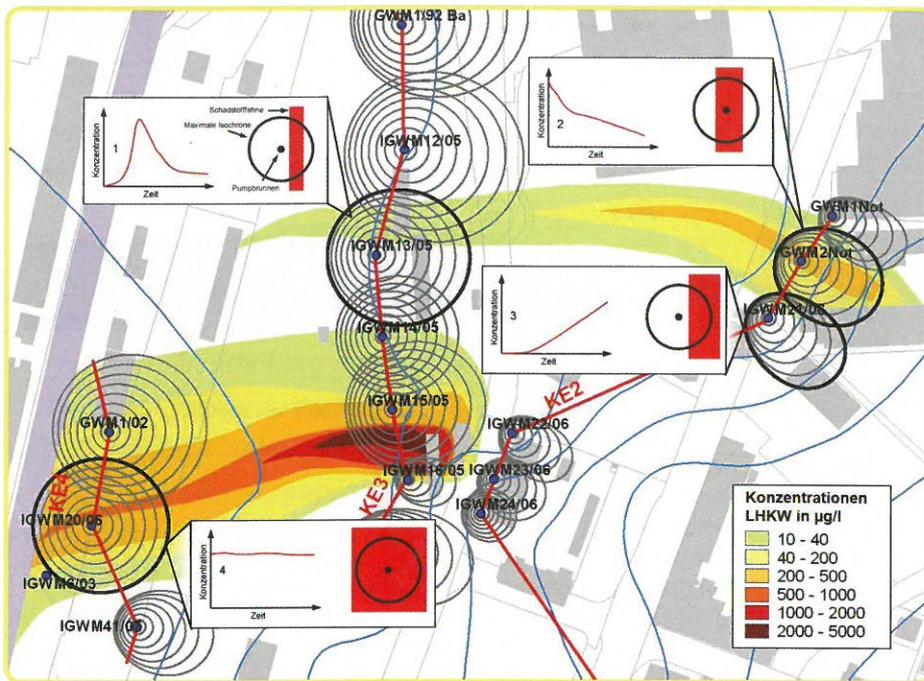
setzungen - die räumliche Zuordnung verschiedener Einzelfahnen ermöglichen. Falls mehrere hintereinander liegende Kontrollebenen untersucht werden, können durch eine hinreichend genaue Bilanzierung der Frachten prinzipiell auch Rückhalte- und Abbauprozesse quantifiziert werden.

Die Immissionspumpversuche werden in der Regel in möglichst vollkommenen Messstellen tiefenintegrierend ausgeführt. Tiefenorientierte Untersuchungen sind jedoch auch möglich.

## Auswerteverfahren

Inzwischen steht eine Reihe von computer-gestützten Auswertewerkzeugen zur Verfügung, mit deren Hilfe aus den Aquifer- und Versuchsdaten die räumliche Schadstoffverteilung und Fracht ermittelt werden können. Neben einfacheren Werkzeugen, die die Grundwasserströmung über die Aquiferparameter und die Pumprate analytisch quantifizieren, gibt es modellgestützte Auswerteverfahren, die auf einer numerischen Simulation der Grundwasserströmung und des Stofftransports basieren.

Die Versuchsbedingungen und Voraussetzungen des Auswerteverfahrens müssen aufeinander abgestimmt sein. Planung und Auswertung von Immissionspumpversuchen sind nur dann fachlich richtig, wenn



**03** Fallbeispiel Integrale Altlastensanierung Ravensburg mit charakteristischen Konzentrationsganglinientypen in Abhängigkeit von der Lage des IPV zur Schadstofffahne und der Fahnengeometrie (nach Hekel et al., 2014)

die Versuchsbedingungen mit den Annahmen des Auswerteverfahrens übereinstimmen. Auf die verschiedenen Auswerteverfahren, ihre Einsatzbereiche und -grenzen wird im oben genannten Statusbericht (af, Heft 16, Ptak, Teutsch et al, 2013) detailliert eingegangen und die Möglichkeiten anhand von Fallbeispielen aus der Altlastenpraxis aufgezeigt. Folgende Auswertewerkzeuge stehen zur Verfügung:

Das MS-Excel basierte IPV-Tool ist eine einfache analytische Planungs- und Auswertungshilfe für die Durchführung von Immissionspumpversuchen. Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Entnahmebreite auf Höhe des Pumpbrunnens erfolgt unter Berücksichtigung der natürlichen Grundwasserströmung. Es wird vorausgesetzt, dass zu den Entnahmezeitpunkten die zugehörigen Isochronen noch (nahezu) kreisförmig sind. Für die Auswertung eines Immissionspumpversuches werden die Aquifer- und Versuchsparameter sowie die Analysenergebnisse der untersuchten Schadstoffe in Tabellen eingegeben. Das Tool berechnet die mittlere Konzentration und den Grundwasservolumenstrom sowie die Schadstofffracht über die Entnahmebreite. In Diagrammform werden mögliche Stoffkonzentrationsverteilungen entlang der Kontrollebene ausgegeben. Das Tool steht kostenlos als Download zur Verfügung ([www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/47957](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/47957)).

Das Magic-Software-Tool wurde im Rahmen des Projekts Magic vom zentralen Bergbauinstitut in Kattowitz (Polen) zur Planung und Auswertung von Immissionspumpversuchen entwickelt. Es berechnet

die Schadstofffracht und die mittlere Schadstoffkonzentration im Entnahmebereich eines IPV. Darüber hinaus werden die möglichen ein- und beidseitigen Lösungen für die Konzentrationsverteilung entlang der Kontrollebene berechnet und grafisch dargestellt.

Das C-SET-Tool (Concentration-Superposition-Evaluation-Tool) ist ein Windows-Programm zur Auswertung von Immissionspumpversuchen, mit dem neben dem Einfluss der Grundströmung auch in der Praxis häufig auftretende hydraulische Beeinflussungen (zeitgleich betriebene Brunnen, Vorversuche in Nachbarbrunnen und daraus resultierende Fahnenverschleppungen, nicht konstante Pumpraten und Pumpausfallzeiten) berücksichtigt werden können. In C-SET wird die zeitliche Konzentrationsentwicklung im Entnahmebrunnen mithilfe eines Particle-Tracking-Verfahrens ermittelt. Die Ausgabe von Isochronen und Stromstreifenkonzentrationsverteilungen ist in Form von ESRI-shp-Dateien möglich, die mithilfe von GIS raumbezogen dargestellt werden können. Das Tool steht ebenfalls kostenlos als Download zur Verfügung ([www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229895](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229895)).

„CStream analytisch“ beinhaltet eine analytische Inversionslösung zur Interpretation von Konzentrationsganglinien aus Immissionspumpversuchen. Sie berücksichtigt die natürliche Grundwasserströmung sowie einen Retardationsfaktor, ohne dass ein numerisches Standortmodell benötigt wird.

„CStream numerisch“ ist die neueste Version des numerischen Inversionsalgorithmus

zur Interpretation von Konzentrationsganglinien aus Immissionspumpversuchen. CStream benötigt ein instationäres Strömungs- und advektives, nicht-reaktives Transportmodell des Untersuchungsgebietes auf der Basis von Modflow96/Modpath3.0 (Prinzipmodell). Diese numerische Inversionslösung ermöglicht, im Gegensatz zur analytischen Lösung, die Einzugsbereiche der IPV unter Berücksichtigung der Heterogenität des Untergrunds (räumliche Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit, der Porosität und der Mächtigkeit) und hydraulischer Einflüsse abzubilden und dabei auch den Einfluss vorangegangener bzw. zeitgleich durchgeführter Immissionspumpversuche (Verschiebung der Schadstofffahne, Verlagerung und Verzerrung der Einzugsbereiche der IPV-Brunnen) zu berücksichtigen. Des Weiteren können stoffspezifische Retardationsfaktoren vorgegeben werden, mit denen Retardation infolge sofortiger linearer Sorption bei der Inversion berücksichtigt werden kann, und damit das im Vergleich zum nicht-retardierten Fall verringerte untersuchte Aquifervolumen.

Allgemein können auch numerische Grundwasserströmungs- und Transportmodelle dazu verwendet werden, IPV nachzurechnen und dabei die Schadstoffverteilung im Untergrund invers zu bestimmen.

## Anwendungen und Erfahrungen

Die Anwendung von Immissionspumpversuchen erfolgt in der Regel im Rahmen einer technischen Untersuchung von Altlasten oder aktiven Standorten, von denen eine Gefahr für das Grundwasser ausgehen kann oder ausgeht. IPV können sowohl zur Untersuchung einzelner Standorte wie auch zur Untersuchung von Gebieten oder von Flächen eingesetzt werden, auf denen mehrere Schadensherde vermutet werden oder bekannt sind.

Dem Prinzip des IPV folgend lassen sich für den Einsatz des Immissionspumpversuches als Untersuchungsmethode drei wesentliche Fallgruppen (A bis C) von Ziel- bzw. Fragestellungen abgrenzen, wobei die Komplexität und die Aussagemöglichkeiten jeweils zunehmen:

(A) quantitative räumliche Erfassung des Abstroms eines Verdachtsbereiches bzw. eines Schadensherdes mithilfe einer Grundwassermessstelle, Konzentrationen und Frachten über einen definierten Betrachtungsraum

(B) Kartierung von Schadstofffahnen anhand mehrerer Grundwassermessstellen entlang einer Kontrollebene, Konzentrationen, Frachten und Fahnengeometrie: Beschreibung von Fahne-Herd-Beziehungen, Eingrenzung möglicher Schadensherde durch Kombination von Untersuchungen an mindestens einer Kontrollebene mit Fahnenlängenstatistik oder mit inverser

Stofftransportmodellierung unterschiedlicher Komplexität

(C) Identifizierung von Rückhalte- und Abbauprozessen, großräumige Modellierung von Grundwasserqualität und Schadstofftransport über mehrere hintereinander liegende Kontrollebenen in Kombination mit adäquaten Modellierungswerkzeugen zur Simulation von Strömungs- und reaktiven Stofftransportprozessen

Ergänzend zu dem Vorteil des integralen Ansatzes können Immissionspumpversuche besonders auch dann zum Einsatz kommen, wenn durch die Komplexität der früheren Nutzung und / oder der hydrogeologischen Verhältnisse eine Untersuchung und Lokalisierung von Schadensherden und Abstromfahnen durch andere Methoden erschwert wird. IPV ermöglichen auch die Erkundung in sonst schwer zugänglichen bebauten Bereichen durch entsprechende Planungen der zu erzielenden Entnahmereichweiten im Grundwasser.

Im Rahmen der Erstellung des oben genannten Statusberichtes (af, Heft 16, Ptak, T. et al, 2013) wurden Informationen zu erfolgreich durchgeführten Immissionspumpversuchen aus verschiedenen Bereichen (Behörde, Kommune, Ingenieurbüro, Handlungsstörer) gesammelt. Insgesamt über 50 abgeschlossene Projekte wurden kategorisiert, um eine sinnvolle Systematik ermitteln zu können. Anhand der wichtigsten Kenndaten konnte so eine nachvollziehbare Einteilung (über die Anzahl der

IPV und der Kontrollebenen) in die bereits genannten Fallgruppen (A bis C) vorgenommen werden. Je Fallgruppe wurden zwei Beispiele ausführlich beschrieben.

Im einfachsten Fall kann eine Untersuchung mit einem einzelnen IPV implementiert werden, um beispielsweise zu prüfen, ob Schadstoffe grundsätzlich abströmen. Je nach hydrogeologischer Situation und räumlicher Ausdehnung der Schadstoffbelastung können aber auch mehrere Kontrollebenen mit parallel oder zeitlich hintereinander ausgeführten IPV erforderlich werden. Bild 3 zeigt am Beispiel der integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg aus der Fallgruppe C die Untersuchung von zwei LHKW-Fahnen mit Immissionspumpversuchen auf mehreren Kontrollebenen. Dargestellt sind auch Beispiele für die in Bild 2 beschriebenen vier charakteristischen Konzentrationsganglinientypen, die in Abhängigkeit von der Lage des IPV zur Schadstofffahne und der jeweiligen Schadstoffahnengeometrie auftreten.

## Zusammenfassung

Das Immissionspumpversuchsverfahren befindet sich inzwischen auf einem hohen Entwicklungsstand und ist in der Praxis als Werkzeug der räumlichen integralen Altlasten- und Grundwasseruntersuchung anerkannt. Es wird daher zunehmend eingesetzt. Mit dem IPV-Verfahren kann im einfachsten Fall schnell und zuverlässig die

Gesamt-Schadstofffracht und die mittlere Schadstoffkonzentration sowie auch eine mögliche Konzentrationsverteilung über einen definierten Kontrollquerschnitt ermittelt werden. Für einfache Randbedingungen und homogene Aquiferverhältnisse existieren analytische Lösungen des Inversionsproblems, die eine schnelle Auswertung ermöglichen. Für komplexere Bedingungen stehen numerisch basierte Auswertverfahren zur Verfügung.

Der Einsatz von IPV gewährleistet häufig eine höhere Erkundungsqualität und somit eine zuverlässigere Gefährdungsabschätzung und mehr Planungssicherheit für weitere Maßnahmen (wie z.B. Sanierung, Rückbau oder Neubebauung) an kontaminierten Standorten.

Im Statusbericht (af Heft 16, Ptak, et al, 2013) wird der aktuelle Stand bezüglich Theorie und Praxis der Untersuchung von Untergrundverunreinigungen mittels Immissionspumpversuchen dokumentiert. Ein ausführliches Literaturverzeichnis und eine Zusammenstellung von Internet-Links ermöglichen darüber hinaus dem interessierten Leser eine tiefergehende Einarbeitung in die Theorie und Praxis der IPV-Anwendung.

Fotos: HPC AG, Rottenburg

[www.vegas.uni-stuttgart.de](http://www.vegas.uni-stuttgart.de)

## Literatur:

Bundesregierung (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999, BGBl. I S. 1554.

Hekel, U., Eichelmann, C., Sonntag, P. (2014): Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg - Strategie und Methoden einer integralen Untersuchung flacher Porengrundwasserleiter im urbanen Raum. Stadt Ravensburg, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/110846>

Holder, T., Teutsch, G. (1999): Prinzip des neuen Immissionsmessverfahrens, Anwendung der Immissionsmessung im Neckartal; in: Integrale Altlastenerkundung im Stuttgarter Neckartal, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, 4/1999, Stuttgart.

LUBW (2008): Leitfaden Untersuchungsstrategie Grundwasser. Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 42, 2008.

Ptak, T., Kircholtes, H., Hiesl, E., Holder, T., Rothschink, P., Hekel, U., Beer, H.-P., Ertel, T., Herold, M., Koschitzky, H.-P. (2013): Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen, Aktualisierung Stand der Technik, Planung, Implementierung, Anwendungsstrategien. Schriftenreihe des Altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Stuttgart, Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungs-methoden, Heft 16, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, ISBN 978-3-510-39016-8.

Teutsch, G., Ptak, T., Schwarz, R., Holder, T. (2000): Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission: I. Beschreibung der Grundlagen. Grundwasser 4(5), 170-175.



**04** Im einfachsten Fall kann eine Untersuchung mit einem einzelnen IPV implementiert werden, um beispielsweise zu prüfen, ob Schadstoffe grundsätzlich abströmen