

Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen – Übersicht und Anwendungsbeispiele

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Tel.: +49 (711) 685 64716,

E-Mail: koschitzky@iws.uni-stuttgart.de

Dipl.-Geol. Erwin Stefan Hiesl

DB Immobilien Region Süd-West, Sanierungsmanagement FRI-SW-S(B), Boden- und
Grundwassersanierung, Lammstraße 19, 76133 Karlsruhe, Tel. 0721 938-4438,

E-Mail: erwin.hiesl@deutschebahn.com

Mitautoren:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ptak, Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum

Dipl.-Ing. Hermann Josef Kirchholtes, Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz

Dipl.-Geol. Thomas Holder, Büro für Hydrogeologie und Umwelt, Pliezhausen

Dipl.-Geol. Peter Rothschink, Klinger und Partner, Ingenieurbüro für Bauwesen und Umwelttechnik
GmbH, Stuttgart

Dr. Uwe Hekel, HPC AG, Rottenburg am Neckar

Dipl.-Geol. Hans-Peter Beer, Institut für Umwelt- und Hydrogeologie, Gerlingen

Dr. Thomas Ertel, et environment and technology, Esslingen a. N.

Inhalt

1. Einführung.....	2
2. Verfahrensbeschreibung Immissionspumpversuche	3
3. Auswerteverfahren	5
3.1 IPV-Tool.....	8
3.2 MAGIC Software Tool.....	8
3.3 C-SET.....	8
3.4 CSTREAM analytisch	8
3.5 CSTREAM numerisch.....	8
3.6 Alternative numerische Auswerteansätze.....	9
4. Anwendungen und Erfahrungen.....	9
4.1 Erfassung des Abstroms mittels einer Grundwassermessstelle (Fallgruppe A)	10
4.2 Erfassung des Abstroms mittels mehrerer Grundwassermessstellen entlang mindestens einer Kontrollebene (Fallgruppe B)	11
4.3 Erfassung des Abstroms mittels mehrerer hintereinander liegenden Kontrollebenen, Instationarität (Fallgruppe C).....	11
5. Anwendungsbeispiele	12
5.1 Fallgruppe A: Ehemalige Metallwarenfabrik, Landkreis Calw.....	12
5.2 Fallgruppe B: Ehemalige Richthalle eines Bahn-Ausbesserungswerks	13
5.3 Fallgruppe C: Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg	14
6. Kosten	15
7. Zusammenfassung.....	16
8. Literaturhinweise, Auszug aus Statusbericht (af Heft 16)	16

1. Einführung

Der Arbeitskreis *Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden* im Altlastenforum Baden-Württemberg hat in einem Statusbericht (af Heft 16, Ptak, T. et al, 2013) den derzeitigen Kenntnis- und Entwicklungsstand der Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen zusammengefasst und den Stand der Technik, die Planung, Implementierung und Anwendungsstrategien dargestellt. Anhand ausgeführter Beispiele aus der Altlastensanierungspraxis werden die Möglichkeiten aufgezeigt. Der Vortrag gibt, basierend auf dem Statusbericht einen zusammenfassenden Überblick über das Verfahren und dessen Einsatzmöglichkeiten anhand einiger Fallbeispiele.

Die dem Vortrag zugrunde liegende Veröffentlichung des af enthält weitere wesentliche Inhalte wie z.B.

- Anforderungen an IPV
- Planung von IPV
- Durchführung von IPV
- Probenahme usw.
- Administrative Konzepte

auf die im Vortrag jedoch nicht näher eingegangen werden können.

Die Quantifizierung einer Grundwassergefährdung im Abstrom eines potentiellen oder bekannten Schadensherdes ist eine schwierige Aufgabe im Rahmen der Altlastenbearbeitung. Oft erfolgt dies entweder indirekt über die Bestimmung von Schadstoffgehalten aus Bodenproben bzw. Eluaten im Schadensherd oder direkt über Grundwasseranalysen aus Messstellen im Grundwasserabstrom. Aufgrund der Heterogenität des Untergrunds und der Schadstoffverteilung im Schadensherd, einhergehend mit Fragen der Repräsentativität der Boden- oder Grundwasserproben, dem Problem aus den Feststoffgehalten stoffspezifisch und zuverlässig mögliche Sickerwasser- oder Grundwasserkonzentrationen umzurechnen bzw. Eluatkonzentrationen mit den Boden- und Grundwasserkonzentrationen zu korrelieren, können beide Methoden nicht unerhebliche Unsicherheiten aufweisen. Eine weitere Schwierigkeit ist die Regionalisierung der aus Punktinformationen (Boden- oder Grundwasserproben) ermittelten Schadstoffkonzentrationen, 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 potentiellen Schadensherdes. Unter Verwendung von Schadstoffkonzentrationsganglinien aus Pumpversuchen, wird eine bessere Qualifizierung und Quantifizierung einer Grundwassergefährdung möglich.

Die Grundidee zu dem integralen Erkundungsverfahren fand sich bereits im Frachtkonzept in den Hinweisen zur Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen vom September 1993 (LUBW, 1998). Sie ist in dem 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.

2. Verfahrensbeschreibung Immissionspumpversuche

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 Schadstoffverteilungen und der integrale Schadstoffmassenfluss bestimmt werden. Durch eine geeignete Anordnung von IPV-Brunnen entstehen im Aquifer sog. Kontrollebenen (s. Abb. 2.1). Dabei handelt es sich um imaginäre Ebenen innerhalb des Aquifers, im Idealfall senkrecht zur Grundwasserfließrichtung angeordnet.

Im einfachsten Fall wird der Abstrom einer Verdachtsfläche durch einen Pumpversuch in einer Grundwassermessstelle vollständig erfasst, wenn die Trennstromlinie nach einer entsprechenden Pumpdauer außerhalb der Schadstofffahne liegt (siehe Abb. 2.1). In diesem quasistationären Fall ist die Schadstofffracht F das Produkt aus der gemessenen Schadstoffkonzentration C_P und der Förderrate des Brunnens Q_P :

$$F = C_P \cdot Q_P$$

Zur Berechnung der Schadstofffracht reicht hier eine einzige Grundwasserprobe am Ende des Pumpversuchs aus. Die stationäre Erfassungsbreite B lässt sich über die Formel

$$B = Q / (k_f \cdot i \cdot m)$$

abschätzen, wobei k_f der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert des Aquifers, i der hydraulische Gradient und m die Mächtigkeit des Aquifers sind.

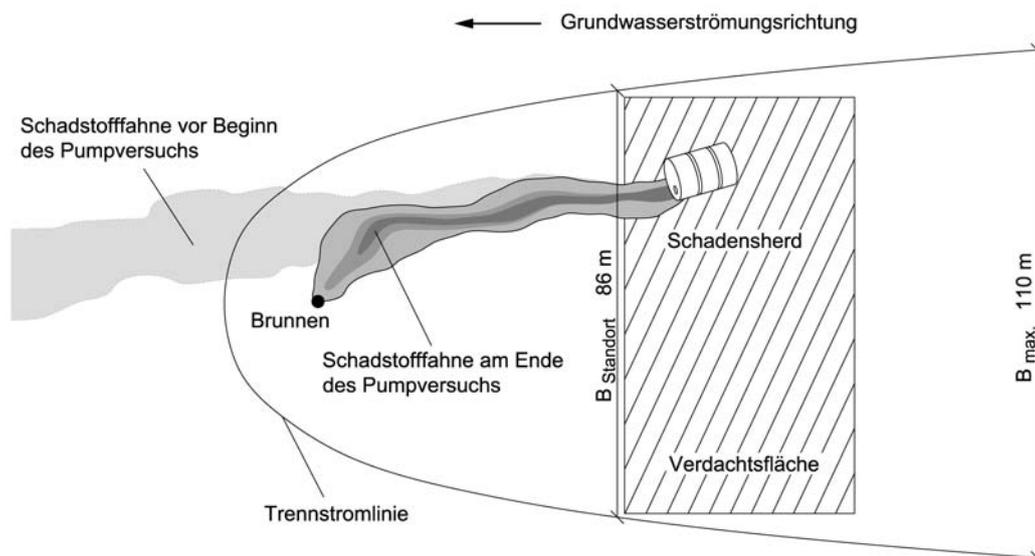


Abb. 2.1: Prinzip der stationären Immissionsmessung (Teutsch et al., 2000)

In der Praxis ist es meist nicht möglich, den Abstrom einer Verdachtsfläche mit nur einem Pumpversuch hinreichend zu erfassen. Zum einen kann die Lage der Fahne normalerweise nicht genau genug abgeschätzt werden, um einen einzigen Pumpbrunnen optimal zu platzieren, zum anderen würden sich meist sehr lange Pumpzeiten ergeben, um den hierfür erforderlichen quasistationären Zustand zu erreichen.

Die Schadstofffracht, die Konzentrationsverteilung und die mittlere Konzentration lassen sich aber auch instationär bestimmen. Die Bestimmung erfolgt auf Grundlage von Konzentrationsganglinien aus Pumpversuchen. Hierzu werden im Bereich der Schadstofffahne Pumpversuche durchgeführt, wobei die Position der Pumpbrunnen, die Pumpzeiten und -raten so gewählt werden, dass die Fahne im Idealfall auf Höhe der Kontrollebene vollständig erfasst wird. Die Anzahl der dafür erforderlichen Pumpbrunnen hängt im Wesentlichen von der Breite der zu untersuchenden Kontrollebene und von der erreichbaren Entnahmebreite der Brunnen 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 Abb. 2.2 ist das Prinzip der instationären Immissionsmessung dargestellt.

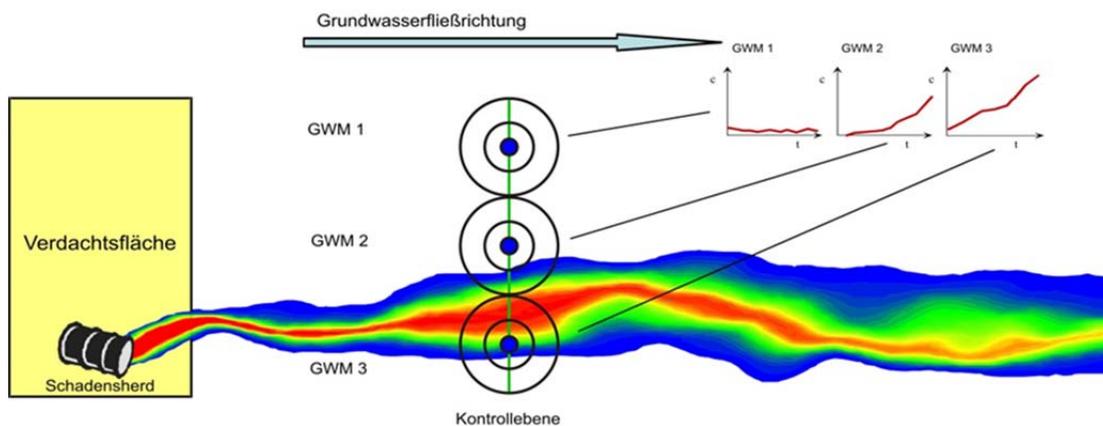


Abb. 2.2: Prinzip der instationären Immissionsmessung (nach Teutsch et al., 2000)

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. 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.

Mit Hilfe von Inversionsverfahren kann aus den Konzentrationsganglinien die mögliche Schadstoffverteilung im Einzugsgebiet des Brunnens rückgerechnet werden. Aus der errechneten mittleren Schadstoffkonzentration im Kontrollquerschnitt und der natürlichen Grundwasserströmung errechnet sich die Schadstofffracht über den Kontrollquerschnitt (siehe Abb. 2.3).

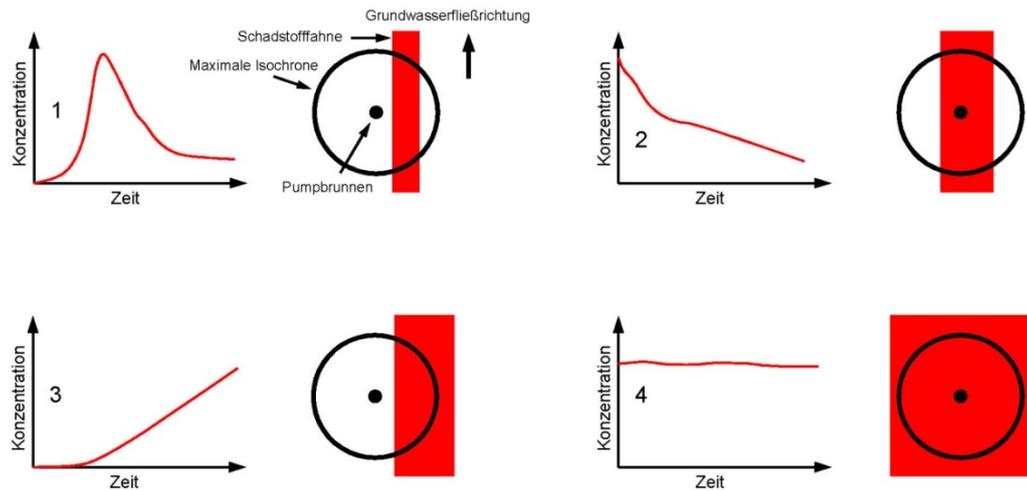


Abb. 2.3: Charakteristische Konzentrationsganglinientypen und zugehörige Schadstofffahnengeometrie (nach Holder und Teutsch, 1999)

Sofern sich die Entnahmebereiche mehrerer Pumpbrunnen überlagern, enthalten die Konzentrationsganglinien Mehrfachinformationen, die - unter günstigen Voraussetzungen - 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 (siehe af Heft 16, Ptak, T. et al, 2013).

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

1. Quantitative räumliche Erfassung des Abstroms eines Verdachtsbereiches bzw. eines Schadensherdes **mittels einer Grundwassermessstelle**, Konzentrationen und Frachten über einen definierten Betrachtungsraum.
2. 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.
3. Identifizierung von Rückhalte- und Abbauprozessen, großräumige Modellierung von Grundwasserqualität und Schadstofftransport über **mehrere hintereinander liegende Kontrollebenen** in Kombination mit adäquaten Modellierwerkzeugen zur Simulation von Strömungs- und reaktiven Stofftransportprozessen.

3. Auswerteverfahren

Inzwischen steht eine Reihe von computergestützter 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 quantifizieren, gibt es modellgestützte Auswerteverfahren, die auf einer numerische 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 die Versuchsbedingungen mit den Annahmen des Auswerteverfahrens übereinstimmen. Bei der Auswertung der Immissionspumpversuche mit den verfügbaren Auswertewerkzeugen wird implizit angenommen, dass der Konzentrationsgradient in Strömungsrichtung innerhalb des Einzugsbereiches eines IPV-Brunnens vernachlässigbar ist, dies ist durch Publikationen belegt (siehe af Heft 16, Ptak, T. et al, 2013).

Auch ist es grundsätzlich mit keinem Auswerteverfahren möglich, aus der Durchgangskurve eines einzelnen IPVs ohne Zusatzinformationen darauf rückzuschließen, ob sich die ermittelte Konzentrationsverteilung und damit die Schadstofffahne rechts, links oder beidseitig des Brunnens befindet.

Tabelle 3.1 fasst wesentliche Kriterien für die Anwendung der einzelnen IPV-Auswerteverfahren zusammen.

Tabelle 3.1: Kriterien und Zusammenstellung von Aspekten im Hinblick auf die Anwendung von IPV-Auswerteverfahren

Kriterien für die Anwendung von IPV-Auswerteverfahren			Einfache Verfahren				Modellgestützte Verfahren	
			IPV-Tool	MAGIC Software Tool	C-SET	CSTREAM analytisch	CSTREAM numerisch	Anpassung Transportmodell
Randbedingungen des IPV	Aquifer einfach (2D, homogen)	Parallele Grundströmung, konstante Pumprate	geeignet solange Isochronen annähernd kreisförmig	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet
		Stärkere Änderungen der Pumprate oder längere Pumpunterbrechungen	nicht geeignet	nicht geeignet	geeignet	nicht geeignet	geeignet	geeignet
		Ausgeprägte hydraulische Einflüsse durch vorausgegangene oder zeitgleiche Pumpmaßnahmen	nicht geeignet	nicht geeignet	geeignet	nicht geeignet	geeignet	geeignet
		Stoffspezifische Retardation	nicht geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet	geeignet	geeignet	geeignet
	Aquifer komplex	2D, heterogen	nicht geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet	geeignet	geeignet
		3D, heterogen	nur Ansatz unabhängiger Schichten für GW-Strömung und IPV-Auswertung möglich	nur Ansatz unabhängiger Schichten für GW-Strömung und IPV-Auswertung möglich	nur Ansatz unabhängiger Schichten für GW-Strömung und IPV-Auswertung möglich	nur Ansatz unabhängiger Schichten für GW-Strömung und IPV-Auswertung möglich	GW-Strömung 3D, IPV-Auswertung schichtweise	geeignet
Software	Autor(en)		Rothschink, 2007	Ertel et al., 2008	Huss, 2012	Bayer-Raich et al., 2003; Bayer-Raich, 2004		gem. Modellsoftware
	Erforderliche Zusatzprogramme		Excel			Surfer	MODFLOW96 MODPATH3.0 Surfer	
	Bezug		1)	2)	1)	3)	3)	
	Kosten		keine	keine	keine	Kursgebühr	Kursgebühr	
	Berechnungsverfahren		Inversion	Inversion	Vorwärts	Inversion	Inversion	Vorwärts
	Validierung		Vergleichsstudie IAU Ravensburg (Hekel, 2012)	MAGIC Stuttgart (Ertel et al., 2008)	Vergleichsstudie IAU Ravensburg (Hekel, 2012)	Vergleichsstudie IAU Ravensburg (Hekel, 2012)	Vergleichsstudie IAU Ravensburg (Hekel, 2012)	MAGIC Stuttgart (Ertel et al., 2008)
		TASK-Studie (Ptak & Holder, 2012)	Test für IPV-Statusbericht (unveröff.)		TASK-Studie (Ptak & Holder, 2012)	TASK-Studie (Ptak & Holder, 2012)	IAU Ravensburg (Hekel et al., 2013)	
Handhabung	Eingabe Aquifer- und Versuchsparameter		Excel	Menu	Menu	Ascii-Datei	MODFLOW Ascii-Datei	gem. Modellsoftware
	Anzahl der möglichen Proben		10	999	praktisch unbegrenzt	praktisch unbegrenzt	praktisch unbegrenzt	praktisch unbegrenzt
	Art der Berechnung		automatische Berechnung einseitiger und beidseitiger Verteilungen	automatische Berechnung einseitiger und beidseitiger Verteilungen	grafik-gestützte Vorgabe der Verteilung u. Anpassung gerechneter/gemessener Durchgang	automatische Berechnung links-, rechtsseitiger und symmetrischer Verteilung	n. Kopplung mit Modflow automatische Berechnung links-, rechtsseitiger und symmetrischer Verteilung	Vorgabe von Stoffquellen/-Verteilungen u. Anpassung gerechneter/gemessener Durchgang
	Ausgabe der Ergebniswerte		Excel-Tabelle: Vol.strom, mittl. Konz., Fracht	Bildschirm: Vol.strom, mittl. Konz., Fracht	Bildschirm: max. Konz., Fracht	Ascii-Datei: Vol.strom, mittl. Konz., Fracht	Ascii-Datei: Vol.strom, mittl. Konz., Fracht	gem. Modellsoftware
	Ausgabe der Konzentrationsverteilungen entlang der Kontrollebene als		Bildschirmgrafik, Excel-Tabelle	Bildschirmgrafik, Excel-Tabelle	Bildschirmgrafik, Excel-Tabelle	Ascii-Tabelle	Ascii-Tabelle	
	Graphische Darstellung der Isochronen		keine	Bildschirm; ESRI shp-Datei	Bildschirm; ESRI shp-Datei	Surfer bln-Datei	Surfer bln-Datei	
	Graphische Darstellung der Stromstreifen-Konzentrationen		keine	ESRI shp-Datei (fehlerhaft!)	Bildschirm; ESRI shp-Datei	Ascii-Tabelle	Surfer grd-Datei	

3.1 IPV-Tool

Das MS-Excel basierte IPV-Tool (Rothschink, 2007) 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 durchschnittliche Konzentration und den Grundwasservolumenstrom sowie die Schadstofffracht über die Entnahmebreite. In Diagrammform werden mögliche Stoffkonzentrationsverteilungen entlang der Kontrollebene ausgegeben. Dabei können sowohl Brunnenpositionen am Fahnenrand (steigende Messwertverläufe), als auch in der Fahnenmitte (stagnierende oder fallende Messwertverläufe) berücksichtigt werden.

3.2 MAGIC Software Tool

Das MAGIC Software Tool wurde im Rahmen des Projekts MAGIC vom Zentralen Bergbauinstitut in Kattowitz (Polen) als nutzerfreundliche Software zur Planung und Auswertung von Immissionspumpversuchen entwickelt (Ertel und Schollenberger, 2008). 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.

3.3 C-SET

C-SET (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 berücksichtigt werden können (zeitgleich betriebene Brunnen, Vorversuche in Nachbarbrunnen und daraus resultierende Fahnenverschleppungen, nicht konstante Pumpraten und Pumpausfallzeiten).

In C-SET wird die zeitliche Konzentrationsentwicklung im Entnahmebrunnen mit Hilfe eines Particle-Tracking-Verfahrens ermittelt. Mit C-SET ist die Ausgabe von Isochronen und Stromstreifenkonzentrationsverteilungen in Form von ESRI-shp-Dateien möglich, die mittels GIS raumbezogen dargestellt werden können. (s. auch Hekel und Huss, 2013).

3.4 CSTREAM analytisch

Die analytische Inversionslösung zur Interpretation von Konzentrationsganglinien aus Immissionspumpversuchen mit Berücksichtigung der Grundwasserströmung ist ausführlich in Bayer-Raich et al. (2004) dargestellt. Die analytische Lösung berücksichtigt die natürliche Grundwasserströmung sowie einen Retardationsfaktor, ohne dass ein numerisches Standortmodell benötigt wird.

3.5 CSTREAM numerisch

Die neueste Version des numerischen Inversionsalgorithmus zur Interpretation von Konzentrationsganglinien aus Immissionspumpversuchen ist im Programm CSTREAM (Bayer-Raich et al. 2003, Bayer-Raich, 2004) implementiert. CSTREAM benötigt ein instationäres Strömungs- und advektives, nicht-

reaktives Transportmodell des Untersuchungsgebietes auf der Basis von MODFLOW96 / MODPATH3.0 (Prinzipmodell), um Stromlinien und Isochronen für die Inversion zu bestimmen. Damit ermöglicht die numerische Inversionslösung, im Gegensatz zur analytischen Lösung, die Einzugsbereiche der IPV unter Berücksichtigung der Heterogenität des Untergrunds (räumlichen Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit, der Porosität und der Mächtigkeit) und hydraulischer Einflüsse abzubilden. Insbesondere kann dabei auch der Einfluss vorangegangener bzw. zeitgleich durchgeführter Immissionspumpversuche (Verschiebung der Schadstofffahne, Verlagerung und Verzerrung der Einzugsbereiche der IPV-Brunnen) berücksichtigt werden. Des Weiteren können stoffspezifische Retardationsfaktoren vorgegeben werden, mit denen Retardation infolge instantaner linearer Sorption bei der Inversion berücksichtigt werden kann (Bayer-Raich et al. 2006), und damit das im Vergleich zum nicht-retardierten Fall verringerte untersuchte Aquifervolumen.

3.6 Alternative numerische Auswertansätze

Aquifersysteme werden fallweise mit numerischen Grundwasserströmungs- und Transportmodellen abgebildet. Mit Hilfe des Transportmodells ist es dann möglich, Immissionspumpversuche nachzurechnen und dabei die Schadstoffverteilung im Untergrund invers zu bestimmen.

4. 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. Die Anwendung beschränkt sich auf den Wirkungspfad Boden – Grundwasser. 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.

Bei **einzelnen Standorten** kommen IPV insbesondere dann zum Einsatz, wenn die Komplexität der früheren Nutzung und / oder der hydrogeologischen Verhältnisse eine Untersuchung und Lokalisierung von Schadensherden und Abstromfahnen erschwert. Dabei sind IPV auch zur Charakterisierung von Schadensherden und Schadstofffahnen geeignet.

Im Rahmen der Erstellung des Statusberichtes wurden aus verschiedenen Bereichen (Behörde, Kommune, Ingenieurbüro, Handlungsstörer) erfolgreich durchgeführte Immissionspumpversuche gesammelt. Insgesamt über 50 abgeschlossene Projekte wurden kategorisiert, um eine sinnvolle Systematik ermitteln zu können. Anhand der wichtigsten Kenndaten konnte so eine nachvollziehbare Einteilung in sogenannte Fallgruppen gebildet werden.

Fallgruppe	Fall	Kontaminanten	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	Ausgangssituation		Größe der Untersuchungsfläche			Zielsetzung/Nutzen	Auswertung	
				Beschreibung des Standorts (Altstandort, Altablagerung, Bauvorhaben etc.)	Kontrolllebenen Anzahl IPV	Standort [m ²]	Erfasste Abstrombreite [m]	Erfasste Mächtigkeit des Aquifers [m]			
A	Biogasanlage im Donautal	Ammonium (NH ₄ ⁺)	1,3·10 ⁻³	Undichter Fahrsilo einer Biogasanlage	1	1	400	22	8	Quantifizierung der aus einem Teilbereich des Silos abströmenden Ammoniumfracht	IPV-Tool, analytisch
A	Ehem. Metallwarenfabrik, Landkreis Calw	LHKW	3,4·10 ⁻⁵	Altstandort	1	1	1.000	8	3	Detailuntersuchung Bestimmung Immission und Fracht zur Klärung Sanierungsbedarf	C-SET
B	Ehem. RICHALLE eines Bahn-Ausbesserungswerks	LHKW, MKW, PAK	3·10 ⁻³	Altstandort, Reparaturbetrieb	1	5	30.000	210	13	Klärung der Emissionslage, Erreichen des 50%-Kriteriums nach VwV BW	IPV-Tool, analytisch
B	Ehem. Metallverarbeitung, Landkreis Hohenlohe	LHKW	1·10 ⁻⁴	Altstandort, Metallverarbeitung	1	3	5.000	120	3	Konzentrations- und Frachtermittlung im Abstrom eines GW-Schadens	IPV-Tool, analytisch
C	Integrale Altlastuntersuchung Ravensburg	LHKW, BTEX, PAK, KW	min. 1·10 ⁻⁵ max. 4·10 ⁻³ Ø: 4·10 ⁻⁴	7 Altablagerungen 16 Altstandorte 2 Unfälle/Störfälle	8	51	1.000.000	1.885	1 - 7 Ø: 3	Schadstofffahnen Ermittlung Stadtplanung	analytische Auswertung mit CSTREAM; C-SET für Spezialfälle
C	Natural Attenuation - Untersuchungen "ehemalige Abfalldeponie Osterhofen"	Ammonium (NH ₄ ⁺)	min. 2,4·10 ⁻⁴ max. 5,3·10 ⁻³ Ø: 4·10 ⁻⁴	Prüfwertüberschreitungen (NH ₄ ⁺) im Abstrom der Deponie	2	15	61.000	290	0,75 - 12,6 Ø: 3,9	Frachtbestimmung, Abbauraten	num. GW-Modell, numerische Auswertung mit CSTREAM

Abb.: 4.1: Systematische Einteilung der Fallgruppen

Wie bereits unter 2. beschrieben, lassen sich somit dem Prinzip des IPV folgend für den Einsatz des Immissionspumpversuches als Untersuchungsmethode drei wesentliche Fallgruppen von Ziel- bzw. Fragestellungen abgrenzen, wobei die Komplexität und die Aussagemöglichkeiten jeweils zunehmen:

- Quantitative räumliche Erfassung des Abstroms eines Verdachtsbereiches bzw. eines Schadensherdes mittels einer Grundwassermessstelle, Konzentrationen und Frachten über einen definierten Betrachtungsraum (Fallgruppe A).
- 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 (Fallgruppe B).
- Identifizierung von Rückhalte- und Abbauprozessen, großräumige Modellierung von Grundwasserqualität und Schadstofftransport über mehrere hintereinander liegende Kontrollebenen in Kombination mit adäquaten Modellierwerkzeugen zur Simulation von Strömungs- und reaktiven Stofftransportprozessen (Fallgruppe C).

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, parallel oder hintereinander ausgeführte IPV erforderlich werden. Die Fallgruppen werden im Folgenden vorgestellt und mit je einem Beispiel aus der Praxis hinterlegt.

4.1 Erfassung des Abstroms mittels einer Grundwassermessstelle (Fallgruppe A)

Die Fallgruppe A stellt den einfachsten Einsatz von IPV dar. Dieser erlaubt die Erfassung des direkten Abstroms eines einzelnen Verdachtsbereiches. Eingesetzt wird diese Form z.B. um grundsätzlich zu klären, ob überhaupt Schadstoffe von einem Schadensherd abströmen und die ggf. abströmende Fracht

dann zu ermitteln. Häufig können Schadensfälle in der Beurteilung bereits mit diesem einfachen Einsatz abgeschlossen werden.

Bei stark positivem Befund (z.B. Überschreitung des Emissionskriteriums) wiederum können jedoch weitergehende Untersuchungsschritte erforderlich werden. Dann ist ggf. die Ausweitung des Untersuchungsbereichs und die Erweiterung der Kontrollebene in der Breite mittels weiterer IPV-Brunnen oder die Implementierung weiterer Kontrollebenen erforderlich.

4.2 Erfassung des Abstroms mittels mehrerer Grundwassermessstellen entlang mindestens einer Kontrollebene (Fallgruppe B)

Die Fallgruppe B umfasst Anwendungen mit mehreren IPV-Brunnen entlang einer Kontrollebene. Diese Implementierung kommt häufig bei größeren und komplexen Schadensfällen (s. z.B. Abb. 3.1) zum Einsatz, wo die abströmende Fracht mit einem IPV-Brunnen nicht vollständig erfasst werden kann, wo die Abstrombreite und die Fahngeometrie ermittelt werden sollen, und wo Fahne-Herd-Beziehungen zu untersuchen sind.

Ob eine Kontrollebene ausreicht oder ob mehrere erforderlich sind, richtet sich nach der Zielsetzung. Dasselbe gilt für den Abstand der Kontrollebenen zu der zu untersuchenden Fläche sowie zwischen den verschiedenen Kontrollebenen (s. auch z.B. Jarsjö et al., 2005). Bei Untersuchungen im kleinräumigen Maßstab wird zunächst eine Kontrollebene im unmittelbaren Abstrom der zu untersuchenden Fläche eingerichtet. Im Regelfall sollte hierbei ein Abstand von etwa 30 – 50 m zu der zu untersuchenden Fläche nicht überschritten werden. Die Breite der Kontrollebene ergibt sich näherungsweise aus der Breite des (vermuteten) Schadensherdes bzw. der Schadensherde senkrecht zur Grundwasserfließrichtung. Zur Fahnenkartierung können mehrere in Abstromrichtung aufeinanderfolgend angeordnete Kontrollebenen erforderlich sein.

4.3 Erfassung des Abstroms mittels mehrerer hintereinander liegenden Kontrollebenen, Instationarität (Fallgruppe C)

Durch die Untersuchung mehrerer, mit Hilfe von IPV vollständig erfasster Kontrollebenen im Abstrom von Schadensherden wird eine Frachtbilanzierung möglich. Diese Bilanzierung gestattet, insbesondere bei mehrfacher, zeitlich gestaffelter Durchführung (z.B. halbjährlich oder jährlich) Rückschlüsse u.a. auf:

- die Ausbildung von Schadstofffahnen im Abstrom (Kontrolle im Hinblick auf Länge, Lage, Konzentrationsbereiche)
- zeitliche und örtliche Variabilität (Instationarität), z.B. in Abhängigkeit vom Grundwasserstand,
- die Entwicklung der Schadstofffrachten in Grundwasserfließrichtung (Abnahme der Fracht: Hinweis auf natürliche Abbau- oder Rückhalteprozesse (NA); Zunahme der Fracht: Hinweis auf abgelöste Fahne, Mobilisierung von Schadstoffen) und
- die zeitliche Entwicklung von Konzentrationen und Frachten.

Ergeben sich Nachweise für NA, so können diese quantifiziert und in das Sanierungskonzept einbezogen werden (z.B. Herfort et al., 2000; Bockelmann et al., 2001). Hier empfiehlt sich auch der Einsatz komplexer, prozessorientierter numerischer Schadstofftransportmodellierung, um die NA-Prozesse standortspezifisch abbilden und Prognosen über die zukünftige Entwicklung der Frachten und Konzentrationen in Raum und Zeit vorhersagen zu können (z.B. Herold et al., 2011).

Zu den beschriebenen Anwendungsbereichen der IPV bestehen umfangreiche praktische Erfahrungen. Für jede der drei Fallgruppen A – C wurden anhand der oben beschriebenen Systematik, jeweils zwei charakteristische Anwendungsbeispiele ausgewählt und im Statusbericht (af Heft 16, Ptak, et al, 2013) mit den wesentlichen Kenndaten dargestellt (s. Abb. 4.1). Im Vortrag wird aus jeder Fallgruppe ein Beispiel vorgestellt.

5. Anwendungsbeispiele

5.1 Fallgruppe A: Ehemalige Metallwarenfabrik, Landkreis Calw

In einem ehemals von Metallwarenfabriken genutzten Altstandort mit einer Flächengröße von 1.300 m² lagen durch den Umgang mit Lösemitteln LHKW-Belastungen im Grundwasser vor. Die quartären Talsedimente sind mit Durchlässigkeitsbeiwerten von ca. $3\text{-}4 \times 10^{-5}$ m/s als „durchlässig“ einzustufen.

In der Detailuntersuchung wurden anhand von 4 Grundwassermessstellen die Abstromkonzentrationen festgestellt. Herausragend war ein Einzelbefund (LHKW-Summe) von knapp 6.000 µg/l in GWM m1. Für den zugehörigen 9 Meter breiten Stromstreifen wurde eine Schadstofffracht von 65 g LHKW pro Tag ermittelt. Damit war neben dem Prüfwert für die Immission auch die einzelfallbezogene Mindestanforderung für die Emission ($E_{\text{max LHKW}} = 20$ g/d) überschritten. Mit Hilfe eines Immissionspumpversuchs in GWM m1 sollte die Fahne näher eingegrenzt und damit ein genauerer Frachtwert ermittelt werden.

Der Immissionspumpversuch wurde über 5 Tage mit einer Pumprate von 0,036 l/s durchgeführt. Am ersten Tag wurden 3 Proben mit LHKW-Gehalten bis 8.000 µg/l gezogen. Die späteren Proben wiesen mit 3.000 µg/l nach 2 Tagen und knapp 600 µg/l bei Versuchsende einen stark abnehmenden Konzentrationsverlauf auf.

Die Auswertung mit C-SET ergab einen ca. 8 m breiten Erfassungsbereich, die abgegrenzte Fahnenbreite betrug 2 m. Damit ergab sich eine Schadstofffracht von 13 g/d. Mit diesem Ergebnis wurde die einzelfallbezogene Mindestanforderung für die Emission eingehalten. Das Ergebnis wurde akzeptiert, auch wenn zunächst eine gewisse Skepsis gegenüber der errechneten geringen Fahnenbreite blieb.

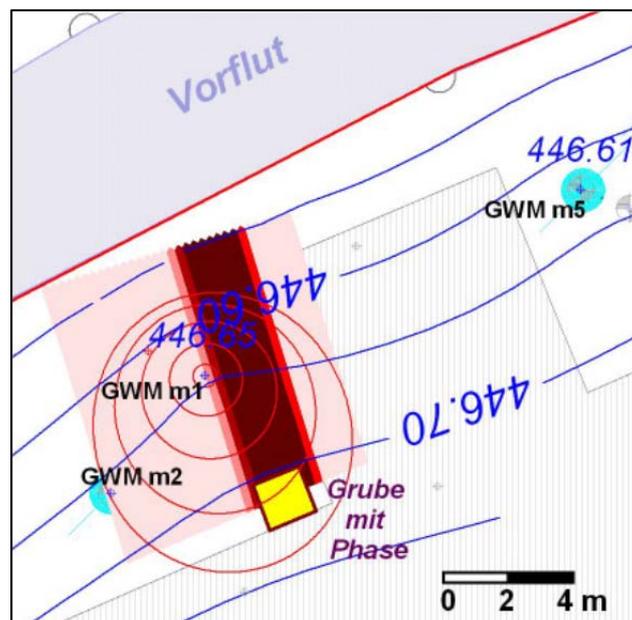


Abb.: 5.1: IPV mit einer GWM

5.2 Fallgruppe B: Ehemalige Richthalle eines Bahn-Ausbesserungswerks

Auf dem Gelände eines ehemaligen Bahn-Ausbesserungswerks befand sich u. a. eine Richthalle (30.000 m²), in welcher zwischen 1917 und 1987 Schienenfahrzeuge repariert wurden. Neben dem Einsatz von Ölen wurde auch der Einsatz von LHKW (Reinigung, Entfettung) vermutet.

Die Verdachtsfläche befindet sich im Oberrheingraben, am Standort steht ab ca. 6 m u. GOK die stark durchlässige ($k_f = 3 \times 10^{-3}$ m/s) und ca. 40 m mächtige Einheit der Oberen kiesig-sandigen Abfolge (OksA, früher Oberes Kieslager OKL) an. Die effektive Porosität wurde mit 0,13 ermittelt.

In früheren orientierenden Untersuchungen wurden MKW und PAK im Boden, in einer zentralen GWM 1 auch geringe Mengen LHKW (max. ca. 50 µg/l) im Grundwasser festgestellt. Da zwischenzeitlich Einsturzgefahr bestand, waren Detailuntersuchungen innerhalb der Richthalle nicht mehr möglich. Außerhalb der Richthalle wurde die GWM 3 niedergebracht, welche den Befund von LHKW bestätigte.

Da eine konkrete Eintragsstelle für die LHKW nicht lokalisiert werden konnte und nicht auszuschließen war, dass man möglicherweise nur den Rand eines größeren Schadens erfasste, wurde beschlossen, ein integrales Untersuchungskonzept im GW-Abstrom der Richthalle aufzustellen. Zudem war nicht auszuschließen, dass infolge der Nutzung mehrere Eintragsbereiche vorlagen.

Das vereinbarte Erkundungsziel bestand darin, mindestens 50 % des GW-Abstroms zu erfassen. Neben der bereits vorhandenen GWM 3 wurden 3 weitere GWM-Lagen festgelegt. Mithilfe des IPV-Tools wurde dann mit den bekannten hydraulischen Parameter das Untersuchungskonzept der IPV aufgestellt.

Für die GWM 7-9 wurde eine Pumpzeit von 48h bei 3 Probenahmen, bei der GWM 3 aufgrund der Lage im direkten Abstrom der GWM 1 eine Pumpzeit von 72 h bei 5 Probenahmen angesetzt. Damit wurden 50 % der Abstrombreite von 210 m erfasst. Die erfasste Fläche in der Richthalle war wesentlich größer.

Die Ergebnisse erbrachten lediglich in der GWM 3 in der ersten Probe ein prüfwertüberschreitendes Signal für LHKW. Die übrigen Proben waren unauffällig (< 10 µg/l). Die anschließende Emissionsberechnung ergab eine Fracht < 1 % (des E_{\max} -Wertes), der Schaden wurde als hinnehmbar bewertet.

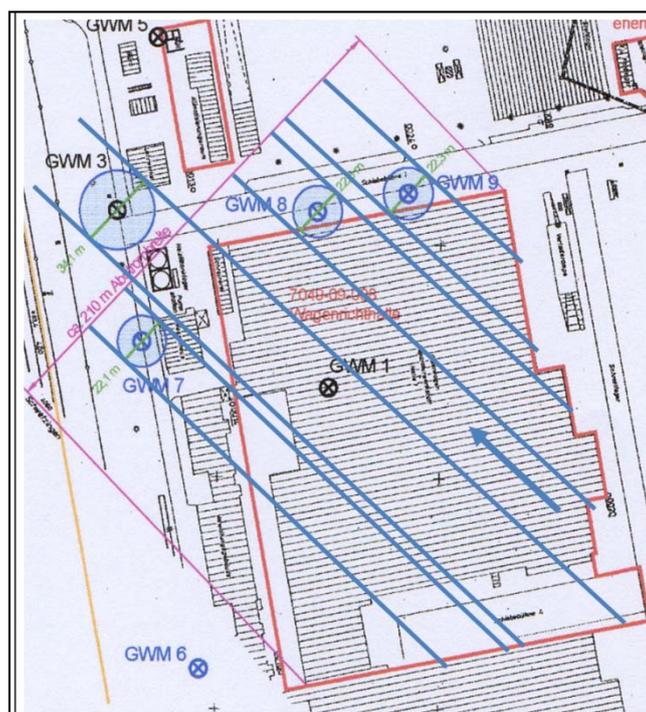


Abb.: 5.2: IPV an einer Kontrollebene

5.3 Fallgruppe C: Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

In der Stadt Ravensburg vollzieht sich im innenstadtnahen Gebiet der „Bahnstadt“ ein grundlegender Strukturwandel. Der Rückgang des produzierenden Gewerbes ermöglicht städtebauliche Folgenutzungen mit einem Investitionsvolumen von 65 Mio. Euro. Die komplexe Altlastensituation wurde als Pilotprojekt des Landes Baden-Württemberg mit integralem Ansatz untersucht.

Für den 1 bis 7 m mächtigen quartären Grundwasserleiter aus gut durchlässigen, kiesig-sandigen Flussablagerungen und durchlässigen Schwemmfächersedimenten sowie bindigen Deckschichten bestand trotz zahlreicher Einzelfalluntersuchungen keine konsistente Kenntnis des Aufbaus und der genaueren Grundwasserströmungssituation. Die 25 bewertungsrelevanten Gefahrverdachtsflächen innerhalb des Untersuchungsgebietes konnten aufgrund ihrer Gemengelage somit nicht hinreichend bewertet werden. In Einzelfällen kam es - im Nachhinein betrachtet – zu falschen Bewertungen oder Sanierungsansätzen.

Mit der Integralen Altlastenuntersuchung sollten für das ca. 1 km² große Untersuchungsgebiet folgende Ziele erreicht werden:

- einheitliche Aufarbeitung und Analyse des Datenbestands
- konsistentes Verständnis des Aquiferaufbaus und der Grundwasserströmungssituation
- flächendeckende Untersuchung der Grundwasserbelastung und Abgrenzung von Fahnen
- Zuordnung der Fahnen zu Störern
- Ausscheiden von Flächen, von denen keine Grundwasserbeeinträchtigungen ausgehen

Auf Grund der engen räumlichen Assoziation der Gefahrverdachtsflächen war es möglich, durch die mit öffentlichen Mitteln geförderte integrale Untersuchung der kommunalen Flächen auch für private Flächen Informationen zu gewinnen und damit synergetisch einen Wirtschaftsfördereffekt zu generieren. Insgesamt konnten für 80% der Gefahrverdachtsflächen sämtliche zur Altlastenbewertung relevanten Informationen für das Schutzgut Grundwasser gewonnen werden.

Nach Analyse sämtlicher vorliegende Sachdaten wurden auf Grundlage der ermittelten Grundwasserströmung im Zu- und Abstrom von 25 Gefahrverdachtsflächen insgesamt 8 Kontrollebenen mit einer Gesamtlänge von ca. 1.900 m eingerichtet und 51 Immissionspumpversuche durchgeführt.

Für die Planung und Auswertung der Immissionspumpversuche wurde das Programm CSTREAM eingesetzt, einige wenige Versuche mit gegenseitiger hydraulischer Beeinflussung wurden mit C-SET ausgewertet. Als unabhängiges Planungs- und Auswerteeinstrument kam zusätzlich ein numerisches Grundwasserströmungs- und Transportmodell zum Einsatz.

In der Synopse der Einzelauswertungen konnten vier zum Teil erhebliche LHKW-Fahnen mit Fahnenlängen zwischen 150 und maximal ca. 700 m abgegrenzt werden (s. Abb.). Für alle vier LHKW-Schadensfälle war es möglich, die - teilweise bis dato unbekannt - Störer zu ermitteln.

Daneben wurden lokale Grundwasserkontaminationen durch BTEX, MKW und PAKs nachgewiesen, die im Zuge der Einzelfallbewertungen ebenfalls den jeweiligen Störern zugeordnet werden konnten.

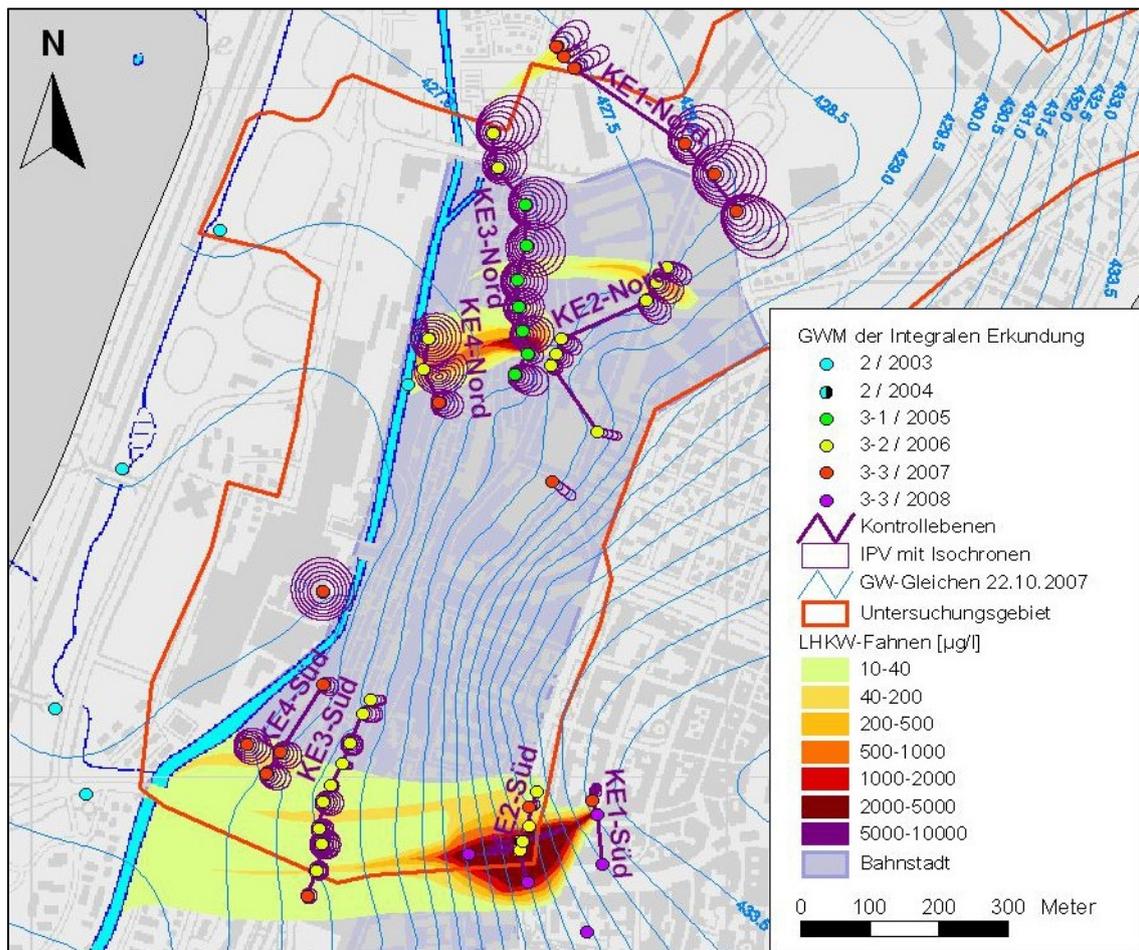


Abb.: 5.3: IPV mit mehreren Kontrollebenen

6. Kosten

Grundlage eines jeden IPV ist eine gründliche vorbereitende Planung durch einen Sachverständigen. Es sind fundierte Kenntnisse des regionalen Grundwasserregimes erforderlich, um die Anzahl, Lage und Ausbau der erforderlichen Grundwassermessstellen sowie die Betriebsparameter der Immissionspumpversuche kostensicher planen und die Immissionspumpversuche ausführen zu können.

Daher kommt der Wahl eines mit der Örtlichkeit vertrauten Fachgutachters eine hohe fachliche und letztlich auch wirtschaftliche Bedeutung zu. Bei der Planung von Immissionspumpversuchen sind im Vergleich zu einem Standard-Pumpversuch zusätzliche Kosten zu berücksichtigen für:

- den eigenen organisatorischer Aufwand und für die Vorbereitung der IPV-Maßnahme,
- die aufwendigere Durchführung,
- den nachgeschalteten Aufwand und für die Aufbereitung und Dokumentation der durchgeführten Maßnahme

Die Kosten der Durchführung beinhalten im Wesentlichen die Erstellung der entsprechenden Infrastruktur (Brunnen, Pumpanlagen, Pumpbetrieb, Ableitvorrichtungen, Reinigung des gepumpten Grundwassers) und werden häufig im Rahmen der gutachterlichen Leistungserbringung stundenweise bzw. mengenmäßig vepreist. Bei der Ableitung der teils in großen Mengen anfallenden Pumpwässer sollte auch die technische Eignung der Abwasseraufnahme mit den örtlichen Entsorgern geklärt sein. Die Einleitgebühren stellen häufig einen hohen Kostenfaktor dar. In einigen Fällen konnte mit dem kommunalen Entsorger eine (kostengünstigere) Pauschale vereinbart werden, da die anfallende Wassermenge im Voraus bereits

genannt werden konnte. Hinzu kommen weitere Kosten für z.B. Absperrung, Rodung einer Fläche, Nutzungsausfall von Dritten (z.B. bei Fremdflächeninanspruchnahme), Klärung von Kampfmitteln, wasserrechtliche Genehmigung etc. Grundsätzlich ist bei jedem IPV auch der eigene, teils nicht unerhebliche Aufwand eines Störers für die Begleitung der Erkundungsmaßnahme zu berücksichtigen.

7. Zusammenfassung

Das Verfahren des Immissionspumpversuchs (IPV-Verfahren) befindet sich inzwischen auf einem hohen Entwicklungsstand und ist in der Praxis als Werkzeug der räumlichen integralen Altlasten- und Grundwasseruntersuchung anerkannt und wird zunehmend eingesetzt. Mit dem 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 Auswerteverfahren zur Verfügung.

Aus der Anwendung resultiert eine erhöhte Erkundungssicherheit und somit eine erhöhte Planungssicherheit. Ebenso werden wichtige Bemessungsdaten zur Planung weiterer Aktivitäten an kontaminierten Standorten erhalten.

Im Statusbericht (af Heft 16, Ptak, et al, 2013) wird der aktuelle Stand bezüglich Theorie und Praxis der Untersuchung von Untergrundverunreinigungen mittels Immissionspumpversuchen (IPV) dokumentiert. Der Bericht beschäftigt sich hauptsächlich mit dem neuesten Entwicklungsstand der IPV-Auswerteverfahren, mit Anwendungsstrategien unter verwaltungsrechtlichen Aspekten und mit Erkenntnissen aus der praktischen Anwendung. 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.

8. Literaturhinweise, Auszug aus Statusbericht (af Heft 16)

BAYER-RAICH, M. (2004): Integral pumping tests for the characterization of groundwater contamination, Ph.D. Thesis, Center for Applied Geoscience, University of Tübingen.

BAYER-RAICH, M., JARSJÖ, J., HOLDER, T. AND PTAK, T. (2003): Numerical estimations of contaminant mass flow rate based on concentration measurements in pumping wells. ModelCare 2002: A Few Steps Closer to Reality, IAHS Publication No. 277, 10-16, ISBN 1-901502-07-4.

BAYER-RAICH, M., JARSJÖ, J., LIEDL, R., PTAK, T., TEUTSCH, G. (2004): Average contaminant concentration and mass flow in aquifers from time dependent pumping well data: analytical framework. Water Resour. Res., 40, W08303, doi:10.1029/2004WR003095.

BAYER-RAICH, M., JARSJÖ, J., LIEDL, R., PTAK, T., TEUTSCH, G. (2006): Integral pumping test analyses of linearly sorbed groundwater contaminants using multiple wells: inferring mass flows and natural attenuation rates. Water Resources Research, 42, W08411, doi: 10.1029/2005WR004244.

- BOCKELMANN, A., PTAK, T. AND TEUTSCH, G. (2001): An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gasworks site. *J. Contam. Hydrol.*, 53(3-4), 429-453.
- BUNDESREGIERUNG (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999, BGBl. I S. 1554.
- ERTEL, T., SCHOLLENBERGER U. (2008): MAGIC Management of Groundwater at Industrially Contaminated Areas - Handbook for Integral Groundwater Investigation. Polish Geological Institute, Warsaw, 2008.
- HEKEL, U. (2012): Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg - Vergleichsstudie „Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche“. - LUBW, Karlsruhe - <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>
- HEKEL, U., EICHELMANN, C., SONNTAG, P. (2013): Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg - Strategie und Methoden einer integralen Untersuchung flacher Porengrundwasserleiter im urbanen Raum. - LUBW, Karlsruhe - <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>
- HERFORT, M., PTAK, T., LIEDL, R. AND TEUTSCH, G. (2000): A new approach for the investigation of natural attenuation at field scale. *Land Contamination and Reclamation*, Vol. 8, Part 3, 209-215.
- HEROLD, M., GRESKOWIAK, J., PTAK, T., PROMMER, H. (2011): Modelling of an enhanced PAH attenuation experiment and associated biogeochemical changes at a former gasworks site in southern Germany. *Journal of Contaminant Hydrology*, 119, 99–112, doi:10.1016/j.jconhyd.2010.09.012, ISSN 0169-7722.
- 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.
- HUSS, A. (2012): Immissionspumpversuche mit gegenseitiger Beeinflussung – Anforderungen und Chancen; in: *Handbuch der Altlastensanierung (HdA)*, Hrsg.: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T., Müller-Verlag, Heidelberg. 67. Ergänzungslieferung.
- JARSJÖ, J., BAYER-RAICH, M., PTAK, T. (2005): Monitoring groundwater contamination and delineating source zones at industrial sites: Uncertainty analyses using integral pumping tests. *Journal of Contaminant Hydrology*, 79, pp. 107-134.
- LUBW BADEN-WÜRTTEMBERG (1998): Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen, Erlaß des Sozialministeriums und des Umweltministeriums Baden-Württemberg vom 16. September 1993, AZ: 32-8984.00 (UM), 57-8490.1.40 (SM) in der Fassung vom 1.3.1998, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14914/>

LUBW BADEN WÜRTTEMBERG (2008): Leitfaden Untersuchungsstrategie Grundwasser. Altlasten und Grundwasser-schadensfälle, Band 42, 2008.

PTAK UND HOLDER (2012): Abgrenzung der verschiedenen Auswertungsansätze für Immissionspumpversuche (IPV). Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum (TASK), Leipzig.

PTAK, T., KIRCHOLTES, H., HIESL, E., HOLDER, T., ROTHSCINK, 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, Arbeitskreises Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden, Heft 16, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, ISBN 978-3-510-39016-8.

ROTHSCHINK, P. (2007): IPV-TOOL. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/47957/>

TEUTSCH, G., PTAK, T., SCHWARZ, R. UND HOLDER, T. (2000): Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission: I. Beschreibung der Grundlagen. Grundwasser 4(5), 170-175.