

Kombinierte „Pump-and-treat“-Barrieren-Systeme, Teil I: Minimierung der Grundwasserentnahmerate durch hydraulische Zusatzmaßnahmen

Peter Bayer, Michael Finkel, Georg Teutsch

Kurzfassung

Das „Pump-and-treat“-Verfahren ist trotz seiner durch Schadstofffreisetzungsraten und -rückhalt bekanntermaßen limitierten Sanierungsleistung aufgrund seiner Einfachheit und Flexibilität ein nach wie vor häufig in der Sanierungspraxis angewendetes Verfahren. Als Konsequenz aus den Erfahrungen der Vergangenheit ist diese Technologie jedoch von vornherein auf sehr lange Betriebszeiten (> 30 Jahre) auszulegen. Damit werden die Betriebskosten zum entscheidenden ökonomischen Faktor. In dieser Arbeit werden verschiedene kombinierte „Pump-and-treat“-Barrieren-Systeme (PT+) vorgestellt, bei denen mittels hydraulischer Zusatzmaßnahmen eine Reduzierung der zur Sicherung eines Schadensherdes bzw. einer Verdachtsfläche erforderlichen Grundwasserentnahmerate erreicht wird. Hierbei wird auf eine Minimierung der mit Grundwasserförderung und -aufbereitung verbundenen Betriebskosten abgezielt. In einer systematischen Szenarienanalyse werden zahlreiche Konfigurationen hydraulischer Barrieren und/oder Abwehrbrunnen untersucht und optimale Anordnungen bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Grundwasserentnahmerate mit PT+ um bis zu 90 % des ursprünglichen Grundwasservolumenstroms durch den Schadensherd (der Verdachtsfläche) reduziert werden kann. Die vorliegende Arbeit liefert die Grundlage für eine vergleichende Kostenanalyse von PT+ und konventionellen „Pump-and-treat“-Sanierungskonzepten (BAYER et al. 2004).

Abstract

Pump-and-treat-Systems in Combination With Hydraulic Barriers – Part I: Minimising the Pumping Rate by Auxiliary Hydraulic Measures.

In spite of its well-known limitations caused by slow contaminant dissolution and retarded contaminant transport in groundwater, pump-and-treat is still widely applied due to its simplicity and flexibility. As a result of past experiences, pump-and-treat should be planned as a long-term measure (> 30 years). Consequently, operating and maintenance costs (OMC) become the major economical factor. This paper presents various enhanced pump-and-treat concepts that aim at minimising OMC by reducing the pumping rate necessary to capture the contaminated area by means of additional hydraulic measures. Numerous configurations of hydraulic barriers and protecting ‘clean-water’ wells are systematically analysed and optimal solutions are determined. The results demonstrate that enhanced pump-and-treat concepts can reduce the pumping rate of a downgradient well by up to 90 % of the original groundwater flow rate through the contaminated area. The presented study serves as the basis for the comparative cost analysis of conventional and enhanced pump-and-treat concepts (BAYER et al. 2004).

Einführung

Das sogenannte „Pump-and-treat“-Verfahren ist in seiner Anwendung seit Beginn der 80er Jahre die wohl am häufigsten zur Sanierung von Altlasten angewendete Methode. Die Einfachheit und Flexibilität des Konzepts der Förderung („pump“) und oberflächigen Aufbereitung („treat“) von kontaminiertem Grundwasser im Abstrom einer Verdachtsfläche und die verhältnismäßig geringen Investitionskosten führten zu einer weiten Anwendung des Verfahrens. Wie die Erfahrungen der letzten 20 Jahre zeigen, wurde jedoch die Effizienz von „Pump-and-treat“ hinsichtlich seiner Sanierungsleistung überschätzt. Mit wenigen Ausnahmen

Dr. P. Bayer, Dr. M. Finkel, Prof. Dr. G. Teutsch,
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften,
Universität Tübingen,
Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen,
Telefon: 07071-2973178, Telefax: 07071-5059,
E-Mail: peter.bayer@uni-tuebingen.de

Eingang des Beitrages: 08.08.2003
Eingang des überarbeiteten Beitrages: 12.05.2004

wurde an keinem Standort eine Sanierung des Schadensherds im eigentlichen Sinne, d. h. eine Abreinigung des Untergrunds bzw. Grundwassers bis unter die vorgegebenen Grenz- oder Prüfwerte innerhalb der veranschlagten Sanierungszeiten erreicht (z. B. U.S. NRC 1994). Gründe hierfür sind die langfristig durch geringe Freisetzungsraten und verzögerten Transport im Grundwasser limitierten Schadstoffausträge an den Entnahmestellen. An vielen Standorten ist – wenn überhaupt – erst in Jahrzehnten mit der vollständigen Extraktion der Schadstoffe aus dem Untergrund bzw. Grundwasser zu rechnen (U.S. EPA 1996). Das „Pump-and-treat“-Verfahren ist demzufolge weniger als Sanierungsverfahren, sondern vielmehr als Sicherungsmaßnahme zu sehen, das – vorausgesetzt der Schadensherd wurde nicht oder nur unvollständig entfernt – von vornherein auf sehr lange Betriebszeiten (> 30 Jahre) einzustellen ist. Bei einer auf Jahrzehnte dauernden Betrieb ausgelegten Planung werden die Betriebskosten, also die jährlich zu erbringenden finanziellen Aufwendungen für die Grundwasserförderung und -aufbereitung, zum entscheidenden ökonomischen Faktor. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit zusätzliche Maßnahmen, die zu einer Reduzierung der zur Schadenssicherung erforderlichen Grundwasserentnahmerate führen, zu effizienteren und ökonomisch attraktiveren Varianten des „Pump-and-treat“-Verfahrens beitragen können. Inspiriert von den Ergebnissen vorausgehender Einzelfallstudien (AHLFELD et al. 1987, JOHNSON & BOWEN 1993, MARRYOTT 1996) werden in der hier vorgestellten Studie die möglichen Vorteile, die sich aus der Einrichtung zusätzlicher hydraulischer Kontrolleinrichtungen ergeben, systematisch analysiert. Im ersten Teil der Arbeit wird die hydraulische Wirkung verschiedener PT+-Verfahrensvarianten anhand eines prinzipiellen Kontaminationsszenarios untersucht. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für den zweiten Teil der Arbeit, die allgemeine Kostenanalyse von PT+-Verfahren (BAYER et al. 2004).

Methodik der systematischen Analyse von PT+-Sanierungskonzepten

Klassifizierung des Spektrums möglicher Designalternativen

Für die systematische Suche der für eine Reduzierung der Entnahmerate am besten geeigneten Anordnung von Entnahmestellen und der hydraulischen Zusatzeinrichtungen wird das breite Spektrum möglicher geometrischer Designalternativen untergliedert in verschiedene Konfigurationen, Szenarien und Varianten. Unter einer Konfiguration wird hierbei eine bestimmte Anordnung von Entnahmestellen zur Förderung von kontaminiertem Grundwasser verstanden. Mithilfe der Definition von Szenarien werden die Alternativen in Bezug auf die wesentlichen Designmerkmale der zusätzlichen hydraulischen Maßnahmen klassifiziert. Beispielsweise wird unterschieden zwischen Alternativen, bei denen u. a. sogenannte Abwehrbrunnen oberstromig der Verdachtsfläche eingesetzt werden, und solchen Alternativen, bei denen ausschließlich hydraulische Barrieren als zusätzliche Maßnahmen zum Einsatz kommen. In verschiedenen Varianten wird innerhalb der einzelnen Szenarien untersucht, wie sich die Änderung von Barrierenlängen und Förderraten an Abwehrbrunnen auf die erforderliche Entnahmerate kontaminierten Grundwassers auswirkt.

Welche und wie viele Szenarien definiert bzw. gewählt werden, bestimmt der jeweilige Bearbeiter in Abhängigkeit von der Fragestellung am betrachteten Standort. Angesichts des mit zunehmender Varianten- und Szenarienanzahl steigenden Rechenaufwandes ist jedoch ein zweistufiges Vorgehen empfehlenswert: in einem ersten Schritt werden viele Szenarien mit wenigen Varianten und Konfigurationen untersucht und eine Szenarien-Vorauswahl getroffen, im zweiten Schritt werden diese (erfolgversprechenden) Szenarien im Detail, also unter Berücksichtigung einer wesentlich größeren Anzahl an Konfigurationen und Varianten als zuvor, analysiert.

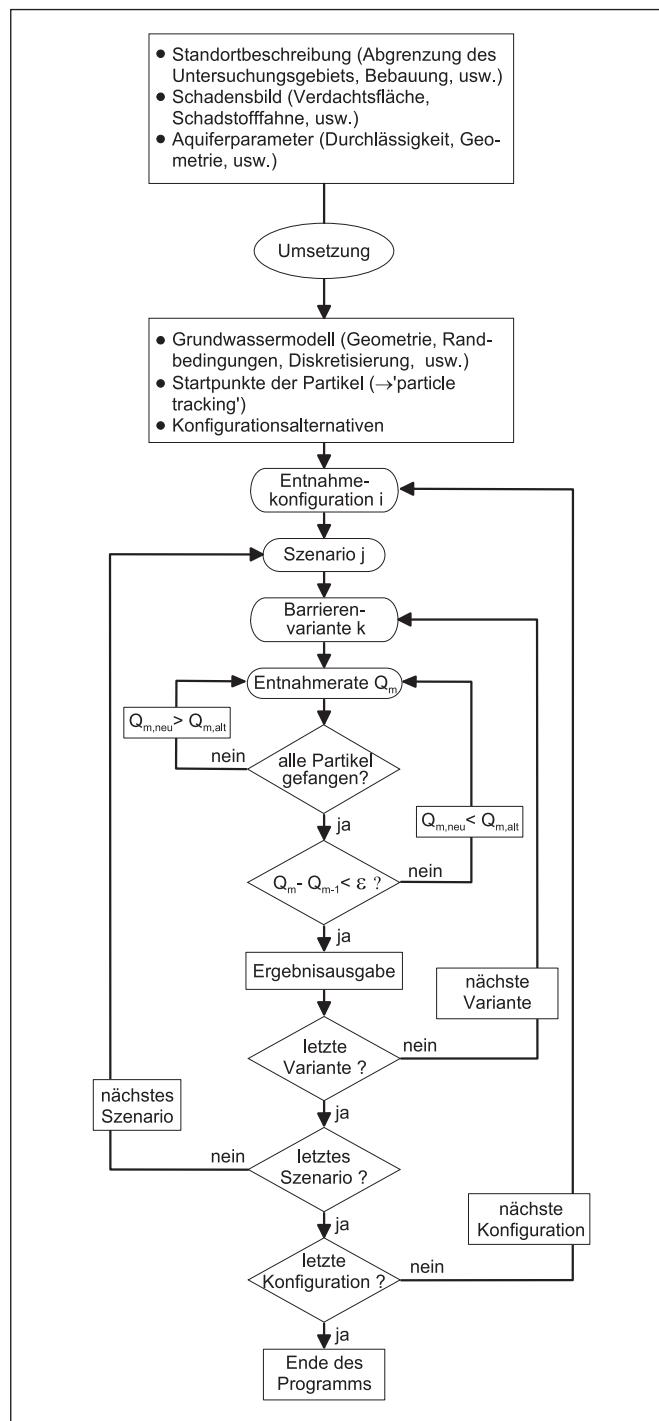


Abb. 1: Ablaufschema der systematischen Analyse.

Ausgangsszenario

Für den Vergleich verschiedener PT+-Konzepte wird hier ein Referenzszenario eines homogenen, isotropen Aquifers mit stationären, gespannten Grundwasserströmungsverhältnissen betrachtet. Weiter wird in diesem Beispiel von einer quadratischen Verdachtsfläche ausgegangen, in der kontinuierlich Schadstoffe in das Grundwasser emittiert werden. Der kontaminierte Grundwasserabstrom wird durch einen zentral positionierten Entnahmestollen gefasst. Für die numerische Berechnung der Grundwasserströmung wird ein zweidimensionales, horizontal-ebenes Grundwasserströmungsmodell mit einem äquidistanten Modellgitter (Zellgröße 1×1 m, 300×300 Zellen) verwendet. Die quadratische Verdachtsfläche erstreckt sich zentral über 50×50 Zellen. Festpotenziale am nördlichen und südlichen Rand sowie „No flow“-Randbedingungen im Westen und Osten erzeugen einen gleichmäßigen N-S-Gradienten.

Ablauf der systematischen Analyse

Grundlage für die systematische Analyse der Designalternativen ist die Umsetzung der am betrachteten Standort vorliegenden hydrogeologischen und hydrologischen Verhältnisse in ein Grundwasserströmungsmodell, das geeignet ist, die Bedingungen am Standort wiederzugeben. Dieses Modell dient als sogenanntes Basismodell zur Simulation der hydraulischen Wirkung möglicher Alternativen. Die Simulation erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden mithilfe des Grundwasserströmungsmodells die durch das jeweils untersuchte „Pump-and-treat“-System veränderten Grundwasserströmungsverhältnisse berechnet. Hierzu wird das USGS-Programm MODFLOW (McDONALD & HARBAUGH 1988) verwendet. In einem zweiten Schritt wird die Lage der von der Schadensfläche ausgehenden Schadstofffahne mittels eines „Particle-tracking“-Algorithmus (Programm MODPATH; POLLOCK 1988, 1994) beschrieben. Gleichzeitig wird kontrolliert, ob die hydraulische Sicherung der Schadensfläche durch den/die Entnahmestollen gewährleistet ist (alle Partikel gefangen?). Im Rahmen der systematischen Analyse werden diese Berechnungsschritte wiederholt durchgeführt, wobei der gewählten Klassifizierung der Designalternativen entsprechend verschiedene Programmschleifen durchlaufen werden (Abb. 1). Für jede Designalternative wird die zur Sicherung der Schadensfläche erforderliche Mindestentnahmerate bestimmt.

Szenarienanalyse

Ausgewählte Szenarien von PT+-Sanierungskonzepten

Insgesamt werden acht Sanierungsszenarien untersucht, die in Abbildung 2 schematisch dargestellt sind. Als *zusätzliche Maßnahmen* in Form von hydraulischen Kontrolleinrichtungen werden sowohl Pumpbrunnen oberstromig der Schadensfläche (Abb. 2f–2h) als auch hydraulische Barrieren an den Rändern der Schadensfläche (Abb. 2b–2e, 2g, 2h) betrachtet. Die Lage der oberstromigen Pumpbrunnen und die Höhe der Entnahmerate wird dabei so angepasst, dass das Einzugsgebiet der Brunnen nicht in die Schadensfläche reicht, also nur unkontaminiertes Grundwasser gepumpt wird, das nicht aufbereitet werden muss.

Untersucht man den Nutzen hydraulischer Barrieren (Spundwände, Schlitzwände, usw.) bei Grundwassersanierung bzw. -sicherungsmaßnahmen, so muss auch eine Gesamtumschließung der Verdachtsfläche als Alternative in Betracht gezogen werden. Diese Tiefbaumaßnahme kann selbstverständlich auch zur vergleichenden monetären Bewertung einbezogen werden, ist jedoch nicht Gegenstand dieses Artikels. Es gilt zu beachten, dass vielfach die prognostizierte Gesamtdichtigkeit der Umschließung (Seiten- oder Basisabdichtung) nicht erreicht wird und trotz vollständiger Umschließung zusätzlich gepumpt werden muss (siehe z. B. U.S. NRC 1997). Bei einer teilweisen Umschließung in Kombination mit einer „Pump-and-treat“-Sanierung ist dieses Risiko aufgrund der unterstromigen Sicherung durch den bzw. die Entnahmestollen ungleich geringer, sodass in der Regel von weiteren Kontrolleinrichtungen abgesehen werden kann.

Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse

Dem Gesetz von Darcy entsprechend bzw. nach der analytischen Lösung von JAVANDEL & TSANG (1986) zur Berechnung der Geometrie der Fassungszone eines vollständigen Brunnens in einer parallelen Grundströmung (homogen-isotroper gespannter Aquifer konstanter Mächtigkeit) ist die Pumprate Q eines Brunnens direkt proportional zur Transmissivität T des Aquifers, zum hydraulischen Gradienten I und zur Breite w der Fassungszone (hier: Breite der Schadens- bzw. Verdachtsfläche). Normiert man das Ergebnis der numerischen Berechnung, die erforderliche Mindestentnahmerate Q_m , mit den entsprechenden Modellparametern (T_m, I_m, w_m), so ergibt sich als Maß für die Mindestentnahmerate die dimensionslose Größe Q' :

$$[1] \quad Q' = \frac{Q_m}{T_m \cdot I_m \cdot w_m} .$$

Für das Szenario A (keine zusätzlichen hydraulische Kontrolleinrichtungen), welches als Referenz für die Szenarien B bis H (vgl. Abb. 2b–2h) dient, ergibt sich $Q' = 2$, falls der Pumpbrunnen zur Entnahme kontaminierten Wassers unmittelbar auf dem unterstromigen Rand der Verdachtsfläche eingerichtet wird. Vergrößert man den Abstand des Brunnens von der Verdachtsfläche, so reduziert sich die erforderliche Pumprate, Q' strebt asymptotisch gegen 1, d. h. die Pumprate Q_m nähert sich dem Grundwasservolumenstrom durch die Verdachtsfläche $Q_D = T_m \cdot I_m \cdot w_m$, der im Folgenden auch als Darcy-Durchflussrate bezeichnet wird (vgl. BAYER et al. 2003). Im Hinblick auf die Bewertung der PT+-Szenarien ist zu beachten, dass dieser Grenzwert ($Q' = 1$) für das Referenzszenario A einer konventionellen „Pump-and-treat“-Maßnahme nicht unterschritten werden kann.

Über die für das jeweils betrachtete Szenario erforderliche spezifische Mindestentnahmerate Q' lässt sich die Mindestentnahmerate Q für andere Verdachtsflächenbreiten, hydraulische Durchlässigkeiten und/oder Gradienten berechnen: Mit T und I als effektive Werte der Transmissivität bzw. des hydraulischen Gradienten und w als Breite der Verdachtsfläche gilt:

$$[2] \quad Q(x, w, b) = w \cdot T \cdot I \cdot Q' \left(\frac{x}{w} = \frac{x_m}{w_m}, \frac{b}{w} = \frac{b_m}{w_m} \right),$$

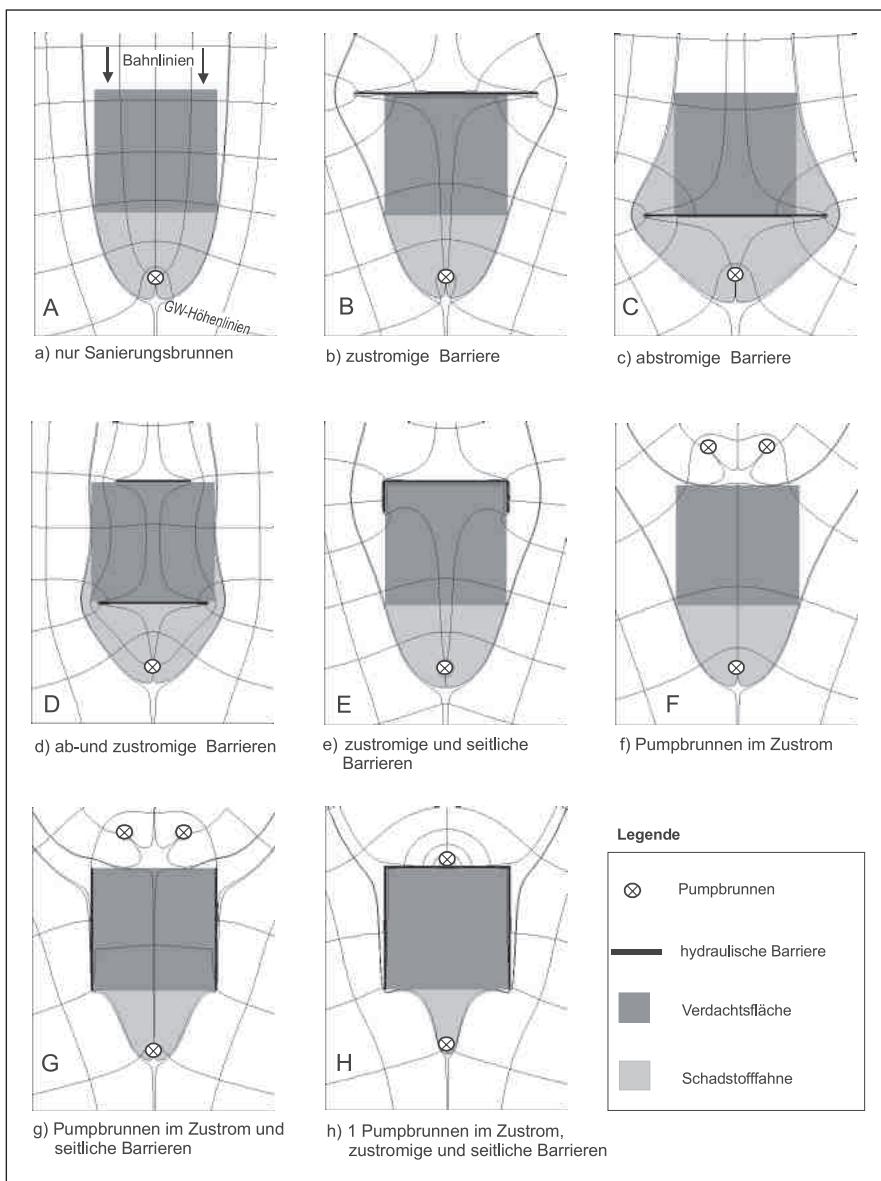


Abb. 2: Untersuchte Sanierungsszenarien innovativer „Pump-and-treat“-Konzepte.

wobei x der Abstand des unterstromigen Entnahmehunnens von der Verdachtsfläche und b die Barrierenlänge ist (vgl. Abb. 3). Unter Berücksichtigung der den Sanierungsszenarien zu grunde liegenden vereinfachenden Annahmen und bei Einhaltung der Längenverhältnisse x/W und b/W lassen sich die nachfolgenden Ergebnisse der Szenarienanalyse durch Anwendung von Gleichung 2 auch dazu verwenden, für reale Standorte erste Abschätzungen zu der möglichen Reduzierung der Entnahmerate durch zusätzliche hydraulische Maßnahmen zu treffen.

Ergebnisse der Szenarienanalyse

Sanierungsbrunnen in Kombination mit Dichtwänden

Die unterschiedlichen Anordnungsmöglichkeiten von Dichtwänden um eine Verdachtsfläche werden in vier Szenarien zusammengefasst (Abb. 2b–2e). Die hydraulischen Barrieren werden unmittelbar entlang der Verdachtsfläche positioniert, wobei den zugrundeliegenden Annahmen (homogener Aquifer, gleich-

förmige Grundströmung) zufolge nur seitensymmetrische Anordnungen berücksichtigt werden. Je Szenario wird in einzelnen Varianten die Gesamtlänge b der Barriere(n) systematisch verändert. Welche Bedeutung die Wahl der Barrierenanordnung auf die erwünschte Reduzierung der erforderlichen Entnahmerate Q' hat, zeigt ein Vergleich der Auswirkungen einer oberstromig der Verdachtsfläche positionierten Barriere (Szenario B) und einer unterstromig positionierten Barriere (Szenario C). Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, bewirkt die unterstromig angeordnete Barriere bei gleicher Barrierenlänge (dargestellt als b/w , d. h. im Verhältnis zur Verdachtsflächenbreite w) in allen untersuchten Fällen eine größere Reduzierung von Q' . Gleichzeitig führt eine Vergrößerung der Distanz x des Sanierungsbrunnens zur Verdachtsfläche grundsätzlich zu geringeren spezifischen Pumpraten Q' . Wie auch für alle anderen aufgeführten Szenarien gezeigt werden konnte, wirkt sich hier die mit wachsender Entfernung zum Entnahmehunnen zunehmende Entnahmefläche des Brunnens günstig aus. Bemerkenswert ist weiterhin, dass der Einfluss einer hydraulischen Barriere immer

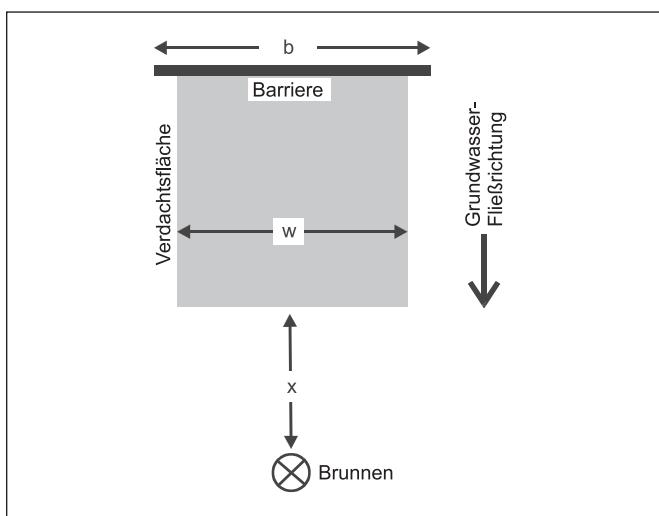


Abb. 3: Geometrische Bezugsgrößen für das Szenario mit oberstromiger Barriere (Szenario B).

unter Berücksichtigung des gewählten Brunnenabstandes x zu beurteilen ist. So führt Szenario C bei kleinen Abständen ($x/w < 1$) zu einer deutlich größeren Q' -Reduzierung als Szenario B, während sich die Ergebnisse für die beiden Barrieren-Szenarien bei großen Abständen ($x/w > 3$) nur noch geringfügig unterscheiden. Zu beachten ist, dass durch den gezielten Einsatz hydraulischer Kontrolleinrichtungen Q' deutlich unter die Darcy-Durchflussrate ($Q' = 1$) reduziert werden kann.

Mit Szenario D wird untersucht, inwieweit die Anordnung von hydraulischen Barrieren sowohl im Zu- als auch Abstrom einer Verdachtsfläche vorteilhaft gegenüber Lösungen mit Einzelbarrieren sein kann. Abbildung 5 verdeutlicht, dass für Gesamt-

Barrierenlängen $b/w = 1$ die optimale Kombination einer ober- und unterstromigen Barriere zu einer größeren Reduzierung von Q' gegenüber Szenario A (keine Barrieren) führt, als dies mit den Szenarien B und C möglich ist (bei gleicher Barrierengesamtlänge b/w). Für jede Gesamtlänge ergibt sich dabei eine andere optimale Verteilung der Längen von ober- und unterstromig angeordneter Barriere (b_o bzw. b_u). Für $b/w = 2$ führen zwei Barrieren der gleichen Länge ($b_u = b_o = w = b/2 \leftrightarrow b_u/w = 1$) zur größtmöglichen Reduzierung von Q' . Für kleinere Gesamtlängen ($b/w < 2$) zeigt sich zunehmend der Einfluss der günstigeren unterstromigen Barrierenlage. In diesen Fällen ergeben sich Optima für Kombinationen mit einer längeren Barriere im Abstrom der Verdachtsfläche ($b_u/w > b/2$). Bei $b/w = 0,5$ führen alle Varianten des Szenarios D zu höheren spezifischen Pumprraten Q' als Szenario C, d. h. eine einzelne, unterstromig angeordnete Barriere ist jeder möglichen Kombination aus ober- und unterstromig positionierter Barriere vorzuziehen.

Die optimale Verteilung von b_o und b_u ist abhängig von der gewählten Distanz des Pumpbrunnens zur Verdachtsflächenbreite x/w : je näher der Pumpbrunnen an der Verdachtsfläche positioniert ist, desto größer wird der Anteil von b_u an b für die jeweils optimalen Verteilungen der Barrierenlängen (Abb. 6). In einem weiteren Szenario (E) wird die Wirksamkeit von Barrieren untersucht, welche die Verdachtsfläche im Zustrom und an den Seiten umschließen (Abb. 2e skizziert eine Teilumschließung beider Seiten). Bei einer maximalen Länge von $b/w = 3$ sind beide Seiten der Verdachtsfläche vollständig umschlossen. Wie in Abbildung 7 dargestellt führt diese Barrierenkonfiguration, verglichen mit den Szenarien B bis D, zur kleinsten Pumprrate, welche auf ein Zehntel der Darcy-Durchflussrate durch die Verdachtsfläche minimiert wird. Dabei wirkt sich eine Veränderung der Barrierenlänge im Bereich $2 \leq b/w \leq 3$ besonders sensitiv auf die Reduzierung von Q' aus.

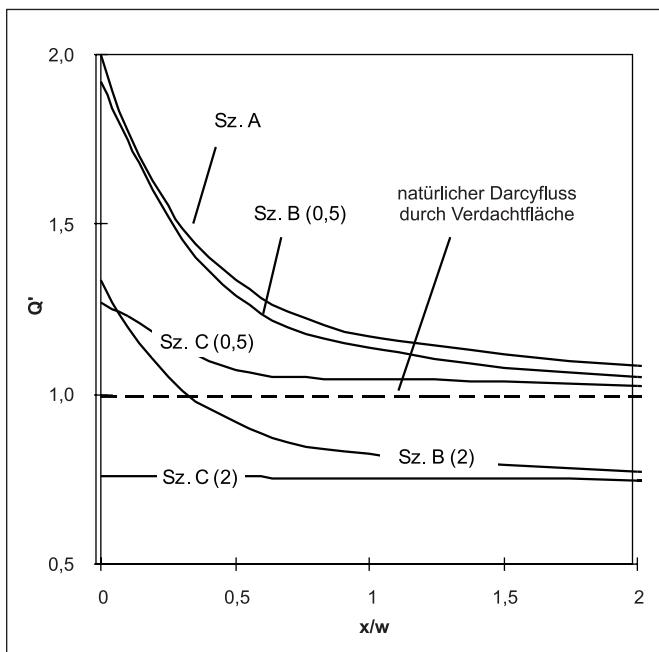


Abb. 4: Spezifische (normierte) Pumprate Q' in Abhängigkeit von der Distanz des Sanierungsbrunnens zur Verdachtsfläche x/w (Szenarien A, B und C). Die Barrieren messen eine halbe ($b/w = 0,5$) bzw. die doppelte ($b/w = 2$) Verdachtsflächenbreite.

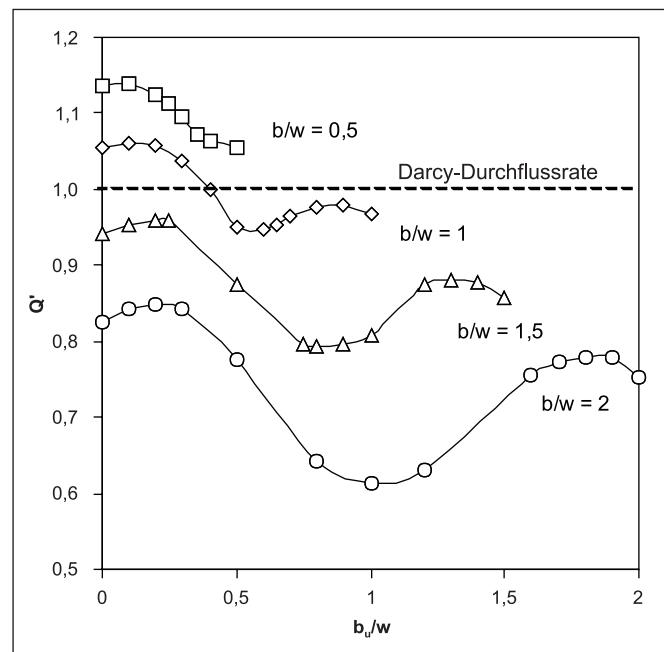


Abb. 5: Änderung der spezifischen Pumprate Q' für unterschiedliche Längenannteile der abstromigen Barriere an der Barrierengesamtlänge b/w für $b/w = 0,5; 1; 1,5; 2$ (Szenario D). Der Abstand des Sanierungsbrunnens beträgt eine Verdachtsflächenbreite ($x = w$).

Sanierungsbrunnen mit oberstromigen Pumpbrunnen bzw. Drainagen

In der Sanierungspraxis werden neben hydraulischen Barrieren auch Abwehrbrunnen oder Drainagen im Zustrom einer Verdachtsfläche eingesetzt, um den Grundwasserstrom durch einen kontaminierten Bereich zu reduzieren bzw. die Ausbreitung von Schadstoffen im Grundwasser zu kontrollieren. Innerhalb des Szenarios F werden Varianten mit zwei bis sechs linear und äquidistant im Zustrom der Verdachtsfläche angeordneten Abwehrbrunnen untersucht (Abb. 2f stellt eine Variante mit zwei Abwehrbrunnen dar). In allen Varianten entspricht die normierte Gesamtpumprate Q'_2 der Abwehrbrunnen der zu einer vollständigen hydraulischen Abschirmung der Verdachtsfläche im Oberstrom erforderlichen spezifischen Mindestentnahmerate. Gleichzeitig ist die Lage der Brunnenreihe so optimiert, dass in den Abwehrbrunnen kein kontaminiertes Wasser gefasst wird, die Brunnenreihe aber so nahe wie möglich an der Verdachtsfläche positioniert ist, um eine maximale hydraulische Wirkung zu erzielen.

Abbildung 8 zeigt, dass die Abwehrbrunnen eine deutliche Reduzierung von Q' bewirken, wobei sich Q' jedoch nur für sehr hohe Entnahmeraten an den Abwehrbrunnen ($Q'_2 > 20$) auf ähnlich kleine Werte reduzieren lässt, wie dies durch den Einsatz hydraulischer Barrieren möglich ist. Wie bereits für die hydraulischen Barrieren gezeigt, ist auch die Wirkung zusätzlicher Abwehrbrunnen von dem Verhältnis x/w abhängig: je geringer die Distanz x des Sanierungsbrunnens zur Verdachtsfläche ist, desto größer ist die Verringerung der Pumprate Q' des Sanierungsbrunnens, die durch zusätzliche Abwehrbrunnen erzielt werden kann.

Wird die Brunnenreihe im Oberstrom durch eine senkrecht zur Richtung der hydraulischen Grundströmung angeordneten Drainage ersetzt, so führt dies zu nahezu äquivalenten Resulta-

ten. Bei gleichen Förderraten im Oberstrom unterscheidet sich die Pumprate des Sanierungsbrunnens nur kaum. Dieses Ergebnis bestätigt die Berechnungen von MURDOCH (1994), der die hydraulische Wirkung von Drainagen mit der von Brunnen bzw. Brunnenreihen nähert.

Sanierungsbrunnen mit Dichtwänden und oberstromigen Pumpbrunnen

Kombiniert man die für das Szenario F beschriebene Brunnenreihe mit Dichtwänden, welche die Verdachtsfläche seitlich umschließen (Szenario G, vgl. Abb. 2g), so ist die Verdachtsfläche nicht nur im Oberstrom sondern auch seitlich hydraulisch abgeschirmt. Die zusätzlichen Barrieren führen zu einer weiteren drastischen Verringerung von Q' , insbesondere für $x/w = 0$ (Abb. 8). Interessant ist der Vergleich von Szenario G mit der Variante $b/w = 3$ des Szenarios E, in der allein durch Dichtwände seitlich und im Zustrom eine vergleichbare hydraulische Isolation der Verdachtsfläche erreicht wird. Es zeigt sich, dass eine hohe Förderrate Q'_2 der Brunnenreihe erforderlich ist, um die Dichtwand hydraulisch zu ersetzen bzw. um die gleiche Q' -Reduzierung zu erreichen. Beispielsweise muss für $x/w = 1$ an den Abwehrbrunnen mit dem etwa neunfachen der Darcy-Durchflussrate gepumpt werden, um eine äquivalente Förderrate des Sanierungsbrunnens (hier: $Q' = 0,13$) zu erzielen (vgl. Abb. 7). Mit Szenario H wird eine Kombination der Variante $b/w = 3$ des Szenarios E und eines Pumpbrunnens im unmittelbaren Zustrom analysiert (Abb. 2h). Durch den zusätzlichen Abwehrbrunnen lässt sich Q' jedoch nur geringfügig reduzieren (Abb. 8). Es ergibt sich eine annähernd lineare Beziehung zwischen Q' und Q'_2 . Für Q'_2 besteht ein oberer Grenzwert, dessen Überschreitung zur Förderung kontaminierten Wassers von der offenen unterstromigen Seite der Verdachtsfläche führt.

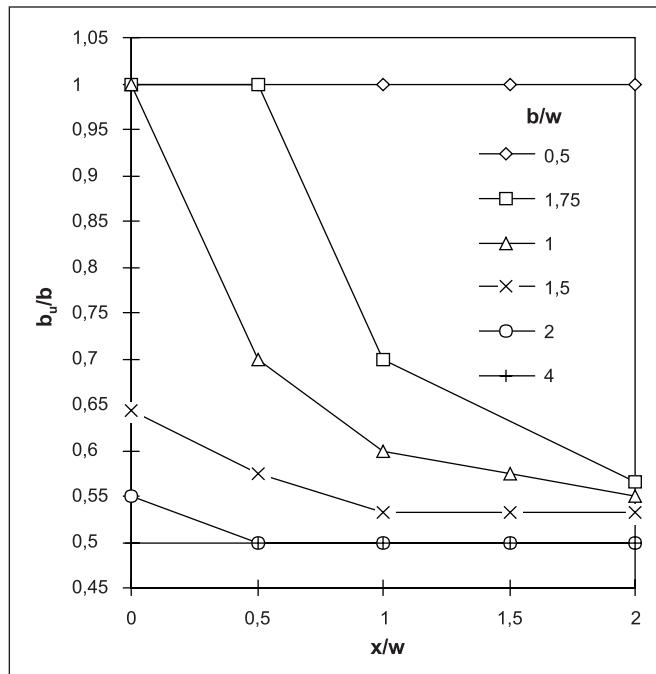


Abb. 6: Optimaler Längenanteil der abstromigen Barriere an der Barriergesamtänge b_u/b ($= 1 - b_o/b$) für variable Distanz des Sanierungsbrunnens x/w und Barriergesamtängen b/w (Szenario D).

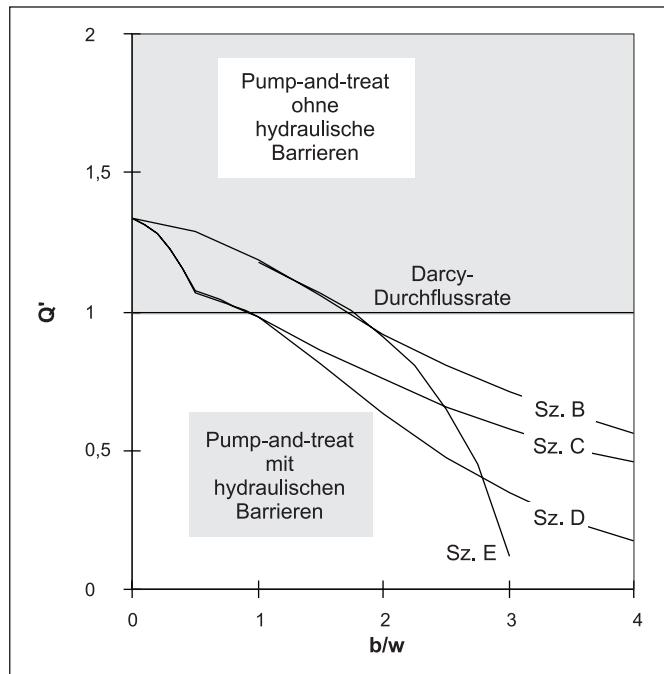


Abb. 7: Vergleich der spezifischen Pumprate Q' für die Barrieren-Szenarien B-E in Abhängigkeit von der Gesamtbarriergesamtänge b/w . Die Distanz des Sanierungsbrunnens beträgt $x/w = 0,5$.

Vergleichbarkeit der Szenarien

Im Hinblick auf die vergleichende Kostenanalyse (BAYER et al. 2004) ist es hilfreich, die beschriebenen Szenarien mit aktiven und passiven Kontrolleinrichtungen in Bezug auf ihre Wirksamkeit zur Reduzierung von Q' vergleichbar zu machen. Hierzu werden die normierten Förderraten oberstromiger Abwehrbrunnen der Szenarien F bis H den hydraulisch äquivalenten normierten Barrierenlängen b/w für die Szenarien B bis E (ausschließlich Dichtwände) gegenübergestellt. In Abbildung 9 ist dies beispielhaft für Szenario F dargestellt (Lage des Pumpbrunnens: $x/w = 0,5$). Jeder spezifischen Pumprate Q' lässt sich für jedes untersuchte Szenario eine normierte Barrierenlänge b/w (Szenario B-E) bzw. oberstromige Förderrate Q'_2 (Szenario F) zuordnen. Zur Veranschaulichung sei ein Beispiel herausgegriffen (in Abb. 9 durch Pfeile dargestellt): Will man mit einer zusätzlichen hydraulischen Maßnahme erreichen, dass die am Sanierungsbrunnen erforderliche spezifische Pumprate Q' auf 1,0 reduziert wird, muss für Szenario F an den oberstromigen Abwehrbrunnen mit einer spezifischen Rate $Q'_2 = 2$ gepumpt werden oder z. B. für die Szenarien D und E die Variante b/w = 1,0 bzw. b/w = 1,8 gewählt werden.

Zusammenfassung

Die systematische Analyse verschiedener PT+-Sanierungskonzepte zeigt, dass durch den gezielten Einsatz zusätzlicher aktiver oder passiver hydraulischer Kontrollmaßnahmen die zur Sicherung eines Schadensherdes bzw. einer Verdachtsfläche erforderliche Grundwasserentnahmerate gegenüber einer konventionellen Anwendung des „Pump-and-treat“-Verfahrens merklich verringert werden kann. Während bei einer konventionellen

Anwendung in allen Fällen eine Entnahmerate erforderlich ist, welche oberhalb des natürlichen Grundwasservolumenstroms durch den Schadensherd (bzw. der Verdachtsfläche) liegt ($Q' > 1$), kann mit PT+-Sanierungskonzepten die erforderliche Pumprate bis auf etwa 10 % dieses Wertes reduziert werden. Es ist offensichtlich, dass sich durch die Reduzierung der Entnahmerate Einsparungen bei den finanziellen Aufwendungen für die Förderung und Aufbereitung des kontaminierten Grundwassers ergeben. Diesen Einsparungen stehen jedoch erhöhte Kosten für die hydraulischen Zusatzmaßnahmen gegenüber. Unter welchen Rahmenbedingungen (Schadstoff-Typ und -Konzentration, Dauer der Maßnahme, Zinssatz, etc.) die Anwendung der vorgestellten PT+-Sanierungskonzepte ökonomisch sinnvoll ist, d. h. zu einer Reduzierung der Gesamtkosten beiträgt, wird im zweiten Teil dieses Artikels im Rahmen eines Kostenvergleichs zwischen konventionellen „Pump-and-treat“-Verfahren und PT+-Sanierungskonzepten untersucht (BAYER et al. 2004).

Für die systematische Analyse wurde ein vereinfachtes Sanierungsszenario herangezogen. Dadurch wird eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ermöglicht, d. h. mittels dimensionsloser Design-Parameter ($b/w, x/w, Q', Q'_2$) lassen sich die Ergebnisse auf beliebige Standortverhältnisse (charakterisiert durch effektive Werte für die Aquifertransmissivität, den hydraulischen Gradienten und die Größe der kontaminierten Fläche) übertragen (Gl. 2). Damit kann die Wirksamkeit hydraulischer Zusatzmaßnahmen an realen Standorten im Sinne einer ersten Abschätzung beurteilt werden. Im Hinblick auf eine detailliertere, eingehende Bearbeitung realer Standorte wird die vorgestellte Methodik zur systematischen Analyse von „Pump-and-treat“-Sanierungskonzepten derzeit erweitert (Berücksichtigung heterogener Aquiferverhältnisse, Einbeziehung von Unsicherheiten, ungespannte Fließverhältnisse).

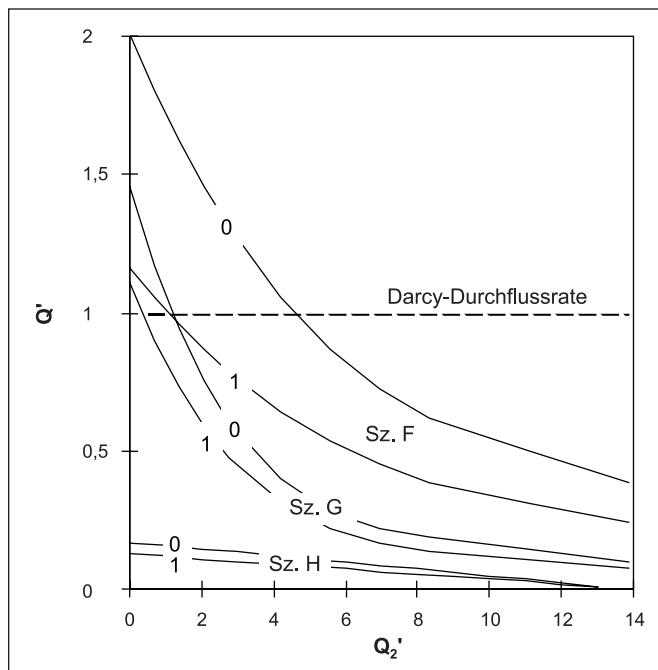


Abb. 8: Abhängigkeit der spezifischen Pumprate Q' des abstromigen Sanierungsbrunnens von der spezifischen Pumprate im Oberstrom Q'_2 und dem gewählten Szenario. Der Abstand des Sanierungsbrunnens von der Verdachtsfläche beträgt $x/w = 0$ bzw. $x/w = 1$.

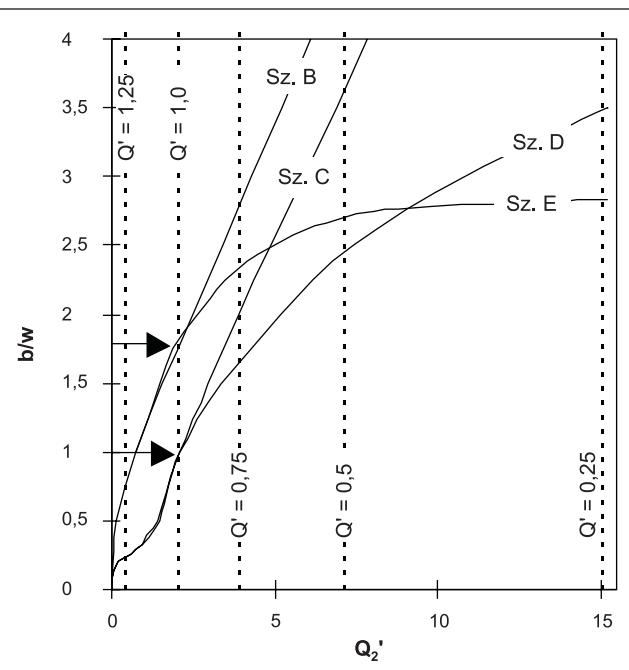


Abb. 9: Vergleich zwischen der Einrichtung von ausschließlich Barrieren (Szenario B bis E, Barrierenlänge b/w) und ausschließlich oberstromigen Pumpbrunnen/Drainagen (spez. Förderrate Q'_2 , Szenario F), um eine spezifische Pumprate des abstromigen Brunnens Q' zu erzielen.

Danksagung

Finanziell unterstützt wurde die vorliegende Arbeit im Rahmen des SAFIRA-Projekts durch das BMBF, Förderkennzeichen 02WT0019. Den beiden anonymen Reviewern danken wir für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und die wertvollen Hinweise.

Literatur

- AHLFELD, D.P., MULVEY, J.M., PINDER, G.F. (1987): Combining physical containment with optimal withdrawal for contaminated groundwater remediation.- *Adv. Wat. Res.* **10** (Dec.): 200–204.
- BAYER, P., FINKEL, M., TEUTSCH, G. (2004): Kombinierte „Pump-and-treat“-Barrieren-Systeme, Teil II: Vergleichende Kostenanalyse. *Grundwasser* **9** (3) (dieses Heft): 181–193.
- BAYER, P., FINKEL, M., Teutsch, G. (2003). Reliability of hydraulic performance and cost estimates of barrier-supported pump-and-treat systems in heterogeneous aquifers. In: KOVAR, K., HRKAL, Z. (Hrsg.): Calibration and reliability in groundwater modelling: A few steps closer to reality - IAHS Publ. **277**: 331–338.
- JAVANDEL, I., TSANG, C.F. (1986): Capture-zone type curves: A tool for aquifer cleanup.- *Ground Water* **24** (4): 616–625.
- JOHNSON, K.D., BOWEN, J.D. (1993): Trade-offs between pumping and slurry walls under changing hydraulic parameters.- In: POETER, E. (Hrsg.): Proceedings of the Groundwater Modeling Conference 1993, Golden, Colorado (US): 2-33-2-41.
- MARRYOTT, R.A. (1996): Optimal ground-water remediation design using multiple control technologies.- *Ground Water* **34** (3): 425–433.
- MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W. (1988): MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model.- U. S. Geological Survey, Open-File Report: 83-875.
- MURDOCH, L.C. (1994): Transient analysis of an interceptor trench.- *Water Resources Research* **30** (11): 3023–3031.
- POLLOCK, D.W. (1988): Semianalytical computation of path lines for finite difference models.- *Ground Water* **26** (6): 743–750.
- POLLOCK, D.W. (1994): User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, version 3: A particle tracking post-processing package for the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model MODFLOW.- Reston, V.A., U. S. Geological Survey.
- U.S. EPA (1996): Pump-and-treat groundwater remediation – a guide for decision makers and practitioners.- United States Environmental Protection Agency, EPA/625/R-95/005, Off. Res. & Developm. US EPA, Washington DC20460.
- U.S.-NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1994): Alternatives for ground-water clean-up. National Academy Press, Washington, USA.
- U.S.-NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1997): Barrier technologies for environmental management summary of a workshop. National Academy Press, Washington, USA.

