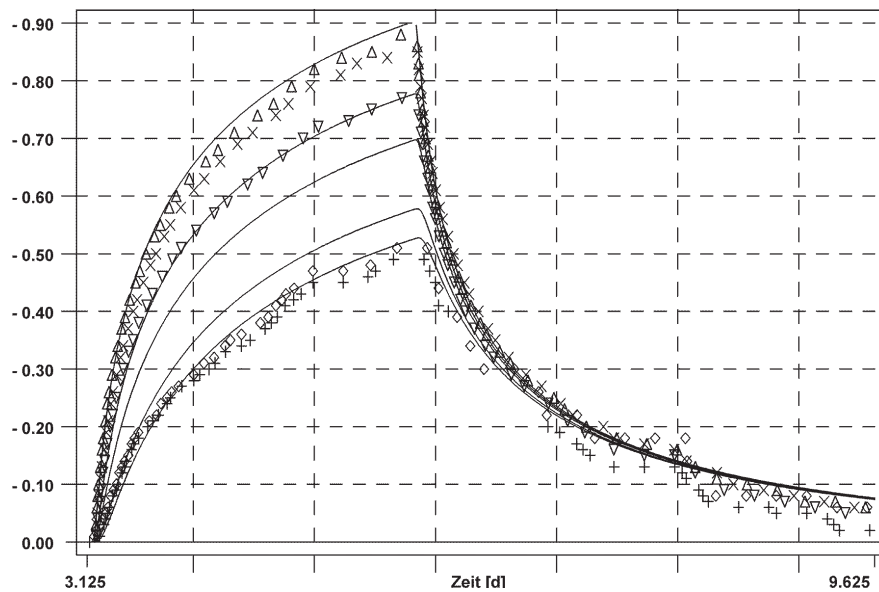


---

Christian A. Gillbricht (Hg.)

# Pumpversuche in der hydrogeologischen Praxis

## Beispiele zu Durchführung und Auswertung



---

Verlegt bei Kay W. Sörensen · Hamburg · 1999

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ohne Zustimmung des Verfassers und des Verlegers ist unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

© Kay W. Sörensen, Hamburg, Dezember 1999

Satz: Kay W. Sörensen

Druck und Bindung: Buch- & Offsetdruckerei Stubbemann GmbH, Hamburg

Kay W. Sörensen · Buchverlag · Mediale Dienstleistungen

Sillemstraße 102 · D-20257 Hamburg · Email: soerenzen-verlag@gmx.de

ISBN 3-932318-04-8

---

## Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen Beispiele aus der Praxis

Vorwort .....	5
1 Durchführung von Pumpversuchen .....	7
1.0 Einführung .....	9
1.1 Pumpversuche in Wasserrechtsverfahren .....	11
1.2 Datenerfassung bei Pumpversuchen mittels Datensammlern .....	21
1.3 Pumpversuche bei langjährig betriebenen Wasserwerken ....	35
2 Auswertung von Pumpversuchen mit analytischen Modellen .....	41
2.0 Einführung .....	43
2.1 Pumpversuche in ungespannten Grundwasserleitern .....	45
2.2 Pumpversuche in ungespannten Grundwasserleitern mit besonderen Versuchsbedingungen .....	53
2.3 Zur Berücksichtigung von Brunnenverlusten .....	59
2.4 Integration von Pumpversuchsauswertung und analytischen Grundwassermodellen .....	67
3 Auswertung von Pumpversuchen mit numerischen Modellen .....	73
3.0 Einführung .....	75
3.1 Einsatz 3-dimensionaler Grundwassermodelle zur Auswertung von Pumpversuchen in hetero- genen Grundwasserleitern .....	77
Autorenverzeichnis .....	87



## **Vorwort**

Die Durchführung und Auswertung hydraulischer Pumpversuche sind Standardaufgaben der Hydrogeologie bzw. Grundwasserhydraulik. Trotz des reichhaltigen Angebotes an Fachschrifttum bestehen beim praktischen Einsatz, der Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen erhebliche Defizite. Dies ist darauf zurückzuführen, daß einerseits die meisten Bearbeiter nur gelegentlich mit diesen Arbeiten befaßt sind, andererseits das Fachschrifttum nur unzureichende Angaben zu »rein handwerklichen« Aspekten macht. Aus diesem Grunde bin ich in der ersten Schrift dieser Reihe (GILLBRICHT, 1996) auf eine Reihe von typischen Bearbeitungsfehlern und Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung eingegangen.

In dieser Nachfolgeschrift sollen weitere Hinweise für die praktische Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen, insbesondere im Licht neuerer Entwicklungen, gegeben werden, sowie an Hand von Beispielen die Vorgehensweise näher erläutert werden. Alle verwendeten Beispiele stammen aus Lockergesteinsgrundwasserleitern der norddeutschen Tiefebene, überwiegend aus dem Großraum Hamburg.

Ich danke allen Autoren sowie zahlreichen Kollegen, die durch Diskussionsbeiträge und die Durchsicht der Manuskripte zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben.

**Literatur**

---

GILLBRICHT, C. A. (1996): Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen.  
– Sörensen: 60 S.; Hamburg

**1**

# **Durchführung von Pumpversuchen**





## Einführung

Hinweise für die praktische Durchführung von Pumpversuchen sind in fast allen einschlägigen Lehr- und Handbüchern der Hydrogeologie bzw. der Grundwasserhydraulik enthalten. Mir ist jedoch kein Text bekannt, der umfassend und auf einem aktuellen Kenntnisstand die handwerklichen Schritte bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche beschreibt. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß die genannten Lehrbücher im Regelfall die Auswertung der Versuche zum Gegenstand haben und die Datengewinnung als »triviale« Handwerksaufgabe ansehen. Diese Vorstellung wird daher oft auch in der Lehre der Hochschulen an den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs weitergegeben. Es besteht daher erfahrungsgemäß die Neigung, Pumpversuche nicht im Detail durchzuplanen, sondern der Verantwortung den ausführenden Firmen, meist Unternehmen des Brunnenbaus, zu übergeben. Diese Herangehensweise führt in vielen Fällen zu einem unnötig niedrigen technischen Standard der Versuchsdurchführung und zu Versuchsanordnungen, die in keinem angemessenen Verhältnis zum Untersuchungsziel stehen. Eine Anhebung der Qualität wäre in den meisten Fällen ohne oder mit geringen Mehrkosten zu erzielen.

In diesem Abschnitt soll daher ausdrücklich das technische Detail der Versuchsplanung und -durchführung im Vordergrund stehen. Der erste Beitrag befaßt sich mit Pumpversuchen im Kontext von Wasserrechtsverfahren, insbesondere der Abschätzung des

Einflusses von Grundwassergewinnungen auf konkurrierende Nutzungen. Der zweite Beitrag erläutert die in den letzten Jahren verstärkt zum Einsatz kommende Möglichkeit der elektronischen Erfassung der Grundwasserstände während des Versuchs. Im dritten Beitrag wird an Hand eines Beispiels die Durchführung eines Großpumpversuchs in einem langjährig betriebenen Wasserwerk dargestellt.

Robert Dési

## **Pumpversuche in Wasserrechtsverfahren**

### *Zusammenfassung*

---

Im Rahmen von Wasserrechtsverfahren sind hydrogeologische Untersuchungen u. a. zur Ermittlung des Einzugsgebietes, des Absenkungsbereiches sowie der durch die geplante Entnahme beeinflussten konkurrierenden Grundwassernutzungen erforderlich. Hierfür stellen Pumpversuche eine sinnvolle Methode dar. Da sowohl die Beeinflussung als auch die Nicht-Beeinflussung durch Messungen nachzuweisen sind, sollten das Meßstellennetz nach möglichen empfindlichen Nutzungen ausgerichtet und die Fördermengen im Pumpversuch nach Menge und Dauer der geplanten Fördercharakteristik angepaßt werden. Sinnvolle Empfehlungen zur Durchführung und Auswertung der Pumpversuche sowie der Ausgleichsmaßnahmen sind nur bei umfassender Kenntnis der hydrogeologischen Wirkungszusammenhänge möglich.

### **Einleitung**

---

Auch in Deutschland steht Grundwasser nicht in beliebigen Mengen und nicht immer in ausreichender Qualität zur Verfügung. Vor allem in Ballungsräumen mit hohen Grundwasserentnahmen bestehen zahlreiche Konflikte zwischen verschiedenen Nutzungen sowie zwischen Nutzungen und natürlichen Grundwasserfunktionen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Grundwasserschutz sowie die Nutzung und Bewirtschaftung des Grundwassers gesetzlich zu regeln. Rechtsgrundlagen für die Nutzung und Bewirtschaftung des Grundwassers sind das Wasserhaushaltsgesetz, die

zuständigen Landeswassergesetze sowie deren Ausführungsbestimmungen.

Nach § 1a, Absatz 1 Wasserhaushaltsgesetz sind Gewässer so zu bewirtschaften, »daß sie dem Wohl der Allgemeinheit ... dienen und daß jede vermeidbare Beeinträchtigung unterbleibt«. Das Niedersächsische Wassergesetz führt diesen Punkt z. B. wie folgt weiter aus (§ 2, Absatz 2):

»Das Wohl der Allgemeinheit erfordert insbesondere, daß

1. nutzbares Wasser in ausreichender Menge und Güte zur Verfügung steht und die öffentliche Wasserversorgung nicht gefährdet wird,

...

5. die Bedeutung der Gewässer und ihrer Uferbereiche als Lebensstätte für Pflanzen und Tiere und ihre Bedeutung für das Bild der Landschaft berücksichtigt werden, ...«.

Für die Nutzung des Grundwassers ist i. d. R. die Erteilung eines Wasserrechtes durch die zuständige Wasserbehörde erforderlich.

Hinsichtlich der Bewilligung eines Wasserrechtes führt § 8, Absatz 3 Wasserhaushaltsgesetz aus: »Ist zu erwarten, daß die Benutzung auf das Recht eines anderen nachteilig einwirkt und erhebt der Betroffene Einwendungen, so darf die Bewilligung nur erteilt werden, wenn die nachteiligen Wirkungen durch Auflagen verhütet oder ausgeglichen werden ...«.

Nach den ersten Ausführungsbestimmungen (vom 22.02.85) zum Niedersächsischen Wassergesetz sind im wasserrechtlichen Antrag u. a. die voraussichtlichen Wirkungen zu beschreiben auf:

- Gewässergüte,
- Fischbestand,
- Grundwasserstand oder Wasserstand im oberirdischen Gewässer,
- Boden und Kulturzustand der betroffenen Grundstücke,
- Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes sowie auf Landschaftsbild.

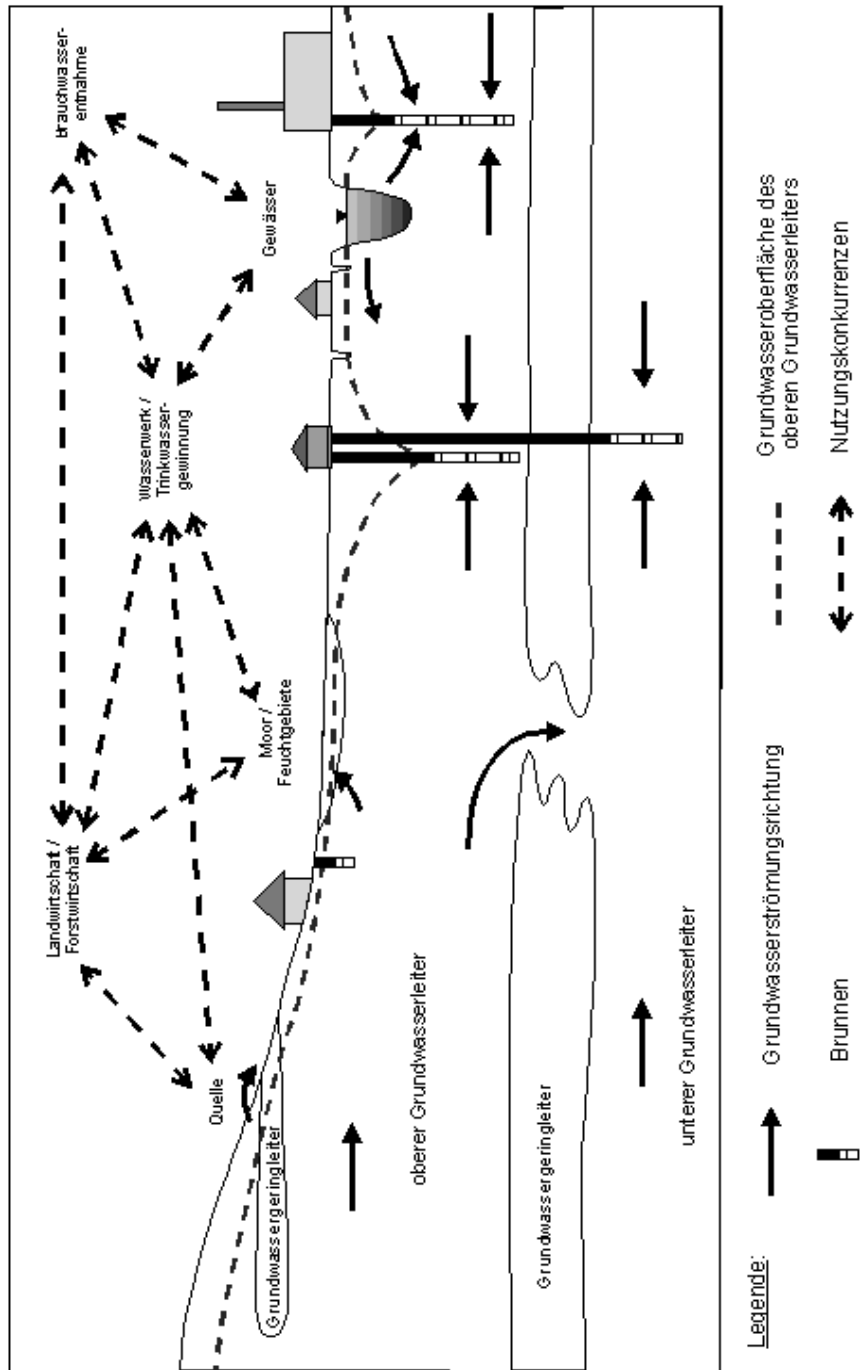
Aufgrund dieser Bestimmungen ist mit der Beantragung eines Wasserrechtes für eine Grundwasserentnahme in der Regel ein hydrogeologisches Gutachten erforderlich. Im Rahmen des hydrogeologischen Gutachtens sind u. a. folgende Sachverhalte zu ermitteln und zu beschreiben:

- hydrogeologische Wirkungszusammenhänge im möglichen Einflußbereich der Grundwasserentnahme,
- Einzugsgebiet und Absenkungsbereich der Grundwasserentnahme,
- mögliche Betroffene der Grundwasserentnahme und andere empfindliche Nutzungen sowie empfindliche grundwasserabhängige Naturfunktionen innerhalb des Absenkungsbereiches. Hierzu zählen insbesondere folgende potentiell konkurrierenden Nutzungen und Naturfunktionen:
  - vorhandene Grundwasserentnahmen der öffentlichen Trinkwassergewinnung, private Haus- und Bewässerungsbrunnen, gewerbliche Brauchwasserentnahmen,
  - Oberflächengewässer, Quellen, grundwasserabhängige Böden und Biotope,
  - land- und forstwirtschaftliche Nutzungen,
  - setzungsempfindliche Bauwerke sowie
  - Altlasten.

Hinsichtlich der Untersuchung der o. g. Sachverhalte und zum Aufbau hydrogeologischer Gutachten wird auf JOSOPAIT (1996) verwiesen.

Abb. 1.1.1 zeigt Beispiele für potentielle Nutzungskonkurrenzen. Zur Ermittlung der o. g. Sachverhalte ist der Einsatz von speziell angepaßten Pumpversuchen sinnvoll.

Die Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen zur Ermittlung der hydrogeologischen Wirkungszusammenhänge und zur Ermittlung möglicher Betroffener unterscheidet sich von hydrologischen Pumpversuchen oder Leistungspumpversuchen. Aus Kostengründen ist es jedoch meist sinnvoll, alle drei Arten der Pumpversuche miteinander zu kombinieren und innerhalb einer Untersuchung durchzuführen.



**Abb. 1.1.1:** Beispiele für potentielle Grundwassernutzungskonkurrenzen

Hinsichtlich der Planung und Durchführung von hydrogeologischen Pumpversuchen und Leistungspumpversuchen sei auf LANGGUTH & VOIGT (1980), KRUSEMAN & DE RIDDER (1973) sowie auf GILLBRICHT (1996) verwiesen.

### **Hinweise für die Planung und Durchführung von Pumpversuchen in Wasserrechtsverfahren**

---

Pumpversuche in Wasserrechtsverfahren dienen der Ermittlung der hydrogeologischen Wirkungszusammenhänge, der Ermittlung der Auswirkungen der Entnahme auf das hydrologische System sowie der Ermittlung möglicher durch die Entnahme betroffener Nutzungen und Naturfunktionen. Ziel der Pumpversuche ist der Nachweis von durch den Förderbrunnen verursachten hydraulischen Reaktionen (Wasserstandsänderungen) oder der Nachweis des Gegenteils, daß Wasserstandsänderungen nicht durch die Entnahme verursacht werden. Die Höhe und der Zeitpunkt der Wasserstandsänderung sind für den Ausgleich von Beeinträchtigungen und bei der Festlegung von Auflagen von Bedeutung.

In einem ersten Schritt erfolgt auf Basis vorhandener Unterlagen eine Abschätzung des Grundwasserabsenkungsbereiches sowie eine Aufnahme der vorhandenen Grundwassernutzungen (Brunnen, Oberflächengewässer, grundwasserabhängige Naturfunktionen usw.) in diesem Bereich.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Planung des Pumpversuchablaufes sowie die Auswahl der zu beobachtenden Meßstellen (Grundwassermeßstellen, Brunnen und Pegel sowie ggf. Quellschüttungen und Abflußmessungen in Fließgewässern).

Die Pumpversuchsstufen sind an die Betriebsabläufe des Antragstellers anzupassen und sollten hinsichtlich der Förderrate und Dauer charakteristischen Fördersituationen während der Betriebsphase (langfristige mittlere Förderung, Spitzenbedarf usw.) entsprechen. Können die Pumpstufen aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht bis zur Quasi-Stationarität oder wie im

späteren Betrieb durchgeführt werden, sollten zur Ermittlung der möglichen Auswirkungen erhöhte Fördermengen gepumpt werden, um auch in größerer Entfernung vom Brunnen charakteristische Absenkungsbeträge im Förderhorizont zu erreichen.

Um die Auswirkungen anderer Grundwasserentnahmen auf den zu untersuchenden Absenkungsbereich zu ermitteln, sind die Förderraten und Absenkungen dieser Entnahmen ebenfalls zu erfassen.

Für die Auswahl der Meßstellen ist maßgeblich, in welchem Grundwasserleiter gefördert wird und ob die Meßstellen für Aussagen bzgl. der Betroffenheit anderer Grundwassernutzungen geeignet sind. Bei der Planung des Meßprogrammes ist auf die Verhältnismäßigkeit zum beantragten Wasserrecht zu achten.

Dies gilt insbesondere, wenn es sich um eine geplante Förderung aus einem tiefen Grundwasserleiter handelt, aber sich alle möglichen betroffenen Nutzungen und Naturfunktionen in einem oberen Grundwasserleiter befinden und keine Meßstellen im tieferen Grundwasserleiter existieren. In Abstimmung mit der zuständigen Wasserbehörde kann dann ggf. auf den teuren Neubau einer tiefen Grundwassermeßstelle verzichtet werden.

In diesem Fall werden lediglich Meßstellen beobachtet, die die Wasserstände in dem Grundwasserleiter wiedergeben, in dem sich die möglicherweise betroffenen Nutzungen und Naturfunktionen befinden. Da die Ermittlung des Absenkungsbereiches im Förderhorizont dann nicht möglich ist, muß dieser geschätzt werden.

Zur Beurteilung der Betroffenheit von Grundwassernutzungen ist es sinnvoll, die Wasserstände möglichst nah an der betroffenen Nutzung zu messen. Bei Grundwasserstandsmessungen in Hausbrunnen oder in unmittelbarer Nähe der Hausbrunnen ist zu beachten, daß diese Wasserstände durch Eigenförderungen abgesenkt sein können.

Hinsichtlich der Meßzeitpunkte für die Wasserstandsmessungen sind zu Beginn des Pumpversuches in Abhängigkeit von der Entfernung zum Förderbrunnen und von den hydrogeologischen Verhältnissen bei einem gespannten Grundwasserleiter wenige Messungen pro Tag bis hin zu 1 Messung pro Tag bei einem freien Grundwasserleiter ausreichend. Nach einigen Tagen Dauer kann meist bei



allen Meßstellen auf 1 bis 3 Messungen pro Woche umgestellt werden. Entscheidend für die Meßhäufigkeit ist, möglichst eindeutige Reaktionen auf die Förderung festzustellen. Es ist hierfür nicht erforderlich, eine Absenkungskurve mit geringen Meßabständen wie in einem hydrologischen Pumpversuch zu erhalten.

Zur möglichst sicheren Ermittlung von Reaktionen auf die Förderung ist ein mehrfacher Wechsel zwischen Förderung und Fördereinstellung hilfreich. So sollten zwischen verschiedenen Förderstufen jeweils mehrwöchige Einstellungen der Grundwasserförderung eingeplant werden.

Sind sehr empfindliche Grundwassernutzungen möglicherweise durch eine Grundwasserentnahme betroffen oder können nicht alle Nutzungen hinsichtlich ihrer Betroffenheit sicher beurteilt werden, ist die Durchführung einer mehrmonatigen bis mehrjährigen Probeförderung als Erlaubnis zum vorzeitigen Beginn (§ 9a Wasserhaushaltsgesetz) sinnvoll. Durch eine Begleitung der Probeförderung mit einem hydrologischen Monitoring können die Ergebnisse des Pumpversuches auch bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen überprüft werden. Dieses Vorgehen ermöglicht dem Antragsteller, bereits vor der endgültigen Erteilung des Wasserrechtes die beabsichtigte Menge zu fördern. Dem Gutachter und der zuständigen Wasserbehörde ermöglicht dieses Vorgehen Aussagen und Entscheidungen auf Basis langfristiger Datenreihen.

Darüber hinaus ist im Rahmen eines solchen Monitorings die Ableitung erforderlicher Grenz- oder Prüfwasserstände möglich, bei deren Unterschreitung Maßnahmen z. B. hinsichtlich der Beweissicherung oder hinsichtlich einer zeitlich befristeten Fördereinschränkung eingeleitet werden können. Ein mögliches Verfahren zur Bestimmung solcher Grenzwasserstände z. B. für die in Feuchtgebieten ökologisch erforderlichen Grundwasserstände ist in KROB ET AL. (1995) beschrieben.

## Beispiel für einen Pumpversuch im Rahmen eines Wasserrechtsverfahrens

---

In dem vorliegenden Beispiel wurde durch einen Lebensmittelhersteller ein Brunnen mit Verfilterung im unteren Grundwasserleiter gebaut. Während eines Leistungspumpversuches durch das Bohrunternehmen fielen in der Umgebung des Brunnens mehrere private Hausbrunnen trocken.

Die Auswertung vorhandener hydrogeologischer Unterlagen und eine Aufnahme der Hausbrunnen zeigte, daß durch den neuen Brunnen eine Beeinflussung vorhandener Grundwassernutzungen bereichsweise möglich ist. In anderen Bereichen dagegen ist eine Beeinflussung unwahrscheinlich.

Zur Ermittlung der Wirkungszusammenhänge und der beeinflussten Grundwassernutzungen wurde ein 2-stufiger Pumpversuch mit Fördereinstellungen vor, zwischen den beiden Phasen und nach dem Pumpversuch durchgeführt. Die Förderraten betragen in der ersten Stufe 10 m<sup>3</sup>/h (240 m<sup>3</sup>/d) über 14 Tage und in der zweiten Stufe 20 m<sup>3</sup>/h (480 m<sup>3</sup>/d) über 14 Tage. Die später beabsichtigte Entnahmemenge betrug 240 m<sup>3</sup>/d.

Abb. 1.1.2 zeigt beispielhaft den Verlauf der Grundwasserstände während des Pumpversuches. Eine eindeutige Beeinflussung durch beide Pumpstufen zeigen nur die Wasserstände in einem im Förderhorizont verfilterten Hausbrunnen (HB10). Im oberen Grundwasserleiter verfilterte Meßstellen und Hausbrunnen reagieren unterschiedlich auf die Förderung. In der ersten Pumpstufe sind aufgrund von Niederschlägen und der geringen Dauer der Pumpstufe keine Reaktionen im oberen Grundwasserleiter festzustellen. In der zweiten Pumpstufe reagiert die Meßstelle GWM 3. In den Meßstellen GWM 1 und 2 sind keine Reaktionen nachzuweisen. GWM 1 befindet sich in einem Bereich, in dem aufgrund des hydrogeologischen Aufbaues keine Reaktion erwartet wurde. GWM 2 und 3 befinden sich in einem Bereich, in dem Reaktionen aufgrund des hydrogeologischen Aufbaues nicht ausgeschlossen werden konnten.

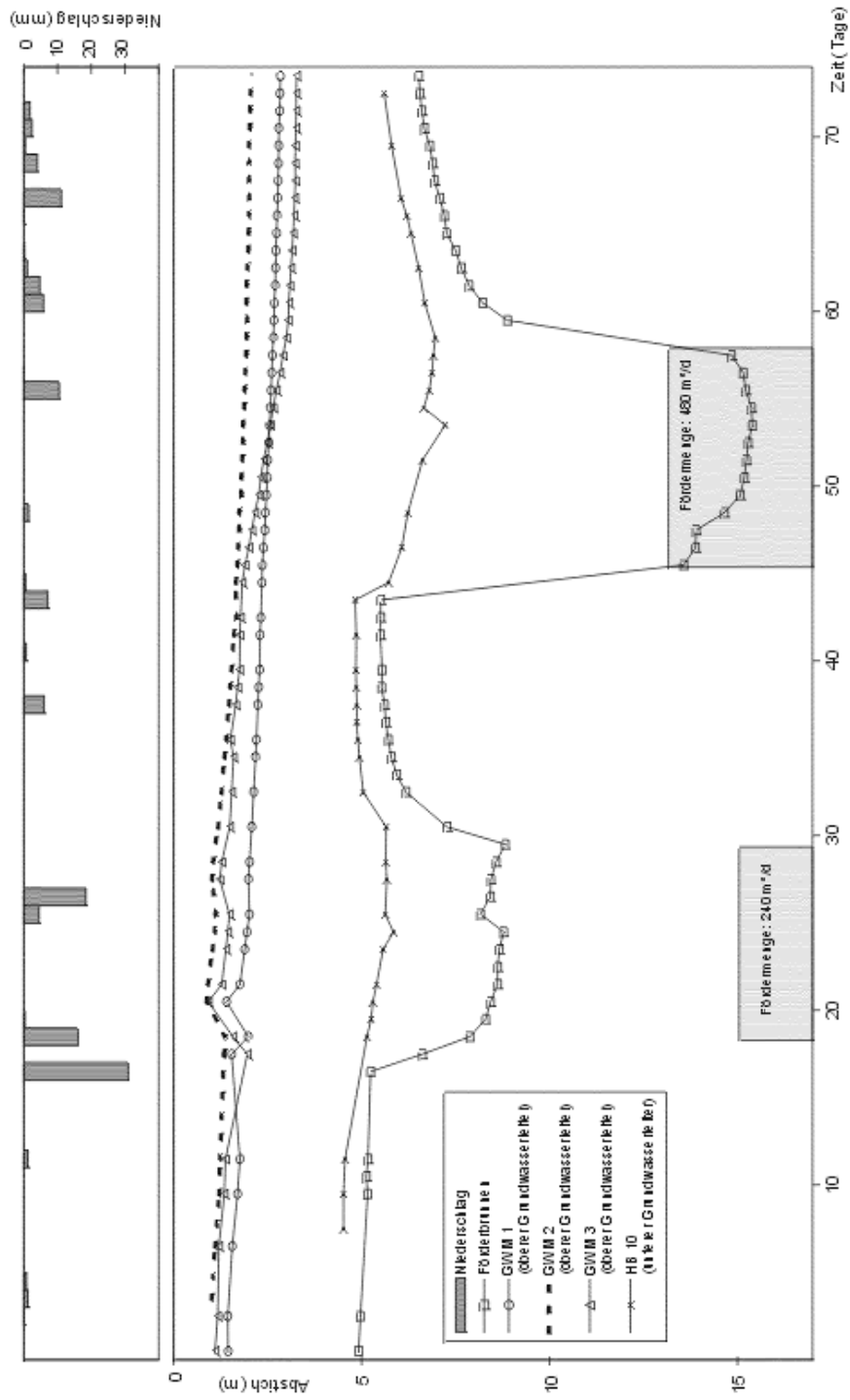


Abb. 1.1.2: Beispiel eines Pumpversuches für ein Wasserrechtsverfahren

Somit wurden mithilfe der hydrogeologischen Untersuchungen und der zweiten Pumpstufe Bereiche mit möglicher Beeinflussung durch die geplante Entnahme von Bereichen unterschieden, in denen eine Beeinflussung unwahrscheinlich ist. Darüber hinaus konnten direkt betroffene Grundwassernutzungen ermittelt werden. Durch eine anschließende mehrjährige Probeförderung mit 240 m<sup>3</sup>/d wurden die Ergebnisse der zweiten Stufe des Pumpversuches bestätigt. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden beeinträchtigte Grundwassernutzungen ermittelt und ausgeglichen.

## Literatur

---

- GILLBRICHT, C. A. (1996): Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen. – Hamburg (Sörensen)
- JOSOPAIT, V. (1996): Überlegungen zu Ziel und Inhalt von hydrogeologischen Gutachten für Wasserrechtsanträge bei Grundwasserentnahmen. – Grundwasser, 1: 137 – 141; Heidelberg
- KROB, L., OBEL, U. & STOLPE, H. (1995): Verfahren zur Bestimmung und Überwachung der in Feuchtgebieten ökologisch erforderlichen Grundwasserstände. – Umweltber. 1: 6 S., Hamburg (Büro Prof. Dr. Harro Stolpe)
- KRUSEMANN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1973): Untersuchung und Anwendung von Pumpversuchsdaten. – Köln-Braunsfeld (Verlagsgesellschaft Rudolf Müller)
- LANGGUTH, H. R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. – Berlin, Heidelberg, New York (Springer)
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIALBLATT (1985): Erste Ausführungsbestimmungen zum Niedersächsischen Wassergesetz (NWG) – Wasserrechtsverfahren. — RdErl. d. ML v. 22.02.1985, 10: 224-225; Hannover
- WASSERRECHT IN NIEDERSACHSEN (1991): Vorschriftensammlung / mit einer erl. Einf. von Eberhard Sander und Reinhard Dietzsch. — 2., neu bearbeitete Aufl., Hannover (Dt. Gemeindeverlag)

Christian A. Gillbricht

## **Datenerfassung bei Pumpversuchen mittels Datensammlern**

### *Zusammenfassung*

---

Seit einigen Jahren werden verstärkt elektronische Datensammler für die Erfassung wasserwirtschaftlicher Daten eingesetzt. Ihre Verwendung zur Erfassung von Grundwasserständen setzt sich auch bei der Durchführung von Pumpversuchen zunehmend durch. Hierfür steht eine Vielzahl Fabrikate mit unterschiedlichen technischen Möglichkeiten zur Verfügung. Die Auswahl geeigneter Meßsysteme muß in jedem Einzelfall auf der Grundlage eines Meßkonzeptes unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte erfolgen.

### **Einleitung**

---

Pumpversuche erfordern eine intensive Beobachtung der Grundwasserstände (und ggf. weiterer Meßgrößen, z. B. Förderrate, meteorologische Parameter, physikalisch-chemische Leitparameter). Bis vor wenigen Jahre erfolgte die Erhebung dieser Daten überwiegend durch manuelle Messungen, insbesondere mit dem Kabellichtlot. Bei größeren Versuchen mit zahlreichen Meßstellen war daher ein großer Personaleinsatz erforderlich. Die schnellen Wasserstandsänderungen am Beginn des Versuchs bzw. bei Änderungen der Förderrate und beim Wiederanstieg konnten oft nicht mit hinreichender zeitlicher Auflösung erfaßt werden. Dies galt auch bei Verwendung von mechanischen Pegelschreibern. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit kostengünstiger und geländetauglicher elektronischer Meßtechnik sind seit Mitte der 80er Jahre Daten-

sammler (Datenlogger) zur automatischen Registrierung von Grundwasserstandsdaten auf den Markt gekommen (DVWK, 1994). Anfänglich dienten sie vornehmlich der Datenerfassung in der routinemäßigen wasserwirtschaftlichen Beweissicherung. In den letzten Jahren werden sie, insbesondere durch die heute größeren Speicherkapazitäten und leistungsfähigeren Auswertungsprogramme verbunden mit der verbesserten Zuverlässigkeit der Geräte (DVWK, 1994) und niedrigeren Anschaffungskosten, zunehmend bei der Durchführung von Pumpversuchen eingesetzt. Dadurch konnten die Datenqualität erheblich verbessert und der Personaleinsatz zum Teil drastisch reduziert werden. Die Geräte haben in der Grundausstattung üblicherweise eine Speicherkapazität für 10000–30000 Meßwerte.

Die meisten heute im Einsatz befindlichen Datensammler zur Grundwasserstandsregistrierung arbeiten als 1-Kanal-Geräte zum Einbau in Grundwassermeßstellen ab einem Innendurchmesser von 50 mm (DN 50, sogenannte 2"-Meßstellen). Daneben gibt es noch ältere Systeme, die erst ab einem Innendurchmesser von 100 mm (DN 100, sogenannte 4"-Meßstellen) eingesetzt werden können. Außerdem gibt es Geräte mit mehreren Datenkanälen, die sich insbesondere für die kurzzeitige Beobachtung im nahen Umfeld um den Förderbrunnen (maximal einige 10er Meter) eignen. Einige Geräte zeichnen neben dem Wasserstand auch physikalisch-chemische Beschaffenheitsdaten (z. B. Temperatur, elektrische Leitfähigkeit) auf. Hierauf wird im folgenden nicht weiter eingegangen.

Neben einfachen Datensammlern sind auch Geräte mit Datenfernübertragung (über Fest- oder Funktelefonnetz) verfügbar. Auf diese wird hier nicht näher eingegangen, da sie für den Einsatz bei Pumpversuchen aus wirtschaftlichen und technischen Gründen bislang noch keine wesentliche Rolle spielen.

## **Meßverfahren**

---

Im folgenden wird nur auf gegenwärtig kommerziell verfügbare Verfahren der Wasserstandsmessung eingegangen. Daneben gibt es

noch eine ganze Reihe weiterer Meßverfahren, die bislang nur im Forschungsbereich bzw. als Prototypen eingesetzt wurden oder heute nicht mehr marktgängig, aber in der Fachliteratur dokumentiert sind. Für alle Meßsysteme gilt, daß beim Einbau in den Förderbrunnen das Meßsystem in einem Peilrohr, entweder eingebaut in die Filterkiesschüttung oder eingestellt in das Brunnenrohr, untergebracht sein sollte.

### *1. Mechanische Wasserstandsmessung über Schwimmer*

Das Meßprinzip der mechanischen Wasserstandsmessung über Schwimmer ist seit Jahrzehnten in Form der mechanischen Pegelschreiber eingeführt und wird von verschiedenen Anbietern in Verbindung mit elektronischer Datenregistrierung angeboten. Dabei handelt es sich bauartlich entweder um eigenständige Meßsysteme oder um Ergänzungen zu vorhandenen Pegelschreibern.

*Vorteile:* relativ robustes und kostengünstiges Gerät; einfache Mechanik, Anpassung an die Meßstellenbedingungen (Einbautiefe, Wasserstandsschwankungsbereich, Durchmesser) und Beseitigung von Störungen vor Ort möglich; einfacher Abgleich mit manuellen Kontrollmessungen;

*Nachteile:* Möglichkeit des »Hängenbleibens« des Schwimmers, insbesondere bei nicht lotrechten Meßstellen oder an nicht vollständig verschraubten Muffenverbindungen; bei Aufhängung in der Abschlußkappe Einfrieren der Umlenkrolle möglich; wenig geeignet für schnelle und starke Änderungen des Wasserspiegels (Förderbrunnen); nicht geeignet für stark lösemittelhaltige Medien (Schwimmer standardmäßig aus Kunststoffen, oft mit Verklebungen); in artesisch gespannten Grundwasserleitern nur in Verbindung mit entsprechend hohen Standrohren einsetzbar.

### *2. Absolut-Drucksonden*

Absolut-Drucksonden messen den Gesamtdruck (in offenen Grundwassermeßstellen: Wassersäule + atmosphärischer Druck) in der Einhängtiefe durch mechanische Deformation eines piezoresistiven Meßwertgebers oder Kapazitätsänderungen einer keramischen Druckmeßzelle.

*Vorteile:* relativ robustes und kostengünstiges Gerät; mißt das tatsächliche hydraulische Potential (RASMUSSEN & CRAWFORD, 1997) auch bei versalzten Grundwässern (SKOWRONEK & GROSSMANN, 1998); zum Einbau unter Packern oder in artesisch gespannten Meßstellen geeignet (DVWK, 1994; GILLBRICHT, 1996); in stark lösemittelhaltigen Medien mit widerstandsfähigen Kabelmänteln und Sondengehäusen einsetzbar; auch bei schnellen Wasserstandsänderungen einsetzbar;

*Nachteile:* begrenzter Meßbereich (maximale Druckbelastung des Meßelements); mißt nicht den freien Wasserspiegel, daher keine unmittelbare Vergleichbarkeit mit manuellen Kontrollmessungen, für den Abgleich Korrektur auf den Luftdruck erforderlich; genaue Bestimmung der Einbautiefe erforderlich.

### 3. Differenz-Drucksonden

Differenz-Drucksonden messen die Druckdifferenz zwischen Gesamtdruck in der Einhängtiefe abzüglich des auflastenden atmosphärischen Drucks durch mechanische Deformation eines piezoresistiven Meßwertgebers. Die Differenzbildung erfolgt intern durch Anlegen des atmosphärischen Drucks als Gegendruck über einen Druckausgleichsschlauch vom Meßstellenkopf zur Meßsonde. Der Meßwert entspricht damit der Höhe der Wassersäule. Differenz-Drucksonden sind heute die am weitesten verbreiteten Systeme zur automatisierten Grundwasserstandserfassung.

*Vorteile:* durch interne Differenzbildung unmittelbare Vergleichbarkeit mit manuellen Messungen mit dem Kabellichtlot (Wasserspiegel); genaue Bestimmung der Einbautiefe nicht erforderlich; auch bei schnellen Wasserstandsänderungen einsetzbar; in stark lösemittelhaltigen Medien mit widerstandsfähigen Kabelmänteln und Sondengehäusen einsetzbar;

*Nachteile:* begrenzter Meßbereich (maximale Druckbelastung des Meßelements); relativ empfindliches und teures Spezialkabel, kann nur unter günstigen Randbedingungen oder durch Vorhalten zahlreicher Ausgleichslängen vor Ort an die erforderliche Einhängtiefe angepaßt werden; standardmäßig nur für nicht versalztes Wasser (Dichte 1 g/cm<sup>3</sup>) eingerichtet; empfindlich gegen Eindringen



von Wasser (als Kondenswasser oder durch Überflutung) in den Druckausgleichsschlauch.

#### 4. Schwingende Saiten

Druckmeßsysteme nach dem Prinzip der schwingenden Saiten werden meines Wissens zur Zeit nur von einem amerikanischen Hersteller angeboten. Sie messen den Druck über die Änderung der Eigenfrequenz eines schwingenden Systems.

Zu den Vor- und Nachteilen des Systems liegen mir keine Erfahrungen vor.

#### 5. Einperlverfahren

Druckmeßsysteme für den Einsatz im Grundwasser nach dem Einperlverfahren werden meines Wissens zur Zeit nur von einem Hersteller angeboten. Über eine Pumpe wird atmosphärische Luft über eine Kapillare in einen Ausperltopf geleitet, von dem Luftblasen zur Grundwasseroberfläche aufsteigen. Der dabei in der Kapillare aufgebaute Luftdruck wird gemessen. Er entspricht der Höhe der Wassersäule über dem Ausperltopf.

*Vorteile:* relativ kostengünstiges Gerät; unmittelbare Vergleichbarkeit mit manuellen Messungen mit dem Kabellichtlot (Wasserspiegel); einfache Anpassung an die Meßstellenbedingungen (Einbautiefe, Wasserstandsschwankungsbereich) vor Ort möglich;

*Nachteile:* relativ komplexe und energieaufwendige Mechanik (elektrische Pumpe); nicht geeignet für schnelle und starke Änderungen des Wasserspiegels (Förderbrunnen); standardmäßig nur für nicht versalztes Wasser (Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$ ) eingerichtet; in artesisch gespannten Grundwasserleitern nur in Verbindung mit entsprechend hohen Standrohren einsetzbar.

## Energieversorgung

---

Alle elektronischen Meßsysteme benötigen eine Energieversorgung für die Meß- und Speicherelektronik sowie ggf. weitere System-

komponenten. Die Art der Energieversorgung hat entscheidenden Einfluß auf die möglichen Anwendungsbereiche eines Systems.

### *1. integrierte Batterien*

Einzelne Meßsysteme sind mit integrierten, nicht austauschbaren Batterien als alleiniger Energieversorgung ausgestattet. Das gesamte Datenloggersystem ist wasserdicht vergossen.

*Vorteile:* lange Betriebszeit (Jahrzehnte) unter Bedingungen der allgemeinen Grundwasserstandsüberwachung (Taktzeiten im Stundenbereich); Wartungsfreiheit; Überflutungssicherheit durch Vergießen; keine Kondenswasserprobleme in der Elektronik;

*Nachteile:* bei kurzen Taktzeiten (unterhalb Minutenbereich) geringe Lebensdauer des Gerätes; bei Batterieversagen Ausfall des Gesamtsystems.

### *2. herstellerseitig tauschbare Batterien*

Einzelne Meßsysteme sind mit Batterien ausgestattet, die nur herstellerseitig gewechselt werden können. Das gesamte Datenloggersystem ist wasserdicht abgeschlossen.

*Vorteile:* lange Betriebszeit (Jahre) unter Bedingungen der allgemeinen Grundwasserstandsüberwachung (Taktzeiten im Stundenbereich); Wartungsfreiheit im Normalbetrieb; einfache Überflutungssicherheit durch dichten Abschluß des elektronischen Systems; keine Kondenswasserprobleme in der Elektronik;

*Nachteile:* bei kurzen Taktzeiten (unterhalb Minutenbereich) geringe Wartungszyklen; bei Batterieversagen Einsendung des Geräts und damit Ausfall für die aktuelle Maßnahme.

### *3. anwenderseitig tauschbare Batterien*

Die meisten Meßsysteme sind mit Batterien ausgestattet, die vom Anwender gewechselt werden können. Hierbei sind zwei Bauformen zu unterscheiden:

Weit verbreitet sind Meßsysteme in einer Bauart mit Trennung von Datensammler und Meßwertgeber. Der Datensammler ist dabei einschließlich der Batterien in einem Gehäuse in der Meßstellenkappe eingehängt. Der Meßwertgeber (Sonde) ist mit einem Kabel zur

analogen Meßwertübertragung an den Datensammler angeschlossen. In dem (spritzwassergeschützten) Datensammler kann es zu Problemen mit Kondenswasserbildung kommen. Starke Temperaturschwankungen können die Funktion der Elektronik und die Batterieleistung beeinträchtigen. Der Batterientausch ist ohne spezielles Werkzeug einfach möglich.

Bei anderen Systemen ist der Datensammler einschließlich der Batterien und dem Meßwertgeber (Sonde) in einem wasserdichten Gehäuse untergebracht. Er wird an einem Kabel zur digitalen Datenübertragung (Auslesung) am Meßstellenkopf aufgehängt. Diese Bauform hat den Vorteil, daß die störanfällige Übertragung analoger Signale über ggf. lange Kabelstrecken vermieden wird. Die Elektronik ist durch die wasserdichte Bauart gegen Kondenswasserprobleme geschützt. Die Einhängung des Gesamtsystems in frostfreier Tiefe (bei Drucksonden: im Grundwasser) schützt es gegen Temperaturschwankungen. Zum Wechsel der Batterien muß jedoch das gesamte System aus- und eingebaut und anschließend ein neuer Sondenabgleich vorgenommen werden. Das Öffnen des druckdichten Gehäuses erfordert meist spezielles Werkzeug und erhöhten Aufwand und Sorgfalt.

*Vorteile:* flexible Handhabung auch bei sehr kurzen Taktzeiten (Sekundenbereich);

*Nachteile:* bei einigen Fabrikaten relativ hohe Stromaufnahme und daher häufiger Batteriewechsel erforderlich.

#### *4. andere Formen der Energieversorgung*

Einige Datensammler verfügen über die Möglichkeit, externe Stromquellen, z. B. Akkumulatoren oder photovoltaische Elemente, anzuschließen. Diese Möglichkeiten sind insbesondere dort von Interesse, wo durch spezielle Zusatzgeräte eine erhöhte Energieaufnahme entsteht, z. B. bei Betrieb einer Datenfernübertragung über Funktelefon oder Kombination mit einer mobilen Wetterstation.

## Software

---

Fast alle Datensammler-Systeme verfügen über die Möglichkeit des Datentransfers auf Standard-PCs (Notebook-Computer) über die serielle Schnittstelle (RS 232). Einige Geräte bedienen sich der kabellosen Datenübertragung über die Infrarot-(IrDA-)Schnittstelle. Daneben sind für viele Geräte auch spezielle geländetaugliche Bedien- und Auslesegeräte verfügbar. Bei der Durchführung von Pumpversuchen wird man meist auf Lösungen mit PC zurückgreifen, da diese eine größere Flexibilität aufweisen, Datensammler verschiedener Hersteller mit einem Gerät bedient und Zwischenauswertungen vor Ort vorgenommen werden können.

Die mitgelieferten Softwareprogramme zum Datentransfer und zur Weiterverarbeitung sind in ihrem Umfang und ihren Möglichkeiten sehr unterschiedlich. Programme mit geringeren technischen Möglichkeiten haben den Vorzug der einfacheren Bedienbarkeit, insbesondere unter Geländebedingungen. Zur Zeit handelt es sich noch durchweg um Programme für das Betriebssystem MS DOS™. Die Datenspeicherung erfolgt als Datensätze DOS-ASCII sequentiell, bei vielen Systemen alternativ auch in speicherplatzsparenden binären Dateiformaten. Bei älteren Datensammlern sind die Zeitangaben zum Teil in gekürzter Form abgelegt; neuere Systeme speichern durchweg vollständige Angaben mit Datum und Uhrzeit. Da für die binären Datenformate keine Normierung vorliegt, sind für die Übernahme in Verarbeitungsprogramme, z. B. Pumpversuchsauswertungsprogramme, meist die ASCII-Formate zu verwenden. Durch die Abspeicherung im internationalen Zahlenformat mit Dezimalpunkt kommt es zu Schwierigkeiten in Verbindung mit Windows™-Programmen (z. B. MS Excel™), die auf das in Deutschland länderspezifische Zahlenformat mit Dezimalkomma zugreifen. Es ist davon auszugehen, daß in nächster Zeit zunehmend Bedienungsprogramme unter dem Betriebssystem MS Windows™ angeboten werden.

Bei der Durchführung von Pumpversuchen ist softwareseitig die Steuerung des Zeittakts der Datenerfassung ein wesentliches Element der Bedienung. Hier sind vier Methoden zu unterscheiden:

### *1. fester Zeittakt*

Die Datenaufzeichnung erfolgt mit einem konstanten Zeittakt. Diese Variante ist für wasserwirtschaftliche Dauerüberwachungen üblich, kann aber auch für Pumpversuche in Verbindung mit einer weitergehenden Datenaufbereitung (siehe unten) verwendet werden. Diese Möglichkeit ist bei allen Datensammlern gegeben.

### *2. manuell veränderlicher Zeittakt*

Der Zeittakt kann während der laufenden Aufzeichnung manuell durch den Anwender geändert werden, z. B. Erhöhung der Taktrate bei Zuschaltung eines Brunnens. Diese Möglichkeit bietet eine hohe Flexibilität in der Versuchsdurchführung, z. B. in der Beobachtung des Förderbrunnens, ist dagegen für größere Meßnetze ungeeignet, da hierzu die Meßstellen aufgesucht werden müssen. Einige Datensammler lassen eine Änderung des Zeittakts nur in Verbindung mit dem Löschen der vorhandenen Daten und dem Neustart der Aufzeichnung zu.

### *3. programmierbarer Zeittakt*

Es wird ein Programm erstellt, das den Zeittakt zu vorbestimmten Zeitpunkten ändert. Diese Möglichkeit läßt einen variablen Zeittakt auch für größere Meßnetze zu. Der geplante Versuchsablauf muß möglichst strikt eingehalten werden. Kommt es zu erheblichen Störungen, z. B. vorzeitige Beendigung des Versuchs, können die Taktraten dem tatsächlichen Geschehen nicht mehr kurzfristig angepaßt werden.

### *4. Ereignissteuerung*

Einige Datensammler-Systeme lassen die Steuerung des Zeittakts über Ereignisse zu. Unter einem Ereignis wird die kurzfristige Änderung des Meßwertes (Wasserstand) verstanden. Dies heißt, daß bei einer plötzlichen Änderung des Wasserstands (z. B. Beginn des Pumpenbetriebs) die Aufzeichnung intensiviert wird. Diese Möglichkeit läßt einen variablen Zeittakt auch für größere Meßnetze zu. Der geplante Versuchsablauf muß nicht strikt eingehalten werden, da das System auf das tatsächliche Geschehen reagiert. Durch die

ständige Aktivität der Meßsysteme kommt es aber zu einem erhöhten Energieverbrauch, der im Einzelfall zu Schwierigkeiten führen kann.

Unabhängig vom gewählten Zeittakt erzeugen Datensammler typischerweise Datenmengen, die über das für die Auswertung benötigte Maß weit hinausgehen (redundante Information). Es ist daher eine Datenreduktion durch Filterung erforderlich. Diese Datenreduktion wird in einigen Fällen durch die mit den Datensammlern mitgelieferte Software geleistet. Daneben gibt es auch Eingangdatenfilter bei den weiterverarbeitenden Programmen (z. B. GILLBRICHT, 1999).

Einige Programme ermöglichen die grafische Visualisierung der Meßdaten, so daß schon vor Ort Störungen erkannt und Entscheidungen über den weiteren Versuchsablauf getroffen werden können.

## **Ausblick**

---

In Tab. 1.2.1 sind auf der Grundlage der in den vorherigen Abschnitten getroffenen Angaben Empfehlungen für die Wahl geeigneter Datensammler für die Durchführung von Pumpversuchen getroffen. Es handelt sich hierbei um Empfehlungen für die grundsätzliche Eignung von Systemen, nicht im Hinblick auf die tatsächliche Eignung (Qualität) einzelner Fabrikate.

In der Praxis wird man nicht ohne weiteres nach den hier gegebenen Empfehlungen vorgehen können. Meist wird man für einen Versuch keine neuen Geräte anschaffen, sondern auf vorhandene (eigene oder entlehbare) zurückgreifen müssen. Damit sind Kompromisse sowohl in technischer als auch in organisatorischer und wirtschaftlicher Hinsicht einzugehen. Eine Abschätzung des voraussichtlichen Absenkungsverhaltens in den einzelnen Meßstellen kann durch Modellrechnungen, möglichst im Zusammenhang mit einem Vorversuch, erfolgen.

	Förderbrunnen	nahe Meßstellen	entfernte Meßstellen
<b>Meßverfahren</b>			
Schwimmer	(-)	(+)	+
Absolut-Drucksonde	+	+	+
Differenz-Drucksonde	+	+	+
Einperlverfahren	-	(-)	+
<b>Energieversorgung</b>			
integrierte Batterie	-	(+)	+
herstellereitig tauschbare Batterien	-	(+)	+
anwenderseitig tauschbare Batterien	+	+	+
andere	+	+	+
<b>Zeittakt</b>			
fest	-	(-)	+
manuell veränderlich	+	+	(+)
programmierbar	(+)	(+)	+
Ereignissteuerung	+	+	(+)

- + empfohlen
- (+) mit Einschränkung empfohlen
- (-) unter günstigen Bedingungen möglich
- im Regelfall nicht sinnvoll

**Tab. 1.2.1:** Empfehlungen für den Einsatz von Datensammlern zur Grundwasserstandsregistrierung bei hydraulischen Pumpversuchen

## Danksagung

---

Ich habe den Herren Dr. Skowronek und Cron, Hamburg, für die kritische Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Hinweise zu danken.

## Literatur

---

- DVWK (Hrsg.) (1994): Datensammler für die Grundwassermessung. – DVWK Schriften, 107: 113–241; Hamburg/Berlin
- GILLBRICHT, C. A. (1996): Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen. – Sörensen: 60 S.; Hamburg
- GILLBRICHT, C. A. (1999): MRQWIN, Version 1.1.4; Hamburg
- RASMUSSEN, T. C. & CRAWFORD, L. A. (1997): Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. – Ground Water, 35: 502–511; Westerville, OH
- SKOWRONEK, F. & GROSSMANN, J. (1998): Grundwasserstandsmessungen in Grundwassermeßstellen mit Salzwassereinfluß. – Fachliche Berichte der Hamburger Wasserwerke GmbH, 17(2): 34–40; Hamburg

## Anhang

---

Bezugsquellen für Datensammler zur Grundwasserstandserfassung  
(nur deutsche Hersteller bzw. Vertreiber, ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

AquiTronic Umweltmeßtechnik GmbH  
Kernerstr. 3  
73230 Kirchheim/Teck  
Tel.: 07021 / 921 64–0, Fax: 07021 / 921 64–39

DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH  
Geschäftsbereich GUC Geo- und Bau-Consult – Baugrundinstitut  
Franz-Fischer-Weg 61  
45307 Essen  
Tel.: 0201 / 172–18 51, Fax: 0201 / 172–18 91

Ecotech Umweltmeßsysteme GmbH  
Siemensstr. 8  
53121 Bonn  
Tel.: 0228 / 61 47 99, Fax: 0228 / 61 48 86



GEOS Daten- und Umwelttechnik GmbH  
Celler Str. 81  
38114 Braunschweig  
Tel.: 0531 / 50 90 66, Fax: 0531 / 552 52

GTC Kappelmeyer GmbH  
Haid- und Neu-Str. 7-9  
76131 Karlsruhe  
Tel.: 0721 / 600-08, Fax: 0721 / 600-09

Hydrotechnik (HT)  
Im Wang 18  
87634 Obergünzburg  
Tel.: 08372 / 23 88, Fax: 08372 / 23 89

Keller Gesellschaft für Druckmeßtechnik mbH  
Schwarzwaldstr. 17  
79798 Jestetten  
Tel.: 07745 / 92 14-0, Fax: 07745 / 92 14-50

Müller-Pettenpohl Meßtechnik GmbH  
Poststr. 26  
63607 Wächtersbach  
Tel.: 06053 / 90 80, 30 77, Fax: 06053 / 34 83, 45 04

OTT Meßtechnik GmbH & Co. KG  
Ludwigstr. 16  
87437 Kempten  
Tel.: 0831 / 56 17-0, Fax: 0831 / 56 17-209

Phytec GmbH  
Petzvalstr. 36a  
38104 Braunschweig  
Tel.: 0531 / 37 47 39, Fax: 0531 / 37 51 98

Scanrock GmbH  
Trift 18  
29221 Celle  
Tel.: 05141 / 282 00, Fax: 05141 / 62 05

SEBA Hydrometrie GmbH  
Gewerbestr. 61a  
87600 Kaufbeuren  
Tel.: 08341 / 96 48-0, Fax: 08341 / 96 48-48

SOMET  
Glatterpfad 22  
79194 Gundelfingen  
Tel.: 0761 / 58 06-69, Fax: 0761 / 58 06-26

Spoehr-Meßtechnik GmbH  
Länderweg 37  
60599 Frankfurt a. M.  
Tel.: 069 / 62 28 60, Fax: 069 / 62 04 55

Jürgen Veser  
Hauptstr. 63  
79211 Denzlingen  
Tel.: 07666 / 76 60, Fax: 07666 / 76 15

Christian A. Gillbricht

## **Pumpversuche bei langjährig betriebenen Wasserwerken**

### *Zusammenfassung*

---

Bei langjährig betriebenen Wassergewinnungsanlagen der öffentlichen Trinkwasserversorgung ist die Durchführung von klassischen Pumpversuchen meist nicht möglich, da eine Einstellung der Förderung bis zur Wiederherstellung der natürlichen Grundwasserverhältnisse nicht realisiert werden kann. In diesen Fällen sind andere Formen der Versuchsdurchführung und -auswertung zu wählen.

### **Einführung**

---

Die völlige Neuplanung von Grundwassergewinnungsanlagen ist heute in der hydrogeologischen Praxis eher die Ausnahme. Dagegen sind Neubemessungen, der Ersatz von älteren Brunnen oder die Ermittlung der gewinnbaren Wassermenge und des Einzugsgebietes im Hinblick auf die Erteilung bzw. Erneuerung von Wasserrechten und die Ausweisung von Schutzgebieten (DVGW, 1995) häufig Anlaß für die Durchführung von Pumpversuchen. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, daß die Grundwasserverhältnisse durch einen langjährigen Förderbetrieb nachhaltig gestört sind und damit eine wesentliche Randbedingung üblicher Auswertungsverfahren, nämlich der Beginn des Pumpversuchs mit einem Wasserstand auf Niveau des natürlichen »Ruhewasserspiegels«, nicht gegeben ist. Bei der Konzeptionierung von Pumpversuchen unter derartigen

Bedingungen müssen daher die sonst üblichen Verfahren modifiziert werden.

## Beispiel

---

Bei einem großen Wasserwerk im norddeutschen Raum sollte ein Pumpversuch mit dem Ziel der Bestimmung grundwasserhydraulischer Parameter und der Erkundung hydraulischer Zusammenhänge zwischen verschiedenen Grundwasserleitern im Bereich komplexer geologischer Strukturen durchgeführt werden. Das Wasser wird aus Schichten einer pleistozänen Rinnenstruktur gefördert, die in hydraulischer Verbindung zu tertiären Schichten steht. Das Werk besteht in seiner heutigen Größe seit den 30er Jahren; die heute betriebenen Brunnen stammen überwiegend aus den 50er und 60er Jahren. Die Brunnen sind in einem Umkreis von mehreren Kilometern verteilt. Das Werk ist Teil eines größeren Wasserversorgungsgebietes und fördert mit relativ konstanter Leistung.

Eine Unterbrechung der Förderung mit dem Ziel der Einstellung eines annähernd natürlichen Grundwasserspiegels vor Versuchsbeginn kam nicht in Frage, da der Wasserversorger keine Möglichkeit zum Ersatz der hier produzierten Wassermenge hat. Die Brunnen fördern zum Teil seit Jahrzehnten ohne wesentliche Unterbrechungen mit konstanter Leistung.

Unter diesen Bedingungen wurde unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Vorinformationen für den Pumpversuch ein Brunnen ausgewählt, der relativ weit von anderen Brunnen desselben Werks entfernt steht. Dieser Brunnen fördert seit über 10 Jahren mit Ausnahme kurzzeitiger Unterbrechungen für Wartungs- und Reparaturarbeiten mit einer Leistung von rund 90 m<sup>3</sup>/h im Winterhalbjahr und 120 m<sup>3</sup>/h im Sommerhalbjahr. Dieser »Grundlastbrunnen« kann unter normalen Betriebsbedingungen nicht aus der Förderung genommen werden. Das Werk betreibt daneben zwei weitere Grundlastbrunnen in ca. 800 m Entfernung sowie weitere Brunnen zur Ergänzung bei Mehrbedarf in einigen Kilometern Entfernung.

Für den Versuch wurden unter diesen Bedingungen die Osterfeiertage gewählt. Hierfür waren zwei Faktoren ausschlaggebend: Erstens war durch die konstante Förderung während des Winterhalbjahrs zu diesem Zeitpunkt ein quasistationärer Beharrungszustand der Grundwasserstände eingetreten. Zweitens bestand durch das vorhersehbare Verbrauchsminimum während der Feiertage ausnahmsweise die Möglichkeit, den Versuchsbrunnen für rund 60 Stunden außer Betrieb zu setzen. Die benachbarten Grundlastbrunnen wurden in dieser Zeit mit konstanter Leistung betrieben. Der Betrieb der weiter entfernten Brunnen, die den durch den Ausfall des Versuchsbrunnens gegebenen Mehrbedarf abfangen mußten, hatte absehbar keinen Einfluß auf die Grundwasserverhältnisse im betrachteten Gebiet.

Die Modellierung der Grundwasserströmung erfolgte mit einem analytischen Rechenmodell (GILLBRICHT, 1999) (Abb. 1.3.1). Hierbei wurde die Förderrate als Versickerung während der Ausschaltphase eingesetzt. Eine direkte Modellierung mit einer Eingabe der Förderraten entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten, d. h. über Jahre konstante Förderung, wenige Tage Ausschaltphase und Wiederinbetriebnahme, ist im Zusammenhang mit einer analytischen (rein hydraulischen) Lösung nicht sinnvoll, da in die Einstellung der Quasibeharrung hydrologische (Grundwasserneubildung) und geologische (z. B. Rinnenränder) Randbedingungen eingehen, die in das analytische Modell nicht einbezogen werden können.

Unter Berücksichtigung der Heterogenität des Grundwasserleiters ist die auf diesem Wege erhaltene Anpassung der Modellfunktion an die Meßdaten als sehr gut zu bezeichnen. Der hier gewählte Ansatz der Versuchsdurchführung hat sich somit bewährt.

## Ausblick

---

Das hier vorgestellte Beispiel eines Pumpversuchs als Wiederanstiegsversuch ist durch verschiedene Randbedingungen besonders günstig und kann so sicher nicht auf jedes Wasserwerk übertragen werden. Die isolierte Lage des Versuchsbrunnens und seine über

lange Zeiträume konstante Förderung als Grundlastbrunnen haben eine fast störungsfreie Versuchsdurchführung ermöglicht. In vielen Fällen werden Brunnen der Trinkwassergewinnung diskontinuierlich betrieben und viele Wasserfassungen sind wesentlich engräumiger gebaut als im vorliegenden Beispiel. Dadurch ergeben sich komplexe Störungen des Absenkungsgeschehens, die eine Auswertung im Hinblick auf die hydraulischen Parameter stark erschweren (Abb. 1.3.2). In diesen Fällen ist in der Versuchsdurchführung eine weitgehende Konstanz der Förderraten der nicht zum Versuch genutzten Brunnen zu fordern. Bei der Auswertung wird man trotzdem nicht umhin kommen, Approximationen zu verwenden, z. B. bei der Abschätzung des »Ruhewasserspiegels« sowie durch Glättung (gleitende Mittelwertbildung) der Absenkungskurven.

### **Danksagung**

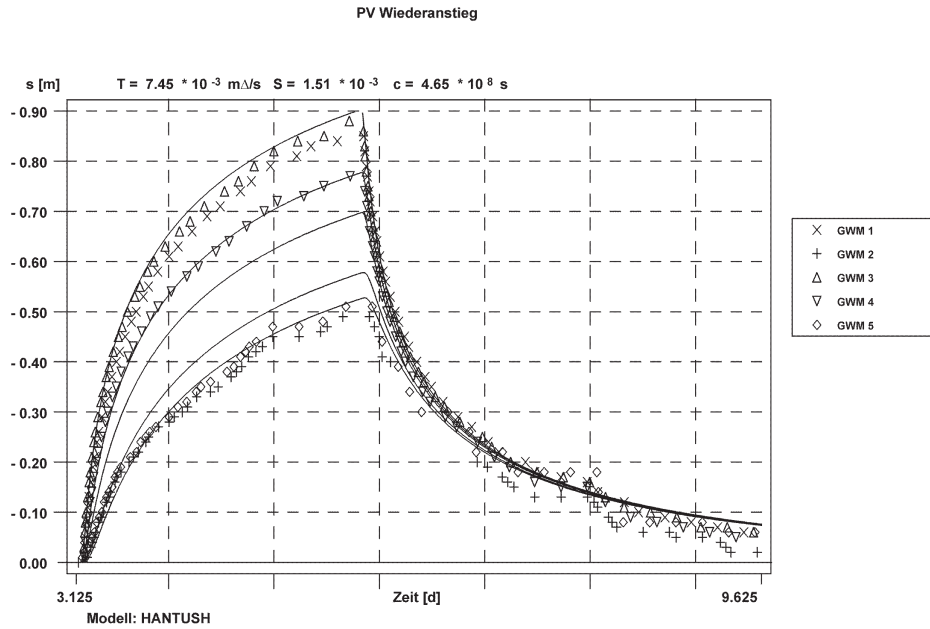
---

Ich habe der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg sowie der Firma Ivers Brunnenbau und Sanierungstechnologie GmbH & Co. KG für die Genehmigung zur Verwendung von Daten zu danken.

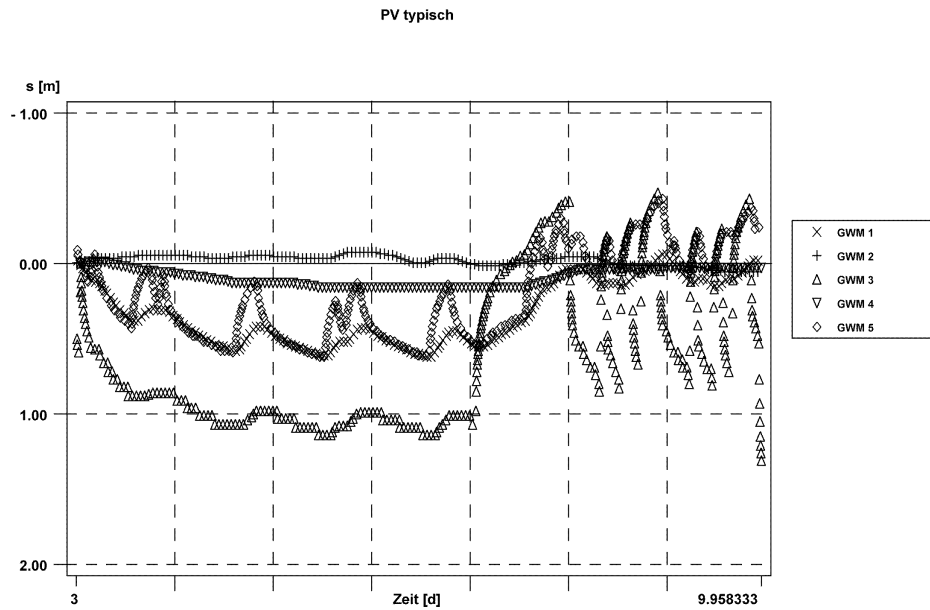
### **Literatur**

---

DVGW (Hrsg.) (1995): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; I. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser. – DVGW-Arbeitsblatt, W 101: 23 S.; Bonn  
GILLBRICHT, C. A. (1999): MRQWIN, Version 1.1.4; Hamburg



**Abb. 1.3.1:** Pumpversuch als Wiederanstiegsversuch bei einem langfristig betriebenen Wasserwerk (Einzelbrunnen)



**Abb. 1.3.2:** Beispiel eines Pumpversuchs bei einem langfristig betriebenen Wasserwerk mit mehreren Brunnen





**2****Auswertung von  
Pumpversuchen mit  
analytischen Modellen**



## Einführung

Die Auswertung von Pumpversuchen im Hinblick auf die hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters erfolgt in der Regel mit Hilfe analytischer Grundwasserströmungsmodelle. Stationäre Modelle wurden hierfür um 1900 eingeführt (z. B. THIEM, 1906). Seit der bahnbrechenden Veröffentlichung von THEIS (1935) haben sich instationäre Modelle durchgesetzt. Die mathematischen Grundlagen sind in zahlreichen Lehr- und Handbüchern dargestellt (z. B. KRUSEMAN & DE RIDDER, 1990). In den letzten Jahren wurden aus den vergleichsweise einfachen Grundansätzen komplexe Modelle mit automatisierter Parameteroptimierung entwickelt (z. B. BOHLING & McELWEE, 1992). Die Anwendung dieser heute in Form von anwenderfreundlichen Computerprogrammen weit verbreiteten Technik ist bislang in Lehrbüchern noch nicht dargestellt, so daß auf Einzelveröffentlichungen zurückgegriffen werden muß. In diesem Abschnitt werden an Hand von Beispielen verschiedene Aspekte der Pumpversuchsauswertung mit analytischen Modellen dargestellt. In den ersten beiden Beiträgen werden die besonderen Probleme bei der Bearbeitung von Pumpversuchen in oberflächennahen ungespannten Grundwasserleitern behandelt. Im dritten Beitrag wird ein modifiziertes Konzept für die Ermittlung der Parameter des Brunnenverlusts (Filtereintrittsverluste) vorgestellt. Der vierte Beitrag zeigt die Anwendung analytischer Grundwasserströmungsmodelle bei der Bemessung von Baugrubenwasserhaltungen und bei einfachen Transportproblemen.

**Literatur**

---

- BOHLING, G. C. & MCELWEE, C. D. (1992): SUPRPUMP: An interactive program for well test analysis and design. – *Ground Water*, **30**: 262–268; Dublin, OH
- KRUSEMAN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1990): Analysis and evaluation of pumping test data. – International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication, **47**: 375 S.; Wageningen
- THEIS, C. V. (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. – *American Geophysical Union Transactions*, **16**: 519–524; Washington, D.C.
- THIEM, G. (1906): *Hydrologische Methoden*. – Gebhardt: 56 S.; Leipzig

Christian A. Gillbricht

## Pumpversuche in ungespannten Grundwasserleitern

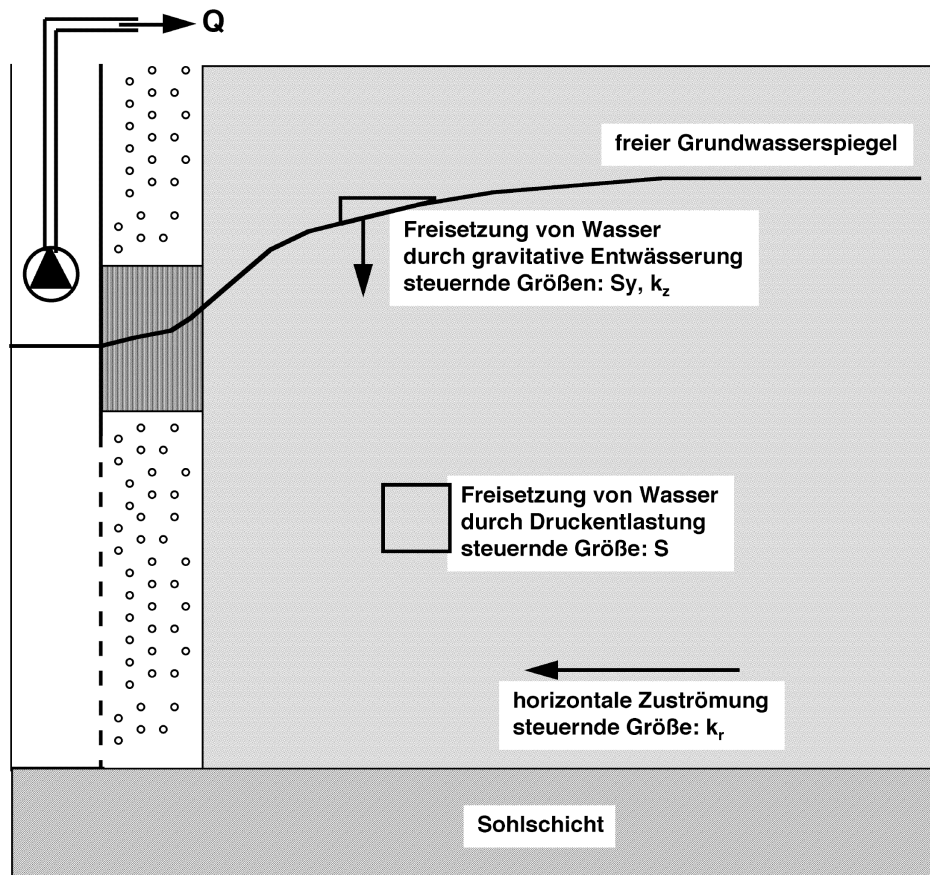
### *Zusammenfassung*

Die umfassende Auswertung von Pumpversuchen in ungespannten Grundwasserleitern ist erst in jüngster Zeit durch die Arbeiten von Moench in Verbindung mit allgemein verfügbaren leistungsstarken Bürocomputern möglich geworden. An Hand eines Beispiels wird die Anwendung dieses Auswertungsverfahrens vorgestellt.

### **Einführung**

Für die Anströmung eines Brunnens in einem Grundwasserleiter mit freier Wasseroberfläche (ungespannter Fall) ist von NEUMAN (1972, 1974, 1975) eine umfassende Theorie entwickelt worden (Abb. 2.1.1).

Neben den allgemein bekannten Parametern Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert in m/s) und Speicherkoeffizient ( $S$ , dimensionslos) gehen in dieses Modell zusätzlich das kurzfristig gravitativ entwässerbare Porenvolumen im Bereich der freien Grundwasseroberfläche («specific yield»  $S_y$ , dimensionslos) und die Anisotropie des Grundwasserleiters (Verhältnis vertikaler zu horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert  $k_z/k_r$ , dimensionslos) ein. Das gravitativ entwässerbare Porenvolumen bestimmt neben dem Durchlässigkeitsbeiwert die großräumige Ausbreitung des Absenkungstrichters. Die Anisotropie kann bei der Betrachtung von Stoffausbreitungsvorgängen,



$S$ : Speicherkoeffizient [-]

$S_y$ : gravitativ entwässerbare Porosität (»specific yield«) [-]

$k_r$ : horizontaler (radialer) Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

$k_z$ : vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

**Abb. 2.1.1:** Schema der Anströmung eines Brunnens in einem Grundwasserleiter mit freier Wasseroberfläche (ungespannter Fall)

z. B. bei einer Verunreinigung im Bereich der freien Grundwasser-oberfläche, von Bedeutung sein.

Bis vor kurzem war die rechentechnische Umsetzung dieser Theorie so aufwendig, daß sie in die ingenieurtechnische Praxis, insbesondere in Deutschland, kaum Eingang gefunden hat. Auch ein-

schlägige Lehrbücher haben daher auf eine ausgiebige Darstellung des Verfahrens weitgehend verzichtet (z. B. KRUSEMAN & DE RIDDER, 1990). Durch die Arbeiten von MOENCH (1996, 1998) steht jetzt ein stark vereinfachter Lösungsalgorithmus zur Verfügung, der in Verbindung mit den allgemein verfügbaren leistungsstarken Bürocomputern eine Anwendung auch in der täglichen Praxis zuläßt (GILLBRICHT, 1999).

### Identifizierung des Modells

---

Außer den genannten rechentechnischen Problemen bei der Anwendung der Neuman'schen Theorie ergab sich für den Praktiker auch ein weiterer Grund, sich mit diesem Ansatz nicht näher zu befassen: Daten, für die eine Auswertung nach der Theorie von Neuman angezeigt erscheint, treten nicht eben häufig auf. Im Regelfall lassen sich Versuche in ungespannten Grundwasserleitern befriedigend mit dem Modell nach Theis mit einer Dupuit-Korrektur (nach Jacob) auswerten (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1990; RADMANN, 1999). Dies liegt einerseits am Konzept der Pumpversuche (Meßstellenanordnung und -ausbau, Datenerfassung) (MOENCH, 1994), andererseits daran, daß die charakteristischen Merkmale des Absenkungsverhaltens eines ungespannten Grundwasserleiters durch die natürliche Heterogenität verschleiert werden kann bzw. Unklarheit über diese besteht.

Im folgenden wird das Ergebnis eines Versuchs dargestellt, der sich befriedigend nur mit dem Modell nach Neuman erklären läßt. An diesem Beispiel soll gezeigt werden, unter welchen Bedingungen der Einsatz dieses Ansatzes gerechtfertigt ist. Es handelt sich um einen Versuch in einem oberflächennahen Grundwasserleiter. Der Pumpbrunnen ist vollkommen ausgebaut, die Meßstellen als unvollkommene Filter im Bereich der freien Grundwasseroberfläche. Der Grundwasserleiter weist schwankende Mächtigkeiten und Heterogenitäten des inneren Aufbaus auf.

Die Auswertung nach Theis (Abb. 2.1.2) ergab einen Speicherkoeffizienten von rund 3%. Dieser Wert zeigt entsprechend der

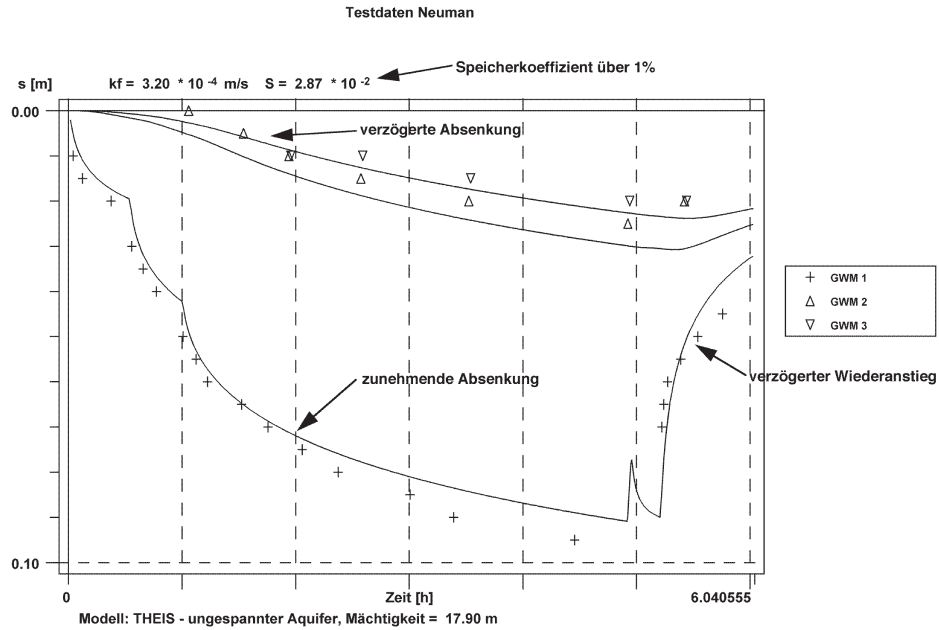
geologischen Situation einen ungespannten Grundwasserleiter an. Die Meßstellen in größerer Entfernung vom Pumpbrunnen (GWM 2 und GWM 3) zeigen eine geringere Absenkung an, die auf einen höheren effektiven Speicherkoeffizienten hindeutet. Ebenso ist der verzögerte Wiederanstieg von GWM 1 mit einem erhöhten Speicherkoeffizienten und/oder der Hysterese der Wiederbenetzung entwässerter Bereiche zu erklären. Im Verlauf des Versuchs kommt es bei GWM 1 zu einer verstärkten Absenkung nach ca. 2 Stunden Laufzeit. Dies entspricht dem Übergang von der Quasibeharrung zur Phase B im Sinne von BOULTON (1963). Ein ähnlicher Effekt kann jedoch auch durch eine hydraulische Grenze mit Übergang zu einem geringer durchlässigen Material bewirkt werden. Hierauf gab es aus der geologischen Erkundung jedoch keinen Hinweis.

Eine Auswertung nach Hantush (mit Leakage) ergibt ein anderes Bild. Die verzögerte Absenkung in den weiter entfernten GWM kann durch eine relativ hohe Leakage erklärt werden. Der verzögerte Wiederanstieg in GWM 1 wird dagegen auch von diesem Modell nicht korrekt beschrieben. Die verstärkte Absenkung im späteren Teil des Versuchs wird zwar zeitlich etwas verschoben, aber nicht völlig eliminiert (Abb. 2.1.3). Für die Entscheidung, in dieser Phase des Auswertungsganges zum Modell nach Neuman überzugehen, ist das Zusammentreffen folgender Fakten ausschlaggebend:

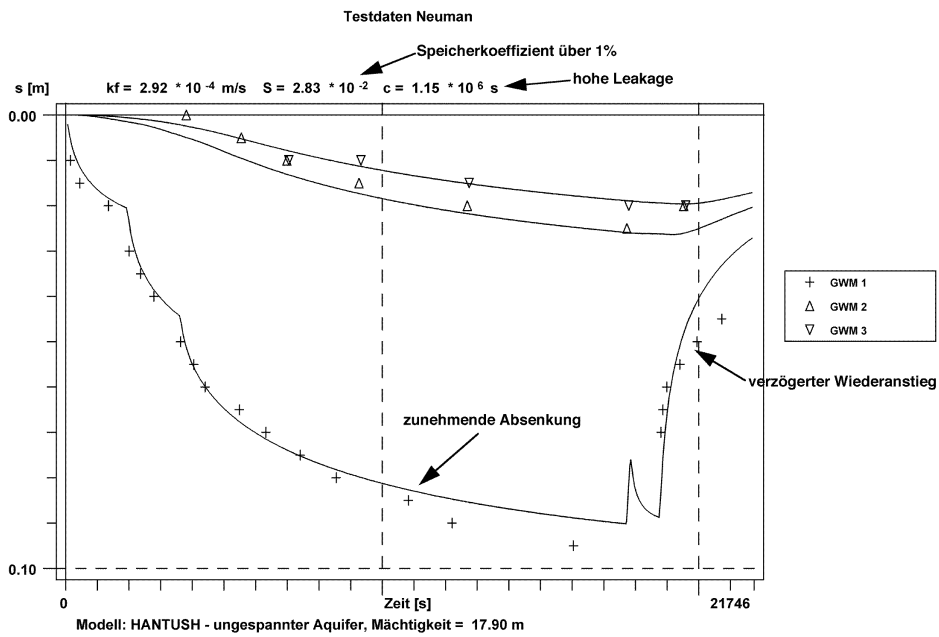
Der Speicherkoeffizient erscheint unrealistisch. Er beschreibt weder eine Druckentlastung noch eine Entwässerung im Bereich des freien Wasserspiegels befriedigend. Die hohe scheinbare Leakage ist in der geologischen Situation nur als Freisetzung von Wasser im Bereich einer freien Grundwasseroberfläche erklärbar. Dasselbe gilt für die Verzögerung des Wiederanstiegs. Die zunehmende Absenkung im zweiten Versuchsabschnitt (Typ B-Kurven nach Boulton) ist für sich genommen nicht hinreichend. Hierfür könnten auch Heterogenitäten des Grundwasserleiters bzw. hydraulische Grenzen verantwortlich sein. Ein optischer Vergleich mit Standardtypkurven ist nicht möglich, da der Versuch als Stufentest ausgeführt wurde.

Die Auswertung nach Neuman (Abb. 2.1.4) zeigt eine fast ideale Anpassung des Modells an die Meßwerte. Die entwässerbare

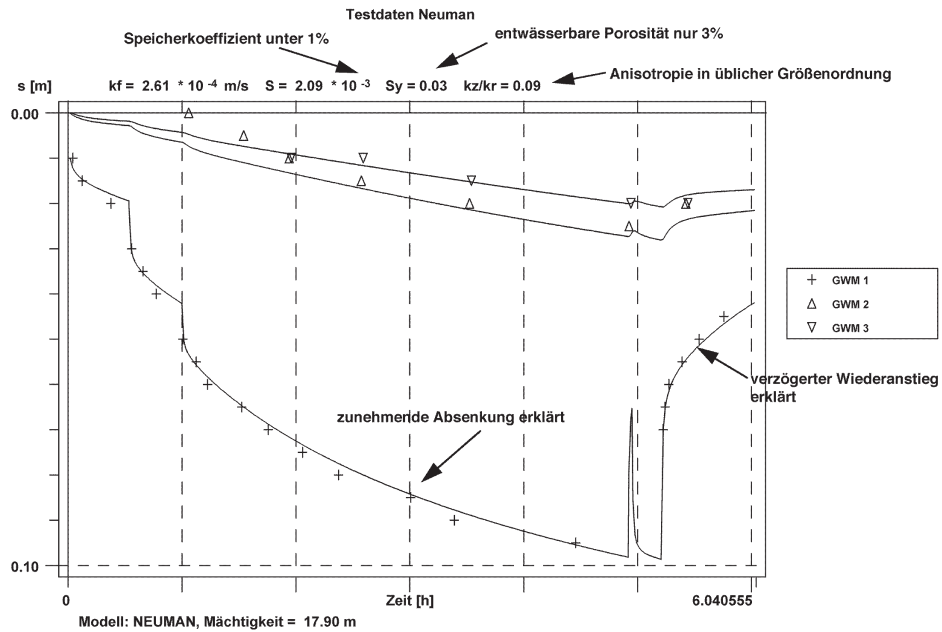




**Abb. 2.1.2:** Pumpversuch in einem ungespannten Grundwasserleiter, Auswertung nach Theis mit Dupuit-Korrektur nach Jacob



**Abb. 2.1.3:** Pumpversuch in einem ungespannten Grundwasserleiter, Auswertung nach Hantush mit Dupuit-Korrektur nach Jacob



**Abb. 2.1.4:** Pumpversuch in einem ungespannten Grundwasserleiter, Auswertung nach Neuman

Porosität wird allerdings weiterhin mit einem Wert von rund 3% sehr niedrig bestimmt. Möglicherweise sind Meßanordnung und Versuchsdauer nicht ausreichend für eine genauere Bestimmung gewesen. Insbesondere der vollkommene Ausbau des Pumpbrunnens schränkt die Auswertbarkeit ein (MOENCH, 1994).

## Schlußfolgerungen

Die Auswertung von Pumpversuchen mit der Theorie nach Neuman erzielt im Einzelfall eine deutlich bessere Anpassung des Modells an die Meßdaten als die konventionelle Auswertung nach Theis (mit Dupuit-Korrektur nach Jacob). Dies ist aber kein Beweis, daß dieses Modell überlegen bzw. »richtiger« ist. Durch die Einführung zusätzlicher Parameter in ein Modell ist bei Verwendung eines funktionstüchtigen Parameteroptimierungs-Algorithmus in jedem Fall eine Verbesserung der Anpassung zu erwarten.

Die Anwendung dieses aufwendigen Modells ist daher nur gerechtfertigt, wenn die (hydro-)geologische Kenntnis des Standorts ausreicht, um andere hydraulisch wirksame Faktoren, z. B. Heterogenität des Grundwasserleiters, hydraulisch wirksame Berandungen, Zusickerung aus anderen Grundwasserleitern, mit hinreichender Sicherheit einschätzen zu können. Es ist zu beachten, daß im vorliegenden Beispiel der Durchlässigkeitsbeiwert durch den Übergang vom Modell nach Theis zum Modell nach Neuman nur geringfügig (ca. 20%) verändert wird. Für eine Bestimmung dieses Parameters wäre also das Modell nach Theis oder eine seiner Abwandlungen, insbesondere das Geradlinienverfahren nach Cooper-Jacob, völlig ausreichend. Die Verbesserung der Anpassung durch den wesentlich höheren Rechenaufwand des Verfahrens nach Neuman wäre unter diesen Bedingungen damit als nicht zwingend erforderliche optische Aufschöpfung anzusprechen.

## Danksagung

---

Ich habe der Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg für die Genehmigung zur Verwendung von Daten zu danken.

## Literatur

---

- BOULTON, N. S. (1963): Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. – Institution of Civil Engineers Proceedings, **26**: 469–482; London
- GILLBRICHT, C. A. (1999): MRQWIN, Version 1.1.4; Hamburg
- KRUSEMAN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1990): Analysis and evaluation of pumping test data. – International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication, **47**: 375 S.; Wageningen
- MOENCH, A. F. (1994): Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data. – Ground Water, **32**: 949–957; Dublin, OH
- MOENCH, A. F. (1996): Flow to a well in a water-table aquifer: an improved Laplace transform solution. – Ground Water, **34**: 593–596; Dublin, OH

- 
- MOENCH, A. F. (1998): WTAQ2, Version 3. – Menlo Park, CA
- NEUMAN, S. P. (1972): Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. – *Water Resources Research*, **8**: 1031–1045; Washington, D.C.
- NEUMAN, S. P. (1974): Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. – *Water Resources Research*, **10**: 303–312; Washington, D.C.
- NEUMAN, S. P. (1975): Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. – *Water Resources Research*, **11**: 329–342; Washington, D.C.
- RADMANN, K.-J. (1999): Pumpversuche in ungespannten Grundwasserleitern mit besonderen Versuchsbedingungen. – *in diesem Band*

Kai-Justin Radmann

## **Pumpversuche in ungespannten Grundwasserleitern mit besonderen Versuchsbedingungen**

### *Zusammenfassung*

---

Mit Hilfe moderner computergestützter Auswertungsverfahren ist es möglich, instationäre Pumpversuche, die unter schwierigen oder sogar gestörten Versuchsbedingungen stattgefunden haben, auszuwerten. Es wird eine Pumpversuchsauswertung dargestellt, bei der trotz aufgetretener Probleme während der Pumpversuchsdurchführung plausible Ergebnisse für die hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters ermittelt werden konnten. Bei günstigen hydrogeologischen Bedingungen ist selbst bei weitgehender Entwässerung des Grundwasserleiters eine Auswertung mit der Dupuit-Korrektur nach Jacob noch möglich.

### **Einführung**

---

Bei der Erkundung oberflächennaher Grundwasserleiter mit freier Grundwasseroberfläche, insbesondere im Zusammenhang mit der Erkundung von Grundwasserverunreinigungen und Altlasten, treten in der Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen Schwierigkeiten auf, die bei Erschließungen zur Wassergewinnung keine Bedeutung haben. In vielen Fällen werden gering mächtige oder gering durchlässige Grundwasserleiter untersucht. Bei Pumpversuchen treten oft Schwierigkeiten mit der Ergiebigkeit des Grundwasserleiters auf, die bis zum Trockenfallen des Versuchbrunnens führen können.

Bei ungespannten Grundwasserleitern ausreichender Mächtigkeit und Durchlässigkeit beträgt die Absenkung auch am Brunnen nur einen geringen Teil der gesamten wassererfüllten Mächtigkeit. In diesem Fall ist eine Auswertung mit Ansätzen für gespannte Grundwasserleiter mit ausreichender Genauigkeit zulässig. Gegebenenfalls erfolgt eine Korrektur der gemessenen Absenkungsbeträge nach dem Ansatz von Jacob (z. B. KRUSEMAN & DE RIDDER, 1990). Bei sehr starken Absenkungen ist diese Korrektur aber nur noch eingeschränkt anwendbar, da einerseits vertikale Strömungskomponenten an Bedeutung gewinnen, andererseits natürliche Heterogenitäten des Grundwasserleiters (Schichtung) störend wirken.

## Beispiel

---

Es wurde ein Pumpversuch in einem oberflächennahen, ungespannten Grundwasserleiter, der, unterhalb eines geringmächtigen anthropogenen Auffüllungskörpers, aus holozänen fluviatilen Sanden mit eingeschalteten Torfen und Mudden besteht, durchgeführt. Die wassererfüllte Mächtigkeit betrug zum Pumpversuchszeitpunkt ca. 7 m. Unterhalb einer ca. 5 m mächtigen Trennschicht folgt ein 2. Grundwasserleiter, für den hydraulische Ergebnisse aus einem kurz vorher durchgeführten Pumpversuch vorlagen.

Während des Pumpversuches im 1. Grundwasserleiter sollten drei verschiedene Förderraten eingestellt werden (Stufe I 0,3 m<sup>3</sup>/h; Stufe II 0,7 m<sup>3</sup>/h; Stufe III 1,4 m<sup>3</sup>/h). Für die Erhebung der Grundwasserstände konnten neben dem Förderbrunnen selbst 3 weitere Grundwassermeßstellen in einer Entfernung von 5 bis ca. 20 m zum Förderbrunnen herangezogen und ausgewertet werden.

Anhand der Grundwasserstände des Förderbrunnens in Abb. 2.2.1 ist deutlich das Problem zu erkennen, welches während des Pumpversuches auftrat. Bei der Förderung von ca. 1,4 m<sup>3</sup>/h senkte sich der Wasserspiegel schon in kurzer Zeit so stark ab, daß keine Grundwasserstände mehr gemessen werden konnten (der Förderbrunnen fiel trocken). Durch eine Reduzierung der Fördermenge stieg der Wasserspiegel wieder deutlich an, so daß der Pumpversuch

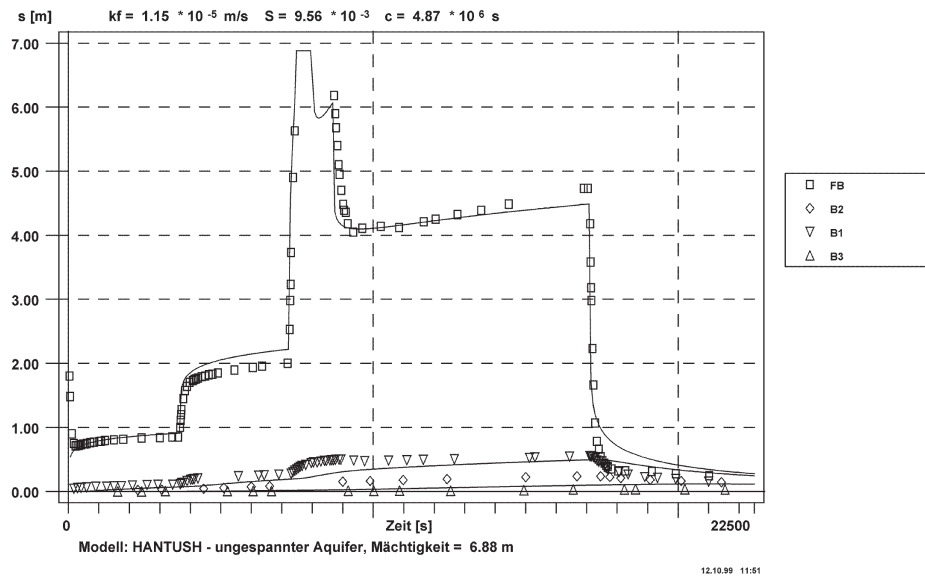
mit einer reduzierten Förderrate von ca. 1,0 m<sup>3</sup>/h planungsgemäß zu Ende geführt werden konnte. In dieser Phase wurde vor Ort besonders darauf geachtet, daß alle Zwischenschritte bis zur Behebung der Schwierigkeiten sorgfältig dokumentiert wurden (detailliertes Aufzeichnen der verschiedenen zwischenzeitlich eingestellten Pumpstufen unter Fortführung der Wasserstandsmessungen bei Verkürzung der Meßintervalle).

Trotz des Trockenfallens des Förderbrunnens führt eine Auswertung des Pumpversuches unter Berücksichtigung aller erhobenen Grundwasserstände (inklusive der Daten des Förderbrunnens) zu einem plausiblen Ergebnis. Die Anpassung zwischen den theoretisch berechneten und den tatsächlich gemessenen Abenkungskurven ist relativ gut (Abb. 2.2.1).

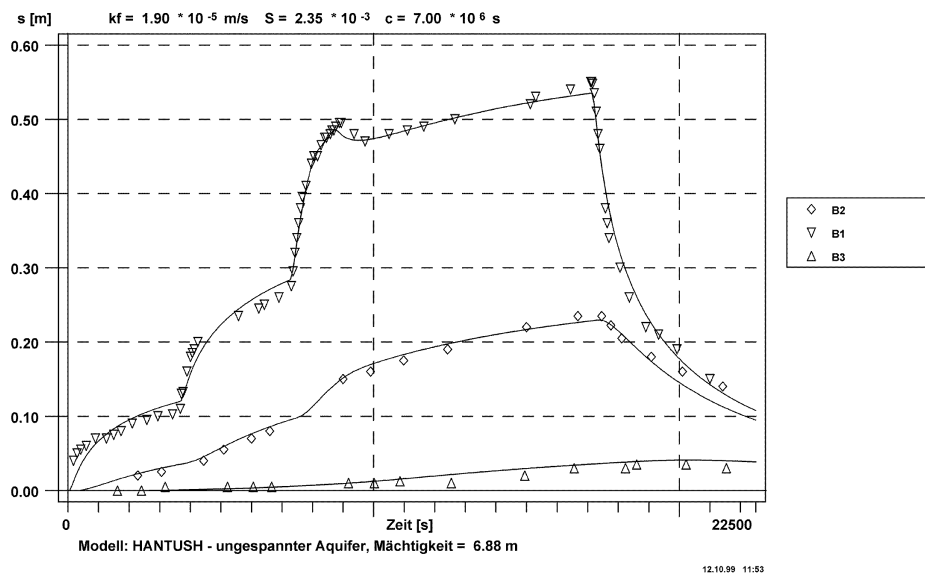
Eine sehr gute Anpassung der berechneten an die gemessenen Wasserstandsganglinien kann nur dann erzielt werden, wenn die Wasserstände des Förderbrunnens nicht berücksichtigt werden (Abb. 2.2.2). Die ermittelten hydraulischen Kennwerte des Grundwasserleiters unterscheiden sich bei den beiden Auswertungsvarianten (mit und ohne Einbeziehung des Förderbrunnens) nur wenig (Tab. 2.2.1).

	Auswertung mit Förderbrunnen	Auswertung ohne Förderbrunnen
k <sub>F</sub> -Wert [m/s]	1,2 * 10 <sup>-5</sup>	1,9 * 10 <sup>-5</sup>
Speicherkoefizient [-]	9,6 * 10 <sup>-3</sup>	2,4 * 10 <sup>-3</sup>
Inverser Leakagekoefizient [s]	4,9 * 10 <sup>6</sup>	7,0 * 10 <sup>6</sup>
k <sub>F</sub> -Wert Trennschicht (5 m) [m/s]	1,0 * 10 <sup>-6</sup>	0,7 * 10 <sup>-6</sup>

**Tab. 2.2.1:** Zusammenstellung der Auswertungsergebnisse für den Pumpversuch

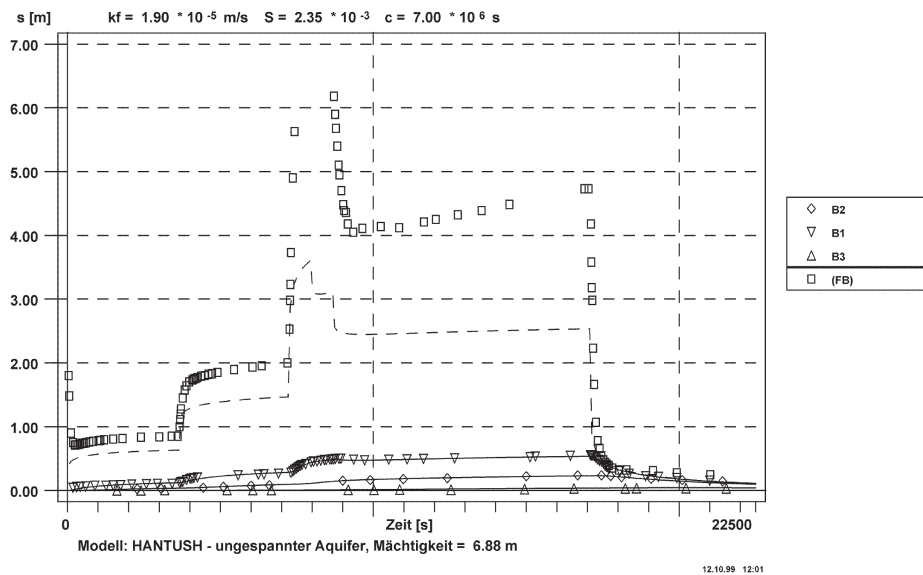


**Abb. 2.2.1:** Auswertung mit dem Förderbrunnen FB



**Abb. 2.2.2:** Auswertung ohne den Förderbrunnen FB





**Abb. 2.2.3:** Auswertung ohne den Förderbrunnen FB, Darstellung der theoretischen Absenkung am Förderbrunnen

Die Darstellung in Abb. 2.2.3 zeigt zusätzlich zu den angepaßten Kurven der in die Auswertung einbezogenen Grundwassermeßstellen die theoretische Ganglinie des Förderbrunnens. Die Diskrepanz zwischen den Meßwerten und der Kurve wird vermutlich durch brunnentypische Effekte (Brunnenverluste, Skin-Effekte, freie Sickerstrecke) verursacht. Es ist zu erkennen, daß die tatsächlich gemessene Absenkung im Brunnen deutlich höher war (bis zu 2 m) als im Grundwasserleiter in unmittelbarer Brunnennähe. Der Versuch zur Bestimmung von Brunnenverlusten führte aufgrund des gestörten Versuchsablaufes zu unplausiblen Ergebnissen.

Für eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse dieser Auswertung wurden außerdem die Ergebnisse des vorhergegangenen Pumpversuches im tieferen 2. Grundwasserleiter berücksichtigt. Hier wurde ein inverser Leakagekoeffizient von  $2,0 \cdot 10^6$  s ermittelt. Hieraus ergibt sich ein  $k_f$ -Wert der 5 m mächtigen Trennschicht von  $2,5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Die Ergebnisse beider Pumpversuche stimmen hinsichtlich der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte für die Trennschicht relativ gut überein.

**Ausblick**

---

Es läßt sich feststellen, daß auch problematisch verlaufende Pumpversuche mit modernen computergestützten Verfahren ausgewertet werden können und dabei plausible, brauchbare Ergebnisse geliefert werden. Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch eine möglichst detaillierte Dokumentation aller Schritte und Stufen (Wasserstände, Förderraten, Förderzeiten) des Pumpversuchsverlaufes.

**Literatur**

---

KRUSEMAN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1990): Analysis and evaluation of pumping test data. – International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication, 47: 375 S.; Wageningen

Kai-Justin Radmann  
&  
Christian A. Gillbricht

## Zur Berücksichtigung von Brunnenverlusten

### *Zusammenfassung*

---

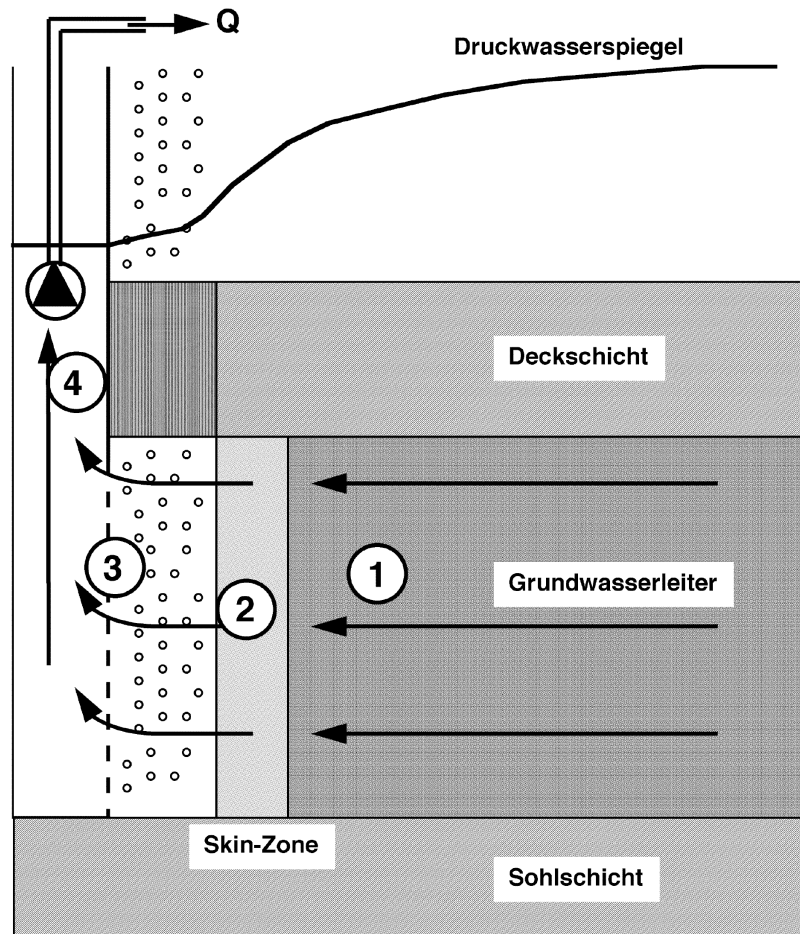
Die Auswertung hydraulischer Pumpversuche in Grundwasserleitern kann durch Brunnenverluste erschwert werden. Konventionelle Auswertungsverfahren führen oft zu ungenauen oder sogar fehlerhaften Ergebnissen für die hydraulischen Parameter sowohl des Brunnens als auch des Grundwasserleiters. Sie setzen außerdem eine Durchführung in mindestens drei Pumpstufen voraus. Moderne computergestützte Verfahren ermöglichen dagegen eine wesentlich zuverlässigere Auswertung und erlauben eine Auswertung auch bei nur zwei Pumpstufen und mit Einschränkungen sogar bei nur einer Pumpstufe.

### **Einführung**

---

Bei Pumpversuchen kommt es im Brunnen zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels. Die Größe dieser Absenkung ergibt sich aus der Summe der zu überwindenden Fließwiderstände im Boden und Brunnen (Abb. 2.3.1, RAMEY, 1982; RADMANN & GILLBRICHT, 1997; GILLBRICHT & RADMANN, 1998):

1. Fließwiderstände im Grundwasserleiter,
2. Fließwiderstände in der brunnennahen Zone (»Skin«),
3. Fließwiderstände am Brunnenfilter,
4. Fließwiderstände im Aufsatzrohr.



**Abb. 2.3.1:** Schematische Darstellung der Bereiche der einzelnen Fließwiderstände an einem Tiefbrunnen, Erläuterungen im Text (RADMANN & GILLBRICHT, 1997)

Näheres zu den Fließwiderständen findet sich bei RADMANN & GILLBRICHT (1997).

Zur Bestimmung der Fließwiderstände am Brunnen (Nr. 2–4) – die sogenannten Brunnenverluste –, werden Stufenpumpversuche mit mindestens drei Leistungsstufen durchgeführt (DVGW, 1997; CLARK, 1977; BIESKE, 1992). Diese wurden früher in jeder Leistungsstufe bis zum (Quasi-)Beharrungszustand betrieben (z. B. BIESKE, 1992), nach moderneren Ansätzen auf wenige Stunden beschränkt (CLARK, 1977; RADMANN & GILLBRICHT, 1997).

Eine weitere Reduzierung des Aufwandes in der Versuchsdurchführung ist aus wirtschaftlichen Gründen wünschenswert. Außerdem wäre es günstig, wenn auch nicht nach dem Stand der Technik durchgeführte Leistungspumpversuche in nur ein oder zwei Pumpstufen nachträglich auch im Hinblick auf die Brunnenverluste ausgewertet werden könnten. Im folgenden wird hierzu eine Methodologie vorgestellt und an einem Beispiel erläutert.

## Mathematischer Hintergrund

---

Die aufgeführten Fließwiderstände lassen sich mathematisch als Absenkung gegenüber dem natürlichen Grundwasserspiegel (Ruhe-spiegel) wie folgt beschreiben (RADMANN & GILLBRICHT, 1997):

$s_{\text{Brunnen}}$	=	$f(t, T, S \text{ etc.}) * Q + D * Q + C * Q^2$
mit $f$	=	Brunnenfunktion
$t$	=	Zeit
$T$	=	Transmissivität
$S$	=	Speicherkoeffizient
etc.	=	weitere hydraulische Parameter in Abhängigkeit vom Typ des Grundwasserleiters, z. B. Leakage, Anisotropie, etc.
$Q$	=	Förderrate
$D$	=	Skinfaktor
$C$	=	Verlustkoeffizient nach Jacob in Abhängigkeit von Eigenschaften des Ausbaumaterials

### Der Aquiferanteil der Absenkung

$$s_{\text{Aquifer}} = f(t, T, S \text{ etc.}) * Q$$

wird aus dem instationären Absenkungsverlauf bestimmt.

Für die Brunnenverluste ergibt sich

$$s_{\text{Brunnenverlust}} = D * Q + C * Q^2$$

als zeitunabhängige Komponente der Gesamtabenkung.

Die Parameter des Brunnenverlustes C und D lassen sich somit bei einer vollständig instationären Auswertung, bei der der Aquiferanteil der Absenkung rechnerisch abgetrennt werden kann, aus den Ergebnissen eines zweistufigen Leistungsversuchs aus dem linearen Gleichungssystem

$$s_{\text{Brunnenverlust}}(Q_1) = D * Q_1 + C * Q_1^2$$

$$s_{\text{Brunnenverlust}}(Q_2) = D * Q_2 + C * Q_2^2$$

mit  $Q_1 \ll Q_2$  und  $Q_1 \ll 0$  und  $Q_2 \ll 0$

bestimmen.

Aus einem einstufigen Versuch läßt sich nur eines der beiden Glieder  $D * Q$  bzw.  $C * Q^2$  rechnerisch bestimmen, so daß hier im Vorherin bekannt sein muß, ob lineare (Skin-) oder nichtlineare (»turbulente«) Brunnenverluste zu erwarten sind.

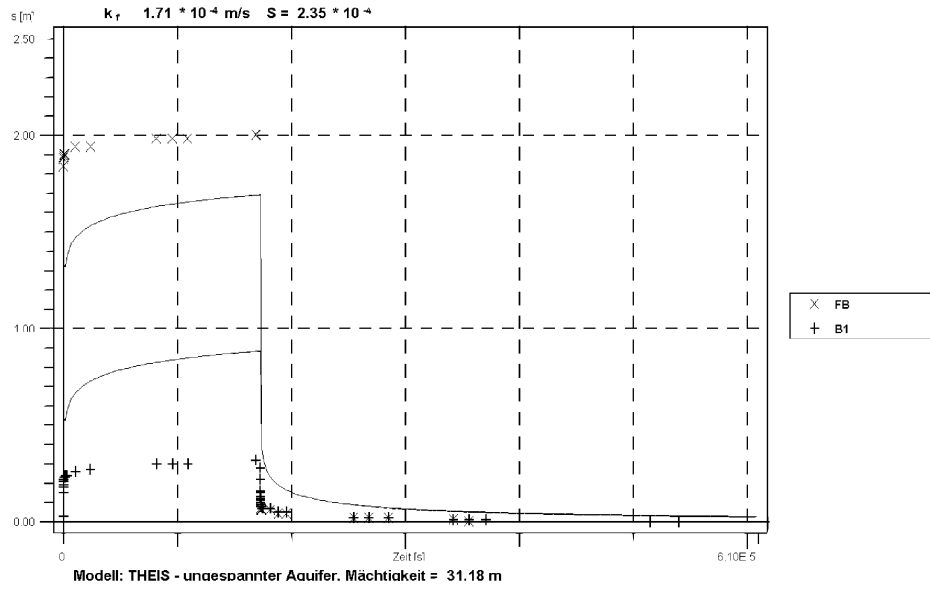
## Beispiel

---

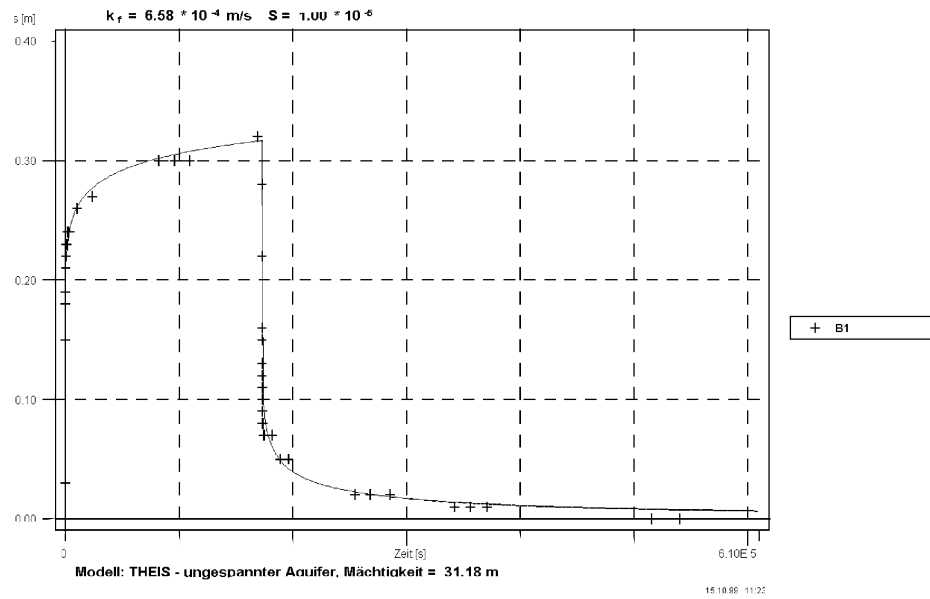
Im folgenden Beispiel wird gezeigt, daß es überaus sinnvoll ist, Pumpversuche, die lediglich mit einer Pumpstufe und Wiederanstieg durchgeführt wurden und wegen aufgetretener Brunnenverluste mittels konventionellen Auswertungsmethoden nur unzureichende Ergebnisse lieferten, nachträglich unter Einsatz moderner computergestützter Verfahren erneut auszuwerten.

Der Pumpversuch fand in einem pleistozänen, hauptsächlich aus Mittelsanden (mit grobsandigen Einschaltungen) bestehenden Grundwasserleiter mit freiem Grundwasserspiegel statt. Als Förderbrunnen (FB) wurde eine Grundwassermeßstelle (B1, Durchmesser DN 125) verwendet. Zur Beobachtung der Reaktionen des Grundwasserleiters stand eine in etwa 10 m Entfernung zum Förderbrunnen befindliche Grundwassermeßstelle zur Verfügung. Die wassererfüllte Mächtigkeit des Grundwasserleiters betrug zum Pumpversuchszeitpunkt ca. 31 m.

Bei einer konventionellen Auswertung nach Theis mit Dupuit-Korrektur nach Jacob unter Berücksichtigung aller gemessenen Wasserstandsdaten (FB und B1) konnte nur eine schlechte Anpas-



**Abb. 2.3.2:** Auswertung mit dem Förderbrunnen FB und der Meßstelle B1 ohne Berechnung von Brunnenverlusten



**Abb. 2.3.3:** Einzelauswertung der Meßstelle B1

sung zwischen gemessenen und berechneten Wasserstandsganglinien erzielt werden (Abb. 2.3.2). Auch der so ermittelte  $k_f$ -Wert von  $1,7 \cdot 10^{-4}$  m/s entspricht nicht dem erwarteten  $k_f$ -Wert (mindestens  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s) für einen mittelsandigen Aquifer.

Abb. 2.3.3 zeigt die Einzelauswertung der Wasserstandsdaten der Grundwassermeßstelle B1. Die Anpassung der berechneten an die gemessene Kurve ist in diesem Fall sehr gut, und der ermittelte  $k_f$ -Wert entspricht in etwa den Erfahrungswerten. Der Wert des Speicherkoeffizienten läßt allerdings darauf schließen, daß es sich hier eher um einen gespannten Grundwasserleiter handelt. Anhand dieser Auswertung wird es wahrscheinlich, daß die Wasserstandsganglinie des Förderbrunnens durch Brunnenverluste geprägt worden sein muß.

Werden mittels einer leistungsfähigen Auswertungstechnik die Brunnenverluste des Förderbrunnens berechnet, so können auch die Wasserstandsdaten des Förderbrunnens berücksichtigt werden, um sehr gute Kurvenanpassungen und plausible Werte für die Systemparameter zu erhalten. Abb. 2.3.4 zeigt die gute Anpassung zwischen berechneten und gemessenen Wasserstandsganglinien.

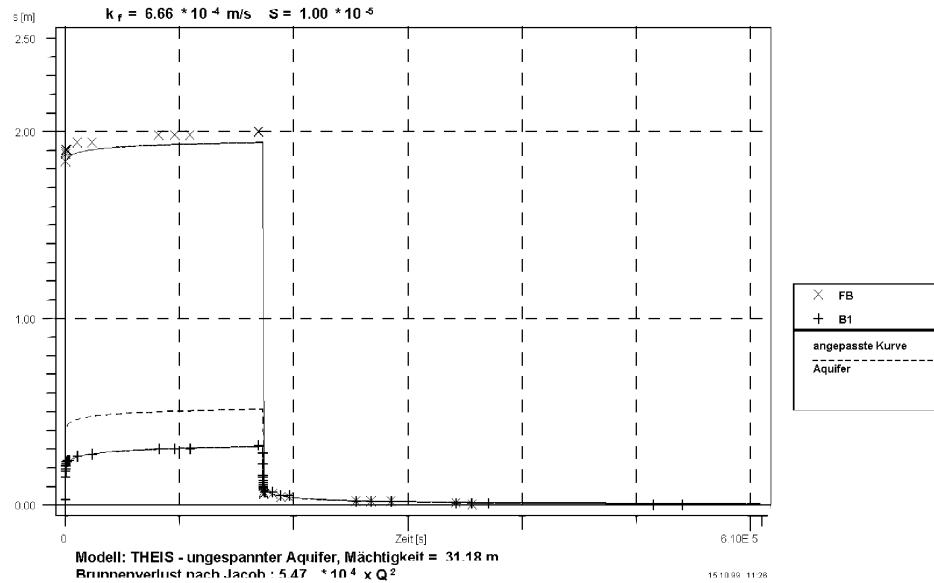
Die Durchführung dieser zusätzlichen Auswertung ist aus zwei Gründen dringend zu empfehlen:

- Absicherung der Ergebnisse der Einzelauswertung von B1 (Abb. 2.3.2)
- Bestimmung des Brunnenverlustfaktors des Förderbrunnens (FB) zur Beurteilung seines Zustandes und damit einer eventuellen Eignung als zukünftiger Wassergewinnungsbrunnen. (Die Brunnenverluste waren in diesem Fall zu hoch, eine zukünftige Nutzung als Wassergewinnungsbrunnen ist nicht zu empfehlen.)

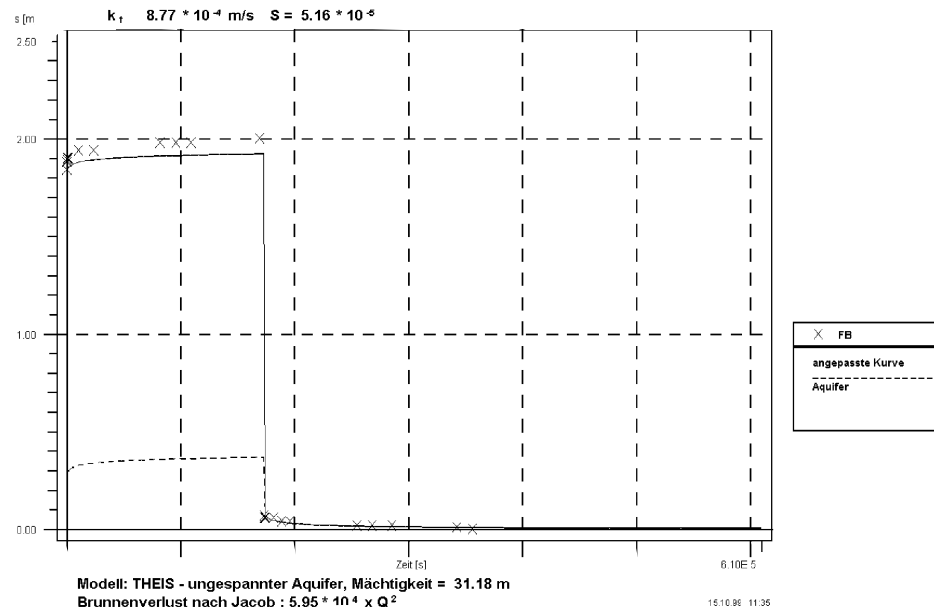
Hätten lediglich die Daten des Förderbrunnens zur Verfügung gestanden, wie dies in der Ingenieurspraxis aus Kostengründen leider häufig vorkommt, so hätten mit Hilfe einer konventionellen Auswertungsmethode keine plausiblen Ergebnisse erzielt werden können.

In Abb. 2.3.5 ist die relativ gute Anpassung der gemessenen Ganglinie des Förderbrunnens an die berechnete dokumentiert. Der ermittelte  $k_f$ -Wert entspricht in seiner Größenordnung dem bei der





**Abb. 2.3.4:** Auswertung mit dem Förderbrunnen FB und der Meßstelle B1 mit Berechnung des Brunnenverlustes



**Abb. 2.3.5:** Einzelauswertung des Förderbrunnens (FB) mit Berechnung des Brunnenverlustes

gemeinsamen Auswertung (Förderbrunnen und Meßstelle) ermittelten Wert.

## Ausblick

---

Eine konsequente Anwendung instationärer Auswertungsverfahren ermöglicht auch die Auswertung von ein- oder zweistufigen Pumpversuchen im Hinblick auf die Aquiferparameter und gegebenenfalls vorhandene Brunnenverluste. Damit können auch technisch nicht optimal ausgeführte Versuche weitergehend ausgewertet werden. Dies sollte jedoch nicht dahingehend mißverstanden werden, daß die Autoren generell eine Verringerung des Aufwandes für Pumpversuche befürworten. Grundsätzlich bleibt für eine Bewertung des hydraulischen Verhaltens des Brunnenbauwerks eine Durchführung des Abnahme-/Leistungspumpversuchs in mindestens drei Leistungsstufen zu fordern.

## Literatur

---

- BIESKE, E. (1992): Bohrbrunnen. – Oldenbourg: 417 S.; München
- CLARK, L. (1977): The analysis and planning of step drawdown tests. – *Quart. J. Engin. Geol.*, **10**: 125–143; London
- DVGW (Hrsg.) (1997): Arbeitsblatt W 111: Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung. – Eschborn
- GILLBRICHT, C. A. & RADMANN, K.-J. (1998): Zur Berücksichtigung von Brunnenverlusten bei der Auswertung von Pumpversuchen. – *Terra Nostra*, **98/3**: P53; Köln
- RADMANN, K.-J. & GILLBRICHT, C. A. (1997): Berechnung von Brunnenverlusten mit instationären Verfahren. – *Fachliche Berichte der Hamburger Wasserwerke GmbH*, **2/97**: 22–29; Hamburg
- RAMEY, H. J. (1982): Well-loss function and the skin effect: a review. – *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, **189**: 265–271; Boulder, CO

Christian A. Gillbricht

## **Integration von Pumpversuchsauswertung und analytischen Grundwassermodellen**

### *Zusammenfassung*

---

In vielen praktischen Anwendungsfällen sollen Grundwasserstände nicht nur am Ort der vorhandenen Grundwassermeßstellen und für den Zeitraum eines Pumpversuchs berechnet werden. Vielmehr ist eine Extrapolation in Raum und Zeit erforderlich. Aus diesem Grunde verfügen Programme zur Pumpversuchsauswertung zunehmend über Schnittstellen zu analytischen Grundwassermodellen oder integrieren diese.

### **Einführung**

---

Pumpversuche dienen in der ingenieurtechnischen Praxis nicht der Ermittlung hydraulischer Parameter als »Selbstzweck«. Die Parameter werden vielmehr dazu benutzt, Abschätzungen über das Verhalten des Grundwasserleiters an bisher nicht untersuchten Orten oder unter anderen Bedingungen, insbesondere der Grundwasserförderung, vorzunehmen. Häufige Fragestellungen sind:

- Mit welcher Förderrate kann ein Absenkungsziel, z. B. die Trockenlegung und -haltung einer Baugrube erreicht werden?
- Innerhalb welches Zeitraums wird das Absenkungsziel, erreicht (Vorlauf der Baumaßnahme)?
- Mit welchen Grundwasserabsenkungen ist bei einer geplanten Förderung an kritischen Orten, z. B. anderen Brunnen, schützenswerten Feuchtgebieten, Quellgebieten von Oberflächengewässern, setzungsempfindlichen Bauwerken, zu rechnen?

- Findet eine Beeinflussung von Grundwasserverunreinigungen (»Fahnen«) durch eine Förderung statt?
- Lassen sich nachteilige Auswirkungen einer Grundwasserabsenkung durch Umplanung, z. B. Reduzierung der Förderraten, Wiederversickerung von Teilmengen, vermeiden oder vermindern?

Diese Abschätzungen erfolgen heute überwiegend mit Hilfe numerischer Grundwasserströmungsmodelle. In vielen praktischen Fällen rechtfertigen die Datenlage und die erforderliche Genauigkeit der Abschätzungen aber nicht den Aufbau eines komplizierten Modells, in das Annahmen zu Randbedingungen (z. B. Zuflüsse, Grundwasserneubildung) eingehen und das durch die erforderliche Diskretisierung einen erheblichen Aufwand bei der Vorbereitung und der rechentechnischen Durchführung erfordert. In diesen Fällen können die wesentlich einfacheren analytischen Strömungsmodelle eine bessere, weil wirtschaftlichere, Alternative darstellen (SPITZ & MORENO, 1996).

Moderne Programme zur Pumpversuchsauswertung basieren auf radialsymmetrischen analytischen Grundwasserströmungsmodellen (z. B. GILLBRICHT, 1996). Es ist daher nur konsequent, daß derartige Programme neuerdings zunehmend Optionen zur Vorwärtsmodellierung integrieren und damit ohne Übergang in eine andere Programmumgebung nach der Auswertung des Versuchs die Prognose für die jeweilige Fragestellung erfolgen kann (z. B. GILLBRICHT, 1999a).

## Beispiel 1

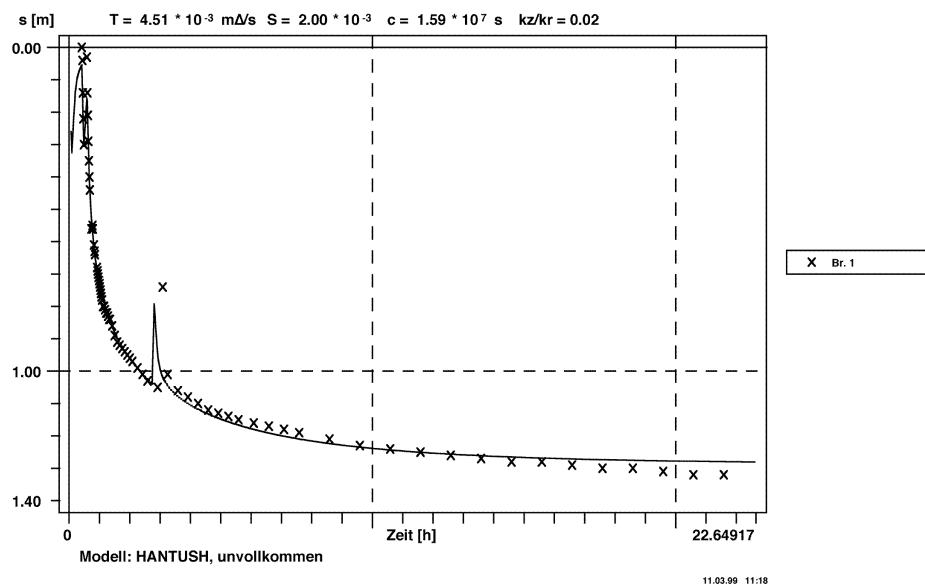
---

Für die Trockenlegung und -haltung einer Baugrube wurden durch ein Tiefbauunternehmen zwei Tiefbrunnen nach Erfahrungswerten dimensioniert und errichtet. Die Brunnen wiesen einen unvollkommenen Ausbau mit Filterstellungen nur im oberen Teil des Grundwasserleiters auf. Da sich während der bereits laufenden Baumaßnahme Zweifel an den geologischen Annahmen bei dieser Dimensionierung ergaben sowie wasserrechtliche Probleme auftra-

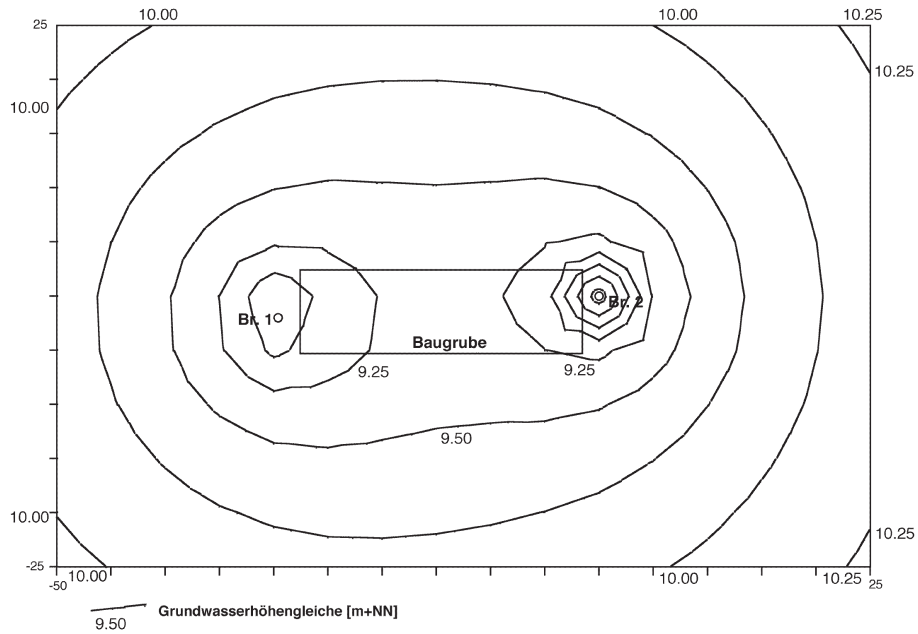
ten, sollten kurzfristig durch einen Pumpversuch die tatsächlich zu erwartende Wassermenge und die Größe des Absenkungstrichters abgeschätzt werden.

Es wurde daher ein eintägiger Pumpversuch mit einem der schon vorhandenen Brunnen durchgeführt, der zweite Brunnen als Meßstelle verwendet. Weitere Meßstellen standen im näheren Umfeld nicht zur Verfügung. Durch technische Schwierigkeiten bei der Ableitung des geförderten Wassers kam es mehrfach zu kurzzeitigen Unterbrechungen des Versuchs. Dieser konnte trotzdem befriedigend ausgewertet werden (Abb. 2.4.1).

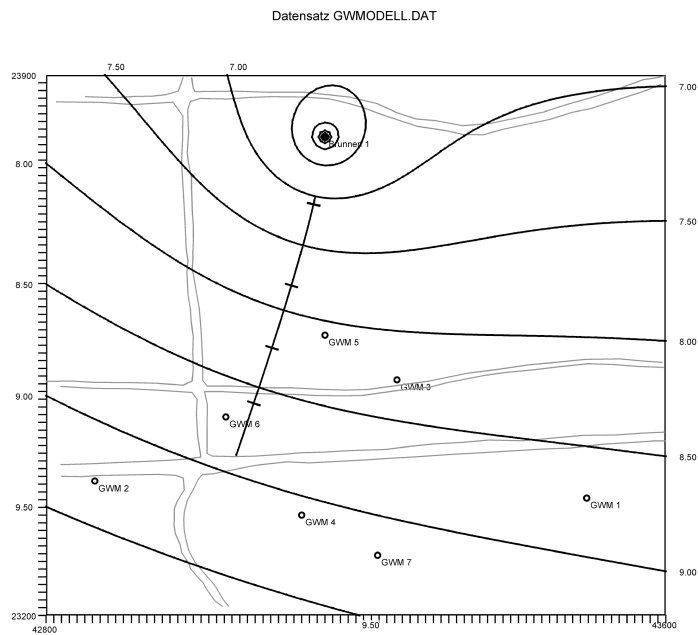
Die Abschätzung des Absenkungstrichters im quasistationären Dauerbetrieb, d. h. im Bezug auf eine Baugrubenwasserhaltung nach einigen Tagen Betriebszeit, erfolgte mit dem im Pumpversuchsauswertungsprogramm integrierten Grundwasserströmungsmodell (GILLBRICHT, 1999a; Abb. 2.4.2). Dieses berechnet mit Hilfe der analytischen Brunnenfunktionen die Absenkung auf einem



**Abb. 2.4.1:** Auswertung des Pumpversuchs zur Dimensionierung einer Baugrubenwasserhaltung



**Abb. 2.4.2:** Prognose der Grundwasserhöhen für eine Baugrubenwasserhaltung, hydraulische Parameter aus der Pumpversuchsauswertung in Abb. 2.4.1



**Abb. 2.4.3:** Prognose der Grundwasserhöhen für das Umfeld eines Wasserwerksbrunnens. Bahnlinie für Stofftransport mit Zeitmarken im Abstand von 6 Monaten

regelmäßigen quadratischen Raster. Das Ergebnis ähnelt damit einfachen numerischen Modellen nach dem Prinzip der finiten Differenzen (z. B. CHIANG ET AL., 1998) für einen homogenen Grundwasserleiter. Durch Variation der Förderraten kann in diesem Modell überprüft werden, ob das Absenkungsziel erreicht werden kann und welche Gesamtfördermengen dabei anfallen. Während im Pumpversuch nur Brunnen 2 betrieben wurde und Brunnen 1 als Meßstelle diente, ist für die Baugrubenwasserhaltung naturgemäß der Betrieb beider Brunnen als Förderbrunnen erforderlich. Auf der Grundlage dieser Modellberechnung konnte kurzfristig über das weitere Vorgehen, insbesondere wasserwirtschaftliche Belange, Beweissicherung etc., entschieden werden. Für die Auswertung des Versuchs und die Modellrechnung war insgesamt ein Aufwand von weniger als 4 Arbeitsstunden ausreichend.

## Beispiel 2

---

Für das Umfeld eines Wasserwerks sollte eine Abschätzung über die mögliche Ausbreitung von Schadstoffen nach einem Schadensfall an einer Hauptverkehrsstraße erfolgen. Ein Pumpversuch wurde als Wiederanstiegsversuch durchgeführt (GILLBRICHT, 1999b: Abb. 1.3.1).

Mit Hilfe eines einfachen Particle-Tracking-Algorithmus (modifiziert nach KINZELBACH, 1986) wurde die Ausbreitung von Schadstoffen von einer Punktquelle im analytischen Modell nachgebildet (Abb. 2.4 3).

## Ausblick

---

Es ist davon auszugehen, daß der Trend zu einer Integration von einzelnen EDV-Lösungen zu immer komplexeren Paketen auch im Bereich der Pumpversuchsauswertung zunehmen wird. Die konsequente Verbindung von Pumpversuchsauswertungen mit analytischen Grundwassermodellen ist hier nur ein erster Schritt, Verbin-

dungen mit numerischen Modellen oder auch numerischen Auswertungsverfahren (z. B. HVILSHØJ ET AL., 1999) werden sich anschließen.

## Literatur

---

- CHIANG, W.; KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. (1998): Aquifer simulation model for Windows. – Schweizerbart: IV + 137 S.; Stuttgart
- GILLBRICHT, C. A. (1996): Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen. – Sörensen: 60 S.; Hamburg
- GILLBRICHT, C. A. (1999a): MRQWIN, Version 1.1.5; Hamburg
- GILLBRICHT, C. A. (1999b): Pumpversuche bei langjährig betriebenen Wasserwerken. – *in diesem Band*
- HVILSHØJ, S.; JENSEN, K. H.; BARLEBO, H. C. & MADSEN, B. (1999): Analysis of pumping tests of partially penetrating wells in an unconfined aquifer system using inverse numerical optimization. – Hydrogeology Journal, 7: 365–379; Berlin
- KINZELBACH, W. (1986): Groundwater modelling. – Elsevier: X + 334 S.; Amsterdam
- SPITZ, K. & MORENO, J. (1996): A practical guide to groundwater and solute transport modeling. – Wiley: XVII + 461 S.; New York



**3**

# **Auswertung von Pumpversuchen mit numerischen Modellen**



## Einführung

Die Auswertung von Pumpversuchen im Hinblick auf die hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters erfolgt in der ingenieurtechnischen Praxis bislang nur in seltenen Fällen mit Hilfe numerischer Grundwasserströmungsmodelle. Dagegen sind diese in der Forschung fest etabliert (z. B. RUSHTON & REDSHAW, 1979; RUTLEDGE, 1991; LEBBE, 1999; HVILSHØJ ET AL., 1999). Andererseits werden numerische Modelle in der überwiegenden Zahl der Fälle für stationäre Strömungsbedingungen und nicht unter Bedingungen eines Pumpversuchs geeicht. Da unter stationären Bedingungen der Durchfluß des Grundwasserleiters im allgemeinen nicht oder nur mit erheblicher Unsicherheit bekannt ist, sind die Ergebnisse derartiger Eichungen immer mit Zweifeln behaftet (z. B. KINZELBACH, 1987; HILL ET AL., 1998; YAGER, 1998). Es wäre somit zu wünschen, daß für die Eichung von Grundwasserströmungsmodellen verstärkt die Ergebnisse aussagefähiger Pumpversuche herangezogen werden. Dagegen ist für die erste Auswertung eines Pumpversuchs die Verwendung numerischer Modelle nur anzuraten, wenn die geologische Situation und/oder die Versuchsergebnisse nicht befriedigend mit analytischen Ansätzen beschrieben werden können. Dies gilt insbesondere für Grundwasserleiter mit ausgeprägten Heterogenitäten in Form lateraler Änderungen der geologischen Struktur und/oder einer relevanten Schichtung, bei komplexen Randbedingungen oder bei erheblichen Einflüssen hydrologischer Vorgänge, insbesondere der Grundwasserneubildung bei längerfristigen Versuchen.

In dem hier vorgelegten Beitrag wird die Modellierung eines komplexen Grundwasserleiters mittels eines 3-dimensionalen Modells vorgestellt.

## Literatur

---

- HILL, M. C.; COOLEY, R. L. & POLLOCK, D. W. (1998): A controlled experiment in ground water flow model calibration. – *Ground Water*, **36**: 520–535; Westerville, OH
- HVILSHØJ, S.; JENSEN, K. H.; BARLEBO, H. C. & MADSEN, B. (1999): Analysis of pumping tests of partially penetrating wells in an unconfined aquifer system using inverse numerical optimization. – *Hydrogeology Journal*, **7**: 365–379; Berlin
- KINZELBACH, W. (1987): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. – *Schriftenreihe gwf Wasser/Abwasser*, **21**: VII + 317 S.; München/Wien
- LEBBE, L.C. (1999): Hydraulic parameter identification. – Springer: XVI + 359 S.; Berlin
- RUSHTON, K. R. & REDSHAW, S. C. (1979): Seepage and groundwater flow. – Wiley & Sons: XII + 339 S.; Chichester
- RUTLEDGE, A. T. (1991): An axisymmetric finite-difference flow model to simulate drawdown in and around a pumped well. – U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report, **90-4098**: 33 S.; Lawrence, KA
- YAGER, R. M. (1998): Detecting influential observations in nonlinear regression modeling of groundwater flow. – *Water Resources Research*, **34**: 1623–1633; Washington, D.C.

Kai-Justin Radmann

## **Einsatz 3-dimensionaler Grundwassermodelle zur Auswertung von Pumpversuchen in heterogenen Grundwasserleitern**

### *Zusammenfassung*

Für die Planung einer Grundwassersicherungsmaßnahme in Norddeutschland wurde ein Pumpversuch in einem mehrschichtigen Grundwasserleiter durchgeführt. Für die Erfassung von Wasserstandsdaten standen mehrere in unterschiedlichen Tiefen verfilterte Grundwassermeßstellen zur Verfügung. Neben der Gewinnung von geohydraulischen Kennwerten sollte insbesondere die Lage von Bereichen im Grundwasserleiter mit erhöhten vertikalen Durchlässigkeiten in der Trennschicht zwischen oberflächennahem und dem tiefer gelegenen Grundwasserleiter im Rahmen der Pumpversuchsauswertung ermittelt werden.

Erst durch den Einsatz eines 3-dimensionalen numerischen Grundwassermodelles konnte die geologische Struktur adäquat beschrieben werden. Eine Auswertung mittels eines analytischen Ansatzes allein führte hinsichtlich der oben genannten Fragestellung zu keinem befriedigenden Ergebnis.

### **Einführung**

Lockergesteinsgrundwasserleiter in Norddeutschland bestehen typischerweise aus komplexen, heterogenen und zumeist nur partiell verstandenen geologischen Strukturen (vgl. SPITZ & MORENO, 1996). Das generelle Ziel von Pumpversuchen ist es, Erkenntnisse über das Grundwasserleitersystem zu gewinnen, welche die Grundlage für die weitere Vorgehensweise im Rahmen einer zukünftigen

Wassergewinnung oder einer Grundwassersicherung bzw. -dekontamination bilden.

Für die Ermittlung von hydraulischen Kennwerten ist es in vielen Fällen ausreichend, das reale Grundwasserleitersystem sehr stark zu vereinfachen und einen analytischen radialsymmetrischen Ansatz für die Pumpversuchsauswertung auszuwählen. Der Einsatz von 3-dimensionalen numerischen Grundwassermodellen empfiehlt sich grundsätzlich in zwei Fällen:

1. Der analytische Ansatz führt aufgrund der großen Heterogenität des Grundwasserleitersystems und besonderer Randbedingungen zu keinen plausiblen hydraulischen Kennwerten. Es können keine zufriedenstellenden Anpassungen zwischen gemessenen und berechneten Wasserstandsganglinien erzielt werden.
2. Es können zwar mit Hilfe eines analytischen Ansatzes plausible Werte für die hydraulischen Kennwerte erzielt werden, doch es sollen zusätzlich Erkenntnisse über die geologische Struktur des Grundwasserleiters gewonnen werden. Der Einsatz eines 3-dimensionalen Grundwassermodelles ist hier als notwendige Ergänzung zum analytischen Auswertungsansatz zu verstehen.

## Beispiel

---

In einem norddeutschen Industriegebiet sind als Folge industrieller Nutzungen Schadstoffe in das Grundwasser gelangt. Das Grundwasserleitersystem ist heterogen aufgebaut. Es lassen sich vereinfachend im wesentlichen zwei Grundwasserleiter, die durch eine schlecht wasserdurchlässige geologische Schicht voneinander getrennt sind, unterscheiden. Die geologische Struktur läßt sich grob folgendermaßen beschreiben

Schicht 1: ungespannter Grundwasserleiter, wassererfüllte  
Mächtigkeit ca. 6 m

Schicht 2: Trennschicht, Mächtigkeit ca. 3 m

Schicht 3: gespannter Grundwasserleiter, Mächtigkeit ca. 26 m.

Die Trennschicht (Schicht 2) ist im Untersuchungsgebiet nur lückenhaft verbreitet.

Für die Optimierung einer geplanten Grundwassersicherungsmaßnahme wurde ein mehrstufiger Pumpversuch im gespannten Grundwasserleiter (Schicht 3) an einem Standort durchgeführt, bei dem zum einen relevante Schadstoffkonzentrationen nachgewiesen waren und zum anderen mehrere Grundwassermeßstellen mit unterschiedlichen Filterstrecken oberhalb und unterhalb der Trennschicht zur Verfügung standen.

Schicht 1: Grundwassermeßstelle GWM 1 (Entfernung zum Förderbrunnen ca. 3 m)

Schicht 3: Förderbrunnen FB,  
GWM 2 (Entfernung zum Förderbrunnen ca. 5 m),  
GWM 3 (Lage zum Förderbrunnen ca. 125 m südwestlich)

Der Pumpversuch hatte folgende Hauptziele:

- Gewinnung von geohydraulischen Kennwerten,
- Lokalisierung von Bereichen mit erhöhten vertikalen Durchlässigkeiten in der Trennschicht (sog. Fehlstellen).

Die Pumpversuchsbedingungen und die Reaktionen der am Pumpversuch beteiligten Grundwassermeßstellen sind in Tab. 3.1.1 zusammengefaßt.

Pumpstufe	Förderrate [m <sup>3</sup> /h]	Absenkung [m]			
		FB	GWM 1	GWM 2	GWM 3
I. Stufe	2,6	0,60	0,00	0,06	0,00
II. Stufe	4,0	0,98	0,00	0,11	0,01
III. Stufe	9,0	2,10	0,00	0,26	0,03
IV. Stufe	15,0	4,47	0,22	0,63	0,12

**Tab. 3.1.1:** Zusammenstellung des Versuchsablaufs und der wesentlichen Ergebnisse

Die Tatsache, daß an der Grundwassermeßstelle GWM 1 deutliche Wasserstandsänderungen während des Pumpversuches auftraten, zeigt, daß eigentlich die Voraussetzung für eine geschlossene mathematische Lösung (Modell nach Hantush) nicht gegeben ist. Daher erfolgt die Auswertung mit analytischen Ansätzen in erster Linie im Hinblick auf eine Abschätzung der hydraulischen Kennwerte für den Aufbau eines 3-dimensionalen Grundwassermodells.

Es wurden die Daten des Förderbrunnens (FB) und der Grundwassermeßstellen GWM 2 und GWM 3 gemeinsam analytisch mit dem Modell nach Theis und dem Modell nach Hantush unter Berücksichtigung von Brunnenverlusten ausgewertet (Abb. 3.1.1 und 3.1.2).

Mit beiden Auswertungsansätzen können relativ gute Anpassungen zwischen gemessenen und berechneten Wasserstandsganglinien erzielt werden.

Bemerkenswert ist jedoch zum einen die relativ große Differenz zwischen den ermittelten Werten für die Transmissivität ( $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  nach Hantush und  $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  nach Theis), zum anderen, daß der prinzipiell ungeeigneteren Ansatz nach Theis (die deutliche Reaktion der Grundwassermeßstelle GWM 1 deutet auf eine vertikale Zusickerung vom 1. in den 2. Grundwasserleiter hin) das plausiblere Ergebnis liefert. In Abb. 3.1.2 ist zu erkennen, daß für die relativ weit vom Förderbrunnen entfernte Grundwassermeßstelle GWM 3 im Ansatz nach Hantush keine Absenkung berechnet wird.

Aus dem Ergebnis der analytischen Auswertung folgt, daß im Nahbereich des Förderbrunnens während des Pumpversuches eine Zusickerung vom 1. in den 2. Grundwasserleiter stattfand, während im Bereich der Grundwassermeßstelle GWM 3 keine Zusickerung wirksam war.

Auf der Basis der Ergebnisse der analytischen Pumpversuchsauswertung wurde unter dem Programmsystem PMWIN (CHIANG & KINZELBACH, 1996) ein aus 3 Modellschichten bestehendes 3-dimensionales numerisches Grundwassermodell aufgebaut.

Im Abb. 3.1.3 sind die Größe des Modellgebietes, die hydraulischen Randbedingungen (umschließende Festpotentialränder) und



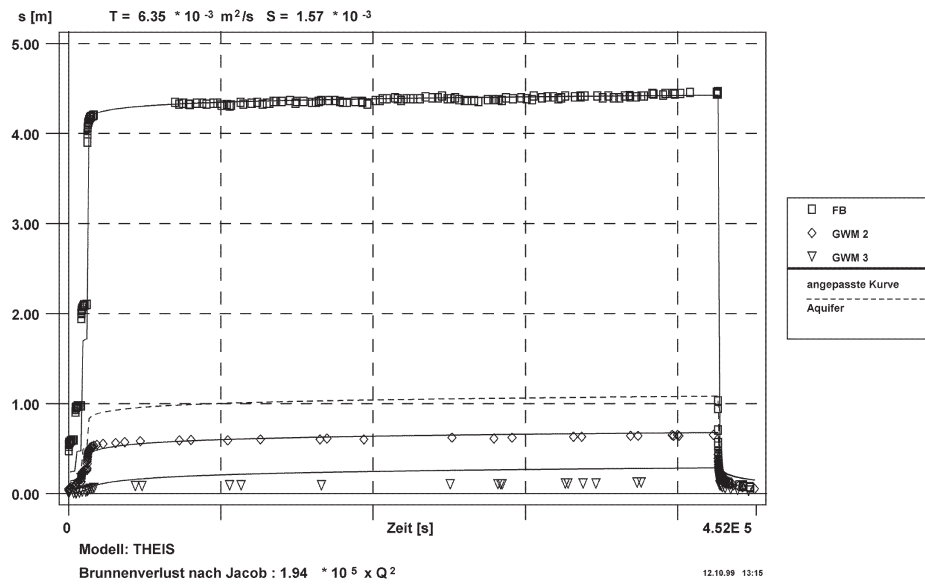


Abb. 3.1.1: Auswertung nach Theis

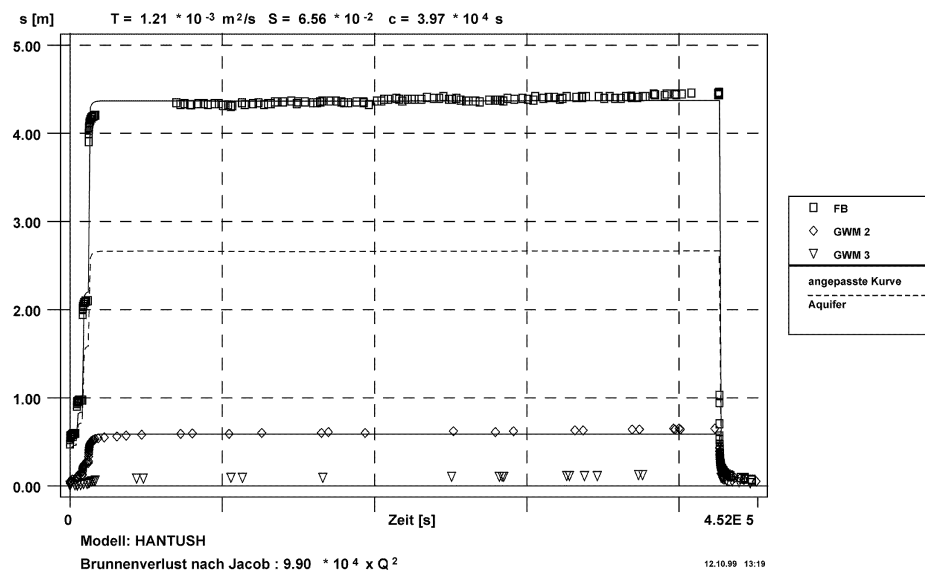
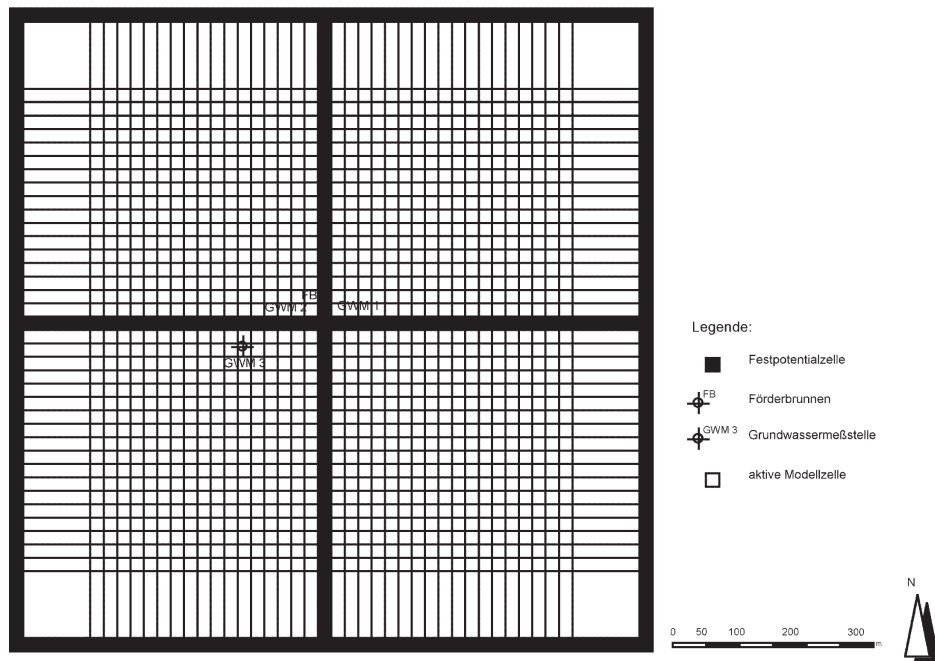


Abb. 3.1.2: Auswertung nach Hantush



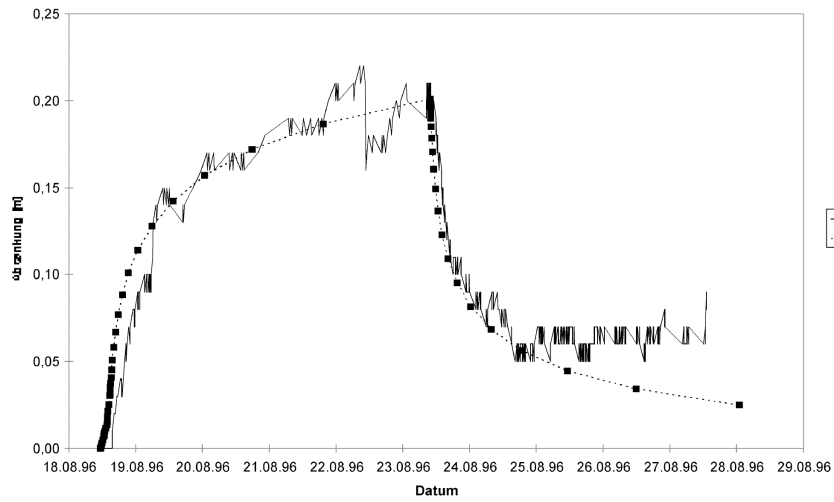
**Abb. 3.1.3:** Modellgebiet, Modelldiskretisierung, hydraulische Randbedingungen

die Diskretisierung des Modellgebietes dargestellt. Im Bereich des Förderbrunnens wurde das Modellnetz stark verfeinert ( $0,5 \text{ m} * 0,5 \text{ m}$  Zellen), um eine höhere Rechengenauigkeit in diesem Bereich zu erzielen.

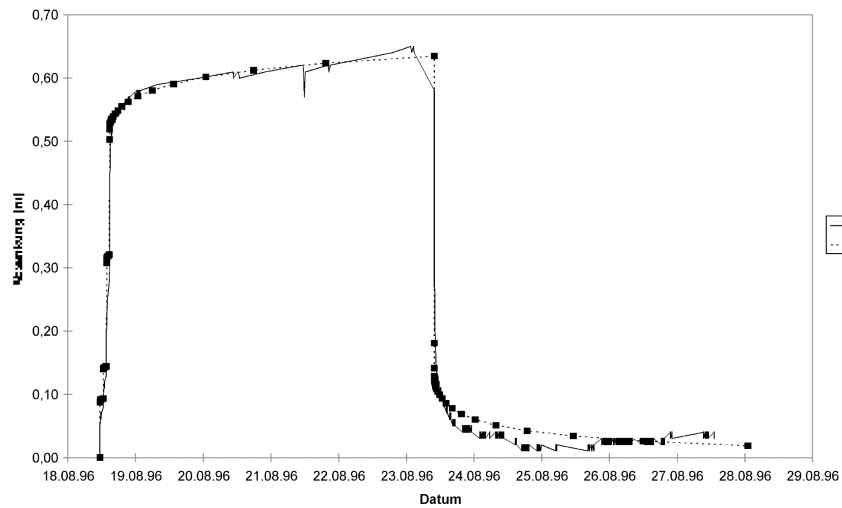
Die Modellränder wurden so weit nach außen gelegt, daß die Auswirkungen der Randbedingungen auf die Modellierung der Pumpversuchsmaßnahme vernachlässigbar gering sind.

Bei der Modellierung wurde von einer horizontal-ebenen Anfangspotentialverteilung im Grundwasserleitersystem ausgegangen. Die Werte für die Festpotentiale betragen für alle Modellschichten  $12,30 \text{ mNN}$ . Dieser Wert entspricht dem Ruhewasserspiegel des oberflächennahen 1. Grundwasserleiters vor Beginn des Pumpversuches.

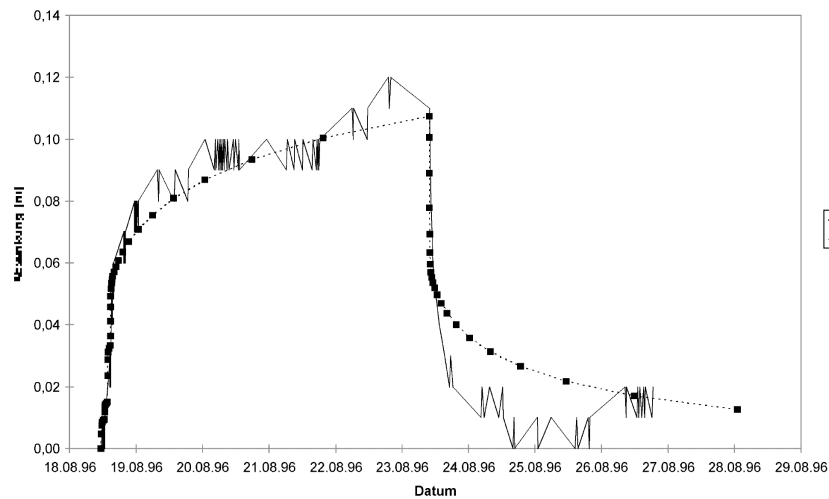
Mit den Eingabedaten wurden eine erste instationäre Berechnung durchgeführt und die berechneten Ganglinien mit den gemessenen



**Abb. 3.1.4:** Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Absenkungskurven an Meßstelle GWM 1



**Abb. 3.1.5:** Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Absenkungskurven an Meßstelle GWM 2



**Abb. 3.1.6:** Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Absenkungskurven an Meßstelle GWM 3

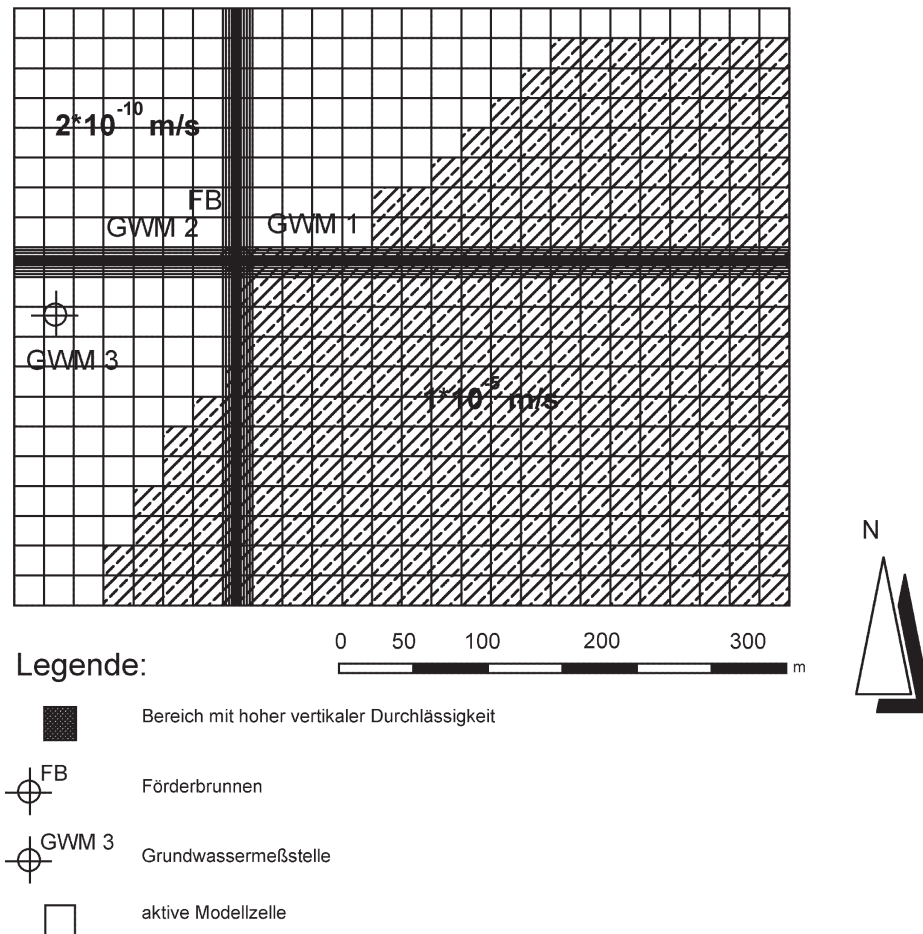
Ganglinien verglichen. Daraufhin wurden die Eingabeparameter solange variiert, bis eine zufriedenstellende Anpassung zwischen den gemessenen und modellierten Wasserstandsganglinien erzielt wurde (Abb. 3.1.4 –3.1.6).

Durch den Einsatz des Grundwassermodelles konnten auch die gemessenen Wasserstandsganglinien der im oberflächennahen Grundwasserleiter verfilterten Grundwassermeßstelle GWM 1 ziemlich genau reproduziert werden (Abb. 3.1.4).

Zudem konnte eine Abschätzung über den Verlauf der flächenhaft verbreiteten »Fehlstelle« in der Trennschicht gemacht werden (Abb. 3.1.7).

Die Ergebnisse der Grundwassermodellierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Im Pumpversuchsgebiet existieren zwei Bereiche, die hinsichtlich ihrer vertikalen Durchlässigkeiten der Trennschicht stark voneinander abweichen. In der Nähe der Grundwassermeßstelle GWM 1



**Abb. 3.1.7:** Verbreitung der Fehlstelle in der bindigen Trennschicht

beträgt die vertikale Durchlässigkeit der Trennschicht ca.  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . In Richtung Norden und Westen verringert sich die vertikale Durchlässigkeit deutlich. Im Bereich der Grundwassermeßstelle GWM 3 beträgt sie ca.  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ , und die Trennschicht kann als hydraulisch dicht bezeichnet werden (Abb. 3.1.7).

Die durch die Grundwassermodellierung ermittelten flächenhaft eingesetzten horizontalen Transmissivität- bzw.  $k_f$ -Werte lauten wie folgt:

Schicht 1:  $k_f$ -Wert  $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Schicht 3: T-Wert  $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  bzw.  $k_f$ -Wert  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ .

## Ausblick

---

Das vorliegende Beispiel zeigt, daß einige Fragestellungen im Rahmen eines Pumpversuches nur mit Hilfe eines 3-dimensionalen Grundwassermodelles zu klären sind. Der zeitliche und technische Aufwand für diese zusätzliche Auswertungsmethode wird in diesem Fall durch den enormen Erkenntnisgewinn gerechtfertigt. Im Falle dieses Beispielen sowie bei den meisten anderen Pumpversuchen werden die wesentlichen Kosten durch die Pumpversuchsdurchführung und die Datengewinnung (evtl. Grundwasseranalytik) verursacht. Die Kosten für die Pumpversuchsauswertung spielen bei der Gesamtkostenbetrachtung zumeist eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund sollte für jeden Pumpversuch abhängig von der Fragestellung und der Auswertbarkeit mit Hilfe konventioneller Methoden auch die Auswertung mittels eines 3-dimensionalen numerischen Grundwassermodelles in betracht gezogen werden.

## Literatur

---

- CHIANG, W. H. & KINZELBACH, W. (1996): PMWIN Version 4.0, Programmdokumentation; Hamburg
- SPITZ, K. & MORENO, J. (1996): A practical guide to groundwater and solute transport modeling. – Wiley: XVII + 461 S.; New York

## **Autorenverzeichnis**

Dipl.-Geol. Robert Dési  
Büro Prof. Dr. Harro Stolpe  
Beratende Geowissenschaftler und Ingenieure GmbH  
Gotenstraße 4  
20097 Hamburg  
Tel.: 040 / 23 41 79  
Fax: 040 / 23 14 49  
Email: bsgi.hh@t-online.de

Dipl.-Geol. Christian A. Gillbricht  
Kieler Str. 421  
22525 Hamburg  
Tel.: 040 / 54 76 82-76  
Fax: 040 / 54 76 82-84  
Email: cagsoft@t-online.de

Dipl.-Geol. Kai-Justin Radmann  
CONSULAQUA Hamburg Beratungsgesellschaft mbH  
Billhorner Deich 2  
20539 Hamburg  
Tel.: 040 / 78 88-30 33  
Fax: 040 / 78 88-27 84  
Email: consulaqua@t-online.de

*Von Christian A. Gillbricht sind weiterhin erschienen:*

### **Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen Anmerkungen für die Praxis**

Die Durchführung und Auswertung hydraulischer Pumpversuche sind Standardaufgaben der Hydrogeologie bzw. Grundwasserhydraulik. Trotz des reichhaltigen Angebots an Fachschrifttum bestehen bei der praktischen Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen erhebliche Defizite. Diese Schrift macht Angaben zu »rein handwerklichen« Aspekten, insbesondere zu typischen Bearbeitungsfehlern und Möglichkeiten ihrer Vermeidung. Sie versteht sich als Ergänzung zu den Lehrbüchern des Faches.

1996 · ISBN 3-932318-01-3 · DM 20,— · *Restexemplare nur beim Verlag*

### **Stochastische Grundwassermodellierung in der ingenieurtechnischen Praxis**

In den letzten 10 Jahren haben sich numerische Grundwassermodelle für die Behandlung ingenieurtechnischer Fragestellungen durchgesetzt. Gleichzeitig sind stochastische Ansätze zur Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten bei der Grundwassermodellierung ein fester Bestandteil in der Forschung geworden. Diese Schrift gibt einen kurzen Überblick über stochastische Ansätze und ihre Anwendbarkeit auf praktische Fragestellungen. Daraus wird eine Einschätzung der Chancen des künftigen Einsatzes dieser Verfahren abgeleitet.

1997 · ISBN 3-932318-02-1 · DM 28,—

### **Geophysikalische Bohrlochvermessungen in der ingenieurtechnischen Praxis**

Bohrlochgeophysikalische Messungen werden seit Jahrzehnten in der hydrogeologischen Praxis eingesetzt. Planung, ingenieurtechnische Betreuung und Auswertung dieser Messungen liegen im Regelfall nicht in der Hand von speziell geophysikalisch geschulten Fachleuten, sondern von Geologen und Ingenieuren ohne besondere Vorkenntnisse. Trotz des hohen Standes der Meßtechnik, der durch die Anwendung vergleichbarer Methoden in der Erdöl- und Erdgasindustrie gewährleistet wird, ist die Umsetzung im Bereich der Umwelt- und Hydrogeologie daher oft unbefriedigend. Diese Schrift gibt einen kurzen Überblick über oft verwendete Methoden und gibt Hinweise auf ihren praktischen Einsatz speziell für den norddeutschen Raum.

1998 · ISBN 3-932318-03-X · DM 36,—

*Bestellung direkt beim Verlag oder über jede Buchhandlung.*  
Kay W. Sörensen · Buchverlag · Sillemstr. 102 · D-20257 Hamburg