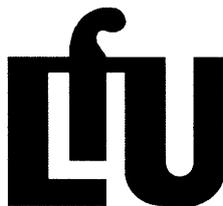
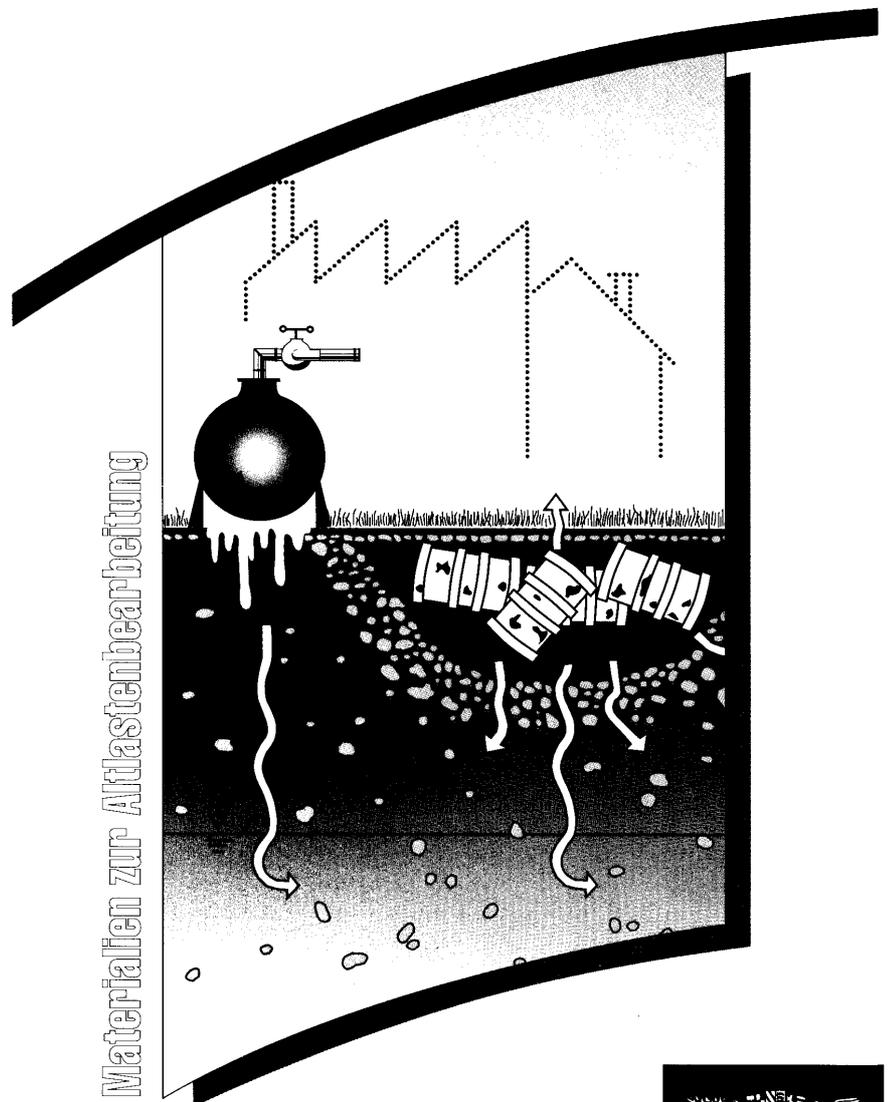


**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

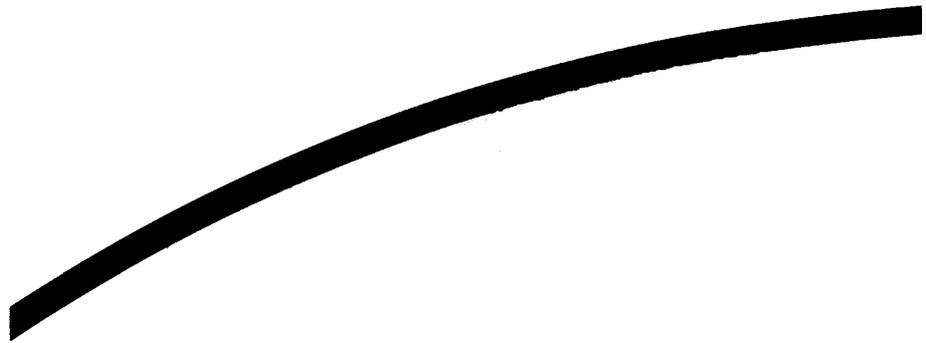


**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit



**Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage**

Karlsruhe 1991



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Bearbeiter: Dr. B. Edalat
Dipl.-Geol. P. Krach
Dipl.-Geol. K. Volk
Ing.-Büro R.W. Ashauer und Partner GmbH
Kerpen-Türnich

Karlsruhe, Juli 1991

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	1
KURZFASSUNG	2
ABKÜRZUNGEN	3
I AUF EINEN BLICK	5
1 ZIEL DER LEITLINIE UND ANWENDUNGSHINWEISE	5
2 VERFAHRENAUSWAHL ANHAND ALLTÄGLICHER PROBLEMSTELLUNGEN.....	8
3 VERGLEICHENDE GEGENÜBERSTELLUNG DER EINZELVERFAHREN	12
II VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER GEBIRGSDURCHLÄSSIGKEIT	17
4. EINZELVERFAHREN.....	18
4.1 Pumpversuche	18
4.2 Wasserdruckversuch (WD-Test).....	28
4.3 Weitere hydraulische Versuche (Auffüll-, Absenkversuch, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test etc.)	36
4.4 Einschwingversuch.....	43
4.5 Flowmetermessung.....	46
4.6 Fluid-Logging	50
4.7 Tracerversuch	55
4.8 Direkte Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben (Permeameterversuche)	58
4.9 Korngrößenanalysen.....	63
4.10 Strömungsnetzanalyse.....	67
4.11 Gezeitenanalyse	70
III ANHANG	72
5 GRUNDLEGENDE BEGRIFFE.....	72
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	76
TABELLENVERZEICHNIS	77
INDEXVERZEICHNIS	78

Vorwort

Mit der vorliegenden Leitlinie soll den mit der Altlastenuntersuchung, Grundwassererschließung und Standorterkundung befaßten Ingenieuren ein praxisnahes Hilfsmittel bei der Suche nach geeigneten Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit an die Hand gegeben werden.

Die Leitlinie soll zunächst in die theoretischen Grundlagen einführen und einen Überblick über einschlägige Ausführungstechniken und Versuchsanordnungen vermitteln. Hinweise auf weiterführende Literatur werden dabei gegeben. Schließlich wird aufgezeigt, wie bei der Wahl des Verfahrens die hydrogeologischen Verhältnisse, die geforderten Nachweistiefen und auch die verfügbaren Finanzmittel zu berücksichtigen sind.

Detaillierte Anwendungshinweise kann das Geologische Landesamt Baden-Württemberg geben.

Das Wissen über die Gebirgsdurchlässigkeit, d.h. die Wasserwegsamkeit im Lockersediment, sowie im Halb- und Festgestein ist noch recht unvollkommen. Viele verschiedene Wissensgebiete spielen in den Problemkreis hinein. Die Leitlinie kann daher keine umfassende Ausleuchtung einzelner Gebiete geben. Sie soll vielmehr als fortzuschreibende Diskussionsgrundlage betrachtet werden.

Karlsruhe, im Juli 1991

Kurzfassung

Die vorliegende Leitlinie soll dem nichtfachspezialisierten Anwender einen kurzen Einblick in die Methoden zur praxisnahen Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit ermöglichen.

Die drei Themenschwerpunkte liegen deshalb im Auffinden geeigneter Verfahren aus Sicht allgemeiner Problemstellungen, in einer vergleichenden Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit der Methoden und in einer knappen theoretischen und praktischen Beschreibung der Einzelverfahren.

Demzufolge werden zunächst Tabellen für die Bereiche Grundwasserbeschaffung, Wasser- und Tiefbau, Standorterkundung und Altlastenproblematik vorgestellt, aus denen die Eignung bestimmter Verfahren im Rahmen orientierender oder vertiefender Untersuchungen und vor bestimmten hydrogeologischen Rahmenbedingungen hervorgeht.

Die vergleichende Gegenüberstellung der Einzelverfahren setzt ebenfalls in Tabellenform das Einsatzspektrum, den Gültigkeitsbereich und die Kosten zueinander in Bezug und zeigt, welche Grundvoraussetzungen zur Durchführung geschaffen oder vorhanden sein müssen und wer entsprechende Leistungen erbringen kann.

Abschließend wird für jedes Verfahren kurz die Theorie, die Durchführung, Meßwerterfassung und Auswertemethodik, der technische und wirtschaftliche Aufwand und die Versuchproblematik erläutert, die Verfahren im einzelnen bewertet und weiterführende Literatur benannt.

Die Leitlinie beinhaltet im wesentlichen Aussagen zu Pumpversuchen, Wasserdruckversuch, Auffüll-, Absenkversuch, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test, Einschwingversuch, Flowmetermessung, Fluid-Logging, Tracerversuch und Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben. In einem Anhang sind darüber hinaus wichtige Grundbegriffe der Hydrologie erläutert.

Abkürzungen

b	Breite [m]
c	Konzentration [kg/m ³]
d _i	Korngröße bei i % Kornteil [mm]
d _w	wirksamer Korndurchmesser [mm]
F	Fläche [m ²]
G _i	Gewichtsanteil der Kornklasse i [i]
h	Grundwasserstand [m]
i	hydraulischer Gradient [-]
k oder k _f	Durchlässigkeitswert [m/s]
l	Länge [m]
M	Mächtigkeit [m]
n	Porenvolumen [-]
p	Druck [bar]
q, Q	Fördermenge, Durchfluß [m ³ /s]
r	Radius [m]
r	Rauhigkeitsgrad [-]
r _w	wirksamer Brunnenradius [m]
s	Absenkung [m]
S	Speicherkoeffizient [-]
t	Zeit [s]
T	Transmissivität [m ² /s]
U	Ungleichförmigkeit
V	Volumen [m ³]
x, y, z	Richtungskordinaten [m]

β	Dämpfungskoeffizient [-]
β	Korrektur der Leitfähigkeit [0,22/°K]
β	Dichte [g/cm ³]
β	partiell Differential
β	Porenziffer [-]
β	Kreisfrequenz [s ⁻¹]
δ	Leitfähigkeit [μS/cm]
δ	Verhältnis der kinematischen Zähigkeit von 10°C warmen Wassers zu Wasser bei Aquifertemperaturen

I Auf einen Blick

1 Ziel der Leitlinie und Anwendungshinweise

Verfahren zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit werden überall dort eingesetzt, wo die Fließvorgänge des Wassers im Untergrund von Interesse sind. Wichtige diesbezügliche Bereiche sind

- die Grundwasserbeschaffung und der Wasser- und Tiefbau,
- die Untergrunderkundung für geplante Standortnutzungen mit einhergehendem wasserwirtschaftlichem Gefährdungspotential sowie
- Erkundungs-, Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen an Deponien und Altlasten.

Ausgehend von den unterschiedlichsten Fragestellungen wurden bis heute eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, deren Theorie, Durchführungsmethodik, Auswertung und Aussagekraft außerordentlich vielfältig sind.

Die Verfahren sind oftmals nur in speziellen Fällen anzuwenden und fast immer auf die gegebenen Verhältnisse des Untergrundes auszurichten; kompliziertere Fragestellungen erfordern darüber hinaus meist eine Kombination unterschiedlicher Methoden.

Aufgrund steigenden Umweltbewußtseins und des gesetzlich verankerten Grundwasserschutzes ist die Anforderung an die Genauigkeit der Ergebnisermittlung, insbesondere bei Vorhaben mit wasserwirtschaftlichem Gefährdungspotential deutlich gestiegen. So sei hier beispielhaft im Zusammenhang mit neuen Deponien das Schlagwort "natürliche Barriere" erwähnt, die nur dann als solche anzusprechen ist, wenn sie eine bestimmte niedrige Gebirgsdurchlässigkeit bei ausreichender Mächtigkeit aufweist.

Vor dem o.g. Hintergrund wird verständlich, daß deshalb gerade dort Schwierigkeiten auftreten können, wo nicht fachspezialisierte Anwender die Sinnhaftigkeit von Versuchen und/oder die Aussagekraft von Ergebnissen beurteilen müssen. Deshalb wurde das Ing.-Büro R.W. Aschauer und Partner GmbH mit Schreiben vom 22.08.1990 von der Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg mit der Erstellung einer aktuellen praxisbezogenen Leitlinie über den Einsatz von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit für den nicht fachspezialisierten Anwender beauftragt.

Ziel ist es, vor allem diesem Personenkreis ein praxisnahes Hilfsmittel in die Hand zu geben, welches es ihm ermöglicht, sich rasch über die wichtigsten Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit zu informieren. Aus diesem Grund kann und will die Leitlinie nicht das gesamte wissenschaftlich-akademische Spektrum aufarbeiten oder umfassend darstellen, sondern nimmt bewußt an einigen Stellen Vereinfachungen in Kauf. So sei bereits an dieser Stelle verdeutlicht, daß sich die nachfolgenden Ausführungen auf den sog. Gebirgsdurchlässigkeitswert (in der Literatur neuerdings k und früher meist k_f -Wert genannt) beziehen, da er der Zielgruppe aus Richtlinien und technischen Anleitungen etc. besser bekannt ist, als der eigentlich zur Beschreibung der Gebirgsdurchlässigkeit aussagekräftigere Wert der Transmissivität. Diese wird mit den meisten Verfahren direkt bestimmt.

Damit nicht für jede Aufgabenstellung die gesamte Leitlinie gelesen werden muß, wurden drei Anwendungs- bzw. Einstiegsmöglichkeiten geschaffen:

- Das Auffinden geeigneter Untersuchungsverfahren für alltägliche Problemstellungen im Bereich der Städte, Kreise, Kommunen, Wasserwirtschaft etc. Hier sind auch Angaben über mögliche oder notwendige Kombinationen von Einzelverfahren gemacht (Kap. 2).
- Die informative, vergleichende Gegenüberstellung der Einzelverfahren unter Berücksichtigung der angestrebten Ergebnistiefe, der geologisch-hydrogeologischen Rahmenbedingungen und der Leistungsfähigkeit des Einzelverfahrens (Kap. 3).
- Die kurze Vorstellung allgemein theoretischer Grundlagen sowie der Einzelverfahren (Kap. 4) mit den schematisch wiederkehrenden Ordnungspunkten
 - Theorie und Auswertung
 - Anwendungsmöglichkeit
 - Durchführung und Meßwerterfassung
 - Technischer und wirtschaftlicher Aufwand
 - Versuchsproblematik
 - Bewertung
 - Literaturhinweise.

Der Leser kann sich vor allem in Kap. 4 mit den Eigenarten der Verfahren vertraut machen und findet im Unterpunkt Bewertung eine Zusammenstellung derjenigen Parameter und Faktoren, die sich mit dem jeweiligen Verfahren erzielen lassen, bzw. notwendige Voraussetzung für seine Anwendung sind. Hieraus läßt sich auch eine gewisse Beurteilung der Qualität und Aussagerelevanz ableiten.

Die wesentliche Problematik besteht jedoch darin, geeignete Verfahren vor dem Hintergrund des Projektzieles und der - ggf. unbekannt - hydrogeologischen Verhältnisse bestmöglich einzusetzen. Da die optimale Verfahrensauswahl und -gestaltung oftmals ganz wesentlich vom Kenntnisstand der Rahmenbedingungen, evtl. auch übergeordneter Zusammenhänge abhängt, sollten die Versuche nach Möglichkeit von beigezogenen Fachleuten ausgewählt, konzipiert und ggf. miteinander verknüpft werden.

Die erzielten Resultate sind daraufhin zu prüfen, ob die Aufgabenstellung hinreichend erfüllt ist oder nicht. Im letzteren Fall führt dies mit der zwischenzeitlich erweiterten Kenntnis der Rahmenbedingungen zur Anwendung von mehr oder anderen Methoden. Dieser Rückkopplungsprozeß muß theoretisch solange durchlaufen werden, bis die Aufgabenstellung gelöst ist. Abb. 1 veranschaulicht diese generelle Vorgehensweise.

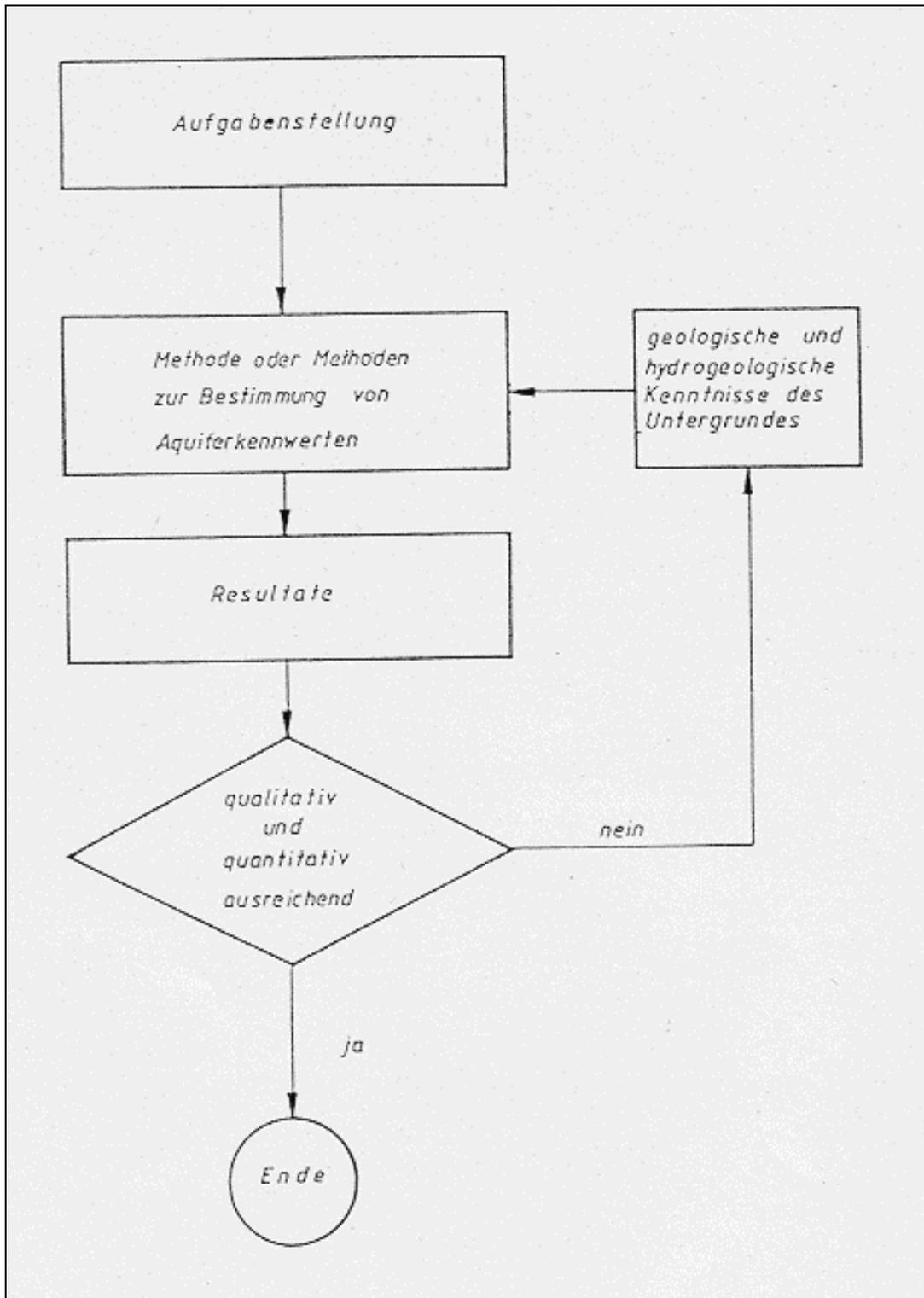


Abb. 1: Vereinfachtes Flußdiagramm zur problemorientierten Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit

Die vorliegende Leitlinie versucht einen knappen Einblick in ein fast unüberschaubar großes versuchstechnisches Gebiet zu geben. Sie erhebt keinen Anspruch auf umfassende Ausleuchtung einzelner Bereiche und soll zunächst als fortschreibungsfähige Diskussionsgrundlage gesehen werden.

2 Verfahrensauswahl anhand alltäglicher Problemstellungen

Zur wirtschaftlichen Bewältigung gegebener, mit der Gebirgsdurchlässigkeit verbundener Fragestellungen ist die Kenntnis der Anwendungsspezifika einzelner Untersuchungsverfahren ebenso erforderlich wie für die Beurteilung bereits vorliegender Einzelergebnisse, Gutachten etc.

Im folgenden sind deshalb die bereits in Kap. 1 benannten wasserwirtschaftlichen Problemkreise mit einigen wichtigen Fragestellungen aufgeführt, die zum Teil unterschiedliche Ansätze bei Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit erfordern. Die zugehörigen Tabellen 1-3 veranschaulichen vereinfacht den gängigen Verfahrenseinsatz. Die mit Kürzeln beschriebenen Eignungskriterien beruhen auf den Ausführungen im Kap. 3, insbesondere aber Kap. 4 und allgemeinen Erfahrungswerten. Sie berücksichtigen auch die Kosten- und Zeitsituation (z.B. keine teuren Versuche bei orientierenden Untersuchungen). Sind Kombinationen verschiedener Verfahren angegeben, handelt es sich um häufigere Anwendungen; es ist damit nicht gemeint, daß andere Kombinationen unter bestimmten Umständen nicht ebenso sinnvoll sind.

Grundwasserbeschaffung, Wasser- und Tiefbau

Wichtige Fragestellungen (Auszug) :

- Bestimmung der Aquiferergiebigkeit
- Brunnenausbauplanung
- Bestimmung der Reichweite von Entnahmetrichtern
- Bestimmung von einspeisbaren Wassermengen bei Grundwasseranreicherungsverfahren
- Bestimmung des Uferfiltratanteils bei Entnahmeanlagen in der Nähe von Oberflächengewässern
- Ermittlung von langfristig förderbaren Wassermengen
- Ermittlung der Wassermengen, die bei Wasserhaltungsmaßnahmen anfallen
- Ermittlung der Wassermengen, die Bauwerke unterströmen oder durchströmen
- Ermittlung von Wassermengen, die aus Oberflächengewässern (Kanäle, Becken) versickern

Tab. 1: Eignung von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit im Problemfeld Grundwasserbeschaffung

	orientierende Untersuchung Rahmenbeding. unbekannt	orientierende Untersuchung (Porenwasserl.)	orientierende Untersuchung (Kluftwasserl.)	vertiefende Untersuchung (Porenwasserl.)	vertiefende Untersuchung (Kluftwasserl.)
ausführlicher Pumpversuch (1)	wg	g	g	g	g
WD-Test (2)	ng	ng	wg	ng	gk1
Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drill- stem-, Pulse-Test (3)	g	g	g	wg	gk1,2
Einschwing- versuch (4)	wg	wg	wg	wg	wg
Flowmeter (5)	ng	ng	wg	gk1	gk1
Fluid-Log. (6)	ng	ng	wg	wg	gk1,3
Tracervers. (7)	ng	ng	ng	gk1	gk1
Direkte Verfah- ren an Boden- proben (8)	g	g	ng	g	ng
Korngrößen (9)	g	g	ng	g	ng
Strömungsnetz- analyse (10)	g	g	wg	wg	ng
Gezeiten (11)	ng	ng	s	s	s

g = geeignet

gk1 = nur in Kombination geeignet (mindestens mit Verfahren Nr.)

wg = weniger geeignet

ng = nicht geeignet

s = selten (möglich)

Bemerkungen:

Bei allen orientierenden Untersuchungen sind Kurzpumpversuche geeignet. In Geringleitern muß jedoch zur Vermeidung von Fehlinterpretationen bei der Auswertung besondere Sorgfalt an den Tag gelegt werden. Sind mit der Grundwasserbeschaffung Fragen verknüpft, die eine Aussage zu geringer durchlässigen Gebirgsbereichen erfordern (z.B. Schutzgebietsfragen - Deckschichten), so können geeignete Versuche über Kap. 3, Abb. 2 und 3 ermittelt werden.

Untergrunderkundung für geplante Standorte mit einhergehendem wasserwirtschaftlichem Gefährdungspotential

Wichtige Fragestellungen (Auszug):

- Beurteilung der Dichtungsfunktion des Untergrundes (natürliche Barriere)
- Festlegung der möglichen Deponieklasse
- Ermittlung möglicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schadstoffen
- Ermittlung von Grundlagen für schadensbegrenzende Maßnahmen

Tab. 2: Eignung von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit im Problemfeld Untergrunderkundung für geplante Standorte mit einhergehendem wasserwirtschaftlichem Gefährdungspotential

	orientierende Untersuchung Rahmenbeding. unbekannt	orientierende Untersuchung (Porenwasserl.)	orientierende Untersuchung (Kluftwasserl.)	vertiefende Untersuchung (Porenwasserl.)	vertiefende Untersuchung (Kluftwasserl.)
ausführlicher Pumpversuch (1)	wg	g/ga	g/ga	g/ga	g/ga
WD-Test (2)	ng	ng	gk1	ng	gk1
Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test (3)	g	g	g	gk1	gk1
Einschwingversuch(4)	ng	ng	ng	ng/gk1	ng/gk1
Flowmeter (5)	ng	ng	gk1	gk1	gk1
Fluid-Log. (6)	ng	ng	gk1,3	wg	gk1,3
Tracervers. (7)	ng	wg	wg	gk1	gk1
Direkte Verfahren an Bodenproben (8)	g	g	ng	g	ng
Korngrößen (9)	g	ga	ng	ga	ng
Strömungsnetzanalyse (10)	ng	ng	ng	gk1	ng
Gezeiten (11)	ng	ng	ng	ng	ng

g = geeignet

ga = geeignet bei höherer Durchlässigkeit, nicht oder weniger geeignet bei sehr geringer Durchlässigkeit

wg = weniger geeignet

gk1 = nur in Kombination geeignet (mindestens mit Verfahren Nr.)

ng = nicht geeignet

Bemerkung:

Nach Möglichkeit sollten im bezeichneten Problemfeld zumindest Kurzpumpversuche durchgeführt werden. Bei geringerer Gebirgsdurchlässigkeit kann auch eine größere Gebirgsstrecke getestet werden. In jedem Fall sind die Pumpversuche jedoch mit weiteren horizontbezogenen Tests (z.B. WD-Tests, Slug-Tests u.v.m.) zu kombinieren.

Erkundungs-, Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen an Deponien und Altlasten

Wichtige Fragestellungen (Auszug) :

- Beurteilung der wasserhaushaltlichen Verhältnisse
- Ermittlung der Auswirkung von Sicherungs- und/oder Sanierungsmaßnahmen
- Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Kontaminationsfahnen für die Gefährdungspotentialabschätzung
- Konzeption von Abwehr- und Schutzmaßnahmen, die mit Eingriffen in das Grundwasserregime verbunden sind.

Tab. 3: Eignung von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit im Problemfeld Altlastenbewältigung

	orientierende Untersuchung Rahmenbeding. unbekannt	orientierende Untersuchung (Porenwasserl.)	orientierende Untersuchung (Kluftwasserl.)	vertiefende Untersuchung (Porenwasserl.)	vertiefende Untersuchung (Kluftwasserl.)
ausführlicher Pumpversuch (1)	wg	g	g	g	g
WD-Test (2)	ng	ng	gk	ng	gk1
Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drill- stem-, Pulse-Test (3)	g	g	g	wg	wg
Einschwingver- such (4)	ng	ng	ng	wg	wg
Flowmeter (5)	ng	ng	gk	gk1,3	gk1,3
Fluid-Log. (6)	ng	ng	gk1	wg	gk1,3
Tracervers. (7)	ng	ng	ng	wg	wg
Direkte Verfah- ren an Boden- proben (8)	g	g	ng	gk	ng
Korngrößen (9)	ga	ga	ng	ga	ng
Strömungsnetz- analyse (10)	wg	wg	ng	wg	wg
Gezeiten (11)	ng	ng	ng	ng	ng

g = geeignet

ga = geeignet bei höherer Durchlässigkeit, nicht oder weniger geeignet bei geringer Durchlässigkeit

wg = weniger geeignet

gk1 = nur in Kombination geeignet (mindestens mit Verfahren Nr.)

ng = nicht geeignet

Bemerkungen:

Die in Tabelle 3 vorgestellten Verfahrenseignungen beruhen auf der Überlegung, daß eine Altlast, die sich der Umgebung deutlich mitteilt, in einem Gebirge meßbarer Gebirgsdurchlässigkeit liegt.

3 Vergleichende Gegenüberstellung der Einzelverfahren

Wie bereits den Ausführungen in Kap. 2 zu entnehmen ist, ist die Entscheidung, welche Verfahren in welcher Anzahl und Kombination zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit herangezogen werden, von der grundsätzlichen Fragestellung, der gewünschten Erkenntnistiefe und der Gesamtkonzeption eines Untersuchungsablaufes abhängig. Darüber hinaus bestimmen jedoch eine ganze Reihe weiterer Faktoren die Auswahl mit.

Insbesondere sind von Bedeutung :

- Der Gültigkeitsbereich der angewandten Methode in bezug auf die gesamte Bandbreite der Gebirgsdurchlässigkeit (etwa beschrieben durch die k-Werte 10^{-1} bis 10^{-11} m/s),
- die räumliche Reichweite der angewandten Methode ab der Teststelle,
- die prinzipiell erforderlichen (technischen) Voraussetzungen, die einen Methodeneinsatz überhaupt erst zulassen,
- der zeitliche und wirtschaftliche Aufwand,
- die Verfügbarkeit geeigneter planender, ausführender und auswertender Firmen sowie
- die erzielbare Ergebnisgenauigkeit, der Grad der wissenschaftlichen Anerkennung einer Methode, die jeweiligen durchführungstechnischen Problempunkte

und vieles andere mehr.

Diese mehrdimensionale Verknüpfung kann nicht sinnvoll in einem Schaubild oder Entscheidungsbaum aufgelöst werden und ist der Grund für die Erfordernis einer fachmännischen Programmkonzeption, die bei komplexen Fragestellungen meist mehrere aufeinander abgestimmte Stufen umfaßt.

Gleichwohl können die nachfolgenden Abb. 2, 3 und 4 sowie die Tab. 4 und 5 einzelne Beziehungen der o.a. Spiegelstrichaufstellung (bis auf die letzte) verdeutlichen. Sie sind deshalb grundsätzlich im Zusammenhang zu sehen. Sind mehrere Versuche in einer Zeile zusammengefaßt, gelten die Angaben in den Balkendiagrammen der Abb. 2 und 3 ebenfalls zusammengefaßt. Details sind ggf. den entsprechenden Unterpunkten in Kap. 4 zu entnehmen.

Abb. 2 veranschaulicht, in welchen Bereichen der Gebirgsdurchlässigkeit, hier wieder vereinfacht durch den k-Wert dargestellt, die verschiedenen Verfahren gewöhnlich ihre Anwendungsschwerpunkte haben. Die offenen Schraffurflächen verdeutlichen, daß die Grenzen fließend sind. Zu den Grenzbereichen der Balken hin erfordert die Versuchsdurchführung und -auswertung in der Regel steigende Präzision und erhöhten Aufwand, um eine vergleichbare Aussagegenauigkeit sicherzustellen. Im Hinblick auf die Zielgruppe der Leitlinie sind die als hydraulische Bohrlochversuche bekannten Methoden zusammen dargestellt, das Einsatzspektrum des Einzelversuchs ist geringer als in Abb. 2 schraffiert (Kap. 4.3).

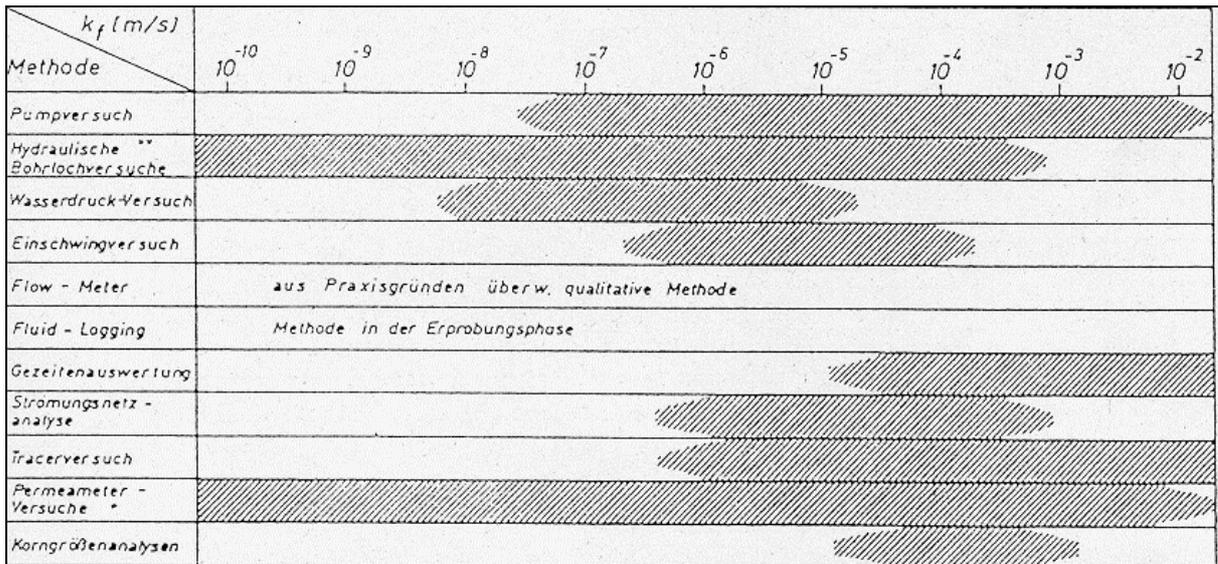


Abb. 2: Reguläres Einsatzspektrum der Verfahren in Bezug auf die Bandbreite der Gebirgsdurchlässigkeit

x = direkte Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben
 xx = Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test, etc.

Abb. 3 veranschaulicht hingegen, welche räumlichen Entfernungen ab der Teststelle unter wechselnden geologischen Rahmenbedingungen mit einem Verfahren in etwa höchstens erreicht werden können. Bei Pumpversuchen z.B. schwankt dies in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit, der Aquifermächtigkeit, der hydraulischen Rahmenbedingung, der Pumpleistung, der erzielbaren Absenkung im Bohrloch, der Versuchsdauer und vielen anderen Faktoren etwa zwischen fünf und wenigen tausend Metern. Demgegenüber beschreiben z.B. die Ergebnisse aus Bestimmungsverfahren an Bodenproben ausschließlich den Probenbereich und sind nur übertragbar, wenn die geologischen Verhältnisse gut bekannt sind. Auch hier sind die Grenzen fließend.

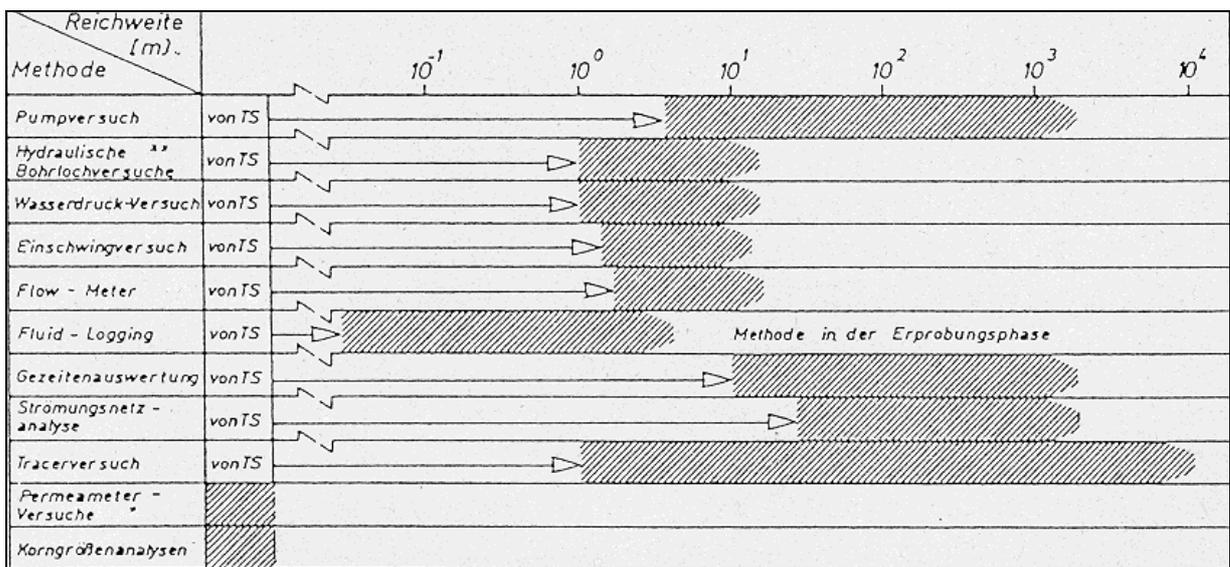


Abb. 3: Verfahrensbezogene ca. -Bereiche der unter verschiedenen Rahmenbedingungen höchstens erfaßten räumlichen Versuchsreichweiten ab der Teststelle

x = direkte Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben
 xx = Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test
 TS = Teststelle

Der wirtschaftliche Aufwand zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit richtet sich nach Art und Anzahl der angewandten Verfahren. Hierbei kommt es neben der Güte der Verfahren auch darauf an, zu entscheiden, ob ein aufwendiges Verfahren größerer Reichweite oder aber, ob weniger aufwendige Verfahren geringerer Reichweite in größerer Anzahl angewandt werden. Maßgeblich dabei ist vor allem Art und Umfang des geologisch-hydrogeologischen Hintergrundwissens. Außerdem geht die erforderliche Güte der Ergebnisse mit in die Entscheidung ein.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, daß einige Verfahren nur in Kombination sinnvoll angewendet werden können.

Auf die Angabe expliziter DM-Preise wird an dieser Stelle verzichtet, da sie zu vielen verschiedenen zeitlich und örtlich variablen Faktoren unterliegen. Das relative Preisgefüge kann aus Abb. 4 entnommen werden, Detailinformationen sind - soweit vertretbar - mit Stand September 1990 in Kap. 4 eingearbeitet.

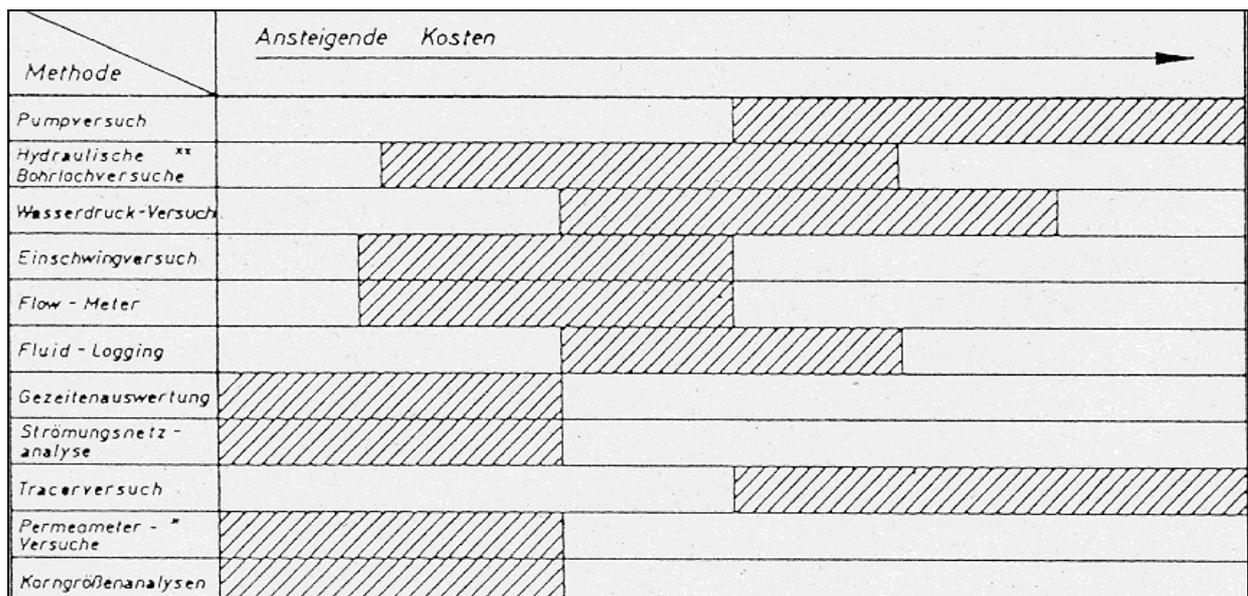


Abb. 4 : Relativer Kostenvergleich von Einzelversuchen

x = direkte Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben
 xx = Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test

In der folgenden Tabelle 4 sind verfahrenbezogen die grundlegenden Voraussetzungen genannt, die für deren Durchführung und erfolgreiche Auswertung geschaffen werden oder vorhanden sein müssen.

Tab. 4 : Grundlegende Voraussetzungen für die Anwendung verschiedener Verfahren zur Ermittlung von Gebirgsdurchlässigkeiten

Voraussetzung Methode	Ausgebauter Brunnen oder Meß- stelle	Offenes Bohrloch	Grundwas- sermeßstelle	Pegel an Oberflächen- gewässer	Schurf	Aufschluß
Pumpver- such	Pumpbrunnen oder Beob- achtungspegel	Pumpbrunnen oder Beobach- tungspegel (auch mit Pak- ker)	Pumpbrunnen oder Beob- achtungspegel	evtl. als Refe- renzpegel	evtl. als Meß- stelle	-
Hydrau- lischer Bohrloch- versuch	Versuchs- brunnen	Versuchs- brunnen (auch mit Packer)	Versuchs- brunnen	-	evtl. als Ver- suchsstelle	-
Wasser- druck- versuch	-	als Versuchs- brunnen mit Packer	-	-	-	-
Drill- Stemtest	-	mit Packern	-	-	-	-
Einschwing- versuch	Versuchs- brunnen	-	Versuchs- brunnen	-	-	-
Flow-Meter	Versuchs- brunnen	Versuchs- brunnen (Kali- bermessung)	Versuchs- brunnen	-	-	-
Fluid- Logging	Versuchs- brunnen	Versuchs- brunnen (Kali- bermessung)	Versuchs- brunnen	-	-	-
Gezeiten- auswertung	Meßstelle	Meßstelle	Meßstelle	Referenzpegel	-	-
Strömungs- netzanalyse	Entnahme- menge	Meßstelle	Meßstelle	evtl. Abfluß- messung	evtl. als Meß- stelle	-
Permeame- terversuch	-	Probennahme	-	-	Probennahme	Probennahme
Auswertung von Korn- größen- analysen	-	Probennahme	-	-	Probennahme	Probennahme
Tracer- Versuche	Eingabe oder Beobach- tungsbrunnen	Eingabe oder Beobachtungs- brunnen	Eingabe oder Beobach- tungsbrunnen	-	Eingabe oder Beobach- tungsbrunnen	-

* = direkte Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben

** = Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drillstem- Pulse-Test, etc.

Tabelle 5 gibt einen Überblick, welche Ansprechpartner in der Regel die Planung, die Durchführung und Auswertung der Versuche übernehmen.

Tab. 5: Angaben zur Planung, Durchführung und Auswertung von Verfahren zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit

	Durchführung in der Regel durch	Planung und Anwendung in der Regel durch
Pumpversuch	Spezialfirmen und Bohrunternehmen	Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Auffüll-, Absenk-, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test	Spezialfirmen, Bohrunternehmen, Ingenieurfirma	Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Wasserdruckversuch	Spezialfirmen mit Hilfeleistung durch Bohrunternehmen	Spezialisierte Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Drill-Stem-Test	Spezialfirmen mit Hilfeleistung durch Bohrunternehmen	Spezialisierte Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Einschwingversuch	Spezialisierte Ingenieurfirmen	Fachinstitute
Flow-Meter	Spezialisierte Ingenieurfirmen und Spezialfirmen	Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Fluid-Logging	Spezialfirmen mit Hilfeleistung durch Bohrunternehmen	Fachinstitute
Gezeitenauswertung	Ingenieurfirmen	Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Strömungsnetzanalyse	Ingenieurfirmen	Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Tracerversuch	Ingenieurfirmen; bei Kombination mit Pumptests Hilfeleistung von Spezialfirmen oder Bohrunternehmen	Spezialisierte Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Permeameterversuch	Ingenieurfirmen	Ingenieurfirmen/Fachinstitute
Korngrößenanalysen	Ingenieurfirmen	Ingenieurfirmen/Fachinstitute

II Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

(Theorie, Auswertung, Durchführung, Aufwand, Bewertung, etc.)

Der Grundwasserfluß wird wesentlich bestimmt durch den sog. Durchlässigkeitswert (k-Wert [m/s]) und den Speicherkoeffizienten (S [-]). Die wichtigste und häufigste Meßgröße bei Untersuchungen der Grundwasserbewegungen ist die Höhe des Grundwasserspiegels bzw. der Grundwasserdruckfläche (h [m]). Die die o.g. Parameter verbindende, aus dem Gesetz von Darcy und dem Kontinuitätsprinzip hergeleitete, grundlegende Differentialgleichung lautet:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(T_x \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(T_y \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(T_z \frac{\delta h}{\delta z} \right) + q(x, y, z, t) = S \frac{\delta h}{\delta t}$$

(dreidimensionale, instationäre Strömung im gespannten, anisotropen Aquifer)

In dieser Gleichung wird die Transmissivität T verwandt, welche sich in einem homogenen Aquifer als Produkt aus Durchlässigkeitswert k und Mächtigkeit M des Aquifers nach der Formel

$$T = k * M$$

ergibt. Bei vielen der beschriebenen Verfahren wird primär die Transmissivität eines Gebirgsabschnittes ermittelt und dann anhand der Mächtigkeit M der k-Wert berechnet.

Sind also Durchlässigkeitswert, Speicherkoeffizient und Grundwasserstände bekannt, so lassen sich Grundwasserdurchsätze und -geschwindigkeiten eines Gebietes berechnen. Dies ist bei speziellen Randbedingungen und vereinfachenden Annahmen auf analytischem Wege möglich. Für alle die Fälle, in denen keine analytische Lösung existiert, muß auf numerische Verfahren (Finite Differenzen, Finite Elemente) zurückgegriffen werden.

Die im folgenden verwendeten Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis erläutert.

4. Einzelverfahren

4.1 Pumpversuche

Theorie und Auswertung

Bei Pumpversuchen wird dem Grundwasserleiter in der Regel über einen längeren Zeitraum (Stunden bis Wochen) Wasser entzogen. Hierdurch stellt sich eine meßbare Absenkung des Grundwasserspiegels in der Entnahmestelle und im Umfeld ein. Der Betrag der Wasserspiegelabsenkung ist abhängig von der Entnahmemenge, von der Durchlässigkeit des getesteten Untergrundes und verschiedenen anderen hydrogeologischen Parametern. Bleiben die meßbaren Parameter konstant und geht man von definierten Randbedingungen aus, kann die Gebirgsdurchlässigkeit unter Auflösung der in Kap. 4 genannten, grundlegenden Differentialgleichung ermittelt werden. Die Lösung der Gleichung wurde von THEIS bereits 1935 mit Hilfe seiner bekannten Brunnenformel für den radialsymmetrischen Fall einer instationären Brunnenanströmung im homogenen, isotropen und gespannten Aquifer erarbeitet und ermöglichte letztlich die Entwicklung eines Auswerteverfahrens für die zeitliche Wasserspiegeländerung während des Versuches.

Die der o.g. Vorgehensweise zugrundeliegenden Annahmen waren:

- Der Aquifer besitzt unendliche seitliche Ausdehnung
- Der Aquifer ist homogen und isotrop
- Der Aquifer ist gespannt
- Die Grundwasserdruckfläche vor Beginn des Versuches ist horizontal
- Die Entnahmestelle ist über die gesamte Mächtigkeit des Aquifers verfiltert
- Die Entnahmemenge bleibt während der Versuchsdauer konstant
- Das Wasser wird bei Fallen des Druckspiegels unverzüglich aus dem Vorrat entlassen
- Die in der Entnahmestelle gespeicherte Wassermenge ist vernachlässigbar klein.

Da die o.g. Bedingungen in der Natur nicht oder nur selten erfüllt sind, wurden von verschiedenen Autoren Modifikationen der Brunnenformel bzw. Korrekturformeln entwickelt, die die Auswertung von Pumpversuchen auch bei Verletzung der THEIS' SCHEN Voraussetzungen erlaubt. So gibt es Auswerteverfahren für die unterschiedlichsten hydrogeologischen Rahmenbedingungen wie z.B. Poren- oder Kluftgrundwasserleiter, für Einzelbrunnen oder für Meßstellenreaktionen im Umfeld, für verschiedene Versuchsabläufe u.v.m. Mit Hilfe der speziellen Verfahren können bekannte Rahmenbedingungen berücksichtigt, quantifiziert, verifiziert oder ermittelt werden. Tabelle 6 soll lediglich einen Einblick in die Vielzahl von Auswerteverfahren für verschiedene Grundwasserleitertypen geben, Tabelle 7 soll im gleichen Sinne die Variationsbreite der Verfahren bei zusätzlichen Rahmenbedingungen verdeutlichen.

Zu betonen sei an dieser Stelle, daß vor der Durchführung und Auswertung eines jeden Pumpversuchs eine klare Vorstellung über den getesteten Aquifertyp und die vorliegenden Randbedingungen existieren muß. Andernfalls besteht die Gefahr der Fehlinterpretation.

Leitertyp	Fließzustand	Fließgleichung	Berechnungsverfahren Name	Berechnungs- Art	Anmerkungen	Berechnete Parameter	Quelle	
gespannt	stationär	$Q = \frac{2\pi k_D (s_r - s)}{\ln(r_0/r)}$	Thiem	Berechnung		kD	Thiem 1906	
	instationär	$s = \frac{Q}{4\pi k_D} \int_y^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi k_D} W(u)$	Theis	Kurvendeckung	$u = \frac{r^2 S}{4kDt}$	kD und S	Jacob 1940	
			$s = \frac{230Q}{4\pi k_D} \log \frac{225 kDt}{r^2 S}$	Chow	Nomogramm		kD und S	Chow 1952
halbgespannt	stationär	$s = \frac{230Q}{4\pi k_D} \log \frac{1}{t^*}$	Jacob	Gerade	$\frac{r^2 S}{4kDt} \leq 0,01$	kD und S	Cooper u. Jacob 1946	
		$s_m = \frac{230Q}{4\pi k_D} \log \frac{L}{r}$	Wiederanstiegsverfahren von Theis	Gerade	s_r - Restabsenkung t^* - Zeit seit Pumpende	kD	Theis 1935	
		$s_m = \frac{Q}{2\pi k_D} K_0\left(\frac{r}{L}\right)$	De Glee	Kurvendeckung	$L \geq 2D$	kU und c	De Glee 1930	
	instationär	$s_m = \frac{230Q}{2\pi k_D} \left(\log 1,12 \frac{L}{r}\right)$	Hantush-Jacob	Gerade		$r/L \leq 0,05$	kD und c	Hantush u. Jacob 1955
		$Q = Q' = \frac{2\pi k_D (s_r - s)}{\ln(r_0/r)}$	Ernstische Modifikation des Thiem'schen Verf.	Berechnung		Q' - Zuzückerungsmenge aus der Deckschicht	kD	mündl. Mitteilung
ungespannt mit verzögerter Schüt- lung und halb- ungespannt	instationär	$s = \frac{Q}{4\pi k_D} \int_y^\infty \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4Ly}\right) dy =$ $= \frac{Q}{4\pi k_D} W(u, r/L)$	Walton	Kurvendeckung	$u = \frac{r^2 S}{4kDt}$	kD, S und c	Walton 1962	
		$s = \frac{Q}{4\pi k_D} (2K_0(r/L) - W(q, r/L))$	Hantush I Hantush II	Wendepunkt Wendepunkt		$q = \frac{kDt}{S L^2}, q > \frac{2r}{L} \Rightarrow 4lp$	kD, S und c kD, S und c	Hantush 1956 Hantush 1956
	stationär	$s = \frac{Q}{4\pi k_D} \int_0^\infty \left[\int_0^y \left(\frac{1}{B} - y \right) \frac{X^2}{Y^{2+1}} \cdot [1 - \exp(-\alpha Y^2 + 1)] dy \right] dy =$ $= \frac{Q}{4\pi k_D} W(u, r, r/B)$	Boulton	Kurvendeckung		y - Integrationsveränderliche $u = \frac{r^2 S_0}{4kDt}, u, Y = \frac{r^2 S_1}{4kDt}$ $\gamma = (S_1 + S_2)/S_0, \gamma > 100$	kD, $S_0, S_1,$ B und $1/\gamma$	Boulton 1963
		$Q = \frac{2\pi k_D (s_r - s)}{\ln(r_0/r)} = \frac{2\pi k_D (s_m - s_m')}{\ln(r_0/r)}$	Thiem-Dupuit	Berechnung		$s' = s - (s^2/2D)$	kD	Thiem 1906
instationär	wie für gespannte Leiter				s wird ersetzt durch $s' = s - (s^2/2D)$	kD und allgemein s	Thiem 1906 Jacob 1940 Chow 1952 Cooper u. Jacob 1946	

Tab. 6: Wichtige Auswerteverfahren für Pumpversuche in Porengrundwasserleitern (aus KRUSEMAN/DE RIDDER, 1973)

Ersetzte Annahme	Leitertyp	Fließzustand	Berechnungsverfahren		Anmerkungen	Berechnete Parameter	Quelle
			Name	Art			
Leiter m. einer o. mehreren ihn voll durchdringenden Anreicherungs- oder Staugrenzen	gespannt o. ungespannt	stationär	Dietz	Berechnung	nur Anreicherungs- Anreicherungs- u. o. Staugrenzen eine Anreicherungs- grenze	kD	Dietz 1943
			Stamm Hantushs Bildverfahren	Kurvendeckung Gerade			
Leiter homogen anisotrop und von gleichbleibender Dicke	gespannt oder ungespannt	instationär	Hantush	Berechnung	auch für Wiederanstiegsdaten	kD kD u. S	Hantush 1966
			Hantush - Thomas Hantush	Berechnung Berechnung			
Leiter homogen u. isotrop, aber von exponentiell veränderl. Dicke	gespannt	instationär	Hantush	Kurvendeckung	$dD/ax < 0,20$	kD u. S	Hantush 1964
			Kulminationspunkt Hantush	Berechnung Kurvendeckung			
Freier Ruhewassersp. hat in Fließrichtung ein Gefälle	ungespannt	stationär	Cooper - Jacob	Gerade	stufenweise Förderung	kD u. S	Cooper u. Jacob 1946
			Aron - Scott Sternberg	Gerade Gerade			
Veränderliche Entnahmemenge	gespannt oder ungespannt	instationär	Wiederanstiegsverf. Sternb.	Gerade	kontinuierliche abnehmende Fördermenge	kD u. S	Aron u. Scott 1965
			Huisman Berichtigung I Huisman Berichtigung II	Berechnung Berechnung			
Unvollkommener Brunnen	gespannt	stationär	Jacob Berichtigung	Berechnung	Filter in der Nähe d. Deckschicht oder Sable d. Leiters	kD	Jacob 1963
			Huisman Berichtigung I-II Hantush Berichtigung	Berechnung Berechnung			
Vorrat im Pumpbrunnen ist nicht vernachlässigbar (großer σ)	gespannt	instationär	Hant. modif. Theis Verf. Hant. modif. Jacob Verf.	Kurvendeckung Gerade	kurze Pumpdauer lange Pumpdauer	kD u. S	Hantush 1962 Hantush 1962
			Papadopoulos Cooper	Kurvendeckung			
Zweischichtiger Leiter mit halbdurchlässiger Trennschicht	halbgespannt	stationär	Huisman Kemperman Bruggeman	Nomogramm u. Kurvendeckung Gerade	es wird nur aus oberem Leiter entnommen oberer und unterer Leiter mit getrennter Entnahme	kD ₁ , kD ₂ , c ₁ , u. c ₂ kD ₁ , kD ₂ , c ₁ , u. c ₂	Huisman u. Kemperman 1951 Bruggeman 1966
			Logan Gosselin	Berechnung Berechnung			
Zusätzliche Annahme Eintrittswiderstand d. Pumpbrunnens 0	gespannt	stationär	Logan Gosselin	Berechnung Berechnung	Näherungsverf. ohne Pegel Näherungsverf. ohne Pegel für sehr tiefe Leiter	kD	Logan 1964 Gosselin 1951
			Logan	Berechnung			
Zusätzliche Annahme wie oben und unvollkommener Brunnen	gespannt	stationär	Zangar	Berechnung	Näherungsverf. ohne Pegel	k	Zangar 1953
			Hurr Hurr	Berechnung Berechnung			
Frei ausfließ. Brunnen, Absenkung konstant Entnahmemenge, wachsend	gespannt	instationär	Hurr Hurr	Berechnung Berechnung	Näherungsverf. ohne Pegel Näherungsverf. ohne Pegel	kD	Hurr 1966 Hurr 1966
			Jacob - Lohman	Gerade			

Tab. 7: Auswerteverfahren für Pumpversuche in Porengrundwasserleitern, teilweise auch Kluffgrundwasserleitern unter der Annahme spezieller Randbedingungen (aus KRUSE-MANDE RIDDER, 1973)

Bislang war die Gewichtung der Versuchsauswertemethoden eindeutig auf den Porengrundwasserleiter gelegt. Bei vielen Fragestellungen haben jedoch Klufftgrundwasserleiter erhöhte Bedeutung erlangt.

Diese unterscheiden sich von den Porengrundwasserleitern durch eher flächenbezogene Strömungsbedingungen und der daraus resultierenden ausgeprägteren Anisotropie. Hinzu kommt, daß ihre Durchlässigkeiten häufig geringer sind als die der Porengrundwasserleiter, so daß bei Pumpversuchen Brunnenspeicher- und Skineffekte nicht mehr vernachlässigbar sind. Um diesen Bedingungen Rechnung zu tragen, wurden wiederum spezielle Typkurvendekungsverfahren und andere Methoden entwickelt, anhand derer Pumpversuche in Klufftgrundwasserleitern ausgewertet werden können.

Gemäß den genannten Unterschieden sind auch die Auswertemethoden anders gewichtet. Während bei Porengrundwasserleitern die Auswertung der Absenkungs- und Wiederanstiegsperiode sowie die räumliche und zeitliche Auswertung auch mit Hilfe von Meßstellen oft breit abgedeckt werden kann, ist der Schwerpunkt bei Klufftgrundwasserleitern auf den Wiederanstieg des Wasserspiegels nach Pumpende und auf Spezialtypkurvenverfahren für die Absenkungsphase gelegt. Einen guten Einblick dazu geben HHANAUER und STRAYLE (vgl. Literaturverzeichnis).

Anwendungsmöglichkeit

Pumpversuche können nur im wassererfüllten Untergrund eingesetzt werden. Es ist in der Regel darauf zu achten, daß unterschiedliche Aquifere separat getestet werden. Hierzu ist ein entsprechender Ausbau des Grundwasseraufschlusses erforderlich.

Im Bereich der Wassergewinnung ggf. Wasserhaltung sind vor allem mehrstufige Pumpversuche bis über 100 Stunden (verschiedene Entnahmeleistungen und Fahren des Versuchs bis zur Beharrung) zusätzlich durchzuführen. Mit Hilfe von Leistungs-/Absenkungs-Diagrammen kann der spätere Brunnenbetrieb abgesichert prognostiziert werden. Komplizierte hydrogeologische Verhältnisse bedingen hier oftmals Zwischen- oder Kurzpumpversuche (etwa bis 12 Stunden Dauer).

Bei wasser- und tiefbaulichen Fragen, Schutzgebieten, Standorterkundungen, Sanierungsplänen etc. sind hingegen die Aquiferkennwerte von höherer Bedeutung. Diese sind mit einstufigen Versuchen günstiger zu bestimmen.

Pumpversuche ermöglichen in der Regel die Bestimmung von Gebirgsdurchlässigkeitswerten zwischen 10^{-2} und 10^{-8} m/s. Deshalb sind sie in sehr gering und sehr gut durchlässigen Gesteinen schlecht oder gar nicht einsetzbar. In einem Fall ergeben sich Probleme daraus, daß das Bohrloch leergepumpt wird, ohne das Wasser nachfließt, während im anderen Fall möglicherweise die zur Erzielung einer auswertbaren Absenkung notwendige Förderleistung nicht erreicht werden kann. Pumpversuche erreichen dann, wenn sie eingesetzt werden können, bei entsprechend langer Dauer und entsprechend günstigen Rahmenbedingungen als einziges Verfahren auch weit von der Teststelle entfernte Untergrundbereiche und erbringen grundsätzlich Durchschnittswerte der Durchlässigkeit für den Testbereich.

Aus diesem Grunde sollten sie in Kluftgrundwasserleitern mit horizontbezogenen Versuchen (z.B. WD-Test, Flowmeter, hydraulische Kurztests wie Auffüll-, Slug- und Pulse-Test (vgl. Kap. 4.3)) kombiniert werden, wenn horizontbezogene Fragestellungen auftreten. Beispielhaft sei die Untersuchung einer natürlichen Barriere genannt.

Bei der Anwendung von Pumpversuchen im Bereich unbekannter Altlasten ist generell Vorsicht geboten, da Kontaminationsherde aktiviert oder verlagert werden können.

Durchführung und Meßwerterfassung

Pumpversuche werden durchgeführt an

- Förderbrunnen
- Beobachtungsbrunnen
- Bohrlöchern als Zwischenpumpversuch über die gesamte Wassermächtigkeit
- Bohrlöchern als Zwischenpumpversuch über, unter oder zwischen Packern.

Vor der Ausführung müssen die technischen Möglichkeiten (z.B. Bohrlochdurchmesser) sowie die Ziele des Pumpversuches klar umrissen sein und eine Vorstellung über die Verhältnisse im untersuchten Aquifer existieren. Nach diesen Vorgaben richtet sich die Fördermenge, die Dauer des Pumpversuchs, die Anzahl und die Abstände der mit zu beobachtenden Meßstellen sowie eine eventuelle Mehrstufigkeit des Versuches.

Mit Hilfe einer Pumpe wird der Wasserspiegel abgesenkt. Die einzustellende Leistung muß vor Versuchsbeginn festgelegt werden; Orientierungswerte erhält man z.B. durch kurze Vorversuche oder Klarspülarbeiten am Vorabend des eigentlichen Versuches. Grundsätzlich sollte Beharrung (gleichbleibender Wasserspiegel) angestrebt werden, diese ist aber oft nicht erreichbar. Eine Veränderung der Entnahmelistung außer bei mehrstufigen Versuchen, ist der Versuchsauswertung abträglich.

Im Brunnen sowie den Pegeln im Umfeld werden die Wasserstände zunächst vor Pumpbeginn gemessen. Nach dem Einschalten der Pumpe mißt man die Wasserstände anfangs in kurzen Zeitabständen, die nach und nach verlängert werden (logarithmisch äquidistant).

Nach Abschalten der Pumpe wird der Wiederanstieg in gleicher Weise wie die Absenkphase gemessen. Für eine Auswertung des Versuches ist der Wiederanstieg in manchen Fällen besser als die Absenkphase geeignet, weshalb diese Messung nicht unterbewertet werden sollte. Sie wird leider allzu oft vernachlässigt.

Vorschläge zur Versuchsdurchführung und Meßwerterfassung sind z.B. in MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1976): Pumpversuche in Porengrundwasserleitern, bei LANGGUTH & VOIGT (1980) und DVGW (5.1975): Arbeitsblatt W 111 beschrieben.

Die Dauer von Pumpversuchen liegt zwischen wenigen Tagen (mit Wiederanstiegsphase) und mehreren Wochen bis Monaten. In Ausnahmefällen kann die Pumpphase bis auf wenige Stunden (Kurzpumpversuche) reduziert werden. In solchen Fällen ist vor allem der Wiederanstieg auswertbar.

Besonderer Wert ist auf die Qualität der Meßwerterfassung zu legen. Die Wasserstände im Pumpversuchsbrunnen und den Beobachtungsbrunnen werden üblicherweise mittels eines sog. Lichtlotes gemessen. Je nach Anzahl der Meßstellen ist daher besonders in der Anfangsphase der Absenkung und des Wiederanstieges ein hoher Aufwand an Personal und Meßgeräten vonnöten. Hier wird in zunehmendem Maße auf automatische kontinuierlich/diskontinuierlich registrierende Pegelschreiber oder digitale Meßwerterfassungssysteme zurückgegriffen. Unentbehrlich ist diese Vorgehensweise in Aquiferen mit stark schwankenden natürlichen Wasserspiegellagen und in tidebeeinflußten Grundwasserleitern. Durch Vergleich mit den Messungen an einem vom Pumpversuch unbeeinflußten Referenzpegel können die natürlichen Wasserspiegelschwankungen auswertungstechnisch eliminiert werden.

Eine ebenfalls korrekt zu messende Größe ist die Förderleistung der Pumpe. Diese wird entweder mit einer kontinuierlich anzeigenden Wasseruhr oder mittels geeigneter Behälter (auslitern) und Stoppuhr gemessen. Obwohl letztere Methode primitiv erscheint, ist sie für den Praktiker doch eine der zuverlässigsten und von ausreichender Genauigkeit. Wasseruhren können sich bei Sedimentführung zusetzen, bei tiefen Außentemperaturen einfrieren etc. Entscheidend für das Gelingen eines Pumpversuchs ist die umfassende Einweisung des Meßpersonals und eine vorbereitende Überprüfung aller benötigten Apparaturen. Es müssen alle eventuell möglichen Fälle von unvorhergesehenen Ereignissen erörtert werden. Das Meßpersonal muß wissen, was es zu tun hat. Dazu gehören auch so banale Dinge, wie das Festlegen der Meßintervalle auf den Formblättern, ein Uhrenvergleich vor Pumpversuchsbeginn, Sicherstellen der Energieversorgung der U-Pumpe etc.

Die Ableitung des geförderten Wassers muß so erfolgen, daß es durch Versickerung nicht wieder in den getesteten Grundwasserleiter gelangen kann.

Kontaminierte Wässer dürfen nicht ohne Reinigung abgeleitet werden. In jedem Fall ist aber eine wasserbehördliche Genehmigung für jedwede Ein- und Ableitung einzuholen.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Außer in den Fällen bereits vorhandener ausgebauter Brunnen müssen in der Regel mindestens folgende wesentliche Voraussetzungen erfüllt sein:

- Ein Grundwasseraufschluß in Form einer meist ausgebauten oder mit Hilfsfiltern versehenen Bohrung (Pumpversuche im offenen Gebirge sind aufgrund der Nachfälligkeit nur im standfesten Festgestein machbar).
- Der Einbau einer angemessenen Pumpe ausreichend tief unter den Wasserspiegel (je geringer durchlässig das Gebirge ist, um so höher sollte die Wassersäule über der Pumpe sein).
- Ein verfügbarer Energieanschluß oder eine unabhängige Energiequelle ausreichend dimensioniert, z.B. Stromaggregat.
- Eine genehmigte Ableitungsmöglichkeit für das Pumpversuchswasser
- Eine Wassermengenmeßeinrichtung, ein Wasserspiegelmeßgerät
- In der Regel die dauerhafte personelle Überwachung des Versuches.
- Es kann zweckmäßig sein, während des Versuchs ein Niederschlagsmeßgerät zu betreiben.

- Beobachtungseinrichtungen der Wasserstände im Vorfluter und benachbarten Wasserfassung können erforderlich sein.

Die Kosten für Pumpversuche setzen sich aus dem Auf- und Abbau der Versuchsanlage einschließlich der Leitungen und Meßgeräte, der Gerätevorhaltung, dem Energieverbrauch, ggf. der Entsorgung des geförderten Wassers und nicht zuletzt den Personalkosten für die Versuchsbeobachtung und Auswertung zusammen.

Für Aquifertests mit einer Pumpe mit Förderleistungen bis zu ca. 50 m³/h müssen für die Pumpstunde mit Überwachung ca. DM 100,00 bis DM 250,00 und die Überwachungsstunde des Wiederanstieges DM 50,00 bis DM 100,00 gerechnet werden. Für den Auf- und Abbau der Versuchsanlage ohne Bohrung müssen pro Versuch bei flachen Pumpeinbauten 3-4 Kolonnenstunden à 2-3 Mann der versuchsführenden Firma angesetzt werden. Somit werden die Versuchskosten durch die Pumpversuchsdauer wesentlich geprägt. Einrichtungs- und Vorhaltekosten sind nur bei Kurzpumpversuchen preisbildend.

Bei Pumpversuchen in leistungsstarken Brunnen mit großen Pumpen, zusätzlichem Personalbedarf für die Beobachtung großer Pegelnetze oder hohen Aufwendungen für die Entsorgung des Wassers können die Kosten auch wesentlich über den genannten Preisen liegen.

Versuchsproblematik

Erfahrungsgemäß können eine ganze Reihe von Beeinträchtigungen auftreten:

- Die Energieversorgung oder die Pumpe fällt aus - der Versuch muß völlig neu gefahren werden.
- Die Versuche sind bei Temperaturen unter -5°C kaum durchführbar, da Ablaufleitungen, Schieber, Wasseruhren etc. einfrieren können.
- Die Ableitung ggf. durch Schadstoffe belasteten Wassers ist schwierig.
- Die ausführenden Firmen halten sich nicht an die vorgegebenen Meßrhythmen oder haben bei schnell sinkenden oder steigenden Wasserspiegeln Schwierigkeiten die Meßwerte korrekt zu erfassen. Damit ist die Versuchsauswertung nur noch eingeschränkt möglich.
- Die Versuche werden zu schnell abgebrochen; wichtige Rahmenparameter werden nicht erkannt, der Wiederanstieg nach Pumpversuchsende wird nicht oder zu kurz beobachtet.
- Vorhandene Grundwassermeßstellen werden nicht mitbeobachtet.
- Es werden fragestellungsbezogen falsche Versuchsauslegungen konzipiert.
- Es werden ungeeignete Auswerteverfahren angewendet.
- Es sind mehrere Aquifere zusammengefaßt untersucht worden und klärende kombinierte Zusatzversuche fehlen; die ermittelten Parameter sind dann meist nicht mehr repräsentativ.

Bewertung

Pumpversuche werden seit langem angewendet und sind aufgrund ihres breiten Anwendungsspektrums wohl das häufigste Hilfsmittel zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit.

Ihr Vorteil liegt vor allem in der großen Vielfalt der erfaßbaren Randbedingungen, in der relativ einfachen Versuchsdurchführung und in der gegenüber anderen Versuchen großen erzielbaren Reichweite. Sie können als Kurzpumpversuche selbst bei orientierenden Programmen gute Dienste leisten. Da die Ausführung von Pumpversuchen den meisten Bohrfirmen etc. vertraut ist, ist das Risiko einer ungenügenden Versuchsdurchführung geringer als bei heute noch relativ selten angewandten Verfahren. Erfahrungsgemäß ergeben sich aus Pumpversuchen recht genaue Resultate. Ein Nachteil liegt darin, daß gering durchlässige Gebirgsbereiche nicht verläßlich getestet werden können und daß die Versuche Inhomogenitäten des Testbereiches integrieren, so daß bei bestimmten Fragestellungen vor allem in Kluftwasserleitern Kombinationsversuche notwendig sind. Obwohl Pumpversuche relativ kostenaufwendig sind, sind sie in absehbarer Zeit kaum durch andere Verfahren zu ersetzen.

Unter dem Gesichtspunkt der Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit eines Pumpversuches sollte eine entsprechende Dokumentation folgendes enthalten:

- Darstellung aller Rahmenbedingungen und Eckwerte des Pumpversuchs (Kurzbeschreibung des Brunnens, Schichtenverzeichnis, Dauer Pumpphase/Wiederanstiegsphase, durchschnittl. Fördermenge, Auffälligkeiten etc.)
- Darstellung aller Meßwerte in tabellarischer und graphischer Form
- Darstellung des Auswertevorgangs unter Quellenhinweis in nachvollziehbarer Form

Literatur zur Einführung

HANAUER, B. (1985):

Zur Interpretation und Auswertung der zeitlichen Grundwasserstandsänderungen im Entnahmebrunnen bei Pumpversuchen im Festgestein. Z. angew. Geowiss. Heft 6.

HÖLTING, B. (1980):

Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Enke Verlag, Stuttgart.

KRUSEMANN, G.P. & DE RIDDER, N.A. (1970):

Analysis and evaluation of pumping test data. Bull. Int. Inst. Land Reclamation and Improvement. Übersetzung

UEHLEND AHL, A.W. (1973):

Untersuchung und Anwendung von Pumpversuchsdaten. Verlag R. Müller, Köln-Braunsfeld.

LANGGUTH, H.R. & VOIGT (1980):

Hydrogeologische Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1976):

Pumpversuche in Porengrundwasserleitern. Wasserwirtschaftsverwaltung, Stuttgart.

STRAYLE, G. (1983):

Pumpversuche in Festgesteinen. DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 34, Eschborn.

Literatur zur Vertiefung

AGARWAL, R.G.; AL-HUSSAINY, R.; RAMEY, H.J. jr.: (1970):

An Investigation of Wellbore Storage and Skin-Effect in Unsteady Liquid Flow. I. Analytical Treatment. AIME, 249, New York.

BEAR (1979):

Hydraulics of Groundwater. McGraw, Hill, London.

BOULTON, N.S. (1951):

The flow pattern near a gravity well in a uniform water-bearing medium. Journ. Institution Civ. Engrs. 36, London.

BOULTON, N.S. (1954):

Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage. Int. Ass. of Scient. Hydrol., Assemblée Générale de Rome, II, Gentbrugge.

BOULTON, N.S. (1963):

Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. Proc. Inst. Civ. Eng. 26, London.

BOURDET, D.; GRINGARTEN; A.C. (1980):

Determination of Fissure Volume and Block Size in Fractured Reservoirs by Type-Curve Analysis. Paper SPE 9293. SPE-AIME 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, Sept. 21-24, 1980.

COOPER, H.H. Jr. and JACOB, C.E. (1946):

A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions, Amer. Geophys. Union, Vol. 24, No. 4.

DVGW Arbeitsblatt W 111 (1975):

Technische Regeln für die Ausführung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung.

FERRIS, J.G., KNOWLES, D.B., BROWN, R.H., and STALLMAN, R.W. (1962):

Theory of aquifer tests. U.S. Geol. Survey - Water Supply Paper 1536-E, Washington.

GRINGARTEN, A.C. & WITHERSPOON, P.A. (1972):

A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. Proceedings. Stuttgart Symposium "Durchströmung von klüftigem Fels". Deutsche Ges. f. Erd- u. Grundbau, Essen.

GRINGARTEN, A.C.; BOURDET, D.; LANDEL, P.A.; KNIAZEFF, V.J. (1979):

A Comparison Between Different Skin and Wellbore Storage Type-Curves for Early-Time Transient Analysis: paper SPE 8205, presented at the SPE-AIME 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nev., Sept. 23-26.

HANTUSH, M.S. & JACOB, C.E. (1954):

Plane potential flow of ground water with linear leakage. Trans. Am. Geophys. Union 35, Richmond, Va.

HANTUSH, M.S. & JACOB, C.E. (1955):

Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Trans. Am. Geophys. Union 36, Richmond, Va.

JACOB, C.E. (1963 a):

The recovery method for determining the coefficient of transmissibility.- In: BENTALL, R., comp. (1963 a): Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536-I, Washington.

JACOB, C.E. (1963 b):

Determining the permeability of water-table aquifers. In: BENTALL, R., comp. (1963 a): Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536-I, Washington.

STALLMANN, R.W. (1963):

Type curves for the solution of single-boundary problems. In: BENTALL, R., comp. (1963 b): Shortcuts and special problems in aquifer tests.- Geol. Survey Water-Supply Paper 1545-C, Washington D.C.

STALLMANN, R.W. (1971):

Aquifer test design, observation and data analysis. Techn. of Water Resources Invest. of the U.S. Geol. Survey, book 3, chapter B 1, Washington D.C.

STOBER, I. (1986):

Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. Geol. Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, BGR/GLA E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover.

THEIS, C.V. (1935):

Relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Transm. Am. Geophys. Union, Richmond, Va.

TODD, D.K., editor (1979):

The Water Encyclopedia. A compendium of useful information on water resources. Port Washington, N.Y. (Water Inform. Center).

WALTON, W.C. (1962):

Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Bulletin 49 des Illinois State Water Survey, Urbana, Ill.

4.2 Wasserdruckversuch (WD-Test)

Theorie und Auswertung

Im Prinzip stellen WD-Versuche eine Weiterentwicklung bzw. Verfeinerung der in Kap. 4.3 besprochenen Tests dar, sowohl bezüglich der Versuchsausrüstung und -durchführung als auch hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Auswertungsmethodik.

In einem definierten Abschnitt des Bohrlochs, der durch Absperren mit Packern festgelegt wird, wird Wasser bei unterschiedlichen Drücken verpreßt. Sowohl Druck als auch Verpreßmenge werden kontinuierlich gemessen. Durch Verfeinerung der Meßmethodik und der Dosiereinrichtungen ist es in den letzten Jahren gelungen, den Einsatzbereich von WD-Versuchseinrichtungen in immer geringer wasserdurchlässige Bereiche zu verschieben.

Die Auswertung der bei Druckkonstanz in aufsteigender und absteigender Reihenfolge ermittelten Durchflußwerte erfolgt qualitativ über ein Q-P-Diagramm. Die Durchflußmenge wird dabei gegen den jeweils eingestellten Druck für jede Druckstufe aufgetragen und verbunden. Die dabei entstehende Hystereseschleife kann wichtige Hinweise auf die Verhältnisse im Gebirge während des Versuchs liefern. Typische Kurvenformen, die bei WD-Versuchen auftreten, sind der Abb. 5 und der Tab. 8 zu entnehmen.

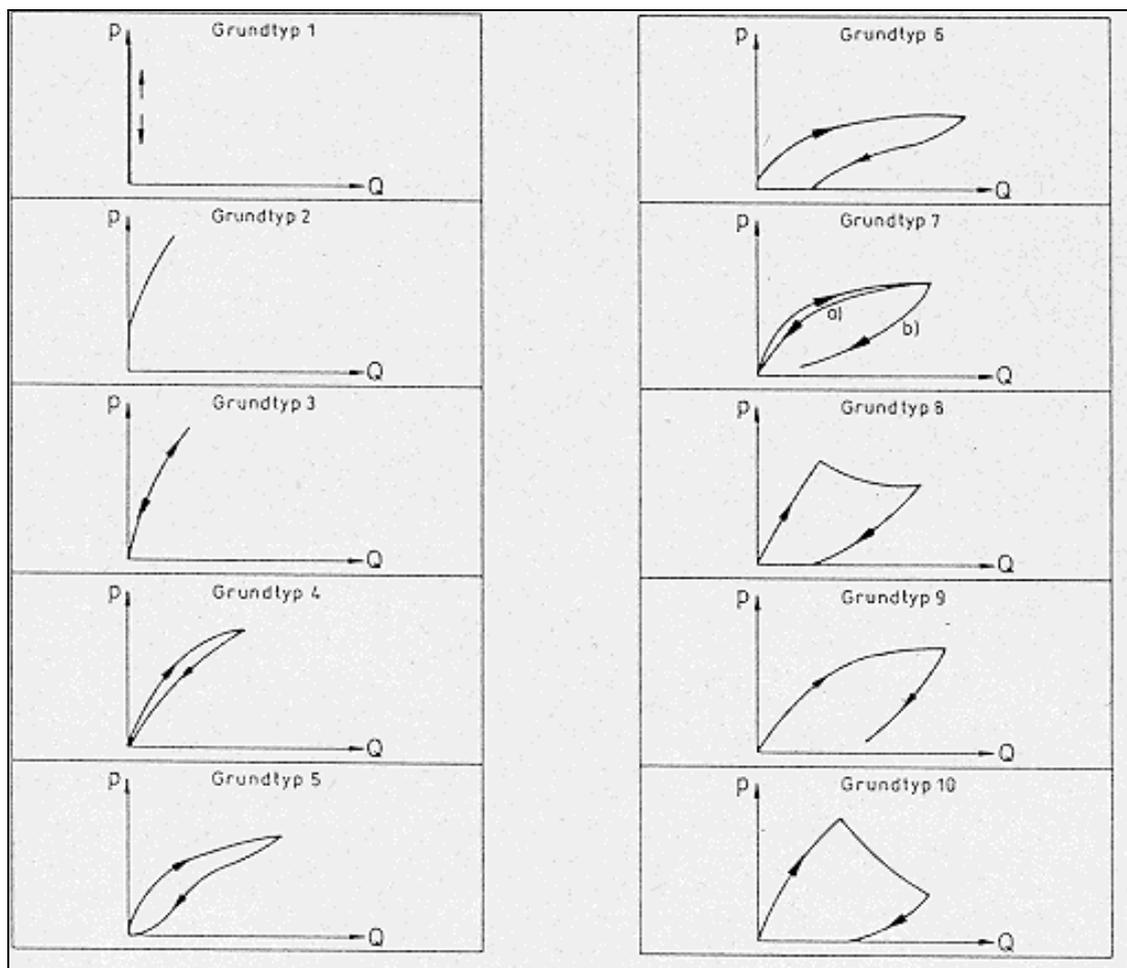


Abb. 5 : WD-Kurven und ihre qualitative Interpretation

Tab. 8: WD-Kurven und ihre qualitative Interpretation

Grundtyp	Verhältnis Gesteinsfestigkeit Pumpendruck	Fugenzustand	Verhalten der Wasseraufnahme beim Versuch	
1	größer als Pumpendruck	geschlossen	keine Aufnahme	festigkeitsbedingtes Aufreißen
2	groß, während Versuch überwunden	zunächst geschlossen	zunächst keine, später geringe	festigkeitsbedingtes Aufreißen
3	groß, elastisch	teilweise offen	+/- proportional	festigkeitsbedingtes Aufreißen
4	klein, elastisch	teilweise offen	überproportional	festigkeitsbedingtes Aufreißen
5	groß, plastisch	teilweise offen	überproportional	festigkeitsbedingtes Aufreißen
6	klein, plastisch	teilweise offen	überproportional teilweise	festigkeitsbedingtes Aufreißen
7	klein bis groß Zugfestigkeit einer Fugenart klein	zunächst geschlossen	überproportional a) reversibel b) irreversibel	festigkeitsbedingtes Aufreißen
8	kleiner als Pumpendruck	offen, gefüllt mit schwach kohäsivem und adhäsivem Material	erst ± proportional plötzlich starke Steigerung, geringer Druckverlust	erosionsbedingtes Aufreißen
9	kleiner als Pumpendruck	offen, gefüllt mit stark kohäsivem und adhäsivem Material	erst ± proportional dann verzögerte Steigerung	erosionsbedingtes Aufreißen
10	kleiner als Pumpendruck	offen, gefüllt mit kohäsionslosem Material	erst ± proportional dann schnelle Steigerung, starker Druckverlust	erosionsbedingtes Aufreißen
11	größer als Pumpendruck	offen, gefüllt mit quellfähigem Material	unterproportional	materialbedingtes Schließen

Aus den gemessenen Werten werden sog. Q_{wd} -Werte inter- oder extrapoliert, die die Verpreßmenge bei bestimmten Drücken (z.B. 1bar, 5bar) angeben, bezogen auf eine 1 m lange Verpreßstrecke. Der Bestimmung des Gebirgsdurchlässigkeitswerts aus den Q_{WD} -Werten liegen Untersuchungen von HEITFELD (1981) zugrunde.

Danach wird der k-Wert mit folgender empirischer Formel berechnet:

$$k_f \text{ [m/s]} = (3,3 Q_{WD5}^2 - 1,3 Q_{WD5}) \cdot 10^{-8}$$

Als Q_{WD} -Wert wird die verpreßte Wassermenge bei einem Druck von 5 bar benutzt. Der Q_{WD} -Wert wird rechnerisch durch Multiplikation mit 5 aus dem abgegriffenen Q_{WD1} -Wert ermittelt, da die Druckstufen selten 5 bar Überdruck erreichen. Die HEITFELD-Formel hat einen durch die Verpreßmenge von 1,0 l/min x m bis 25 l/min x m definierten Gültigkeitsbereich. Demnach können aus den Tests nur k-Werte zwischen $2,0 \times 10^{-8}$ und $2,0 \times 10^{-5}$ m/s berechnet werden. Wenn das Gebirge gar kein Wasser aufgenommen hat (Verpreßmenge 0) ist der k-Wert demzufolge aller Wahrscheinlichkeit nach sehr viel geringer als $2,0 \times 10^{-8}$ m/s. Die quantitative Auswertung von WD-Tests ist nicht unumstritten.

Anwendungsmöglichkeit

Aufgrund der technischen Gegebenheiten (Doppel- oder Einfachpacker) der WD-Tests ergibt sich eine Anwendungsmöglichkeit der Methode nur im standfesten Gebirge, d.h. im Fest- bzw. Halbfestgestein. Im Bereich der Wasserbeschaffung dürfte der Einsatz von WD-Tests eine untergeordnete Rolle spielen. Lediglich die vertiefte Untersuchung von Festgesteinsaquiferen böte hier einen Anwendungsbereich.

Der eigentliche Schwerpunkt qualitativ ausgewerteter WD-Tests lag früher beim Talsperrenbau. In neuerer Zeit hat sich die Anwendung jedoch zunehmend zur quantitativen Auswertung von Versuchen in Festgesteinen und Halbfestgesteinen geringer Durchlässigkeit z.B. im Hinblick auf Standorterkundungen verlagert.

Durchführung und Meßwerterfassung

Zur Versuchsvorbereitung wird das fertiggestellte Bohrloch bzw. der Bohrlochabschnitt mit klarem Wasser gründlich gespült, um die Bohrspülung und den möglichen Filterkuchen zu entfernen. Anschließend dichtet man einen Bohrlochabschnitt mit Hilfe von Packern nach oben und unten (Doppelpacker) bzw. nur nach oben (Einfachpacker) ab. In diesen abgedichteten Abschnitt wird mittels Pumpe Wasser eingepreßt, wobei grundsätzlich der Einpreßdruck, die eingepreßte Wassermenge und die Zeit registriert werden (siehe Abb. 6 und 7).

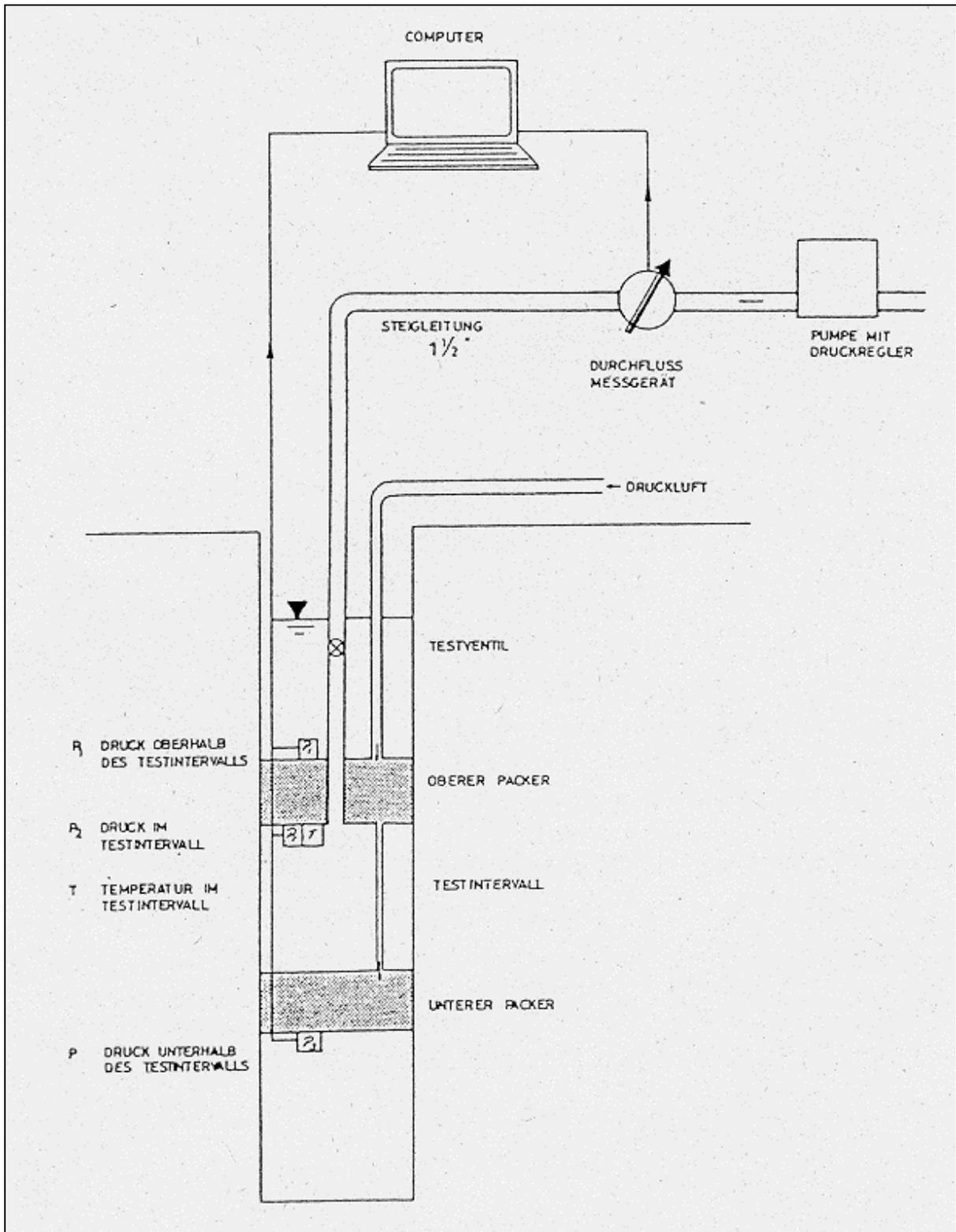


Abb. 6: Typische Gerätekonfiguration eines WD-Tests mit modernem Versuchsaufbau

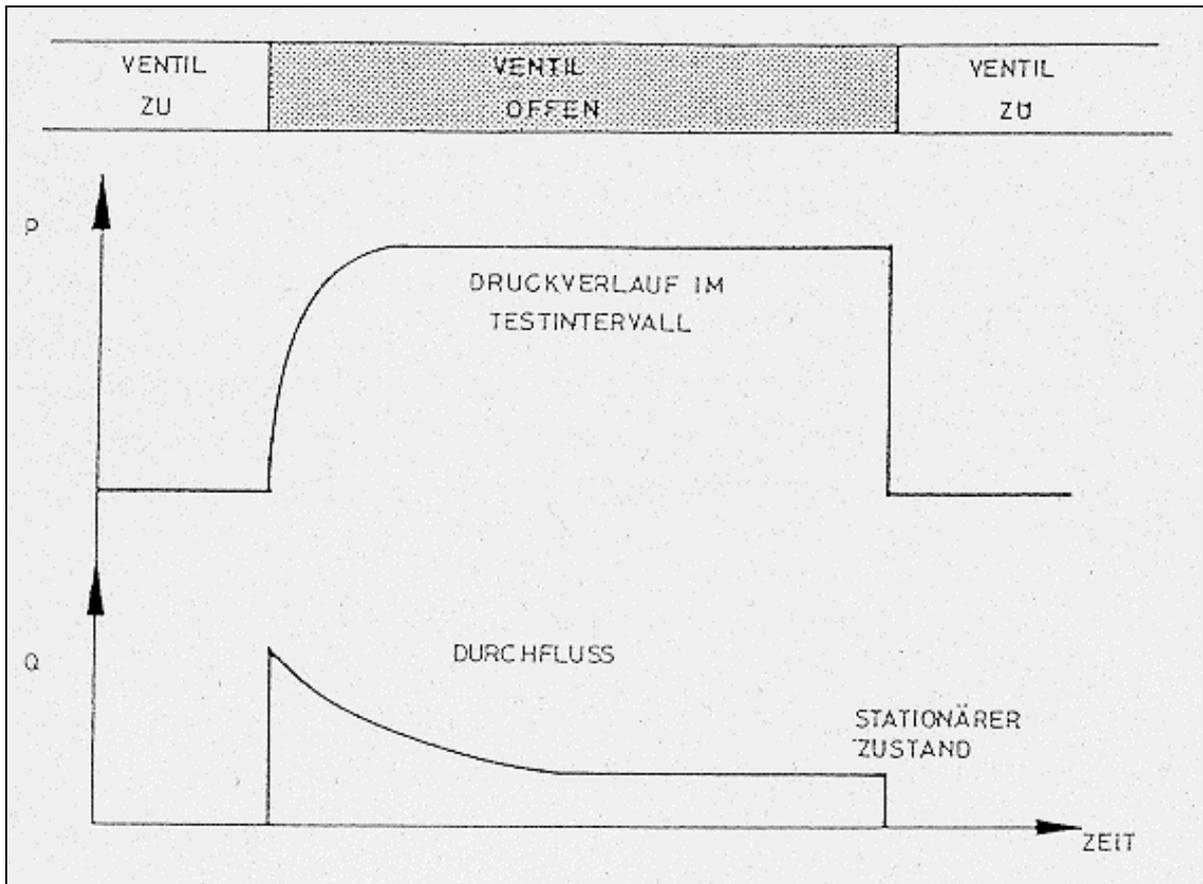


Abb. 7: Typische Durchfluß- und Druckkurven bei einem WD-Test

Die Wassereinpressung kann sowohl druck- als auch mengengesteuert durchgeführt werden. Je nach Fragestellung, Versuchsziel, geologischen und technischen Rahmenbedingungen sind spezielle Abpreßschemata zu erarbeiten. Grundsätzlich kann zwischen ein- und mehrstufigen Tests unterschieden werden; für bestimmte Auswerteverfahren muß der Druckabbau im Bohrloch nach abgeschlossener Wasserabpressung beobachtet werden.

Die Wassereinpressung sollte möglichst bis zur Konstanz von Druck und Durchfluß erfolgen.

Verschiedene Vorschläge für prinzipielle Abpreßschemata mit entsprechenden Auswertungsmöglichkeiten sind z.B. bei HEITFELD & KOPPELBERG (1981), PEARSON & MONEY (1977), SCHETELIG et. al. (1978), STOBBER (1986) u.v.a. beschrieben.

Bei der Meßwerterfassung gab es bislang drei Entwicklungsstufen:

Zunächst wurden Wasseruhr und Manometer in bestimmten Zeitintervallen abgelesen und in Meßprotokolle übertragen.

Seit den siebziger Jahren setzte man zunehmend Analogschreiber zur Datenregistrierung ein.

Die neusten WD-Testgeräte arbeiten mit EDV-Anlagen und digitaler Datenerfassung. Damit wird eine EDV-gestützte Auswertung möglich.

Bei modernen Geräten wird der Druck direkt in der Abpreßstrecke gemessen. Das geschieht am besten mit elektronischen Druckwandlern. Gegenüber einer Druckmessung am Bohrlochkopf brauchen so keine Druckverluste durch Strömungseffekte im Packergestänge etc. abgeschätzt werden.

Die Messung der eingepreßten Wassermenge stellt ein besonderes Problem bei WD-Tests dar, weil eine möglichst genaue Mengenbestimmung über große Meßbereiche gefordert ist. Gerätebedingt werden die Fehler im unteren Meßwertbereich jedoch sehr groß. Daher sollten mehrere Meßgeräte für die entsprechenden Durchflußmengen zur Verfügung stehen.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

WD-Geräteaufbau

Zur Versuchsdurchführung sind prinzipiell folgende Geräte erforderlich:

- Wasserpumpe
- Packer
- Druckmeßeinrichtung
- Mengenmeßeinrichtung
- Packergestänge und Zuleitung
- Datenregistrierung

Diese Geräte müssen bestimmte Anforderungen für WD-Tests erfüllen.

Wasserpumpe

- Für die zu testenden Bohrlochteufen müssen die erforderlichen Drücke erzeugt werden können. Dabei sind Druckverluste bedingt durch die Reibung des strömenden Wassers zwischen der Pumpe und der Abpreßstrecke gegebenenfalls zu berücksichtigen.
- Die Pumpe muß einen gleichmäßigen Druck erzeugen. Druckschwankungen bzw. Druckstöße können die Auswertung unmöglich machen oder zerstören gar das Gebirge im Bereich der Abpreßstrecke.
- Die Wassermenge, die vom Gebirge aufgenommen werden kann, muß von der Pumpe gefördert werden können.

Packer

Mit Hilfe von Packern kann ein Bohrloch in einzelne hydraulisch isolierte Abschnitte unterteilt werden.

Nach Art ihrer Wirkungsweise unterscheidet man mechanische, hydraulische und pneumatische Packer.

- *Mechanische Packer*: Mittels Doppelgestänge wird ein Gummiballon zwischen zwei Tellern eingequetscht. Der Gummi drückt sich dadurch nach außen und legt sich fest an die Bohrlochwand an, so daß die Bohrung abgedichtet ist. Für sehr große Abpreßdrücke gibt es Packer bei denen ein Gummikörper durch hydraulisch oder pneumatisch betriebene Pressen gequetscht wird.

- *Hydraulische, pneumatische Packer:* Bei diesen Packern wird eine gewebeverstärkte Gummimanschette mittels Flüssigkeit oder Luft ballonartig aufgeblasen. Auch bei unebenen Bohrlochwänden schließen die Packer das Bohrloch noch gut ab.

Je nach Versuchsdurchführung kommen Einfach-, Doppel- oder Mehrfachpacker zum Einsatz. Mehrfachpacker finden in der Regel jedoch nur bei sehr aufwendigen Versuchsaufbauten, wie sie z.B. von SCHNEIDER, H.J. (1987) beschrieben wird, Verwendung.

Packergestänge und Zuleitungen

Bei allen Leitungen ist auf deren Dichtigkeit auch bei hohen Drücken zu achten.

Dauer

Je nach Gebirgstyp und Abpreßschema muß mit Abpreßzeiten zwischen ca. 15 und 120 Minuten gerechnet werden. In Ausnahmefällen können auch Langzeitversuche über mehr als 2 Stunden gefahren werden.

Versuchsproblematik

Probleme können bei den WD-Tests sowohl anwendungsbedingt als auch auswertungsbedingt auftreten. In ihrer Anwendung sind die Tests auf standfeste Bohrlöcher mit zumindest teilweise gleichmäßiger Bohrlochwand beschränkt.

Wenn die Tests mit zu hohen Druckstufen gefahren werden, so besteht immer die Gefahr, daß das Gebirge irreversibel verändert wird (siehe Abb. 5 und Tab. 8). Es ist dann nicht mehr möglich, die Meßergebnisse einer quantitativen Auswertung zuzuführen. Außerdem ist das Gebirge für nachfolgende Versuche zerstört.

Aus o.g. Gründen ist ersichtlich, daß zur erfolgreichen Abwicklung eines WD-Test-Programms einerseits erfahrenes Meßpersonal und andererseits eine kompetente Versuchsplanung, die die Gegebenheiten des Bohrlochs berücksichtigt, erforderlich ist. Erst dann können aus den WD-Tests qualitativ und quantitativ richtige Schlüsse gezogen werden.

Bewertung

Das Verfahren erfordert einen relativ hohen meßtechnischen Aufwand und kann nur im Halbfest- und Festgestein unter günstigen Voraussetzungen angewandt werden. Hier liefert es jedoch gute Ergebnisse zur vertikalen Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit in Kombination mit anderen Bohrlochversuchen wie z.B. Pumpversuchen.

Im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit von WD-Tests sollte eine entsprechende Dokumentation folgendes enthalten:

- Darstellung aller Rahmenbedingungen und Eckwerte der WD-Tests (Kurzbeschreibung des Bohrlochs, Wasserspiegel, Kalibermessung etc.).
- Darstellung der Meßwerte der Einzeltests in tabellarischer oder besser graphischer Form
- Hystereseschleife
- Darstellung der Auswertung unter Quellenhinweis in nachvollziehbarer Form

Literatur zur Einführung

HEITFELD, K.H. & W. KOPPELBERG (1981):

Durchlässigkeitsuntersuchungen mittels WD-Testen. Zbl. Geol. Paläont., Teil 1, Heft 5/6, Stuttgart.

PRINZ, H. (1982):

Abriß der Ingenieurgeologie. Enke Verlag, Stuttgart.

Literatur zur Vertiefung

EWERT, F.K. (1977):

Zur Ermittlung eines k_f -Wertes für Fels und Kriterien zur Abdichtung des Untergrundes von Talsperren. Berl. 1. natl. Tag. Ingenieurgeol., Paderborn 1977, Essen.

KOPPELBERG, W. (1986):

Numerische und statistische Untersuchungen zur Durchlässigkeit geklüfteter geologischer Körper und ihrer Bestimmung durch Wasserdruckversuche. Mitt. Ing.-u. Hydrogeol. Heft 23, Aachen.

LUGEON, M. (1933):

Barrages et Géologie. Dunod, Paris.

PEARSON, R. & M.S. MONEY (1977):

Improvements in the Lugeon or Packer Permeability Test. Quart. Journ. Engng. Geol., Heft 10, London.

SCHETELIG, K., V. SCHENK & W. HEYBERGER (1978):

Neues Meßverfahren für die Durchführung von Wasserabpressungen. Veröff. 3. Nat. Tagung Felsmech.; Aachen.

SCHNEIDER, H.J. (1987):

Durchlässigkeit von geklüftetem Fels - eine experimentelle Studie unter besonderer Berücksichtigung des Wasserabpressversuches. Mitt. Ing.- u. Hydrogeol. 26, Aachen.

STOBER, Ingrid (1986):

Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. Geol. Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, BGR/GLA E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, Stuttgart.

4.3 Weitere hydraulische Versuche (Auffüll-, Absenkversuch, Slug-, Drillstem-, Pulse-Test etc.)

Theorie und Auswertung

Während sich beim Pumpversuch die dem Aquifer mitgeteilte Wasserstands- oder Druckänderung weitestgehend gleichmäßig und über einen längeren Zeitraum vollzieht, wird bei den im folgenden beschriebenen Verfahren dem Aquifer ein positives oder negatives Drucksignal in teilweise recht kurzen Zeitintervallen mitgeteilt. Die Verfahren können einzeln oder miteinander kombiniert angewendet werden. Ihre Benennung ist vielfältig und verschiedentlich unterscheiden sie sich kaum voneinander.

Grundlegendere Unterschiede sind dadurch gegeben, ob bei konstanter oder veränderlicher Druckhöhe oder ob im Test zunächst eine positive oder eine negative Druckänderung vorgenommen wird, mit oder ohne Wasserentnahme oder -zugabe. Deshalb lassen sich die Versuche in vier, bereits 1973 bei SCHULER (1973) beschriebene Grundtypen einordnen (vgl. Tab. 9); die Namensgebung bezieht sich teilweise auch auf die Auswertung, so daß aus dem Namen nicht auf die Zuordnung geschlossen werden darf (z.B. Absenkversuch).

Tab. 9 : Arten und Benennung von in der Regel kurzen hydraulischen Bohrlochversuchen

Druckhöhe beim Versuch	positive Druckänderung	negative Druckänderung
variabel (hydrodynamisches Verfahren)	Absenk-, Eingieß-, Sickerversuch, Pulse-Test	Steig-, Ausspiegelungsversuch, Slug-Test, Drillstem-Test
konstant (hydrostatisches Verfahren)	Hebungs-, Auffüll-, Abpreßversuch	Absenk-, Bohrloch-, Kurzpumpversuch

Generell ist die Namensgebung von Fachinstitut zu Fachinstitut oft unterschiedlich, so daß hier heute noch Mißverständnisse auftreten können.

Nachstehend sei eine **Kurzbeschreibung** der Tests gegeben:

Absenk- bzw. Eingieß- bzw. Sickerversuch:

In die Teststrecke (offenes oder ausgebautes Bohrloch) wird Wasser bis zu einer definierten Aufhöhung des Wasserspiegels zugegeben. Für kurze Zeit (einige Minuten) wird durch ständiges Nachfüllen der Wasserspiegel konstant gehalten. Der nachfolgende Absinkvorgang wird meßtechnisch erfaßt (z.B. Lichtlot) und ausgewertet.

Pulse-Test:

Die Teststrecke im Bohrloch ist durch Paker eingegrenzt und über einen Tübingstrang mit der Erdoberfläche verbunden. Zwischen Teststrecke und Tübingstrang befindet sich ein steuerbares Ventil. Durch kurzzeitiges Öffnen des Ventils wird der Überdruck des wassergefüllten Stranges auf die Teststrecke übertragen. Der Druckverlauf in der Teststrecke, ausgelöst durch

die Absenkung des Wasserspiegels im Strang, wird mit einem in der Teststrecke eingebauten Druckmesser gemessen und ausgewertet.

Steig- bzw. Ausspiegelungsversuch:

Aus der Teststrecke (offenes Bohrloch oder ausgebaute Meßstelle) wird für einen sehr kurzen Zeitraum Wasser entnommen (Pumpe). Der Anstieg des abgesenkten Wasserspiegels nach Beendigung der Entnahme wird ausgewertet.

Slug-Test:

Die Teststrecke ist durch Packer eingegrenzt und über einen Tübingstrang mit der Erdoberfläche verbunden. Zwischen Teststrecke und Tübingstrang ist ein steuerbares Ventil eingebaut. Zur Versuchsdurchführung wird der entweder bereits aufgrund der Einbaumethode leere oder später entleerte Tübingstrang durch Öffnen des Ventils mit der Teststrecke verbunden. Dadurch ändert sich der Druck in der Teststrecke schlagartig. Dessen Erholung (Anstieg) wird mit Hilfe eines Sensors in der Teststrecke gemessen und ausgewertet. Das Ventil bleibt dauerhaft geöffnet.

Drillstem-Test:

Die Vorbereitungen und der Beginn des Testes entsprechen dem Slug-Test. Es wird jedoch das Testventil nach relativ kurzer Zeit wieder geschlossen, so daß das Druckgefälle noch nicht ausgeglichen ist und die Druckerhöhung im Bohrloch gemessen. Die Druckerhöhung in der isolierten Teststrecke erfolgt nun schneller als beim Slug-Test. Die gleiche Verfahrensweise wird sofort im Anschluß an den ersten Test nochmals durchgeführt. Das Diagramm des Druckverlaufes setzt sich nun aus Anteilen einer Slug-Test-Kurve und einer Pulse-Test-Kurve zusammen und kann so ausgewertet werden.

Hebungs- bzw. Auffüll- bzw. Abpreßversuch:

In ein Bohrloch oder eine ausgebaute Meßstelle wird über einen Wasserzähler eine über die Zeit konstante Menge Wasser eingeleitet. Nach Erreichen einer gleichbleibenden Wasserspiegelaufhöhung wird diese über einige Zeit beibehalten. Die Wasserspiegelaufhöhung und die eingeleitete Menge können ausgewertet werden.

Absenk- bzw. Bohrloch- bzw. Kurzpumpversuch:

Mittels einer Pumpe wird eine konstante Wassermenge dem Bohrloch, der Packerstrecke oder der ausgebauten Meßstelle entnommen. Nach Erreichen einer einigermaßen konstant bleibenden Absenkung wird aus der Fördermenge und dem Absenkungsbetrag die Auswertung meist nach orientierenden Formeln vorgenommen.

In jüngerer Zeit werden die o.g. Tests auch unter der Annahme von Fließbedingungen, wie sie in klüftigem Gebirge und Gebirge mit doppelter Porosität herrschen, interpretiert. Auch hier sei noch einmal betont, daß für eine sinnvolle Auswertung der Tests eine plausible Modellvorstellung des Gebirgssystems vorhanden sein muß.

Dieses läßt sich anhand der geologischen Kenntnisse geophysikalischer Bohrlochmessungen und mit Hilfe diagnostischer Diagramme, die aus den Tests selbst abgeleitet werden, aufstellen.

Letztere lassen beispielsweise erkennen, welche Testanteile aufgrund von Skin- und/oder Brunnenspeicherungseffekten für eine weitere Interpretation nicht geeignet sind.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß sowohl für die etwas älteren Testmethoden (z.B. Eingieß- oder Kurzpumpversuch) als auch für die neuerdings angewandten Verfahren in Festgesteinsaquifere zahlreiche Auswertemethoden wie Geradlinien- oder Typkurvendeckungsverfahren existieren.

Hier sei auf die einschlägige Fachliteratur (vgl. unten) verwiesen.

Anwendungsmöglichkeit

Außer den Eingießversuchen können die o.a. Tests nur im wassererfüllten Untergrund eingesetzt werden. Sie lassen sich allgemein bei orientierenden, im speziellen Fall auch vertiefenden Untersuchungen ebenso gut anwenden, wie in Poren- oder Kluftgrundwasserleitern. Für Fragestellungen zur Ergiebigkeit eines Aquifers sind sie jedoch weniger geeignet. Dies gilt auch für alle Fragen regionalen Charakters, da sie keine große Reichweite erzielen. Zur besseren Übersicht sei folgendes vermerkt:

- Tests unter konstanten Druckverhältnissen eignen sich in der Regel zur Bestimmung mittlerer Durchlässigkeiten (Hebungs-, Auffüll-, Abpreß-, Absenk- und Kurzpumpversuch).
- Relativ kurze Tests unter variablen Drücken eignen sich in der Regel zur Bestimmung mittlerer bis kleiner Durchlässigkeiten (Slug-, Drillstem-Test, Eingieß-, Sickerversuch).
- Relativ lange Tests (Nadelimpulse) unter variablen Drücken eignen sich in der Regel zur Bestimmung geringer bis sehr geringer Durchlässigkeiten (Pulse-Test, kombinierter Slug-Pulse-Test).

Demzufolge kann mit diesen Tests ein breites Spektrum der Gebirgsdurchlässigkeit abgedeckt werden. Ihre Aussagekraft ist auf den engeren Bohrlochumkreis begrenzt. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen:

Herkömmlichen **hydraulischen Bohrlochversuchen** (Auffüll-, Absenk-, Sicker-, Steig- Abpreß-, Kurzpumpversuch):

Hierunter werden eher Orientierungswerte liefernde Versuche mit geringerem zeitlichen und technischen Aufwand verstanden.

Modernere **hydraulische Bohrlochversuche** (Slug-, Puls-, Drillstem-, Kombinatinstests):

Diese werden meist bei komplizierteren Fragestellungen im Halbfest- bzw. Festgestein angewendet. Es ist möglich, sie mit Hilfe von Packern gezielt horizontbezogen einzusetzen, weshalb sie sich auch für die Kombination mit integrierenden Versuchen (z.B. Pumpversuch) besonders eignen.

Durchführung und Meßwerterfassung

Herkömmliche **hydraulische Bohrlochversuche** (vgl. oben)

Sie werden meist im offenen Bohrloch, seltener in ausgebauten Grundwassermeßstellen durchgeführt.

Notwendig sind:

- Ein geeignetes Mittel um den Wasserspiegel zu verändern (Wasser eingießen, Pumpe)
- Ein Gerät zur Messung des Wasserspiegels (z.B. Lichtlot)
- Ein Zeitmeßgerät
- Eine Wassermengenmeßeinrichtung
- Ggf. ein Verdrängungskörper, mit welchem je nach Einsatz Aufhöhungs- bzw. Absenkungsvorgänge des Wasserspiegels ausgelöst werden können.

Durch eine der oben beschriebenen Methoden wird der Wasserspiegel verändert und seine Reaktionen über die Versuchszeit und nach Versuchsende gemessen. Wird Wasser zugegeben oder abgepumpt, ist die Menge kontinuierlich und die Summe zu registrieren. Aufgrund der geringen Reichweiten der Versuche ist das Beobachten von nahegelegenen Meßstellen in der Regel nicht erforderlich (vgl. oben "Theorie").

Modernere **hydraulische Bohrlochversuche** (vgl. oben)

Notwendig sind:

- Bohrgerät oder Kran
- Packer und Tübingstrang mit steuerbarem Ventil
- Drucksensor mit elektronischer Datenerfassung (analog - digital)
- Vorrichtung zum Entleeren oder Füllen des Tübings

Die Aufzeichnung der Versuche erfolgt meistens analog und digital, so daß Schreiberaufzeichnungen, Disketten und Meßwertausdrucke dem AG übergeben werden können.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Die herkömmlichen mit einfacherem Geräteeinsatz (ohne Packer etc.) durchzuführenden Versuche, erfordern einen üblichen apparativen und personellen Aufwand wie ein einfacher Pumpversuch (vgl. Kap. 4.1), jedoch wirkt sich der Zeitfaktor kostengünstig aus. Pro Test ist mit wenigen hundert DM zu rechnen.

Die moderneren aufwendigeren Versuche zwischen Packern mit Drucksensoren und elektronischer Datenerfassung ziehen aufgrund des apparativen Mehraufwandes und komplizierterer Auswertungsformen einen höheren wirtschaftlichen Aufwand nach sich. Die Kosten pro Test sind sehr unterschiedlich, da sie auch vom Gesamtprogramm, dem Know-how der ausführenden Firma, der Teststreckenteufe u.v.m. abhängen. Es ist jedoch meist mit Kosten über DM 1 000,00 zu rechnen.

Versuchsproblematik

Eine der am häufigsten auftretenden Schwierigkeiten bei den herkömmlichen hydraulischen Bohrlochversuchen ist die Herstellung einer einwandfreien Teststrecke. Vor allen Dingen muß gewährleistet sein, daß ihre Wandung nicht durch Einflüsse der Bohrspülung zugesetzt ist. Probleme der Standfestigkeit können ggf. durch Einbringen von Filterkies reduziert werden. Da manche Versuche nur in bestimmten Durchlässigkeitsbereichen eingesetzt werden können, kann eine falsche Abschätzung zur Nichtauswertbarkeit des Versuches führen. Durch das Setzen von Packern können offene Bohrlochstrecken irreversibel verändert werden und sind für nachfolgende Versuche nicht mehr geeignet. Deshalb ist ein in sich schlüssiges Kompletprogramm für die Gesamtbohrung vor Einleitung der Versuche zu erarbeiten. Schwierigkeiten bei der Auswertung der Versuchsergebnisse können auftreten durch Skineffekte oder durch einen falschen Gebirgsmodellansatz.

Bewertung

Die herkömmlichen Testverfahren haben sich vor allem bewährt, wenn es darauf ankommt, Ergebnisse kostengünstig, rasch und/oder in engen aufeinanderfolgenden vertikalen Abständen einer Bohrung zu erhalten.

Da die Tests kurz laufen, erfassen sie nur das engere Umfeld der Teststrecke; aufgrund relativ vieler möglicher Versuchsbeeinträchtigungen sollten sie bei vertiefenden Untersuchungen nur in Kombination mit anderen Verfahren zur Absicherung der Ergebnisse eingesetzt werden. Bei richtiger Auswahl und Durchführung sind sie in einem weiten Durchlässigkeitsbereich anwendbar (vgl. Kap. 3)

Die moderneren Verfahren haben sich hauptsächlich bei Bohrungen im Festgestein bewährt, vor allem in der Erkundung teufenbezogener Details. Sie werden in großem Umfang bei Tiefbohrungen (z.B. Lagerstättenbohrungen, Erkundungsbohrungen) eingesetzt. Mit ihnen können auch sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeiten ermittelt werden.

Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit der Ergebnisse, sollte eine entsprechende Versuchsdokumentation folgendes enthalten:

- Darstellung der Rahmenbedingungen und Eckwerte der Versuche sowie Kurzbeschreibung der Bohrung.
- Darstellung aller Meßwerte in tabellarischer und graphischer Form.
- Darstellung der Auswertemethodik mit Quellenangabe in nachvollziehbarer Form.

Literatur zur Einführung

HÖLTING, B. (1980):

Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. F. Enke Verlag, Stuttgart.

LANGGUTH, H.R. & R. VOIGT (1980):

Hydrogeologische Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

PRINZ, H. (1982):

Abriß der Ingenieurgeologie. F. Enke Verlag, Stuttgart.

STOLPE, H. (1977):

Hydrogeologische Modell- und Geländeuntersuchungen zur Versickerung in Lockergesteinen. Mitt. zur Ingenieur- u. Hydrogeologie 5, Aachen.

Literatur zur Vertiefung

CECEN, K. (1967):

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes im Zusammenhang mit bautechnischen Bodenuntersuchungen.- Schriftenreihe d. Kuratoriums f. Kulturbauwesen, 17. Verlag Wasser und Boden, Hamburg.

DAVIDENKOFF, R. (1962):

Über die Berechnung von Sickerverlusten aus Kanälen. Mitt. BAW, 18, Karlsruhe.

GILG & GAVARD (1957):

Calcul de perméabilité par essai d'eau dans les sondages en alluvions. Bull. Tech. Suisse Romande, Grenoble.

HEITFELD, K.H., OLZEM, R., STOLPE, H. (1979):

Erarbeitung von Kriterien und Untersuchungsmethoden für die Dichtigkeit von Böden zur Standortbeurteilung von Sondermülldeponien (Untersuchungsmethoden). Landesanstalt für Wasser und Abfall NW, Aachen.

KOLLBRUNNER, C.F. (1946):

Foundation und Konsolidation. Bd. I und II, Schweiz. Druck- und Verlagshaus, Zürich.

MAAG, E. (1941):

Methode zur feldmäßigen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit. Straße und Verkehr (La Route et la Circulation Routière) 19, Solothurn, Zürich.

MAROTZ, G. (1968):

Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund; Mitteilungen, Institut f. Wasserwirtschaft, Grundbau und Wasserbau der Universität Stuttgart, H. 9., Stuttgart.

MATSUO, S.; YOSHIDA, H., KOOICHI, A. (1953):

A field determination of permeability. Proc. of the third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zürich, Vol. 1, Zürich.

MOOS, A.v. & De QUERVAIN, F. (1948):

Technische Gesteinskunde, Verlag Birkenhäuser, Basel.

SCHAFFER, G., COLLINS, H.J. (1966):

Eine Methode zur Messung der Infiltrationsrate im Felde. Zeitschr. Kulturtechn. u. Flurber., 7.

SCHULER, G. (1973):

Über Durchlässigkeitsbestimmungen durch hydraulische Bohrlochversuche und ihre Ergebnisse in tertiären Flinsanden (Obere Süßwassermolasse) Süddeutschlands. bbr 24, Köln.

STOBER, Ingrid (1986):

Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. Geol. Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, BGR/GLA, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover.

VEDERNIKOV, V.V. (1934):

Versickerung aus Kanälen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, H. 11

4.4 Einschwingversuch

Theorie und Auswertung

Daß gespannte Grundwasserleiter als schwingfähige Systeme betrachtet werden können, dokumentiert sich in der Reaktion von Druckwasserspiegeln bei Erdbeben. Es konnte nachgewiesen werden, daß Amplitude, Frequenz und Dämpfung der Schwingung wesentlich von der Transmissivität und Wasserspiegellage des Aquifers abhängt. Die Gleichung für die Beziehung zwischen Transmissivität und Schwingung in einem Brunnen lautet:

$$T = 1,3 r_w^2 \cdot \frac{\omega_w}{\beta}$$

wobei der Dämpfungskoeffizient β gegeben ist durch :

$$\beta = \frac{\omega_w^2 + E^2}{2 \omega_w E}$$

ω_w ist die Eigenfrequenz des Systems Brunnen-Aquifer und wird aus der aufgezeichneten Schwingungskurve ermittelt.

Anwendungsmöglichkeit

Theoretisch ist das Verfahren zur raschen und kostengünstigen Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit in ausgebauten Meßstellen in gespannten Porengrundwasserleitern geeignet. Demzufolge liegt sein Anwendungsspektrum bei k -Werten zwischen etwa 10^{-3} und 10^{-7} m/s. Die erzielbare Reichweite kann mit höchstens bis wenige 10er Meter beziffert werden.

Durchführung und Meßwerterfassung

Einschwingversuche sind nur an Brunnen, Pegeln oder ähnlich ausgebauten Aufschlüssen möglich, dabei darf die Filterstrecke nicht oberhalb des Grundwasserspiegels liegen. Der Brunnenkopf wird luftdicht abgeschlossen und der Wasserspiegel durch Einleiten von Preßluft abgesenkt. Nach Öffnen des Brunnenkopfes wird die einsetzende gedämpfte Schwingung der Wassersäule im Brunnen über einen Meßwertaufnehmer registriert und aufgezeichnet. Eine schematische Darstellung der Versuchsaapparaturen und der resultierenden Meßkurve gibt die Abb. 8.

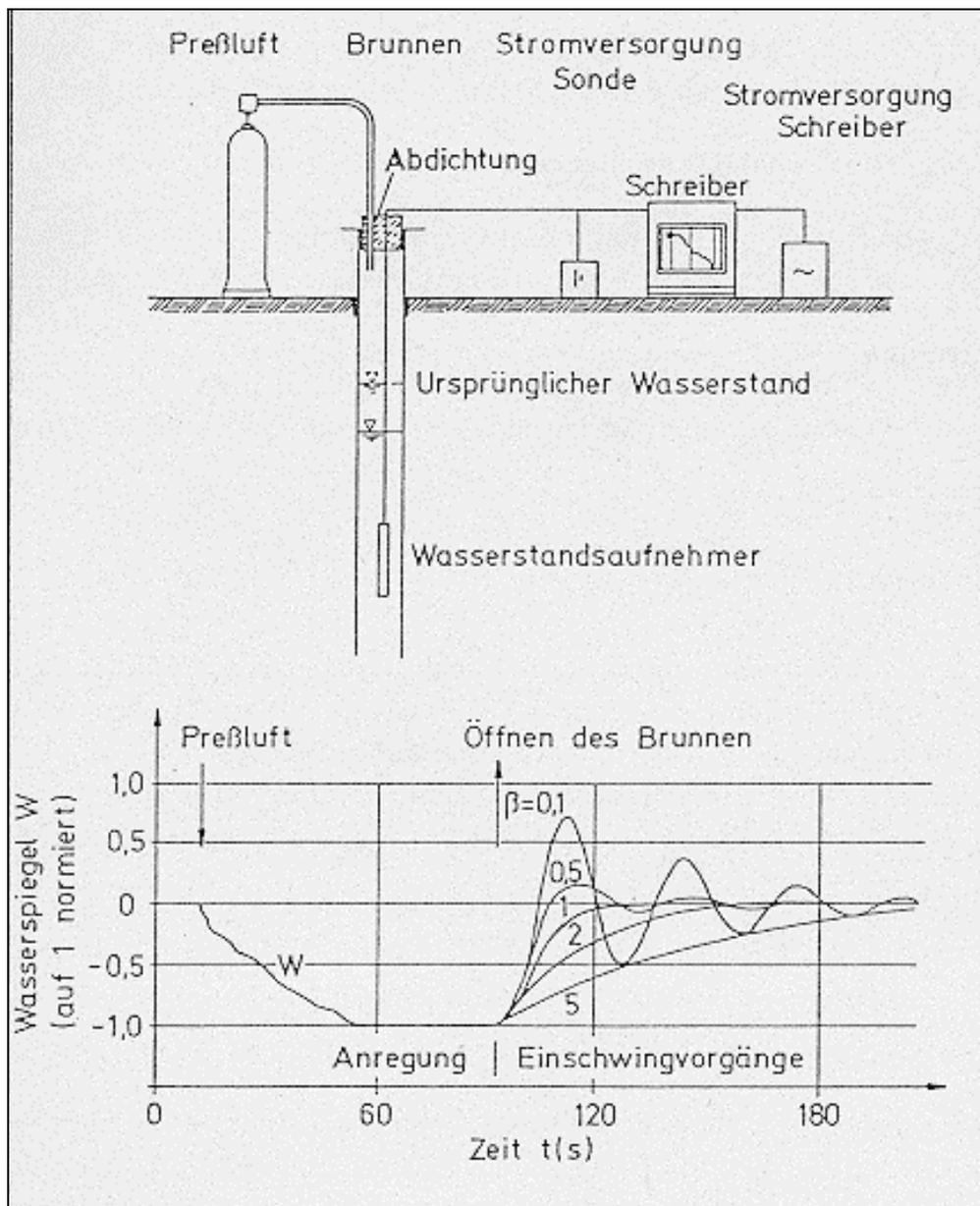


Abb. 8: Apparativer Aufbau und Meßkurve eines Einschwingversuches

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Einschwingversuche sind an vorhandenen Brunnen ohne großen Aufwand ausführbar. Die zeitliche Dauer ist gering, kann sich aber durch mehrmalige Versuchsausführung (stacking) verlängern.

An apparativer Ausrüstung ist erforderlich:

- Gasdichter Abschluß für Brunnenkopf (mit Anschluß für Preßluftflasche, Durchführung für Meßwertaufnehmer und Ventil)
- Preßluftflasche
- Analoge oder digitale Aufzeichnungseinheit sowie Drucksensor

Versuchsproblematik

Ein wesentliches Problem ist in der bisher geringen Verbreitung von Einschwingversuchen zu sehen. Hieraus resultiert ein Defizit an Erfahrung in der Versuchsdurchführung und in der Auswertemethodik der Versuche. Vor allem können Einflüsse des Ringraumes die Schwingungen und damit das Versuchsergebnis verändern.

Bewertung

Aufgrund der geringen Erfahrungswerte, die für dieses Verfahren vorliegen, ist es in der Praxis schwierig, die Versuchsergebnisse ohne begleitenden Kombinationsversuch (z.B. Pumpversuch) im Hinblick auf ihre Genauigkeit einzustufen. Nach Literaturangaben (MÜLLER) ergibt sich eine gute Übereinstimmung zu herkömmlichen Verfahren.

Unter dem Gesichtspunkt der Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit sollte eine entsprechende Dokumentation folgendes beinhalten:

- Beschreibung der Versuchsapparatur
- Beschreibung der Versuchsdurchführung
- nachvollziehbare Beschreibung des Auswertevorganges, ggf. unter Quellenangabe der angewendeten Methodik
- Meßwertprotokoll
- Meßwertdarstellung graphisch

Literatur

HÖLTING, B. (1980) :

Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, F. Enke Verlag, Stuttgart.

KRAUSS, I. (1974):

Die Bestimmung der Transmissivität von Grundwasserleitern aus dem Einschwingverhalten des Brunnen-Grundwasserleitersystems. J. Geophys., 40, Springer Verlag, Berlin.

KRAUS, I. (1977) :

Das Einschwingverfahren - Transmissivitätsbestimmung ohne Pumpversuche. Gas Wasserfach-Wasser-Abwasser, 118, Verlag Oldenburg, München.

MÜLLER, CHR. (o.J.):

Tranmissivitätsmessungen mit dem Einschwingverfahren
Vergleichende Untersuchungen im vollkommenen und unvollkommenen Brunnen
Unveröff. Diss. Geol. Pal. Inst. der Christian Albrecht Universität Kiel

4.5 Flowmetermessung

Theorie und Auswertung

Wird aus einem offenen Bohrloch oder einem ausgebauten Brunnen Wasser mittels einer Pumpe entnommen, so ist die vertikale Verteilung der Fließgeschwindigkeit des Wassers im Bohrloch abhängig von den Zuflüßzonen im Gebirge. Von unten nach oben betrachtet, nimmt sie in Form einer Summenkurve, die die Berechnung der prozentualen Zuflüsse bezogen auf die Gesamtfördermenge erlaubt, zu. In Verbindung mit der Kenntnis der Transmissivität des getesteten Abschnittes ist es somit möglich, die vertikale Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit zu ermitteln. In Abb. 9 ist schematisch eine Flowmeter-Kurve mit den aus ihr errechneten prozentualen Zuflüssen dargestellt. Der Durchlässigkeitswert der einzelnen Bereiche ergibt sich dann zu:

$$k_i = \frac{Q_i}{100} * \frac{T}{m_i}$$

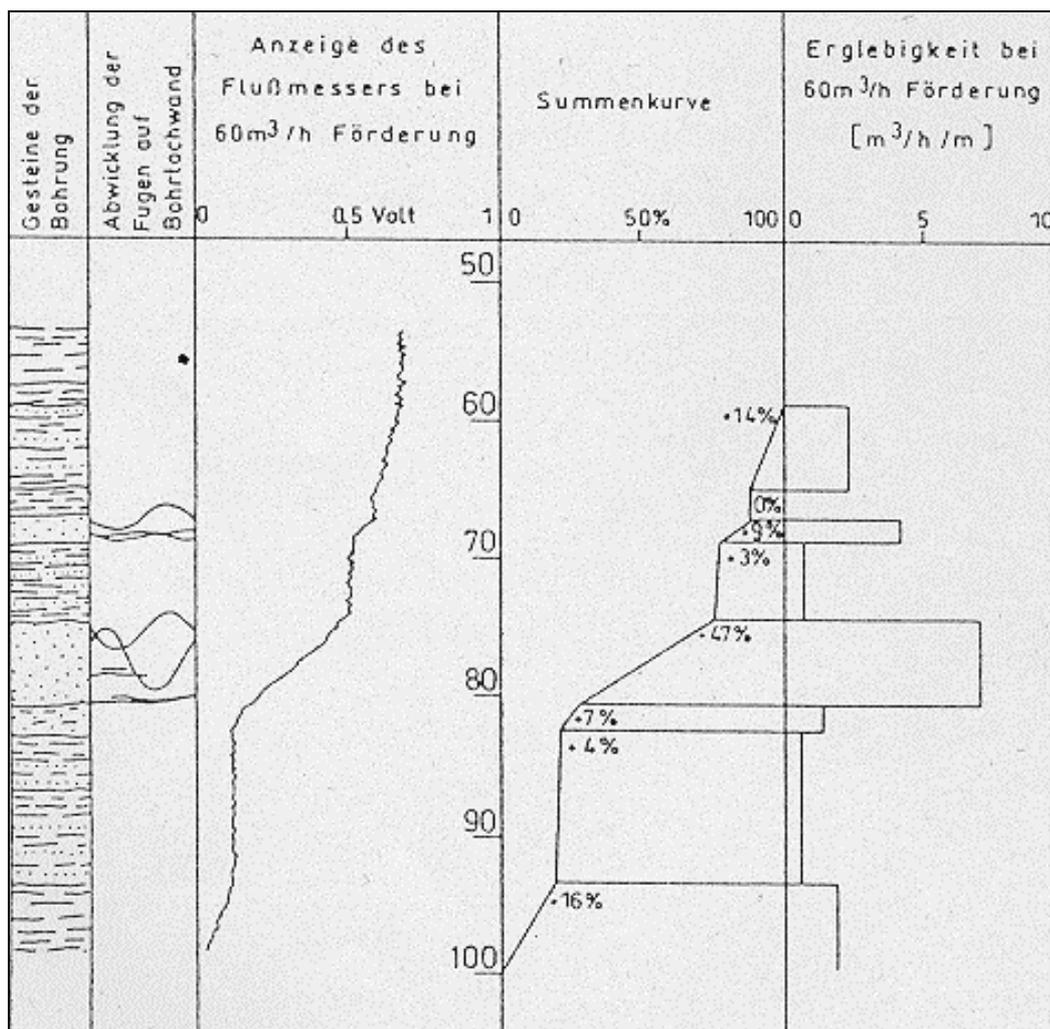


Abb. 9: Aufnahme und Auswertung einer Flowmeter-Kurve

Aus den ermittelten Teilzuflüssen q_i in das Bohrloch können mit der Formel von COOPER und JACOB die Transmissivitäten T_i berechnet werden:

$$T_i = \frac{q_i}{4\pi * s_i} * \ln \frac{2,25 T_i * t}{r_i^2 * S_i}$$

Die Gleichung ist explizit nicht lösbar, sondern muß, ausgehend von einem Startwert für T_i und einem Schätzwert für S_i iterativ gelöst werden. Unmittelbar aus der Formel zu erkennen ist, daß das Ergebnis relativ unempfindlich gegenüber starken Änderungen von S_i ist.

Anwendungsmöglichkeit

Flowmetermessungen besitzen ein großes Anwendungsspektrum. In der Wasserbeschaffung eignen sie sich vor allem zur Ausbauplanung von Brunnen, besonders zur Beurteilung von Bohrungen im Kluftgestein. Bei der Untergrunderkundung für Standorte mit einhergehendem wasserwirtschaftlichem Gefährdungspotential und im Zuge von Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen liefern sie unter günstigen Bedingungen in den vertiefenden Untersuchungsphasen relativ weitreichende Details zu Fließwegen im Untergrund.

Durchlässigkeiten unter 10^{-6} m/s können kaum erfaßt werden, da die Wasserbewegung aus dem Gebirge in das Bohrloch in der Regel zu gering wird. Die Methode erfaßt nur das unmittelbare Umfeld der Teststelle (einige Meter).

Durchführung und Meßwerterfassung

Dem Prinzip der Flowmeter-Messung liegt die Ermittlung der Umdrehungszahl eines Flügel-Impellers zugrunde. Dieser wird in der Bohrung mit konstanter Geschwindigkeit entgegen dem durch die Pumpe erzeugten Förderstrom bewegt. Unbedingt erforderlich ist die Erstellung einer sogenannten Nullkurve, die bei nicht eingeschalteter Pumpe aufgenommen wird. Hiermit wird der sogenannte "Fahreffekt" ermittelt. Weiterhin müssen die relevanten Einbaumaße (Verrohrungen, Steigleitungen etc.) bekannt sein. Im unverrohrten Bohrloch muß der Durchmesser anhand eines Kaliberlogs ermittelt werden. Alle o.g. Parameter dienen dazu, die aufgenommene Flowmeterkurve zu korrigieren. Aus gleichem Grund sollte die Flowmetermessung generell durch eine Leitfähigkeitsmessung ergänzt werden.

Die Pumpe sollte oberhalb oder aber unterhalb des zu testenden Abschnittes eingebaut werden, aber immer noch unterhalb der größten während des Versuchs zu erwartenden Absenkung des Wasserspiegels. Die Förderrate ist über die gesamte Versuchsdauer konstant zu halten. Die Entnahme sollte mindestens 15 Minuten vor Beginn der Messung begonnen werden.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Zur Durchführung von Flowmetermessungen ist mindestens notwendig:

- Auf geophysikalische Messungen spezialisierte Servicefirma mit Meßgeräten
- Einbau einer geeigneten Pumpe; nach Möglichkeit sollte ein 2-Zoll-Rohr an ihr vorbeigeführt werden, damit die Sonde ungehindert passieren kann (kann u.U. von der Servicefirma ausgeführt werden).
- Erstellung einer sogenannten "Nullkurve"
- Erstellung eines Kaliberlogs (bei unverrohrtem Bohrloch)
- Erstellung der Flowmeterkurve bei Pumpenbetrieb mit konstanter Förderrate (evtl. mehrmals mit unterschiedlicher Förderrate)
- Messung der Förderrate der Pumpe und der Wasserspiegellage im Brunnen.

Die **Kosten** für eine komplette Flowmetermessung setzen sich aus den An- und Abfahrtskosten, den Kosten für die Aufnahme von Kaliber- und Flowmeterlog, in der Regel den Kosten für den Pumpeneinbau und den Kosten der Wartezeit der beauftragten Bohrfirma zusammen. Die reinen Messungen dauern in einem 50 m tiefen Brunnen etwa eine Stunde. Die Meßdauer verlängert sich bei mehreren Logs entsprechend.

- An- und Abfahrtskosten ca. 0,80 - 1,20 DM/km
- Kaliber- und Flowmeterlog ca. 5,00 - 6,00 DM/m
- Standzeiten Bohrfirma ca. 150,00 - 300,00 DM/h

Die preisbildenden Positionen sind damit nicht die Messungen selbst, sondern die zugehörigen Nebenleistungen.

Versuchsproblematik

- Ist das Gebirge gering durchlässig, so können die für eine sichere Auswertung notwendigen Umdrehungszahlen des Impellers nicht erreicht werden.
- Bei zu geringem Bohrlochdurchmesser muß für jeden Meßvorgang mit Förderung die Pumpe ein- und ausgebaut werden, damit die Meßsonde vorbeigefahren werden kann.
- Bei der Auswertung von Flowmetermessungen in ungespannten Aquiferen kann die mit einem anderen Verfahren ermittelte Transmissivität nicht ohne weiteres zur Bestimmung von Teildurchlässigkeiten herangezogen werden, da diese für die gesamte wassererfüllte Mächtigkeit bestimmt wurde, die Flowmetermessungen jedoch nur Aussagen über den beim Pumpenbetrieb noch wassererfüllten Teil des Aquifers liefern.

Die Berechnung der Durchlässigkeit allein aus dem Flowmeterlog ist meist nicht möglich, da der Versuch selten bei Beharrung des Wasserspiegels gefahren wird.

Bewertung

Flowmetermessungen stellen ein vielfach erprobtes und bewährtes Mittel dar, um überwiegend qualitative, ggf. auch quantitative Informationen über die vertikale Verteilung der Zuflußzonen in einer Bohrung oder einem Brunnen zu erhalten. Die Errechnung von Durchlässigkeiten einzelner Gebirgsabschnitte ist nur unter günstigen Umständen möglich. Grundsätzlich ist die Flowmetermessung als ergänzender Kombinationsversuch anzusehen, der vor allem bei schwierigen Fragen zur Gebirgsdurchlässigkeit im Bereich vertiefender Untersuchungen und bei brunnenbautechnischen Problemstellungen eingesetzt werden sollte.

Unter dem Gesichtspunkt der Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit sollte eine entsprechende Dokumentation folgendes beinhalten:

- Kaliberlog
- Flowmeterkurve im Ruhezustand und unter Förderbedingungen
- Graphische Auswertung der Kurve hinsichtlich der Zuflußzonen
- Lage des Betriebs- und Ruhewasserspiegels
- Im Falle einer horizontbezogenen Berechnung von Durchlässigkeiten Angabe über Art und Ergebnis des vorgeschalteten Kombinationsversuches (z.B. Pumpversuch) über dessen Teststrecke etc.
- horizontbezogene Darstellung der Umrechnungsergebnisse

Literatur

DESBRANDES, R. (1985):

Encyclopedia of well logging Gulf Publishing Company, Book Division London, Paris, Tokyo

REPSOLD H., v. RÜLKE O. (1970):

Der Flußmesser, ein Gerät zur Bestimmung von Wasserzuflußmengen in verfilterten Brunnen. Reihe Geo. Jb., 98: 95 - 105; Hannover

SCHNEIDER, H. (1988):

Die Wassererschließung. Grundlagen der Erkundung, Bewirtschaftung und Erschließung von Grundwasservorkammern in Theorie und Praxis. Vulkan Verlag, Essen

4.6 Fluid-Logging

Theorie und Auswertung

Die Spülung im Bohrloch wird vollständig gegen eine Flüssigkeit ausgetauscht, die sich hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit stark von der des Gebirgswassers unterscheidet. Mit konstanter Pumprate wird ein hydraulisches Gefälle vom Gebirge zum Bohrloch hin erzeugt und ein Temperatur/Leitfähigkeits-Log zu verschiedenen Zeitpunkten (Abb. 10) durchgeführt. In diesem sind die Zuflußzonen aus dem Gebirge als Peaks zu erkennen.

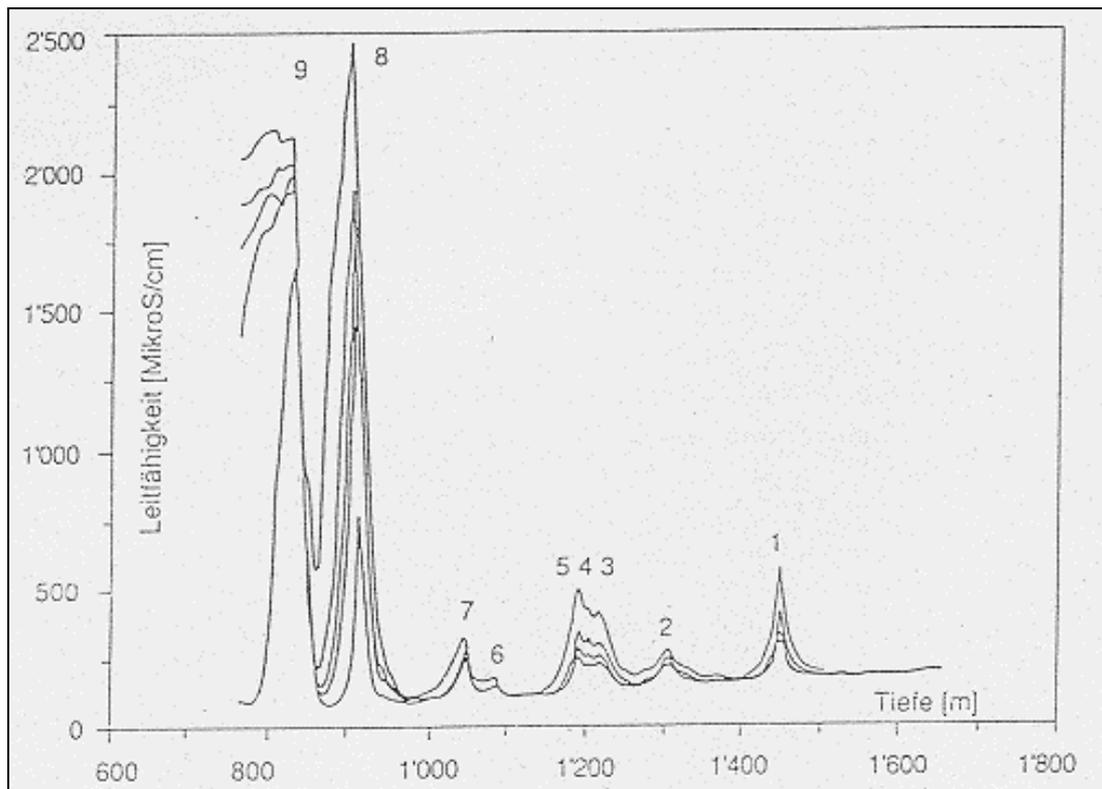


Abb. 10: Leitfähigkeits-Logs zu verschiedenen Zeiten in einer Tiefbohrung beim Fluidlogging-Verfahren

Zur quantitativen Auswertung muß aus den temperaturkorrigierten und auf NaCl-Gehalte umgerechneten Leitfähigkeitslogs verschiedener Zeitpunkte die in den einzelnen Zonen dem Bohrloch zufließende Wassermenge und ihr Elektrolytgehalt berechnet werden.

$$\sigma(20^{\circ}\text{C}) = \frac{\sigma(T)}{1 + \beta(T - T_s)}$$

Hierzu kann z.B. die sogenannte Methode der partiellen Momente oder die Advektions/Dispersions-Methode verwandt werden. Ersteres Verfahren geht von Vereinfachungen der Strömung und des Transports im Bohrloch aus. Aus der zeitlichen Veränderung des Elektrolytmassenschwerpunktes zwischen zwei Zuflußzonen lassen sich die Fließgeschwindigkeiten und die Dispersionskoeffizienten des Elektrolyttransports im Bohrloch berechnen.

Das zweite der o.g. Verfahren beruht auf einer numerischer Lösung der Differentialgleichung des advektiven und dispersiven Transports von Wasserinhaltsstoffen im Bohrloch. Für ein räumlich in einzelne Abschnitte unterteiltes (diskretisiertes) Bohrloch werden die einzelnen Zuflüsse und Elektrolytkonzentration anhand numerischer Optimierungsverfahren für die einzelnen Zeitschritte zur bestmöglichen Anpassung an die Meßkurven gebracht.

Aus den mit einem oder beiden der o.g. Verfahren ermittelten Teilzuflüssen q_i in das Bohrloch können mit der Formel von COOPER und JACOB (1946) die Transmissivitäten T_i berechnet werden:

$$T_i = \frac{q_i}{4\pi \cdot s_i} \cdot \ln \frac{2,25 T_i t}{r_i^2 S_i}$$

Die Gleichung ist explizit nicht lösbar, sondern muß, ausgehend von einem Startwert für T_i und einem Schätzwert für S_i iterativ gelöst werden. Unmittelbar aus der Formel zu erkennen ist, daß das Ergebnis relativ unempfindlich gegenüber starken Änderungen von S_i ist.

Anwendungsmöglichkeit

Die Methode des Fluid-Logging kann vor allem in Geringwasserleitern zur Anwendung kommen, also dort, wo die Unterschiede zwischen Zuflußzonen und hydraulisch relativ dichten Bereichen besonders groß sind. Bei genügend großen Durchlässigkeitsunterschieden ist aber auch eine Anwendung im Porengrundwasserleiter möglich. Aus dem Prinzip des Verfahrens und der Leifähigkeitsaufnahme ist ersichtlich, daß der Vorteil in der sehr exakten Lokalisierung von Zuflußzonen im Gebirge liegt. Somit ist eine weitere Anwendungsmöglichkeit bei der Erkennung von Wässern unterschiedlicher Mineralisation zu sehen (Mineralwasser - Süßwasser; Trinkwasser - Salzwasser). Die Bandbreite der zu errechnenden Gebirgsdurchlässigkeiten ist in der allgemeinen Praxis noch nicht abgesichert. Sie dürfte in tiefere Bereiche als die Flowmetermessungen vordringen ($< 10^{-6}$ m/s). Grundsätzlich erfaßt die Methode nur das engste Umfeld um die Teststelle.

Durchführung und Meßwerterfassung

Erster Schritt beim Fluid-Logging ist die Säuberung des Bohrlochs im Anschluß an eine Kalibermessung. Mittels eines geeigneten Gestänges oder Tübings wird die Austauschflüssigkeit (je nach Eigenschaft des Formationswassers wird mit entionisiertem Wasser oder einer Salzlösung gearbeitet) in das Bohrloch eingebracht. Dies geschieht am besten von unten nach oben, wobei es sich als zweckmäßig erwiesen hat, den Wasserspiegel im Bohrloch durch Pumpen konstant zu halten. Danach wird ein Temperatur/Leitfähigkeits-Log im Ruhezustand gefahren, um die gleichmäßige Verteilung der Austauschflüssigkeit zu dokumentieren.

In Abb. 11 ist die Durchführung der Temperatur/Leitfähigkeits-Messungen sowie der Austausch der Bohrlochflüssigkeit schematisch dargestellt.

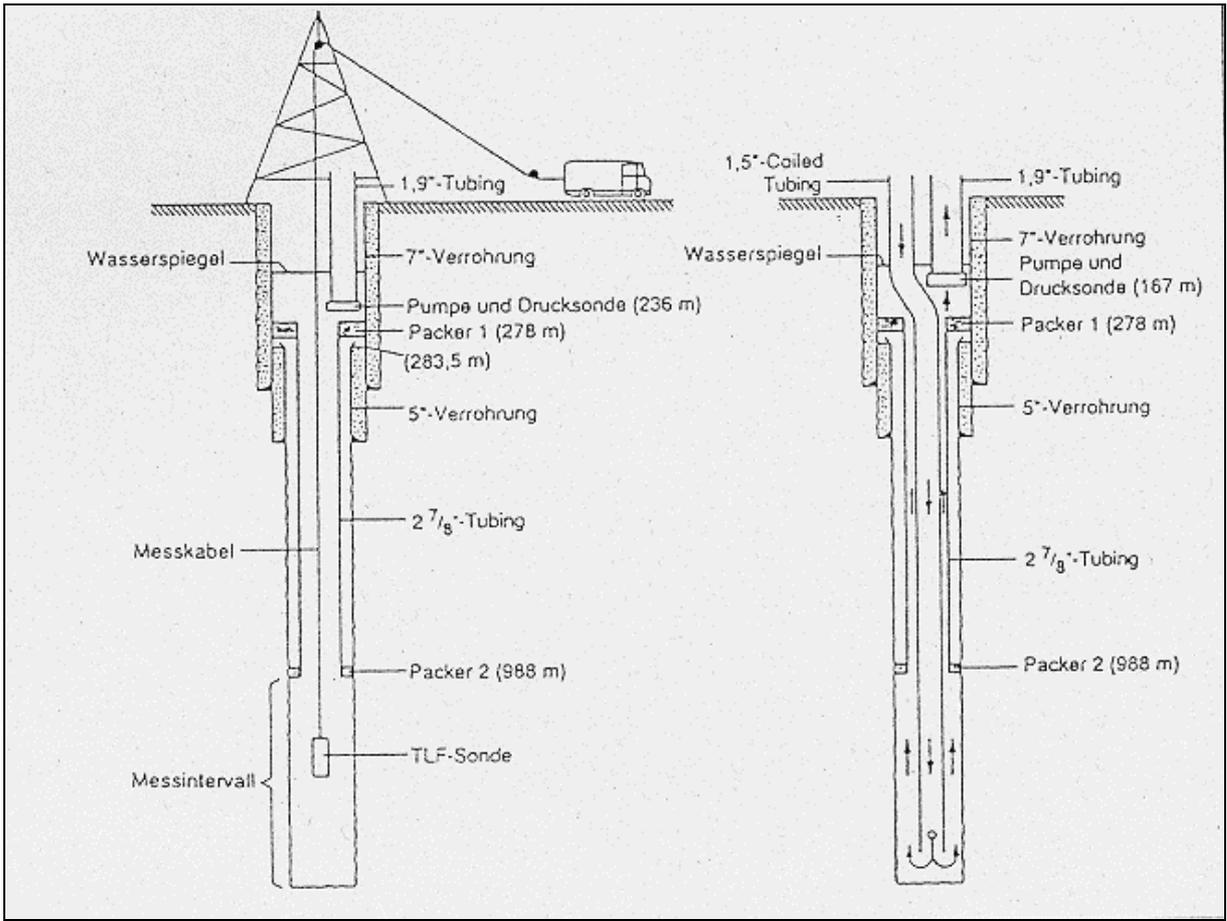


Abb. 11: Temperatur/Leitfähigkeits-Messungen im Bohrloch und Vorgehensweise beim Austausch der Spülung während des Fluidlogging-Verfahrens

Die Pumpe wird auf eine konstante Förderrate eingestellt, wobei darauf zu achten ist, daß sie nicht trockenfällt, d.h. es muß vor Versuchsbeginn einigermaßen klar sein, mit welcher Absenkung des Wasserspiegels im Bohrloch bei welcher Fördermenge zu rechnen ist. In bestimmten zeitlichen Abständen werden die Temperatur/Leitfähigkeits-Messungen wiederholt.

Die teufenbezogene Aufzeichnung der Temperatur und der Leitfähigkeit kann sowohl analog oder digital (Abb. 12) erfolgen. Sinnvoll ist die digitale Meßwerterfassung, so daß die Daten unmittelbar in die oben beschriebenen Auswerteverfahren Eingang finden. Während des gesamten Versuchs ist die Fördermenge der Pumpe und die Wasserspiegellage im Bohrloch zu überwachen.

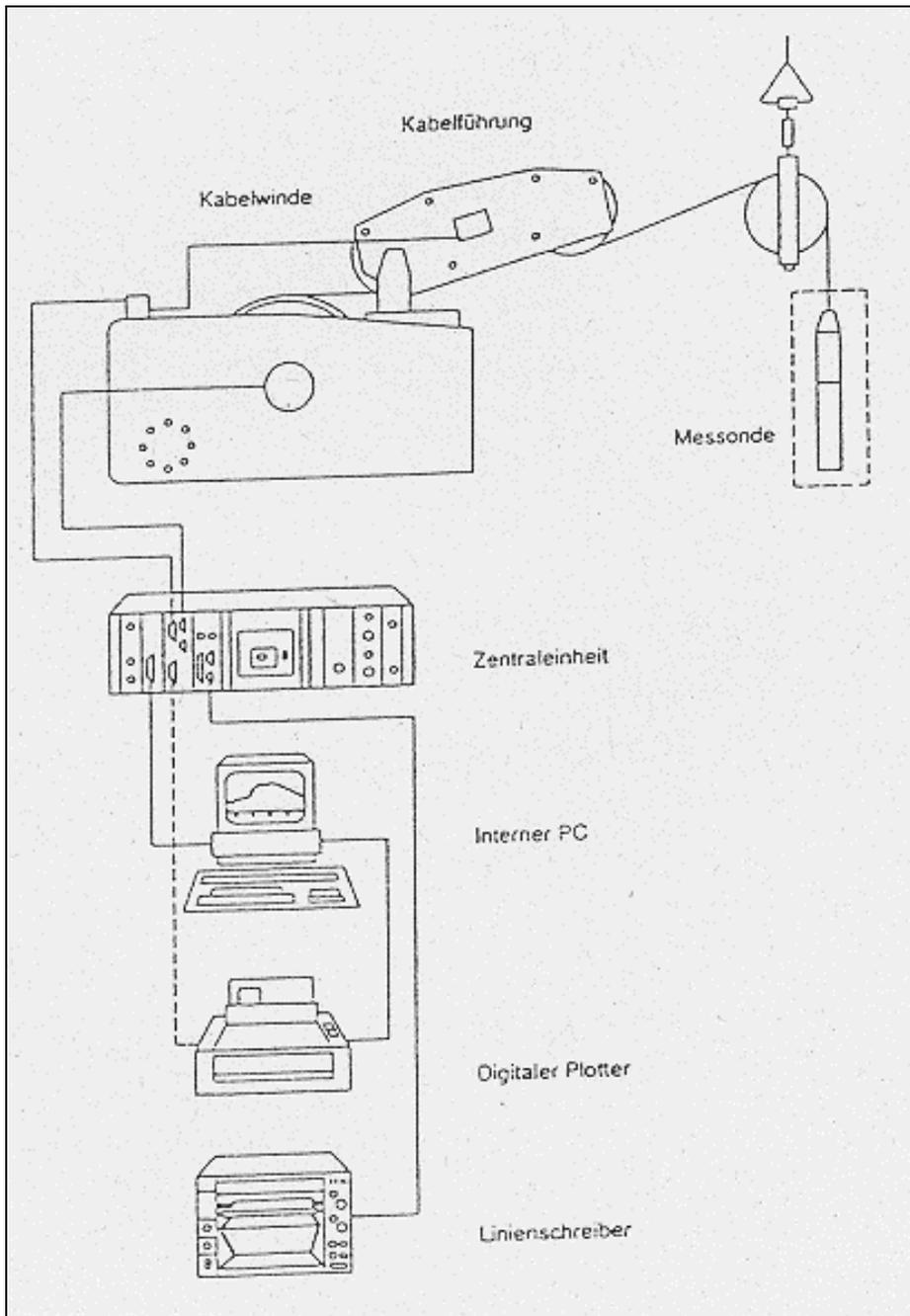


Abb. 12: Systemkonfiguration beim Fluid-Logging

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Zur Durchführung des Versuchs muß eine geeignete Einrichtung zum Austausch der Bohrlochflüssigkeit zur Verfügung stehen. Je nach speziellem Anwendungsfall ist als Austauschflüssigkeit entionisiertes Wasser, Trinkwasser oder eine Salzlösung in ausreichender Menge erforderlich. Die Anzahl und die zeitlichen Abstände der durchführenden Leitfähigkeitslogs richten sich nach den Gebirgsverhältnissen und der gewünschten Erkenntnistiefe.

Die Versuchskonfiguration ist relativ neu. Angaben zu den Kosten liegen derzeit nicht vor, aufgrund der Zeitdauer ist jedoch mit Größenordnungen weit über DM 1 000,00 zu rechnen.

Versuchsproblematik

Schwierigkeiten können sich beim Einbringen der Bohrlochflüssigkeit ergeben. Hierbei muß verhindert werden, daß diese allzusehr in das Gebirge eindringt. Sind die Dichteunterschiede zwischen Gebirgswasser und Austauschflüssigkeit sehr groß, so besteht die Gefahr, daß die nach Versuchsbeginn sich einstellenden Peaks der Leitfähigkeitsanomalien verwischen und zu falschen Interpretationen verleiten.

Bewertung

Der Einsatz des Fluid-Logging-Verfahrens ist noch relativ neu. Es befindet sich jedoch in manchen Bereichen z.B. bei Tiefbohrungen bereits in der Anwendungsphase. Vom Aufwand her ist das Verfahren nach momentanem Kenntnisstand nur bei speziellen Fragestellungen, vor allem in Kluftgrundwasserleitern, einzusetzen. Es wurde z.B. in der Schweiz für die Untersuchung von Endlagern radioaktiver Stoffe im kristallinen Gebirge mit Erfolg angewendet. Weiterhin wurde die Methode erfolgreich in Tonsteinen (Baden-Württemberg) und bei der Kontinentalen Tiefbohrung (Windisch-Eschenbach) angewandt. Zur Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit von Fluid-Logging-Ergebnissen, sollten diese mit einer umfangreichen Dokumentation versehen sein. Diese sollten aufweisen :

- Rahmendaten und Eckwerte der Bohrung (Profilaufnahme, Wasserspiegellage etc.)
- Graphische Darstellung der Temperatur/Leitfähigkeits-Messungen
- Ausführliche Darstellung des Verfahrensgangs der qualitativen und/oder quantitativen Auswertung

Literatur

NAGRA (1989) :

Schriftenreihe Nagra informiert, Nummer 34.4 Ch 5401 Baden,

COOPER, H.H. & JACOB, C.E. (1964):

A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. Am. Geoph. Union 27: S. 526 - 534, 5 Abb., 1 Tab. ; Richmond, Va.

4.7 Tracerversuch

Theorie und Auswertung

Neben den häufigen rein qualitativen Anwendungen, wie z.B. der Erkundung von Fließwegen und Fließzeiten des Grundwassers, werden Tracer-Methoden untergeordnet auch zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit herangezogen. Dies kann in einem Aquifer mit Einspeisungs- und Entnahmemöglichkeit, oder aber während eines Pumpenversuchs geschehen.

Hierbei kann die Beziehung zwischen dem während eines Pumpversuchs entnommenen Wasservolumen, dem effektiven Porenvolumen und dem Abstand der Einspeisungsstelle vom Pumpbrunnen zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden. Bei bekannten Mächtigkeiten und Porenvolumina eines geschichteten Aquifers lassen sich bei Kenntnis der Gesamttransmissivität der Gebirgsstrecke Einzeltransmissivitäten von Schichtgliedern ermitteln. Für einen zweischichtigen Grundwasserleiter gilt:

$$V_1 = \pi s_1^2 M_1^2 n_{o1} \cdot \frac{T}{T_1}$$

$$V_2 = \pi s_2^2 M_2^2 n_{o2} \cdot \frac{T}{T_2}$$

Als Tracer kommen in Abhängigkeit von den Versuchs- und Untergrundbedingungen die verschiedensten Substanzen zur Anwendung. Hier sind als wichtigste Klassen zu nennen:

- Farbstoffe
- radioaktive Isotope (u.U. Erlaubnis problematisch)
- Sporen und Pollen

Anwendungsmöglichkeit

Tracerversuche zur indirekten Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit können dort eingesetzt werden, wo Beobachtungspegel in nicht zu großem Abstand von einem Förderbrunnen oder anderen Wasserfassungen vorhanden sind. Außerdem müssen bestimmte Aquiferkennwerte wie z.B. das effektive Porenvolumen bekannt sein. Tracerversuche bieten sich für vertiefende Untersuchungen an, wenn die Gebirgsdurchlässigkeiten nicht zu gering sind (Zeitfaktor).

Durchführung und Meßwerterfassung

Ein Pumpversuch wird an einem Brunnen bei konstanter Förderleistung bis zur Beharrung gefahren. Der Pumpversuch sollte so durchgeführt werden, daß mit ihm direkt die Transmissivität des Aquifers bestimmt werden kann. In einer oder auch mehreren Beobachtungsmeßstellen, die in unterschiedlichen Teilen des (geschichteten) Aquifers verfiltert sind, werden nacheinander verschiedene Tracer eingebracht und ihre Ankunft im Förderbrunnen beobachtet. Dies geschieht mit Hilfe von in angemessenen zeitlichen Abständen entnommenen Proben, die auf das Vorhandensein des Tracers getestet werden.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Da die Tracereingabe im o.g. Anwendungsfall erst nach Erreichen des Beharrungszustandes erfolgt, ist mit einer Pumpzeit von Tagen bis Wochen zu rechnen. Hinsichtlich der Kosten sei hier auf das Kap. 4.1 verwiesen.

Die Kosten für einen geeigneten Tracer liegen zwischen ca. wenigen Zehn und mehreren Hundert DM/kg. Die Kosten für radioaktive Tracer können auch wesentlich höher liegen.

Ein weiterer gewichtiger Kostenfaktor liegt in den zahlreichen Analysen, die bei Auftreten der ersten Tracerspuren im Wasser zeitlich verdichtet werden.

Versuchsproblematik

Die Wahl eines geeigneten Tracers erfordert die genaue Kenntnis seines Verhaltens im Untergrund. So werden unterschiedliche Tracer auch in verschiedener Weise retardiert und dispergiert, so daß bei Unkenntnis dieses Sachverhalts durchaus falsche Versuchsergebnisse ermittelt werden können. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, im Rahmen der Planung eines Versuchs die wahrscheinlichen Fließzeiten des Tracers abzuschätzen. Hierdurch wird vermieden, daß zu viele Analysen vor Ankunft des Tracers an der Teststelle vorgenommen werden.

Bewertung

Die Schwerpunkte von Traceruntersuchungen liegen bei der direkten Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und bei der Untersuchung komplexer Fließwege und -vorgänge im Untergrund (z.B. Karst), der Ermittlung von Dispersion und Retardation etc. sowie in der Bestimmung von Gebirgsdurchlässigkeiten. Ein bedeutender Vorteil ist in der zum Teil sehr großen Reichweite des Verfahrens zu sehen.

Die Ermittlung von Teildurchlässigkeiten des Gebirges anhand von Tracerversuchen ist verhältnismäßig aufwendig, so daß sich das Verfahren auch nur eingeschränkt bei vertiefenden Untersuchungen hierzu anbietet. Außerdem müssen günstige Verhältnisse hinsichtlich der Anordnung des Meßstellennetzes gegeben sein. Die Beschreibung eines Tracerversuchs aus dem Gebirgsdurchlässigkeiten abgeleitet werden, sollte mindestens folgendes enthalten:

- Rahmenbedingungen (Beschreibung der Meßstellen und des Aquifers, Wasserspiegellagen, Fördermengen, Art des Tracers etc.)
- Darstellung der Versuchsdurchführung in tabellarischer und graphischer Form
- Darstellung der Versuchsauswertung und -ergebnisse in nachvollziehbarer Form.

Literatur zur Einführung

DEUTSCHE GEOLOGISCHE GESELLSCHAFT (1972) :
Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 2.

HÖLTING, B. (1980/1984):
Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, F. Enke Verlag, Stuttgart.

Literatur zur Vertiefung

DROST, W. (1971):
Grundwassermessungen mit radioaktiven Isotopen. Geologica Bavarica, 64, München.

DROST, W.; MOSER, H.; NEUMAIER, F. & RAUERT, W. (1972):
Isotopenmethoden in der Grundwasserkunde. EURISOTOP. Ser.Monogr., 16, H. 61, Brüssel.

DROST, W; KLOTZ, D. (1988):
Tracermethoden zur Bestimmung der Fließparameter des Grundwassers.

GSF-Bericht 9/88 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.

KÄSS, W. (1967a) :
Erfahrungen mit Uranin bei Färbeversuchen, Steir. Beitr. Hydrogeol., N.F., Jg 1966/67, Graz.

KLOTZ, D.; RAUERT, W.; SEILER, K.P. (1982) :
Beiträge über hydrologische Tracermethoden und ihre Anwendungen Institut für Radiohydro-
metrie, GSF-Bericht R 290 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München.

LANGGUTH, H.R. & R. VOIGT (1980)
Hydrogeologische Methoden; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

MOSER, H. (1980) :
Traceruntersuchungen in Hydrogeologie und Hydrologie, GSF-Bericht R 250; Gesellschaft für
Strahlen- und Umweltforschung mbH, München

4.8 Direkte Durchlässigkeitsbestimmung an Bodenproben (Permeameterversuche)

Theorie und Auswertung

Den Permeameterversuchen im Labor liegt das Fließgesetz von Darcy zugrunde.

$$k = \frac{Q}{i * F}$$

Ein definiertes Probenvolumen wird in eine Apparatur eingebracht, die die Messung der Durchflußmengen und der Drücke (Wasserstände) vor und hinter der Probe erlaubt. Normalerweise wird der Versuch auf 10°C Wassertemperatur umgerechnet. Somit ergibt sich für Versuche bei konstanter Druckhöhe

$$K_{10} = \frac{Q}{\Delta H} * \frac{\Delta l}{F} * \frac{t}{V_{10}}$$

und bei variabler Druckhöhe

$$k_{10} = \frac{f}{F} * \frac{l}{t} * 2,303 * \lg \left[\frac{h_{01}}{h_2} \right] * \frac{\dot{V}_t}{V_{10}}$$

Der prinzipielle Aufbau von Permeametern ist in Abb. 13 dargestellt.

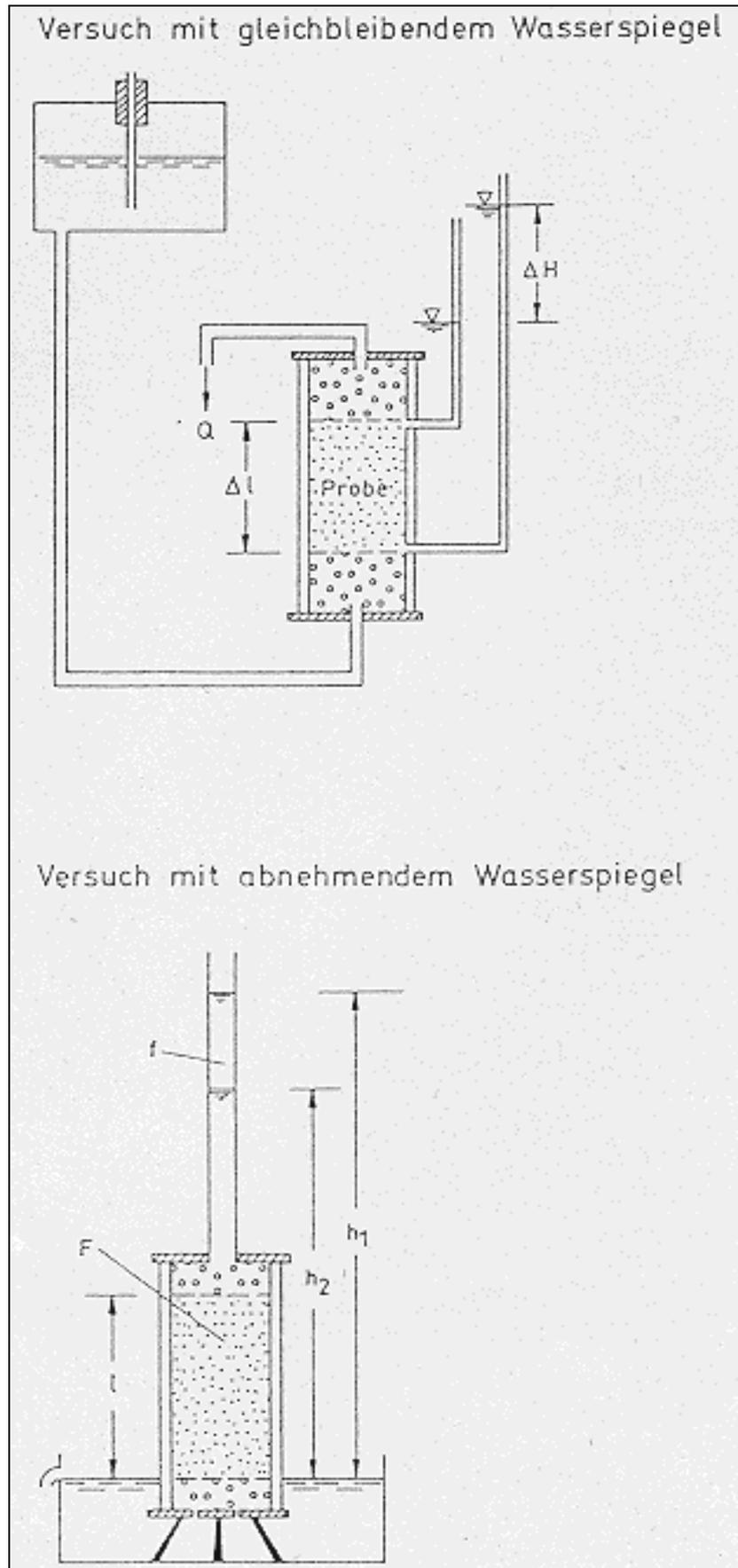


Abb. 13 : Prinzipieller Aufbau von Permeametern zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

Anwendungsbereiche

Permeameterversuche können überall dort eingesetzt werden, wo gestörtes oder ungestörtes Probenmaterial von Lockergesteinen oder auch in untergeordnetem Maße von Halbfest- und Festgesteinen zur Verfügung steht. Aufgrund der unterschiedlichen Versuchs- und Durchführungstechniken kann mit ihnen ein großer Gebirgsdurchlässigkeitsbereich (10^{-2} bis 10^{-11} m/s) abgedeckt werden. Sie eignen sich für schnelle regional orientierende, aber auch für vertiefende Untersuchungen (vertikale Verteilung von Durchlässigkeiten) in Kombination mit anderen Verfahren, z.B. Pumpversuchen.

Durchführung und Meßwerterfassung

Permeameteruntersuchungen können an gestörten oder ungestörten Bodenproben durchgeführt werden. Gestörte Bodenproben werden vor ihrem Einbau in das Gerät durch Rüttler verdichtet. Bei der Verwendung ungestörter Probenkörper ist der Entnahme selbiger erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen. Ein Stechzylinder wird, je nach den örtlichen Gegebenheiten und der zu bestimmenden Komponente des k-Werts (xy-Richtung, z-Richtung) horizontal oder vertikal in den Boden eingerammt. Anschließend wird er freigegeben, die Probe mit Stechzylinder vorsichtig entnommen und allseitig verschlossen.

Beim Einbau des Zylinders in das Permeameter ist mit gleicher Sorgfalt vorzugehen wie bei der Probennahme. Die Proben werden langsam von unten nach oben mit entgastem Wasser gesättigt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, gut bis sehr gut durchlässige Materialien bei gleichbleibendem Wasserspiegel zu untersuchen und weniger gut durchlässige Proben bei abnehmendem Wasserspiegel. Die in der Abb. 13 angegebenen Parameter werden gemessen und gehen in die o.a. Formeln zur Berechnung der Durchlässigkeit ein. Dabei sind mit jeder Probe mehrere Versuche durchzuführen. Der höchste ermittelte k-Wert dürfte dann der größten Wassersättigung der Probe entsprechen und wird weiterverwendet.

Mit Hilfe der sogenannten Vollvergußmethode können Durchlässigkeitsbestimmungen an bindigen Bodenproben im Labor vorgenommen werden. Das Verfahren wurde von HEITFELD, OLZEM und STOLPE entwickelt.

Hierbei wird eine allseitig in Spezialzement eingebettete und anschließend von Harz umschlossene Bodenprobe, an deren oberen und unteren Ende dünne Filterkörper mit eingegossen sind, von unten nach oben durchströmt. Der Spezialzement schließt Randströmungen (zwischen Probe und Einbettungswandung) mit großer Sicherheit aus.

Die Proben müssen zur Versuchsdurchführung aufbereitet werden. Sie sind mit einem Messer in etwa auf 5 cm Probendurchmesser und auf etwa 2 cm Probenhöhe zurechtzuschneiden. Das genaue Einhalten der Bemessung ist nicht erforderlich, so daß die Proben weder gedrückt noch aufgelockert werden müssen und weitestgehend ungestört bleiben.

Bei entsprechender Größe des vor Ort entnommenen, ungestörten Probestückes (meist aus Bohrkern) kann theoretisch je nach Einbau sowohl die vertikale wie auch die horizontale Durchlässigkeit ermittelt werden. In der Praxis hat es sich aber gezeigt, daß bei den gängigen Kernbohrdurchmessern die Probenbearbeitung zur Bestimmung der vertikalen Durchlässigkeit einfacher zu handhaben ist.

Aus obigen Ausführungen geht hervor, daß die Versuche nur an Proben durchgeführt werden können, die sich gut bis gerade noch schneiden lassen (steif-halbfest). Proben mit zu hohem Sandanteil oder z.B. halbfeste Proben mit eingelagerten festen Bestandteilen lassen sich zur Versuchsdurchführung nicht aufbereiten.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Durchlässigkeiten an gestörten oder ungestörten Bodenproben besteht in der Verwendung einer Triaxialzelle, wie sie normalerweise zur Ermittlung bodenmechanischer Kennwerte verwandt wird. Hierbei wird die Probe nach Glättung oben und unten mit einem Filterstein und seitlich mit einer dichten Gummihaut versehen. Über bzw. unter den Filtersteinen folgen die Zuleitungen für das durchströmende Wasser. Nach Einbau in die Zelle wird diese mit Flüssigkeit (meistens Wasser) gefüllt und unter Druck gesetzt. Die eigentliche Versuchsdurchführung erfolgt wie bei den o.g. Permeameterversuchen.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Permeameteruntersuchungen sind relativ kostengünstige Verfahren zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit. Je nachdem, ob mit gestörten oder ungestörten Bodenproben gearbeitet werden soll, ist die Probennahme und die Sorgfalt beim Transport mehr oder weniger aufwendig. Für die eigentliche Untersuchung muß ein Permeameter geeigneter Bauart zur Verfügung stehen sowie eine geeignete Stätte zur Probenbearbeitung und Versuchsdurchführung. Danach sind die Kosten für eine Untersuchung mit ca. 250-900 DM anzugeben.

Versuchsproblematik

Bei Durchlässigkeitsuntersuchungen an gestörten oder ungestörten Proben treten folgende Schwierigkeiten auf :

- Verlust von Feinkornanteil bei der Probennahme (dieser ist für die Durchlässigkeit entscheidend).
- Veränderung der Packungsdichte des Korngemisches
- Entmischungen in der Versuchsanordnung
- Umläufigkeiten in der Versuchsanordnung (Besonders bei gering durchlässigen Proben)
- Veränderung des Korngefüges bei der Probennahme

Bewertung

Mit Permeameteruntersuchungen lassen sich in vielen Fällen rasche und kostengünstige, manchmal aber nur orientierende Bestimmungswerte für die Gesteinsdurchlässigkeit erzielen. Ein Nachteil liegt jedoch darin begründet, daß die Verfahren aufgrund des kleinen Probenvolumens bei heterogenen Gebirgsverbänden keine weiträumig repräsentativen Werte liefern.

Im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit und Bewertbarkeit sollten einer Permeameteruntersuchung immer die folgenden Daten beigelegt werden.

- Rahmenbedingungen (Schichtbeschreibung, Ort und Art der Probennahme, Versuchsart)
- Darstellung der Meßwerte

- Darstellung der Versuchsdurchführung
- Darstellung des Auswerteverfahrens.

Literatur

JOHNSON, A.I., PRILL, R.C. und MORRIS, D.A. (1963):

Specificyield - Column Drainage und centrifuge moisture content. Survey Water- Supply Paper 1662-A, 60 S., 36 Abb. 9 Tab., Washington D.C.

MÖLLER, H.-W. (1972):

Durchlässigkeiten von Lockergesteinen. Schriftenreihe Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 36, 49 S, 18 Abb., Guntar Fischer Verlag, Stuttgart

MORRIS, D.A. und JOHNSON, A.I. (1967):

Summary of hydrologic und physical properties of rock and soil materials, as analysed by the Hydrologic Laboratory of the U.S Geological Survey 1948 - 1960. Geol. Survey Water-Supply Paper 1839-D, 42 S., 13 Abb., 12 Tab., Washington D.C.

SCHULTZE, E. u. MUHS, H. (1967):

Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, 2. Aufl., 722 S., 782 Abb., 83 Tab., 1 Tafel, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York

4.9 Korngrößenanalysen

Theorie und Auswertung

Ein weiteres Laborverfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit ist die Auswertung von Korngrößenanalysen. Dessen liegt die empirische Erfahrung und auch die theoretische Herleitung zugrunde, daß der Feinanteil und die Ungleichförmigkeit eines Korngemisches entscheidend seine Durchlässigkeit bestimmt. Entsprechende Umrechnungsformel wurden von mehreren Autoren veröffentlicht:

Die von HAZEN aufgestellte Formel setzt $d_w \approx d_{10}$ voraus.

$$K = 0,0116 d_{10}^2 (0,70 + 0,03 t)$$

nach ZIESCHANG ergibt sich

$$K = C d_{10}^2 (0,70 + 0,03 t)$$

wobei C ein empirischer Beiwert ist, der vom lithologischen Aufbau und von der Ungleichförmigkeit (d_{60}/d_{10}) abhängt. Eine etwas aufwendigere Methode ist die von KOZENEY/KÖHLER:

mit

$$K = C d_w^2 = \frac{\tau}{r} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \frac{\epsilon^3}{1 + \epsilon} d_w^2$$

und

$$\frac{1}{d_w} = \frac{\sum \frac{1}{d_i} \Delta G_i}{\sum \Delta G_i}$$

Von diesen wird das Porenvolumen, der Rauigkeitsgrad der Körner und die kinematische Zähigkeit des Wassers mit berücksichtigt. Außerdem wird der wirksame Korndurchmesser d_w anhand der gesamten Sieblinie ermittelt.

Eine weitere häufig verwandte Methode zur Bestimmung der Durchlässigkeiten ist das Verfahren nach Beyer, dem die Gleichsetzung von d_w mit d_{10} sowie die Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit zugrunde liegt.

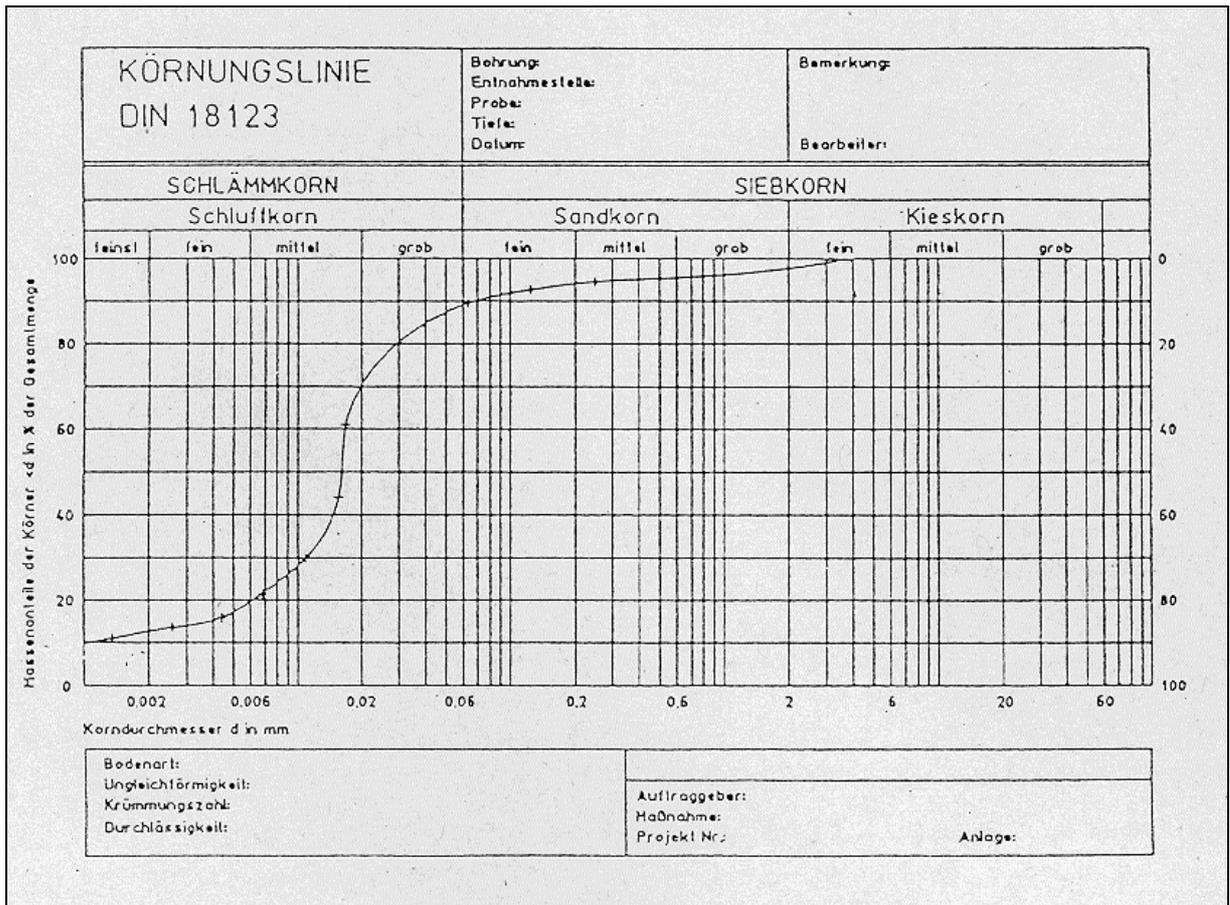


Abb. 14 : Körnungslinie nach DIN 18123

Die aus der Körnungslinie abgegriffenen Werte gehen in die oben beschriebenen Berechnungsverfahren ein.

Anwendungsmöglichkeiten

Korngrößenanalysen werden zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit von Korngemischen verwendet. Wegen der empirischen Auswertungsmethodik ist der abgedeckte Bereich an Durchlässigkeiten (10^{-3} - 10^{-5} m/s) relativ klein.

Man benutzt die Methodik gerne, um ein dichtes Raster orientierender Werte sowohl in regionaler als auch teufenbezogener Hinsicht zu bekommen.

Durchführung und Meßwerterfassung

Grundlage der o.g. Auswerteverfahren ist die Kenntnis der Korngrößenverteilung eines Sediments. Diese wird durch Sieben und Schlämmen ermittelt.

Bei der Probennahme im Gelände ist darauf zu achten, daß keine Entmischungsvorgänge, die zum Verlust von Feinkornanteil führen könnten, auftreten. In einem bodenmechanischen Labor wird der prozentuale Anteil der einzelnen Korngrößen bestimmt und als kumulative Kurve im semilogarithmischen Koordinatensystem dargestellt (Abb. 14).

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Die Versuche werden an gestört entnommenen Bodenproben vorgenommen. Zur Durchführung der Siebung und Schlämmung muß ein entsprechend ausgerüstetes Labor zur Verfügung stehen. Die Kosten für eine Sieb/Schlämmanalyse können mit ca. 100,00 - 250,00 DM beziffert werden.

Versuchsproblematik

Bei der Probennahme und den Arbeiten im Labor können Entmischungen auftreten. Dies betrifft vor allem den die Durchlässigkeit bestimmenden Feinkornanteil.

Die Auswerteverfahren gelten nur für relativ enge Durchlässigkeits- und Kornverteilungsbe-reiche.

Da aus Kornverteilungskurven ermittelte k-Werte von den mittels z.B. von Pumpversuchen ermittelten Werten abweichen können, sollte vor dem umfangreichen Einsatz von Siebanalysen ein Vergleich verschiedener Methoden stattfinden (Kalibrierung).

Bewertung

Korngrößenanalysen können kostengünstig und rasch orientierende Werte der Gebirgsdurchlässigkeit liefern. Deshalb ist das Verfahren bei vertiefenden Untersuchungen nur in Kombi-nation mit anderen Methoden anwendbar, wenn höhere Genauigkeiten gefordert sind. Bei he-terogenen Gebirgsverhältnissen lassen sich aus wenigen Proben keine repräsentativen Ergeb-nisse erzielen.

Einer Korngrößenanalyse sollten folgende Unterlagen beigelegt werden:

- Rahmendaten (Ort der Probennahme, Gesteinsansprache, angewandtes Verfahren etc.)
- Darstellung aller Meßergebnisse in tabellarischer Form sowie der Körnungslinie in ei-nem geeigneten Diagramm.
- Darstellung des zur Bestimmung der Durchlässigkeit angewandten Verfahrens mit Be-nennung der einschränkenden Anwendungsvoraussetzungen in nachvollziehbarer Form.

Literatur

BIESKE, E. sen. (1968):

Nold - Brunnenfilterbuch 4. Aufl., 303 S., 297 Abb., Nold & Co. Stockstadt/Rhein

HAZEN, A. (1892):

Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. Twenty-fourth annual report state board of health Mass. S. 541-556, 4 Abb., 7 Tab.; Boston Mass.

HÜTTE (1951):

Des Ingenieurs Taschenbuch 3, 27. Aufl., 1304 S. Wilhelm-Ernet & Sohn, Berlin

KANZ, W. (1977):

Das Talgrundwasser des Maintals im Grenzbereich Muschelkalk-Buntsandstein. Hydrogeologie und Beschaffenheit.

KÖHLER, H.P. (1965):

Ein kombiniertes Verfahren zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Sand- und Kiesgemischen für Wasser aus Siebproben. Bergbautechnik 15, S. 338-342, 4 Abb., Freiburg

PEKDEGER, A. u. SCHULZ, H. D. (1975):

Ein Methodenvergleich des k_f -Wertes von Sonden, Meyniana 27, 35-40, 2 Abb., Kiel

SKABALLANOWTSCH, i.a. (1945):

Hydrogeologische Berechnungen über die Dynamik der Grundwässer (russ.), Moskau (Gosgortechisdat)

ZIESCHANG, J. (1961):

Zur zulässigen Höchstbelastung eines Brunnens. Z. Angew. Geologie 7: S 580-582, 1 Abb, 2 Tab.; Berlin

4.10 Strömungsnetzanalyse

Theorie und Auswertung

Ein Strömungsnetz entsteht aus einem Grundwassergleichenplan durch Ergänzung von Stromlinien in geeigneten Abständen. Ist die zwischen zwei oder mehreren Stromlinien fließende Wassermenge bekannt, so läßt sich die Transmissivität des Gebirges folgendermaßen berechnen.

Zwischen 2 Stromlinien:

$$T = \frac{Q}{i * b}$$

Zwischen n_f Stromlinien:

$$T = \frac{1}{n_f} * \frac{Q}{\Delta h}$$

Voraussetzung für die Anwendung einer Strömungsnetzanalyse bei der Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit ist

- Die Strömung ist stationär
- Das poröse Medium ist zunächst bereichsweise homogen
- Das Wasser besitzt konstante Dichte und Viskosität
- Es gilt das Gesetz von Darcy

Anwendungsmöglichkeiten

Strömungsnetzanalysen können aufgrund der starken Anisotropien in Kluftgrundwasserleitern eigentlich nur in Porengrundwasserleitern angewandt werden, wenn ein hinreichend dichtes Meßstellennetz zur Verfügung steht und zumindest bereichsweise die abfließenden Wassermengen bekannt sind. In diesem Fall können dann regionale Betrachtungen zur Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeiten angestellt werden.

Durchführung und Meßwerterfassung

Die Wasserstände einer ausreichenden Anzahl von Grundwassermeßstellen müssen zu einem Zeitpunkt ermittelt werden, für den ein stationäres Fließregime angenommen werden kann. Weiterhin muß die Wassermenge, die das vom Strömungsnetz erfaßte Gebiet durchströmt, bekannt sein. Dies kann z.B. die Fördermenge eines oder mehrerer Brunnen oder aber auch die einem Fluß auf einem begrenzten Abschnitt zufließende Wassermenge sein.

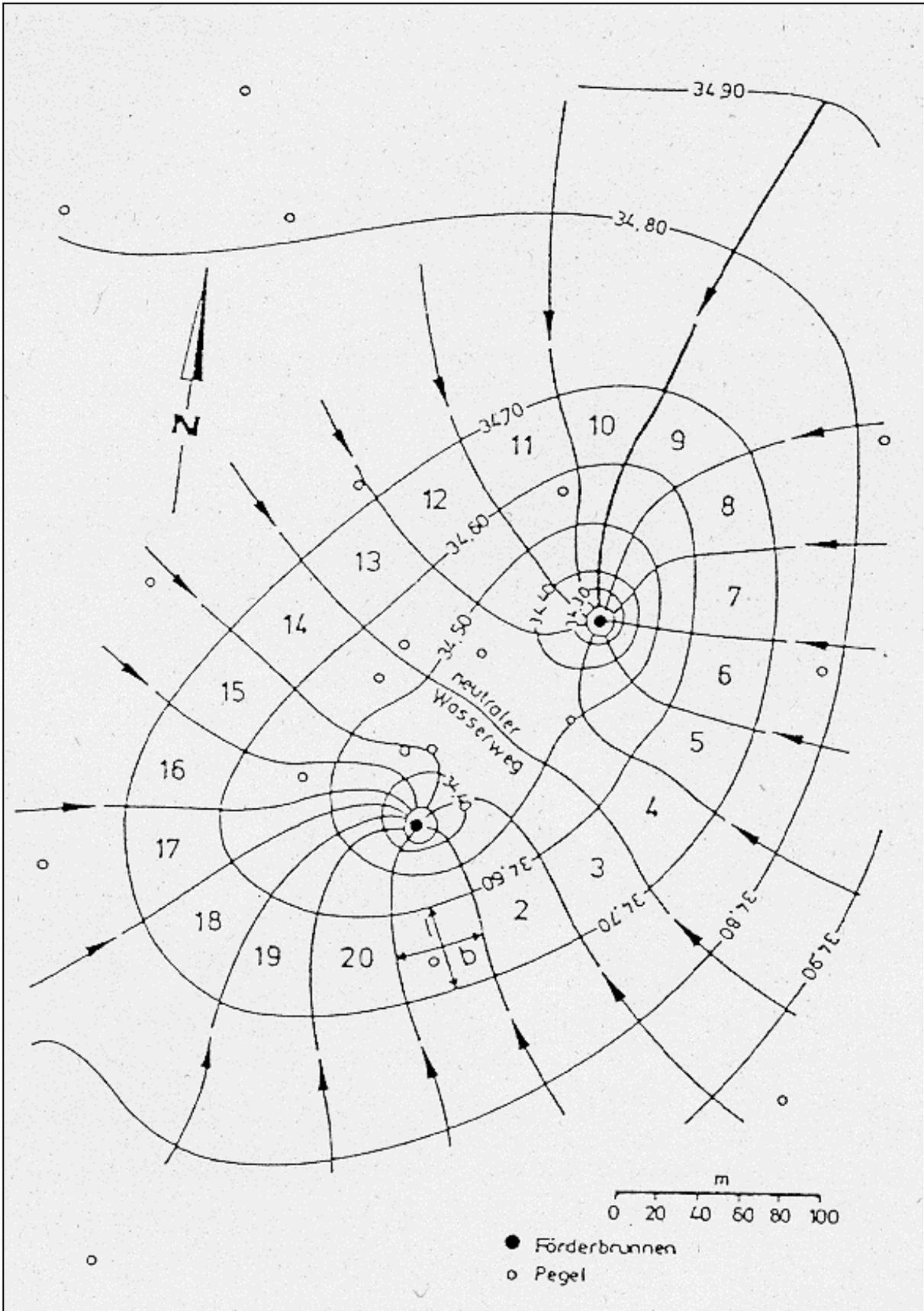


Abb. 15: Strömungsnetz in der Nähe von 2 Förderbrunnen

In Abb. 15 ist ein Beispiel für das Strömungsnetz in der Nähe von 2 Förderbrunnen gegeben. Ausgehend von einem sorgfältig konstruierten Grundwassergleichenplan werden in diesen Stromlinien hineinkonstruiert. Diese müssen die Äquipotentiallinien senkrecht schneiden und mit diesen ein Netz von Quadraten ergeben. Dies gilt selbstverständlich nur für den isotropen Leiter. Im anisotropen Leiter sind die Verhältnisse komplizierter.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Die Erstellung eines Strömungsnetzes erfordert die Messung von Grundwasserständen an möglichst vielen Pegeln, ggf. von Entnahme- oder Abflußmengen.

Die eigentliche Erstellung und Auswertung eines Strömungsnetzes durch den Fachmann kostet je nach Pegelanzahl und Gebietsgröße ab etwa 1 000,00 DM.

Versuchsproblematik

Die Qualität der mit einer Strömungsnetzanalyse ermittelten Durchlässigkeitswerte hängt in hohem Maße von der Dichte des Meßstellennetzes und der Homogenität oder Heterogenität des untersuchten Aquifers ab. Die einen bestimmten Aquiferteil durchströmenden Wassermengen lassen sich meist nur im Falle von Förderbrunnen mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

Bewertung

Für den eigentlich seltenen Fall eines dichten Meßstellennetzes und eines nicht zu heterogenen Aquifers kann eine Strömungsnetzanalyse durchaus brauchbare Resultate zur Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeiten und zur Dokumentation der regionalen Fließverhältnisse liefern. Das Verfahren läßt sich aber meist nur orientierend und/oder für weiträumigere Überlegungen einsetzen. Sehr genaue Werte können in der Regel nicht ermittelt werden. Ausnahmefälle bilden manchmal Brunnengalerien großer Wasserwerke etc.

Literatur

LANGUTH, H.R. & VOIGT (1980):

Hydrogeologische Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

4.11 Gezeitenanalyse

Theorie und Auswertung

Steht ein gespannter Aquifer in hydraulischem Kontakt zu einem gezeitenbeeinflussten Oberflächengewässer, so pflanzen sich dessen Schwankungen räumlich gedämpft und phasenverschoben in den Aquifer hinein fort.

Die Lösung der diesem Fließverhalten zugrundeliegenden Differentialgleichung:

$$\frac{\delta^2 s}{\delta x^2} = \frac{S}{T} * \frac{\delta s}{\delta t}$$

führt zu unterschiedlichen Geradenlinienfahnen, bei denen einerseits die Schwankungsbreite verschiedener Beobachtungspegel hinsichtlich ihres Abstands zum Vorfluter und andererseits die Phasenverschiebung hinsichtlich des Abstands zum Vorfluter ausgewertet wird.

Theoretische Randbedingungen für die Anwendung des Verfahrens sind:

- Der Aquifer besitzt unendliche Ausdehnung bei konstanter Mächtigkeit.
- Das Wasser wird bei fallendem Wasserspiegel im Vorfluter unverzüglich aus dem Vorrat des Aquifers entlassen.

Die Strömung ist eindimensional und der Vorfluter begrenzt den Aquifer über dessen gesamte Mächtigkeit

Für Aquifere mit freier Grundwasseroberfläche gelten die Erweiterungen :

- Die beobachteten Pegel sind so weit vom Kontakt zum Vorfluter entfernt, daß eine vertikale Strömungskomponente ausgeschlossen werden kann.
- Die Amplitude der Grundwasserschwingung macht nur einen Bruchteil der grundwassererfüllten Mächtigkeit des Aquifers aus.

Anwendungsmöglichkeiten

Eine Auswertung von Gezeiteneinflüssen kann grundsätzlich nur in Meeresnähe mit ausreichendem Gezeitenhub durchgeführt werden. Weiterhin müssen mehrere Beobachtungspegel zur Verfügung stehen und die o.g. Randbedingungen dürfen nicht wesentlich verletzt werden.

Durchführung und Meßwerterfassung

Zur Anwendung der Methode sind prinzipiell die Minimal- und Maximalbeträge der Wasserspiegellagen des zu untersuchenden Aquifers und des mit ihm in Verbindung stehenden Oberflächengewässers zu messen. Wird zur Auswertung ein Verfahren herangezogen, das die Phasenverschiebung berücksichtigt, so ist die Verwendung von automatischen Pegelschreibern zu empfehlen.

Technischer und wirtschaftlicher Aufwand

Die Methode ist relativ wenig aufwendig. Es genügt, während mindestens eines Gezeiteneignisses die Wasserstände am Beobachtungspiegel und Oberflächengewässer entweder in regelmäßigen Abständen mittels eines Lichtlotes oder Pegelschreibers zu messen. Zur Auswertung der Daten sollte ein Fachmann zu Rate gezogen werden.

Versuchsproblematik

Sofern die zur Versuchsauswertung notwendigen Rahmenbedingungen gegeben sind, ist die Methode als wenig problematisch anzusehen. Ein Vorteil liegt darin begründet, daß die Versuche jederzeit wiederholt werden können.

Bewertung

Die Auswertung von Gezeiteneinflüssen wird sehr selten angewandt, da die Rahmenbedingungen hierfür meist nicht gegeben sind. Da der Speicherkoeffizient als Schätzung in die Berechnung eingeht, ist mit höheren Schwankungen bei den ermittelten Durchlässigkeiten zu rechnen.

Literatur

Handbuch der Hydrogeologie:

2. Aufl. : 422 S., 334 Abb. Tab. J. Springer Verlag, Berlin

FERRIS, J.G. (1963):

Cyclic water-level fluctuations as basis for determining aquifer transmissibility. In: BENTALL, R. comp.(1963): Methods of determining aquifer transmissivity and drawdown. Geol. Survey Water-Supply Paper 1536-I: S 305-318, 5 Abb., 3Tab. Washington D.C.

III Anhang

5 Grundlegende Begriffe

In diesem Kapitel werden die wichtigsten, in der Geohydraulik verwendeten **Begriffe** kurz erklärt, so daß auf diese in den einzelnen Kapiteln zu den Methoden der Bestimmung von Durchlässigkeiten nicht mehr näher eingegangen wird.

Durchlässigkeitswert k [m/s] oder k_f [m/s]

Dieser für die meisten geohydraulischen Berechnungen unentbehrliche Wert ist ein Maß für die hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins. Er wird auf eine definierte Durchtrittsfläche und den hydraulischen Gradienten bezogen.

$$Q = i_o * A * k \quad ; \quad k = \frac{Q}{i_o * A}$$

Q = Durchflußmenge [m³/s]

i_o = hydraulischer Gradient [-]

A = Durchtrittsfläche [m²]

Sprachregelung für den Durchlässigkeitsbegriff

Die Durchlässigkeit des Untergrundes kann exakt mit Zahlenwerten beschrieben werden (z.B. über den k -Wert, vgl. oben) . Die sprachliche Regelung ist bislang in der Fachliteratur nicht einheitlich. Nach DIN 18130, die etwas älter ist und ursprünglich mehr auf felsbauliche Gegebenheiten abzielt lautet sie:

k_f (alte Bezeichnung) [m/s]	qualitative Bewertung
$< 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig
über 10^{-8} bis 10^{-6}	schwach durchlässig
über 10^{-6} bis 10^{-4}	durchlässig
über 10^{-4} bis 10^{-2}	stark durchlässig
$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig

Nach der bundesweit in entsprechenden Problemfällen anerkannten Nordrhein-Westfalen-Richtlinie, die mehr auf deponietechnische Fragestellungen ausgelegt ist, lautet die Sprachregelung:

k_f (alte Bezeichnung) [m/s]	qualitative Bewertung
$< 10^{-9}$	sehr schwach durchlässig
über 10^{-9} bis 10^{-7}	schwach durchlässig
über 10^{-7} bis 10^{-4}	durchlässig
über 10^{-4} bis 10^{-2}	stark durchlässig
$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig

Transmissivität T [m²/s]

Dieser ebenfalls für viele geohydraulische Berechnungen erforderliche Wert bezeichnet das Wasserleitvermögen eines Gesteins bezogen auf die Breite und den hydraulischen Gradienten. Die Transmissivität stellt das Integral der Durchlässigkeit über die Grundwassermächtigkeit dar und wird Inhomogenitäten im Gebirge eher gerecht als der k_f -Wert einzelner Aquiferbereiche.

$$Q = i_o * b * T ; \quad T = \frac{Q}{i_o * b}$$

Q = Durchflußmenge [m³/s]

i_o = hydraulischer Gradient [-]

b = Breite der Durchtrittsfläche [m]

Speicherkoeffizient S [-]

Der dimensionslose Wert ist ein Maß für die Wassermenge, die einem Aquifersegment von 1 m² Grundfläche bei Senkung des Wasserspiegels um 1 m entnommen werden kann. Bei ungespannten Grundwasserleitern ist der Speicherkoeffizient mit dem nutzbaren Porenvolumen identisch.

In gespannten Grundwasserleitern erfolgt bei Entnahme einzig eine Dekompression des Wassers und eine Deformation des Korngerüsts (keine Vorratsentnahme). Dementsprechend niedrig sind die Speicherkoeffizienten gespannter Aquifere (10^{-3} - 10^{-6}).

Neben speziellen Berechnungen gestattet die Kenntnis der Größenordnung des Speicherkoeffizienten dem Hydrogeologen die Überprüfung seiner Aquiferbeurteilung und die Abschätzung der Wirkung hydraulischer Eingriffe.

hydraulischer Gradient i_o [-]

Der dimensionslose Wert wird z.B. zur Berechnung von realen Grundwasserfließgeschwindigkeiten benötigt und beschreibt den Wasserspiegelunterschied zweier Punkte oder Grundwassermeßstellen eines Aquifers bezogen auf ihre Entfernung voneinander.

$$i_o = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [-]$$

mit

Δh = Wasserspiegelunterschied

Δl = Entfernung

Der hydraulische Gradient ist durch Größe und Richtung festgelegt (Vektorgröße). Zur Richtungsbestimmung sind daher mindestens drei punktuelle Angaben des Grundwasserstands erforderlich (hydrogeologisches Dreieck). Eine Angabe des hydraulischen Gradienten ist nur parallel zur Grundwasserfließrichtung bzw. senkrecht zu den Potentiallinien (Grundwassergleichen) sinnvoll. Natürliche Grundwasseroberflächen besitzen u.a. in Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit einen Gradienten von wenigen Promille bis zu einigen Prozent.

nutzbares Porenvolumen n_o [-] (effektives Porenvolumen)

Der dimensionslose Wert wird z.B. zur Berechnung von realen Grundwasserfließgeschwindigkeiten benötigt und bezeichnet den Anteil des gesamten Porenvolumens, der für Fließvorgänge im wassergesättigten Medium zur Verfügung steht.

$$n_o = \frac{V_w}{V_{Pr}} [-]$$

mit

V_w = Volumen des ausgeflossenen Wassers

V_{Pr} = Gesamtvolumen der Probe

n_o wird in %/100 definitionsgemäß zwischen 0 und 1 angegeben (10% entspricht 0,10). Im Lockersedimenten liegt n_o erfahrungsgemäß zwischen 0,10 und 0,40. Das nutzbare Porenvolumen der Fest- und Halbfestgesteine ist meistens geringer und bezieht sich immer auf größere Gebirgsvolumina als bei den Lockergesteinen

Grundwassergleichen

Auf die Kartenebene projizierte Linien gleicher Grundwasserstände in einem Aquifer.

Aus den Abständen und der Lage der Grundwassergleichen kann i_o errechnet und die Grundwasserfließrichtung ermittelt werden.

Grundwasserstromlinien

Auf die Kartenebene projizierte Linien, denen die Wasserteilchen in einem Aquifer unter dem Einfluß des natürlichen Gefälles folgen

Grundwasserstromlinien verlaufen im isotropen Aquifer stets senkrecht zu den Grundwassergleichen.

Homogenität und Heterogenität

Mit diesen Begriffen wird die Ortsabhängigkeit der Durchlässigkeit in einem Aquifer beschrieben. Besitzt er an allen Stellen den gleichen k-Wert, so ist er homogen; sind die k-Werte an verschiedenen Stellen des Aquifers unterschiedlich groß, so wird er als heterogen bezeichnet.

net. Viele Aquifere weisen von Ort zu Ort wechselnde Durchlässigkeiten auf und sind damit heterogen (laterale Änderung von Gesteinszusammensetzung und/oder Gefüge).

Isotropie und Anisotropie

Diese Begriffe beschreiben die Richtungsabhängigkeit der Durchlässigkeit (und anderer hydraulischer Parameter) in einem Aquifer. Ist sie in allen Richtungen gleich groß, so spricht man von Isotropie; ist sie in verschiedenen Richtungen unterschiedlich groß, so besitzt der Aquifer anisotrope Eigenschaften. Die meisten natürlichen Grundwasserleiter sind anisotrop, bedingt durch Ausrichtung der Kluftsysteme, Korneinregelungen und Mikroschichtungen (in den meisten Fällen ist $k_{\text{horizontal}} > k_{\text{vertikal}}$).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vereinfachtes Flußdiagramm zur problemorientierten Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit	7
Abb. 2: Reguläres Einsatzspektrum der Verfahren in bezug auf die Bandbreite der Gebirgsdurchlässigkeit	13
Abb. 3: Verfahrensbezogene ca. -Bereiche der unter verschiedenen Rahmenbedingungen höchstens erfaßten räumlichen Versuchsreichweiten ab der Teststelle.....	13
Abb. 4 : Relativer Kostenvergleich von Einzelversuchen	14
Abb. 5 : WD-Kurven und ihre qualitative Interpretation	28
Abb. 6: Typische Gerätekonfiguration eines WD-Tests mit modernem Versuchsaufbau.....	31
Abb. 7: Typische Durchfluß- und Druckkurven bei einem WD-Test	32
Abb. 8: Apparativer Aufbau und Meßkurve eines Einschwingversuches	44
Abb. 9: Aufnahme und Auswertung einer Flowmeter-Kurve	46
Abb. 10: Leitfähigkeits-Logs zu verschiedenen Zeiten in einer Tiefbohrung beim Fluidlogging-Verfahren	50
Abb. 11: Temperatur/Leitfähigkeits-Messungen im Bohrloch und Vorgehensweise beim Austausch der Spülung während des Fluidlogging-Verfahrens	52
Abb. 12: Systemkonfiguration beim Fluid-Logging.....	53
Abb. 13 : Prinzipieller Aufbau von Permeametern zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit	59
Abb. 14 : Körnungslinie nach DIN 18123.....	64
Abb. 15: Strömungsnetz in der Nähe von 2 Förderbrunnen.....	68

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Eignung von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit im Problemfeld Grundwasserbeschaffung.....	9
Tab. 2: Eignung von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit im Problemfeld Untergrunderkundung für geplante Standorte mit einhergehendem wasserwirtschaftlichem Gefährdungspotential	10
Tab. 3: Eignung von Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit im Problemfeld Altlastenbewältigung	11
Tab. 4 : Grundlegende Voraussetzungen für die Anwendung verschiedener Verfahren zur Ermittlung von Gebirgsdurchlässigkeiten	15
Tab. 5: Angaben zur Planung, Durchführung und Auswertung von Verfahren zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit	16
Tab. 6: Wichtige Auswerteverfahren für Pumpversuche in Porengrundwasserleitern (aus KRUSEMAN/DE RIDDER, 1973)	19
Tab. 7: Auswerteverfahren für Pumpversuche in Porengrundwasserleitern, teilweise auch Kluftgrundwasserleitern unter der Annahme spezieller Randbedingungen (aus KRUSEMAN/DE RIDDER, 1973)	20
Tab. 8: WD-Kurven und ihre qualitative Interpretation	29
Tab. 9 : Arten und Benennung von in der Regel kurzen hydraulischen Bohrlochversuchen ...	36

Indexverzeichnis

D		Strömungsnetzanalyse.....	67
Durchlässigkeitsbeiwert		Transmissivität.....	73
Allgemeines	72	Erkundungsmethoden Grundwasser	
Durchlässigkeitsversuch		Abpreßversuch	37
Allgemeines	58	Absenkversuch.....	36, 37
Anwendungsbereiche.....	60	Absinkversuch.....	36
Aufbau	58	Anwendungsvoraussetzungen der	
Bewertung.....	61	Verfahren	15
Durchführung.....	60	Auffüllversuch	36, 37
Literatur	62	Ausspiegelungsversuch.....	37
Meßwerterfassung.....	60	Bohrlochversuch	37
technischer und wirtschaftlicher		Drill-Stem-Test	36, 37
Aufwand	61	Durchlässigkeitsversuch.....	58, 72
Theorie und Auswertung	58	Eignung von Verfahren.....	9, 10, 11
Versuchsproblematik	61	Eingießversuch.....	36
E		Einschwingversuch	43
effektives Porenvolumen	74	Fluid-Logging	50, 52
Einschwingversuch		Gezeitenanalyse.....	70
Allgemeines	43	Hebungsversuch.....	37
Anwendungsmöglichkeit	43	hydraulischer Bohrlochversuch	36, 38,
Apparativer Aufbau und Meßkurve....	43	39	
Bewertung.....	45	Kurzpumpversuch	37
Durchführung.....	43	Permeameterversuch	58
Literatur	45	Planung, Durchführung und Auswertung	
Meßwerterfassung.....	43	von Verfahren	16
technischer und wirtschaftlicher		Pulse-Test.....	36
Aufwand	44	Pumpversuch.....	18
Theorie und Auswertung	43	Sickerversuch.....	36
Versuchsproblematik	45	Slug-Test	36, 37
Erkundung Grundwasser		Steigversuch.....	37
Deponien und Altlasten	10	Tracerversuch.....	55
effektives Porenvolumen	74	Verfahrensauswahl.....	8
geplante Standorte	9	vergleichende Gegenüberstellung der	
grundlegende Begriffe	72	Einzelverfahren	12
Grundwasserbeschaffung.....	8	Versuchreichweiten der Verfahren....	13
Grundwassergleichen.....	74	Wasserdruckversuch (WD-Test).....	28
Grundwasserstromlinien.....	74	F	
Homogenität und Heterogenität.....	74	Flowmetermessung	
hydraulischer Gradient.....	73	Allgemeines	46
Isotropie und Anisotropie	75	Anwendungsmöglichkeit	47
Korngrößenanalyse	63	Bewertung	49
nutzbares Porenvolumen.....	74	Durchführung	47
Speicherkoeffizient.....	73	Kosten	48
Strömungsnetz	67	Literatur.....	49

Meßwerterfassung.....	47	Einsatzspektrum der Verfahren.....	12
technischer und wirtschaftlicher		Einschwingversuch	43
Aufwand	48	Fluid-Logging	50, 52
Theorie und Auswertung	46	geplante Standorte.....	9
Versuchsproblematik	48	Gezeitenanalyse.....	70
Fluid-Logging		grundlegende Begriffe.....	72
Allgemeines	50	Grundwasserbeschaffung	8
Anwendungsmöglichkeit	51	Grundwassergleichen	74
Bewertung.....	54	Grundwasserstromlinien	74
Durchführung.....	51	Hebungsversuch	37
Leitfähigkeits-Log	50	Homogenität und Heterogenität	74
Literatur	54	hydraulischer Bohrlochversuch36, 38,	
Meßwerterfassung.....	51	39	
Systemkonfiguration.....	52	hydraulischer Gradient	73
technischer und wirtschaftlicher		Isotropie und Anisotropie.....	75
Aufwand	53	Korngrößenanalyse	63
Temperatur/Leitfähigkeits-Messung... 52		Kostenvergleich von Einzelversuchen 14	
Theorie und Auswertung	50	Kurzpumpversuch	37
Versuchsproblematik	54	nutzbares Porenvolumen	74
G		Permeameterversuch	58
Gebirgsdurchlässigkeit		Planung, Durchführung und Auswertung	
Durchlässigkeitsversuch	72	von Verfahren	16
effektives Porenvolumen	74	Pulse-Test.....	36
grundlegende Begriffe	72	Pumpversuch.....	18
Grundwassergleichen.....	74	Sickerversuch.....	36
Grundwasserstromlinien.....	74	Slug-Test	36, 37
Homogenität und Heterogenität.....	74	Speicherkoeffizient	73
hydraulischer Gradient.....	73	Steigversuch	37
Isotropie und Anisotropie	75	Strömungsnetz.....	67
nutzbares Porenvolumen.....	74	Strömungsnetzanalyse.....	67
Speicherkoeffizient	73	Tracerversuch.....	55
Theorie.....	17	Transmissivität.....	73
Transmissivität	73	Verfahrensauswahl.....	8
Gebirgsdurchlässigkeits-Bestimmung		vergleichende Gegenüberstellung der	
Abpreßversuch.....	37	Einzelverfahren	12
Absenkversuch.....	36, 37	Versuchsreichweiten der Verfahren.... 13	
Absinkversuch	36	Wasserdruckversuch (WD-Test).....	28
Allgemeines	6	Gezeitenanalyse	
Anwendungshinweise	5	Allgemeines	70
Anwendungsvoraussetzungen der		Anwendungsmöglichkeiten.....	70
Verfahren	15	Bewertung	71
Auffüllversuch	36, 37	Durchführung	70
Ausspiegelungsversuch.....	37	Literatur.....	71
Bohrlochversuch.....	37	Meßwerterfassung.....	70
Deponien und Altlasten	10	technischer und wirtschaftlicher	
Drill-Stem-Test.....	36, 37	Aufwand.....	71
Durchlässigkeitsversuch	58, 72	Theorie und Auswertung.....	70
effektives Porenvolumen	74	Versuchsproblematik	71
Eignung von Verfahren.....	9, 10, 11	Grundwassererkundung	
Eingießversuch	36	Deponien und Altlasten.....	10

effektives Porenvolumen	74	Grundwasserstromlinien	74
geplante Standorte	9	H	
grundlegende Begriffe	72	Homogenität und Heterogenität	74
Grundwasserbeschaffung	8	hydraulische Methoden	
Grundwassergleichen.....	74	Abpreßversuch	37
Grundwasserstromlinien.....	74	Absenkversuch.....	37
Homogenität und Heterogenität.....	74	Absinkversuch.....	36
hydraulischer Gradient.....	73	Allgemeines	36
Isotropie und Anisotropie	75	Anwendungsmöglichkeit	38
Korngrößenanalyse	63	Arten	36
nutzbares Porenvolumen.....	74	Auffüllversuch	37
Speicherkoeffizient.....	73	Ausspiegelungsversuch.....	37
Strömungsnetz	67	Bewertung	40
Strömungsnetzanalyse	67	Bohrlochversuch	37
Transmissivität	73	Drill-Stem-Test	37
Grundwassererkundungsmethoden		Durchführung	39
Abpreßversuch.....	37	Eingießversuch.....	36
Absenkversuch.....	36, 37	Hebungsversuch.....	37
Absinkversuch	36	Kurzbeschreibung	36
Anwendungsvoraussetzungen der		Kurzpumpversuch	37
Verfahren	15	Literatur.....	41
Auffüllversuch	36, 37	Meßwerterfassung.....	39
Ausspiegelungsversuch.....	37	Pulse-Test.....	36
Bohrlochversuch.....	37	Sickerversuch.....	36
Drill-Stem-Test.....	36, 37	Slug-Test	37
Durchlässigkeitsversuch	58, 72	Steigversuch.....	37
Eignung von Verfahren.....	9, 10, 11	technischer und wirtschaftlicher	
Eingießversuch	36	Aufwand.....	39
Einschwingversuch.....	43	Theorie und Auswertung.....	36
Fluid-Logging	50, 52	Versuchsproblematik	40
Gezeitenanalyse	70	hydraulischer Gradient.....	73
Hebungsversuch.....	37	hydraulischer pneumatischer Packer.....	33
hydraulischer Bohrlochversuch.....	36, 38,	I	
39		Isotropie und Anisotropie.....	75
Kurzpumpversuch.....	37	K	
Permeameterversuch.....	58	Korngrößenanalyse	
Planung, Durchführung und Auswertung		Allgemeines	63
von Verfahren	16	Anwendungsmöglichkeiten.....	64
Pulse-Test	36	Bewertung	65
Pumpversuch	18	Durchführung.....	64
Sickerversuch.....	36	Literatur.....	66
Slug-Test.....	36, 37	Meßwerterfassung.....	64
Steigversuch.....	37	technischer und wirtschaftlicher	
Tracerversuch	55	Aufwand.....	65
Verfahrensauswahl	8	Theorie und Auswertung.....	63
vergleichende Gegenüberstellung der		Versuchsproblematik	65
Einzelverfahren.....	12	Körnungslinie.....	63
Versuchsreichweiten der Verfahren....	13	L	
Wasserdruckversuch (WD-Test)	28	Literatur	
Grundwassergleichen.....	74	Durchlässigkeitsversuch.....	62

Einschwingversuch	45	Strömungsnetzanalyse	
Flowmetermessung	49	Allgemeines	67
Fluid-Logging	54	Anwendungsmöglichkeiten.....	67
Gezeitenanalyse	71	Bewertung	69
hydraulische Methoden.....	41	Durchführung	67
Korngrößenanalyse	66	Literatur.....	69
Permeameterversuch.....	62	Meßwerterfassung.....	67
Pumpversuch	26	technischer und wirtschaftlicher	
Strömungsnetzanalyse	69	Aufwand.....	69
Tracerversuch	57	Theorie und Auswertung.....	67
Wasserdruckversuch (WD-Test)	35	Versuchsproblematik	69
M		T	
mechanischer Packer	33	Tracerversuch	
N		Allgemeines	55
nutzbares Porenvolumen.....	74	Anwendungsmöglichkeit	55
P		Bewertung	56
Permeameterversuch		Durchführung	55
Allgemeines	58	Literatur.....	57
Anwendungsbereiche.....	60	Meßwerterfassung	55
Aufbau	58	technischer und wirtschaftlicher	
Bewertung.....	61	Aufwand.....	56
Durchführung.....	60	Theorie und Auswertung.....	55
Literatur	62	Versuchsproblematik	56
Meßwerterfassung.....	60	Transmissivität.....	73
technischer und wirtschaftlicher		W	
Aufwand	61	Wasserdruckversuch (WD-Test)	
Theorie und Auswertung	58	Allgemeines	28
Versuchsproblematik	61	Anwendungsmöglichkeit	30
Pumpversuch		Bewertung	34
Allgemeines	18	Dauer.....	34
Anwendungsmöglichkeit	21	Durchfluß- und Druckkurven.....	31
Auswerteverfahren		Durchführung	30
Porengrundwasserleiter.....	18	Geräte-Konfiguration	30
Bewertung.....	24	Literatur.....	35
Durchführung.....	22	Meßwerterfassung	30
Literatur	26	Packer.....	33
Meßwerterfassung.....	22	Packergestänge und Zuleitungen.....	34
technischer und wirtschaftlicher		technischer und wirtschaftlicher	
Aufwand	23	Aufwand.....	33
Theorie und Auswertung	18	Theorie und Auswertung.....	28
Versuchsproblematik	24	Versuchsproblematik	34
S		Wasserpumpe.....	33
Speicherkoeffizient.....	73	WD-Geräteaufbau	33
Strömungsnetz	67	WD-Kurven.....	28