

## 7 Weitere hydraulische Untersuchungsverfahren

### 7.1 Allgemeines

An dieser Stelle sollen Untersuchungsverfahren vorgestellt werden, die sich dadurch auszeichnen,

- daß sie mit geringem Aufwand durchzuführen sind
- daß sie kurze Versuchszeiten beanspruchen
- daß sie in großer Anzahl in einem Untersuchungsgebiet durchgeführt werden können
- daß sie unter Aufrechterhaltung des Versorgungsbetriebs durchgeführt werden können.

Mit Hilfe dieser Versuche ist es möglich, hydraulische Parameter zumindest größenordnungsmäßig abzuschätzen.

Es wird darauf hingewiesen, daß nachstehend vorwiegend Verfahren genannt werden, die sich für die Untersuchung von durchlässigen Aquiferen zur Trinkwassererschließung eignen. Verfahren, die vorwiegend in Geringleitern oder geologischen Barrieren Anwendung finden, sind im Abschlußbericht des Forschungsberichts „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“ des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg beschrieben.

### 7.2 Wasserdurchlässigkeitstests

Die einfach durchzuführenden und auszuwertenden WD-Tests werden bevorzugt bei ingenieurgeologischen Fragestellungen angewandt. Üblicherweise wird dazu eine große Anzahl solcher Tests durchgeführt, um die Durchlässigkeit des anstehenden Gesteinsverbands an vielen Stellen zu prüfen.

Bei WD-Tests wird in einem abgepackerten Bohrlochabschnitt von 1 – 5 m Wasser eingepreßt. Dabei sollen Umläufigkeiten des Packers bei der Abpressung vermieden werden. Zur Versuchsdurchführung wird auf HEITFELD (1979), MAINI et al. (1972), EWERT (1977) oder RISSLER (1977) verwiesen.

Die bei den einzelnen Druckstufen in das Gebirge eintretende Wassermenge wird registriert und daraus die Aufnahmemenge pro Zeiteinheit für einen einheitlichen Druck berechnet. Die Aufnahmemengen können sowohl überproportional (Abb. 45 b) als auch unterproportional (Abb. 45 a, c) mit dem Druck zunehmen. Bei einer überproportionalen Zunahme wächst die Injektionsrate in das Gebirge pro Drucksteigerung (konvexer Kurvenverlauf in Abb. 45 b). In diesem Falle nimmt die Durchlässigkeit des Gebirges z. B. durch elastische Verformung, durch Aufbrechen oder durch Ausspülungen zu. Bei unterproportionaler Zunahme der Injektionsrate werden entweder Reibungsverluste und Fließwiderstände während der Injektionsphase größer, oder der getestete Gebirgshohlraum ist sehr eng begrenzt. Abb. 45 a repräsentiert ein Beispiel ohne Veränderung der Durchlässigkeit. Der Kurvenverlauf in Abb. 45 c zeigt, daß entweder das Gebirge abgedichtet oder ein isolierter Gebirgshohlraum getestet worden ist.

Wegen der mechanischen und hydraulischen Vorgänge, die bei einem WD-Test auftreten können, ist die Ermittlung von  $k_f$ -Werten aus WD-Tests umstritten. Wird ein WD-Test mit konstanter Injektionsrate über einen längeren Zeitraum (Stundenbereich) gefahren und wurde durch den Einpreßdruck weder eine Gebirgsverformung noch ein Aufbrechen oder

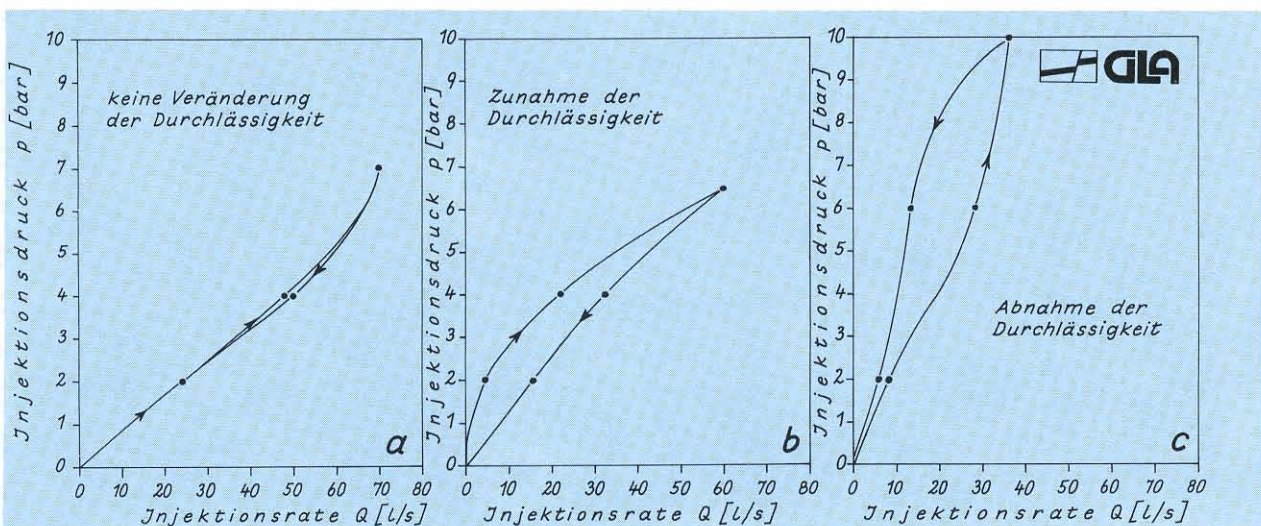


Abb. 45: Diagramme von WD-Tests in Injektionsbohrungen bei der Talsperre „Kleine Kinzig“  
 Dargestellt sind verschiedene Druck-Injektionsrate-Beziehungen

Ausspülen verursacht, dann ist ein solcher Versuch wie ein Pumpversuch (Kap. 6) auszuwerten. Mögliche Probleme einer Einspeisung von Fremdwasser in den Aquifer sind dabei zu berücksichtigen (Kontaminationen, Veränderungen der Hydrochemie oder Isotopenverhältnisse).

### 7.3 Schöpf- und Auffüllversuche (Slug-Tests)

Schöpf- und Auffüllversuche (engl. slug-tests) sind besonders für kleinkalibrige Versuchs- oder Aufschlußbohrungen in gering durchlässigen Gesteinen geeignet. Bei diesen Versuchen wird ein bekanntes Wasservolumen möglichst rasch aus einem Bohrloch gepumpt (Schöpfversuch) oder in ein Bohrloch injiziert (Auffüllversuch). Dieser Vorgang kann auch durch einen Verdrängungskörper mit definiertem Volumen im Bohrloch erzielt werden (Bail-Test). In ähnlicher Weise kann mit der Drill-Stem-Test-Garnitur in einem bestimmten Bohrlochabschnitt eine plötzliche Drucksteigerung oder -abnahme erzeugt werden. Aus dem ansteigenden bzw. abfallenden Wasserspiegel (Druck) lassen sich die hydraulischen Parameter des Aquifers sowie Skinfaktor und Brunnen-speicherung ermitteln.

Der abfallende (ansteigende) Wasserspiegel sollte mindestens solange beobachtet werden, bis die Restdifferenz zum Wasserspiegel bei Versuchsbeginn weniger als 30 % der maximalen Wasserspiegeländerung beträgt.

Für den Normalfall gilt folgender Meßturnus:

Zeit seit Versuchsbeginn	Zeitabstand der Messungen
0 – 3 min	alle 30 s eine Messung
3 – 10 min	alle 1 min " "
10 – 30 min	alle 2 min " "
30 – 60 min	alle 5 min " "
60 – 120 min	alle 10 min " "
120 – 240 min	alle 20 min " "
240 – 600 min	alle 40 min " "
bis zum Ende	alle 60 min " "

Für die Auswertung wurden für einen THEIS-Aquifer (homogen, isotrop, unendlich ausgedehnt) Typkurven entwickelt, die auch die Brunnen- und Bohrlochradien berücksichtigen (PAPADOPULUS & COOPER 1967). RAMEY et al. (1975) entwickelten Typkurven,

bei denen zusätzlich der Einfluß des Skins in Form eines wirksamen Brunnenradius berücksichtigt werden kann. In Abb. 46 sind Typkurven und ein Beispiel für die Anwendung des RAMEY-Verfahrens dargestellt. Die Anwendung in Kluftaquifere setzt voraus, daß eine statistisch ausreichende Anzahl von Schichtflächen getestet wird. Dies bedeutet, daß bei massigen Festgesteinen der getestete Gebirgsabschnitt größenordnungsmäßig 50 m lang sein sollte, während bei schichtigen Festgesteinen Abschnitte von 10 m und größer genügen. Die Daten aus der Bohrung Urach 3 (Abb. 46) zeigen im späteren Versuchsabschnitt eine auffallende Abweichung vom Typkurvenverlauf, weil die bohrlochnahen Klüfte durchlässiger sind als die weiter entfernten Klüfte.

### 7.4 Einschwing- und Gezeitenverfahren

KRAUSS (1977) beschreibt ein anderes Verfahren, um die Durchlässigkeit in gespannten Aquifere zu bestimmen. Dazu wird die Wassersäule im Bohrloch in Schwingung versetzt, indem man mit Preßluft den Wasserspiegel absenkt und die Luft rasch entweichen läßt. Amplitude und Verlauf der angeregten Schwingung hängen im wesentlichen von der Transmissivität und dem Speicherkoeffizienten des Aquifers sowie von seiner Druckhöhe ab.

Die Transmissivität und der Speicherkoeffizient können ferner durch die Analyse seismischer oder durch Gezeiten hervorgerufener Grundwasserstandsschwankungen bestimmt werden. Ein Beispiel für den Einfluß der Gezeiten zeigt Abb. 47. Durch die Anziehungskraft von Mond und Sonne und die dadurch hervorgerufene Fliehkraft wird der Erdkörper elastisch verformt. An den entlasteten Stellen wird der Hohlraumanteil vergrößert, so daß der Wasserspiegel abfällt. Da sich der Erdkörper um seine eigene Achse dreht, fällt und steigt der Wasserspiegel meßbar in Grundwassermeßstellen gespannter Aquifere. Wegen der Schiefe der Ekliptik ist der Wasserspiegelanstieg und -abfall jedoch nicht gleich hoch: pro Tag treten zwar zwei in etwa gleichgroße Maxima auf, jedoch zwei verschieden hohe Minima. Besonders große Amplituden stellen sich bei den Springtiden ein, wenn Sonne, Erde und Mond auf einer Ebene liegen. Da die Gezeiten auf große Teile der Erdoberfläche einwirken, erhält man entsprechend großräumige Mittelwerte für die hydraulischen Parameter der Aquifere.

Zusammen mit den witterungsbedingten Luftdruckschwankungen können die Gezeiten einen meßba-

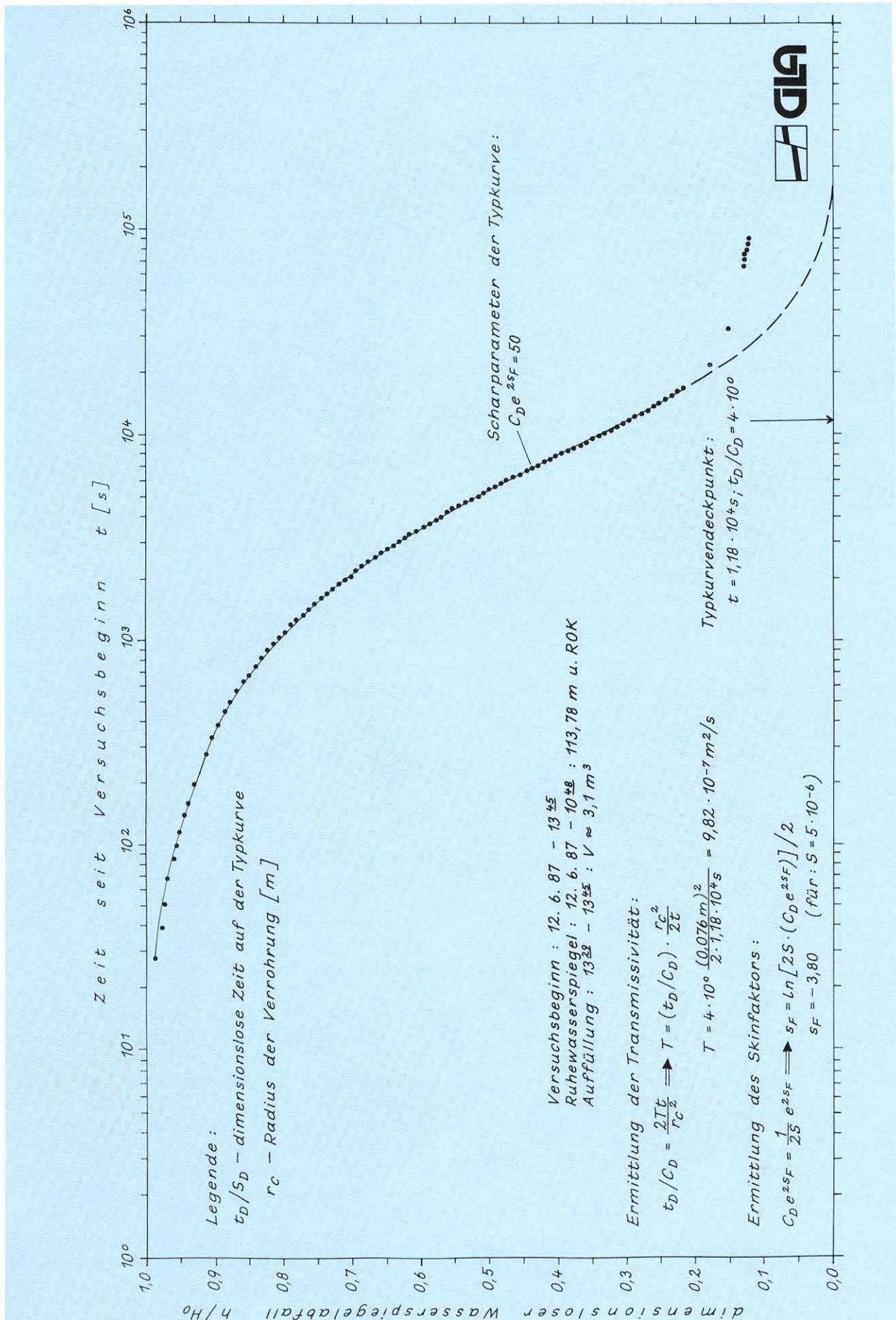


Abb. 46: Auswertung des Auffüllversuches in der Forschungsbohrung Urach 3 mit Typkurven nach RAMEY et al. (1975)

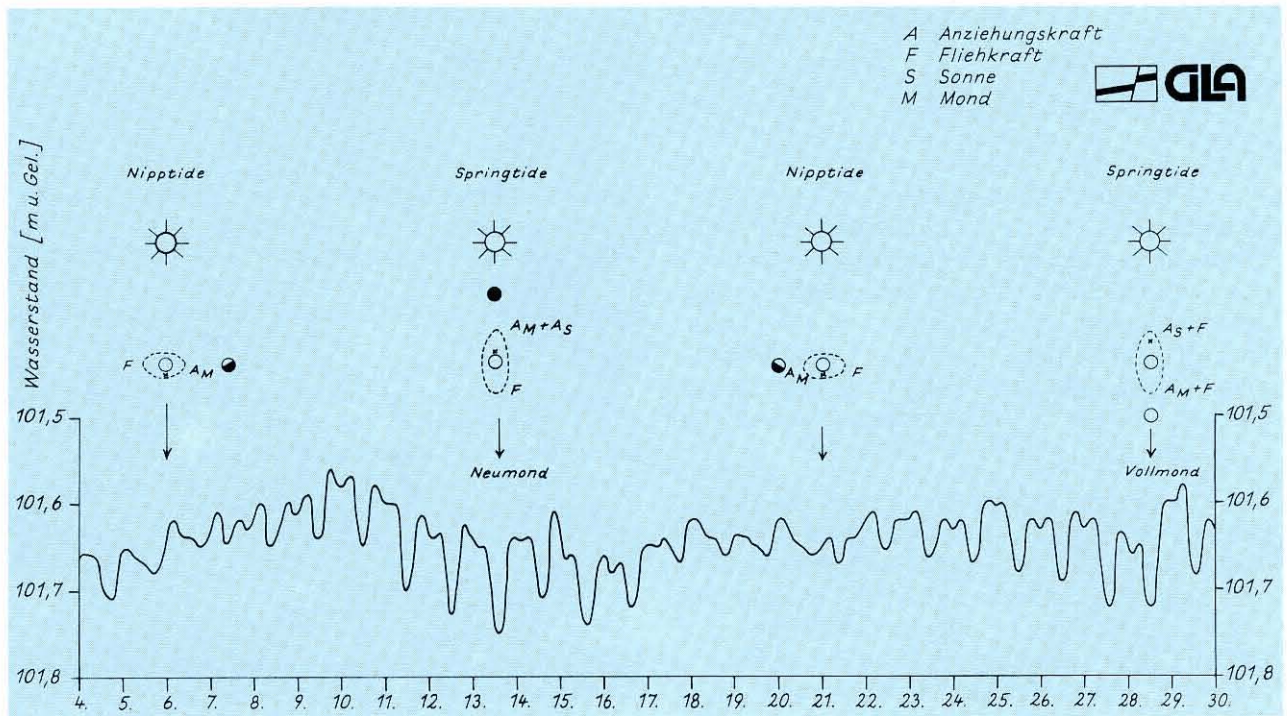


Abb. 47: Gezeitenbeeinflusster Wasserspiegelgang in der Bohrung Saulgau TB 1 im Juni 1980

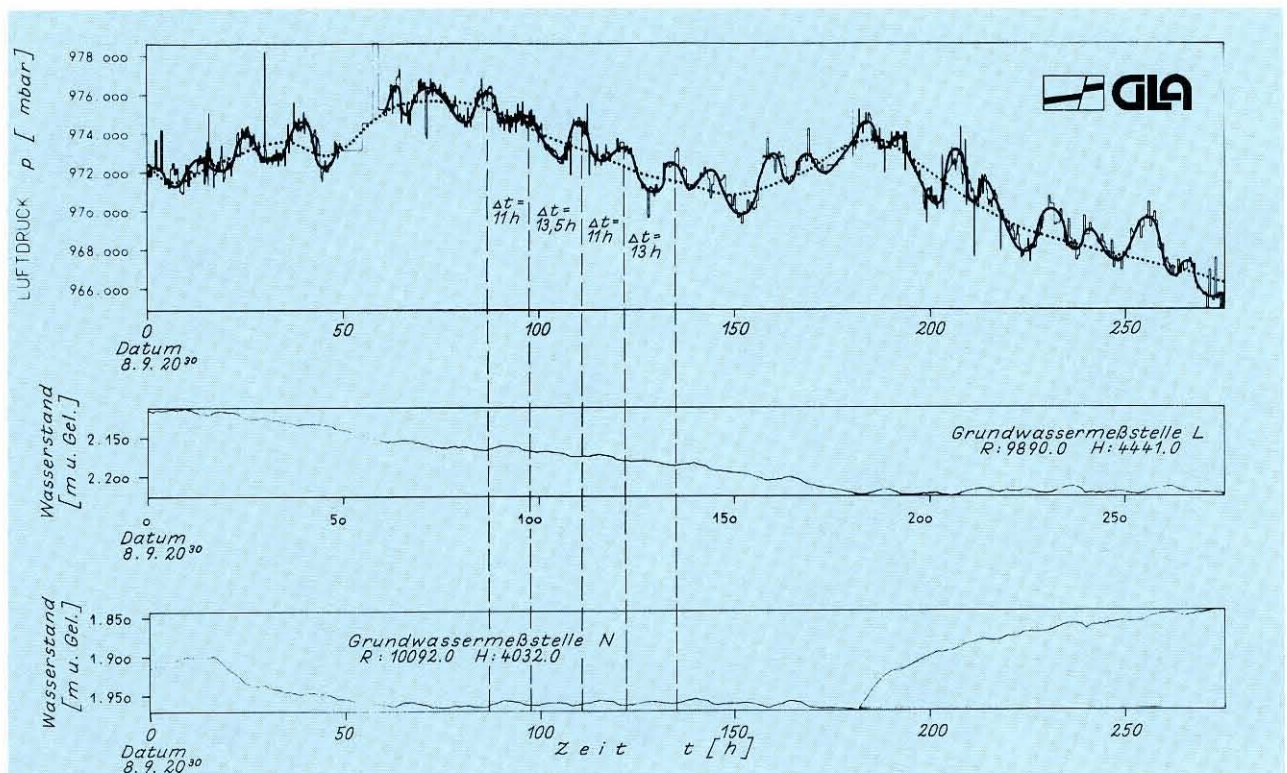


Abb. 48: Pumpversuch Tiefbrunnen 459, Fassung 4, Landeswasserversorgung  
Korrespondenz zwischen Luftdruck und Grundwasserganglinien (Kiesaquifer)

ren Einfluß auf den Grundwasserspiegelgang oberflächennaher, nicht gespannter Aquifere haben. Abb. 48 zeigt den Einfluß witterungs- und gezeitenbedingter Luftdruckschwankungen auf den Wasserspiegelgang bei einem Pumpversuch im Donauried.

## 7.5 Zyklische Pumpversuche

Die Durchlässigkeit kann auch während des routinemäßigen Förderbetriebs erkundet werden, ohne daß

er wesentlich beeinträchtigt oder gestört wird. Der eigentliche hydraulische Versuch besteht aus einem intervallweisen täglichen Betrieb, bei dem die einzelnen Entnahmeraten, Betriebszeiten und Ruhephasen immer gleich groß bzw. gleich lang sein müssen. Ein Zyklus setzt sich aus der Absenkungs- ( $t$ ) und der Wiederanstiegsphase ( $t'$ ) zusammen. Der Quotient  $t/t'$  muß während des Gesamtversuches konstant sein.

Die hydraulische Auswertung basiert auf der Annahme eines THEIS-Aquifers und auf einer Superposition der linearisierten THEISSchen Brunnenfunktion. Gemessen und zur Auswertung herangezogen werden nur die Absenkung und der Wiederanstieg im Förderbrunnen jeweils am Ende der Pump- und Wiederanstiegsphase. Dieses Verfahren sollte nur in klein dimensionierten Brunnen gut durchlässiger Aquifere angewandt werden, bei denen Größe und Dauer der Brunnenspeicherung klein ist.

Als Auswertebispiel wird der Betriebsplan eines zyklischen Pumpversuchs in der Thermalwasserbohrung Bad

Buchau dargestellt (Abb. 49). Während dieses Versuchs wurde die Auslauftemperatur registriert, die rhythmisch zu den einzelnen Entnahmezyklen verläuft und zwischen 42 und 47 °C schwankt. Sie wurde dazu benutzt, um den gemessenen Wasserstand über die Dichte des Wassers, bezogen auf Druck und Temperatur, zu korrigieren (vgl. Kap. 9.4.1). Aus den korrigierten Wasserständen am Ende jeden Pumpzyklus' wird die Restabsenkung ermittelt. Aus dem Nomogramm (Abb. 50) wird für jeden Pumpzyklus die dimensionslose Absenkung für  $q_{14h}$  – ein Pumpzyklus dauerte vierzehn Stunden – bestimmt und aus der Gleichung für die dimensionslose Absenkung

$$s_D = s_n T / 0,183 Q \tag{7.1}$$

die Transmissivität errechnet. In Tab. 7 sind die Einzelergebnisse aufgelistet. Sie liegen zwar alle in der gleichen Größenordnung, jedoch erkennt man den Einfluß von Entnahmeschwankungen zu Beginn des zyklischen Versuchs, den Einfluß der vorangegangenen Dauerentnahme und dem Ende der Entnahmereduktion. Die mittlere Transmissivität beträgt daher  $T = 4,12 \cdot 10^{-3}$  m/s und stimmt mit den Ergebnissen anderer hydraulischer Versuche überein.

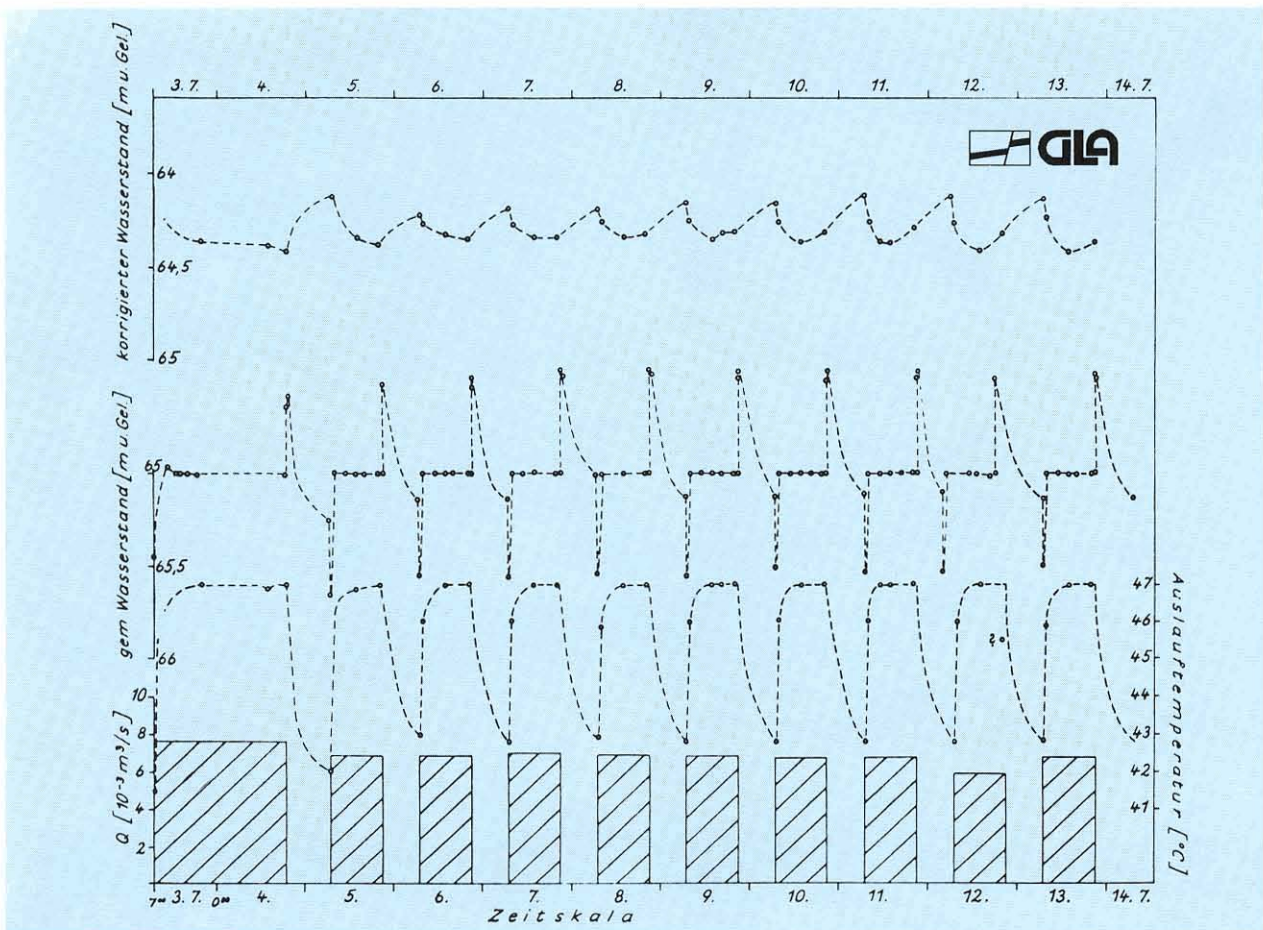


Abb. 49: Betriebsplan des zyklischen Pumpversuchs in der Thermalwasserbohrung Bad Buchau

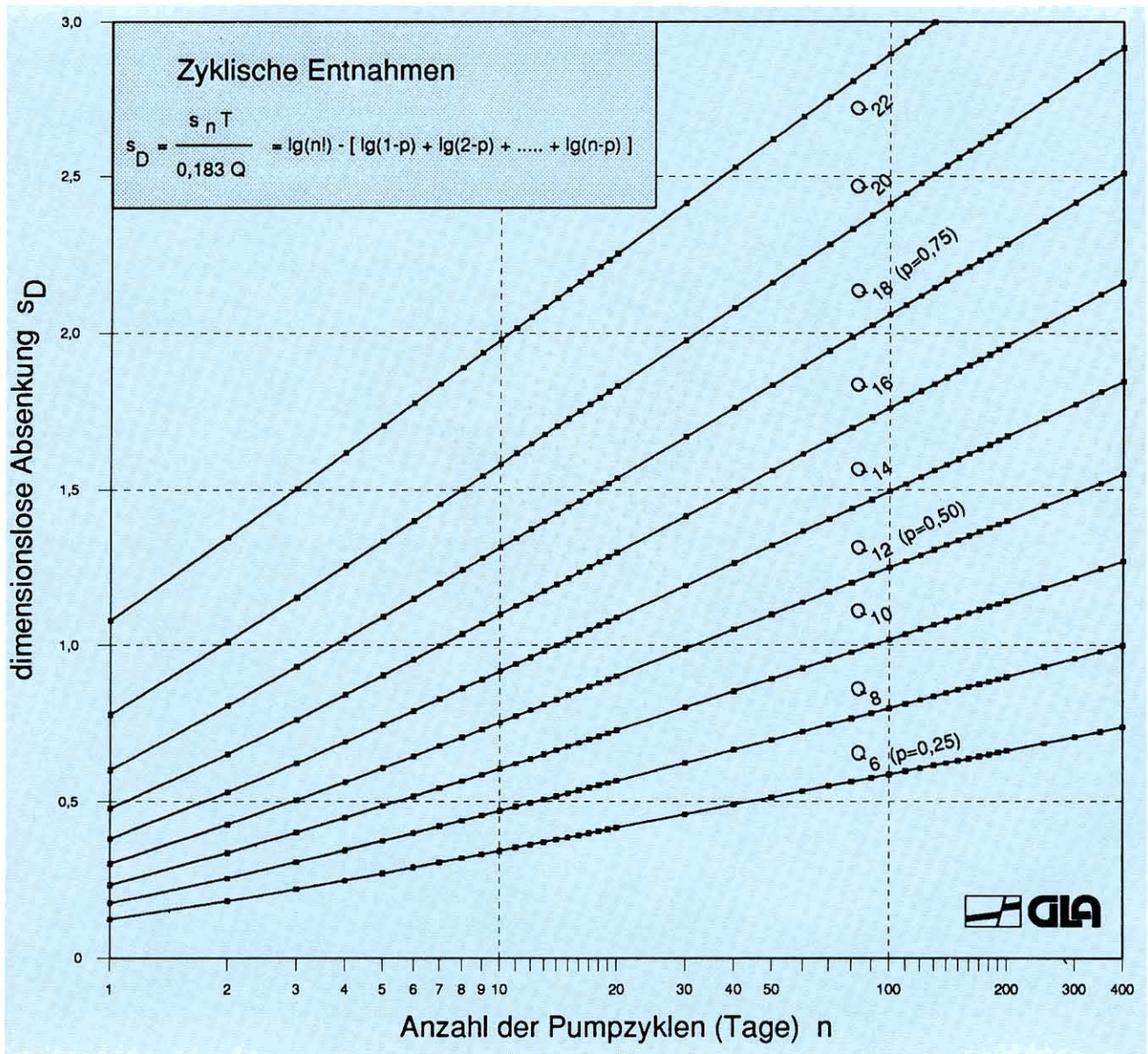


Abb. 50: Nomogramm zur Auswertung von zyklischen Pumpversuchen

Tab. 7: Ergebnisse des zyklischen Pumpversuchs (3. – 13.7.84) in der Thermalwasserbohrung Bad Buchau

Ausgangsdaten	Zyklus-Nr.	Absenkung (m u. Gel.)	Transmissivität (m <sup>2</sup> /s)	Bemerkung
Pumpdauer während eines Zyklus $t = 14$ h	1	64,375	–	Einfluß der Dauerentnahme
Entnahme $Q = 6,8 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /s	2	64,345	$2,91 \cdot 10^{-3}$	
Ruhewasserspiegel $s = 64,123$ m u. Gel.	3	64,335	$3,59 \cdot 10^{-3}$	
	4	64,335	$4,05 \cdot 10^{-3}$	
	5	64,345	$4,15 \cdot 10^{-3}$	
	6	64,365	$4,06 \cdot 10^{-3}$	stabile Werte
	7	64,365	$4,22 \cdot 10^{-3}$	
	8	64,415	$3,67 \cdot 10^{-3}$	Entnahme-änderungen
	9	64,415	$3,79 \cdot 10^{-3}$	

## 7.6 Abschätzung von Parametern

Es ist möglich, ohne umfangreiche hydraulische Tests, Aquiferparameter, die Reichweite eines Absenkungstrichters usw. abzuschätzen. Dabei wird nicht zwischen Festgesteins- und Porengrundwasserleitern unterschieden.

Ausblasversuche an Bohrlöchern mittels Druckluft können schon während des Abteufens einer Bohrung, insbesondere bei Luftspülverfahren, einen groben Anhalt über die **Lage der Wasserzutritte** und die **Größe des Wasserandrangs** geben, die von der Klüftung und örtlichen Durchlässigkeit abhängen.

**Durchlässigkeitsänderungen** im Aquifer können aus dem Verlauf der Grundwassergleichen abgeschätzt werden: Aus der Änderung des Gefälles ist es möglich, Rückschlüsse auf den  $k_f$ -Wert oder die effektive Geschwindigkeit gezogen werden.

In gespannten Aquiferen kann der **Speicherkoeffizient** aus den physikalischen Gesteins- und Wassereigenschaften abgeschätzt werden. Für normal temperierte Aquifere gilt als Anhaltswert:

$$S = H \cdot n \cdot 5 \cdot 10^{-6} \quad (7.2)$$

Ein gespannter Aquifer mit einer Mächtigkeit von  $H = 30$  m und einer absoluten Porosität von  $n = 10\%$  besäße demnach einen Speicherkoeffizienten von  $S = 1,5 \cdot 10^{-5}$ .

Die **Reichweite eines Absenkungstrichters** kann im einfachsten Fall durch Extrapolation der halblogarithmisch aufgetragenen Absenkungswerte aus benachbarten Meßstellen ermittelt werden.

Sofern die Aquiferparameter bekannt sind, errechnet sich die Reichweite der Absenkung bei einem THEIS-Aquifer zu:

$$r_o = \sqrt{2,25 T \cdot t/s} \quad (7.3)$$

Daneben gibt es eine Reihe von halbquantitativen Verfahren zur Abschätzung der Reichweite, die auch die freie Oberfläche berücksichtigen. Die Anwendung dieser Abschätzungen im Bereich von Klüftaquiferen kann zu beachtlichen Fehlern führen.

## 7.7 Stimulation von Bohrungen

### 7.7.1 Schocken

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Ergiebigkeit von Bohrungen zu steigern, wenn das erwartete Dargebot des Aquifers nicht erschlossen wurde. Zu diesen Verfahren gehören das Schocken, das Fracen und die Bohrlochsäuerung.

Das Entsandn (Entschlammen, Klarpumpen oder Entwickeln) einer Bohrung spielt im Festgestein eine geringere Rolle als im Lockergestein. Im Festgestein muß versucht werden, das in die Klüfte eingespülte Bohrgut zu entfernen. Dazu werden die Klüfte am besten abschnittsweise zwischen zwei Packern und intermittierend durch Abpumpen entsandet oder durch stoßartiges Pumpen geschockt.

### 7.7.2 Fracen

Das „Fracen“ stammt ursprünglich aus der Erdöl- bzw. Erdgasgewinnung; man versteht darunter die künstliche Erzeugung von Rissen in porösen Trägergesteinen zur Steigerung der Durchlässigkeit und damit der Produktivität der Bohrung. Das Verfahren wird in tiefen, gering durchlässigen Lagerstätten angewendet. In einem abgepackerten Gebirgsabschnitt werden so hohe hydraulische Drücke aufgebracht, bis das Gebirge bricht. Beim Fracen wird der bei konstanter Injektionsrate erzeugte Druck am Bohrlochkopf gemessen. Zunächst baut sich der Druck relativ rasch auf. Bei erfolgreicher Rißbildung fällt er spontan ab (Abb. 51a) und verharrt in einem eng begrenzten niederen Druckbereich. Die hydraulisch erzeugten Risse oder Fracs sollen möglichst weit in das Gebirge hineinreichen, um in der gering durchlässigen Formation eine große Drainagefläche zu erzeugen. Fracs werden meist durch Stützmittel oder Proppings (Stopfmittel) offen gehalten.

Eine Anwendungsmöglichkeit dieses Verfahrens im Festgesteinsbereich besteht darin, den Anschluß relativ unergiebigter Bohrlöcher an gut durchlässige, geklüftete Gebirgsbereiche herzustellen oder zu verbessern. Daneben wird diese Methode auch beim Hot-Dry-Rock-Verfahren angewandt, um im kristallinen Grundgebirge Wärmeaustauschflächen zwischen Injektions- und Extraktionsbohrungen herzustellen.

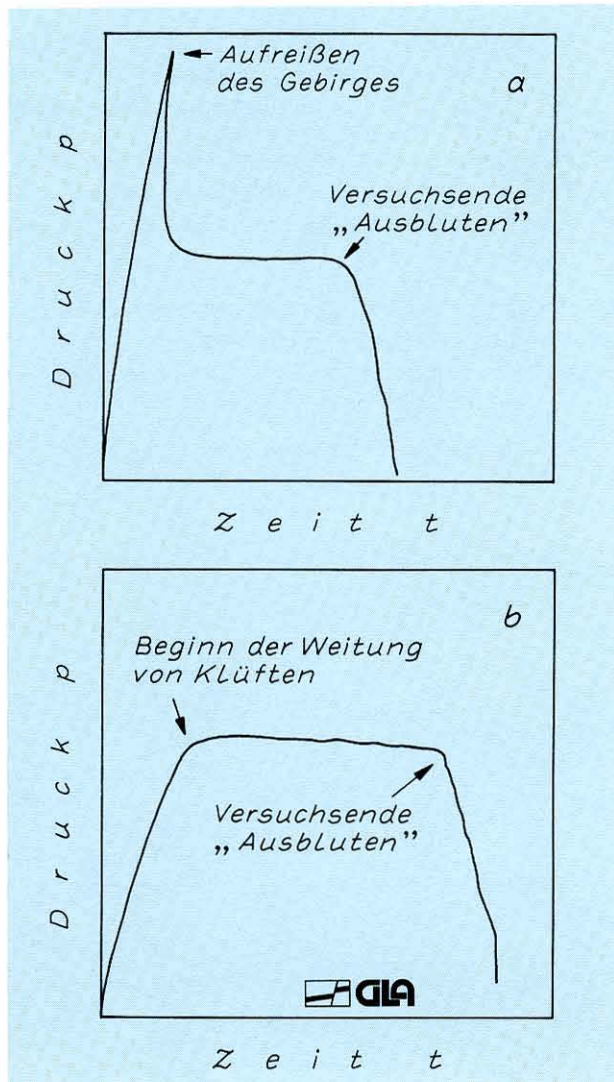


Abb. 51: Beispiele für Diagramme von Fracversuchen in porösen Medien (a) und im Festgestein (b)

Zwischen den Fracversuchen der Erdöl- und der Erdgaserschließung und der Grundwassererschließung besteht nur der Unterschied, daß erstere häufiger in relativ homogenen, feinporösen Gesteinen, letztere in klüftigen oder verkarsteten Gesteinen durchgeführt werden. Frac-Druck und Frac-Ausbreitung orientieren sich im Festgestein am vorhandenen, latenten Mikro- und Makrorißsystem, das durch die hohen hydraulischen Drücke geweitet wird. Der anfänglich starken Druckzunahme bis zu dem Zeitpunkt der Klüftaufweitung folgt ein relativ konstantes Druckniveau (vgl. Abb. 51b). Die Frac-Drücke sind im geklüfteten Festgestein in der Regel geringer als in ungeklüfteten porösen Sandsteinen, da zum Weiten bereits angelegter Klüfte wesentlich weniger Kraft benötigt wird.

### 7.7.3 Bohrlochsäuerung

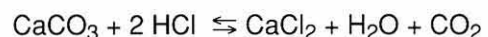
In karbonatreichen Festgesteinen können zur Verbesserung des hydraulischen Anschlusses einer Bohrung an durchlässigere Bereiche des Aquifers Bohrlochsäuerungen durchgeführt werden. Nach dem Einpreßdruck der Säure (in das Bohrloch) unterscheidet man zwischen Matrix- und Frac-Säuerung.

Die **Matrixsäuerung** wird ohne zusätzlichen Druck im Bohrloch vorgenommen. Sie ist besonders dafür geeignet, relativ dünne, flächenhafte Fließwiderstände zu beseitigen oder Filterkuchen und fehlerhafte Zementierungen aufzulösen.

Die **Frac-säuerung** ist eine Kombination von Fracversuch und Säuerung. Unter hohen Drücken werden meist Klüfte geöffnet, durch die die Säure weit in das Gebirge eindringen kann und das vorhandene Kluftsystem durch Lösung stark vergrößert. Mit diesem Verfahren können überraschend große Ergiebigkeitssteigerungen erzielt werden.

Vor der Durchführung einer Bohrlochsäuerung ist ein wasserrechtliches Verfahren notwendig. Die Anwendbarkeit dieses Stimulationsverfahrens hängt maßgeblich vom Ausbau der Bohrung ab.

Bei der Bohrlochsäuerung kommen bevorzugt Salz-, Essig- oder Ameisensäure zum Einsatz. Häufig wird 15 %ige Salzsäure (HCl) verwendet. Die chemische Gleichung für die Lösung von Kalk (CaCO<sub>3</sub>) lautet:



Das bei der Kalklösung entstehende CO<sub>2</sub> kann zu explosionsartigen Eruptionen aus dem Bohrloch führen.

Für die Lösung von 1 m<sup>3</sup> Kalkstein werden 12,2 m<sup>3</sup> 15%ige Salzsäure benötigt. Beispielsweise läßt sich durch eine Matrixsäuerung in einem Bohrloch von 10 m Tiefe und 500 mm Durchmesser mit 50 m<sup>3</sup> 15 %iger Salzsäure eine zylindrische Schicht der Stärke 19 cm lösen. Diese Zahlen zeigen, daß durch eine normale Matrixsäuerung allenfalls Abdämmungen in der Größenordnung von Zentimetern bis Dezimetern beseitigt werden können. Da die Löslichkeit von Dolomit geringer ist als die von Kalkstein, wird dafür entsprechend mehr Salzsäure benötigt.



### 7.7.4 Erfahrungen

Aus Baden-Württemberg liegen bezüglich Bohrloch-säuerung unterschiedliche Ergebnisse vor. Entsprechend den vorstehenden Ausführungen ist nur die Drucksäuerung erfolversprechend. Dazu gibt es Erfahrungswerte aus dem Muschelkalk und dem Weißjura:

- erfolgreiche Herstellung einer 40 m langen Verbindung zwischen einer ergiebigen und einer weniger ergiebigen Tiefbohrung bei Aalen
- Nachweis einer hydraulisch wirksamen Fracsäuerung mit Hilfe von Durchbruchkurven und Ergiebigkeitssteigerung einer Bohrung im Stadtgebiet Ulm

Im übrigen liegen von von Fracversuchen in Baden-Württemberg zur Ergiebigkeitssteigerung von Trinkwasserbohrungen bislang keine Ergebnisse vor.