

E 1-4 Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

Stand: September 2004

1 Vorbemerkungen

In dieser Empfehlung werden Feldverfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte behandelt. Besonders wird auf Verfahren eingegangen, mit denen die Durchlässigkeit von schwach durchlässigem natürlichen Untergrund (Geologische Barriere) bis $k < 10^{-9}$ m/s nachgewiesen werden kann. Darüber hinaus werden Verfahren behandelt, die in durchlässigeren Strukturen von Geologischen Barrieren oder im durchlässigen Umfeld von Deponiestandorten sowie Altlasten und Verdachtsflächen Verwendung finden.

Neben der Verbreitung, der Mächtigkeit, der Homogenität und dem Rückhaltevermögen der Geologischen Barriere ist der Durchlässigkeitsbeiwert des Gebirges ein maßgebender Parameter für die Beurteilung eines Standortes.

Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich aus der Durchlässigkeit der Gesteinsporen und der Durchlässigkeit des Trennflächengefüges zusammen. Im Laborversuch wird lediglich die Gesteinsdurchlässigkeit gemessen. Die Beurteilung der Durchlässigkeit von Geologischen Barrieren kann daher nur durch im natürlichen Gesteinsverband durchgeführte Feldversuche vorgenommen werden. Zusätzlich kann es bei Lockergesteinen sinnvoll sein, die im Labor gemessenen Gesteinsdurchlässigkeitsbeiwerte heranzuziehen.

Mit den Feldverfahren wird die Transmissivität T ermittelt. Daraus wird mittels Division durch die Mächtigkeit des untersuchten Gebirgsabschnittes der Durchlässigkeitsbeiwert k berechnet.

2 Planung und Auswahl der Verfahren

Voraussetzung für den optimalen Einsatz von Feldversuchen zur Bestimmung des Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwertes ist die hinreichende Kenntnis der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse (Empfehlung E 1-1).

Die Anzahl der Feldversuche sowie die Erkundungstiefen sind vom Planer in Abhängigkeit vom Stand der Untersuchungen und den hydrogeologischen Verhältnissen (insbesondere der Anzahl der Homogenbereiche) vorzugeben. Die Gebirgsdurchlässigkeit des Untergrundes soll repräsentativ untersucht und eventuelle Inhomogenitäten mit hinreichender Sicherheit erkannt werden können.

Die Auswahl geeigneter Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit ist abhängig davon, ob an einem Deponiestandort die Geologische Barriere, Aquifere im Umfeld, die technische Barriere oder sonstige geotechnische Fragestellungen

untersucht werden sollen. Darüber hinaus gibt es unterschiedliche Verfahren für die grundwassergesättigte bzw. die ungesättigte Zone und für die am Standort möglichen Aufschlussarten. Der Planer muss bei der Verfahrensauswahl berücksichtigen, in welcher Größenordnung die erwarteten Durchlässigkeiten liegen und welche Größenordnung der mit dem Verfahren erfasste Gebirgsbereich und die damit verbundene Versuchsdauer haben.

Nicht zuletzt muss sich die Auswahl der Testverfahren und Auswerteverfahren auch nach der angestrebten Genauigkeit der Bestimmung der hydraulischen Gebirgsparameter richten.

In Tabelle 1-4.1 sind diese Auswahlkriterien und Anwendungsbereiche für die behandelten Verfahren dargestellt. In Ergänzung hierzu zeigt Bild 1-4.1 am Beispiel einiger Verfahren die Abhängigkeit der Versuchsdauer von der Gebirgsdurchlässigkeit.

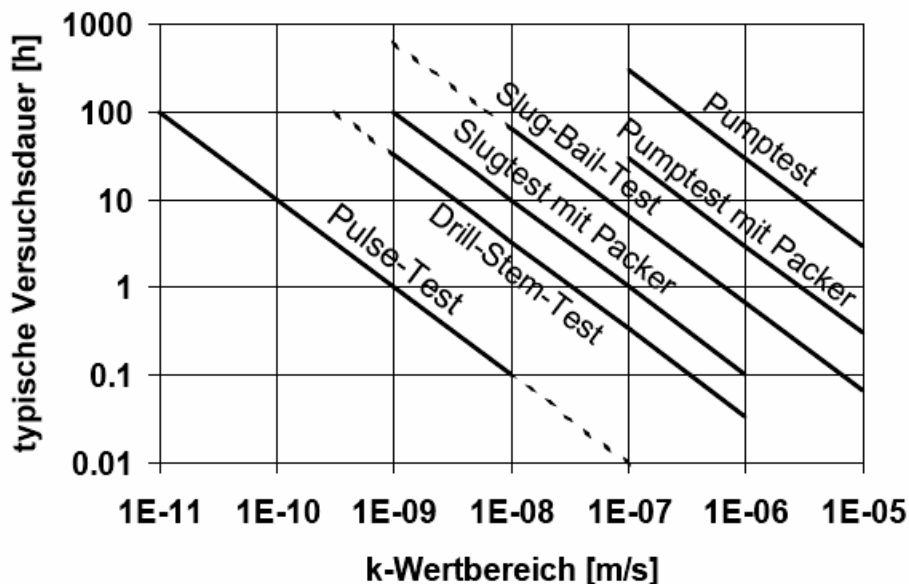


Bild 1-4.1: Anhaltswerte zur Versuchsdauer ausgewählter Verfahren in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit bei 5 m Schichtmächtigkeit

Speziell zur Planung der Durchlässigkeitsuntersuchungen in potentiellen Barrieregesteinen dient ein Ablaufschema (Anlage 1-4.1), das in Abhängigkeit von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen am Standort die Vorgehensweise zur Herstellung bzw. zum Ausbau von Aufschlüssen und darin möglichen Testverfahren aufzeigt. Das Ablaufschema unterscheidet Verfahren zur orientierenden Voruntersuchung und zur detaillierten Bestimmung der hydraulischen Kennwerte.

Da die Bohrloch- und Gebirgsverhältnisse (Standicherheit, Wassersättigung, Durchlässigkeit) erst während der Untersuchungen genauer bekannt werden, dürfen Testmethoden, Teststrecken, Testdauer und ggf. Fließraten durch das Leistungsverzeichnis nicht zu starr vorgegeben werden. Es muss eine den angetroffenen Untergrund- und Durchlässigkeitsverhältnissen angepasste Vorgehensweise ermöglicht werden, bei der Testart und Versuchsdurchführung mit dem Gutachter abgestimmt werden können.

Bereits beim Abteufen der Erkundungsbohrungen sollten einfache Versuche zur orientierenden Untersuchung durchgeführt werden (z. B. Auffüll- und Versickerungsversuche). Anhand von Bohrkernaufnahmen können sich Hinweise auf hydraulisch zu testende Bohrlochabschnitte ergeben. Besonderes Augenmerk ist in diesem Zusammenhang auf wasserführende Schichten, Trennflächen und Trennflächenbeläge sowie Verwitterungsgrade zu legen.

Geophysikalische Bohrlochmessungen stellen eine hilfreiche Ergänzung des Erkundungsprogramms dar (Empfehlung E 1-3). Daraus abzuleitende Daten zur Bohrlochgeometrie, Gesteinsausbildung, Porosität, Gesteinsdichte, zum Tongehalt u.a. lassen Rückschlüsse auf die Gebirgsdurchlässigkeit zu.

In der hydrogeologischen Feldpraxis gelegentlich eingesetzte Tracerverfahren sind wegen zu geringer Fließgeschwindigkeiten zur Beurteilung von schwachen Gebirgsdurchlässigkeiten in der Regel nicht geeignet.

3 Verfahren zur orientierenden Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

3.1 Infiltrometer- und Versickerungsversuche

Die Durchlässigkeit oberflächennaher Böden kann mit Infiltrometer- und Versickerungsversuchen an der (präparierten) Oberfläche, in Schürfen und flachen Bohrlöchern bis etwa 2 m Tiefe untersucht werden.

Die Durchführung erfolgt i. d. R. im ungesättigten Milieu. Reproduzierbare Durchlässigkeitsbeiwerte werden erfahrungsgemäß erst ermittelt, wenn sich nach ausreichender Infiltration quasi-gesättigte Verhältnisse im Umfeld der Testbereiche eingestellt haben. Das ist dann der Fall, wenn bei konstanter Druckhöhe eine konstante Versickerung pro Zeiteinheit erfolgt. Bei geringen Infiltrationsraten kann diese über Mariott'sche Flaschen gewährleistet werden (DIN 19 682 Blatt 7). Alternativ kann auch eine automatische Wasserstands-Regleinrichtung aus Wasserstands-Sensor und Magnetventilregelung eingesetzt werden. Für die Wassermengenmessungen wird eine kontinuierliche Registrierung im Wasservorratsbehälter empfohlen.

Verdunstungsverluste sind bei längerer Testdauer durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden.

3.1.1 Infiltrationsversuche

Mittels Infiltrationsversuchen kann die Durchlässigkeit nur sehr oberflächennah bestimmt werden. Für die Bestimmung kommen Doppelring-Infiltrationsmeter oder Tensions-Infiltrationsmeter zum Einsatz.

Beim Doppelring-Infiltrationsmeter soll das aus dem Außenring versickernde Wasser die unmittelbare Umgebung des Ausströmbereiches vom Innenring vorsättigen und bewirken, dass die Infiltration aus dem Innenrohr möglichst vertikal gerichtet wird. Damit bei geringen Durchlässigkeiten keine Stagnation der Versickerung aus dem Innenrohr eintritt, sollte im Innenring eine deutlich größere Druckhöhe herrschen. Dies wird am besten durch ein Gerät mit Aufsatzrohr erreicht.

Die Bestimmung der Durchlässigkeit bei konstanter Druckhöhe kann nach BENNER ET AL., 1991 i.d.R. aus den Daten des letzten Versuchsdrittels erfolgen:

$$k = \frac{Q d}{4 r_i^2 h} \quad [m/s]$$

mit:

Q = Versickerungsmenge	[m ³ /s]
d = Dicke der durchströmten Bodenschicht im Innenrohr	[m]
r_i = Durchmesser der Innenrohres	[m]
h = Druckhöhe in Innen- bzw. Aufsatzrohr	[m]

Beim Tensions-Infiltrationsmeter erfolgt die Infiltration aus einer auf den Boden gesetzten geschlossenen Haube, die mit Wasser gefüllt ist. Die wirksame Druckhöhe an der Bodenoberfläche kann zwischen Null und einem Unterdruck bis zum Luftdurchtrittspunkt des Bodens frei gewählt werden. Über ein U-Rohrmanometer an der Haube wird diese Druckhöhe exakt gemessen. Die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes erfolgt aus den im Versuch ermittelten stationären Fließraten nach WOODING, 1968.

Infiltrationsversuche sind nur in homogenen, feinkörnigen Böden (Feinsand bis Feinschluff) sinnvoll einsetzbar. Der Messbereich liegt zwischen $k=5 \cdot 10^{-8}$ und 10^{-5} m/s.

3.1.2 Schurfversickerung

Hierbei wird ein möglichst rechteckiger Schurf mit Wasser befüllt. Bei durchlässigem Untergrund wird gewöhnlich die Wassermenge bestimmt, die bei konstanter Wasserspiegelhöhe versickert. Die Auswertung kann nach MAROTZ, 1968 erfolgen, zitiert in WIEDERSPAHN, 1997:

$$k = \frac{2 Q l_s}{LB(l_s + z)} \quad [m/s]$$

mit:

Q = Versickerungsmenge	[m ³ /s]
L = Länge des Schurfes	[m]
B = Breite des Schurfes	[m]
l_s = Abstand Schurfsohle zum Grundwasserspiegel	[m]
z = Höhe der Wassersäule im Schurf	[m]

Der Faktor 2 ist eine Näherung für den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert. Da in dieser Auswertungsformel die Versickerung über die Flanken nicht berücksichtigt wird, sollte keine zu hohe Wassersäule (z) im Schurf eingestellt werden.

Für die überschlägige Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit mit fallender Druckhöhe, kann vereinfachend die Wasseroberfläche im Schurf mit der Länge L und Breite B in die Wasseroberfläche eines Bohrloches mit dem Radius

$$r = \sqrt{\frac{LB}{\pi}}$$

umgerechnet werden. Weiter wird dann wie bei einem instationären Auffüllversuch im Bohrloch vorgegangen (Kap. 3.2). Dieses Verfahren eignet sich für k -Werte zwischen 10^{-8} und 10^{-5} m/s.

3.1.3 Bohrlochversickerung

Der Versuch ist in allgemeiner Form auch als Auffüllversuch (stationärer Versuch) in DIN 18 130, Teil 2 beschrieben.

Speziell zur Untersuchung Geologischer Barrieren können in flachen Bohrlochern von meist geringen Durchmessern Bohrlochversickerungsversuche nach REYNOLDS ET AL., 1983, 1985 durchgeführt werden.

Es wird bei konstant gehaltener Druckhöhe aus einem zylindrischen Bohrloch die in den Boden pro Zeiteinheit infiltrierte Wassermenge gemessen. Bei geringen Durchlässigkeiten bzw. Wassermengen kann hierzu das Prinzip der Mariott'schen Flasche angewendet werden.

Die Auswertung erfolgt nach REYNOLDS ET AL., 1985. Der Messbereich für den k-Wert liegt zwischen 10^{-9} und 10^{-5} m/s.

3.2 Auffüll- und Wiederanstiegsversuch in Bohrlöchern

Bei Auffüllversuchen wird Wasser in ein unverrohrtes oder in ein ausgebautes Bohrloch gefüllt und das Absinken des Wasserspiegels beobachtet. Bei den Wiederanstiegsversuchen wird der Wasserspiegel im Bohrloch abgesenkt und der Wiederanstieg beobachtet.

Je nach Ausbau ergeben sich im Testbereich unterschiedliche Strömungsverhältnisse, die bei der Auswertung zu berücksichtigen sind. Dabei müssen Versuche in der ungesättigten Zone von denen in der gesättigten Zone unterschieden werden. Bei Versuchen in der ungesättigten Zone werden die Daten ausgewertet, die erst nach Sättigung des zu untersuchenden Gebirgsbereiches gemessen werden.

Die Verfahren sind für Gebirge mit Durchlässigkeitsbeiwerten von $k = 10^{-9}$ bis 10^{-5} m/s geeignet. Verfahren zur Auswertung der Versuche finden sich in SCHREINER ET AL., 1998 sowie in DIN 18 130, Teil 2 als Auffüll- bzw. Absenkversuch (instationärer Versuch).

3.3 Squeeze-Test

Squeeze-Tests werden nur in unverrohrten Bohrlochabschnitten eingesetzt. Mit einer Serie von Squeeze-Tests kann als orientierende Untersuchung innerhalb kurzer Zeit die relative Durchlässigkeitsverteilung in einem Bohrloch ermittelt werden. In tieferen Erkundungsbohrungen haben sich Squeeze-Testserien mit Packerabständen von 2 bis 3 m und einer Testdauer bis 30 Minuten bewährt.

Beim Squeeze-Test wird ein Doppelpackerteststrang im Bohrloch abschnittsweise versetzt (i. d. R. von unten nach oben). Beim Aufblasen der Packer mit geschlossenem Testventil wird das Wasservolumen zwischen den Packern eingeschlossen. Nach dem Abdichten der Packer gegen die Bohrlochwand bewirkt die weitere Volumenausdehnung der Packer bis zum Erreichen des endgültigen Aufblasdruckes einen Überdruck im eingeschlossenen Wasservolumen. Je nach Gebirgsdurchlässigkeit der abgepackerten Bohrlochstrecke baut sich dieser Überdruck unterschiedlich schnell ab. Eine Korrelation der Geschwindigkeit des Druckabbaus mit k-Werten ist möglich (HEKEL, 1994). Wesentlicher ist jedoch der relative Vergleich der Squeeze-Testergebnisse. Auf der Grundlage dieses Vergleichs können die für quantitative Messungen relevanten Bohrlochstrecken ausgewählt und die jeweils geeignete Testart auf die dann bekannte Größenordnung der Durchlässigkeit abgestimmt werden.

4 Verfahren zur detaillierten Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

4.1 Tests mit impulsartiger Anregung

4.1.1 Slug-Bail-Test

Beim Slug-Bail-Test handelt es sich um einen modifizierten Auffüllversuch, bei dem durch einen Verdrängungskörper (Slug-Körper) eine schlagartige Anhebung des Wasserspiegels hervorgerufen wird. Nach Ende der Slug-Phase (Erreichen des Ruhewasserspiegels) erfolgt durch die schnelle Entnahme des Verdrängungskörpers eine Absenkung des Wasserspiegels. Die zeitliche Änderung der Wasserspiegelhöhe wird gemessen.

Mittels eines Packers kann auch ein bestimmter Bohrlochabschnitt untersucht werden. Durch Öffnen eines Testventils wird eine Verbindung zwischen dem zu untersuchenden Gebirgsabschnitt unter dem Packer und dem Testgestänge über dem Packer hergestellt. War das Testgestänge vorher über den Formationsdruck mit Wasser gefüllt, so fließt dieses nach Öffnen des Testventils bis zum Druckausgleich in das Gebirge (Slug-Injection). Wenn umgekehrt der Formationsdruck höher liegt als der Wasserspiegel im Testgestänge, so fließt nach Öffnen des Testventils Wasser aus dem Gebirge in das Testventil (Slug-Withdrawl-Test).

Zur Auswertung stehen prinzipiell zwei verschiedene Gruppen von Verfahren zur Verfügung. Die Geradenlinienverfahren nach HVORSLEV, 1951 erlauben bereits eine Auswertung bei unvollständiger Druckerholung (mind. 10 bis 30 %), berücksichtigen jedoch keine Bohrloch- und bohrlochnahen Effekte (z. B. Skin-Effekt). Mit Typkurvenverfahren nach COOPER ET AL., 1967 (zitiert in SCHREINER ET AL., 1998) können Skin-Effekte einbezogen werden. Sie setzen jedoch eine längere Messdauer zur Auswertung voraus (ca. 70 bis 90 %). Da in Geringleitern oft Skin-Effekte auftreten, die das Ergebnis um 1 bis 2 Größenordnungen beeinflussen können, ist der Gebrauch von Typkurvenverfahren zu empfehlen.

Die Verfahren sind für den Durchlässigkeitsbereich von $k = 10^{-9}$ bis 10^{-5} m/s geeignet.

4.1.2 Einschwingversuch

Ein mit dem Slug-Test verwandter Versuch ist das Einschwingverfahren. Hierbei wird der Wasserspiegel mit Hilfe von Druckluft abgesenkt. Die Messstelle muss so beschaffen sein, dass sie sich oben verschließen lässt und die Druckluft nicht in das Gebirge entweichen kann. I. d. R. muss hierzu der Ruhewasserspiegel im Vollrohrbereich liegen. Nach der Equilibrierung lässt man den Luftdruck aus der Messstelle entweichen, die Wiedereinstellung des Ruhewasserspiegels wird mit einem automatischen Drucksensor in hoher zeitlicher Auflösung (< 1 Sek.) gemessen.

In Abhängigkeit von der Messstellengeometrie und der Durchlässigkeit wird sich der Wasserspiegel mehr oder weniger schnell einschwingen (oszillierender Verlauf) oder eher langsam der Ausgangslage nähern (asymptotischer Verlauf). Die Auswertung erfolgt nach DIN 18 130, Teil 2.

Das Verfahren eignet sich für durchlässigen Untergrund ($k > 10^{-7}$ m/s). Für schwach durchlässigen Untergrund wie Geologischen Barrieren ist das Verfahren nicht geeignet, da u.a. Skin-Effekte nicht ausreichend erkannt werden können (Slug-Bail-Test).

4.1.3 Drill-Stem-Test

Der Drill-Stem-Test (DST) wird sowohl in verrohrten als auch in unverrohrten Bohrlöchern mit offener, glatter Bohrlochwandung eingesetzt. Der erfasste Gebirgsbereich beträgt einige Dezimeter bis mehrere Meter.

Beim Drill-Stem-Test ist am unteren Ende eines Packergestängerohres ein Testventil eingebaut, mit dem die Verbindung zwischen dem abgepackerten Bohrlochintervall und dem Gestängerohr geöffnet und geschlossen werden kann. Beim Einbau des Packergestänges in das Bohrloch bleibt das Testventil in der Regel geschlossen. Nach Einbau der Apparatur in der vorgesehenen Untersuchungstiefe werden die Packer aufgeblasen und anschließend das Testventil geöffnet.

In Abhängigkeit von der Entwicklung der Fließzeitkurve und der Durchlässigkeit des abgepackerten Gebirgsabschnittes wird das Testventil geschlossen. Nach dem Schließen des Testventils steigt der Druck im Bohrlochabschnitt bis zum hydrostatischen Druck des Grundwasserleiters (Druckaufbauphase) an. Die Fließ- und Druckaufbauphasen können zur besseren Bewertung mehrfach wiederholt werden (Bild 1-4.2). Dadurch können evtl. verstopfte Strömungswege an der Bohrlochwand freigespült werden.

Der Druckverlauf wird als Funktion der Zeit registriert. Die Fließphase kann als unvollständiger Slug-Bail-Test betrachtet und ausgewertet werden. Die Auswertung des Druckanstiegs erfolgt unter der Voraussetzung konstanten Zustroms in der Fließphase nach THEIS, 1935 oder HORNER, 1951. Bei VOIGT UND WAGNER, 1978 (zitiert in SCHREINER ET AL., 1998) wird zusätzlich eine sich während der Druckaufbauperiode verändernde Fließrate berücksichtigt. Weiterhin stehen eine Reihe von Typkurvenverfahren und rechnergestützte Methoden zur Verfügung.

Diese Untersuchungsmethode ist für Gebirgsdurchlässigkeiten von $k = 10^{-9}$ bis 10^{-7} m/s geeignet.

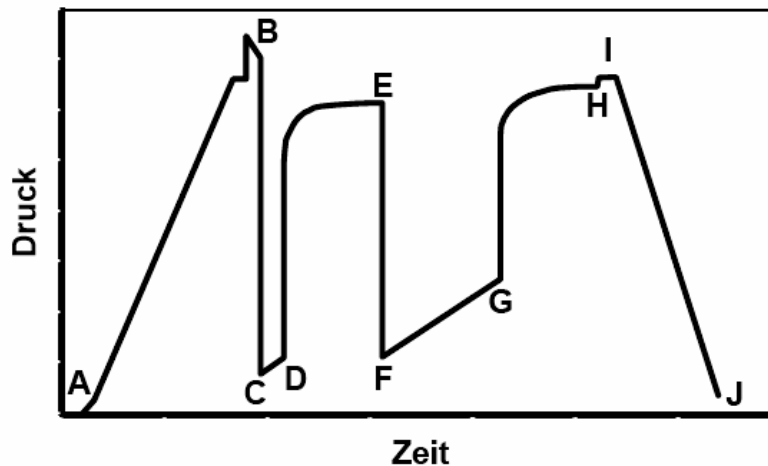


Bild 1-4.2: Druckverlauf bei einem Drill-Stem-Test – Schemaskizze

- A-B: Einbau der Packergarnitur in das Bohrloch, Aufblasen der Packer und Schließen des Testventils
- B/C: Öffnen des Testventils
- C-D: 1. Fließphase
- D: Schließen des Testventils
- D-E: 1. Druckaufbaukurve
- E/F: Öffnen des Testventils
- F-G: 2. Fließphase
- G-H: 2. Druckaufbaukurve
- H-I: Lösen der Packer, hydrostatischer Druck der Spülungssäule
- I-J: Ausbau der Testgarnitur aus dem Bohrloch

4.1.4 Pulse-Test

Der Pulse-Test ist ein modifizierter Slug-Test. Nach erfolgtem Druckimpuls wird jedoch nicht die Wiedereinstellung des Testrohrwasserstandes, sondern der Abbau bzw. Aufbau des Druckes im Testintervall gemessen (BREDEHOEFT UND PAPADOPULOS, 1980, zitiert in SCHREINER ET AL., 1998).

Bei der Versuchsanordnung wird in einem mit Packern abgedichteten Bohrlochintervall (Einbohrlochmethode) nach Einstellung des Ruhedruckpotentials eine impulsartige Druckänderung herbeigeführt. Beim Druckerhöhungs-Test wird eine kurzfristige Druckbeaufschlagung und beim Druckabsenk-Test eine kurzfristige Druckminderung vorgenommen. Nach dem Schließen des Testventils wird der Druckabbau/-aufbau im abgepackerten Bereich als Funktion der Zeit aufgezeichnet (Bild 1-4.3).

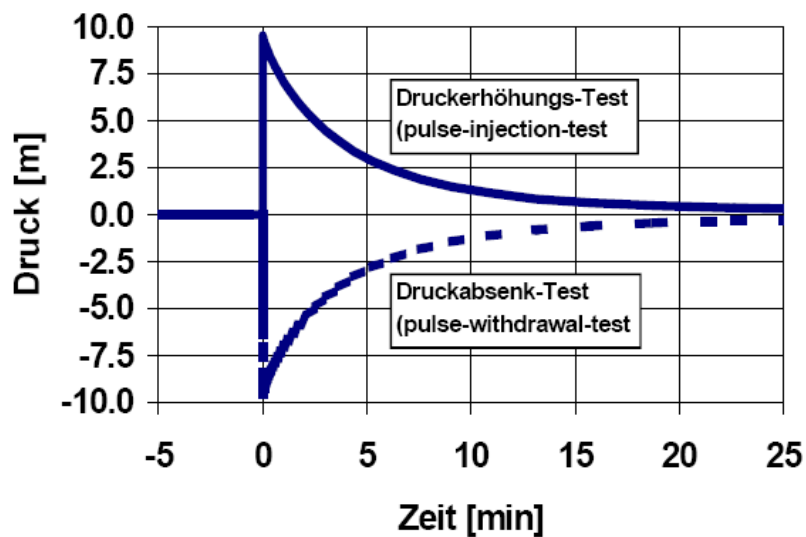


Bild 1-4.3: Verlauf von Druckkurven bei Pulse-Tests – Beispiel

Beim Pulse-Test wird nur die unmittelbare Umgebung des Bohrloches bis ca. 1 m erfasst. Aufgrund der geringen Eindringtiefe des Druckimpulses wird die Auswertung u. a. auch von Bohrlochwandeffekten (Skin-Effekt) und der Brunnenspeicherung (Bohrlochkapazitätskoeffizient) beeinflusst, die bei der Auswertung als Korrekturfaktoren berücksichtigt werden müssen. Daher werden zur Auswertung von Pulse-Tests dieselben Typkurvenverfahren eingesetzt wie zur Auswertung von Slug-Tests. Die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes mittels Typkurvenverfahren liefert bei ausreichender Messdauer gute Ergebnisse.

Während bei der Auswertung von Slug-Bail-Tests die Wasserspiegeländerung und der Radius des Testrohrs eingehen, sind diese Größen beim Pulse-Test durch die Druckänderung und einen aus der Kompressibilität zu errechnenden Ersatzradius zu ersetzen (SCHREINER ET AL., 1998). Die hierfür maßgebende Kompressibilität ist die des Gesamtsystems, bestehend aus Packer, Gebirge und Wasser. Wird dagegen nur die Kompressibilität des Wassers angesetzt, führt dies zu Ergebnissen, die bis zu zwei Zehnerpotenzen zu niedrig sind. Die Gesamtkompressibilität muss während der Versuchsdurchführung bestimmt werden.

Der Pulse-Test eignet sich insbesondere für die Messung sehr geringer Durchlässigkeitsbeiwerte von $k = 10^{-11}$ bis 10^{-8} m/s.

4.1.5 Gasdrucktest

Beim Gasdrucktest wird ein Gas als Strömungsmedium eingesetzt. Er eignet sich deshalb für die Untersuchung der ungesättigten Zone und hat den Vorteil, dass der bestehende Sättigungszustand nicht verändert und ein evtl. Quellen der Tonminerale vermieden wird. Die Messungen erfordern nur einen geringen Zeitaufwand.

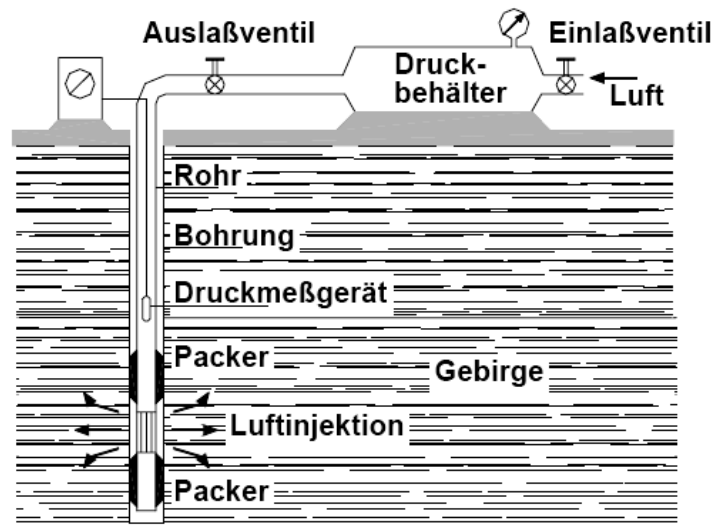


Bild 1-4.4: Messanordnung für Gasdrucktests

Die Teststrecke wird mit Packern abgedichtet und über ein Rohr mit einem Druckbehälter verbunden (Bild 1-4.4). Zur Versuchsdurchführung wird das Auslassventil des Druckbehälters schlagartig geöffnet. Das Gas strömt in das Gebirge, und der Druckabbau wird über die Zeit gemessen (Bild 1- 4.5).

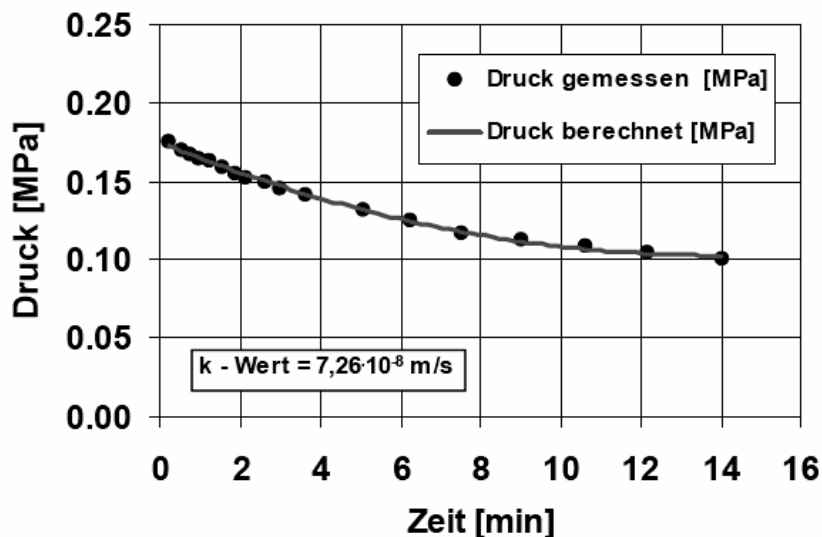


Bild 1-4.5: Typischer Druckverlauf eines Gasdrucktests mit Ausgleichskurve

Die Auswertung des Druckverlaufs setzt eine radialsymmetrische Druckausbreitung der instationären Strömung im Gebirge voraus. Die Bestimmung der Durchlässigkeit (Permeabilität [DARCY]) erfolgt dabei mit Hilfe von Typkurven, die in Abhängigkeit vom Startdruck und daraus resultierender Änderung der Kompressibilität zu berechnen sind. Dazu können auch rechnerunterstützte Auswerteverfahren verwendet werden.

Zur Umrechnung auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k sind die unterschiedlichen Viskositäten und Dichten von Gas und Wasser zu berücksichtigen. Die Auswertung erfolgt nach VOIGT UND WAGNER, 1978 (zitiert in SCHREINER ET AL., 1998).

Der Messbereich für den Durchlässigkeitsbeiwert liegt zwischen $k = 10^{-12}$ und 10^{-6} m/s.

4.2 Versuche mit Pump- oder Injektionsphase

Während einer Pump- oder Injektionsphase wird dem Gebirge mit konstanter Rate Wasser entnommen oder zugeführt. Aus den resultierenden Wasserstands- bzw. Druckänderungen lässt sich die Transmissivität ermitteln. Zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit aus der Transmissivität ist die hydraulisch wirksame Mächtigkeit aus dem geologischen Profil (Kernaufnahme/Schichtbeschreibung) abzuleiten. In Verbindung mit Packern können auch einzelne Bohrlochabschnitte untersucht werden.

Da Versuche mit Pump- oder Injektionsphase in Geringleitern besonders stark von Brunnenspeicherungs- und Skin-Effekten beeinflusst werden, muss die Auswertung mit Verfahren erfolgen, die den Einfluss dieser Bohrloch- und bohrlochnahen Einflüsse (innere Randbedingungen) berücksichtigen und deren mathematische Abtrennung bei der Transmissivitätsberechnung ermöglichen.

Durch den Einsatz dieser Testverfahren in Geringleitern soll häufig untersucht werden, ob durchlässigere Bereiche wie z. B. Sandlinsen oder Klüfte begrenzt sind. Daher muss die Auswertung auch die Diagnose und Bestimmung hydraulischer Ränder (äußere Randbedingungen) zulassen.

Innere und äußere Randbedingungen sind am besten aus einer doppeltlogarithmischen Auftragung des Druckverlaufs gegen die Zeit zu erkennen, wobei die mathematische Ableitung des Druckverlaufs eine genauere Bewertung und bessere Abgrenzung einzelner Einflüsse erlaubt. Anhand dieser so genannten „diagnostischen Plots“ lässt sich auch beurteilen, ob das nach hydrogeologischen Informationen über den getesteten Gebirgsbereich ausgewählte Gebirgsmodell bzw. Auswerteverfahren zutreffend ist.

Die Auswertung erfolgt mittels Typkurvenverfahren, für innere Randbedingungen und Transmissivität nach GRINGARTEN ET AL., 1979 und BOURDET ET AL., 1983 (zitiert in SCHREINER ET AL., 1998). Zur Berücksichtigung der äußeren Randbedingungen existieren nur für sehr einfache Fälle geeignete Typkurven. In der Regel ist mittels geeigneter Software eine für das Gebirgsmodell der Durchlässigkeitsbestimmung und der inneren und äußeren Randbedingungen kombinierte Typkurvenanpassung durchzuführen.

4.2.1 Pumpversuch (mit Beobachtungspegeln)

Beim Pumpversuch wird i. d. R. durch die Wahl einer hohen Entnahmerate oder langen Versuchszeit ein größeres Gebirgsvolumen von mittlerer bis guter Durchlässigkeit untersucht. Durch Auswertung der Wasserstandsänderungen in zusätzlichen Grundwassermessstellen in Abhängigkeit von der Zeit erhält man ein von Störungen im Brunnennahbereich weitgehend unabhängiges Versuchsergebnis. Zusätzlich ist die Bestimmung der Speichereigenschaften des Gebirges möglich. Vor Beginn des Pumpversuchs sind in allen Messstellen Messungen des Ruhegrundwasserstandes, des Luftdruckes sowie des Niederschlages über mindestens einen Tag, besser mehrere Tage erforderlich. Sinnvoll ist auch die Registrierung der Wasserstandsänderungen in nahen, aber von der Entnahme unbeeinflussten Messstellen. Damit können natürliche Veränderungen während des Versuchs erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Pumpversuche sind nur bei Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwerten von $k > 10^{-6}$ m/s anwendbar. Damit sind Pumpversuche im Zusammenhang mit Deponiestandorten nur im durchlässigen Umfeld oder in größeren durchlässigen Strukturen einer Geologischen Barriere sinnvoll.

4.2.2 Leistungstest

Der Leistungstest dient der Ermittlung der Leistungsfähigkeit eines Brunnens zur Wasserentnahme. Diese wird im Allgemeinen benötigt, um die Funktionsfähigkeit eines Brunnens sowie die Wirksamkeit von hydraulischen Sanierungsmaßnahmen zu planen oder zu optimieren. Der Leistungstest wird in mindestens drei Stufen mit jeweils ansteigenden Entnahmeraten durchgeführt. Die Dauer der einzelnen Stufen richtet sich nach der Gebirgsdurchlässigkeit und sollte solange andauern bis nur noch geringe (1 bis 2 cm pro Stunde) Wasserspiegeländerungen festzustellen sind. Aus dem Verhältnis zwischen Entnahmerate und zugehöriger Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen, wird die spezifische Ergiebigkeit C als Quotient von Entnahmerate Q (l/s) und der Absenkung s (m) im Brunnen angegeben.

4.2.3 Pumptest (Einbohrlochmethode)

Pumptests als Einbohrlochmethode können in solchen Fällen eingesetzt werden, in denen Inhomogenitäten, Anisotropien oder die Reichweite von hydraulisch höher leitfähigen Horizonten/Klüften im ansonsten gering leitenden Gebirge untersucht werden sollen. Ferner können mit ihnen nicht eindeutige Ergebnisse anderer Testarten überprüft werden.

Mit Hilfe von Packern oder zoniertem Messstellenausbau können einzelne, in einem Bohrloch erschlossene Gebirgsbereiche getestet werden.

Pumptests sind nur bei Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwerten von $k > 10^{-7}$ m/s anwendbar.

Ein **Kurzpumptest** kann als hydraulisch unvollständiger Pumptest zur Gewinnung einer Wasserprobe und zur überschlägigen Abschätzung der Durchlässigkeit im Testbereich herangezogen werden.

4.2.4 Injektionstest

Beim Injektionstest wird Wasser mit konstanter Rate in eine Grundwassermessstelle, ein offenes Bohrloch oder über ein Packersystem in einen definierten Bohrlochabschnitt des gesättigten Gebirges eingegeben. Die resultierende Druckerhöhung wird als Wasserstand im Bohrloch bzw. Testrohr gemessen und ausgewertet. Bei der Auswertung werden Injektionstests wie Pumptestes mit negativer Entnahmemenge behandelt.

Die Druckerhöhung und damit die Injektionsrate ist nach folgenden Kriterien festzulegen:

- Vermeidung des Aufreißens des Gebirges
- Vermeidung von Wasserüberlauf im Bohrloch bzw. Packertestrohr
- ausreichend große Druckdifferenz

Bei **WD-Tests** wird Wasser in das Gebirge verpresst. Die Versuchsdurchführung mit mehreren Druckstufen bei veränderlicher Rate zielt jedoch auf die Ermittlung der Injizierbarkeit des Gebirges, z. B. zur Planung von Abdichtmaßnahmen im Talsperren- und Dammbau. Es gibt zahlreiche Ansätze zur Berechnung des k-Wertes aus dem Druckverlauf. Diese setzen für geringdurchlässiges Gebirge meist unzutreffende Annahmen und unwirtschaftlich lange Versuchszeiten voraus. Zur Bestimmung geringer Durchlässigkeiten sind klassische WD-Tests daher nicht geeignet (HEKEL, 1994).

4.2.5 Fluid-Logging

Mit dem Leitfähigkeits-Fluid-Logging kann eine tiefengenaue Lokalisierung und Quantifizierung von Grundwasserzuflüssen in offenen Bohrungen und Grundwassermessstellen vorgenommen werden, (TSANG UND HUFSCHMIED, 1988 (zitiert in SCHREINER ET AL., 1998; LÖW ET AL., 1988 und HEKEL, 1994).

Das Wasser im Bohrloch wird gegen ein Kontrastfluid mit deutlich niedrigerer elektrischer Leitfähigkeit ausgetauscht. Nach dem Austausch werden die Zuflüsse in das Bohrloch durch Absenken des Ruhewasserspiegels mit konstanter Pumprate aktiviert. Während der Pumpphase werden mit einer Sonde kontinuierlich Leitfähigkeitslogs in der Bohrung gefahren (Bild 1-4.6). Zuflussstellen lassen sich in den Logs durch Leitfähigkeitsänderungen lokalisieren. Mit analytischen und numerischen Auswerteverfahren können diese Zuflüsse quantifiziert werden. Für die einzelnen Zuflüsse werden aus dem Absenkungsverlauf während der Messung und den berechneten Zuflussraten die Transmissivitäten bestimmt.

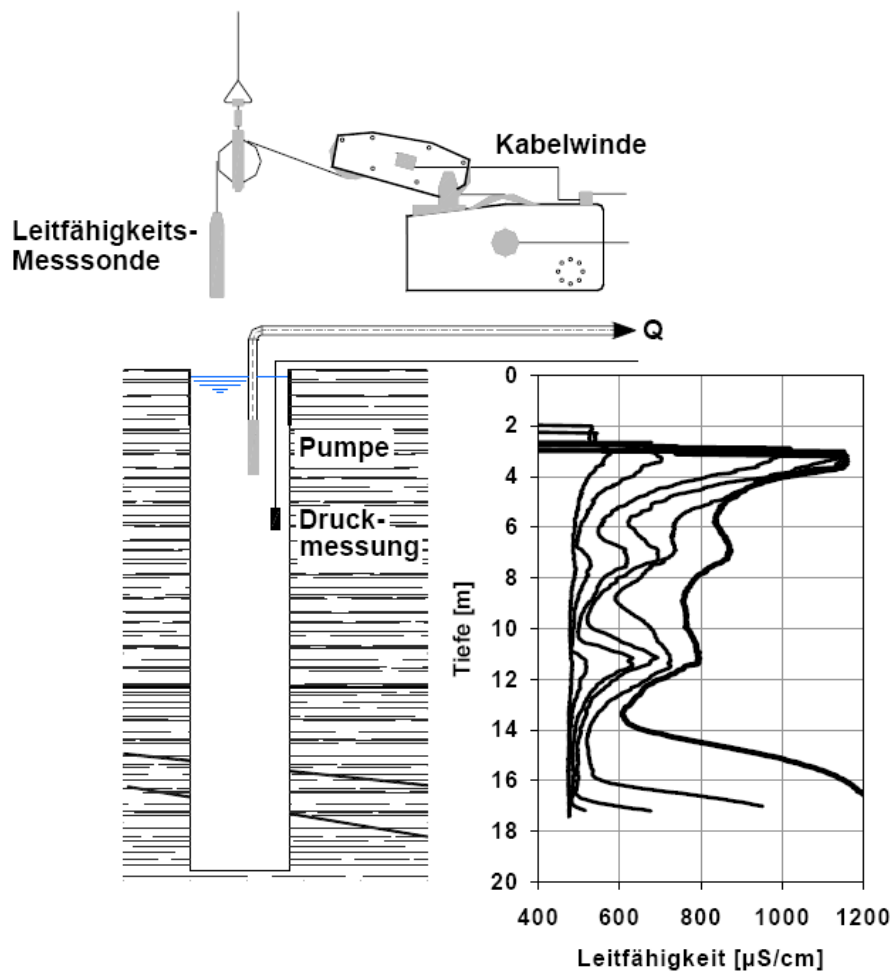


Bild 1-4.6: Beispiel einer Leitfähigkeits-Fluid-Logging-Messung in einem offenen Bohrloch. Die Zuflüsse in 3, 7, 11 und 17 m Tiefe zeichnen sich durch deutliche Leitfähigkeitserhöhungen in den über ca. 2 Stunden gemessenen Logs ab.

Gegenüber Packertests hat das Fluid-Logging-Verfahren den Vorteil, dass sich Tiefe und Transmissivität von Zuflussbereichen in einer Bohrung mit nur einem Versuch bestimmen lassen. Dabei treten durch Packerversuche verfahrensbedingte Dichtigkeits bzw. Umläufigkeitsprobleme nicht auf. Das Verfahren ist in offenen Bohrungen oder in Bohrungen mit verfilterten Gebirgsbereichen ab 10 bis 20 m Wassersäule einsetzbar.

Da sich über Leitfähigkeitsveränderungen Zuflüsse auch noch in einer Größenordnung von einigen ml/min bestimmen lassen, eignet sich das Fluid-Logging für die Messung von Durchlässigkeiten zwischen 10^{-8} und 10^{-4} m/s.

4.2.6 Sättigungsinjektionstest

Zur Ermittlung hydraulischer Kenngrößen von Bohrlochabschnitten in der ungesättigten Zone haben sich Sättigungsinjektionstests bewährt. Dabei wird zunächst Wasser mit konstanter Rate in einen offenen oder abgepackerten Bohrlochabschnitt bis zur Sättigung des zu untersuchenden Gebirgsbereichs injiziert. Sobald sich ein Gleichgewicht zwischen Injektionsrate und Druckspiegel (stationäre Strömung) oder ein über den Logarithmus der Zeit geradliniger Anstieg des Druckspiegels (infinite radiale instationäre Strömung) eingestellt hat, werden der Basisinjektionsrate zusätzliche hydraulische Anregungen überlagert.

Diese können z. B. aus Slug-Bail-Anregungen bestehen, hervorgerufen durch Eintauchen oder Herausziehen eines Verdrängungskörpers in das Testrohr oder kurzfristige Erhöhung oder Verminderung der Basisinjektionsrate. Durch eine andauernde Verminderung der Basisinjektionsrate um einen konstanten Betrag kann auch ein Pumpstest superponiert werden, der sich instationär wie ein Pumpstest in der gesättigten Zone auswerten lässt. Der Wiederanstieg wird durch das Erhöhen der Injektionsrate auf die ursprüngliche Basisinjektionsrate simuliert (Bild 1-4.7).

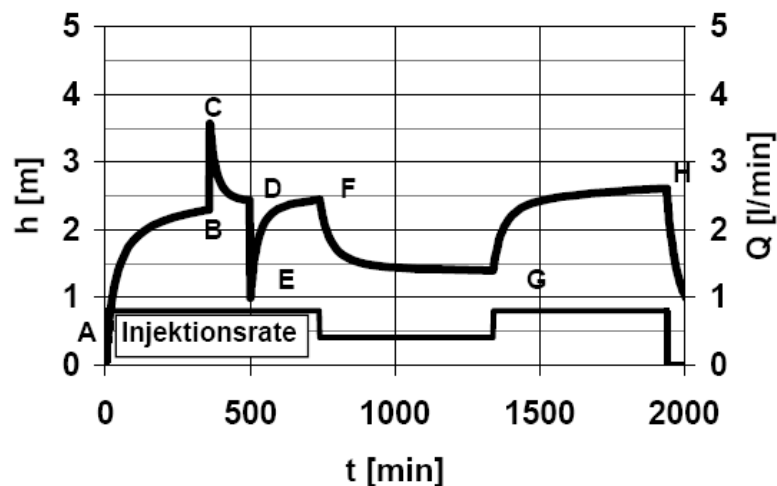


Bild 1-4.7: Schematischer Verlauf eines Sättigungsinjektionstests. Druckverlauf mit aufgesetzten Slug- (B-C-D), Bail- (D-E-F) und Pumpstests (F-G-H)

Da bei der Versuchsdurchführung relativ kurze hydraulische Anregungen nach einer längeren Sättigungsphase überlagert werden, wird die Auswertung nicht durch die ungesättigten Randbereiche beeinflusst und können daher wie unter gesättigten Bedingungen ausgewertet werden (HEKEL, 1994). Die für die Auswertung des superponierten Pumpstests maßgebende Rate ist die Differenz der beiden Injektionsraten. Werden die Slug-, Bail- oder Pumpanregungen einer instationären Strömung überlagert, so sind die Wasserspiegeldaten der superponierten Tests entsprechend dem Basistrend zu korrigieren.

Der Anwendungsbereich liegt bei k -Werten zwischen 10^{-7} und 10^{-3} m/s.

5 Qualitätssicherung

5.1 Allgemeines

Voraussetzung für die korrekte Durchführung der Testverfahren ist ein einwandfreier Aufschluss nach DIN 4022. i. d. R. sollten die Testverfahren in gekernten – nach Möglichkeit unverrohrten – Erkundungsbohrungen durchgeführt werden. Beim Einsatz von Spülungen in Bohrungen sollten nur Wasser, Schaum oder Luft bei geringen Spüldrücken verwendet werden. Bohrlöcher sind anschließend klarzuspülen bzw. zu säubern. Oberflächennahe Aufschlüsse (Schürfe) sind sauber auszuheben und zu präparieren.

Häufig auftretende Fehlerquellen, die sich mit abnehmender Durchlässigkeit stärker auswirken, sind:

- Zusetzen der Bohrlochwand oder Sohle
- Inhomogenitäten des Gebirges
- Umläufigkeit bei Packereinsatz
- hydraulischer Kurzschluss verschiedener Gebirgsabschnitte
- Veränderungen innerhalb der Teststrecken während des Versuchs (z. B. Quellvorgänge)
- nichthydraulische Störfaktoren (z. B. Temperatur, Viskosität)
- ungenaue Datenerfassung
- nicht ausreichende Versuchsdauer
- Undichtigkeit der Versuchsanlage oder des Messstellenausbaus
- Wahl eines unzutreffenden Strömungsmodells bzw. Auswerteverfahrens

Es ist daher unangemessen, die ermittelten k-Werte bei der üblichen Exponentialschreibweise mit Nachkommastellen anzugeben.

Aus der Komplexität der Durchlässigkeitsversuche in gering durchlässigem Gebirge ergibt sich die Notwendigkeit einer fachkompetenten und intensiven Betreuung der Aufschlussarbeiten, Vorversuche und Versuchsplanung sowie der Versuchsdurchführung und -auswertung bis zur Interpretation und Dokumentation.

5.2 Versuchstechnik

Standard bei Bohrlochversuchen ist eine digitale Messwerterfassung sowie die kontinuierliche Aufzeichnung aller Versuchsparameter. Bei orientierenden Feldversuchen können auch Handmessungen (z. B. Kabellichtlotmessungen) ausreichend sein.

Bei den eingesetzten Drucksensoren ist darauf zu achten, dass der Wasserdruck bereits im Sensor in ein digitales Signal umgewandelt wird und eine automatische Kompensation des atmosphärischen Luftdruckes erfolgt. Die Messgenauigkeit dieser Sensoren liegt im Millimeterbereich. Bei den in flachen Bohrlöchern üblichen geringen Absenk- bzw. Auffüllhöhen sollte eine Messgenauigkeit von 0,5 cm

gefordert werden.

Bei Pump- oder Injektionsversuchen erfolgt die Messung der i. d. R. geringen Durchflussraten mittels geeigneter Geräte, z. B. magnetisch induktiver Durchflussmesser. Damit ist auch eine Erfassung von Raten < 1 l/min zum Nachweis von k-Werten in der Größenordnung 10^{-7} bis 10^{-6} m/s möglich.

Vorrichtungen zur Messung und Steuerung von Pumpraten, entweder automatisch über Regelkreis oder mittels Handventil, müssen von Versuchsbeginn an konstante Raten ermöglichen. Die Qualität von Konstante-Rate-Versuchen ist erfahrungsgemäß gesichert, wenn die Pumprate im Mittel weniger als ± 2 % vom Sollwert abweicht.

Der Erfolg von Packertests ist nur sichergestellt, wenn ein vollständiger Abschluss des zu testenden Bohrlochabschnitts während des gesamten Versuchs gewährleistet ist. Die hierzu notwendige Abdichtwirkung der Packer sowie die Dichtigkeit der Versuchsapparatur ist durch kontinuierliche Messungen des Drucks oberhalb und unterhalb der Packer sowie des Packerdrucks zu belegen. In Zweifelsfällen ist vor Versuchsbeginn die erfolgreiche Abpackerung der Teststrecke durch Einfüllen einer ausreichenden Wassermenge über dem Packer nachzuweisen. Dabei darf sich in der Teststrecke keine Druckerhöhung bemerkbar machen. In Sonderfällen kommen zur Umläufigkeitskontrolle auch 4fach-Packersysteme in Betracht.

5.3 Datenaufzeichnung und Dokumentation

Die Messdaten sind in Zeitabständen aufzuzeichnen, die dem Versuchsverlauf angepasst sind und alle wichtigen Versuchsphasen mit einer für die Auswertung hinreichenden Anzahl von Messpunkten belegen. Je nach Standortgegebenheiten und Testart können auch Messintervalle im Sekundentakt oder kleiner erforderlich sein.

Während der Messung sollten alle Versuchsparameter nachverfolgt werden können. Dabei ist der Einsatz einer Bildschirmgrafik zu empfehlen, die neben den aktuellen Werten auch den gesamten oder ausschnittweisen Verlauf des Versuches zeigt.

Angaben zur Messstelle, zum Versuchsaufbau und zur Versuchsmethode sind zu protokollieren (Anlage 1-4.2). Darüber hinaus sind alle wichtigen Schritte während des Versuchs nachvollziehbar zu dokumentieren. Dies umfasst Kalibrierungen (insbesondere der Drucksonden auf den angetroffenen Wasserspiegel), alle Schaltvorgänge (z. B. Packer setzen/lösen, Pumpe an/aus, Testventil auf/zu), Raten und Ratenänderungen sowie in sinnvollen Zeitabschnitten durchgeführte Handmessungen bzw. Instrumentenablesungen (z. B. Kabellichtlotmessungen, Ratenmessungen, chemisch-physikalische Messparameter). Der Versuchsverlauf ist durch Zeit/Werte-Grafiken aller relevanten Versuchsparameter zu belegen.

5.4 Auswertung und Sicherung des Versuchserfolges

Der Versuchserfolg soll bereits während des Versuches durch eine Felddauswertung überprüft werden. Hierfür stehen auf dem Markt geeignete Auswertprogramme zur Verfügung, die sich auch auf Feldrechnern (Notebooks etc.) installieren lassen. Nur so können Fehlversuche frühzeitig erkannt bzw. Versuchswiederholungen vermieden und Versuchsmethode sowie -verlauf optimiert werden. Außerdem ist auf diese Weise die Testzeit auf das fachlich notwendige Maß, nämlich bis zur Auswertbarkeit des Versuchs, zu beschränken.

Literatur zu E 1-4:

- BENNER, L.H., COLDEWEY, W.G., WEBER, M., WENZEL, H.-J., 1991:
Geländemethoden zur Wasserdurchlässigkeitsbestimmung von
Lockergesteinen unter besonderer Berücksichtigung von Bergematerial.
– DMT Publik, Heft 2, Bochum.
- DIN 19682 BLATT 7, 1972: Felduntersuchungen – Bestimmung der
Versickerungsintensität mit dem Doppelzylinder-Infiltrometer
- DIN 18130-2: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 2:
Feldversuche.
- GRINGARTEN, A. C., BOURDET, D., LANDELL, P. A., KNIAZEFF, V. J., 1979:
A comparison between different skin and wellbore storage type-curves
for early-time transient analysis, presented at the SPE-AIME 54th
Annual Technical Conference and Exhibition Society of Petroleum
Engineers, SPE-8205, Las Vegas, Nevada
- HEKEL, U., 1994: Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des
Opalinustons (Unteres Aalenium) Tübinger Geowissenschaftliche
Arbeiten C18, Tübingen
- HORNER, D. R., 1951: Pressure build-up in wells Proceedings of 3rd World
Petroleum Congress, Section II: S. 503–521, Leiden
- HVORSLEV, M. J., 1951: Time lag and soil-permeability in groundwater observations
Waterways Experimental Stn. Bull. No. 36: 50 S., Waterways. US
Corps. of Engineers, Vicksburg, Miss.
- LÖW, S., EHLERS, F., ANDREWS, R. W., MCNEISH, J., VOMVORIS, S.,
HUFSCHMIED, P., 6.–12. DEZEMBER 1988: Quantitative Analysis of
Electrical Conductivity Logs in the Leuggern Borehole, Switzerland
Paper präsentiert am AGU Fall Characterization of Hydraulic and
Transport Properties of Fractured Rock, San Francisco
- REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., 1983: A reexamination of the constant head well
permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity
above the water table. - Soil Sci. 136, 250 - 268.

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., CLOTHIER, B.E., 1985: The constant head well permeameter: Effect of unsaturated flow. - Soil Sci. 139, 172 – 180

SCHREINER, M., KREYSING, K., 1998: Geotechnik, Hydrogeologie. (Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4), Berlin (Springer)

THEIS, C. V., 1935: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage Transactions Amer. Geophys. Union, Vol. 16, Nr. 2, S. 519–524

WIEDERSPAHN, M., 1997: Versickerung von Niederschlagswasser aus geowissenschaftlicher Sicht, in Heft. Nr. 15 Schriftenreihe d.BDG, 65S., 12Abb., 19 Tab., Bonn, ISBN: 3-9803528-4-6.

WOODING, R.A., 1968: Steady infiltration from a shallow circular pond. – Water Resour. Res. 4; 1259-1273.