

E 1-4 Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

Juli 2010

1 Vorbemerkungen

In dieser Empfehlung werden Feldverfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte 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 (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.

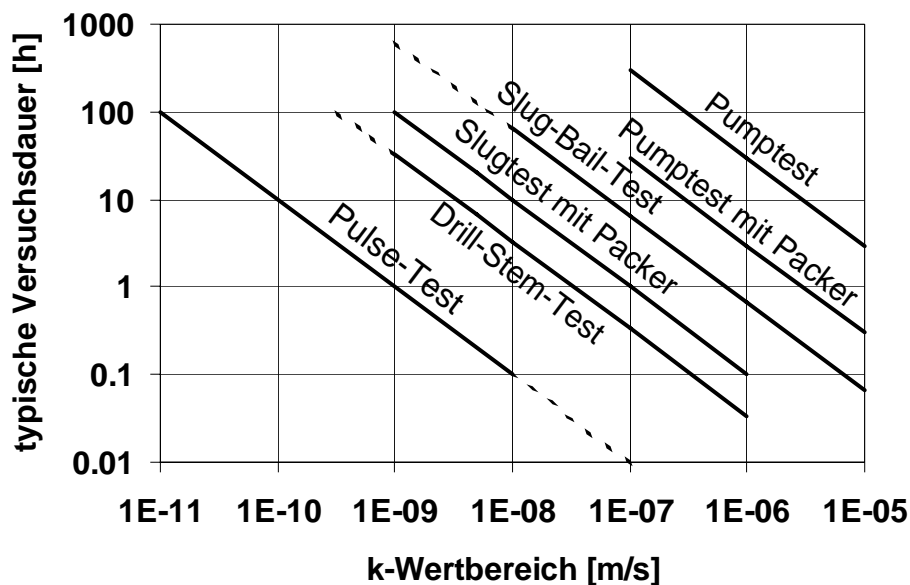


Bild 1-4.1: Anhaltswerte zur Versuchsdauer ausgewählter Verfahren in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit bei 5 m Schichtmächtigkeit

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.

Tabelle 1-4.1: Anwendungsbereiche der Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit

Zeichenerklärung	Versuche mit Pump-oder Injektionsphase		Versuche mit impulsartiger Anregung							Versickerungsversuche									
	Pumpversuch / Aquifertest	Leistungspumpversuch/Brunnente	Pumptest / Kurzpumpversuch	Injektionstest	WD-Test	Leitfähigkeits-Fluid-Logging	Sättigungs-Injektions-Test	Einschwingversuch	Slug-Ball-Test	Drill-Stem-Test	Pulse-Test	Gasdrucktest	Auffüll- / Wiederanstiegsversuch	Squeeze-Test	Standrohrversuch nach E 5-9	Infiltrometerversuch	Schurfversickerung	Bohrlochversickerung	Tracerversuch
<p>typische Anwendungsgebiete bei der Deponieerkennung</p> <p>Geologische Barriere</p> <p>Aquifere im Deponieumfeld</p> <p>Technische Barriere</p> <p>sonstige Geotechnische Fragestellungen</p> <p>Grundwasserzone</p> <p>gesättigte Zone</p> <p>ungesättigte Zone</p> <p>Aufschlußart</p> <p>Brunnen / Grundwassermeßstelle</p> <p>Bohrloch standfest</p> <p>temporär in Untersuchungsreich verillertes Bohrloch</p> <p>Schurf/Graben/präparierte Oberfläche</p> <p>Anwendungsbereich mit typischen Versuchsdauern t [Std]</p> <p>>1E-2 m2/s 100 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</p> <p>1E-3 - 1E-2 100 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</p> <p>1E-4 - 1E-3 100 10 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10</p> <p>1E-5 - 1E-4 100 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10 > 10</p> <p>1E-6 - 1E-5 >100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100</p> <p>1E-7 - 1E-6 1 10 >100 1 10 >100 1 10 >100 1 10 >100 1 10 >100 1 10 >100 1 10 >100</p> <p>1E-8 - 1E-7 100 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</p> <p>1E-9 - 1E-8 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</p> <p><1E-9 m2/s 10</p> <p>>100 Tage</p>																			
<p>typische Erkundungsreichweite R</p> <p>abhängig von der Transmissivität T [m²/s] und der Versuchszeit t [s], Näherungsweise gilt:</p> $R = \sqrt{\frac{r \cdot T}{0,0002 \cdot (gespannt)}}$ $R = \sqrt{\frac{r \cdot T}{0,1} \cdot (fret)}$ <p>Dezimeter</p> <p>Meter</p> <p>Dekameter</p> <p>Hektometer</p> <p>Anforderung an die Bestimmung der Durchlässigkeit</p> <p>Voruntersuchung größenordnungsmäßig (P=Pakettest)</p> <p>detaillierte integral über Aufschlußstrecke</p> <p>Bestimmung differenzierzeit. (P = nur mit Fackler)</p> <p>mögliche Auswerteverfahren</p> <p>empirisch oder überschlägige Formel</p> <p>stationäre Verfahren mit angenommenen Größen</p> <p>stationäre Verfahren</p> <p>instationäre Verfahren mit und ohne Randbedingungen</p>																			

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 (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

3.1.1 Vorbemerkungen

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-Regeleinrichtung 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.

3.1.2 Infiltrationsversuche

Mittels Infiltrationsversuchen kann die Durchlässigkeit nur sehr oberflächennah bestimmt werden. Ein häufig eingesetztes Gerät ist der Doppelring-Infiltrationsmeter. Dabei 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. Mit Infiltrationsmetern, die ein Aufsatzrohr besitzen, lassen sich höhere Gradienten erzeugen.

Versuchsdurchführungen mit konstanter und fallender Druckhöhe beschreibt DIN ISO 22282-5. Die Bestimmung der Durchlässigkeit bei konstanter Druckhöhe kann relativ einfach aus den Daten des letzten Versuchsdrittels erfolgen:

$$k = \frac{Q z_w}{\pi r_i^2 (h + z_w)} \quad (1)$$

mit	Q = Versickerungsvolumenstrom	[m ³ /s]
	r _i = Durchmesser des Innenrohrs	[m]
	h = konstante hydraulische Druckhöhe	[m]
	z _w = gesättigte Dicke, durch die der Durchfluss erfolgt	[m]

Die gesättigte Dicke, durch die der Durchfluss erfolgt, wird entweder aus dem Sättigungsprofil des Bodens nach dem Versuch oder rechnerisch aus der während des Versuchs versickerten Wassermenge berechnet.

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

3.1.3 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 in Anlehnung an DIN ISO 22282-5 erfolgen (vgl. 3.1.2):

$$k = \frac{2 \cdot Q \cdot z_w}{l \cdot b \cdot (h + z_w)} \quad (2)$$

mit	Q = Versickerungsmenge	[m ³ /s]
	l = Länge des Schurfs	[m]
	b = Breite des Schurfs	[m]
	h = Höhe der Wassersäule im Schurf	[m]
	z _w = gesättigte Dicke, durch die der Durchfluss erfolgt	[m]

Der Faktor 2 ist eine Näherung für den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchsdurchführung unter ungesättigten Verhältnissen. 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

$$r = \sqrt{\frac{l \cdot b}{\pi}} \quad (3)$$

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

3.1.4 Bohrlochversickerung

Speziell zur Untersuchung Geologischer Barrieren können in flachen Bohrlöchern von meist geringen Durchmessern in der ungesättigten Zone Bohrlochversickerungsversuche nach REYNOLDS/ELRICK, 1983 und REYNOLDS ET AL., 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 $k = 10^{-9}$ 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.

Auffüll- und Wiederanstiegsversuche in Bohrlöchern sind für Gebirge mit Durchlässigkeitsbeiwerten von $k = 10^{-9}$ bis 10^{-5} m/s geeignet. Verfahren zur Auswertung der Versuche unter Berücksichtigung gebräuchlicher Versuchsgeometrien finden sich im Grundbau-Taschenbuch, Teil 2 (ODENWALD ET AL. 2009) sowie in DIN ISO 22282-2.

3.3 Squeeze-Test

Mit einer Serie von Squeeze-Tests kann als orientierende Untersuchung innerhalb kurzer Zeit die relative Durchlässigkeitsverteilung in einem unverrohrten 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 (vgl. 4.1.3) 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 zur detaillierten Bestimmung relevante Bohrlochstrecken und Testverfahren ausgewählt 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 Wasserdurchlässigkeitsversuch in einem offenen System gem. DIN EN ISO 22282-2. Charakteristisch ist eine schlagartige Anhebung oder Absenkung des Wasserspiegels in der untersuchten Bohrung oder Grundwassermessstelle.

Die schlagartige Anhebung des Wasserspiegels kann durch Eintauchen eines Verdrängungskörpers (Slug-Körper) hervorgerufen werden. Nach Ende der Slug-Phase (Erreichen des Ruhewasserspiegels) erfolgt durch die schnelle Entnahme des Verdrängungskörpers eine Absenkung des Wasserspiegels (Bail-Phase). Die zeitliche Änderung der Wasserspiegelhöhe wird gemessen.

In Verbindung mit einem Packer kann auch ein bestimmter Bohrlochabschnitt

untersucht werden. Hierbei wird durch Öffnen eines Testventils 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 Testgestänge (Slug-Withdrawal-Test).

Zur Auswertung stehen prinzipiell zwei verschiedene Gruppen von Verfahren zur Verfügung. Die Geradlinienverfahren 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 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 genannten Auswerteverfahren sind bei ODENWALD ET AL., 2009 näher beschrieben.

Slug-Bail-Tests 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 Störgrößen wie z. B. der Skin-Effekt nicht ausreichend erkannt werden.

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

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.

Nach einer für die Interpretation ausreichend langen Fließphase 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.

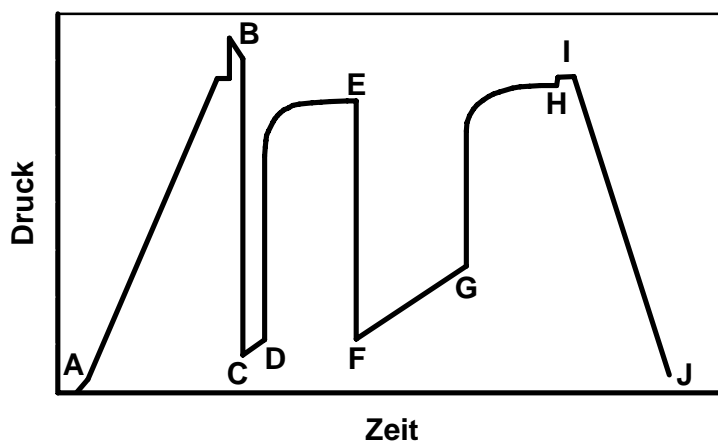


Bild 1-4.2: Druckverlauf bei einem Drill-Stem-Test – Schemaskizze:

- 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
- E-F: 1. Druckaufbauphase, Öffnen des Testventils
- F-G: 2. Fließphase
- H-I: 2. Druckaufbauphase, Lösen der Packer, hydrostatischer Druck der Spülungssäule
- I-J: Ausbau der Testgarnitur aus dem Bohrloch

Der Druckverlauf wird als Funktion der Zeit registriert. Die Gebirgsdurchlässigkeit wird aus der Druckaufbauphase unter der Voraussetzung konstanten Zustroms in der Fließphase nach THEIS, 1935 oder HORNER, 1951 bestimmt. Weiterhin stehen eine Reihe von Typkurvenverfahren zur Verfügung (ODENWALD ET AL. 2009).

4.1.4 Pulse-Test

Der Pulse-Test ist ein modifizierter Slug-Test unter Verwendung eines geschlossenen Systems nach DIN EN ISO 22282-6. Dabei wird in einem mit Packern abgedichteten Bohrlochabschnitt nach Einstellung des Ruhedruckpotentials eine impulsartige Druckänderung herbeigeführt. Beim Druckerhöhungs-Test wird durch kurzzeitiges Öffnen des Testventils eine Druckbeaufschlagung, beim Druckabsenk-Test eine Druckminderung im Testabschnitt ausgelöst. Nach dem Schließen des Testventils wird der Druckabbau/-aufbau im Testabschnitt als Funktion der Zeit aufgezeichnet (Bild 1-4.3).

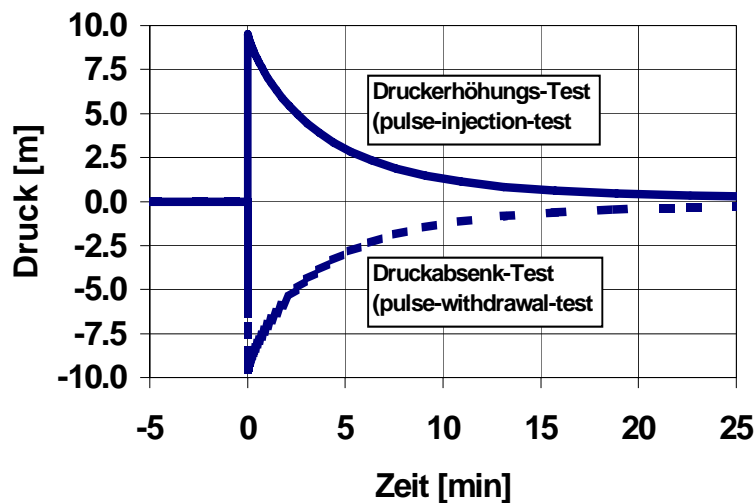


Bild 1-4.3: Verlauf von Druckkurven bei Pulse-Tests – Beispiel

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 (ODENWALD ET AL. 2009). 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.

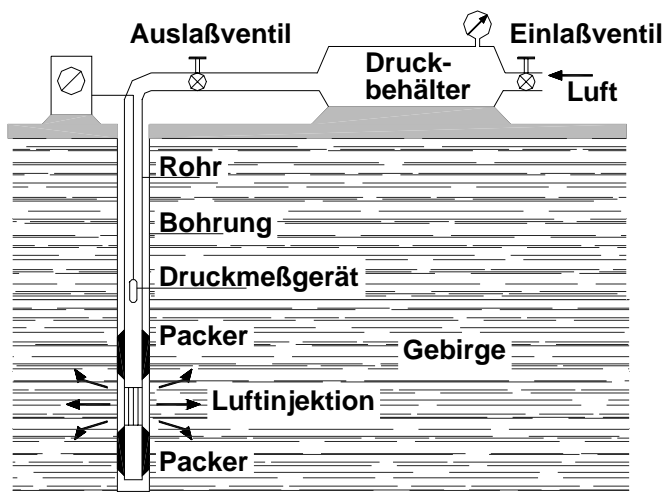


Bild 1-4.4: Messanordnung für Gasdrucktests

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).

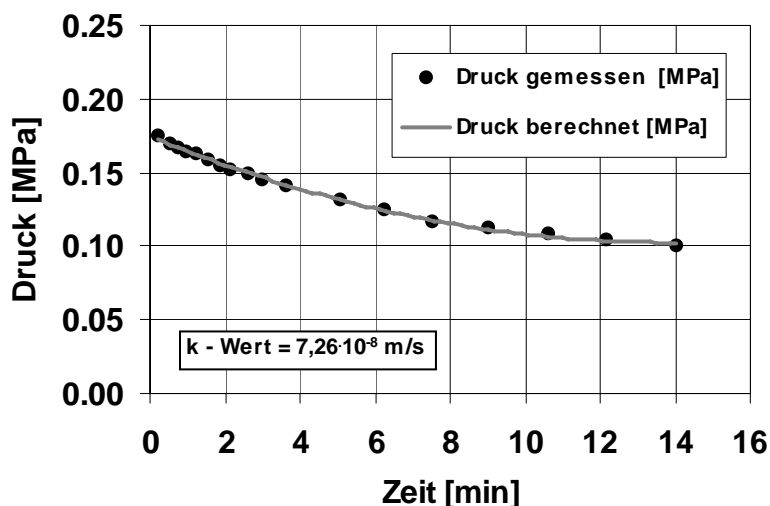


Bild 1-4.5: Typischer Druckverlauf eines Gasdrucktests mit Ausgleichskurve

Die Auswertung des Druckverlaufs setzt eine radialsymmetrische Druckausbreitung der instationären Strömung im Gebirge voraus. Mit Hilfe von Typkurven, die in Abhängigkeit vom Startdruck und daraus resultierender Änderung der

Kompressibilität zu berechnen sind, erfolgt die Bestimmung der Permeabilität. Dazu können auch rechnerunterstützte Auswerteverfahren verwendet werden (WAGNER/VOIGT 1999).

Zur Umrechnung auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k sind die unterschiedlichen Viskositäten und Dichten von Gas und Wasser zu berücksichtigen.

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

4.2 Versuche mit Pump- oder Injektionsphase

4.2.1 Vorbemerkungen

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.

Durch Pump- oder Injektionsversuche 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 dieses so genannten „diagnostischen Plots“ lässt sich auch beurteilen, ob das nach hydrogeologischen Informationen über den getesteten Gebirgsbereich ausgewählte Gebirgsmodell bzw. Auswerteverfahren zutreffend ist. Diese Aquiferdiagnose sowie die Auswertung mit Typkurvendeckungsverfahren für instationäre Strömung ist bei ODENWALD ET AL., 2009 näher beschrieben.

Die Auswertung unter Berücksichtigung der inneren Randbedingungen erfolgt mit dem Typkurvenverfahren nach GRINGARTEN ET AL. 1979. Zur Berücksichtigung der äußeren Randbedingungen existieren für einfache Fälle ebenfalls Typkurven. Stand der Technik ist eine Typkurvenauswertung mittels geeigneter Software, mit der eine

Kurvendeckung für verschiedene Gebirgsmodelle sowie innere und äußere Randbedingungen durchgeführt werden kann.

4.2.2 Pumpversuch (mit Beobachtungspegeln)

Beim Pumpversuch wird i. d. R. durch die Wahl einer hohen Entnahmerate oder langen Versuchszeit ein größeres Gebirgsvolumen von mittlerer bis starker 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.

4.2.3 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.

4.2.4 Pumptest (Einbohrlochmethode)

Bei Pumpversuchen ohne Beobachtungspegel spricht man auch von Pumptests oder Kurzpumpversuchen. Bei der Untersuchung von Geologischen Barrieren kommen sie in stärker durchlässigeren Horizonten oder Kluftbereichen zum Einsatz. Mit Hilfe von Packern oder entsprechend angeordneten Filterstrecken können derartige Bereiche auch gezielt getestet bzw. beprobt werden. Pumptests sind i. d. R. nur bei Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwerten von $k > 10^{-7}$ m/s anwendbar.

4.2.5 Injektions- und WD-Test

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 Pumptests 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).

4.2.6 Fluid-Logging

Mit dem Leitfähigkeits-Fluid-Logging kann eine tiefengenaue Lokalisierung und Quantifizierung von Grundwasserzuflüssen in offenen Bohrungen und Grundwassermessstellen vorgenommen werden, (BLÜMLING/HUFSCHMIED 1989, 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.

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 $k = 10^{-8}$ und 10^{-4} m/s.

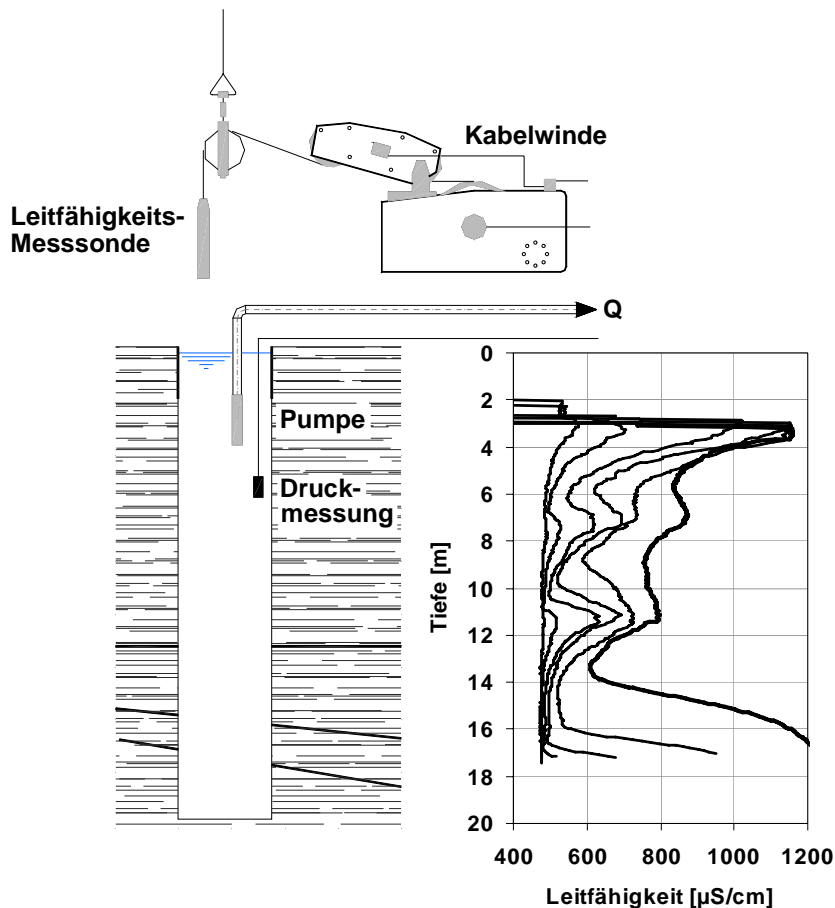


Bild 1-4.6: Beispiel einer Leitfähigkeits-Fluid-Logging-Messung in einem offenen Bohrloch

(Die Zuflüsse in 3, 7, 11 und 17 m Tiefe zeichnen sich durch deutliche Leitfähigkeitserhöhungen in den über ca. 2 Stunden gemessenen Logs ab.)

4.2.7 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).

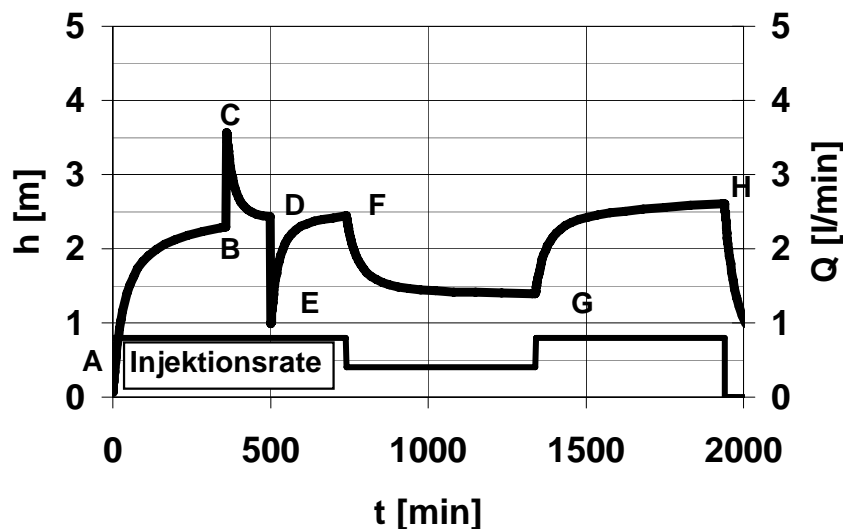


Bild 1-4.7: Schematischer Verlauf eines Sättigungsinjektionstests
 B-C-D: Druckverlauf mit aufgesetzten Slugtest
 D-E-F: Bailtest
 F-G-H: Pumptests

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 Gebirgsdurchlässigkeiten zwischen $k = 10^{-7}$ und 10^{-3} m/s.

5 Qualitätssicherung

5.1 Allgemeines

Voraussetzung für die korrekte Durchführung der Testverfahren ist ein einwandfreier Aufschluss (E 1-1). 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 klar zu spülen 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 Versuchsapparatur oder des Messstellenausbau
- 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 $k = 10^{-7}$ 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 $\pm 2\%$ 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 Versuchsanlage 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 Felddatenauswertung überprüft werden. Hierfür stehen auf dem Markt geeignete Auswerteprogramme 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 kann auf diese

Weise die Testzeit auf das fachlich notwendige Maß, nämlich bis zur Auswertbarkeit des Versuchs, beschränkt werden.

Literatur

- BLÜMLING, P.; HUFSCHMIED, P., 1989: Fluid Logging in Tiefbohrungen
Schriftenreihe Nagra informiert, Nummer 3+4, 11. Jahrgang, CH 5401 Baden
- GRINGARTEN, A. C.; BOURDET, D.; LANDELL, P. A.; KNIAZEFF, V. J., 1979: A comparison between different skin and wellborne 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, 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.
- ODENWALD, B.; HEKEL, U.; THORMANN, H., 2009: Grundwasserströmung – Grundwasserhaltung
in: Witt, K. J. (Hrsg), 2009: Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, 7. Auflage
Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- 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
- REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E.; CLOTHIER, B.E., 1985: The constant head well permeameter: Effect of unsaturated flow. - Soil Sci. 139
- 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
- WAGNER, R.M.,; VOIGT, H.-D., 1999: Bestimmung und Durchlässigkeit trockener und teilgesättigter Böden mit dem Gasdrucktest in Bohrungen, TerraTech 3/99

Regelwerke

- DIN 19682-7:2007-07: Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelzylinder-Infiltrimeter
- DIN 18130-2, 2003-10: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 2: Feldversuche

DIN EN ISO 22282-2:2008-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung -
Geohydraulische Versuche - Teil 2: Wasserdurchlässigkeitsversuche in einem
Bohrloch unter Anwendung offener Systeme

DIN EN ISO 22282-5:2008-01: Geotechnische Erkundung und Untersuchung -
Geohydraulische Versuche - Teil 5: Infiltrometerversuche

DIN EN ISO 22282-6:2008-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung -
Geohydraulische Versuche - Teil 6: Wasserdurchlässigkeitsversuche im
Bohrloch unter Anwendung geschlossener Systeme

Ansprechpartner: Dr. Uwe Hekel
HPC HARRESS PICKEL CONSULT AG
72108 Rottenburg am Neckar, uhekel@hpc-ag.de

Bearbeiter: Dipl.-Geol. J. Fritz, Bremen
Dr. U. Hekel, Rottenburg
Dipl.-Geol. T. Kolb, Bottrop
Dipl.-Geol. J. Kowalewski, Essen
Prof. Dr.-Ing. K.-P. Salomo, Uelzen
Dr.-Ing. R. M. Wagner, Gommern