

DIN 18130-2**DIN**

ICS 93.020

Einsprüche bis 2011-11-18
Ersatz für
E DIN 18130-2:2003-10**Entwurf****Baugrund, Untersuchung von Bodenproben –
Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts –
Teil 2: Feldversuche**

Soil, investigation and testing –

Determination of the coefficient of water permeability –

Part 1: Field tests

Sol, reconnaissance et essais –

Détermination du coefficient de perméabilité à l'eau –

Partie 1: Essais sur le terrain

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2011-07-11 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an nabau@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 53 Seiten

Inhalt	Seite
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen.....	6
3 Begriffe	6
4 Bezeichnung.....	9
5 Versuchsgrundlagen	10
5.1 Sättigungszustand.....	10
5.2 Temperatur	10
5.3 Isotropie und Homogenität.....	10
5.4 Absenk- und Auffüllversuch.....	10
5.4.1 Allgemeines.....	10
5.4.2 Hydraulisches Gefälle	10
5.5 Einschwingversuch	10
6 Versuchsanordnungen.....	11
6.1 Strömungsrichtung und Druckhöhe	11
6.2 Messen der Standrohrspiegelhöhen.....	11
6.2.1 Bezugshöhe.....	11
6.2.2 Grundwasserspiegel	11
6.2.3 Wasserspiegel in der Versuchsstelle	11
6.3 Messen der Wassermenge bzw. des Durchflusses.....	12
6.4 Verhinderung der Umläufigkeit	12
6.5 Wahl der Versuchsanordnung.....	12
7 Versuche im Bohrloch.....	12
7.1 Bodenarten	12
7.2 Geräte.....	12
7.3 Anordnung.....	13
7.3.1 Versuch bei zurückgezogener Verrohrung	13
7.3.2 Versuch im zur Grundwassermessstelle ausgebauten Bohrloch	13
7.4 Durchführung	13
7.4.1 Herstellen des Bohrlochs	13
7.4.2 Ausbau des Bohrlochs	14
7.4.3 Versuchsablauf	17
7.5 Auswertung	20
7.5.1 Absenkversuch und Auffüllversuch	20
7.5.2 Einschwingversuch	24
8 Versuche mit Aufsatzgerät (A)	27
8.1 Bodenarten	27
8.2 Geräte.....	27
8.3 Anordnung.....	28
8.4 Durchführung	28
8.5 Auswertung	29
9 Versuche in Dichtwänden (DW).....	29
9.1 Arten der Dichtwand.....	29
9.2 Geräte.....	29
9.3 Herstellen des Bohrlochs	29
9.3.1 Anforderungen an die Geometrie.....	29

9.3.2	Ausbau des Bohrlochs	29
9.4	Durchführung	29
9.5	Auswertung	30
10	Angabe der Versuchsergebnisse	32
11	Anwendungsbeispiele	33
11.1	Anwendungsbeispiele zu Abschnitt 7 (Versuche im Bohrloch)	33
11.1.1	Absenkversuch, stationär, in gespanntem Grundwasser, Vollraumbedingung	33
11.1.2	Auffüllversuch, stationär, in gespanntem Grundwasser, Halbraumbedingung	34
11.1.3	Instationärer Versuch mit Verdrängungskörper in gespanntem Grundwasser, Vollraumbedingung	35
11.1.4	Instationärer Auffüllversuch mit freiem Grundwasserspiegel und Auswertung nach dem Verfahren von Bouwer und Rice	38
11.1.5	Einschwingversuch: asymptotischer Verlauf des Wiederanstiegs	42
11.1.6	Einschwingversuch: oszillierender Verlauf des Wiederanstiegs	45
11.2	Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 8 (Versuch mit dem Aufsatzgerät)	47
11.3	Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 9 (Dichtwand)	49
Anhang A (informativ) Anpassungsgleichungen zur Ermittlung der Koeffizienten A , B und C als Funktion des Verhältnisses l_0/r_0 zur Ermittlung der bezogenen Reichweite der Absenkung R/l_0 nach Bouwer und Rice		53

Bilder

Bild 1 —	Bohrloch mit Messstrecke in standfestem Boden; Abdichtung mit Packer	15
Bild 2 —	Bohrloch mit Messstrecke in nicht standfestem Boden mit Filterkies und Abdichtung: Messstrecke im „Halbraum“ — gespanntes Grundwasser	16
Bild 3 —	Bohrloch mit Messstrecke in nicht standfestem Boden mit Filterkies und Tonabdichtung: Messstrecke im „Vollraum“ — dargestellt für Grundwasser mit freier Oberfläche	17
Bild 4 —	Bohrloch mit Messstrecke in nicht standfestem Boden mit Filterkies und Abdichtung: Messstrecke bildet „vollkommenen Brunnen“ — gespanntes Grundwasser	18
Bild 5 —	Versuchsanordnung beim Einschwingversuch (E)	20
Bild 6 —	Ermittlung des wirksamen Ruhewasserspiegels mit Hilfe der Geschwindigkeitslinie	21
Bild 7 —	Koeffizienten A , B und C über l_0/r_0 (nach Bouwer und Rice, 1976)	24
Bild 8 —	„Asymptotischer Verlauf“	25
Bild 9 —	„Oszillierender Verlauf“	26
Bild 10 —	Aufsatzgerät	28
Bild 11 —	Auffüllversuch in Dichtwand	30
Bild 12 —	Absenkversuch in gespanntem Grundwasser — Vollraumbedingung	33
Bild 13 —	Auffüllversuch in gespanntem Grundwasser — Halbraumbedingung	35
Bild 14 —	Instationärer Versuch mit Verdrängungskörper in gespanntem Grundwasser	36
Bild 15 —	Zeitlicher Verlauf des Wiederanstiegs im Bohrloch	37

Bild 16 — Instationärer Auffüllversuch in freiem Grundwasser	38
Bild 17 — Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels.....	40
Bild 18 — Wasserstandsänderung beim Auffüllversuch.....	41
Bild 19 — Einschwingversuch in gespanntem Grundwasser"	43
Bild 20 — Asymptotischer Wiederanstieg des Grundwassers	43
Bild 21 — Ermittlung des Steigungskoeffizienten α aus Bild 20.....	44
Bild 22 — Einschwingversuch in freiem Grundwasser	46
Bild 23 — Oszillierender Anstieg des Grundwassers	46
Bild 24 — Ermittlung des Steigungskoeffizienten α aus Bild 23.....	47
Bild 25 — Temperaturkalibrierkurve für Aufsatzgerät Nr. A2	48
Bild 26 — Bodenprofil, Geometrie und Druckhöhenverteilung an der Schlitzwand	50

Tabellen

Tabelle 1 — Bestandteile der Normbezeichnung	9
Tabelle 2 — Zeitlicher Verlauf des Wiederansteigens im Bohrloch	37
Tabelle 3 — Wasserstandsentwicklung beim Auffüllversuch.....	39
Tabelle 4 — Messdaten, asymptotischer Verlauf	44
Tabelle 5 — Messdaten, oszillierender Verlauf.....	46
Tabelle 6 — Versuchsprotokoll und Auswertung.....	48
Tabelle 7 — Wassertemperatur	50
Tabelle 8 — Standrohrspiegelhöhen über Schlitzwand OK	51
Tabelle 9 — Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 9: Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit einer Schlitzwand	52

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 005-05-03 AA "Baugrund; Laborversuche" im Normenausschuss Bauwesen (NABau) des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. erarbeitet.

DIN 18130 *Baugrund — Untersuchung von Bodenproben* besteht aus folgenden Teilen:

- *Teil 1: Laborversuche*
- *Teil 2: Feldversuche*

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Böden unter dem Grundwasserspiegel und künstlich hergestellter Dichtungsmassen durch Feldversuche. Die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit über dem Grundwasserspiegel ist noch nicht Stand der Technik und wird in dieser Norm nicht behandelt. Die Untersuchungsergebnisse werden im Grund-, Erd- und Deponiebau angewendet. Sie sind Grundlage z. B. für die Berechnung von Grundwasserströmungen und zur Beurteilung der Durchlässigkeit von Dichtungs- und Injektionswänden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 4021, *Baugrund — Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben*

DIN 4022-1, *Baugrund und Grundwasser — Benennen und Beschreiben von Boden und Fels — Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels*

DIN 4044:1980-07, *Hydromechanik im Wasserbau — Begriffe*

DIN 4049-3:1994-10, *Hydrologie — Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*

DIN 18130-1:1998-05, *Baugrund — Untersuchung von Bodenproben — Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts — Teil 1: Laborversuche*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Potenzialfläche

geometrischer Ort aller Punkte im Grundwasserkörper mit gleicher Standrohrspiegelhöhe

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.2

Potenziallinie

Verschneidungslinie zwischen Potenzialfläche eines Grundwasserkörpers und Grundwasserlängsschnitt

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.3

Grundwasserstromlinie

Abbildung einer idealisierten Bewegungsspur von Grundwasserteilchen im Potenzialfeld eines Grundwasserkörpers

ANMERKUNG 1 Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

ANMERKUNG 2 In hydraulisch isotropen Böden (d. h. in Böden, deren Durchlässigkeit in allen Richtungen gleich groß ist) stehen Grundwasserstromlinien senkrecht auf den Potenzialflächen eines Grundwasserkörpers.

3.4

Strömungsfeld

Bereich im Boden, in dem Grundwasser strömt

ANMERKUNG Siehe DIN 4044.

3.5

Strömungsnetz

Netz aus Grundwasserstromlinien und Potenziallinien im Strömungsfeld

3.6

Formfaktor

F

Verhältnis zwischen dem Zufluss zu oder dem Abfluss aus einer Kugelquelle Q_{kug} und dem Zufluss zu bzw. dem Abfluss aus einer zylindrischen Versuchsstelle Q_{zyl} bei gleichem Radius r_0 und gleichem hydraulischen Unterschied h zur Druckhöhe des Grundwassers

$$F = Q_{\text{kug}} / Q_{\text{zyl}} \quad (1)$$

3.7

Transmissivität

Integral des Durchlässigkeitsbeiwerts über die Grundwassermächtigkeit

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.8

Zufluss

einem Raum in der Zeiteinheit zufließendes Wasservolumen

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.9

Ausfluss

aus einem Raum in der Zeiteinheit ausfließendes Wasservolumen

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.10

Durchfluss

Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.11

Volumenstrom

Überbegriff für das einem Raum in der Zeiteinheit zufließende, aus ihm ausfließende oder durch einen Querschnitt durchfließende Wasservolumen

3.12

Filterstrecke

Höhe der Schüttung aus Filterkies oder -sand im Bohrloch

3.13

Absenkversuch

zeitlich begrenzte Entnahme von Grundwasser aus einem Brunnen oder einer Grundwassermessstelle zur Bestimmung geohydraulischer Kenngrößen des Bodens

3.14**Auffüllversuch**

zeitlich begrenztes Einbringen von Wasser in Brunnen oder Grundwassermessstellen zur Bestimmung geohydraulischer Kenngrößen des Bodens

ANMERKUNG Siehe auch DIN 4049-3:1994-10.

3.15**Versuch mit Verdrängungskörper**

Versuch, bei dem die Wasserspiegelhöhe in einem Brunnen oder einer Grundwassermessstelle für einen instationären Bohrlochversuch durch einmaliges Einbringen oder Herausziehen eines Verdrängungskörpers eingestellt wird

3.16**Einschwingversuch**

Bestimmung der Transmissivität eines Grundwasserleiters durch Messen der Wasserspiegelbewegung einer einmalig dynamisch angeregten Wassersäule in einer Grundwassermessstelle

4 Bezeichnung

Folgende Bestandteile ergeben die Bezeichnung dieser Norm.

Tabelle 1 — Bestandteile der Normbezeichnung

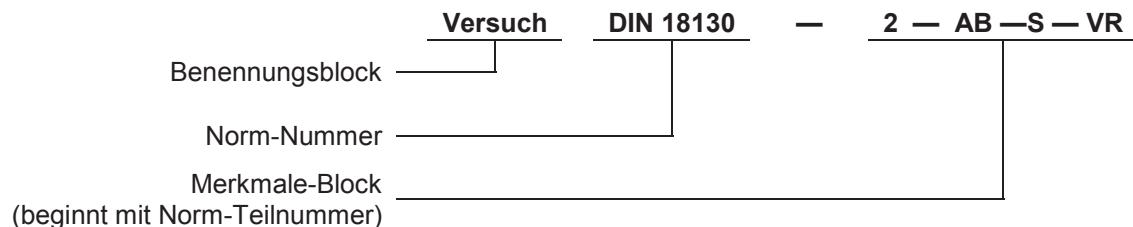
Bestandteil der Normbezeichnung	Angabe in dieser Norm
Benennungsblock	Versuch
Identifizierungsblock	

Norm-Nummer DIN 18130-2

Merkmale

- Absenkversuch (AB)
- Auffüllversuch (AU)
- Einschwingversuch (E)
- Versuch mit Verdrängungskörper (V)
- Versuch mit Aufsatzgerät (A)
- Versuch in Dichtwand (DW)
- Stationärer Versuch (S)
- Instationärer Versuch (I)
- Vollraumbedingungen (VR)
- Halbraumbedingungen (HR)

BEISPIEL Bezeichnung eines Feldversuchs nach DIN 18130-2 zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts im Boden, mit dem Absenkversuch (AB) mit gleichbleibender Druckhöhe (S) bei Vollraumbedingungen (VR).



5 Versuchsgrundlagen

5.1 Sättigungszustand

Der Durchlässigkeitsbeiwert k des gesättigten Bodens kann zuverlässig nur an einem Strömungsfeld unterhalb des Grundwasserspiegels ermittelt werden. Bei Versuchen oberhalb des geschlossenen Kapillarsaums tritt bei allen Versuchsanordnungen im Boden zunächst ein Sättigungsvorgang ein. Solche Versuche sind erst bewertbar, wenn sich der Volumenstrom bei gleichem Potenzialunterschied mit der Zeit nicht mehr ändert. Der Durchlässigkeitsbeiwert k bezieht sich dann auf einen mittleren Sättigungsgrad im Strömungsfeld, der durch Fortsetzung des Versuchs nicht mehr signifikant erhöht werden kann.

ANMERKUNG Da die Auswertung von Versuchen zur Ermittlung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts in der wasserungesättigten Zone des Bodens noch nicht hinreichend erforscht ist, beschränkt sich die Norm auf die Ermittlung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts im gesättigten Boden.

5.2 Temperatur

Die Messung der Wassermengen bei geringem Volumenstrom wird durch die Volumenänderung des Wassers infolge der täglichen Temperaturänderungen beeinträchtigt. Zudem ändert sich mit der Temperatur auch die Zähigkeit des Wassers (siehe DIN 18130-1:1998-05, 5.7). Daher ist bei den Versuchen die Temperatur zu berücksichtigen.

5.3 Isotropie und Homogenität

Isotropie liegt vor, wenn Eigenschaften — hier die Wasserdurchlässigkeit — richtungsunabhängig, Homogenität liegt vor, wenn sie ortsunabhängig sind.

5.4 Absenk- und Auffüllversuch

5.4.1 Allgemeines

Zur Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts im Feld wird im Boden ein Strömungsfeld mit bekanntem Formfaktor erzeugt. Potenzialunterschied und Volumenstrom (zeitlicher Zu- oder Abfluss) werden gemessen.

5.4.2 Hydraulisches Gefälle

Das hydraulische Gefälle ist an der Eintrittsfläche bzw. Austrittsfläche der Versuchsstelle am größten und nimmt von hier längs einer Stromlinie mit zunehmender Entfernung ab.

Änderungen des Porenanteils beeinflussen die Wasserdurchlässigkeit des Bodens und damit das hydraulische Gefälle. Deshalb sollten im Bereich unmittelbar neben der Ein- bzw. Austrittsfläche die Bodeneigenschaften durch Einflüsse bei der Versuchsvorbereitung (z. B. Auflockerung oder Verdichtung beim Bohren) oder durch Einflüsse bei der Versuchsdurchführung (Ausspülen von Feinteilen [Suffosion] oder Zusetzen von Poren von im Versuchswasser schwebenden Feinteilen [Kolmation]) nicht verändert werden.

5.5 Einschwingversuch

Der Versuch dient dazu, die Transmissivität eines Grundwasserleiters und daraus dessen Durchlässigkeitsbeiwert zu ermitteln. Dazu wird der Ruhewasserspiegel einer Grundwassermessstelle mittels Druckluft abgesenkt. Nach plötzlicher Entspannung kehrt der abgesenkte Wasserspiegel, mehr oder weniger gedämpft, in seine Ausgangslage zurück.

6 Versuchsanordnungen

6.1 Strömungsrichtung und Druckhöhe

a) Nach der Strömungsrichtung wird unterschieden zwischen:

- 1) Versuch mit Wasserentnahme (Absenkversuch (AB)) oder Verdrängung des Wasserspiegels durch Zugabe von Druckluft in die Versuchsstelle: der freie Wasserspiegel in der Versuchsstelle liegt während des Versuchs unterhalb des Grundwasserspiegels;
- 2) Versuch mit Wasserzugabe (Auffüllversuch (AU)): der freie Wasserspiegel in der Versuchsstelle liegt während des Versuchs oberhalb des Grundwasserspiegels.

b) Nach der Art der Druckhöhe wird unterschieden zwischen:

- 1) Versuch mit gleich bleibender Druckhöhe (stationärer Versuch (S)):

Der freie Wasserspiegel wird durch Zugabe oder Entnahme von kontrollierten Wassermengen während der Zeitdauer der Versuchsdurchführung auf gleicher Höhe gehalten. Der Versuch ist so lange fortzusetzen, bis auch die Strömungsrate konstant bleibt;

- 2) Versuch mit veränderlicher Druckhöhe (instationärer Versuch (I)):

Nach Erhöhen des freien Wasserspiegels wird ohne weitere Wasserzugabe dessen Absinken bzw. nach Absenken des freien Wasserspiegels wird ohne weitere Wasserentnahme oder ohne Änderung des Luftdruckes in der Messstelle dessen Ansteigen zeitabhängig beobachtet.

6.2 Messen der Standrohrspiegelhöhen

6.2.1 Bezugshöhe

Die versuchsrelevanten Höhen, wie z. B. die Höhe der Grundwasseroberfläche, des freien Wasserspiegels in der Versuchsstelle sowie die Höhenlage der Eintrittsfläche und gegebenenfalls der oberen und unteren Begrenzungsflächen des Strömungsfeldes sind auf die gleiche, eindeutig beschriebene Bezugshöhe einzumessen.

6.2.2 Grundwasserspiegel

Der Grundwasserspiegel in der Versuchseinrichtung ist vor und nach der Versuchsdurchführung auf weniger als 5 % der im Versuch erzielten maximalen Spiegeldifferenz, mindestens aber auf 1 cm zu messen. Sind Veränderungen der Höhe des Grundwasserspiegels während der Versuchsdurchführung zu erwarten (z. B. Tideeinfluss), ist auch die Beobachtung einer benachbarten, durch den Versuch nicht beeinflussten Grundwassermessstelle während des Versuchs erforderlich.

6.2.3 Wasserspiegel in der Versuchsstelle

Der Wasserspiegel in der Versuchsstelle ist während der Versuchsdurchführung auf weniger als 5 % der Spiegeldifferenz, mindestens aber auf 1 cm zu messen.

Dies wird erreicht:

- bei Versuchen im Bohrloch mit Druckaufnehmern, Lichtlot oder Schwimmerlot;
- bei Wasserspiegel über Gelände auch in skalierten Standrohren.

Es wird entweder die Zeitspanne für das Durchfahren der Wasserspiegelhöhen einer vorgegebenen Messstrecke oder die Wasserspiegelhöhen für ein vorgegebenes Zeitintervall gemessen.

6.3 Messen der Wassermenge bzw. des Durchflusses

Bei Versuchen mit konstant gehaltenem Wasserspiegel ist die in der Zeiteinheit eingefüllte oder entnommene Wassermenge (Durchfluss) mit Wasserzählern, Messwehr oder elektrischem Durchflusssmesser zu messen. Bei sehr geringem Durchfluss wird die Wassermenge in Messgefäß (Messzylinder) gemessen und die zugehörige Zeit erfasst.

Bei Versuchen mit veränderlichem freiem Wasserspiegel ergibt sich die Wassermenge aus den Wasserspiegeldifferenzen und der Querschnittsfläche der im Rohr, Standrohr oder Messpipette gemessenen freien Wasseroberfläche. Rohre, Standrohre und Messpipetten müssen im Messbereich konstante Querschnitte aufweisen.

6.4 Verhinderung der Umläufigkeit

Durch Abdichtungen ist dafür zu sorgen, dass die gemessenen Wassermengen gleich den Wassermengen sind, die durch die Eintrittsfläche dem Strömungsfeld zufließen bzw. durch die Austrittsfläche ausfließen.

ANMERKUNG Die zuverlässige Abdichtung ist besonders bei der Untersuchung geringdurchlässiger Böden versuchsentcheidend.

6.5 Wahl der Versuchsanordnung

Die Abmessungen der Eintrittsfläche des Strömungsfeldes und die Einrichtung zur Messung der Wassermenge bzw. des Durchflusses sind der Größenordnung des zu erwartenden Durchlässigkeitsbeiwerts anzupassen.

7 Versuche im Bohrloch

7.1 Bodenarten

Diese Anordnung eignet sich zur Untersuchung von Kiesen (beim Einschwingverfahren bis $k = 10^{-2}$ m/s), Sanden sowie von gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden mit $k > 1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

7.2 Geräte

Je nach Versuchsanordnung werden benötigt:

- 7.2.1** Einfachpacker oder Doppelpacker, die dem Bohrlochdurchmesser angepasst sind.
- 7.2.2** Messrohr mit Filterstrecke im Messbereich.
- 7.2.3** Filtersand oder Filterkies.
- 7.2.4** Tonkugeln und Bentonitgranulat o. Ä. im Grundwasser bzw. Ton-Zementsuspension über dem Grundwasser zur Abdichtung.
- 7.2.5** Druckaufnehmer, Lichtlot oder Schwimmerlot zur Messung des Wasserspiegels.
- 7.2.6** Stoppuhr.
- 7.2.7** Gerät zur Datenerfassung.
- 7.2.8** Temperaturmessgerät mit einer Fehlergrenze von 1 °C.
- 7.2.9** Standrohr mit Markierungen bzw. Maßstab.

bei Wasserzugabe:

7.2.10 Wasserbehälter mit Wasser.

7.2.11 Wassermengenmesser.

bei Wasserentnahme:

7.2.12 Wasserpumpe mit Rückschlagventil.

7.2.13 Wassermengenmesser bzw. Durchflussmessgerät.

beim Einschwingversuch:

7.2.14 Stopfen zur Abdichtung der Messstelle und Druckluft zur Absenkung des Wasserspiegels.

7.2.15 Druckaufnehmer für dynamische Vorgänge zur Messung von Luftdruck und Wasserdruck und damit zur Bestimmung des Wasserspiegels.

7.2.16 Gerät zur Datenerfassung mit Messfolge <0,05 s;

Versuch mit Verdrängungskörper:

7.2.17 Verdrängungskörper: Zylinderförmiger Körper mit einem Durchmesser kleiner als der Durchmesser des Standrohrs und einer Dichte, die größer als die Dichte des Wassers ist.

7.2.18 Seilwinde.

7.3 Anordnung

7.3.1 Versuch bei zurückgezogener Verrohrung

Der Messbereich liegt im unverrohrten Bohrlochtfesten und wird zur Vermeidung einer Umläufigkeit nach oben abgedichtet (siehe Bild 1). Der Wasserspiegel im Bohrloch wird in einem Messrohr mit Lichtlot oder Ähnlichem gemessen. Einschwingversuche sind über das Rohr des Packers als Messrohr ausführbar.

7.3.2 Versuch im zur Grundwassermessstelle ausgebauten Bohrloch

Das Filterrohr eines Messrohres steht im unverrohrten Bohrlochtfesten (siehe Bilder 2 bis 4). Der zu untersuchende Boden wird gegen das Filterrohr mit Filtersand oder Filterkies abgefiltert. Die Filterstrecke wird nach oben abgedichtet. Der Wasserspiegel im Messrohr wird mit Lichtlot oder Ähnlichem gemessen.

Beim Einschwingversuch (siehe Bild 5) muss das Vollrohr so weit unter den Ruhewasserspiegel geführt werden, dass die Druckluft beim Absenken des Wasserspiegels nicht über die Filterschlitzte entweichen kann.

7.4 Durchführung

7.4.1 Herstellen des Bohrlochs

Die Bohrung ist nach DIN 4021 auszuführen. Sie ist mit einem Außendurchmesser $d \geq 159$ mm verrohrt abzuteufen.

Die Bohrung muss ein zutreffendes Bild über Schichtung und Feinschichtung des Bodens liefern.

Für Versuche, bei denen in Böden mit Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten $k > 1 \cdot 10^{-6}$ m/s die Wasserentnahme durch Pumpen erfolgen soll, ist der Bohrdurchmesser $d \geq 219$ mm zu wählen.

ANMERKUNG Je kleiner der Bohrdurchmesser, um so stärker werden die Versuchsergebnisse durch Störungen in der Bohrlochwandung verfälscht.

Die Bohrung muss so tief in die zu untersuchende Schicht geführt werden, dass die Geometrie der Messstrecke eine Auswertung nach 7.5 ermöglicht.

Der Bohrvorgang sollte Wandung und Sohle der Messstrecke möglichst wenig stören.

Bei Anordnungen nach 7.3.2, d. h. in Grundwassermessstellen, die zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit herangezogen werden, sollte die Filterstrecke im Bohrlochtiefsten liegen und unter einer Deckschicht in einen mächtigeren Grundwasserleiter auf geringe Tiefe einbinden (siehe Bilder 2 und 3).

7.4.2 Ausbau des Bohrlochs

7.4.2.1 Allgemeines

a) Halbraumbedingung (HR):

Die Messstrecke grenzt an eine undurchlässige Schicht. Die Filterstrecke muss auf Höhe der undurchlässigen Schicht enden.

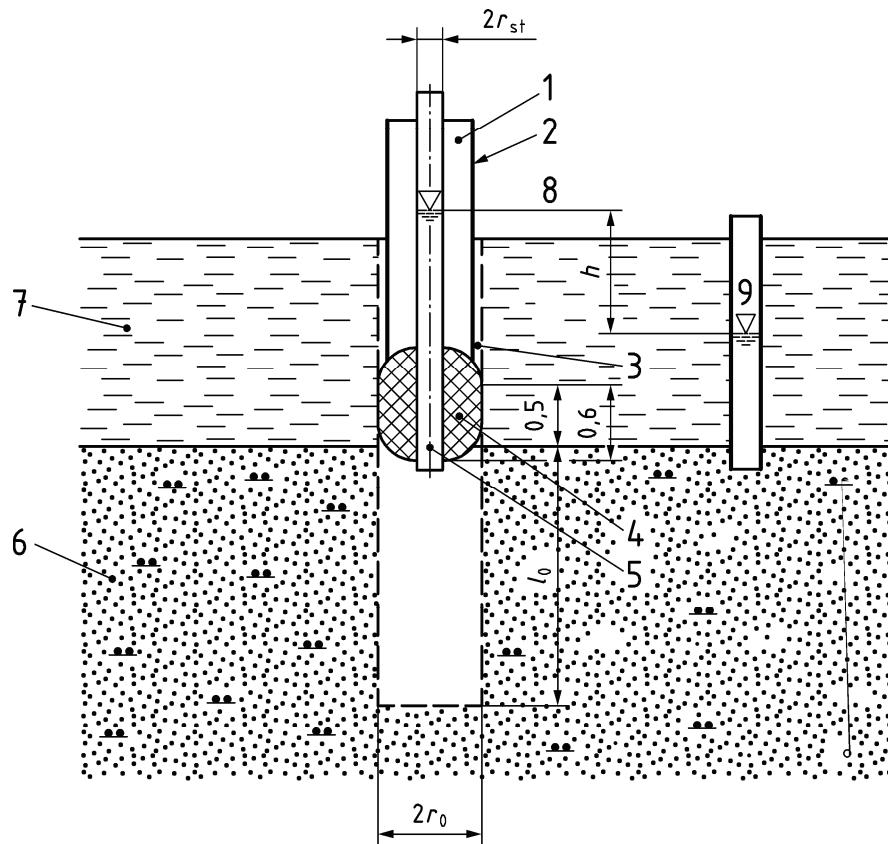
b) Vollraumbedingung (VR):

Die Messstrecke liegt innerhalb des Grundwasserleiters. Das Bohrloch ist oberhalb der Filterstrecke des Messrohrs in gespanntem Grundwasser bis in die Deckschicht, bei freiem Grundwasserspiegel bis über die Grundwasseroberfläche so abzudichten, dass hier keine Strömung längs der Verrohrung auftreten kann.

7.4.2.2 Anordnung nach 7.3.1 (Versuch bei zurückgezogener Verrohrung)

- a)** Liegt die Messstrecke in standfestem Boden, wird die Verrohrung zunächst bis mindestens 0,6 m oberhalb der Schichtgrenze zur geringdurchlässigen Deckschicht zurückgezogen. Dann wird ein mindestens 0,6 m langer Packer mit Messrohr eingeführt und so fixiert, dass er unterhalb der Verrohrung sitzt. Durch Aufblasen des Packers ist der Ausbau abgeschlossen (siehe Bild 1).

Maße in Meter



Legende

1	Ringraum	6	standfester durchlässiger Boden
2	Bohrrohr	7	standfeste gering durchlässige Deckschicht
3	Freischnitt durch Rohrschuh	8	Standrohrspiegel
4	Einfachpacker	9	Ruhewasserspiegel
5	Messrohr		

Bild 1 — Bohrloch mit Messstrecke in standfestem Boden; Abdichtung mit Packer

- b) Liegt die Messstrecke in nicht standfestem Boden, wird vor Zurückziehen der Verrohrung nach Absatz a) ein in der Messstrecke mit Filterschlitzten versehenes Messrohr zentrisch eingebracht und der verbleibende Hohlraum mit Filtersand oder Filterkies so verfüllt, dass die Filterstrecke nach Ziehen der Verrohrung von ihm auf volle Länge umhüllt bleibt. Das Filterrohr ist auf der Unterseite mit einer Kappe zu verschließen. Für die Mindestmaße gilt DIN 4021.

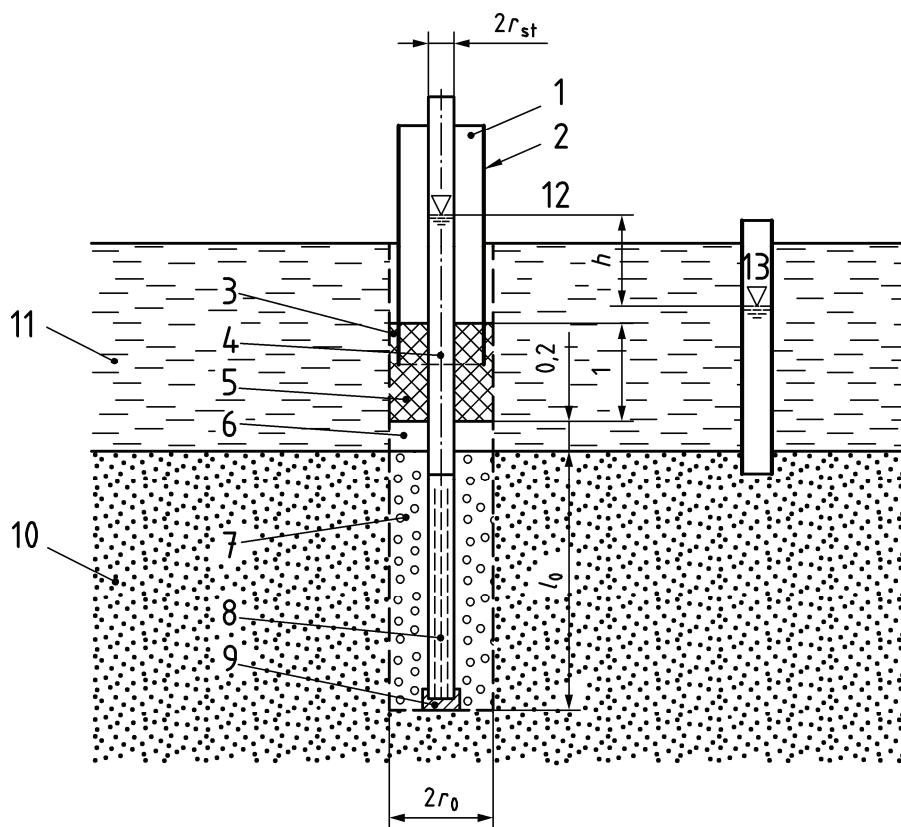
Die Körnung des Filtersandes/Kieses muss dem zu untersuchenden Boden und der Schlitzweite des Filters angepasst sein. Es darf am Übergang von Bohrlochwandung zum Filtersand/Kies keine Kolmation durch Anlagerung von ausgespülten Feinteilen des Bodens auftreten (mechanische Wirksamkeit). Die untere Nenngröße des Filtersandes/Kieses darf nicht kleiner als die Schlitzweite des Filterrohres sein. Die Oberkante des eingebrachten Filtersandes/Kieses ist durch Loten nachzuweisen.

Oberhalb des Filtersandes/Kieses wird als Abdichtung im Grundwasser z. B. ein Gemisch von Tonkugeln und Bentonitgranulat und über dem Grundwasser eine Ton-Zementsuspension auf mindestens 1 m Höhe eingefüllt und das Aufquellen abgewartet. Zur Kontrolle der Quellzeit sollte eine Rückstellprobe des Gemisches in Wasser der gleichen Temperatur beobachtet werden.

ANMERKUNG Tonkugeln allein haben sich zur Abdichtung nicht bewährt.

Die Abdichtung darf nicht in den Filtersand/Kies eindringen. Gegebenenfalls sind zwischen Sandfilter und Abdichtung Gegenfilter zwischenzuschalten.

Maße in Meter

**Legende**

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 Ringraum | 8 Filterrohr |
| 2 Bohrrohr | 9 Kappe |
| 3 Freischmitt durch Rohrschuh | 10 nicht standfester Boden |
| 4 Messrohr | 11 Deckschicht (Grundwasserhemmer) |
| 5 Abdichtung | 12 Standrohrspiegel |
| 6 Gegenfilter | 13 Ruhewasserspiegel |
| 7 Filterkies oder -sand | |

**Bild 2 — Bohrloch mit Messstrecke in nicht standfestem Boden mit Filterkies und Abdichtung:
Messstrecke im „Halbraum“ — gespanntes Grundwasser**

Nach dem Ausbau ist die Abdichtung nach Füllen des Ringraums mit Wasser bis mehrere Meter über den Grundwasserspiegel durch Kontrolle des Wasserspiegels im Standrohr zu überprüfen.

7.4.2.3 Anordnung nach 7.3.2 (Versuch im zur Grundwassermessstelle ausgebauten Bohrloch)

Bei Anordnung nach 7.3.2 gelten die Bilder 2 und 3 ohne Bohrrohr. Der Messstellenabschluss ist nach DIN 4021 durchzuführen.

7.4.2.4 Dokumentation der Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung und die Durchführung sind zu dokumentieren und zu skizzieren.

7.4.3 Versuchsablauf

7.4.3.1 Allgemeines

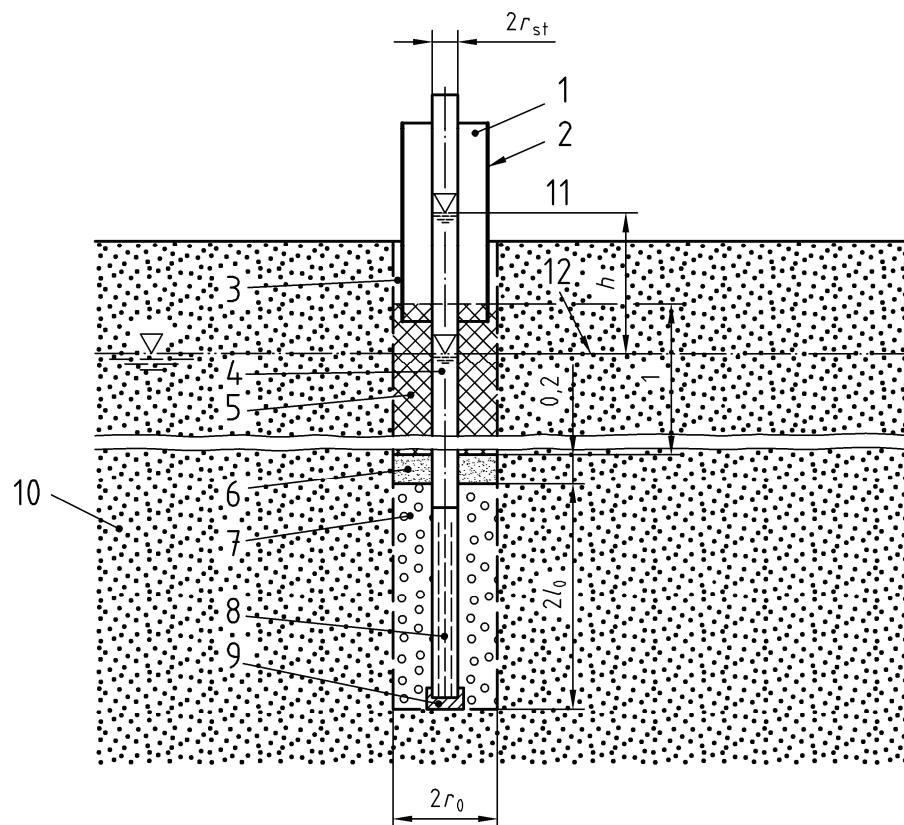
Vor Versuchsbeginn ist die ausgebaute Messstelle so lange zu bepumpen oder zu beschöpfen, bis das entnommene Wasser keinen Schwebstoff mehr enthält.

Dann ist abzuwarten, bis sich in der Messstelle der Ruhewasserspiegel eingestellt hat. Dies ist durch wiederholte Messung zu dokumentieren.

In einer Messstelle sollten die Versuche mit Wasserentnahme den Versuchen mit Wasserzugabe vorangehen.

Die Einzelversuche sind zwischen gleichen Grenzen des freien Wasserspiegels zu wiederholen, bis sich gleich bleibende Absenk- bzw. Anstiegszeiten einstellen.

Maße in Meter

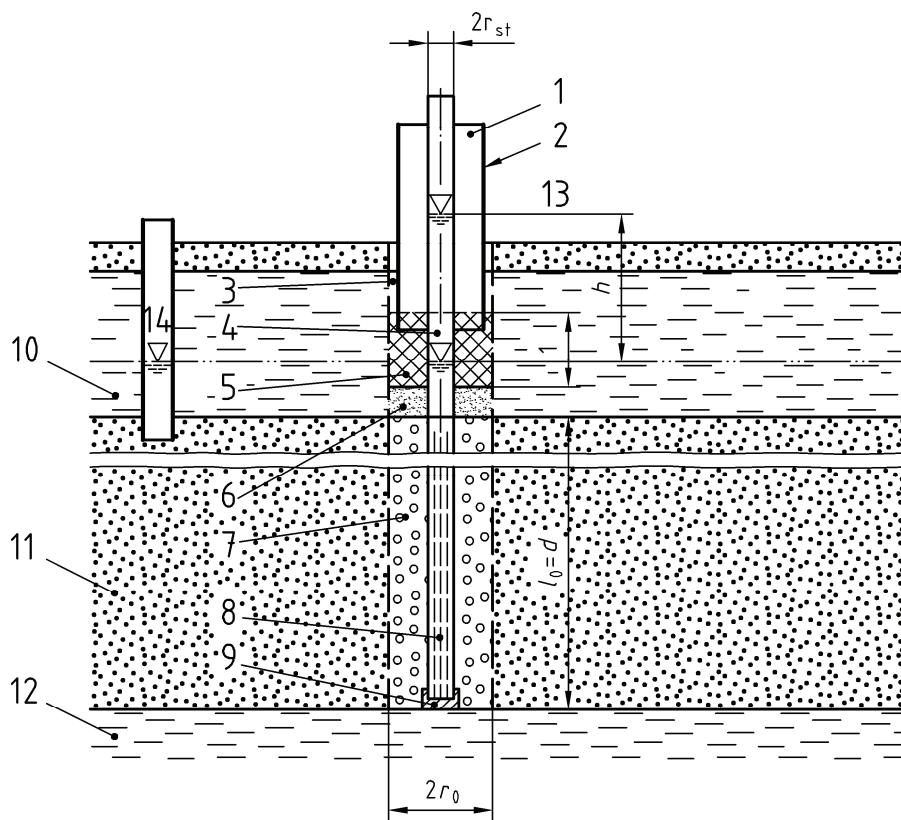


Legende

- | | | | |
|---|-----------------------------|----|---|
| 1 | Ringraum | 8 | Filterrohr |
| 2 | Bohrrohr | 9 | Kappe |
| 3 | Freischnitt durch Rohrschuh | 10 | nicht standfester Boden (Grundwasserleiter) |
| 4 | Messrohr | 11 | Standrohrspiegel |
| 5 | Abdichtung | 12 | Ruhewasserspiegel |
| 6 | Gegenfilter | | |
| 7 | Filterkies oder -sand | | |

Bild 3 — Bohrloch mit Messstrecke in nicht standfestem Boden mit Filterkies und Tonabdichtung:
Messstrecke im „Vollraum“ — dargestellt für Grundwasser mit freier Oberfläche

Maße in Meter

**Legende**

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 Ringraum | 8 Filterrohr |
| 2 Bohrrohr | 9 Kappe |
| 3 Freischmitt durch Rohrschuh | 10 Deckschicht |
| 4 Messrohr | 11 nicht standfester Boden (Grundwasserleiter) |
| 5 Abdichtung | 12 Grundwassernichtleiter |
| 6 Gegenfilter | 13 Standrohrspiegel |
| 7 Filterkies oder -sand | 14 Ruhewasserspiegel |

**Bild 4 — Bohrloch mit Messstrecke in nicht standfestem Boden mit Filterkies und Abdichtung:
Messstrecke bildet „vollkommenen Brunnen“ — gespanntes Grundwasser**

7.4.3.2 Absenkversuch (AB)

7.4.3.2.1 Stationärer Versuch (S)

Aus der Messstelle wird mit Hilfe einer Pumpe Wasser entnommen. Die Entnahme ist so einzustellen, dass sich der Wasserspiegel in der Messstelle bei vorgegebener konstanter Entnahme Q oberhalb der Filterstrecke in einer konstanten Tiefe h unter dem Ruhewasserspiegel einstellt. Dabei muss bei Druckpumpen oberhalb der Pumpe eine Wassersäule verbleiben, die groß genug ist, um Verwirbelungen durch die Pumpe auszuschließen. Bei Saugpumpen gilt die Forderung für die Unterkante Saugrohr. Der Abfluss Q und die Wasserspiegellage in der Messstelle sind dazu kontinuierlich zu messen. Die Konstanz von Q und h sollte über mindestens 10 min beobachtet werden.

7.4.3.2.2 Instationärer Versuch (I)

Aus der Messstelle wird durch Pumpen Wasser so entnommen, dass der Wasserspiegel in der Messstelle absinkt und noch oberhalb der Filterstrecke verbleibt. Nach Abschalten der Pumpe wird die Höhe des ansteigenden Wasserspiegels in der Messstelle wiederholt in zunehmenden Zeitabständen gemessen. Die Messung ist so lange fortzuführen, bis eine sichere Auswertung möglich ist. Dies ist gegeben, wenn

- die Beobachtungszeit mindestens 15 min beträgt und
- die beobachtete Spiegeldifferenz mindesten 15 cm beträgt.

Der Versuch ist mindestens dreimal durchzuführen.

7.4.3.3 Auffüllversuch (AU)

7.4.3.3.1 Stationärer Versuch (S)

In die Messstelle wird Wasser so eingefüllt, dass sich bei gleich bleibender Zugabe Q ein konstanter Wasserspiegel einstellt. Das Wasser muss hierbei über einen unter den Wasserspiegel eintauchenden Schlauch blasenfrei eingegeben werden. Q und die Höhe des Wasserspiegels in der Messstelle werden kontinuierlich gemessen. Die Konstanz der Messwerte ist über eine Zeitspanne von 10 min nachzuweisen.

7.4.3.3.2 Instationärer Versuch (I)

Durch Zugabe von Wasser über einen unter den Wasserspiegel reichenden Schlauch wird der Wasserspiegel in der Messstelle einmaligblasenfrei angehoben. Nach Ziehen des Schlauches wird der absinkende Wasserspiegel wiederholt eingemessen. Für die Vorgaben von Zeit und Spiegeldifferenz gilt 7.4.3.2.2.

7.4.3.4 Versuch mit Verdrängungskörper (V)

Bei dieser Versuchsart wird Wasser aus der Messstelle weder abgepumpt noch in die Messstelle zugegeben. Die Änderung der Ausgangsspiegelhöhe für einen instationären Versuch wird mit Hilfe eines in der Messstelle vollständig unter den Grundwasserspiegel getauchten Verdrängungskörpers bewirkt. Nach Eintauchen des Verdrängungskörpers wird das Absinken, nach dessen Ziehen das Wiederansteigen des Wasserspiegels in der Messstelle zeitabhängig nach 7.4.3.2.2 bzw. 7.4.3.3.2 gemessen.

ANMERKUNG Diese Versuchsart wird auch Slug-and-Baile-Test genannt.

7.4.3.5 Einschwingversuch (E)

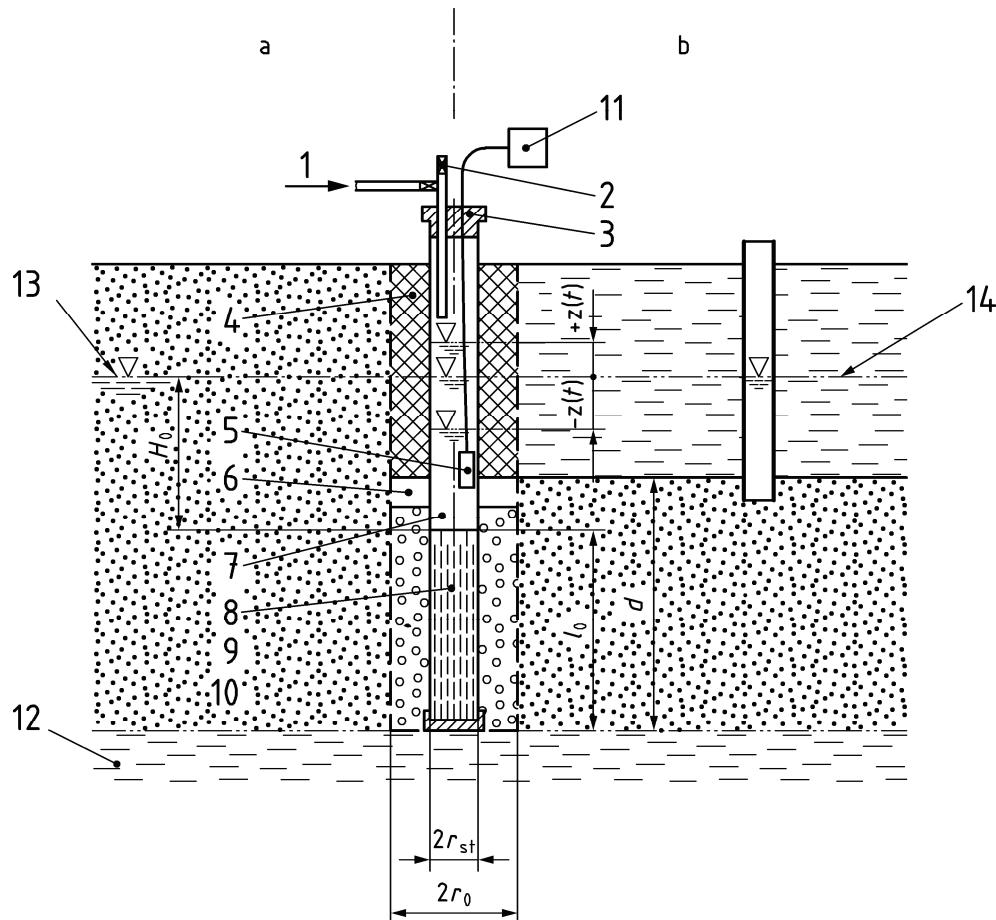
Der Versuch wird in der Regel über ein EDV-Programm gesteuert und ausgewertet.

Bei durchlässigen bis schwach durchlässigen Böden muss der Ringraum in der Grundwassermessstelle abgedichtet sein, damit Grundwasser nicht bevorzugt in den Ringraum aufsteigen kann (siehe Bild 5). Der Ruhewasserspiegel muss im Vollrohr der Grundwassermessstelle liegen, damit die Druckluft nicht über die Filterschlüsse entweichen kann.

Bei der Versuchsdurchführung sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

- Prüfen des Messsystems und Kalibrierung;
- Einbauen des Druckaufnehmers in die Grundwassermessstelle;
- Abdichten des Messstellenkopfes;
- Absenken des Wasserspiegels durch Aufbringen von Druckluft;
- Auslösen des Einschwingvorgangs durch Entspannen der Druckluft; dabei messen des zeitabhängigen Wasserspiegels, evtl. mit Schwingungen über die Höhe des Ruhewasserspiegels hinaus.

Der Versuch ist zur Kontrolle zweimal zu wiederholen.

**Legende**

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| a freier Grundwasserspiegel | 8 Filterrohr |
| b gespannter Grundwasserspiegel | 9 Filterkies oder Sand |
| 1 Druckluft | 10 Kappe |
| 2 Ventil | 11 Gerät zur Datenerfassung |
| 3 luftdichter Verschluss | 12 Grundwassernichtleiter |
| 4 Abdichtung | 13 freier Ruhewasserspiegel H_0 |
| 5 Druckaufnehmer | 14 gespannter Ruhewasserspiegel H_0 |
| 6 Gegenfilter | |
| 7 Messrohr | |

Bild 5 — Versuchsanordnung beim Einschwingversuch (E)**7.5 Auswertung****7.5.1 Absenkversuch und Auffüllversuch****7.5.1.1 Ermittlung des wirksamen Ruhewasserspiegels bei nichtstationärer Versuchsdurchführung**

Aus den beobachteten ansteigenden oder abfallenden Wasserspiegeln werden für die einzelnen Zeitintervalle Δt deren mittlere Höhen $h_{mi} = 0,5 \cdot (h_i + h_{i+1})$ und mittlere Anstiegs- oder Absinkgeschwindigkeiten $v_i = |(h_i - h_{i+1}) / \Delta t|$ errechnet und in einem Diagramm mit h_{mi} als Ordinate und v_i als Abszisse — beide in linearem Maßstab — aufgezeichnet (siehe Bild 6). Trat während des Versuchs keine Änderung des Wassergehalts im durchströmten Boden ein, so liegen die Punkte im Diagramm auf einer (ausgleichenden) Geraden („Geschwindigkeitslinie“), die die Abszissenachse ($v_i = 0$) auf Höhe des wirksamen Ruhewasserspiegels schneidet. Auf diese Höhe sind die Höhen der Wasserspiegel in der weiteren Auswertung zu beziehen.

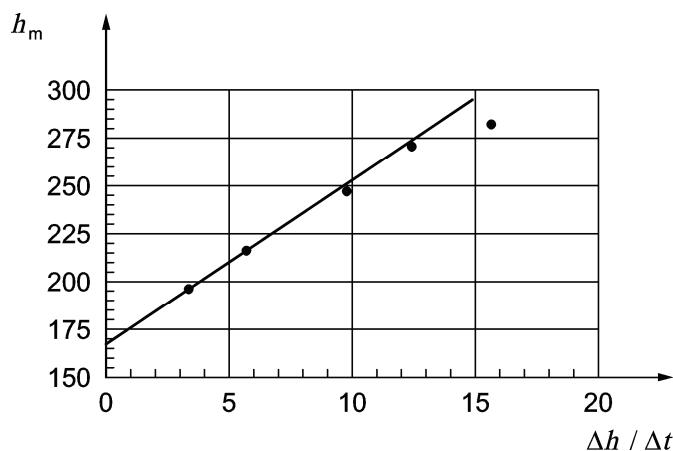


Bild 6 — Ermittlung des wirksamen Ruhewasserspiegels mit Hilfe der Geschwindigkeitslinie

7.5.1.2 Filterstrecke im gespannten Grundwasser

Fall A) Die Filterstrecke ist kürzer als die Mächtigkeit der durchlässigen Schicht

Bei der Auswertung ist zwischen Halbraum- und Vollraum-Bedingung zu unterscheiden.

Halbraum-Bedingung (H) liegt vor, wenn

- a) der Abstand zwischen OK Filterstrecke und Grundwasserdeckfläche kleiner als $a_0 = 2 r_0$ und zwischen UK Filterstrecke und Grundwassersohle größer als $a_u = 5 r_0$ ist oder wenn
- b) der Abstand zwischen OK Filterstrecke und Grundwasserdeckfläche größer als $a_0 = 5 r_0$ und zwischen UK Filterstrecke und Grundwassersohle kleiner als $a_u = 2 r_0$ ist

Vollraum-Bedingung (V) liegt vor, wenn

der Abstand zwischen OK Filterstrecke und Grundwasserdeckfläche und zwischen UK Filterstrecke und Grundwassersohle größer als $5 r_0$ ist.

Für stationäre Versuchsdurchführung gilt

$$\text{bei Halbraumbedingung } k = \frac{Q \cdot F_H}{2\pi \cdot r_0 \cdot h} \quad (2)$$

$$\text{bei Vollraumbedingung } k = \frac{Q \cdot F_V}{4\pi \cdot r_0 \cdot h} \quad (3)$$

Für nichtstationäre Versuchsdurchführung gilt

$$\text{bei Halbraumbedingung } k = \frac{r_{st}^2 \cdot F_H}{2r_0 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

$$\text{bei Vollraum-Bedingung } k = \frac{r_{st}^2 \cdot F_V}{4r_0 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

Dabei ist

- r_0 der Radius der Bohrung in der Filterstrecke;
- Q Zufluss zur oder Abfluss aus der Versuchsstelle;
- h konstanter hydraulischer Unterschied zwischen Wasserspiegel in der Versuchsstelle und dem Ruhewasserspiegel;
- r_{st} der Radius des Standrohrs, in dem das Absinken bzw. Ansteigen des Wasserspiegels zeitlich beobachtet wird;
- h_1 hydraulischer Unterschied zwischen Wasserspiegel in der Versuchsstelle und dem Ruhewasserspiegel zum Zeitpunkt t_1 ;
- h_2 hydraulischer Unterschied zwischen Wasserspiegel in der Versuchsstelle und dem Ruhewasserspiegel zum Zeitpunkt t_2 ;

der Formfaktor F für α -Werte größer oder gleich 2,0:

$$F = \frac{\ln(\alpha + \sqrt{1 + \alpha^2})}{\alpha} \quad (6)$$

mit dem Schlankheitsverhältnis α

$$\text{für Halbraum-Bedingung } \alpha = \frac{l_0}{r_0} \quad (7)$$

$$\text{für Vollraum-Bedingung } \alpha = \frac{l_0}{2r_0} \quad (8)$$

l_0 die Länge der Filterstrecke (siehe Bilder 2 bzw. 3)

Für α -Werte kleiner 2,0 sind anstelle von Gleichung (6) folgende Beziehungen gültig:

$$\text{für Halbraumbedingung } F_H = 0,954 \cdot (\alpha + 0,1)^{-0,4023} \quad (9)$$

$$\text{für Vollraumbedingung } F_V = 0,87 - 0,244 \cdot \ln(\alpha + 0,055) \quad (10)$$

Fall B) Länge der Filterstrecke entspricht der Mächtigkeit der durchlässigen Schicht

$$\text{für stationäre Versuchsdurchführung gilt } k = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}{2\pi \cdot l_0 \cdot h} \quad (11)$$

Dabei ist

R die Reichweite der versuchsbedingten Veränderung der Druckhöhe des Grundwassers;

Länge der Filterstrecke $l_0 = d$ Mächtigkeit der durchlässigen Schicht;

h konstanter hydraulischer Unterschied zwischen Wasserspiegel in der Versuchsstelle und dem Grundwasserspiegel;

Näherungsweise kann $\ln(R/r_0) = 5$ gesetzt werden.

7.5.1.3 Filterstrecke im freien Grundwasser

Fall A) Die Filterstrecke ist kürzer als die Mächtigkeit des Grundwassers unter dem Ruhewasserspiegel

$$\text{für nichtstationäre Versuchsdurchführung } k = \frac{r_{st}^2 \cdot \ln \frac{R}{r_0}}{2l_0 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (12)$$

Dabei ist

r_{st} der Radius des Standrohrs, in dem das Absinken bzw. Ansteigen des Wasserspiegels zeitlich beobachtet wird;

h_1 hydraulischer Unterschied zwischen Wasserspiegel in der Versuchsstelle und dem Ruhewasserspiegel zum Zeitpunkt t_1 ;

h_2 hydraulischer Unterschied zwischen Wasserspiegel in der Versuchsstelle und dem Ruhewasserspiegel zum Zeitpunkt t_2 ;

R die Reichweite;

r_0 der Radius der Bohrung in der Filterstrecke;

$$\ln \frac{R}{r_0} = \left[\frac{1,1}{\ln \frac{(l_0 + H_0)}{r_0}} + \frac{r_0}{l_0} \cdot \left(A + B \cdot \ln \frac{[d - (l_0 + H_0)]}{r_0} \right) \right]^{-1} \quad (13)$$

mit

den Koeffizienten A und B nach Bild 7

l_0 Länge der Filterstrecke;

H_0 Abstand des Ruhewasserspiegels von OK Filterstrecke;

d Grundwassermächtigkeit unterhalb des Ruhewasserspiegels.

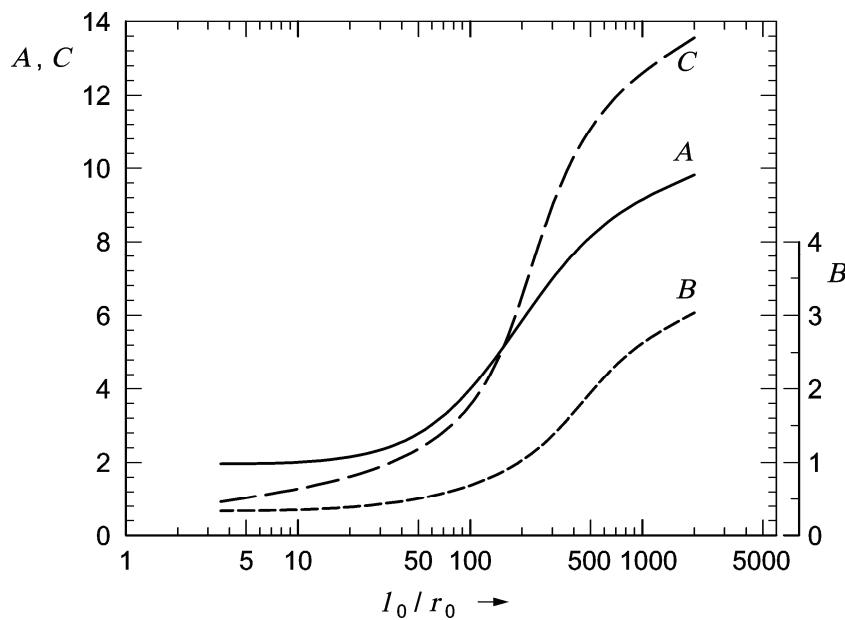


Bild 7 — Koeffizienten A , B und C über I_0/r_0 (nach Bouwer und Rice, 1976)

Gleichung (13) liefert auch für gespanntes Grundwasser nach 7.5.1.2 brauchbare Ergebnisse, wenn der Abstand der Filteroberkante zur Deckschicht $> 5 r_0$ ist, die Halbraum- oder Vollraum-Bedingungen für die Anwendung der Gleichungen (4) oder (5) aber sonst nicht zutreffen.

Fall B) Länge der Filterstrecke entspricht der Mächtigkeit des Grundwassers unterhalb des Ruhewasserspiegels

Auswertung nach Gleichung (12) mit

$$\ln \frac{R}{r_0} = \left(\frac{1,1}{\ln \frac{(l_0 + H_0)}{r_0}} + \frac{r_0}{l_0} \cdot C \right)^{-1} \quad (14)$$

Der Koeffizient C ist Bild 7 zu entnehmen.

Die rechnerische Ermittlung der Koeffizienten A , B und C ist Anhang A zu entnehmen.

7.5.2 Einschwingversuch

7.5.2.1 Allgemeines

Die Transmissivität T und der Durchlässigkeitsbeiwert k errechnen sich für einen vollkommenen Brunnen zu

$$T = k \cdot d = 1,3 \cdot r_{st}^2 \cdot \omega_w / \beta \quad (15)$$

mit

$$k = T/d$$

Für einen unvollkommenen Brunnen gilt

$$T = k \cdot l_0 = 1,3 \cdot r_{st}^2 \cdot \omega_w / \beta \quad (16)$$

$$k = T/l_0$$

Dabei ist

- T die Transmissivität in m^2/s ;
- k der Durchlässigkeitsbeiwert in m/s ;
- d die Mächtigkeit des Grundwasserleiters in m ;
- l_0 die Länge der Filterstrecke in m ;
- r_{st} der Radius der schwingenden Wassersäule in m ;
- ω_w die Eigenfrequenz des Systems in $1/\text{s}$;
- β der Dämpfungsfaktor des Einschwingvorgangs.

ANMERKUNG Die Einschwingvorgänge können sowohl im gespannten wie im ungespannten Grundwasser mit asymptotischem oder oszillierendem Verlauf auftreten. Sie sind allein von der Transmissivität des Grundwasserleiters und der Brunnengeometrie abhängig.

7.5.2.2 Asymptotischer Verlauf

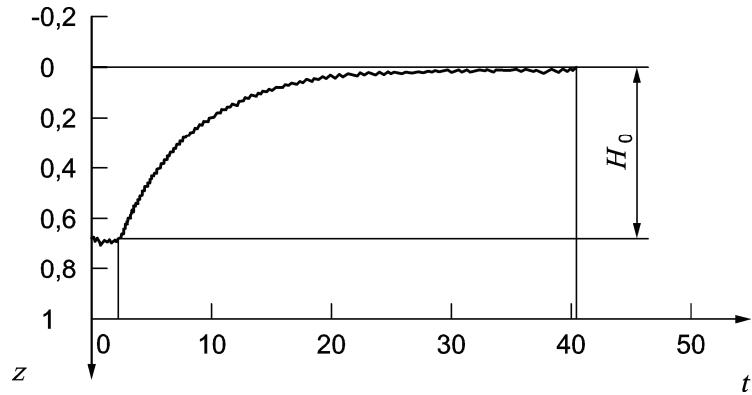


Bild 8 — „Asymptotischer Verlauf“

Bei exponentiellem, asymptotischem Verlauf ergibt sich die Eigenfrequenz ω_w des Systems zu

$$\omega_w = \frac{3,3}{\sqrt{H_0}} \quad (17)$$

ANMERKUNG Die Eigenfrequenz ω_w hängt hauptsächlich von der Druckhöhe H der Wassersäule im Brunnen bzw. in der Grundwassermessstelle oberhalb Filteroberkante ab.

Der Dämpfungskoeffizient β berechnet sich aus

$$\beta = \frac{\omega_w^2 + \delta^2}{2\delta \cdot \omega_w} \quad (18)$$

Dabei ist

H_0 die Höhe des Ruhewasserspiegels oberhalb der Filter-OK;

δ der Steigungskoeffizient der logarithmisch aufgetragenen Auslenkung $z(t)$ gegenüber der Zeit t , ermittelt durch Regressionsrechnung aus den Messdaten;

$$z(t) = z_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \quad \text{die Restauslenkung des Wasserspiegels im Brunnen zur Zeit } t \text{ in m;}$$

t die Zeit in s;

z_0 die Anfangsauslenkung des Wasserspiegels zur Zeit t_0 ;

$$\ln z = \ln z_0 - \delta \cdot t.$$

ANMERKUNG 1 Ermittlung von δ siehe Bild 21 im Anwendungsbeispiel nach 11.1.6.

ANMERKUNG 2 Asymptotischer Verlauf ist bei schwach durchlässigen und durchlässigen Böden (siehe DIN 18130-1) zu erwarten.

7.5.2.3 Oszillierender Verlauf

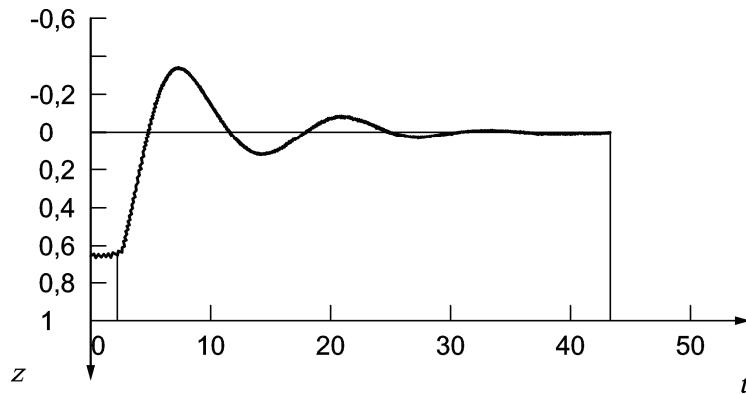


Bild 9 — „Oszillierender Verlauf“

$$\omega_w = \frac{2\pi}{\tau \cdot \sqrt{1 - \beta^2}} \quad (19)$$

Darin ist τ die Periode der Schwingung.

$$\beta^2 = \frac{1}{1 + \frac{4\pi^2}{\tau^2 \cdot \delta^2}} \quad (20)$$

ANMERKUNG 1 Ermittlung von τ und δ siehe Bilder 23 und 24 im Anwendungsbeispiel 11.1.7.

ANMERKUNG 2 Oszillierender Verlauf ist bei stark durchlässigen Böden (siehe DIN 18130-1) zu erwarten.

8 Versuche mit Aufsatzgerät (A)

8.1 Bodenarten

Diese Anordnung eignet sich für die Untersuchung von künstlich hergestellten Dichtungsschichten aus feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden mit Durchlässigkeitsbeiwerten $k < 10^{-8}$ m/s.

8.2 Geräte

Für diese Versuchsanordnung werden benötigt:

8.2.1 Aufsatzgerät, bestehend aus einem unten offenen Standrohr von 100 mm bis 300 mm Durchmesser, das oben geschlossen werden kann und eine Messpipette trägt. Das Eigengewicht des Standzylinders muss größer sein als

$$1,2 \cdot \gamma_w \cdot r_0^2 \cdot \pi \cdot h_p \quad (21)$$

Dabei ist

γ_w die Wichte des Wassers;

r_0 der Halbmesser des Standohrs;

h_p die Höhe der Messpipette.

Das Verhältnis des Standrohrdurchmessers 2 r_0 zum lichten Durchmesser der Messpipette 2 r_p sollte ≥ 5 sein. Das Standrohr ist außen zum Wärmeschutz isoliert und mit einer reflektierenden Folie (Alufolie) überdeckt.

ANMERKUNG Hierdurch wird sichergestellt, dass Temperaturänderungen im Messwasser, die in der Versuchszeit eintreten, den Durchlässigkeitsbeiwert um nicht mehr als 30 % verändern.

8.2.2 Bentonitpaste oder Paste aus Grobsand und Bentonit.

8.2.3 Stahllineal mit Schneide und Fase.

8.2.4 schlufffreier, an Sand armer Kies (möglichst Körnung 16/32).

8.2.5 Behälter mit Wasser.

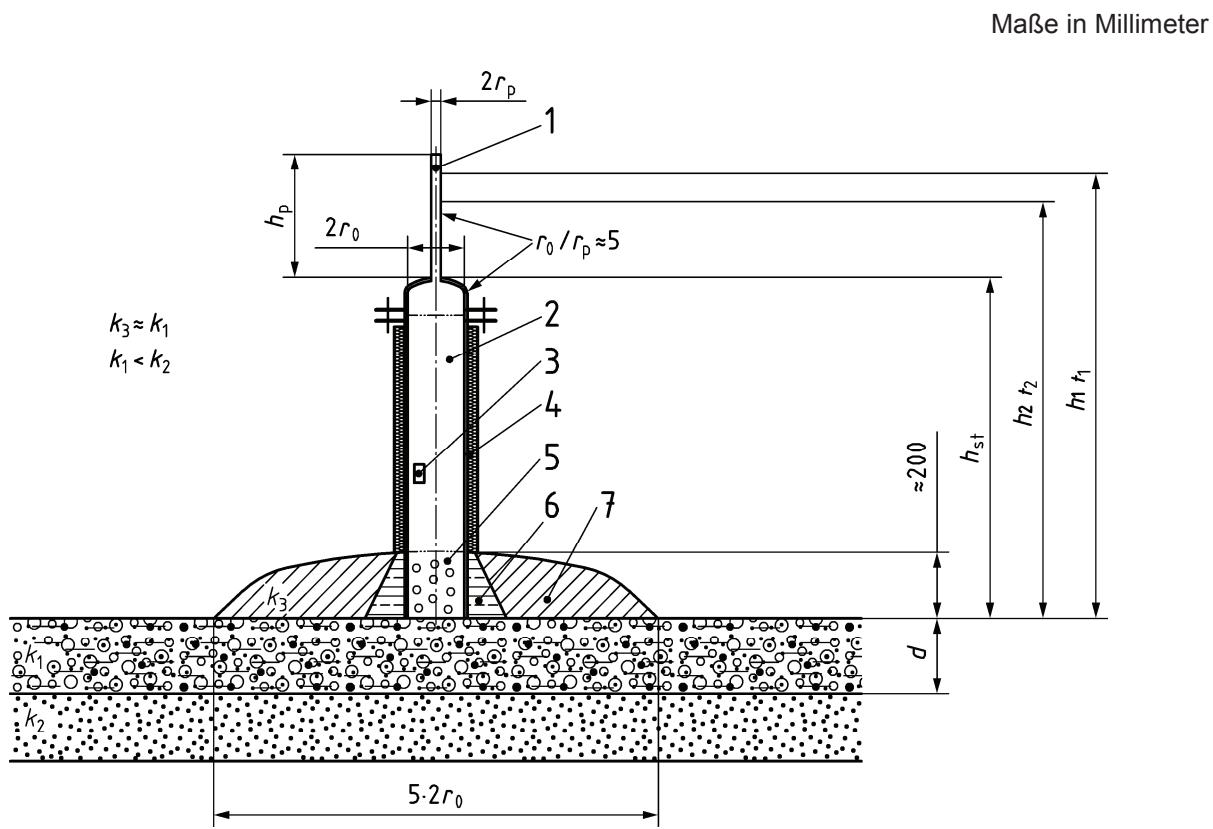
8.2.6 Schlauch mit Trichter.

8.2.7 Thermometer, Ableseunsicherheit von 0,5 K.

8.2.8 Stoppuhr.

8.3 Anordnung

Das Gerät sitzt mit der Rohrunterkante auf dem zu untersuchenden Boden auf und wird gegen diesen nach Bild 10 abgedichtet. Die Mächtigkeit der zu untersuchenden Schicht sowie die Größenordnung des Durchlässigkeitsbeiwerts ihrer Unterlage müssen bekannt sein. Der Grundwasserspiegel liegt in der Regel deutlich tiefer als die Oberfläche des zu untersuchenden Bodens. Der Versuch wird mit fallender Druckhöhe ausgeführt.



Legende

- | | |
|--|---------------------|
| 1 Messpipette | 5 Kies |
| 2 Standrohr | 6 Bentonitdichtung |
| 3 Temperaturaufnehmer | 7 Dichtungsmaterial |
| 4 Isolierung mit reflektierender Folie | |

Bild 10 — Aufsatzgerät

8.4 Durchführung

An der Untersuchungsstelle wird die Geländeoberfläche eben abgeglichen, ohne die Poren zu verschmieren.

An der Aufstandsfläche wird der untere Teil des Geräts mit dem Ende des Standrohrs aufgestellt, um das Standrohr Bentonitmörtel aufgebaut und in einer Breite von mindestens dem 2-fachen Standrohrdurchmesser mit weiterem Dichtungsboden umgeben (siehe Bild 10). Der Durchlässigkeitsbeiwert dieser Dichtungen darf nicht größer als der des zu prüfenden Bodens sein. In das Rohr wird auf etwa 200 mm Höhe Kies eingefüllt und die restlichen Teile werden mit Dichtungen aufgesetzt. Nun wird bis über die obere Marke in der Messpipette mit Hilfe von Schlauch und Trichter Wasser luftblasenfrei eingefüllt. Das Absinken des Wasserspiegels in der Messpipette wird zeitabhängig gemessen. Bei jeder Ablesung ist die Temperatur des Wassers etwa im unteren Drittel des Standrohres zu messen. Der Vorgang ist durch Wiederauffüllen der Messpipette so lange zu wiederholen, bis sich etwa gleiche Versuchszeiten einstellen.

8.5 Auswertung

Bei einer Dicke der zu untersuchenden Schicht $d \geq 5 \cdot r_0$ wird nach Gleichung (4) mit einem Formbeiwert $F_H = 1,57$ ausgewertet. Voraussetzung ist, dass der Grundwasserspiegel unterhalb der zu untersuchenden Schicht liegt.

Die erhaltenen Durchlässigkeitsbeiwerte sind dem mittleren Sättigungsgrad bzw. Luftporenanteil im durchströmten Bereich zugeordnet.

9 Versuche in Dichtwänden (DW)

9.1 Arten der Dichtwand

Diese Anordnung eignet sich zur Untersuchung von Dichtwänden definierter Dicke, die z. B. als Schlitzwände, im Injektionsverfahren oder im Düsenstrahlverfahren hergestellt wurden und Durchlässigkeitsbeiwerte $k < 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ aufweisen.

9.2 Geräte

- Druckaufnehmer, Lichtlot oder Schwimmerlot zur Messung des Wasserspiegels;
- Stoppuhr;
- Wasserbehälter;
- Packer mit Standrohr.

9.3 Herstellen des Bohrlochs

9.3.1 Anforderungen an die Geometrie

Die Bohrung ist mit einem Außendurchmesser $d \geq 10 \text{ cm}$ in der Dichtwand möglichst mittig abzuteufen. Die Bohrungen müssen als Rotationskernbohrungen — in der Regel mit Doppelkernrohr — ausgeführt werden.

Die Bohrung ist richtungsgenau auszuführen. Vor Einsatz des Bohrlochs als Messstelle ist das Bohrloch bis zur Endteufe auf Lotabweichungen zu vermessen. Die tatsächliche Dickenabmessung sowie Lotabweichungen der Dichtwand müssen bereits aus den herstellungsbegleitenden Messungen bekannt sein. Der Randabstand sollte 10 cm an keiner Stelle unterschreiten. Abstände des Bohrlochs mit Randabständen $< 10 \text{ cm}$ sind aus der Messung auszuschließen.

9.3.2 Ausbau des Bohrlochs

Das Bohrloch bleibt unverrohrt. Falls der Wasserspiegel in einem Standrohr gemessen wird, muss dieses an die Bohrlochwandung mittels Packer dicht angeschlossen werden.

9.4 Durchführung

Das Bohrloch wird entweder integral über die gesamte Höhe oder in durch Einfach- oder Zweifachpacker begrenzten Abschnitten untersucht.

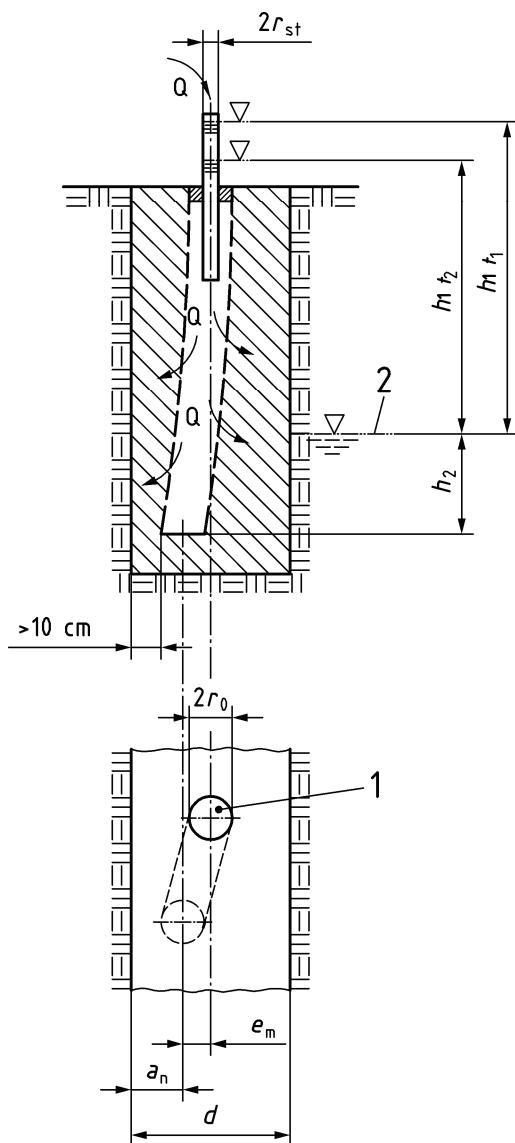
Im Bohrloch wird in der Regel nach 7.4.3.3.2 ein instationärer Auffüllversuch durchgeführt. Der Versuchsdurchführung sollte eine mehrtägige Sättigungsphase vorangehen. Das Bohrloch ist über diese Zeit mit Wasser gefüllt zu halten. Die Grundwasserspiegel beidseits der Dichtwand müssen für die Auswertung bekannt sein und sind während der Versuchsdurchführung begleitend zu beobachten. Für einen Absenkversuch ist nach 7.4.3.2.2 vorzugehen.

9.5 Auswertung

Die Auswertung wird für den Auffüllversuch mit den Bezeichnungen von Bild 11 für die instationäre Versuchsdurchführung unter Annahme einer undurchlässigen Bohrlochsohle nach Gleichungen (22), (23) und (24) vorgenommen.

Beim Absenkversuch ist $r_{st} = r_0$ und die Indizes der Versuchszeiten sind zu vertauschen.

Für die Auswertung muss die Wasserdrukverteilung längs des Bohrlochs in dreieck- und rechteckförmige Anteile unterteilt werden (siehe Bild 26). Dann ist der im Standrohr gemessene Durchfluss nach Gleichung (24) der Summe aller rechnerischen Durchflüsse durch die Dichtwand nach Gleichungen (22) und (23) gleichzusetzen und daraus der Durchlässigkeitsbeiwert der Dichtwand zu errechnen (siehe Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 9).



Legende

- 1 Prüfbohrloch
- 2 Ruhewasserspiegel

Bild 11 — Auffüllversuch in Dichtwand

Der rechnerische Durchfluss durch die Dichtwand infolge dreieckförmigen Druckverlaufs längs des Bohrlochs beträgt

$$Q_{\Delta} = k \cdot \frac{\pi \cdot h_{1m}^2}{\ln \left[\frac{2d}{\pi \cdot r_0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot a}{d} \right]} \quad (22)$$

Der rechnerische Durchfluss durch die Dichtwand infolge rechteckförmigen Druckverlaufs längs des Bohrlochs beträgt

$$Q_{\square} = k \cdot \frac{2\pi \cdot h_{1m} \cdot h_2}{\ln \left[\frac{2d}{\pi \cdot r_0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot a}{d} \right]} \quad (23)$$

Der in der Zeit $t_1 - t_2$ im Standrohr beobachtete Durchfluss beträgt

$$\Sigma Q = \frac{r_{st}^2 \cdot \pi \cdot (h_{1t_1} - h_{1t_2})}{t_1 - t_2} \quad (24)$$

Dabei sind in den Gleichungen (22) bis (24)

h_{1t_1} der Wasserstand im Standrohr über dem Mittel der Grundwasserspiegel beidseits der Dichtwand zu Beginn der Versuchsdurchführung (t_1);

h_{1t_2} der Wasserstand im Standrohr über dem Mittel der Grundwasserspiegel beidseits der Dichtwand am Ende der Versuchsdurchführung (t_2);

$h_{1m} = 0,5 \cdot (h_{1t_1} - h_{1t_2})$ mittlerer Wasserstand im Standrohr über dem Mittel der Grundwasserspiegel beidseits der Dichtwand;

h_2 Einbindetiefe des Bohrlochs unter den Grundwasserspiegel;

t_1 Zeit des Beginns der Versuchsdurchführung;

t_2 Zeit des Endes der Versuchsdurchführung;

r_{st} Radius des Standrohrs;

r_0 Radius der Bohrung;

d Dicke der Dichtwand im Bereich der Bohrung;

a Abstand zwischen Bohrachse und nächstgelegener Außenkante der Dichtwand.

Ist $a > 0,3 d$, so darf die Exzentrizität der Bohrung in der Auswertung vernachlässigt werden, in dem $a = d/2$ gesetzt wird.

Liegt die Schlitzwand unterhalb des im Bohrloch stehenden Wasserspiegels in durchlässigem Boden und verläuft das Bohrloch parallel zur Wand, so ergibt sich der Durchlässigkeitsbeiwert der Dichtwand k bei einem Absenkversuch aus den Gleichungen (22) bis (24) zu

$$k = \frac{h_{1t_1} - h_{1t_2}}{t_1 - t_2} \cdot \frac{r_{st}^2 \cdot \ln \frac{2d}{\pi \cdot r_0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot a}{d}}{(h_{1m} + 2h_2) \cdot h_{1m}} \quad (25)$$

Bei zentrischer Bohrung vereinfacht sich Gleichung (25) zu

$$k = \frac{h_{1t_1} - h_{1t_2}}{t_1 - t_2} \cdot \frac{r_{st}^2 \cdot \ln \frac{2d}{\pi \cdot r_0}}{(h_{1m} + 2h_2) \cdot h_{1m}} \quad (26)$$

10 Angabe der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind wie folgt anzugeben:

- a) Angaben zum Boden und zu den allgemeinen Versuchsbedingungen:
 - Schichtenprofil;
 - Bodenart des untersuchten Grundwasserleiters nach DIN 4022-1;
 - Bodenart der angrenzenden Grundwasserhemmer oder Grundwassernichtleiter nach DIN 4022-1;
 - Ausbauzeichnung der Messstelle;
 - Versuchsart mit Bezeichnung nach Abschnitt 4;
 - Lageskizze mit Versuchsstelle, gegebenenfalls mit benachbarten Grundwassermessstellen
- b) Angaben zum Versuch:
 - vermaßte Schnittskizze;
 - Ruhewasserspiegel (Druckhöhe) des Grundwassers, gegebenenfalls mit zeitlicher Entwicklung (Datums- und Zeitangabe);
 - Witterungsbedingungen (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung usw.);
 - Wassertemperatur (bei Einfüllversuchen);
 - Angaben zur Messanordnung und zu verwendeten Messgeräten;
- c) Versuchsdaten mit Angabe von Datum und Uhrzeit;
- d) Ergebnisse der Versuchsauswertung unter Hinweis auf den zutreffenden Abschnitt der Norm;
- e) gegebenenfalls zeichnerische Darstellung der Versuchsergebnisse.

11 Anwendungsbeispiele

11.1 Anwendungsbeispiele zu Abschnitt 7 (Versuche im Bohrloch)

11.1.1 Absenkversuch, stationär, in gespanntem Grundwasser, Vollraumbedingung

Absenkversuch im gespannten Grundwasser bei zurückgezogener Verrohrung in standfestem Boden. Bild 12 zeigt die Messstellenkonfiguration.

Versuch DIN 18130 – 2 – AB – S – VR

Grundwasserleiter:	schwach schluffiger Feinsand (fS, u')
Grundwasserhemmer:	Deckschicht: schwach feinsandiger Schluff (U, fs')
	Sohlschicht: schluffiger Ton (T, u)
h Absenkung im Bohrloch	1 m
Q_E Entnahme	$37 \text{ l/h} = 37 \cdot 0,001/3\,600 = 1,028 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
r_0 Radius der Bohrung in der Filterstrecke	0,11 m

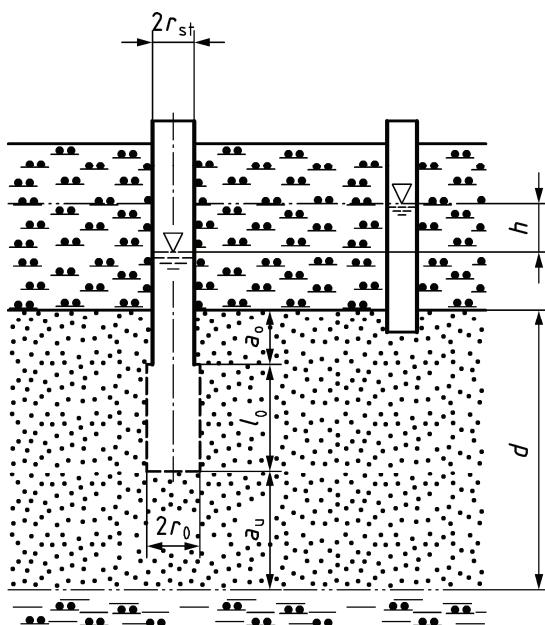


Bild 12 — Absenkversuch in gespanntem Grundwasser — Vollraumbedingung

a_0 Abstand Filterstrecke Grundwasseroberfläche	4,4 m
a_u Abstand Filterstrecke Grundwassersohle	11 m
l_0 Länge Filterstrecke	6,6 m
Abstand Filterstrecke zu Rändern	
Abstand zur Grundwasseroberfläche	$a_0 > 2 r_0 = 0,22 \text{ m}$
Abstand zur GW-Sohle	$a_u > 5 r_0 = 0,55 \text{ m}$

Vollraumbedingung Auswertung nach Gleichung (3) und (6).

$$k = \frac{Q \cdot F_V}{4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h}, \quad \text{mit} \quad F_V = \frac{\ln(\alpha + \sqrt{1 + \alpha^2})}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{l_0 / 2}{r_0}$$

a) α Schlankheitsverhältnis $\alpha = (6,6/2)/0,11 = 30$

b) F_V Formbeiwert für Vollraum $F_V = \ln(30 + (1 + 30^2)^{1/2})/30 = 0,1365$

c) $k = \frac{1,028 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1365}{4 \cdot \pi \cdot 0,11 \cdot 1,0} = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

11.1.2 Auffüllversuch, stationär, in gespanntem Grundwasser, Halbraumbedingung

Auffüllversuch in gespanntem Grundwasser bei knapp über der Grundwassersohle zurückgezogener Verrohrung (standfester Boden). Bild 13 zeigt die Messstellenkonfiguration.

Versuch DIN 18130 – 2 – AU – S – HR

Grundwasserleiter: schwach schluffiger, feinsandiger Mittelsand (mS, fs, u')

Grundwasserhemmer: Deckschicht: stark feinsandiger Ton (T, fs*)

Sohlschicht: sandiger, toniger Schluff (U, s, t)

h_0 Ruhewasserstand im Bohrloch 11 m

h_1 Wasserstand im aufgefüllten Bohrloch 11,8 m

Q_Z Zufluss $38 \text{ l/h} = 38 \cdot 0,001/3600 = 1,056 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

r_0 Radius der Bohrung in der Filterstrecke 0,055 m

r_{st} Radius im Standrohr (nicht relevant bei dieser Auswertungsmethode)

a_o Abstand Filterstrecke GW-Oberfläche 10,4 m

a_u Abstand Filterstrecke Grundwassersohle 0 m

l_0 Länge Filterstrecke 0,6 m

Abstand Filterstrecke zu Grundwasseroberfläche $a_o > 2 r_0 = 0,22 \text{ m}$

Abstand zur Grundwassersohle $a_u < 5 r_0 = 0,55 \text{ m}$

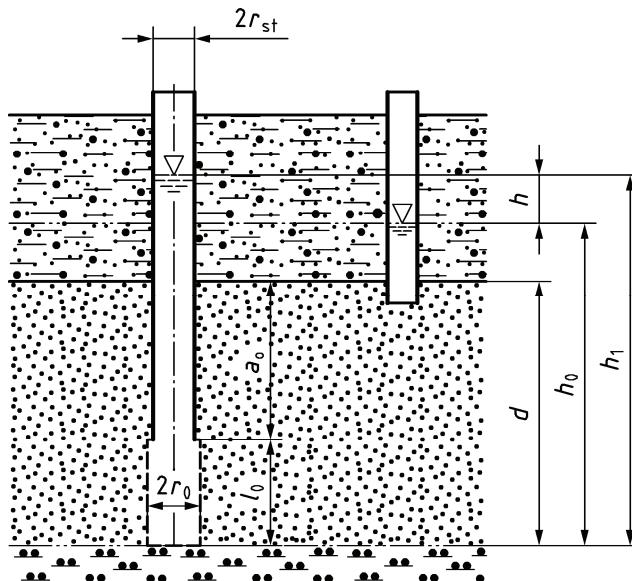


Bild 13 — Auffüllversuch in gespanntem Grundwasser — Halbraumbedingung

Halbraumbedingung

$$k = \frac{Q \cdot F_H}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h} \quad \text{mit} \quad F_H = \frac{\ln(\alpha + \sqrt{1 + \alpha^2})}{\alpha} \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{l_0}{r_0}$$

- a) α Schlankheitsverhältnis $\alpha = 0,6/0,055 = 10,91$
- b) F_H Formbeiwert für Halbraum $F_H = \ln(10,91 + (1 + 10,91^2)^{1/2})/10,91 = 0,283$
- c) $k = \frac{1,056 \cdot 10^{-5} \cdot 0,283}{2 \cdot \pi \cdot 0,055 \cdot 0,8} = 1,08 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

11.1.3 Instationärer Versuch mit Verdrängungskörper in gespanntem Grundwasser, Vollraumbedingung

Der Grundwasserleiter kann in diesem Versuch als nach unten unbegrenzt angesehen werden, die Entfernung zum freien Grundwasserspiegel beträgt knapp einen Meter, somit liegen die Voraussetzungen eines Versuchs im Vollraum vor. Die Systemskizze dieses Versuchs ist in Bild 14 wiedergegeben.

Versuch DIN 18130 – 2 – V – I – VR

Grundwasserleiter:	schwach schluffiger, stark mittelsandiger Feinsand (fS, ms*, u*)
Grundwasserhemmer:	Deckschicht: feinsandiger, schluffiger Ton (T, u, fs)
	Sohlschicht: schwach sandiger, Schluff (U, s')

Nach Feststellung des Ruhewasserspiegels wurde ein Verdrängungskörper in die Verrohrung bis unter den GW-Stand eingeführt. Der Wasserstand im Standrohr stieg zunächst um die Höhe des verdrängten Wasservolumens an und fiel dann mit der Zeit ab. Der zeitliche Verlauf dieses Abfalls und dessen Auswertung wird im Beispiel nicht wiedergegeben. Nach Wiedereinstellung des Ruhewasserstandes wurde der Verdrängungskörper rasch herausgezogen und der Wasseranstieg im Bohrloch beobachtet. Folgende Eingangsgrößen wurden gemessen:

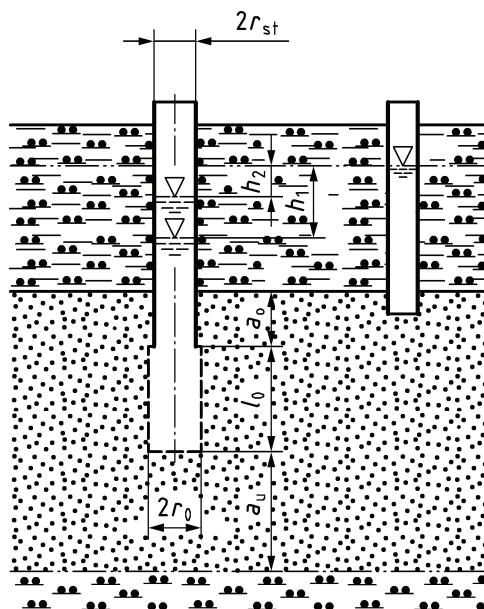


Bild 14 — Instationärer Versuch mit Verdrängungskörper in gespanntem Grundwasser

H_1	Abstand zum Ruhewasserspiegel zur Zeit t_1	} Siehe Tabelle 2
h_2	Abstand zum Ruhewasserspiegel zur Zeit t_2	
t	Zeit zum Wasseranstieg	
r_{st}	Filterradius im Standrohr	0,076 m
r_0	Radius der Bohrung in der Filterstrecke	0,12 m
l_0	Filterlänge	4,56 m

Die zeitliche Entwicklung des Wiederansteigens (bezogen auf den Ruhewasserspiegel) ist in Tabelle 2 dokumentiert, Bild 15 gibt den Verlauf in halblogarithmischer Darstellung wieder.

Tabelle 2 — Zeitlicher Verlauf des Wiederansteigens im Bohrloch

Zeit <i>t</i> s	Absenkung <i>h</i> m
0	0,870
42	0,714
84	0,570
168	0,450
222	0,351
360	0,216
528	0,090
768	0,036
1.116	0,015
1.716	0,006
2.316	0,003

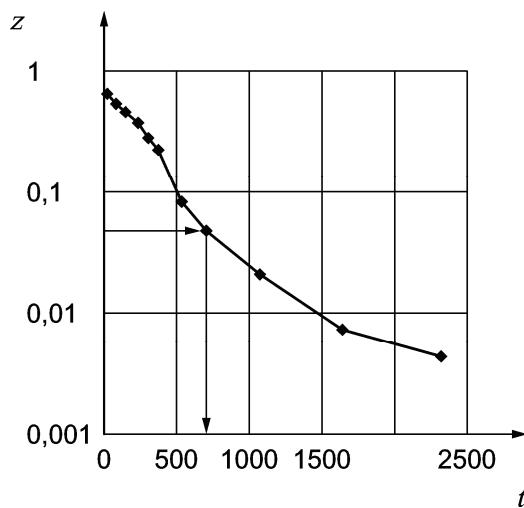


Bild 15 — Zeitlicher Verlauf des Wiederansteigens im Bohrloch

Das Wiederansteigen des Wasserspiegels erfolgt in der Endphase stark verzögert. Für die Auswertung ist lediglich der lineare Ast in der Anfangsphase bis zum Zeitpunkt $t = 768$ s, als der Wasserstand im Standrohr lediglich 0,036 m vom Ruhewasserstand abwich, maßgebend.

Vollraumbedingung

$$k = \frac{r_{st}^2 \cdot F_V}{4 r_0} \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right), \quad \text{mit} \quad F_V = \frac{\ln(\alpha + \sqrt{1 + \alpha^2})}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{l_0 / 2}{r_0}$$

a) α Schlankheitsverhältnis des Filters $\alpha = (4,56/2)/0,12 = 19$

b) F_V Formbeiwert für Vollraum

$$F_V = \ln(19 + (1 + 19^2)^{1/2})/19 = 0,191$$

$$c) k = \frac{0,076^2 \cdot 0,191}{4 \cdot 0,12} \cdot \frac{1}{768} \cdot \ln\left(\frac{0,87}{0,036}\right) = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

11.1.4 Instationärer Auffüllversuch mit freiem Grundwasserspiegel und Auswertung nach dem Verfahren von Bouwer und Rice

Der Auffüllversuch wird im Grundwasser mit freiem Grundwasserspiegel durchgeführt. Die Messstellenkonfiguration ist in Bild 17 skizziert.

Versuch DIN 18130 – 2 – AU – I

Grundwasserleiter: stark kiesiger, schluffiger Sand (S, g*, u)

Sohlschicht: sandiger Ton (T, s)

r_{st} Radius im Standrohr 0,078 m

r_0 Radius der Bohrung in der Filterstrecke 0,11 m

l_0 Filterlänge 2,44 m

d Mächtigkeit des Grundwasserleiters 15,24 m

H_0 Abstand zwischen Filteroberkante und GW-Spiegel 0,00 m

H Wasserstand im Bohrloch über der GW-Sohle zur Zeit t

h hydraulischer Unterschied zum Ruhewasserspiegel im Bohrloch zur Zeit t

Die Wasserstandsänderung infolge einer Wasserzugabe ist in Tabelle 3 dokumentiert.

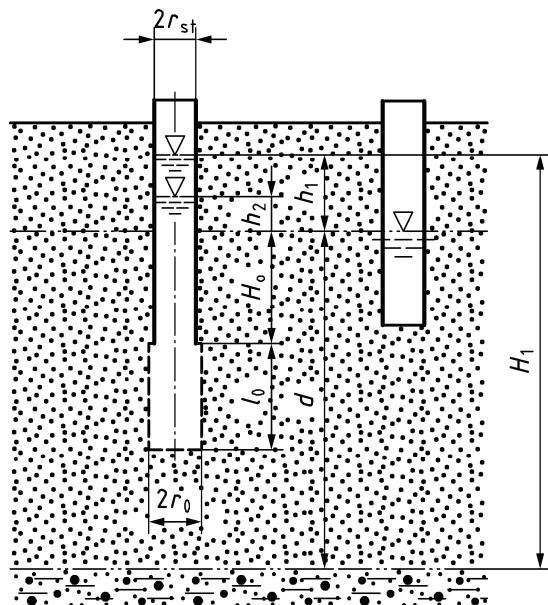


Bild 16 — Instationärer Auffüllversuch in freiem Grundwasser

Tabelle 3 — Wasserstandsentwicklung beim Auffüllversuch

Zeit <i>t</i> s	Zeitintervall <i>Δt</i> s	Wasserstand über GW- Sohle <i>H</i> m	hydraul. Höhe über Ruhe GW <i>h</i> cm	Absenkung in der Zeit <i>dt</i> <i>Δh</i> cm	Mittlerer WS über GW- Sohle <i>H_m</i> m	Absink- geschwindig- keit <i>Δh / Δt</i> cm/s
0,0	2,5	16,25	101	9	16,205	3,600
2,5	2,5	16,16	92	8	16,120	3,200
5,0	2,5	16,08	84	7	16,045	2,800
7,5	2,5	16,01	77	6	15,980	2,400
10,0	10,0	15,95	71	18	15,860	1,800
20,0	10,0	15,77	53	13	15,705	1,300
30,0	30,0	15,63	39	24	15,520	0,800
60,0	30,0	15,40	16	9	15,355	0,300
90,0	30,0	15,31	7	4	15,290	0,133
120,0		15,27	3			

Zunächst ist der Ruhewasserspiegel anhand der Absenksdaten zu überprüfen. Hierzu kann ein Diagramm der Absinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wasserstandsänderung (Mittelwert innerhalb eines Zeitintervalls) dargestellt werden (siehe Bild 17).

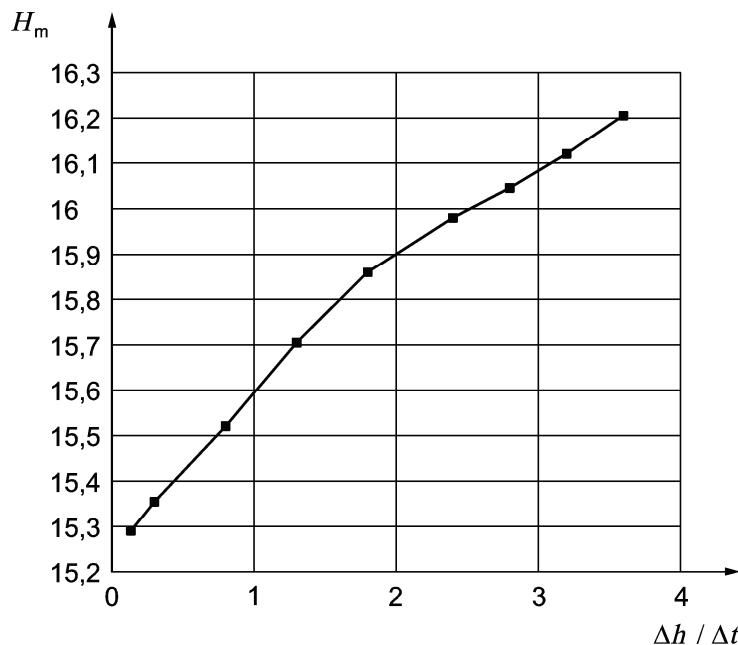


Bild 17 — Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels

Eine Extrapolation der Geraden zum Nullwert der Absenkgeschwindigkeit ergibt den Ruhewasserstand. Dieser Wert sollte mit dem vor Beginn der Wasserzugabe gemessenen Wert (hier 15,24 m) übereinstimmen (siehe Bild 17).

Die Bestimmungsgleichung für die hydraulische Durchlässigkeit lautet nach Bouwer und Rice:

$$k = \frac{r_{st}^2 \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}{2 \cdot l_0} \cdot \frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Der Term $[1/(t_2 - t_1)] \cdot \ln(h_1/h_2)$ lässt sich auch zeichnerisch bestimmen aus einer halblogarithmischen Auftragung der Wasserstandsänderung über die Zeit (siehe Bild 18). Maßgebend ist das Zeitintervall, während dem diese Beziehung linear ist.

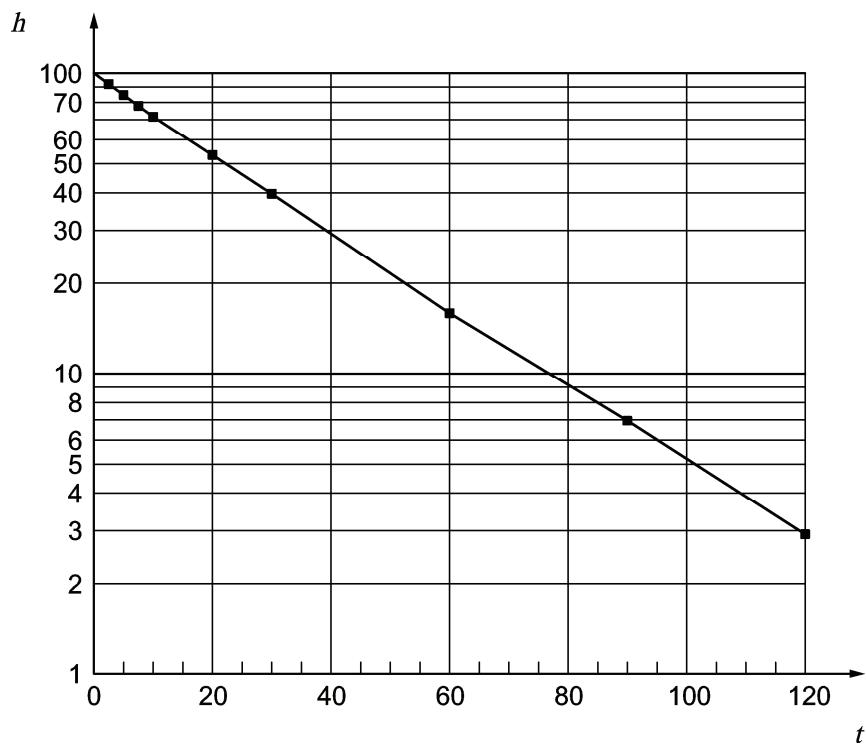


Bild 18 — Wasserstandsänderung beim Auffüllversuch

$$a) \frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{1}{120} \cdot \ln\left(\frac{1,00}{0,03}\right) = \frac{3,51}{120} = 0,0292 \text{ 1/s}$$

Der im Parameter $\ln(R/r_0)$ erfasste Einflussradius wird anhand der von Bouwer und Rice vorgelegten Kurven (siehe Bild 7) ermittelt. Da die Filterstrecke im GW-Leiter einen unvollkommenen Brunnen bildet, sind in Abhängigkeit des Verhältnisses l_0/r_0 die Werte A und B zu bestimmen. Aus dem Diagramm Bild 7 ergeben sich für:

$$b) \frac{l_0}{r_0} = \frac{2,44}{0,11} = 22,2$$

die Koeffizienten $A = 2,2$ und $B = 0,4$. Die Bestimmungsgleichung (13) ergibt nun

c)

$$\ln \frac{R}{r_0} = \left[\frac{1,1}{\ln \left(\frac{l_0 + H_0}{r_0} \right)} + \frac{A + B \cdot \ln \left[\frac{(d - (l_0 + H_0))}{r_0} \right]}{\left(\frac{l_0}{r_0} \right)} \right]^{-1}$$

$$= \left[\frac{1,1}{\ln \left(\frac{2,44 + 0}{0,11} \right)} + \frac{2,2 + 0,4 \cdot \ln \left[\frac{(15,24 - 2,44 - 0)}{0,11} \right]}{\left(\frac{2,44}{0,11} \right)} \right]^{-1} = \left[\frac{1,1}{3,099} + \frac{2,2 + 0,4 \cdot 4,76}{22,18} \right]^{-1} = 1,85$$

Somit kann der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert berechnet werden zu:

$$d) \quad k = \frac{r_{st}^2 \cdot \ln \left(\frac{R}{r_0} \right)}{2 \cdot l_0} \cdot \frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = \frac{0,078^2 \cdot 1,85}{2 \cdot 2,44} \cdot 0,0292 = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

11.1.5 Einschwingversuch: asymptotischer Verlauf des Wiederanstiegs

11.1.5.1 Versuchsdaten

Versuch DIN 18130 – 2 – E

- Messung vom: 11.06.01
- Versuchsort: Niederberg
- Bohrung: Grundwassermessstelle GWM I
- Bodenart: Feinsand (fS)
- Bohrdurchmesser: 273 mm
- Ausbaudurchmesser 2 r_{st} : 100 mm
- $H_0 = 1,5$ m
- $l_0 = 2,5$ m

11.1.5.2 Versuchsanordnung

Der Versuch wird mit der Anordnung nach Bild 19 (entspricht der in Bild 5 beschriebenen Anordnung) durchgeführt.

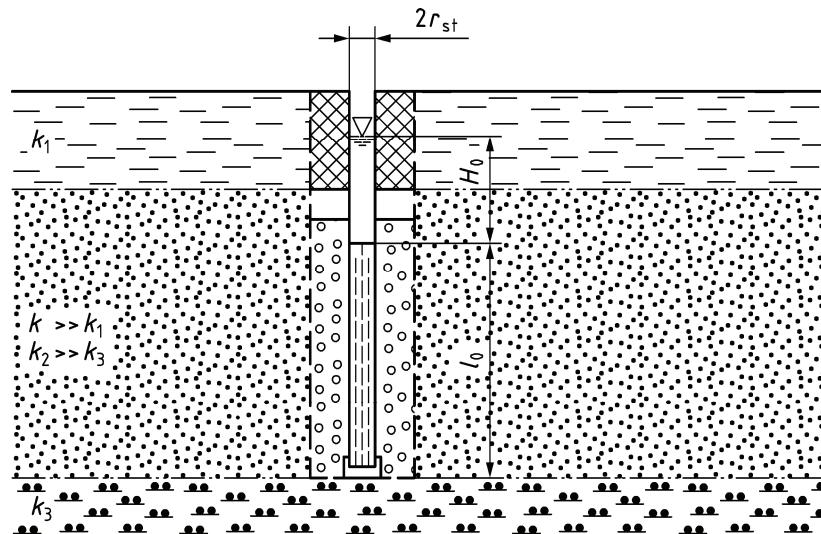


Bild 19 — Einschwingversuch in gespanntem Grundwasser"

11.1.5.3 Messwertaufzeichnung

Nach Absenken des Wasserspiegels in der Grundwassermessstelle mittels Druckluft wird sein Wiederanstieg gemessen.

Versuchsergebnisse siehe Bild 20 und Tabelle 4.

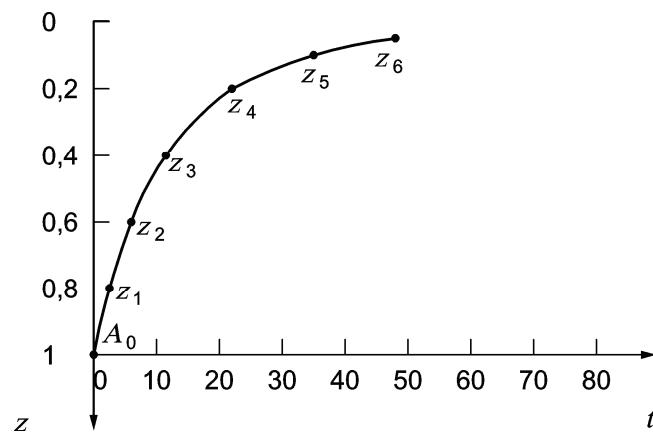


Bild 20 — Asymptotischer Wiederanstieg des Grundwassers

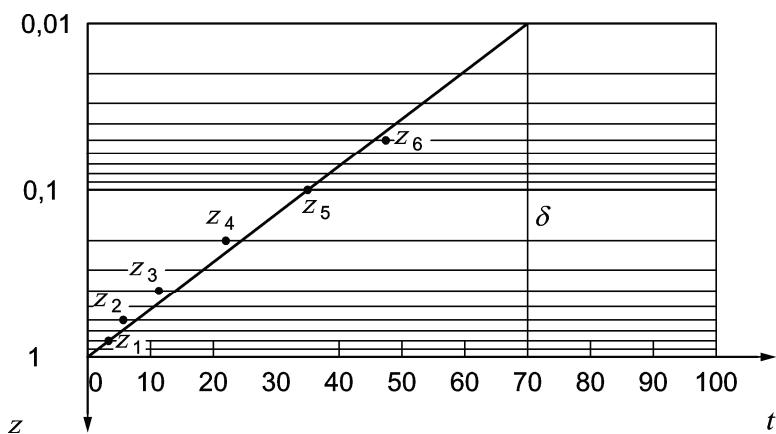
Bei starker Dämpfung erfolgt der Einschwingvorgang asymptotisch (siehe 7.5.2 und Bild 8).

Aufzeichnung der Messdaten siehe Tabelle 4.

Tabelle 4 — Messdaten, asymptotischer Verlauf

Messwerte	Absenkung	Zeit
	z m	t s
z_0	1,0	0
z_1	0,8	2,5
z_2	0,6	6
z_3	0,4	11,5
z_4	0,2	22
z_5	0,1	35
z_6	0,05	48

11.1.5.4 Auswertung (siehe 7.5.2.1)

Bild 21 — Ermittlung des Steigungskoeffizienten δ aus Bild 20

Die Messwerte werden halblogarithmisch aufgetragen siehe Bild 21 und die Steigung der Regressionsgeraden bestimmt. Die Steigung δ der Regressionsgeraden beträgt

$$\text{a)} \quad \delta = \frac{(\ln z_0 - \ln z)}{t} = \frac{1}{t} \cdot \ln \frac{z_0}{z} = \frac{1}{70} \cdot \ln \frac{1,0}{0,01} = 0,066.$$

Aus der Eigenfrequenz ω_w und dem Dämpfungskoeffizienten β werden Transmissivität T und Wasserdurchlässigkeit beiwert k berechnet:

- b) Eigenfrequenz $\omega_w = 3,3 / \sqrt{H_o} = 3,3 / \sqrt{1,5} = 2,69 \text{ s}^{-1}$
- c) Dämpfungskoeffizient $\beta = (\omega_w^2 + \delta^2) / (2\delta \cdot \omega_w) = 7,237 / 0,355 = 20,38$
- d) Transmissivität $T = 1,3 \cdot r_{st}^2 \cdot \omega_w / \beta = 1,95 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
- e) Durchlässigkeit beiwert $k = T / l_0 = 1,95 \cdot 10^{-4} / 2,5 = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

11.1.6 Einschwingversuch: oszillierender Verlauf des Wiederanstiegs

11.1.6.1 Versuchsdaten

Versuch DIN 18130 – 2 – E

- Messung vom: 12.06.01
- Versuchsort: Neustadt
- Bohrung: Grundwassermessstelle GWM 2
- Bodenart: Kies (G)
- Bohrdurchmesser: 273 mm
- Ausbaudurchmesser 2 r_{st} : 100 mm
- $H_0 = 1,5$ m
- $l_0 = 2,5$ m

11.1.6.2 Versuchsanordnung

Der Versuch wird mit der Anordnung nach Bild 22 (entspricht der in Bild 5 beschriebenen Anordnung) durchgeführt.

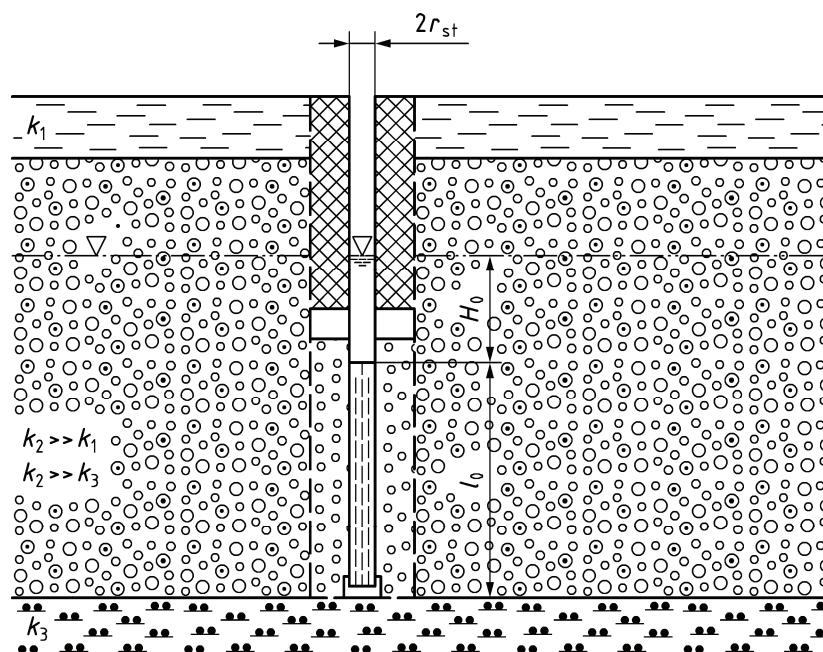
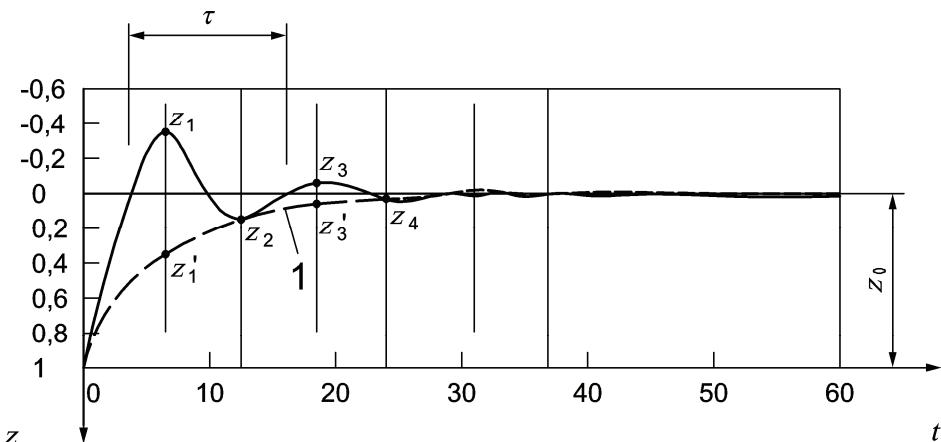


Bild 22 — Einschwingversuch in freiem Grundwasser**11.1.6.3 Messwertaufzeichnung**

Bei geringer Dämpfung des Wiederanstiegs in einem stark durchlässigen Grundwasserleiter erfolgt der Einschwingvorgang oszillierend: die Nulllage wird überschwungen (7.5.2 und Bild 9).

**Legende**

1 Einhüllende

Bild 23 — Oszillierender Anstieg des Grundwassers

Beim oszillierenden Verlauf wird die Einhüllende der Schwingung graphisch an die Minima und an die an der Nullachse gespiegelten Maxima angelegt (siehe Bild 23 und Tabelle 5). Die Abnahme der Amplituden folgt dann, wie beim asymptotischen Verlauf, einer Exponentialfunktion.

Tabelle 5 — Messdaten, oszillierender Verlauf

Messwerte	z m	z' m	t s
z_0	1,00	1,00	0,0
z_1	-0,35	0,35	6,5
z_2	0,15	0,15	12,5
z_3	-0,06	0,06	18,5
z_4	0,03	0,03	24,0

Die Periode τ der Schwingung wird aus der Einschwingkurve entnommen und beträgt 12,5 s.

11.1.6.4 Auswertung (siehe 7.5.2.2)

Die Messwerte der Einhüllenden werden halblogarithmisch aufgetragen und die Steigung der Regressionsgeraden bestimmt, siehe Bild 24.

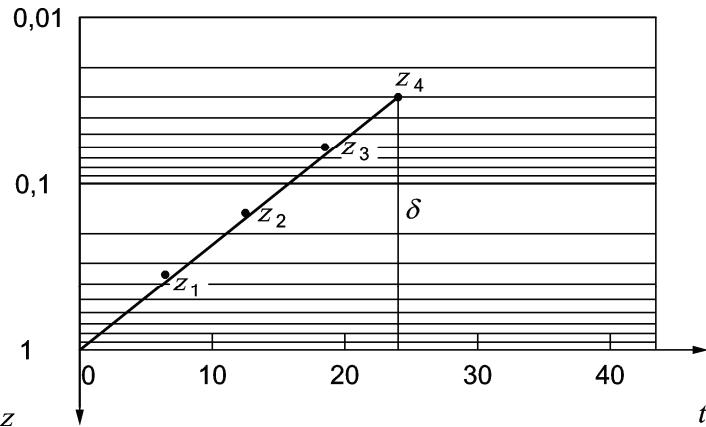


Bild 24 — Ermittlung des Steigungskoeffizienten δ aus Bild 23

a) Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt $\delta = \frac{(\ln z_0 - \ln z)}{t} = \frac{1}{t} \cdot \ln \frac{z_0}{z} = \frac{1}{28} \cdot \ln \frac{1,0}{0,01} = 0,165$.

Aus der Eigenfrequenz ω_w und dem Dämpfungskoeffizienten β lassen sich Transmissivität T und der Durchlässigkeitsbeiwert k berechnen:

b) Eigenfrequenz $\omega_w = \frac{2\pi}{\tau \cdot \sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{6,283}{12,5 \cdot \sqrt{1 - 1,58 \cdot 10^{-3}}} = 0,503 \text{ s}^{-1}$

c) Dämpfungskoeffizient $\beta^2 = \frac{1}{1 + \frac{4\pi^2}{\tau^2 \cdot \delta^2}} = \frac{1}{1 + \frac{39,478}{156,25 \cdot 0,027}} = \frac{1}{10,358} = 0,0965$

$$\beta = \sqrt{0,0965} = 0,311$$

d) Transmissivität $T = 1,3 \cdot r_{st}^2 \cdot \omega_w / \beta = 5,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

e) Durchlässigkeitsbeiwert $k = T / l_0 = 5,26 \cdot 10^{-3} / 2,5 = 2,10 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

ANMERKUNG Beide in den Beispielen dargestellten Einschwingvorgänge können in gespanntem und in ungespanntem Grundwasser auftreten. Sie sind allein von der Transmissivität des Grundwasserleiters und der Höhe der schwingenden Wassersäule abhängig.

11.2 Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 8 (Versuch mit dem Aufsatzgerät)

Versuch DIN 18130 – 2 – A

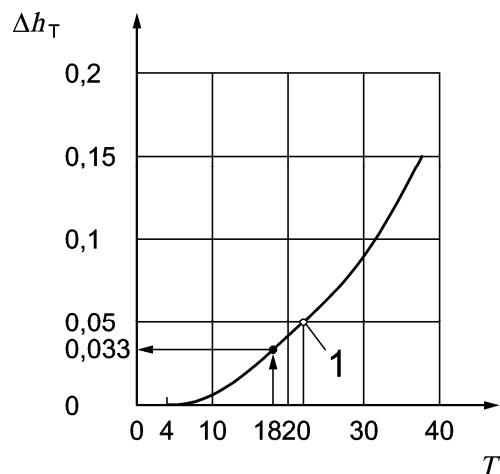
Bodenart: Kies, sandig, schwach tonig (G,s,t') (gemischtkörnige mineralische Abdichtung)

Versuchsaufbau: nach Bild 14, $2r_o = 10,0 \text{ cm}$, $2r_p = 1,9 \text{ cm}$

Aufsatzgerät: Nr A2 mit Temperaturkalibrierkurve (siehe Bild 25)

Wetter: überwiegend warm, nachts kühler, zeitweise Regen

Auswertung: Aufzeichnung der Versuchsergebnisse siehe Tabelle 6, Berechnung nach Gleichung (4), Formfaktor: $F_H = 1,57$

**Bild 25 — Temperaturkalibrierkurve für Aufsatzgerät Nr. A2**

ANMERKUNG Bei Temperaturen unterhalb der Ausgangstemperatur wird die abgelesene Standrohrspiegelhöhe um den Betrag Δh_T erhöht, oberhalb der Ausgangstemperatur um den Betrag Δh_T verringert.

Tabelle 6 — Versuchsprotokoll und Auswertung

Datum	Uhrzeit	T °C	h m	Δh_t m	h_{korr} m	t s	k m/s
05.06.01	9.00	21	1.500	$0,050$ $-0,050$ $0,000$	1,500		
06.06.01	8.30	18	1.440	$0,050$ $-0,040$ $0,010$	1,450	84.600	$5,7 \cdot 10^{-10}$
07.06.01	10.00	25	1.145	$0,050$ $-0,075$ $-0,025$	1,425	91.800	$2,7 \cdot 10^{-10}$
08.06.01	8.22	20	1.413	$0,050$ $-0,047$ $0,003$	1,416	76.920	$1,2 \cdot 10^{-10}$
09.06.01	7.07	16	1.382	$0,050$ $-0,025$ $0,025$	1,407	81.900	$1,1 \cdot 10^{-10}$
12.06.01	8.30	23	1.398	$0,050$ $-0,064$ $-0,014$	1,384	264.180	$8,8 \cdot 10^{-11}$

11.3 Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 9 (Dichtwand)

Als Dichtungselement für eine spätere einseitige Absenkung des Grundwasserspiegels um 11,0 m dient eine Schlitzwand aus mineralischen Dichtungsstoffen, deren Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bestimmt werden soll.

Versuch DIN 18130 – 2 – DW

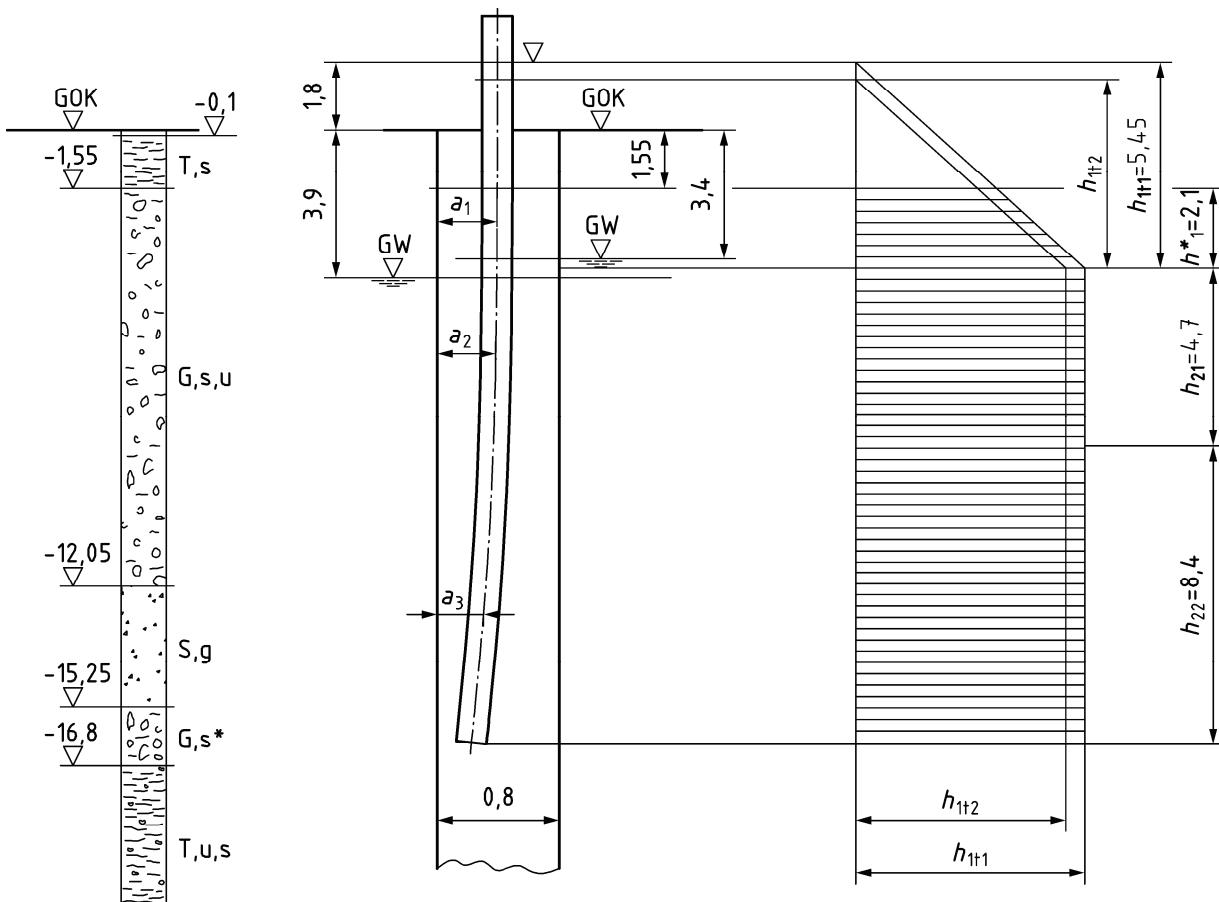
Schichtung des Baugrunds:

bis 0,40 m unter GOK	Mutterboden (Mu)
0,40 m bis 1,55 m u. GOK	Ton, sandig (T,s)
1,55 m bis 12,05 m u. GOK	Kies, sandig, schwach schluffig (G,s,u')
12,05 m bis 15,25 m u. GOK	Sand, kiesig (S,g)
15,25 m bis 16,80 m u. GOK	Kies, stark sandig (G,s*)
16,80 m bis 25,00 m u. GOK	Ton, schluffig, schwach sandig (T,u,s')

Die Schlitzwand bindet mehr als 1,0 m in den Ton als Grundwasserhemmer ein.

In die Schlitzwand wurde eine zentrisch angesetzte Bohrung mit $2r_0 = 112$ mm Bohrdurchmesser bis 16,80 m unter Schlitzwand-Oberkante = GOK ausgeführt und nach Vermessen des Bohrlochverlaufs mittels Inklinometer in diese ein Packer mit Standrohr ($r_{st} = 15$ mm) eingesetzt. Die Geometrie der Schlitzwand, der Verlauf der Bohrung mit Standrohr sowie der während der Versuchsdurchführung in den unmittelbar benachbarten Grundwassermessstellen beidseits der Schlitzwand beobachtete Grundwasserstand (rechts auf -3,40 m u. GOK, links auf -3,90 m u. GOK) sind in Bild 26 dargestellt.

Maße in Meter

**Bild 26 — Bodenprofil, Geometrie und Druckhöhenverteilung an der Schlitzwand**

Vor der Versuchsdurchführung wurde die Wand über einen Behälter 3 Tage lang mit Wasser gesättigt. Der Wasserspiegel im Behälter stand dabei etwa auf OK des Standrohrs, also 2,0 m über GOK. Während der Versuchsdurchführung war das Standrohr vor unmittelbarer Sonneneinstrahlung geschützt.

Die Wassertemperatur im Bohrloch wurde unmittelbar nach der Versuchsdurchführung in 3 Tiefen gemessen siehe Tabelle 7.

Tabelle 7 — Wassertemperatur

Tiefe unter GOK m	Temperatur °C
6,0	10,8
11,2	10,2
16,1	10,0

Die gemessenen Standrohrspiegelhöhen über Schlitzwand OK sind:

Tabelle 8 — Standrohrspiegelhöhen über Schlitzwand OK

Höhe m	Zeitpunkt s
1,80	180
1,60	422
1,40	667
1,20	916

Für die Auswertung müssen die Druckflächen des Bildes 26 auf die bei den Gleichungen (13) und (16) vorausgesetzten Dreiecks- bzw. Rechtecksflächen zurückgeführt werden. Dies führt zu folgenden Beziehungen:

- a) für die Trapezfläche mit Höhe h_1^* und mittlerem Randabstand der Bohrung a_1 :

$$Q_1^* = k \cdot \frac{\pi \cdot \left[h_{1m}^2 - (h_{1m} - h_1^*)^2 \right]}{\ln \left[\frac{2d}{\pi \cdot r_0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot a_1}{d} \right]} \quad (27)$$

- b) für die obere Rechteckfläche mit Höhe h_{21} und mittlerem Randabstand der Bohrung a_2 :

$$Q_{21} = k \cdot \frac{2\pi \cdot h_{21} \cdot h_{1m}}{\ln \left[\frac{2d}{\pi \cdot r_0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot a_2}{d} \right]} \quad (28)$$

- c) für die untere Rechteckfläche mit Höhe h_{22} und mittlerem Randabstand der Bohrung a_3 :

$$Q_{22} = k \cdot \frac{2\pi \cdot h_{22} \cdot h_{1m}}{\ln \left[\frac{2d}{\pi \cdot r_0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot a_3}{d} \right]} \quad (29)$$

Die zahlenmäßige Auswertung ist in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9 — Anwendungsbeispiel zu Abschnitt 9: Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit einer Schlitzwand

Radius der Bohrung	r_0	0,056 m	Zeitpunkt Versuchsbeginn	t_1	180 s											
Radius des Standrohrs	r_{st}	0,015 m	Zeitpunkt Versuchsende	t_2	707 s											
Dicke der Dichtwand	d	0,80 m														
Höhe der Druck-Trapezfläche unter der Deckschicht	h^{*1}	2,10 m	mittlerer Randabstand der Bohrachse über h^{*1}	a_1	0,39 m											
Höhe des oberen Druck-Rechtecks	h_{21}	4,70 m	mittl. Randabstand über h_{21}	a_2	0,36 m											
Höhe des unteren Druck-Rechtecks	h_{22}	8,40 m	mittl. Randabstand über h_{22}	a_3	0,24 m											
h_{1t_1}	h_{1t_2}	h_{1m}	t_1	t_2	$Z1$	$N1$	Q_1^*/k	$Z2$	$N2$	Q_{21}/k	$Z3$	$N3$	Q_{22}/k	$\Delta Q/k$	ΔQ_{mes}	k
m	M	M	s	s	m^2	1	m^2	m^2	1	m^2	m^2	1	m^2	m^2	m^3/s	m/s
5,45	5,15	5,30	180	310	56,08	2,21	25,41	156,51	2,2	71,30	279,73	2	140,16	236,87	1,63E-006	6,89E-009
5,15	4,75	4,95	310	499	51,46	2,21	23,32	146,18	2,2	66,59	261,25	2	130,91	220,81	1,50E-006	6,78E-009
4,75	4,35	4,55	499	708	46,18	2,21	20,93	134,37	2,2	61,21	240,14	2	120,33	202,46	1,35E-006	6,68E-009
5,45	4,35	4,90	180	708	50,08	2,21	23,02	144,70	2,2	65,91	258,62	2	129,58	218,52	1,47E-006	6,74E-009
Hierbei sind:						Z1 der Zähler in Gleichung Q_1^*/k	Q_{mes} das in der Versuchszeit aus dem Standrohr gestromte Wasser									
						N1 der Nenner in Gleichung Q_1^*/k	$Q_{mes} = r_{st}^2 \cdot \pi \cdot \frac{h_{1t_1} - h_{1t_2}}{t_2 - t_1} \cdot k = \frac{Q_{mes}}{\sum (Q_i/k)}$									
						Z2 der Zähler in Gleichung Q_{21}/k										
						N2 der Nenner in Gleichung Q_{21}/k										
						Z3 der Zähler in Gleichung Q_{22}/k										
						N3 der Nenner in Gleichung Q_{22}/k										

Anhang A (informativ)

Anpassungsgleichungen zur Ermittlung der Koeffizienten A , B und C als Funktion des Verhältnisses l_0/r_0 zur Ermittlung der bezogenen Reichweite der Absenkung R/l_0 nach Bouwer und Rice

Koeffizient A (l_0/r_0)

Falls $\log(l_0/r_0) < 2,55$ gilt:

$$A = 1,638 + 0,167 \cdot \log(l_0/r_0) + 0,000\,740\,4 \cdot \exp(6,171\,1 \cdot \log(l_0/r_0) - 1,054\,75 \cdot [\log(l_0/r_0)]^2) \quad (\text{A.1})$$

Falls $\log(l_0/r_0) > 2,55$ gilt:

$$A = 11,004 - 170,775 \cdot \exp(-1,509\,6 \cdot \log(l_0/r_0)) \quad (\text{A.2})$$

Koeffizient B (l_0/r_0)

Falls $\log(l_0/r_0) < 2,597$ gilt:

$$B = 0,175 + 0,06 \cdot \log(l_0/r_0) + 0,007\,97 \cdot \exp(2,053\,4 \cdot \log(l_0/r_0) - 0,007\,8 \cdot [\log(l_0/r_0)]^2) \quad (\text{A.3})$$

Falls $\log(l_0/r_0) > 2,597$ gilt:

$$B = 4,133 - 93,061\,4 \cdot \exp(-1,435\,4 \cdot \log(l_0/r_0)) \quad (\text{A.4})$$

Koeffizient C (l_0/r_0)

Falls $\log(l_0/r_0) < 2,200$ gilt:

$$C = 0,075 + 1,084 \cdot \log(l_0/r_0) + 0,005\,573 \cdot \exp(2,929\,5 \cdot \log(l_0/r_0) - 0,001\,03 \cdot [\log(l_0/r_0)]^2) \quad (\text{A.5})$$

Falls $\log(l_0/r_0) > 2,200$ gilt:

$$C = 15,669 - 178,433 \cdot \exp(-1,322\,8 \cdot \log(l_0/r_0)) \quad (\text{A.6})$$

Für die Auswertung ist die angegebene Anzahl der Stellen in den Gliedern der Gleichungen verbindlich.

Mit dem Bouwer- und Rice-Verfahren können Versuche im Grundwasser für unterschiedlichste Ausbauverhältnisse ausgewertet werden. Als Parameter geht bei diesem Verfahren der durch die Potenzialänderung im Bohrloch bewirkte Einflussradius R in die Auswertung ein. Werte für den Einflussradius R , ausgedrückt durch den dimensionslosen Parameter $\ln(R/r_0)$, wurden für verschiedene Kombinationen von Filterlänge, Filterradius, Mächtigkeit des Grundwasserleiters und Randabständen anhand eines elektrischen Analogmodells bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden als Diagramme dargestellt, aus welchen die Parameter A und B für unvollkommene Brunnen beziehungsweise der Parameter C für den Fall eines vollkommenen Brunnens als Funktion des Verhältnisses $\alpha = l_0/r_0$ grafisch zu ermitteln sind (siehe Bild 7). Diese Kurven konnten durch Regressionsrechnung parametrisiert werden, was den Einsatz von Tabellenkalkulationsprogrammen zur Auswertung ermöglicht. Die größte Abweichung zwischen der Grafik nach Bild 7 und der Auswertung nach diesem Anhang A beträgt 3 % für kleine Werte von B . Die Abweichungen für die Parameterkurven A und C sind kleiner als 1 %. Die numerische Annäherung der Parameterkurven erzeugt somit keinen relevanten Fehler.