Probekapitel

Grundbau-Taschenbuch, 7. Auflage
Teil 2: Geotechnische Verfahren
Herausgeber: Karl Josef Witt
Copyright © 2009 Ernst & Sohn, Berlin
ISBN: 978-3-433-01845-3

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften
GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

2.10 Grundwasserströmung – Grundwasserhaltung

Bernhard Odenwald, Uwe Hekel und Henning Thormann

Dieses Kapitel ist in 3 Abschnitte untergliedert. Von *Bernhard Odenwald* werden in Abschnitt 1 die Grundlagen für die mathematische Beschreibung von Grundwasserströmungen sowie deren Berechnung dargestellt. Die Ermittlung geohydraulischer Parameter wird in Abschnitt 2 von *Uwe Hekel* beschrieben. *Henning Thormann* behandelt in Abschnitt 3 die praktischen Aspekte der Grundwasserhaltung.

1 Grundwasserhydraulik

1.1 Grundlagen

1.1.1 Begriffe

Grundlage für die Beschreibung von Grundwasserströmungen ist die Verwendung einheitlicher Begriffe. Für unterirdisches Wasser als Teil des Wasserkreislaufes sind diese in der DIN 4049-3 [1] definiert. Die nachfolgend aufgeführten Grundbegriffe basieren auf den Definitionen dieser Norm, wobei sie jedoch teilweise an die Erfordernisse von Grundwasserströmungsberechnungen angepasst wurden.

Gesteinskörper mit ausreichend großen und zusammenhängenden Hohlräumen, die einen Grundwasserfluss ermöglichen, werden als **Grundwasserleiter** bezeichnet. Diese können aus Lockergesteinen (Sedimenten) oder Festgesteinen bestehen. Bei Lockergesteinen werden die Hohlräume zwischen den einzelnen Gesteinspartikeln, die sich mehr oder weniger eng berühren, als **Poren** bezeichnet. In Festgesteinen bestehen die durchflusswirksamen Gesteinsbereiche nicht aus Poren, sondern aus Trennfugen (Klüfte, Schieferung, Schichtung, Störungen). Sonderformen stellen Hohlräume im Karstgestein dar, die in geologischen Zeiträumen durch Lösung von Gestein durch zirkulierendes Grundwasser entstanden sind und die wesentlich größer als Klüfte im nicht verkarsteten Festgestein sein können. Eine Beschreibung der Hohlraumarten in den unterschiedlichen Gesteinen (Bild 1) und deren geohydraulische Auswirkungen geben z. B. *Hölting* und *Coldewey* [2].

Die aus diesen Gesteinen gebildeten Grundwasserleiter werden als Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter bezeichnet. Die im Folgenden dargestellten Grundwasserströmungs-

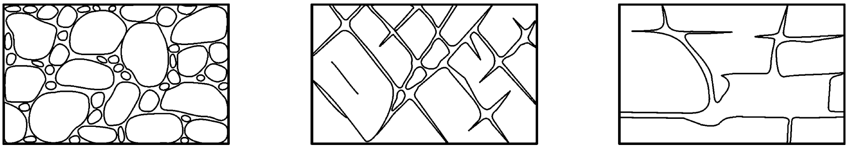

Bild 1. Schematische Darstellung von Gesteinen mit Poren- (links), Kluft- (Mitte) und Karsthohlräumen (rechts) (nach [2])

Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren
Herausgegeben von Karl Josef Witt
Copyright © 2009 Ernst & Sohn, Berlin
ISBN: 978-3-433-01845-3

berechnungen beziehen sich jedoch ausschließlich auf **Porengrundwasserleiter**, bei denen die vom Grundwasser durchströmten Hohlräume vergleichsweise gleichmäßig über den Gesteinskörper verteilt sind. Bedingt lassen sich diese auch auf ausreichend vernetzte Kluftgrundwasserleiter anwenden.

Grundwassernichtleiter bestehen im Unterschied zu Grundwasserleitern aus Gesteinskörpern, die nahezu wasserundurchlässig sind, weil sie keine zusammenhängenden oder nur so kleine Hohlräume aufweisen, dass kein relevanter Grundwasserfluss möglich ist.

Als **Grundwassergeringleiter** werden Gesteinskörper bezeichnet, die zwar von Grundwasser durchströmt werden können, jedoch gegenüber benachbarten Grundwasserleitern eine deutlich geringere Wasserdurchlässigkeit aufweisen.

Existieren mehrere übereinander liegende Grundwasserleiter, die durch Grundwassernichtleiter oder Grundwassergeringleiter hydraulisch voneinander getrennt sind, so werden diese als **Grundwasserstockwerke** bezeichnet.

Die Hohlräume eines Porengrundwasserleiters können sowohl Wasser als auch Luft beinhalten. Sind die Poren vollständig zusammenhängend mit Wasser gefüllt, so wird dieser Bereich des Grundwasserleiters als **(wasser)gesättigte Zone** und das die Poren ausfüllende Wasser als **Grundwasser** bezeichnet. In der englischsprachigen Literatur wird der wassergesättigte Teil eines Grundwasserleiters als **Aquifer** bezeichnet. Diese Bezeichnung wird auch häufig in der deutschsprachigen Literatur verwendet.

In der ungesättigten Zone sind die Poren des Grundwasserleiters dagegen sowohl mit Wasser als auch Luft gefüllt. Das sich in der **ungesättigten Zone** im Wesentlichen durch die Schwerkraft abwärts bewegende Wasser (z. B. Infiltration aus Niederschlag) wird definitionsgemäß nicht als Grundwasser, sondern als **Sickerwasser** bezeichnet.

Oberhalb der gesättigten Zone bildet sich in Porengrundwasserleitern in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung und dem dadurch bedingten Durchmesser der Porenkanäle ein mit **Kapillarwasser** gefüllter Bodenbereich aus, in dem das Wasser durch Kapillarkräfte aus der gesättigten Zone gehoben bzw. gehalten wird. In Tabelle 1 sind Größenordnungen für die kapillare Steighöhe in unterschiedlichen Lockergesteinen nach *Langguth/Voigt* [3] angegeben.

In der ungesättigten Zone oberhalb des Kapillarwasserraums sind die Bodenteilchen mit **Haftwasser** umgeben, das gegen die Schwerkraft gehalten wird und im Gegensatz zum Sickerwasser unbeweglich ist. Unter Haftwasser wird hygroskopisch gebundenes Wasser und Adsorptionswasser, das eine Hülle um die Mineralkörner bildet, sowie Porenwinkelwasser, das durch Kapillarkräfte an den Berührpunkten der Bodenteilchen gebunden wird,

Tabelle 1. Kapillare Steighöhen (nach [3])

Lockergesteinsart	Kapillare Steighöhe [m]
Grobsand	0,12–0,15
Mittelsand	0,40–0,50
Feinsand	0,90–1,00
Sandiger Lehm	1,75–2,00
Feinsandiger Ton	2,25–9,40

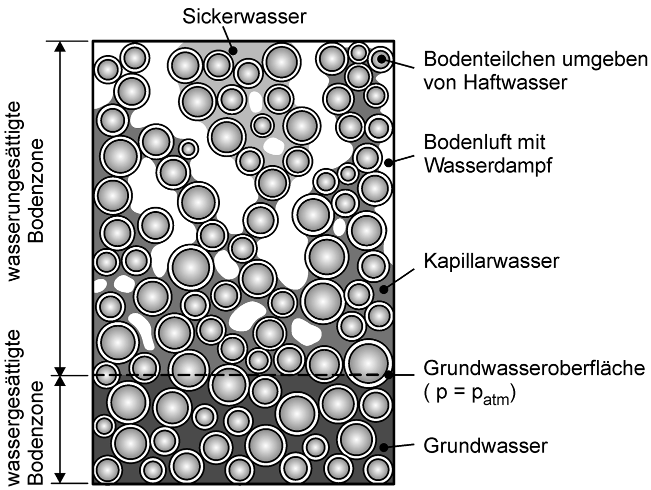

Bild 2. Erscheinungsformen des Wassers in der gesättigten und der ungesättigten Bodenzone (nach [2])

verstanden (Bild 2). Das Haftwasser steht an den Berührpunkten der Bodenteilchen miteinander sowie über das Kapillarwasser auch mit dem Grundwasser in der gesättigten Zone in Verbindung.

Der in der gesättigten Zone im Grundwasser an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit vorhandene Porenwasserdruck u wird als **Grundwasserdruck** [N/m² oder m WS (Wassersäule)] bezeichnet. Die **Grundwasserdruckhöhe** h_D [m] entspricht der Höhe der Wassersäule über dem Messpunkt, die ein dem Grundwasserdruck am Messpunkt entsprechender Wasserdruck bewirkt.

$$h_D = \frac{u}{\rho_W \cdot g} \quad \text{bzw.} \quad h_D = \frac{u}{\gamma_W}$$

mit

h_D Grundwasserdruckhöhe [m]
u Grundwasserdruck [N/m²]
ρ_W Dichte des Grundwassers [kg/m³]
g Gravitationskonstante = 9,81 m/s²
γ_W Wichte des Grundwassers [N/m³]

Die Dichte des Grundwassers, die nur geringfügig vom Druck und der Temperatur abhängig ist (siehe Tabelle 3), wird in der Grundwasserhydraulik i. Allg. mit $\rho_W = 1000$ kg/m³ angenommen.

Maßgebend für Grundwasserströmungsberechnungen ist die nach [1] als Standrohrspiegelhöhe h [m] bezeichnete Größe, die die Summe aus Grundwasserdruckhöhe h_D und geodätischer Höhe z [m] des Messpunktes über einem horizontalen Bezugsniveau darstellt (Bild 3). In Deutschland wird als Bezugsniveau i. Allg. die amtliche deutsche Bezugsfläche für Höhen über dem Meeresspiegel Normalnull (NN) verwendet. Da der Begriff Standrohrspiegelhöhe aufgrund des möglichen ausschließlichen Bezugs auf Grundwassermessstellen

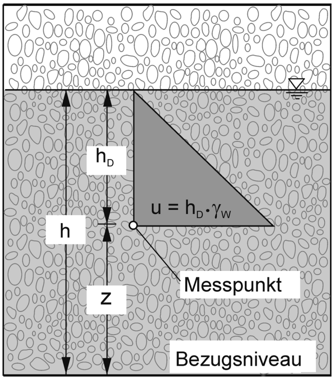

Bild 3. Definition des Grundwasserpotenzials

als Variable zur Beschreibung von Grundwasserströmungen nicht geeignet erscheint, wird im Folgenden anstatt Standrohrspiegelhöhe der Begriff **Grundwasserpotenzial** verwendet.

$$h = h_D + z$$

mit

h Grundwasserpotenzial [m]
h_D Grundwasserdruckhöhe [m]
z geodätische Höhe [m]

Existiert in einem Grundwasserleiter sowohl eine gesättigte als auch eine ungesättigte Zone, so bildet sich an der Grenzfläche, an der das in den Poren vorhandene Grundwasser unter atmosphärischem Luftdruck steht, eine **(freie) Grundwasseroberfläche** aus. Der Grundwasserleiter wird in diesem Fall als **ungespannter Grundwasserleiter** bezeichnet. Im ruhenden Grundwasser entspricht die Grundwasserdruckhöhe für alle Messpunkte innerhalb des betrachteten Abschnitts des ungespannten Grundwasserleiters dem vertikalen Abstand zwischen dem Messpunkt und der Grundwasseroberfläche.

Sind die Poren des Grundwasserleiters dagegen vollständig mit Grundwasser gefüllt (ausschließlich gesättigte Zone) und wird der Grundwasserleiter an seiner Oberfläche durch einen Grundwassernichtleiter begrenzt, wird der Grundwasserleiter als **gespannter Grundwasserleiter** bezeichnet. In diesem Fall steht das Grundwasser auch an der Oberfläche des Grundwasserleiters unter einem Druck, der größer ist als der atmosphärische Luftdruck. Die Fläche, die durch die Grundwasserdruckhöhen an der Unterkante des Grundwassernichtleiters gebildet wird, stellt die **Grundwasserdruckfläche** dar. Eine Sonderform des gespannten Grundwasserleiters ist der artesisch gespannte Grundwasserleiter, bei dem die Grundwasserdruckfläche oberhalb der Geländeoberfläche liegt.

Im Unterschied zum gespannten Grundwasserleiter wird der **halbgespannte Grundwasserleiter** von einem Grundwassergeringleiter überlagert und es findet ein vertikaler Grundwasseraustausch über den Grundwassergeringleiter mit einem darüber liegenden Grundwasserstockwerk statt.

Mit der **Grundwassermächtigkeit** M [m] wird die Dicke der wassergesättigten Zone eines Grundwasserleiters bezeichnet. Sie entspricht dem vertikalen Abstand zwischen der unteren Grenzfläche des Grundwasserleiters (Grundwasserbasis) und der Grundwasseroberfläche bei einem ungespannten Grundwasserleiter und dem vertikalen Abstand zwischen Basis und Oberfläche des Grundwasserleiters bei einem gespannten Grundwasserleiter.

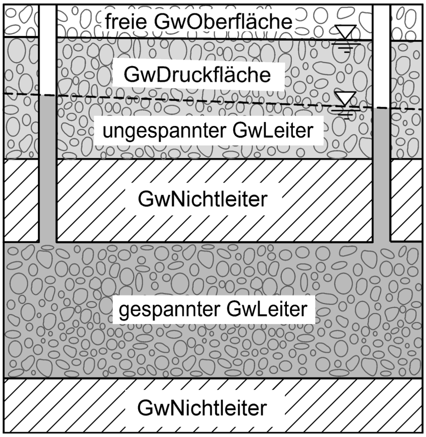

Bild 4. Schematische Darstellung von Grundwasserstockwerken

In Bild 4 sind zwei Grundwasserstockwerke, die aus einem oberen ungespannten Grundwasserleiter mit freier Grundwasseroberfläche und aus einem unteren gespannten Grundwasserleiter mit Grundwasserdruckfläche bestehen und die durch einen dazwischen befindlichen Grundwassernichtleiter hydraulisch getrennt sind, schematisch dargestellt.

Eine **stationäre Grundwasserströmung** liegt vor, wenn sich die Strömungsverhältnisse (Grundwasserpotenzialverteilung, Strömungsgeschwindigkeiten) innerhalb des betrachteten Bereiches mit der Zeit nicht ändern. In der Natur existieren i. Allg. keine stationären Zustände. Für Grundwasserströmungsberechnungen werden jedoch häufig stationäre Zustände, z. B. aufgrund vernachlässigbarer zeitlicher Änderungen oder für auf der sicheren Seite liegende Abschätzungen, angesetzt. Die Grundwasserströmung wird in diesem Fall nur in Abhängigkeit vom Ort berechnet. Der Beharrungszustand bei einer Grundwasserentnahme entspricht einer nahezu stationären Grundwasserströmung, bei der sich der durch die Grundwasserentnahme verursachte Absenktrichter der freien Grundwasseroberfläche oder der Grundwasserdruckfläche mit der Zeit nicht relevant verändert.

Ändern sich die Strömungsverhältnisse maßgebend mit der Zeit, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit an einem bestimmten Betrachtungspunkt ist mit der Zeit nicht konstant, liegt eine **instationäre Grundwasserströmung** vor. Die Grundwasserströmungsberechnung ist in diesem Fall sowohl in Abhängigkeit vom Ort als auch der Zeit durchzuführen.

Eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung eines Porengrundwasserleiters ist der Hohlraumanteil bzw. die Porosität n [–]. Sie ist definiert als Quotient aus dem Volumen der Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen.

Wie in der ungesättigten Zone ist auch in der gesättigten Zone ein Teil des Wassers als Haftwasser an die Bodenpartikel fest gebunden und damit unbeweglich. Der Anteil des Haftwassers ist umso höher, je kleiner der Durchmesser der Porenkanäle ist, da mit geringerer Korngröße die Kornoberfläche pro Volumeneinheit und damit auch der Anteil an Haftwasser zunimmt. Dadurch steht für die Grundwasserströmung nur ein Teil des gesamten Porenraums zur Verfügung. Der Volumenanteil der durchströmbaren Poren am Gesamtvolumen des Gesteinskörpers wird als durchflusswirksame Porosität n_f [–] bezeichnet.

In gleicher Weise wird bei einer Änderung der Höhe einer freien Grundwasseroberfläche nur ein Teil des Porenraums gefüllt oder entleert. Der Volumenanteil der entleerbaren oder auffüllbaren Poren am Gesamtvolumen des Gesteinskörpers wird als effektive Porosität n_e [–]

Tabelle 2. Gesamtporositäten und entwässerbare Porositäten (nach [4])

Lockergesteinsart	**Porosität n [–]**	**Entwässerbare Porosität n_e [–]**
Sandiger Kies	0,25 – 0,35	0,20 – 0,25
Kiesiger Sand	0,28 – 0,35	0,15 – 0,20
Mittlerer Sand	0,30 – 0,38	0,10 – 0,15
Schluffiger Sand	0,33 – 0,40	0,08 – 0,12
Sandiger Schluff	0,35 – 0,45	0,05 – 0,10
Toniger Schluff	0,40 – 0,55	0,03 – 0,08
Schluffiger Ton	0,45 – 0,65	0,02 – 0,05

oder speichernutzbare Porosität n_{sp} [–] bezeichnet. Nach *Busch* et al. [4] ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Anhaltswerte für die Gesamtporosität n und die effektive (entwässerbare) Porosität n_e in verschiedenen Lockergesteinen. Die speichernutzbare Porosität wird für die instationäre Berechnung der Strömung in ungespannten Grundwasserleitern, bei denen sich die Höhe der freien Grundwasseroberfläche mit der Zeit ändert, benötigt.

Auch in gespannten Grundwasserleitern breitet sich eine Grundwasserdruckänderung, z. B. infolge Absenkung der Grundwasserdruckfläche durch eine Brunnenentnahme, nicht vollkommen ungedämpft aus. Zur Beschreibung der Dämpfung dient der **spezifische Speicherkoeffizient** S_S [m^{-1}], der als Änderung des gespeicherten Wasservolumens je Volumeneinheit des Grundwasserleiters bei Änderung des Grundwasserpotenzials um 1 m definiert ist. Der über die Grundwassermächtigkeit integrierte Wert des spezifischen Speicherkoeffizienten wird als **Speicherkoeffizient** S [–] bezeichnet. Dieser als Formationskonstante des Gesteins betrachtete Wert lässt sich durch die Auswertung von Pumpversuchen ermitteln.

Die in der Literatur für den spezifischen Speicherkoeffizienten von Grundwasserleitern angegebenen Werte reichen von ca. $1 \cdot 10^{-6}\ m^{-1}$ bis ca. $1 \cdot 10^{-4}\ m^{-1}$. Im Allgemeinen wird die für die Dämpfung der Druckausbreitung erforderliche Elastizität von gespannten Grundwasserleitern mit der Kompressibilität des Wassers und der Gesteinsmatrix begründet. Zumindest für spezifische Speicherkoeffizienten in der Größenordnung der oberen Werte der angegebenen Spannweite ist dies jedoch nicht ausreichend. In der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführte theoretische und experimentelle Untersuchungen (z. B. *Köhler* [5]) zeigen, dass im natürlichen Porenwasser keine vollständige Wassersättigung vorliegt, sondern mikroskopisch kleine Gasblasen enthalten sind, die das Speicherverhalten bei Wasserdruckänderungen erheblich beeinflussen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn der Grundwasserleiter an seiner Oberfläche nur unter einem geringen Wasserüberdruck steht. Der zur Berücksichtigung dieser Dämpfungseffekte entwickelte Berechnungsansatz wurde auch in die Empfehlung E 115 der EAU 2004 [6] aufgenommen. Dieser Berechnungsansatz lässt sich auf die Ermittlung des spezifischen Speicherkoeffizienten in Abhängigkeit des Porenluftgehalts übertragen. Aufgrund der Kompressibilität der Luft nimmt der Porenluftgehalt (Luftvolumen bezogen auf das Gesamtporenvolumen eines Lockergesteinskörpers) mit steigendem Grundwasserdruck deutlich ab, wodurch sich ein vom Porenwasserdruck abhängiger spezifischer Speicherkoeffizient ergibt. Der druckabhängige spezifische Speicherkoeffizient lässt sich unter Annahme des Porenluftgehalts und des Grundwasserdrucks an der Oberfläche des Grundwasserleiters auf Grundlage eines vereinfachten Ansatzes nur unter Berücksichtigung der Kompressibilität des Wasser-Luft-Gemisches ermitteln. In

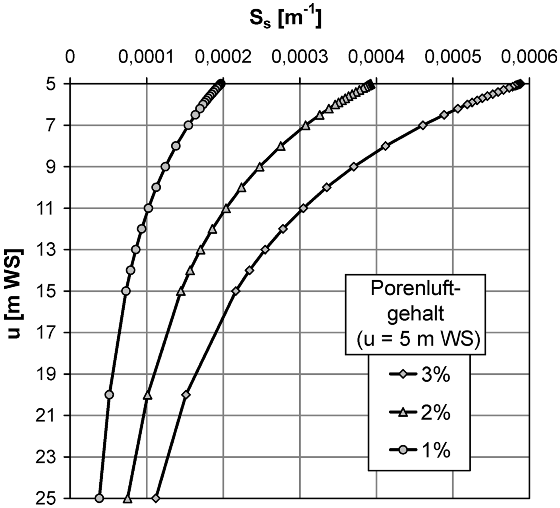

Bild 5. Spezifischer Speicherkoeffizient S_s in Abhängigkeit vom Porenwasserdruck u und dem Porenluftgehalt an der Oberfläche des Grundwasserleiters

Bild 5 ist beispielhaft der spezifische Speicherkoeffizient S_s in einem Grundwasserleiter, der an seiner Oberfläche unter einem Grundwasserdruck (über atmosphärischem Luftdruck) von 5 m WS steht, in Abhängigkeit vom Porenwasserdruck u und dem angenommenen Porenluftgehalt (1 %, 2 % und 3 %) an der Oberfläche des Grundwasserleiters bezogen auf eine Gesamtporosität von n = 0,3 dargestellt.

Ergibt sich bei einem Grundwasserleiter ein Übergang von ungespannten zu gespannten Strömungsverhältnissen, z. B. infolge Zuströmung aus einem Hochwasser führenden Fluss mit einem Anstieg der Grundwasseroberfläche bis zu einer geringdurchlässigen Deckschicht, ist zusätzlich von Lufteinschlüssen unter der Deckschicht auszugehen, die den spezifischen Speicherkoeffizienten deutlich erhöhen können. In den nachfolgend dargestellten Strömungsberechnungen wird jedoch vereinfachend, wie allgemein üblich, ein über die Höhe konstanter spezifischer Speicherkoeffizient S_s bzw. ein über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters integrierter Speicherkoeffizient S angesetzt.

1.1.2 Gesetz von *Darcy*

Die Theorie der Grundwasserströmungsberechnung basiert auf den Ergebnissen der von *Darcy* [7] um 1856 für das öffentliche Wasserversorgungssystem der Stadt Dijon durchgeführten Versuche. Dabei untersuchte er den Durchfluss durch eine aus Grob- bis Mittelsanden bestehende, wassergesättigte zylinderförmige Bodenprobe bei konstanter Potenzialdifferenz zwischen den beiden Seiten der Bodenprobe, wie in Bild 6 qualitativ dargestellt. Eine Beschreibung der von Darcy durchgeführten Versuche findet sich z. B. bei *Verruijt* [8].

Aus der Variation der Potenzialdifferenz Δh sowie der Querschnittsfläche A und der durchströmten Strecke Δs der Bodenprobe ergab sich der als Gesetz von *Darcy* bezeichnete, lineare Zusammenhang zwischen der **Filtergeschwindigkeit** v [m/s] und dem hydraulischen Gradienten i [–]. Die Filtergeschwindigkeit v ist dabei als Quotient aus dem Durchfluss Q [m^3/s] und der durchströmten Querschnittsfläche A [m^2] und der hydraulische Gradient i [–]

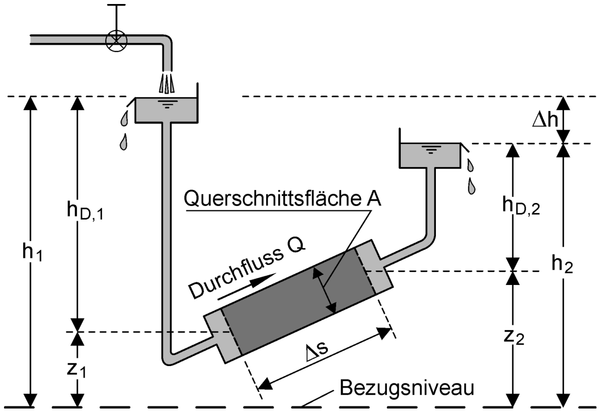

Bild 6. Qualitative Darstellung eines Darcy-Versuchs (nach [8])

als Quotient aus der Potenzialdifferenz Δh [m] und der durchströmten Strecke Δs [m] definiert. Der Proportionalitätsfaktor k [m/s] wird als **Durchlässigkeitsbeiwert** (oder vereinfacht als Durchlässigkeit) bezeichnet.

$$v = k \cdot i$$

mit

$v = Q/A$	Filtergeschwindigkeit [m/s]
k	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
$i = \Delta h/\Delta s$	hydraulischer Gradient [–]

Die Filtergeschwindigkeit v ist als der spezifischen Durchfluss (Durchfluss Q bezogen auf die Querschnittsfläche A) definiert und entspricht deshalb nicht der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit der Wasserteilchen in den Poren. Diese ist wesentlich höher, da der durchströmte Querschnitt durch die Bodenpartikel und das an diese gebundene Porenwasser eingeschränkt wird. Die als **Abstandsgeschwindigkeit** v_a [m/s] bezeichnete mittlere Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich näherungsweise durch Division der Filtergeschwindigkeit durch die durchflusswirksame Porosität n_f.

$$v_a = \frac{v}{n_f}$$

mit

v_a	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
v	Filtergeschwindigkeit [m/s]
n_f	durchflusswirksame Porosität [–]

Der Durchlässigkeitsbeiwert k wird i. Allg. als gesteinsspezifische Größe in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung, der Kornform und der Lagerungsdichte des Lockergesteins angesehen. In Tabelle 5 (s. Abschnitt 2.2) sind Spannweiten und typische Durchlässigkeitsbeiwerte von Lockergesteinen in Abhängigkeit von der Gesteinsart angegeben.

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist jedoch nicht nur von der Gesteinsart, sondern auch von der Dichte und der Zähigkeit (Viskosität) des durch die Poren strömenden Fluids abhängig. Die eigentliche gesteinsspezifische Größe wird als **Permeabilitätskoeffizient** K oder spezifische

Permeabilität bezeichnet und ist mit dem Durchlässigkeitsbeiwert k durch die folgende Gleichung verknüpft.

$$k = K \cdot \frac{g \cdot \rho}{\eta} = K \cdot \frac{g}{\nu}$$

mit

k Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
K Permeabilitätskoeffizient [m²]
ρ Dichte des Fluids [kg/m³]
η dynamische Zähigkeit des Fluids [kg/(m · s)]
ν kinematische Zähigkeit des Fluids [m²/s]

Die Berücksichtigung von Fluideigenschaften beim Durchlässigkeitsbeiwert ist insbesondere bei der Untersuchung von Mehrphasenströmungen, also Strömungsvorgängen von mehreren, miteinander in Kontakt stehenden Fluiden (z. B. Öl und Wasser, Süß- und Salzwasser, Wasser und Luft) von Bedeutung. Mehrphasenströmungen werden im Folgenden jedoch nicht betrachtet.

Unter bestimmten Randbedingungen können auch die physikalischen Eigenschaften von Grundwasser (Süßwasser) einen deutlichen Einfluss auf die Durchlässigkeit eines Grundwasserleiters haben. Während die Dichte von Wasser nur geringfügig von der Temperatur abhängig ist, ist die Zähigkeit des Wassers in weitaus größerem Maße temperaturabhängig (Tabelle 3).

Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass sich die Zähigkeit von Wasser bei Erwärmung von 10 °C auf 40 °C auf ca. die Hälfte reduziert. Da die Durchlässigkeit umgekehrt proportional zur Zähigkeit ist, verdoppelt sich durch die Temperaturerhöhung die Durchlässigkeit des Lockergesteins. Diese kann z. B. durch eine lokale Erhöhung der Grundwassertemperatur infolge Hydratationswärme beim Abbinden von Beton (Unterwasserbeton, Düsenstrahlinjektionskörper) hervorgerufen werden. Ohne äußere Beeinflussung weist Grundwasser i. Allg. jedoch nur geringe Temperaturunterschiede auf, sodass im Folgenden vom Durchlässigkeitsbeiwert als einer rein gesteinsspezifischen Größe ausgegangen wird.

Die Anwendung der Darcy-Gleichung ist jedoch auf einen bestimmten Strömungsbereich beschränkt. Sowohl bei sehr grobkörnigen als auch sehr feinkörnigen Lockergesteinen

Tabelle 3. Abhängigkeit der Dichte und der Zähigkeit reinen Wassers von der Temperatur (nach [3])

Temperatur [°C]	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Dynamische Zähigkeit η [kg/(m · s)]**	**Kinematische Zähigkeit ν [m²/s]**
0	999,84	$1{,}7938 \cdot 10^{-3}$	$1{,}7941 \cdot 10^{-6}$
10	999,70	$1{,}3097 \cdot 10^{-3}$	$1{,}3101 \cdot 10^{-6}$
20	998,20	$1{,}0087 \cdot 10^{-3}$	$1{,}0105 \cdot 10^{-6}$
30	995,65	$0{,}8004 \cdot 10^{-3}$	$0{,}8039 \cdot 10^{-6}$
40	992,21	$0{,}6536 \cdot 10^{-3}$	$0{,}6587 \cdot 10^{-6}$
50	988,04	$0{,}5492 \cdot 10^{-3}$	$0{,}5558 \cdot 10^{-6}$
60	983,21	$0{,}4699 \cdot 10^{-3}$	$0{,}4779 \cdot 10^{-6}$

können sich Strömungsverhältnisse ergeben, für die der lineare Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gradient nicht zutreffend ist.

Eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Darcy-Gesetzes ist, dass die durch die Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit über den Porenkanaldurchmesser hervorgerufenen Trägheitskräfte vernachlässigbar gegenüber den inneren Reibungskräften des Fluids sind. Das Verhältnis zwischen Trägheits- und Reibungskräften wird durch die dimensionslose Reynoldszahl Re bestimmt.

$$\mathrm{Re} = \frac{v \cdot d_f}{\nu}$$

mit

Re Reynoldszahl [–]
v Filtergeschwindigkeit [m/s]
d_f durchflusswirksamer Porendurchmesser [m]
ν kinematische Zähigkeit des Grundwassers [m²/s]

Für den durchflusswirksamen Porendurchmesser d_f existieren unterschiedliche Definitionen, vereinfachend wird oft der Korndurchmesser d_{10} der maßgebenden Körnungslinie des untersuchten Lockergesteins bei 10 % Siebdurchgang verwendet. Die kritische Reynoldszahl, unterhalb derer von laminaren Strömungsverhältnissen (schleichende Strömung, Trägheitskräfte vernachlässigbar) ausgegangen werden kann, wird zumeist mit $\mathrm{Re}_{krit} = 1 - 10$ angegeben. Bei darüber liegenden Reynoldszahlen liegt ein Übergang zur turbulenten Strömung vor. Die kritische Reynoldszahl wird bei Strömungen in natürlichen Grundwasserleitern fast immer deutlich unterschritten. Ausnahmen können Grundwasserströmungen in sehr durchlässigen Lockergesteinsmaterialien (Kies) bei vergleichsweise hohen hydraulischen Gradienten, z. B. in Brunnenfiltern, darstellen. Im Allgemeinen kann jedoch von der Gültigkeit des Gesetzes von *Darcy* zur Beschreibung von Grundwasserströmungen ausgegangen werden.

In bindigen, sehr geringdurchlässigen Lockergesteinsböden können aufgrund der geringen Strömungskanaldurchmesser Haltekräfte zwischen den Bodenpartikeln und dem Wasser in den Poren nicht vernachlässigt werden. Hier gilt ebenfalls nicht der lineare Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gradienten gemäß dem Gesetz von *Darcy*. Für Strömungen in Grundwasserleitern ist dies jedoch nicht von Belang. Die Gültigkeitsgrenzen dieses Gesetzes sind in [4] detailliert beschrieben.

Zur Berechnung der Grundwasserströmung ist eine Verallgemeinerung des Gesetzes von *Darcy* erforderlich, um die in der Natur vorhandenen dreidimensionalen Strömungsverhältnisse zu berücksichtigen. Weiterhin ist die Durchlässigkeit in natürlichen Grundwasserleitern sowohl abhängig vom Ort als auch von der Richtung. Die Richtungsabhängigkeit der Durchlässigkeit wird als Anisotropie (**anisotrope Durchlässigkeit**) bezeichnet. Für die Durchlässigkeit wird i. Allg. angenommen, dass sie durch Homogenbereiche abgebildet werden kann, in denen die einzelnen Durchlässigkeitskomponenten jeweils als konstant angesetzt werden können. Das heißt für diese Abschnitte eines Grundwasserleiters wird jeweils eine **homogene Durchlässigkeit** angesetzt.

Für den allgemeinen dreidimensionalen Fall mit richtungsabhängigen Durchlässigkeiten, deren Hauptdurchlässigkeitsrichtungen nicht den kartesischen Koordinatenrichtungen entsprechen, lässt sich die Darcy-Gleichung für einen Bereich mit homogener Durchlässigkeit durch das folgende Gleichungssystem beschreiben:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \partial h/\partial x \\ \partial h/\partial y \\ \partial h/\partial z \end{Bmatrix}$$

Dabei stellt der linke Term den Vektor der Filtergeschwindigkeiten, der mittlere Term den Tensor der richtungsabhängigen Durchlässigkeitsbeiwerte und der rechte Term den Vektor der partiellen Ableitungen der Grundwasserpotenziale nach den kartesischen Koordinaten dar. Bei definitionsgemäß in Strömungsrichtung positiver Filtergeschwindigkeit ergibt sich das negative Vorzeichen aus dem Potenzialabbau in Fließrichtung (negativer Gradient). Für gegebene Hauptrichtungen der Durchlässigkeit mit darauf bezogenen Durchlässigkeitsbeiwerten lassen sich die auf die kartesischen Koordinaten bezogenen Komponenten des Durchlässigkeitstensors durch Hauptachsentransformation bestimmen (siehe z. B. [8]). Entsprechen die Hauptachsen der Durchlässigkeit den kartesischen Koordinatenrichtungen, so vereinfacht sich das Gleichungssystem zu:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \partial h/\partial x \\ \partial h/\partial y \\ \partial h/\partial z \end{Bmatrix}$$

bzw. in Komponentenschreibweise zu:

$$v_x = -k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = -k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = -k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}$$

Von praktischer Relevanz ist zumeist nur eine von der horizontalen Durchlässigkeit ($k_{xx} = k_{yy} = k_h$) abweichende vertikale hydraulische Durchlässigkeit ($k_{zz} = k_v$). Diese verminderte vertikale Durchlässigkeit kann sowohl in natürlich abgelagerten Lockergesteinen (Sedimenten) als auch in künstlichen Erdbauwerken vorkommen. Bei Sedimenten ist dies durch die bevorzugte horizontale Ausrichtung von plattigen Partikeln sowie vor allem durch die geologische Entstehungsgeschichte der Sedimente mit wechselnder Ablagerung von grob- und feinkörnigeren Schichten begründet. Nach [4] ist die Durchlässigkeit von natürlichen Grundwasserleitern in horizontaler Richtung meist um den Faktor 2–10 größer als die in vertikaler Richtung. Auch bei künstlichen Erdbauwerken resultiert aus dem schichtweise verdichteten Einbau oft eine in vertikaler Richtung verminderte Durchlässigkeit. Diese wird durch den Bruch von Kornpartikeln bei der Verdichtung und dem daraus folgenden erhöhten Feinkornanteil an der Oberfläche der Einbaulagen sowie durch eine unterschiedliche Verdichtung über die Höhe der Einbaulagen verursacht. In Abhängigkeit von der Empfindlichkeit des Einbaumaterials gegenüber mechanischer Belastung und dem Herstellungsverfahren können erheblich anisotrope Durchlässigkeitsverhältnisse auftreten (z. B. bei Waschbergematerial).

Anisotrope Durchlässigkeitsverhältnisse lassen sich problemlos in numerischen Strömungsberechnungen berücksichtigen. Für analytische Berechnungen von gespannten Grundwasserströmungen können Modellbereiche mit anisotroper Durchlässigkeit durch Verzerrung in Modellbereiche mit isotroper Durchlässigkeit übergeführt werden (siehe z. B. [4]). Für die nachfolgenden Grundwasserströmungsberechnungen wird jedoch vereinfachend eine isotrope Durchlässigkeit k angesetzt. Für homogene und isotrope Durchlässigkeitsverhältnisse ergeben sich die kartesischen Komponenten der Darcy-Gleichung zu:

$$v_x = -k\frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = -k\frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = -k\frac{\partial h}{\partial z}$$

1.1.3 Kontinuitätsgleichung

Neben der Darcy-Gleichung stellt die Kontinuitätsgleichung, die das physikalische Prinzip der Massenerhaltung beschreibt, die zweite grundlegende Gleichung zur Beschreibung von Grundwasserströmungen dar. Für stationäre (zeitunabhängige) Verhältnisse besagt diese, dass die Bilanz der Zu- und Abflüsse an einem wassergesättigten Kontrollvolumen null betragen muss (Bild 7).

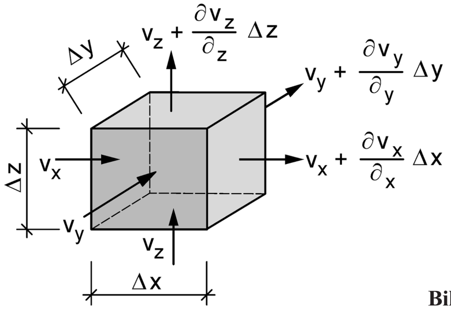

Bild 7. Zu- und Abflüsse am Kontrollvolumen

Unter der Annahme einer konstanten Dichte des Grundwassers ergibt sich die Kontinuitätsgleichung für stationäre, wassergesättigte Strömungsverhältnisse zu:

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Bei instationären (zeitabhängigen) Strömungsverhältnissen ist zusätzlich die Änderung des innerhalb des Kontrollvolumens gespeicherten Grundwasservolumens mit der zeitlichen Veränderung des Grundwasserpotenzials zu berücksichtigen. Die Bilanz der Zu- und Abflüsse am Kontrollvolumen muss der zeitlichen Änderung des im Kontrollvolumen vorhandenen Wasservolumens entsprechen. Unter der Voraussetzung eines konstanten spezifischen Speicherkoeffizienten ergibt sich die Kontinuitätsgleichung für instationäre, wassergesättigte Strömungsverhältnisse zu:

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

1.1.4 Strömungsgleichung

Die Strömungsgleichung resultiert aus der Verknüpfung der Kontinuitätsgleichung mit der Darcy-Gleichung. Unter der Annahme von homogenen Durchlässigkeitsverhältnissen mit den Hauptachsen der anisotropen Durchlässigkeit entsprechend der kartesischen Achsen ergibt sich die Strömungsgleichung für stationäre, wassergesättigte Strömungsverhältnisse durch Einsetzen der Komponenten der Darcy-Gleichung in die Kontinuitätsgleichung zu:

$$k_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Unter der zusätzlichen Annahme von isotropen Durchlässigkeitsverhältnissen vereinfacht sich die Strömungsgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0$$

Diese Gleichung ist eine der bedeutendsten partiellen Differenzialgleichungen der mathematischen Physik, die Laplace-Gleichung. Die Lösung dieser Gleichung ist die Funktion h(x,y,z), die die Verteilung der Zustandsvariablen, des hydraulischen Potenzials h, in Abhängigkeit vom Ort des dreidimensionalen Strömungsfeldes beschreibt.

Für instationäre, wassergesättigte Strömungsverhältnisse ergibt sich die Strömungsgleichung unter der Annahme einer homogenen, isotropen Durchlässigkeit durch Einsetzen der Komponenten der Darcy-Gleichung in die instationäre Kontinuitätsgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=\frac{S_s}{k}\frac{\partial h}{\partial t}$$

Dieser partielle Differenzialgleichungstyp wird in der Physik als Diffusionsgleichung bezeichnet. Die Lösung dieser Gleichung beschreibt die Verteilung des hydraulischen Potenzials h(x,y,z,t) in Abhängigkeit vom Ort des Strömungsfeldes und von der Zeit t.

1.1.5 Rand- und Anfangsbedingungen

Zur Lösung der stationären (zeitunabhängigen) Grundwasserströmungsgleichung müssen entlang der gesamten Ränder des Modellgebietes Randbedingungen definiert werden. Es werden dabei drei Arten von Randbedingungen unterschieden:

Mit der **Randbedingung der ersten Art** (Dirichlet-Bedingung) wird das Grundwasserpotenzial am Modellrand vorgeschrieben (Festpotenzial h = const.). Beispielsweise kann ein See oder ein Fluss mit einem direkten Anschluss an einen Grundwasserleiter eine Randbedingung der ersten Art darstellen. Ein Festpotenzial kann auch an einem Modellrand vorgeschrieben werden, wenn erwartet wird, dass der Modellrand so weit von der die Grundwasserverhältnisse beeinflussenden Maßnahme entfernt ist, dass deren Einfluss auf das Grundwasserpotenzial am gewählten Modellrand vernachlässigt werden kann. Stellt ein Brunnenrand einen Modellrand dar (z. B. bei der rotationssymmetrischen Berechnung der Zuströmung zu einem Brunnen), so lässt sich der Modellrand unterhalb eines konstanten Brunnenwasserstandes für den anschließenden Grundwasserleiter ebenfalls als Festpotenzialrand beschreiben. Die Vorgabe eines konstanten (atmosphärischen) Druckes (p = 0 bzw. h = z) zur Beschreibung von Sickerstrecken (z. B. beim Grundwasseraustritt an der Geländeoberfläche, in Dräns oder Brunnen), stellt ebenfalls eine Randbedingung der ersten Art dar (s. Abschn. 1.3.5 und 1.5.4).

Bei der **Randbedingung der zweiten Art** (Neumann-Bedingung) wird der Zu- oder Abfluss senkrecht zum Modellrand vorgeschrieben (z. B. konstanter Zufluss infolge Zuströmung aus überlagernden Bodenschichten). Die konstante Entnahme aus einem Brunnen, dessen Rand einem Modellrand darstellt, kann ebenfalls durch eine Randbedingung der zweiten Art als konstanter Abstrom über den Brunnenmantel beschrieben werden. Ein häufig auftretender Spezialfall dieses Randes ist der undurchlässige Modellrand (z. B. entlang von Grundwassernichtleitern oder wasserundurchlässigen Bauwerken), bei dem der Zu- oder Abfluss senkrecht zu diesem Rand gleich null ist. Als undurchlässig angenommene Modellränder stellen Randstromlinien dar.

Die **Randbedingung der dritten Art** (Cauchy-Bedingung) stellt eine Kombination aus erster und zweiter Art durch die Vorgabe eines Zu- oder Abflusses senkrecht zum Modellrand in Abhängigkeit von der Differenz zwischen dem Grundwasserpotenzial und einem konstanten äußeren Potenzial dar. Sie wird zur Beschreibung von halbdurchlässigen Rändern

(z. B. Zusickerung aus kolmatierten Oberflächengewässern oder Dräns und Brunnen bei der Grundwasseranreicherung) verwendet. Dabei wird am Modelland nicht unmittelbar ein äußeres Potenzial, sondern ein gedämpftes (durch einen Strömungswiderstand abgeschwächtes) Grundwasserpotenzial wirksam.

Zur Lösung der instationären (zeitabhängigen) Grundwasserströmungsgleichung ist **als Anfangsbedingung** zusätzlich die Grundwasserpotenzialverteilung zu Simulationsbeginn ($h(t = t_0)$) vorzugeben. Weiterhin kann der Wert der Randbedingungen auch als veränderlich über den Simulationszeitraum (z. B. als Wasserstandsganglinie oder unterschiedliche Entnahmerate) vorgegeben werden.

1.2 Berechnung von Grundwasserströmungen

Grundlage für die Berechnung von Grundwasserströmungen ist ihre Beschreibung mithilfe mathematischer Modelle. Ein Modell ist ein Hilfsmittel zur vereinfachten Abbildung der zu untersuchenden, wesentlichen physikalischen Prozesse in der Natur. Bei den hier verwendeten mathematischen Modellen wird die Grundwasserströmung durch die Strömungsgleichungen abgebildet, die die wesentlichen physikalischen Prozesse beschreiben. Bereits bei den zugrunde gelegten mathematischen Modellen werden, wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, die Grundwasserströmungsvorgänge auf Grundlage vereinfachter Annahmen abgebildet (z. B. Einphasenströmung, konstante Dichte des Wassers, Gültigkeit des Darcy-Gesetzes, bereichsweise homogene Durchlässigkeit, druckunabhängiger spezifischer Speicherkoeffizient). In Abhängigkeit von den wesentlichen, die Grundwasserströmung beeinflussenden Faktoren und der erforderlichen Genauigkeit der Abbildung der Strömungsvorgänge können weitere Vereinfachungen des mathematischen Modells getroffen werden (z. B. ausschließlich wassergesättigte Strömung, isotrope Durchlässigkeit, stationäre Strömungsverhältnisse, vertikal-ebene, horizontal-ebene, eindimensionale oder rotationssymmetrische Modellierung).

Um die Grundwasserströmung basierend auf einem mathematischen Modell ermitteln zu können, ist – unabhängig vom Berechnungsverfahren (analytische oder numerische Berechnung, zeichnerisches Lösungsverfahren) – ein Modellgebiet festzulegen, das einen Abschnitt der für das Untersuchungsziel maßgebenden Grundwasserleiter und ggf. Grundwassernichtleiter und Grundwassergeringleiter sowie der strömungsrelevanten Bauwerke abbildet. Die Modellabmessungen sind möglichst so festzulegen, dass sie die Vorgabe von natürlichen grundwasserhydraulischen Randbedingungen an den Modellrändern ermöglichen (z. B. durch Grundwassernichtleiter vorgegebene Randstromlinien, Wasserstände in Oberflächengewässern). Ist dies für einzelne Modellränder nicht möglich, müssen die Modellabmessungen so gewählt werden, dass die an diesen Rändern angenommenen grundwasserhydraulischen Randbedingungen keinen relevanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben. Gegebenenfalls kann der Einfluss der Randbedingungen durch eine Parameterstudie ermittelt werden. Bei analytischen Berechnungen können die Modellränder auch im Unendlichen liegen.

Zur Berechnung der Grundwasserströmung ist eine Parametrisierung erforderlich. Dies bedeutet, dass auf Grundlage einer zumeist geringen Anzahl von geologischen Erkundungen und hydrogeologischen Untersuchungen, die räumlich und teilweise auch zeitlich veränderlichen Einflussgrößen (z. B. Schichtgrenzen, Durchlässigkeiten, Speicherkoeffizienten, Zuflüsse, Wasserstände) durch vereinfachte Modellparameter, in Abhängigkeit vom gewählten mathematischen Modell abgebildet werden (z. B. Festlegung von Homogenbereichen).

Für die Berechnung von Grundwasserströmungen existiert umfangreiche Fachliteratur, z. B. *Verruit* [8], *Harr* [9], *Bear* [10], *Freese/Cherry* [11] und *Busch* et al. [4] sowie *Hölting/*

Coldewey [2] und *Langguth/Voigt* [3], mit dem Schwerpunkt auf hydrogeologischen Fragestellungen. Verfahren zur Berechnung und Ausführung von Grundwasserabsenkungen werden insbesondere von *Herth/Arndts* [12] behandelt. Eine weitere umfangreiche Zusammenstellung von Berechnungsansätzen für die Grundwasserhaltung mit zahlreichen Diagrammen für unterschiedliche Randbedingungen sowie die Darstellung von Verfahren zur Grundwasserhaltung und zur Ermittlung geohydraulischer Parameter enthält auch die im Internet frei verfügbare Veröffentlichung der amerikanischen Streitkräfte [13].

Analytische Berechnungen von Grundwasserströmungen sind meist nur auf Grundlage vereinfachter (meist eindimensionaler) mathematischer Modelle und stark vereinfachter Modellannahmen möglich. Trotzdem können Grundwasserströmungsprobleme in vielen Fällen mit ausreichender Genauigkeit durch analytische Lösungen beschrieben werden. Dies gilt auch für die Berechnung von Grundwasserhaltungen, wenn keine komplexen Randbedingungen vorliegen und keine detaillierten Aussagen zur Auswirkung der Grundwasserhaltung auf die Grundwasserverhältnisse erforderlich sind. Die folgenden Abschnitte enthalten grundlegende Lösungen für Grundwasserhaltungsaufgaben und weitere Grundwasserströmungsprobleme. Besonderen Wert wird dabei auf die Darstellung der zugrunde gelegten Annahmen und Voraussetzungen für die Lösungen gelegt. Für weiterführende analytische Lösungen von Grundwasserströmungsproblemen sei auf [4] sowie *Polubarinova-Kochina* [14] verwiesen, die teilweise jedoch vertiefte mathematische Kenntnisse erfordern.

Für komplexe geohydraulische Fragestellungen, die nicht mit ausreichender Genauigkeit durch vereinfachte analytische Lösungen beantwortet werden können, stellen numerische Verfahren ein geeignetes Mittel dar. Die Anwendung numerischer Modelle gehört mittlerweile zum Standardinstrumentarium bei der Beantwortung grundwasserhydraulischer Fragestellungen. Dies gilt insbesondere für wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen, aber auch in zunehmendem Maß für die Berechnung von Grundwasserabsenkungen und für die Ermittlung von Grundwasserströmungen als Grundlage für geotechnische Berechnungen.

Mittlerweile sind kommerzielle Programmsysteme erhältlich, mit denen Grundwassermodellierungen mit relativ geringem Aufwand und nahezu ohne Kenntnisse der mathematisch-physikalischen Grundlagen durchgeführt werden können. Der Modellierer sollte jedoch über ausreichende Kenntnisse der mathematischen Beschreibung von Grundwasserströmungen und über grundlegende Kenntnisse der numerischen Lösungsverfahren verfügen, um die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse beurteilen zu können. Die numerischen Lösungsverfahren basieren i. Allg. auf der Finite-Differenzen-Methode (FDM) oder der Finite-Elemente-Methode (FEM). Bei beiden Methoden wird das Modellgebiet in eine endliche (finite) Anzahl von Zellen oder Elementen unterteilt (diskretisiert). Ein wesentlicher Unterschied der beiden Verfahren ist die Art der Diskretisierung. Bei der FDM erfolgt die Diskretisierung durch rechteckige (oder quaderförmige) Zellen, während bei der FEM die Diskretisierung durch Elemente beliebiger Form erfolgen kann. Die FEM erlaubt deshalb eine bessere Anpassung der Diskretisierung an den Verlauf von Modellgrenzen oder Strukturen innerhalb des Modellgebietes.

Numerische Grundwasserströmungsmodelle stellen wie alle Modelle ein vereinfachtes Abbild der natürlichen Verhältnisse dar, das maßgebend vom Umfang und der Qualität der Eingangsparameter beeinflusst wird. Ein wesentlicher Aspekt der numerischen Modellierung ist deshalb die Beurteilung der Berechnungsergebnisse auf Grundlage der Unsicherheit der Eingangsdaten. Dabei bieten numerische Modelle die Möglichkeit, durch Parameterstudien die Auswirkung von innerhalb physikalisch sinnvoller Grenzen variierten Eingangsparametern auf die Berechnungsergebnisse beurteilen zu können.

In den folgenden Abschnitten werden lediglich die wesentlichen Grundlagen bei der Durchführung von numerischen Grundwasserströmungsberechnungen (z. B. Wahl der Randbedingungen sowie Ermittlung der freien Grundwasseroberfläche und von Sickerstrecken bei ungespannten Grundwasserströmungen) beschrieben (s. insbesondere Abschn. 1.3.5). Ausführliche Darstellungen von numerischen Verfahren zur Berechnung von Grundwasserströmungen enthalten z. B. *Pinder/Gray* [15], *Huyakorn/Pinder* [16], *Wang/Anderson* [17], *Anderson/Woessner* [18] sowie *Kinzelbach/Rausch* [19].

Nachstehend wird die Berechnung von Grundwasserströmungen auf Grundlage von vertikal-ebenen (Grabenströmung), rotationssymmetrisch vertikal-ebenen (Brunnenströmung) und dreidimensionalen Modellen jeweils für stationäre und instationäre Strömungsverhältnisse beschrieben. Die analytischen Lösungen für räumlich eindimensionale, stationäre und instationäre Modelle werden dabei aus den vertikal-ebenen und rotationssymmetrisch vertikal-ebenen Modellen abgeleitet.

1.3 Vertikal-ebene Berechnung von stationären Grundwasserströmungen

Vertikal-ebene Berechnungen eignen sich für Grundwasserströmungen, die durch langgestreckte Bauwerke mit gleichen hydraulischen Randbedingungen dominiert werden und bei denen die Strömung senkrecht zu der Berechnungsebene als vernachlässigbar angenommen werden kann (z. B. Zuströmung zu einem Graben oder Dammdurchströmung). Die Berechnung erfolgt für eine vertikal-ebene Scheibe mit Einheitsbreite und den seitlichen, vertikalen Begrenzungsflächen als Randstromflächen.

Für vertikal-ebene, stationäre Strömungen in einem vollständig wassergesättigten Grundwasserleiter mit homogener und isotroper Durchlässigkeit ergibt sich die Strömungsgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Diese Strömungsgleichung stellt die Grundgleichung für die nachfolgend beschriebenen eindimensionalen analytischen, numerischen und zeichnerischen Lösungen dar.

1.3.1 Analytische Berechnung von gespannten Grundwasserströmungen

Unter vereinfachten Modellannahmen lassen sich vertikal-ebene, stationäre Grundwasserströmungen bei gespannten Grundwasserverhältnissen durch eindimensionale, analytisch lösbare Strömungsgleichungen beschreiben. Im Folgenden sind analytische Lösungen für Grabenströmungen (Zuströmungen zu einem Dränagegraben) bei gespannten Grundwasserverhältnissen für verschiedene Randbedingungen dargestellt. Für $x = 0$ wird jeweils eine Absenkung des Grundwasserpotenzials durch den Dränagegraben angesetzt. Dabei werden keine Strömungsverluste innerhalb des Dränagegrabens berücksichtigt.

Grabenströmung im gespannten Grundwasserleiter

Der Berechnung liegen folgende zusätzliche, vereinfachende Annahmen zugrunde (Bild 8):

- rechteckförmiger Querschnitt des Grundwasserleiters mit Länge L und konstanter Mächtigkeit M,
- homogene und isotrope Durchlässigkeit k,
- horizontale Modellränder ohne äußeren Zufluss (Randstromlinien),
- konstantes Grundwasserpotenzial an den vertikalen Modellrändern.

BUCHEMPFEHLUNG

Witt, K. J. (Hrsg.)

Grundbau-Taschenbuch

Teil 2: Geotechnische Verfahren

7., überarb. u. aktualis. Auflage

Das Grundbau-Taschenbuch ist das bekannteste und umfangreichste deutschsprachige Kompendium auf dem Gebiet der Geotechnik. Für die 7. Auflage wurde es unter einem neuen Herausgeber von zahleichen neuen Autoren überarbeitet.
Der zweite Teil des Grundbau-Taschenbuches behandelt die geotechnischen Verfahren mit ihren Berechnungs- und Nachweismethoden: Erd- und Grundbau, Baugrundverbesserung, Injektions- und Ankertechnik, Rammen und Bohren, Bauwerksabdichtungen, Bodenvereisung, Grundwasserhaltung bis hin zu ingenieurbiologischen Verfahren zur Böschungssicherung.
(939 Seiten, 549 Abb., 90 Tab. Gebunden)

Aus dem Inhalt:

- Erdbau (H.-H. Schmidt, T. Rumpelt)
- Baugrundverbesserung (W. Sondermann, K. Kirsch)
- Injektionen (W. Hornich, G. Stadler)
- Unterfangungen und Verstärkung von Gründungen (K. J. Witt)
- Bodenvereisung (W. Orth)
- Verpressanker (L. Wichter, W. Meiniger)
- Bohrtechnik (G. Ulrich, G. Ulrich)
- Horizontalbohrungen und Rohrvortrieb (H. Schad, T. Bräutigam, H.-J. Bayer)
- Rammen, Ziehen, Pressen, Rütteln (F. Berner, W. Paul)
- Grundwasserströmung - Grundwasserhaltung (B. Odenwald, U. Hekel, H. Thormann)
- Abdichtungen und Fugen im Tiefbau (A. Haack)
- Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau (F. Saathoff, G. Bräu)
- Ingenieurbiologische Verfahren zur Böschungssicherung (R. Johannsen, E. Hacker)
- Stichwortverzeichnis
- Inserentenverzeichnis

Fax-Antwort an +49(0)30 47031 240

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	Einzelpreis
	978-3-433-01845-3	Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren	€ 179,- / sFr 283,-
	978-3-433-01846-0	Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke	€ 179,- / sFr 283,-
	978-3-433-01847-7	**im Set:** Grundbau-Taschenbuch Teile 1 bis 3	zum Sonderpreis € 483,- / sFr 763,-
	905221	Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn	kostenlos
	2091	Probeheft BAUTECHNIK, die Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift: ☐privat ☐geschäftlich **Bestell-Code: 100 773**

Firma			
Ansprechpartner			Telefon
UST-ID Nr./VAT-ID No.			Fax
Straße//Nr.			E-Mail
Land	-	PLZ	Ort

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21
10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

✕

Datum/Unterschrift

*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: 19.10.09 (homepage_Leseprobe)