

1 Größen und Einheiten in der Hydrogeologie

1.1 Allgemeines

In der Hydrogeologie werden abgeleitete Größen und Einheiten zur physikalischen und chemischen Kennzeichnung des Wassers und zur Beschreibung der Aquiferparameter benutzt, die sich in der Regel mit physikalischen Größen verbinden lassen. Da es auf internationaler Ebene auch heute noch kein für alle Naturwissenschaften verbindliches Einheitensystem gibt, werden in der Praxis für ein und denselben Parameter unterschiedliche Einheiten gebraucht. Deshalb wird in diesem Buch ein Kapitel über Dimensionen, Größen und Einheiten vorangestellt.

In Deutschland wie in Europa ist seit 1978 das Internationale Einheitensystem SI (Système International d'Unités) verbindlich. Es wurde im Jahr 1960 durch die 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) als *praktisches Einheitensystem* beschlossen (Anonym 1977). In ihm werden drei Klassen von SI-Einheiten unterschieden, die eine kohärente Gesamtheit bilden:

- Basiseinheiten
- abgeleitete Einheiten
- ergänzende Einheiten

Basiseinheiten sind hinsichtlich ihrer Definition voneinander unabhängig.

Abgeleitete Einheiten werden durch Kombination von Basiseinheiten gemäß gewählten algebraischen Beziehungen, die zugehörige Größen verknüpfen, gebildet (vgl. auch Abschn. 1.5.2).

Einige dieser als Funktion der Basiseinheiten gebildeten algebraischen Ausdrücke können selbst durch besondere Namen und Einheitenzeichen ersetzt werden. Sie dürfen ihrerseits wieder für die Bildung weiterer abgeleiteter Einheiten benutzt werden.

Ergänzende Einheiten sind solche Einheiten, über die noch nicht entschieden ist, ob es sich bei ihnen um Basiseinheiten oder um abgeleitete Einheiten handelt.

Dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten sind ebenfalls festgelegt. Sie werden durch die SI-Vorsätze (Präfixe) gekennzeichnet (vgl. Tabelle 1.5).

Das SI ist in Deutschland wie in Europa auch die gesetzliche Grundlage für DIN- und ISO-Normen. Basisgrößen und Basiseinheiten des SI sind in DIN 1301 definiert. Alle seit 1978 erfolgten Neubearbeitungen von DIN-Normen bauen auf dem SI auf bzw. werden es noch berücksichtigen. Wichtig für die Hydrogeologie sind beispielsweise die DIN 4021, 4049, 4188, 4924.

Vor allem in der deutschen Fachliteratur wird gelegentlich anstelle des Begriffs Einheit auch der Terminus Dimension benutzt. Dies ist inkorrekt. Als *Dimension* bezeichnet man *Basisgrößen* wie

- Länge (L)
- Masse (M)
- Zeit (T),

die im SI durch die Einheiten

- Meter (m)
- Kilogramm (kg)
- Sekunde (s)

bzw. daraus abgeleitete Einheiten definiert werden.

Speziell im amerikanischen Schrifttum werden aber anstelle von SI-Einheiten häufig noch traditionelle, zudem numerisch inkonsistente Einheiten verwendet, deren Bedeutung dem Neuling oft rätselhaft vorkommt.

So lautet etwa die amerikanische Einheit für die Durchlässigkeit ‚gallons per day and square foot‘. Sie ist dimensionell identisch mit der äquivalenten SI-Einheit ms^{-1} . Bei Umrechnungen abgeleiteter Einheiten aus einem System ins andere beginnt man daher zweckmäßigerweise mit einer Kontrolle der jeweiligen Dimension. Die Abschnitte 1.3 und 1.5 beschäftigen sich speziell mit dieser Problematik.

Die meisten hydrogeologischen Fach- und Lehrbücher enthalten meist am Schluss Anhänge mit Maßeinheiten und Umrechnungstabellen: Es sei insbesondere auf Driscoll (1986), Freeze u. Cherry (1979), Kruseman u. De Ridder (1991) sowie Weast (1978) verwiesen.

Für die Hydrodynamik wichtige Angaben über Messgrößen und Maßeinheiten enthalten ferner Standardwerke wie Jonys (1972) sowie Strahler u. Strahler (1973) sowie das Tabellenwerk von Anderson (1993).

Nachstehend werden zunächst die Basisgrößen und -einheiten des SI aufgeführt. Danach folgen die abgeleiteten Größen und ihre Einheiten, besonders die für die Hydrogeologie wichtigen. Ein Abschnitt beschäftigt sich speziell mit den Techniken von Umrechnungen.

Für allgemeine Angaben betreffend das SI sowie physikalische Größen und ihre Einheiten sei auf die preiswerten Ausgaben von Haeder u. Gaertner (1971), Bender u. Pippig (1973), Baehr (1974) sowie Anonym (1977) verwiesen. Als Standardwerke zum Nachschlagen seien Landolt-Boernstein (1923 ff; 1952 ff) sowie nochmals Weast (1978) genannt.

1.2 Basisgrößen und Basiseinheiten des SI

Die Basisgrößen (Dimensionen) des SI sind nach Anonym (1977) und DIN 1301:

Basisgrößen	Einheit	
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	Ampere	A
Temperatur thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Ihre Definitionen sind

- 1 *Meter* ist das 1 650 763,73 fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids ^{86}Kr beim Übergang vom Zustand $5d_5$ zum Zustand $2p_{10}$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung.
- 1 *Kilogramm* ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.
- 1 *Sekunde* ist das 9 192 631 770 fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.
- 1 *Ampere* ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stroms, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1m zueinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 m Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.
- 1 *Kelvin* ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.
- 1 *Mol* ist die Stoffmenge eines Systems bestimmter Zusammensetzung, das aus ebenso vielen Teilchen besteht, wie Atome in (12/1000) kg des Nuklids ^{12}C enthalten sind. Bei Benutzung des Mol müssen die Teilchen spezifiziert werden. Es können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.
- 1 *Candela* ist die Lichtstärke, mit der (1/600 000) m^2 der Oberfläche eines Schwarzen Strahlers bei der Temperatur des beim Druck von $101\,325\text{ Nm}^{-2}$ erstarrenden Platins senkrecht zu seiner Oberfläche leuchtet.

1.3 Abgeleitete, in der Hydrogeologie wichtige SI-Einheiten

Die für die Hydrogeologie notwendigen abgeleiteten Einheiten werden im Folgenden in Tabellen zusammengefasst wiedergegeben. Es wurde bewusst Wert auf Vollständigkeit gelegt, auch wenn nicht alle Einheiten in den weiteren Kapiteln wieder vorkommen.

Tabelle 1.1 enthält die geometrischen, kinematischen und mechanischen Einheiten, Tabelle 1.2 einige thermodynamische Einheiten, Tabelle 1.3 elektrische Einheiten. In Abb. 1.4 sind viskosimetrische und radiologische Einheiten zusammengestellt.

In den Tabellen sind zunächst Name oder Benennung der Einheit, dann das Einheitenzeichen, der algebraischer Ausdruck, durch den sie im SI-System angegeben wird, sowie die Dimension angegeben. Kenntnis der letzteren ist vor allem dann zwingend, wenn aus einem in das andere Maßsystem umgerechnet werden muss.

Dabei stehen symbolisch für die Basisgrößen die Dimensionen:

L	für Länge
M	für Masse
T	für Zeit
Θ	für Temperatur
I	für Stromstärke
J	für Lichtstärke

Definitionsgemäß ist die Dimension einer Größenart der Ausdruck, der die betrachtete Größe als Potenzprodukt der Basisgrößen mit dem Zahlenfaktor 1 darstellt (Bender u. Pippig 1973; vgl. auch Abschn. 1.5.2). Sie ist somit *systemneutral*.

Zum Beispiel wird die Kraft im SI durch den algebraischen Ausdruck kgms^{-2} beschrieben. Ihre Dimension lautet entsprechend MLT^{-2} . Als Formelzeichen für die Dimension einer Größenart x wird in Anlehnung an Bender u. Pippig (1973) in diesem Buch durchgehend die Notation $\text{dim}(x)$ benutzt. Daher

$$\text{dim}(\text{Kraft}) = \text{MLT}^{-2}$$

Die Einheitenzeichen abgeleiteter Einheiten dürfen in unterschiedlicher Form als Produkte bzw. Quotienten geschrieben werden (Anonym 1977), also

$$\begin{aligned} &\text{N}\cdot\text{m} \text{ oder } \text{Nm} \\ &\text{m/s} \text{ oder } \text{m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ oder } \text{ms}^{-1} \end{aligned}$$

Mit Ausnahme von Konzentrationseinheiten werden in diesem Buch Notationen wie Nm und ms^{-1} verwandt. Des besseren Verständnisses halber erfolgt oft auch die Angabe der Dimension.

Notwendig sind in diesem Zusammenhang noch einige Bemerkungen zu Wortverbindungen mit den Wörtern Konstante, Koeffizient, Faktor und Grad sowie zu dem Gebrauch der Wörter „bezogen“, „spezifisch“, „relativ“ und „reduziert“.

- Wortverbindungen mit *-faktor* oder *-beiwert* bezeichnen Verhältnisgrößen, mit denen eine Größe multipliziert werden muss, um ihre Abweichung von einer Ausgangsgröße zu berücksichtigen.
- Wortverbindungen mit *-grad* bezeichnen Verhältnisgrößen, deren Optimalwert höchstens 1 (100 %) ist.
- *Konstante* ist in erster Linie die Bezeichnung für unveränderliche universelle physikalische Konstanten (z.B. allgemeine Gaskonstante) oder solche Größen, die bei definierten Bedingungen eines Systems konstant sind.
- *Koeffizient* bezeichnet eine Größe, die den Einfluss einer Stoffeigenschaft oder eines physikalischen Systems auf einen physikalischen Zusammenhang kennzeichnet.
- *Bezogen* heißen Größen, die der Quotient aus zwei Ausgangsgrößen sind. Der begriffliche Schwerpunkt liegt dabei bei der im Zähler stehenden Größe. Die im Nenner stehende Größe heißt *Bezugsgröße*.
- *Spezifisch* werden bezogene Größen genannt, wenn die Bezugsgröße eine geometrische Größe (Länge, Fläche, Volumen) oder die Masse ist. Beispiel: spezifisches Volumen, spezifischer Speicherkoeffizient.
- *Reduziert* ist eine Größe, wenn ihr Wert auf vereinbarte Bedingungen umgerechnet oder umgewertet worden ist (z.B. reduzierter Luftdruck).
- Das Wort *relativ* wird zur Bezeichnung von Verhältnisgrößen angewendet, bei denen die im Nenner stehende Größe eine festgelegte Bezugsgröße ist.

Streng genommen dürfte bei der Durchlässigkeit K (vgl. Gl. 1.8 und 1.9) nur von einem Durchlässigkeitsbeiwert bzw. -faktor gesprochen werden und nicht wie auch üblich von einem Durchlässigkeitskoeffizienten. Denn die stoffliche Eigenschaft des porösen Mediums, permeabel zu sein für Fluide (Gase und Flüssigkeiten), wird durch die Größe „spezifische Permeabilität“ mit dem Einheitenzeichen k beschrieben (vgl. Abschn. 2.3.4 sowie Gl. 1.10). Nur diese spezifische Permeabilität kann also mit Permeabilitätskoeffizient bezeichnet werden.

Der in der deutschen Literatur üblicherweise angegebene Durchlässigkeitsbeiwert k_f (Koehne 1948) ist dagegen nur ein konkreter Zahlenwert für die Größe K , und zwar in einem bestimmten Aquifer für ein gegebenes schwach mineralisiertes Wasser von 10 °C, somit

$$k_f = K_{10\text{ °C, mineralarmes Wasser}}$$

Die *dezimalen Teile und Vielfachen* der Einheiten des SI werden durch Vorsätze (Präfixe) und Vorsatzzeichen gekennzeichnet. Eine Übersicht dazu bietet Tabelle 1.5.

Tabelle 1.1. Abgeleitete geometrische, kinematische und mechanische Größen des SI

Größe	Einheitenname	Einheitenzeichen	ausgedrückt in SI-Einheiten	dim (x)
Fläche	Quadratmeter	A	m^2	L^2
Volumen	Kubikmeter	V	m^3	L^3
Volumenstrom	Kubikmeter pro Sekunde	Q	m^3s^{-1}	L^3T^{-1}
Dichte	Kilogramm pro Kubikmeter	ρ	kgm^{-3}	ML^{-3}
Frequenz	Hertz	Hz	s^{-1}	T^{-1}
Wellenzahl	Eins je Meter	σ	m^{-1}	L^{-1}
Wellenlänge		λ $1/\sigma$	m	L
Geschwindigkeit	Meter pro Sekunde	v	ms^{-1}	LT^{-1}
Beschleunigung	Meter pro Sekunde hoch zwei	b	ms^{-2}	LT^{-2}
Kraft	Newton	N	$kgms^{-2}$	MLT^{-2}
Druck	Pascal	Pa Nm^{-2}	$kgm^{-1}s^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
mechanische Arbeit, Energie	Joule	J Nm	kgm^2s^{-2}	ML^2T^{-2}
Leistung	Watt	W Js^{-1}	kgm^2s^{-3}	ML^2T^{-3}
Oberflächen- spannung	Newton pro Meter	A Nm^{-1}	$kgms^{-2}m^{-1}$	MT^{-2}
Elastizitätsmodul	Newton pro Quadratmeter	E Nm^{-2}	$kgm^{-1}s^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
Wichte, spezifisches Gewicht	Newton pro Kubikmeter	γ Nm^{-3}	$kgm^{-2}s^{-2}$	$ML^{-2}T^{-2}$

Tabelle 1.2. Abgeleitete thermodynamische Größen des SI

Größe	Einheitenname	Einheitenzeichen	ausgedrückt in SI-Einheiten	dim (x)
Wärmemenge	Joule	$J \quad Nm = Ws$	kgm^2s^{-2}	ML^2T^{-2}
spezifische Wärmemenge	Joule in Kilogramm	$q \quad Jkg^{-1}$	m^2s^{-2}	L^2T^{-2}
spezifische Wärmekapazität	Joule pro Kilogramm mal Kelvin	$Jkg^{-1}K^{-1}$	$m^2s^{-2}K^{-1}$	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit	Watt pro Meter-Kelvin	$WK^{-1}m^{-1}$	$mkgs^{-3}K^{-1}$	$LMT^{-3}\Theta^{-1}$
Wärmestrom	Watt	W	kgm^2s^{-3}	L^2MT^{-3}
Temperaturleitfähigkeit	Quadratmeter pro Sekunde		m^2s^{-1}	L^2T^{-1}
Celsiustemperatur	Grad	$^{\circ}C$	K	Θ

Tabelle 1.3. Abgeleitete elektrische Größen des SI

Größe	Einheitenname	Einheitenzeichen	ausgedrückt in SI-Einheiten	dim (x)
elektrische Spannung	Volt	$V \quad A\Omega \quad WA^{-1}$	$kgm^2s^{-3}A^{-1}$	$ML^2T^{-3}I^{-1}$
elektrischer Widerstand	Ohm	$\Omega \quad VA^{-1} \quad WA^{-2}$	$kgm^2s^{-3}A^{-2}$	$ML^2T^{-3}I^{-2}$
spezifischer elektrischer Widerstand	Ohmmeter	Ωm	$kgm^3s^{-3}A^{-2}$	$ML^3T^{-3}I^{-2}$
elektrischer Leitwert	Siemens	$S \quad \Omega^{-1}$	$kg^{-1}m^{-2}s^3A^2$	$M^{-1}L^{-2}T^3I^2$
elektrische Leitfähigkeit	Siemens pro Meter	Sm^{-1}	$kg^{-1}m^{-3}s^3A^2$	$M^{-1}L^{-3}T^3I^2$

Tabelle 1.4. Abgeleitete viskosimetrische und radiologische Größen des SI

Größe	Einheitenname	Einheitenzeichen	ausgedrückt in SI-Einheiten	dim (x)
dynamische Viskosität	Pascalsekunde	$\mu \quad Pas$	$kgm^{-1}s^{-1}$	$ML^{-1}T^{-1}$
kinematische Viskosität	Quadratmeter pro Sekunde	ν	m^2s^{-1}	L^2T^{-1}
Aktivität einer radioaktiven Substanz	reziproke Sekunde		s^{-1}	T^{-1}