

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 88 (1970)
Heft: 12

Artikel: Einfluss eines schwankenden Vorfluterspiegels auf den Grundwasserspiegel
Autor: Vischer, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-84455>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Einfluss eines schwankenden Vorfluterspiegels auf den Grundwasserspiegel

Von Prof. Dr. D. Vischer, Baden

DK 551.491.54.001

1. Einleitung

In der Umgebung vieler Seen und Flüsse wird der Grundwasserspiegel durch den Spiegel im Vorfluter beeinflusst. Bleibt die Spiegellage im Vorfluter längere Zeit auf gleicher Höhe, so stellt sich der Spiegel des unmittelbar angrenzenden Grundwassers auf diese Höhe ein. Der Spiegel des etwas weiter abgelegenen Grundwassers liegt über oder unter dieser Kote, je nachdem ob sich der Grundwasserstrom in den Vorfluter ergiesst oder ob dieser ihn speist. Wenn kein Austausch zwischen den beiden Gewässern stattfindet und das Grundwasser stagniert, ist der Grundwasserspiegel überall gleich dem des Vorfluters, Bild 1. Im folgenden wird zunächst gerade dieser Fall einer näheren Betrachtung unterzogen, weil er – als Gegenstück zur Kommunikation zweier Gefässe – leichter zu erfassen ist. Und zwar soll der Frage nachgegangen werden, inwiefern sich der Grundwasserspiegel dem des Vorfluters angleicht, wenn dieser wegen äusseren Einflüssen periodisch schwankt. Zu diesen Einflüssen gehören beispielsweise

- kurze Wellen, wie sie vom Wind oder der Schifffahrt erzeugt werden können,
- mittlere Wellen, die von einer täglichen Bewirtschaftung durch Pumpspeicherwerke herrühren oder die den Gezeiten entsprechen,
- lange Wellen, die sich durch eine über Wochen und Monate erstreckende Bewirtschaftung ergeben oder die einfach die schwankenden Wetter- und damit Abflussverhältnisse widerspiegeln¹⁾.

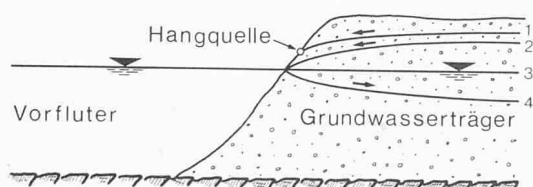


Bild 1. Zusammenhang zwischen Vorfluter- und Grundwasserspiegel. Fälle 1 und 2: Der Grundwasserstrom ergiesst sich mit und ohne Hangquelle in den Vorfluter. Fall 3: Das Grundwasser stagniert. Fall 4: Der Grundwasserstrom wird vom Vorfluter gespeist

2. Die Bewegungsgleichung des Grundwasserspiegels

Die Differentialgleichung für eine instationäre Grundwasserströmung kann, wie dies bereits *Boussinesq* getan hat, mittels der Kontinuitätsgleichung und des verallgemeinerten Gesetzes von *Darcy* abgeleitet werden. Wenn man einen bestimmten (aber an sich häufig vorkommenden) Typus eines Grundwasserträgers voraussetzt, das heisst wenn

- es sich um ein ebenes Problem handelt,
- die freie Oberfläche nur schwach geneigt ist,
- die Geschwindigkeiten horizontal gerichtet und von der Höhenlage unabhängig sind,

¹⁾ Es wird hier davon abgesehen, dass sich die Gezeiten und allfälligen Niederschläge nicht nur auf den Vorfluter, sondern auch direkt auf den Grundwasserstrom auswirken.

- die Tiefe des Grundwasserträgers überall gleich und gegenüber den Spiegelschwankungen gross ist, so lautet diese Gleichung:

$$(1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k d}{n_s} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

Hierin bedeuten: h, x die Spiegelkoordinaten in m

t die Zeit in s

d die Mächtigkeit des Grundwasserträgers in m

k den Durchlässigkeitskoeffizienten nach Darcy in m/s

n_s die wirksame Porosität (Verhältnis der freien Durchtrittsfläche zur Gesamtfläche senkrecht zur Strömung)

Ihre Lösung kann für zahlreiche Fälle aus der Theorie der Wärmeleitung übernommen werden, da eine vollständige Analogie besteht [1]. Der Quotient kd/n_s entspricht dabei der Temperaturleitzahl.

Um eine möglichst übersichtliche Darstellung zu erhalten, sei hier angenommen, dass

- die Vorfluterschwankung periodisch erfolge gemäss der Gleichung

$$(2) \quad h = H \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$$

- der Grundwasserträger in bezug auf den Vorfluter als Halbraum aufgefasst werden könne, Bild 2,
- an der Grenze, das heisst am Ufer, die Spiegellage im Vorfluter immer mit derjenigen im Grundwasserträger übereinstimme,
- der Anlaufvorgang abgeklungen sei.

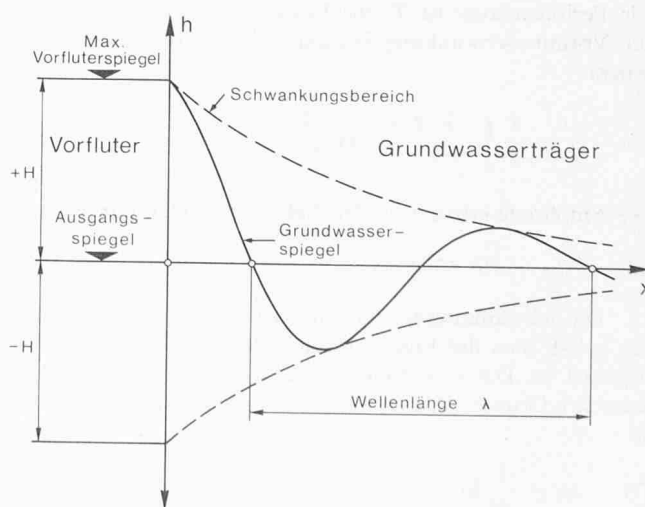


Bild 2. Schematisierung des Vorfluters und des Grundwasserträgers (Halbraum). Die Schwankung des Vorfluterspiegels erzeugt landwärts wandernde Grundwasserwellen

Als Lösung ergibt sich dann, wie bereits andernorts dargestellt [2], die Bewegungsgleichung

$$(3) \quad h = H e^{-ax} \sin(2\pi t/T - ax)$$

worin bedeuten:

H die maximale Auslenkung des Vorfluterspiegels (Amplitude) in m

T die Periodendauer in s

$$a = \sqrt{\frac{\pi n_s}{T k d}} \text{ in } 1/\text{m}$$

Die Annahme, wonach die Spiegellage des Vorfluters immer mit derjenigen des Grundwassers am Ufer übereinstimmen soll, schliesst die Bildung einer Hangquelle, Bild 1, aus. Eine solche entsteht, wenn der Vorfluter schneller absinkt, als die Sickerströmung zu folgen vermag [3]. Entsprechend der hier eingeführten Definition der Vorfluterschwankung ergibt sich die maximale Absenkungsgeschwindigkeit zu $2\pi H/T$. Die grösstmögliche effektive Sickergeschwindigkeit ist bei senkrechten Ufern naturgemäss k/n_s . Sie ist vertikal, was den Voraussetzungen der Bewegungsdifferentialgleichung an sich widerspricht. Lässt man dies im unmittelbaren Uferbereich jedoch unter Hinnahme einer entsprechenden Ungenauigkeit zu, so gilt die abgeleitete Bewegungsgleichung jedenfalls nur unter der Bedingung, dass

$$(4) \quad 2\pi \frac{H}{T} < \frac{k}{n_s}$$

Da das verallgemeinerte Gesetz von Darcy auf der Voraussetzung einer laminaren Strömung beruht und zudem die Trägheitskräfte vernachlässigt, wird hier implizite nur von Grundwasserträgern mit kleinen Werten von k/n_s gesprochen. Dementsprechend lässt die oben abgeleitete Bedingung auch nur Vorfluterschwankungen mit geringen Absenkungsgeschwindigkeiten zu. Der Einfluss von kurzen Wellen, also von Wind- und Schiffswellen, kann folglich mit der angeführten Bewegungsgleichung nicht beschrieben werden. Dagegen lässt sich im allgemeinen der Einfluss der mittleren und langen Wellen erfassen.

3. Die Fortpflanzung der Schwankungen

Die Bewegungsgleichung besagt, dass der Grundwasserspiegel im Abstand x vom Vorfluter sinusförmig schwankt. Die Periodendauer ist T ; die Phasenverschiebung gegenüber der Vorfluterschwankung beträgt – im Zeitmassstab ausgedrückt –

$$(5) \quad t_p = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{n_s T}{\pi k d}} = ax \frac{T}{2\pi}$$

Die Amplitude erreicht an der Stelle x nur noch den Wert

$$(6) \quad h_{\max} = H e^{-ax}$$

Die Schwankung erfolgt dementsprechend stark gedämpft, das heisst, dass der Einflussbereich der Vorfluterschwankung begrenzt ist. Die Reichweite x_R , an welcher eine gerade noch messbare Grundwasserschwankung h_R auftritt, berechnet sich zu

$$(7) \quad x_R = \frac{1}{a} \ln \frac{H}{h_R}$$

Sie ist also umso grösser, je grösser die Periodendauer, die Sickergeschwindigkeit und die Grundwassermächtigkeit sind.

Die Wellenlänge beträgt

$$(8) \quad \lambda = 2 \sqrt{\frac{\pi T k d}{n_s}} = \frac{2\pi}{a}$$

und die Wellengeschwindigkeit

$$(9) \quad c = \frac{\lambda}{T} = 2 \sqrt{\frac{\pi k d}{T n_s}} = \frac{2\pi}{aT}$$

Wie bei allen Wellen darf diese Fortpflanzung natürlich nicht mit dem Massentransport verwechselt werden. Die Grundwasserströmung bewegt sich gemäss dem Ansatz von Darcy mit der effektiven Sickergeschwindigkeit

$$(10) \quad v_s = -\frac{k}{n_s} \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$

oder, durch die entsprechende Differentiation der Bewegungsgleichung ausgedrückt, mit

$$(11) \quad v_s = H \sqrt{\frac{2\pi k}{T n_s d}} e^{-ax} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - ax + \frac{\pi}{4}\right)$$

Sie pendelt also unter dem Einfluss der Vorfluterschwankung hin und her. Die entsprechende Bewegung am Ufer verläuft gemäss

$$(12) \quad v_{s0} = H \sqrt{\frac{2\pi k}{T n_s d}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{4}\right)$$

und weist die maximale Eintritts- bzw. Austrittsgeschwindigkeit von

$$(13) \quad v_{s0 \max} = H \sqrt{\frac{2\pi k}{T n_s d}}$$

auf. Die Eintrittsmenge (Infiltration) am Ufer innerhalb der Zeit von t_1 bis t_2 ergibt sich pro benetzte Flächeneinheit aus dem Integral

$$(14) \quad q_0 = n_s \int_{t_1}^{t_2} v_{s0} dt$$

oder

$$(15) \quad q_0 = -H \sqrt{\frac{T k n_s}{2\pi d}} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{4}\right) \Bigg|_{t_1}^{t_2}$$

Das Maximum während einer Halbperiode $T/2$ tritt zwischen den Grenzen $t_1 = -T/8$ und $t_2 = 3T/8$ auf und erreicht den Wert von

$$(16) \quad q_{0 \max} = H \sqrt{\frac{2 T k n_s}{\pi d}}$$

In der nächsten Halbperiode fliesst naturgemäss die gleiche Menge wieder in den Vorfluter zurück.

Die Ergebnisse in bezug auf die Fortpflanzung der Vorfluterschwankung könnten durch Einführung dimensionsloser Grössen noch zusammengefasst und in entsprechenden Diagrammen dargestellt werden. In Frage kämen die Parameter

$$\xi = x \sqrt{\frac{\pi n_s}{T k d}} = ax$$

$$\alpha = \frac{h}{H}$$

$$\tau = \frac{2\pi}{T} t$$

Ebenso könnten die Formeln für die zugehörige Sickerströmung durch geeignete Parameter gerafft werden. Weil jedoch dabei die unmittelbare Anschaulichkeit der Ausdrücke verlorengeht, wird hier darauf verzichtet.

4. Beispiele

Beispiel A

Infolge der Bewirtschaftung durch ein Pumpspeicherwerk schwankt ein Vorfluter um insgesamt 80 cm innerhalb eines Tages. Der 20 m mächtige Grundwasserträger zeichnet sich durch eine verhältnismässig hohe Durchlässigkeit von 0,5 cm/s bei einer wirksamen Porosität von 25% aus. Demnach sind:

$$H = 40 \text{ cm}, T = 24 \text{ h}, d = 20 \text{ m}, k = 0,5 \text{ cm/s}, n_s = 25\%$$

Zuerst muss untersucht werden, ob die Vorfluterschwankung derart langsam erfolgt, dass die Entstehung von Hangquellen ausgeschlossen ist. Dazu dient Gleichung (4). Die maximale Absenkgeschwindigkeit beträgt $2\pi H/T = 2,9 \cdot 10^{-5}$ [m/s] und die grösstmögliche effektive Sickergeschwindigkeit im senkrechten Ufer $k/n_s = 2,0 \cdot 10^{-2}$ [m/s]. Die verlangte Bedingung ist also sehr gut erfüllt. Die Bewegungsgleichung (3) lautet mit

$$a = \sqrt{\frac{\pi n_s}{T k d}} = 0,0095 \sim 0,01$$

$$h = 0,4 e^{-0,01 x} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - 0,01 x\right) \quad [\text{m}]$$

Die momentanen Spiegellagen nach jeder Achtelsperiode sind in Bild 3 dargestellt, ebenfalls die Amplitudenkurven

$$h = \pm 0,4 e^{-0,01 x} [\text{m}]$$

Die Dämpfung ist derart stark, dass die Grundwasserschwankung in 70 m Entfernung vom Ufer nur noch der halben Vorfluterschwankung entspricht. Die Phasenverschiebung beträgt dort rund 2½ Stunden.

Vergegenwärtigt man sich, dass eine mit herkömmlichen Mitteln durchgeführte Grundwasserstandsmessung etwa eine Genauigkeit von ± 1 cm aufweist, so kann die Reichweite der Schwankung mit Gleichung (7)

$$x_R = \frac{1}{0,01} \ln \frac{40}{1} \quad [\text{m}]$$

zu rund 400 m ermittelt werden. In über 400 m Entfernung vom Ufer ist der Einfluss der Vorfluterschwankung also nicht mehr eindeutig festzustellen.

Die Wellenlänge beträgt nach Gleichung (8) rd. 660 m, die Wellengeschwindigkeit nach Gleichung (9) rd. 0,76 cm/s. Demgegenüber erreicht die effektive Sickergeschwindigkeit am Ufer nach Gleichung (13) im Maximum nur 0,01 cm/s.

Beispiel B

Um den Einfluss der Schwankungsperiode zu erläutern, sei angenommen, dass die beim Beispiel A beschriebene Vorfluterschwankung innerhalb eines Jahres statt eines Tages stattfindet. Die Schwankungsperiode ist also 365mal grösser. Da sie in alle Formeln mit ihrer Quadratwurzel eingeht, können die entsprechenden Werte des Beispiels A mit dem Faktor 19,1 umgerechnet werden.

Die Amplitudenkurven der Jahresschwankung

$$h = \pm 0,4 e^{-0,0005 x} \quad [\text{m}]$$

umschreiben, wie auch Bild 3 zeigt, eine erheblich geringere Dämpfung. Demzufolge ist die Reichweite der Jahresschwankung mit rund 7,5 km wesentlich grösser. Die Wellenlänge beträgt rd. 12,5 km und die Wellengeschwindigkeit 0,04 cm/s.

Der Einflussbereich einer Jahresschwankung ist folglich wesentlich ausgedehnter als derjenige einer Tagesschwankung. Dies bestätigt die bekannte Tatsache, dass sich saisonbedingte Vorfluterschwankungen auf einen Grundwasserstand oft stark auswirken, während kurzzeitige Veränderungen kaum in Erscheinung treten.

Beispiel C

In den vorangehenden Beispielen wurde ein Grundwasserträger mit grosser Durchlässigkeit betrachtet. Da der Durchlässigkeitskoeffizient mit seiner Quadratwurzel in die Formeln eingeht, lassen sich diese Beispiele leicht auf einen dichteren Grundwasserträger übertragen. Es wird dann insbesondere deutlich, dass die Dämpfung der Wellen im dichteren Medium erheblich grösser und der Einflussbereich der Vorfluterschwankung dementsprechend wesentlich geringer ist.

Statt näher darauf einzutreten, soll hier noch einmal das Beispiel A betrachtet werden, und zwar für den Fall, dass das Ufer durch eine 5 m starke Kolmatierungsschicht mit einem Durchlässigkeitskoeffizienten von nur $5 \cdot 10^{-3}$ cm/s oder $5 \cdot 10^{-5}$ cm/s abgedichtet ist. In dieser Schicht ist also die Dämpfung 10- bzw. 100mal grösser als im anschliessenden Grundwasserträger. Dementsprechend schirmt sie den Grundwasserträger mehr oder weniger gut gegen die Vorfluterschwankungen ab. Die Amplitudenkurven, die in Bild 4 festgehalten sind, verlaufen am Übergang von der Kolmatierungsschicht in den Grundwasserträger geknickt.

Zu erwähnen bleibt allerdings, dass die effektive Sickergeschwindigkeit im Ufer bei einem Durchlässigkeitskoeffizienten von $5 \cdot 10^{-5}$ cm/s kleiner als die maximale Absenkgeschwindigkeit des Vorfluters ist, das heisst, dass

$$2\pi \frac{H}{T} > \frac{k}{n_s} \text{ oder } 2,9 \cdot 10^{-5} > 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s ist.}$$

Es würde sich folglich beim Absenken eine Hangquelle bilden, so dass die dargestellten Verhältnisse nicht ganz zutreffen.

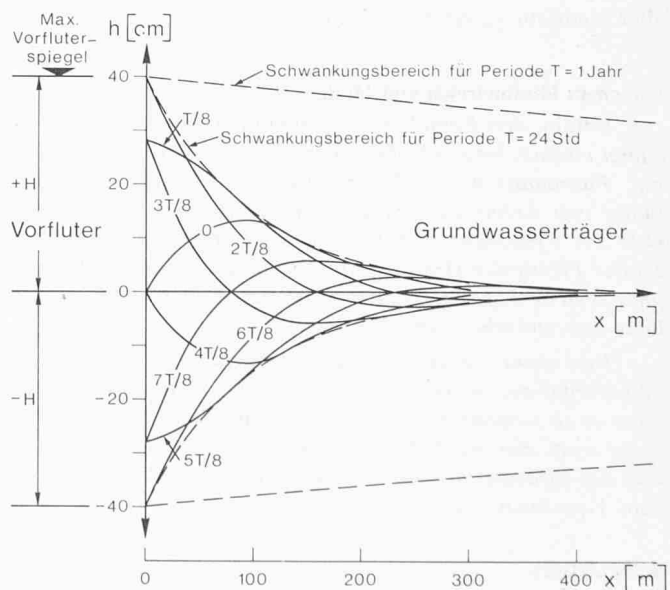


Bild 3. Konkrete Beispiele einer Vorfluterschwankung von 80 cm. Beim Beispiel A erfolgt die Schwankung innerhalb von 24 h. Dargestellt sind die momentanen Grundwasserspiegel nach jeweils 3 h sowie der entsprechende Schwingungsbereich. Beim Beispiel B schwankt der Vorfluter innerhalb eines Jahres. Dargestellt ist der wesentlich grössere Schwingungsbereich des Grundwasserspiegels

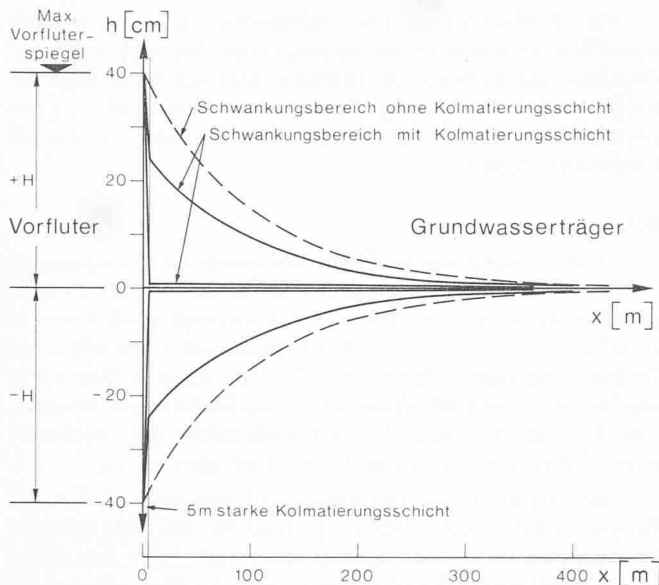


Bild 4. Einfluss einer 5 m starken Kolmatierungsschicht am Ufer auf den Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels (Beispiel C). Je dichter die Kolmatierungsschicht ist, desto stärker dämpft sie den Einfluss der Vorfluterschwankung auf den Grundwasserspiegel

5. Schlussbemerkung

Die abgeleiteten Formeln sind zunächst nur auf den Fall des kommunizierenden Grundwasserspiegels angewendet worden. Der Ausgangsspiegel wurde also sowohl im Vorfluter wie im Grundwasserträger als horizontal vorausgesetzt, was das Verständnis der Vorgänge erleichtert. Es handelt sich dabei

Aphorismen von Paul Hofer

In Heft 32 der SBZ 1969 haben wir auf S. 614 einige Gedanken Professor Paul Hofers (ETH) zum Phänomen Stadt publiziert. Hier folgen einige weitere Aphorismen aus der gleichen Quelle, ebenfalls dem Leser zum Vergnügen, aber auch zur Besinnlichkeit gedacht:

Forschers Himmelreich und Hölle

Irrtum, den Forscher zu intellektuell zu nehmen. Er ist zuerst einfach Naturell, Temperament, unableitbarer Archetyp. Pallmanns wunderbarer Ausruf auf einer Waldbegehung, von Leibundgut zitiert am Schluss der Gedächtnisrede im Fraumünster (16.10.1965): «Herrlich, Herrlich! Lauter Probleme! Hier beginnt alles neu.» Hier die Wurzel, ohne welche Faradays «Travailler! Achever! Produire!» nur leere kantianische Formel bleibt.

Von wann an ist ein Gelehrter nur noch Arbeitstier, «un animal qui se croit libre» (Galiani) und damit erblindet, ohne es zu wissen? Vom Augenblick an, da er Bücher nicht mehr liest, nur noch benutzt. Wenn die Stickerei vergeht und das Stramin, als triviales Geflecht grauen Ungenügens, zum Vorschein kommt.

Schwülstiges

Klassischer deutscher Gelehrtenstil ohne Deutsch: «Das spezifische Ingrediens des Theophrast ist der mimetische Humor.» Nicht etwa Phrase; der Satz ist von Hermann Diels; Problem der Verdeutschbarkeit. Von den zwanzig Silben sind vier «deutschstämmig». Bei Wahrung der vollen Bedeutungsbreite wird der Satz länger, schwerfälliger, um-

jedoch nicht um eine notwendige Voraussetzung, denn wie ein Blick auf die Bewegungsgleichung (3) zeigt, könnten dieser noch andere Lösungen superponiert werden, welche Gleichung (1) mit den zugehörigen Anfangs- und Randbedingungen erfüllen. Auf diese Weise liesse sich also auch ein geneigter Ausgangsspiegel einführen. Als einfachste Möglichkeit eines solchen bietet sich der Ausdruck $h_1 = Cx$ an, mit dem näherungsweise die Oberfläche eines schwach vom oder zum Vorfluter abfallenden Grundwasserstromes erfasst werden kann. Aus seiner Superposition mit der Spiegelordinate h_2 nach Gleichung (3) ergibt sich die vollständige Beschreibung der Grundwasserspiegellage zu

$$h = h_1 + h_2$$

Die in den vorangehenden Abschnitten berechneten Werte von h müssten in diesem Fall also vom Ausgangsspiegel h_1 aus abgetragen werden. Oder in andern Worten, die Grundwasserspiegel würden gleichsam um den geneigten Ausgangsspiegel schwanken. Dabei hätten die Phasenverschiebung, die Wellenlänge und die Wellengeschwindigkeit genau die in Abschnitt 3 definierten Werte.

Literaturverzeichnis

- [1] Carlslaw, H. S. und Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids, Oxford 1958.
- [2] Schoeller H.: Les eaux souterraines, Paris 1962.
- [3] Dracos, Th.: Ebene nichtstationäre Grundwasserabflüsse mit freier Oberfläche. Mitt. Nr. 57 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, Zürich 1962.

Adresse des Verfassers: Dr. Daniel Vischer, Nelkenstrasse 4, 5200 Windisch, (in Firma Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden).

DK 92:8-82

ständlicher. Antifremdwörterei ist so plump wie gelehrter Bombast.

Notizen während eines Vortrages von Kerényi (1955). Es fallen Sätze wie: «das ist der Mensch (Hölderlin), und dieser konkrete Mensch steht in der konkreten Geschichte.» Initiationsgeschwätz. Lauwarmer Deutungsbrei. Der Wicht als Gaukler. Seifenblasen, deklariert als Goldkugeln – alles das alles zur «Friedensfeier» Hölderlins!

Begriffsschärfe

Grobstellen deutscher Sprachlichkeit. Nach dem «Buch der Freunde» gehört zu den beleuchtenden Unterschieden zwischen Französisch und Deutsch, dass es dort den Unterschied zwischen «chair» und «viande» gibt, hier aber nicht; oder, auf ganz anderem, aber ebenfalls sinnlichem Gebiet: der Gegensatz zwischen «Lux» und «Lumen». Das Deutsche unterscheidet scharf im Abstrakten, grob im Sinnlichen.

Diagramme sind Denkhilfen, Sehhilfen; optischen Instrumenten vergleichbar, sind sie dazu da, das Untersuchungsobjekt schärfer, d. h. unterscheidender zu fassen. Von ihrem Missbrauch als Definitionsformeln bis zur Verwechslung von Gerät und Objekt ist nur ein Schritt.

Schein und Sein

Die lächerlichste Form des Provinziellen: die ständige Furcht, es zu sein. Äquivalent des Provinziellen: die Mächtetern-Urbanität um jeden Preis.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Paul Hofer, 3037 Stuckishaus, Halen 2.