

Werk

Jahr: 1953

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 Z NAT 2148:19

Werk Id: PPN101433392X_0019

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X_0019|LOG_0027

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Der Einfluß von Luftdruckschwankungen auf den Grundwasserstand

Von R. Meissner, Frankfurt a. Main¹⁾

Mit 12 Abbildungen

1. Einführung

Die Tatsache, daß zwischen Luftdruck und Grundwasser gewisse Zusammenhänge bestehen, ist nicht neu. So wurde bereits im 17. Jahrhundert in Karlsbad erhöhte Dampfmenge des Sprudels bei schlechtem Wetter und im 18. Jahrhundert dessen größere Spannungshöhe bei vermindertem Luftdruck festgestellt. In Franzensbad wurde 1811 bis 1819 der Einfluß des Luftdrucks auf die Ergiebigkeit der Quellen nachgewiesen. Eine Quelle stellt sogar bei hohem Barometerstand ihren Abfluß ganz ein, während eine andere, in der gleichen Gegend liegende Süßwasserquelle gar keine feststellbaren Veränderungen zeigt. Im Jahre 1874 veröffentlicht *A. Novak* eine Abhandlung „Über das Verhältnis der Grundwasserschwankungen zu den Schwankungen des Luftdrucks“. *Novak* mißt täglich viermal beide Werte und stellt statistisch einen bedeutenden Einfluß des Luftdrucks auf den Brunnenpiegel fest. In allen Fällen steht das Grundwasser *bei fallendem* oder *tieferem* Druck *höher* als bei *steigendem* oder *hohem* Druck. 1879 wird von anderen Autoren „Über die periodischen Schwankungen in den inundierten Kohlschächten in Dux (Böhmen)“ berichtet, wo man gleichfalls eine Abhängigkeit vom Luftdruck findet, aber auch noch Sonne und Mond einen — wohl sonst nicht erklärbaren — Einfluß zuschreibt.

Der erste, der sich mit diesen Fragen genauer beschäftigt, ist *Weyde* [1], Böhmen, 1910. Er stellt fest, daß das Grundwasser in gewissen Böden, z. B. im Moor, gar nicht auf den Luftdruck reagiert, während in Alluvialböden eine gute Korrelation zwischen Luftdruck und Grundwasser bestehen soll. Bei einem Brunnen, dessen Gang gut mit dem Luftdruck übereinstimmt, versucht *Weyde* festzustellen, wie groß bei 1 mm Luftdruckunterschied allgemein die Veränderung des Brunnenpiegels ist. Er findet jedoch recht unterschiedliche Ergebnisse²⁾. Besonders bei Gewittern schein das Grundwasser direkt in den Boden gedrückt zu werden, der Effekt trete hier verstärkt auf. Es sei schon an dieser Stelle erwähnt, daß wir bei unseren jetzigen Versuchen das gleiche beobachten und auch für diese Erscheinung eine plausible Erklärung besitzen.

Den Wasserhaushalt eines Bodens bestimmen Niederschlag, Abfluß und Verdunstung. Ein Teil des Niederschlags, der nicht verdunstet oder abfließt, dringt in den Erdboden ein und erfüllt einen Teil der hier vorhandenen Hohlräume. Diese sind mit Flüssigkeiten (meist Wasser) und Gasen (meist Luft) gefüllt. Enthält ein Boden nur feste und flüssige Bestandteile, nennt man ihn gesättigt, enthält er Wasser und Luft nebeneinander, bezeichnet man ihn als lufthaltig, ohne das Wasser besonders zu erwähnen. Grenz an eine „lufthaltige Zone eine wassergesättigte, so entstehen in der Übergangszone beträchtliche osmotische Saug- und Kapillardrucke.

Wird ein Brunnen mit durchlässigen Wandungen in den Boden eingeführt, so tritt in der oberen, lufthaltigen Zone zunächst kein Wasser aus, da der äußere Luftdruck

¹⁾ Dipl. Met. *R. Meissner*, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt a. M.

²⁾ U. a. ermittelt er auch — rein statistisch — einen Einfluß der Windstärke.

größer ist als der Druck im dort vereinzelt vorhandenen Wasser (vgl. auch Abb. 2a). Im obersten Teil der Sättigungszone tritt auch zunächst noch kein Wasser aus, da der oberste Teil der wassergesättigten Schicht durch osmotische und kapillare Kräfte getragen wird, wobei der Druck zunächst kleiner bleibt als der Außendruck.

Erst in einer gewissen Tiefe unterhalb der Oberfläche der Sättigungszone wird der Druck im Wasser gleich dem äußeren Luftdruck. Diese Fläche bezeichnet man als *Grundwasserspiegel* im engeren Sinne. Das Wasser unterhalb dieser Fläche (= Grundwasser) tritt in den Brunnen über.

Der Grundwasserspiegel ist also im allgemeinen keine Wasseroberfläche, sondern ein Druckniveau. Seine Höhe wird durch Messung der Höhenlage des Wasserspiegels in solchen Brunnen oder Bohrlöchern gemessen, die nicht tief in das Grundwasser eintauchen. Eine wirklich scharfe Wasseroberfläche wie bei offenen Gewässern gibt es nicht.

Wie erwähnt, ist auch in der *lufthaltigen* Zone ein großer Teil der Gesteinsporen mit Wasser gefüllt. Dieser Prozentsatz an Wasser ist sowohl örtlich wie zeitlich recht unterschiedlich und für die Luftdurchlässigkeit des Bodens von größter Bedeutung. Neben einer zeitlich sehr unterschiedlichen Menge an Sink- und Sickerwasser ist in dieser Zone ein weiterer Teil des Porenvolumens durch einen sich nur langsam verändernden Gehalt an Haftwasser ausgefüllt, das durch osmotische Saugkräfte der Ton- und Humusteilchen gehalten wird und von der Schwerkraft unabhängig ist.

Zwischen dieser lufthaltigen Zone und den darunterliegenden sogenannten geschlossenen Kapillawasserbereich bildet sich meist noch eine Übergangsschicht aus, in der alle Bodenteile benetzt sind, aber alle größeren Poren mit Luft gefüllt bleiben. Der geschlossene Kapillawassersaum erreicht nach *Keen* [4] bei Sanden nur 35 bis 70 cm, bei schwerem Lehm bis zu 85 cm.

2. Einteilung und Meßmethode der Grundwasserschwankungen

Es werden zunächst die Einflüsse gezeigt, die überhaupt Brunnenpiegel und Grundwasser beeinflussen können. Wir unterscheiden:

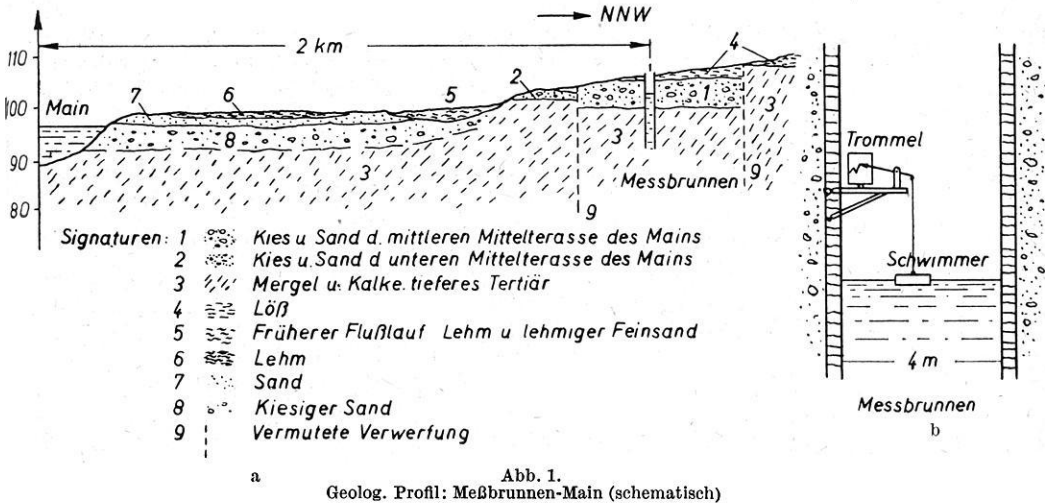
- A. Großschwankungen (monatlich bis jährlich),
- B. Kleinschwankungen (täglich bis monatlich),
- C. Kleinstschwankungen (kleiner als täglich).

Großschwankungen können hervorgerufen werden durch unterschiedliche Niederschlagszufuhr, Verdunstung oder sich verändernden unterirdischen Abfluß (Abpumpung, Zusammenhang mit Flüssen, Seen o. dgl.). Eine jährliche Schwankung ist wohl immer zu erkennen. Während im Winter und Frühjahr das Grundwasser meist ansteigt, fällt es im Herbst und im Sommer. Der Grund hierzu liegt einmal in der größeren direkten Verdunstung der gefallenen Niederschläge in der warmen Jahreszeit als auch in erhöhtem Wasserentzug des Bodens durch Vegetation.

Diese Großschwankungen stellen eine wirkliche Veränderung des Grundwasserspiegels *und* der wassergesättigten Schicht im Boden dar. Ihnen sind nun zeitweise luftdruckbedingte Klein- und Kleinstschwankungen überlagert, für deren Untersuchungen sich ein Brunnen im Frankfurter Palmengarten als sehr geeignet erwies. In diesem Brunnen, der nicht weit vom meteorologischen und geophysikalischen Institut entfernt ist, steht das Grundwasser in 3 bis 4 m Tiefe im Sandboden. Ein nachweisbarer Zusammenhang des Grundwassers mit Flüssen oder Seen liegt nicht vor. Entnahme aus dem Grundwasser finden in der Umgebung nicht statt. Einige in der Nähe befindliche

Meßrohre zeigen gleiche Grundwasserhöhen an wie der Brunnen, woraus man auf einen relativ ebenen Grundwasserspiegel in diesem Gebiet schließen kann. All diese Tatsachen rechtfertigen die Aussage, daß hier der Grundwasserspiegel durch den Brunnenspiegel gut repräsentiert wird (Abb. 1).

Zur Messung der Schwankungen des Grundwasserspiegels wurde in der Brunnenstube eine Registriertrommel untergebracht. (Tintenschrieb mit

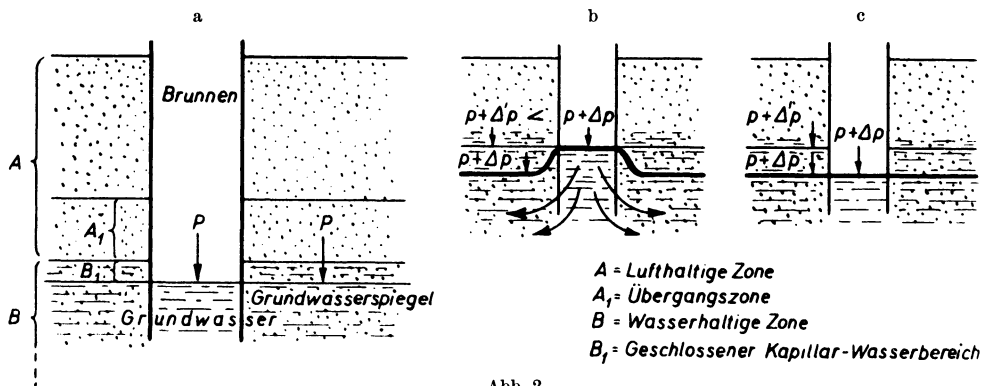


geringer Reibung, Umlaufdauer: eine Woche, Vergrößerung 2:1.) Wie aus Abb. 1 b ersichtlich, wird die so entstehende Brunnenkurve höhenvertauscht, d. h. ein hoher Grundwasserstand entspricht einem tiefen Kurvenverlauf und umgekehrt. Diese Anordnung besitzt zwei Vorteile: Einmal läßt sich das betriebssichere und einfache Hebelsystem (kleine Reibung) anwenden, zum anderen läßt eine solche umgekehrt aufgetragene Brunnenkurve einen viel anschaulicheren Vergleich mit der dazugehörigen Luftdruckkurve zu: Alle Registrierstreifen (vom 1. Dezember 1951 bis 1. Juni 1953) zeigen den starken unmittelbaren Einfluß des Luftdrucks. (Vgl. wöchentliche Originalstreifen sowie monatliche Darstellungen am Schluß dieser Arbeit.) Schon eine flüchtige Betrachtung läßt einige Besonderheiten erkennen: Größerer Einfluß von kurzen Luftdruckschwankungen, Voreilen der Wassermaxima vor die Luftdruckmaxima bei längeren Schwankungsperioden des Drucks u. a. m. Bevor versucht wird, diese Erscheinung in eine einheitliche Theorie einzuordnen, seien zunächst die Erklärungen anderer Autoren erwähnt, die dieses Thema bearbeitet haben. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß sie weder über einen gleichwertigen empfindlichen Pegelschreiber (Vergrößerung 2:1) noch über einen präzisen Feindruckschreiber (10 mb = 3 cm) verfügten. Beide Instrumente wurden in der Werkstatt des meteorologischen und geophysikalischen Institutes von Herrn Feinmechanikermeister *Weine* gebaut.

3. Die Erklärungen anderer Autoren

Zunker [5], dem sich Koehne [3] weitgehend anschließt, glaubt, für die Grundwasserschwankung sei die im Grundwasser gelöste Bodenluft verantwortlich, besonders die im Boden angereicherte Kohlensäure. Bekanntlich hängt die im Wasser lösbare Luftmenge von Temperatur und Druck ab. Bei fallendem Druck würde nach Zunker ein Teil der im Grundwasser gelösten Luftmenge frei, die nun einen größeren Raum einnimmt als im gelösten Zustand. Durch die Reibung kann die freigewordene Luft nicht ganz aufsteigen und bleibt auch in manchen Porenwinkeln haften. Diese freigewordene Luft verdrängt also etwas Grundwasser, das nur nach oben, zum Brunnenspiegel hin, ausweichen kann.

Mehrere Gründe sprechen jedoch gegen diese Annahme Zunkers. Einmal ist mit seiner Erklärung nicht gesagt, wie sich das Grundwasser nun bei steigendem Druck verhält. Denn ein großer Teil der beim Druckfall freigewordenen Gase hat sich zweifellos mit der Grund- oder Außenluft vereinigt. Ein gleich großer Teil kann bei einem nun einsetzenden



Druckanstieg nicht so schnell wieder dem Grundwasser zugeführt werden. Selbst nach Zunker geht die Zufuhr von neuen Gasen durch das Kapillarwasser nur sehr langsam vor sich. Ein Druckanstieg müßte sich also auf die Brunnenspiegelkurve weitaus geringer bemerkbar machen als ein Druckfall. Tatsächlich wird aber eine solche Asymmetrie von Kurven nicht beobachtet. Der Brunnenspiegel spricht auf steigenden Druck genau so an wie auf fallenden. Auch die gute Wiedergabe scharfer, d. h. kurzperiodischer Luftdruckzacken durch die Brunnenspiegelkurve steht in krassem Widerspruch zu den langsamen Vorgängen freiwerdender oder zur Absorption gelangender Gasvolumina. Ebenfalls läßt sich das oft auftretende Voreilen der Wassermaxima vor die Luftdruckmaxima und andere spezielle Erscheinungen unserer Streifen in keiner Weise durch die Theorie Zunkers erklären.

Die freiwerdenden oder zur Absorption gelangenden Gase könnten demnach nur einen ganz unbedeutenden Einfluß auf den Grundwasserstand besitzen. Auch v. Eimern [6] meint, daß man höchstens 10% der festgestellten Schwankungsbeträge durch Zunkers Theorie erklären könne. Auf Grund unserer Registrierungen müssen wir zumindest bei unserem Brunnen diesen Prozentsatz noch als zu hoch ansehen. Ansonsten erscheinen, qualitativ gesehen, v. Eimerns Ausführungen recht treffend und seien deshalb im folgenden eingehender betrachtet (Abb. 2a, b, c).

Es sei zu irgendeiner Zeit der Luftdruck im Boden gleich dem äußeren Luftdruck. Der Wasserspiegel im Brunnen und das gleich hohe Grundwasserniveau im Boden stehen dann unter demselben statischen Druck p (vgl. Abb. 2a). Nun steige der äußere Luftdruck schnell um einen Betrag Δp (Abb. 2b). Im Erdboden liegt dann das Niveau, das unter

dem Druck $p + \Delta p$ steht, tiefer als der Wasserspiegel im Brunnen. Am Brunnenspiegel herrscht also der Außendruck, während in gleicher Höhe in der Umgebung des Brunnens auf das Wasser im Boden nur der Druck $p + \Delta p$ wirkt (Abb. 2b). Zwischen dem Wasser im Boden und dem im Brunnen besteht also ein Druckgefälle, so daß bis zum Druckausgleich Wasser vom Brunnen in den Boden übertreten muß (Abb. 2c).

Bei fallendem äußeren Luftdruck ist der Vorgang genau umgekehrt. Das so entstehende Druckgefälle setzt in diesem Falle bis zum Druckausgleich Wasser vom Boden zum Brunnenspiegel hin in Bewegung, was eine Hebung des Brunnenspiegels zur Folge hat. Da die hierbei bewegten Wassermassen im Verhältnis zum Bodenwasservorrat wohl zu vernachlässigen sind, ändert sich an der Wasserfüllung des Bodens nichts. Nur ein hydrostatisches Druckniveau, durch den Brunnenspiegel (= Grundwasserspiegel) repräsentiert, hat sich verändert.

Als eigentliche Ursache der Grundwasserschwankungen erkennt also *v. Eimern* gewisse *Druckdifferenzen*, die zwischen Außendruck und Bodendruck auftreten. Ihre Größe entnimmt *v. Eimern* einer Arbeit von *Lucke* und *Rose* [7], einer Veröffentlichung, die meines Erachtens nicht in allen Punkten richtig ist. Ehe jedoch hierauf näher eingegangen wird, sei zunächst untersucht, inwieweit mit der Theorie der Druckdifferenzen anschaulich die Besonderheiten unserer Registrierstreifen erklärt werden können.

4. Qualitative Erklärung der Besonderheiten unserer Registrierstreifen

Unter Ausschaltung der Tage mit verstärkter Sickerwasserzufuhr — etwa an Hand von monatlichen Aufzeichnungen (am Schluß) — kann die reine Luftdruckabhängigkeit des Brunnenspiegels näher untersucht werden. Der Brunnen-

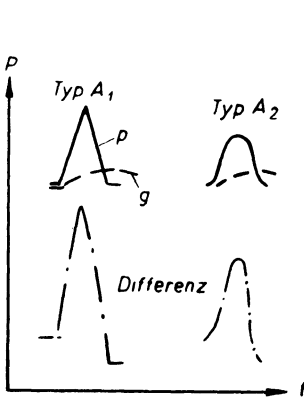


Abb. 3a.

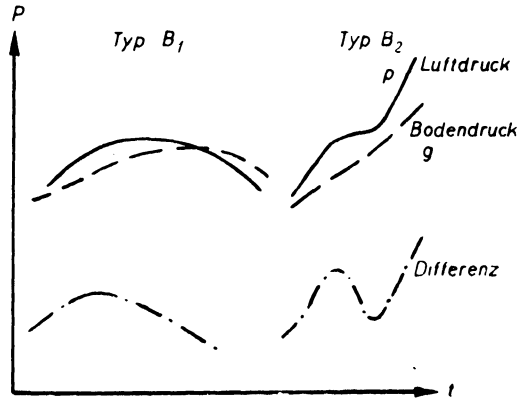


Abb. 3b.

spiegel reagiert nicht immer gleich stark auf den Luftdruck; neben den bereits erwähnten Besonderheiten im Kurvenverlauf der Brunnenspiegelkurve gibt es noch weitere Verzerrungen. Alle diese Besonderheiten lassen sich gut in ein Schema von acht verschiedenen Verzerrungstypen einordnen. Diese Typen, die im folgenden näher betrachtet werden, erfassen nicht nur alle vorkommenden Kurvenverzerrungen, sondern gestatten auch eine einheitliche und plausible Erklärung durch unsere — vorläufig rein qualitative — Theorie

der Druckdifferenzen. Die die einzelnen Typen erläuternden Abbildungen zeigen, daß die Annahme einer zwischen Boden- und Außendruck entstehenden Druckdifferenz zwangsläufig die tatsächlich beobachteten Kurvenverzerrungen hervorrufen muß. Unter der vorläufigen Voraussetzung, daß sich das Grundwasser unmittelbar auf die entstehende Druckdifferenz einstellt, können wir die abgebildete *Druckdifferenzkurve* direkt als *Brunnenspiegelkurve* (= *Grundwasserkurve*) ansehen.

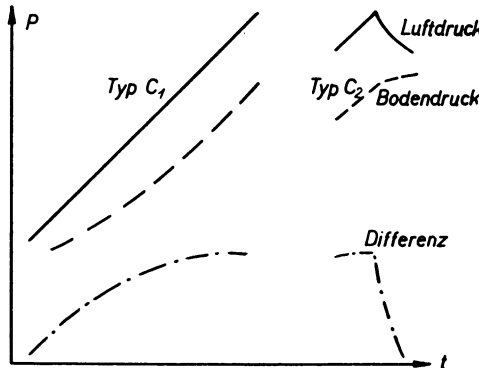


Abb. 3c.

In der Abb. 3a, 3b und 3c bedeuten:

————— angenommener *Luftdruckverlauf*.
 - - - - - angenommener *Bodendruckverlauf* (Druck auf das geschlossene Wasser im Boden, hinkt nach).

Darunter:
 - · - · - · sich daraus ergebende *Druckdifferenz* (für die Hebung und Senkung des Brunnenpiegels verantwortlich).

Typ A_1 = Stärkste Ausschläge der Brunnenpiegelkurve bei Luftdruckzacken.
 Typ A_2 = Um so größere Wiedergabe von Schwingungen, je kleiner ihre Periode.

Bei diesen A-Typen bildet sich eine relativ große Druckdifferenz zwischen Brunnen und Boden infolge der schnellen Außendruckänderung aus. Im Vergleich zu langsameren Druckgängen muß also die Brunnenpiegelkurve auf solche Kurvenverläufe stärker ansprechen. Dies können wir auf allen Registrierungen beobachten (vgl. Abb. 3a). Diese A-Typen überlagern sich stets dem übrigen Kurvenverlauf, und es gilt allgemein: Je kürzer die Luftdruckschwankung, desto stärker der Ausschlag am Brunnenpiegel.

Typ B_1 = Voreilen der Maxima (und Min.) der Brunnenpiegelkurve, je größer die Periode der Luftdruckschwankung.

Typ B_2 = „Sattelformungen“ bei ungleich verlaufendem Druckanstieg (Druckfall).

Die B-Typen, deren Entstehung man leicht an Hand der Abb. 3b beobachten kann, sind meist bei Perioden bzw. Druckänderungen von 6 Stunden an aufwärts festzustellen.

Typ C_1 = „Ermüdungserscheinungen“ bei lang anhaltendem Druckanstieg (Fall). (Wenn Neigung der Luftdruckkurve nicht zu steil.)

Typ C_2 = Sehr starke Veränderungen am Brunnenpiegel, wenn nach lang anhaltendem Luftdruckanstieg (Fall) plötzlich Fall (Anstieg) einsetzt.

Diese C-Typen werden immer bei bzw. nach lang anhaltender Druckänderung (von 12 Stunden an aufwärts) wahrgenommen. Bei bzw. nach schwächerer Druckänderung treten sie auch schon bei kürzeren Zeiten auf.

Auch die C-Typen, deren Entstehung man an Hand von Abb. 3c verfolgen kann, verdanken ihre Existenz dem Nachhinken des Bodendrucks und der sich daraus ergebenden Druckdifferenz. Auch auf den Beispielen am Schluß der Arbeit sind markante Fälle durch Angabe des jeweiligen Typs vermerkt.

Nicht durch Luftdruckdifferenzen, sondern durch Veränderung der gesamten Bodenwassermenge entstehen die D-Typen:

Typ D_1 = Sich überlagernder verstärkter Sickerwassereinfluß.

Typ D_2 = Sich überlagernder verstärkter Verdunstungseinfluß.

Derartige Einflüsse können sich über mehrere Wochen erstrecken, so daß sich die D-Typen dem übrigen Kurvenverlauf großzügig überlagern (s. monatliche Darstellungen am Schluß).

Die Tatsache, daß man — abgesehen von den D-Typen — alle Besonderheiten unserer Registrierstreifen durch die Druckdifferenzen erklären kann, spricht wohl eindeutig für die Richtigkeit der Theorie.

Schwieriger als die qualitative Deutung der Erscheinungen ist ihre quantitative Berechnung. Das Problem der Bewegung von Luft längs der gewundenen Wege im Boden ist zu kompliziert, um es auf rein theoretischer Grundlage zu lösen. Schon bei Behandlung von Flüssigkeitsströmen durch poröse Medien nimmt man das empirisch gefundene *Darcysche* Gesetz (Fließgeschwindigkeit proportional dem Druckgradienten) als Grundlage der Hydrodynamik und nicht etwa die *Stokes-Navierschen* Gleichungen. Auch für den Durchgang von Luft oder Gasen durch poröse Medien fanden *M. Muskat* und *H. G. Botset* [8], analog zum *Darcyschen* Gesetz bei Flüssigkeiten, experimentell ein empirisches, gut bestätigtes Gesetz. Die Ergebnisse ihrer exakt durchgeführten Messungen sowie eine hieran anknüpfende Arbeit von *Lucke* und *Rose* seien im folgenden kurz erwähnt.

5. Zu den Arbeiten von Muskat und Botset [8] und Lucke und Rose [7]

Bei ihren Versuchen verwenden *Muskat* und *Botset* das in Abb. 4 dargestellte Gerät. Der Zylinder *Z* ist mit dem zu untersuchenden Material gefüllt: Kleine Glaskugeln, gesiebter und heterogener Sand, Sandstein u. dgl. Die Quecksilberbarometer auf der linken Seite erlauben es, sowohl die Druckdifferenzen p_1 bis p_2 als auch die Einzeldrucke zu bestimmen. Zwei Thermometer *T* am Anfang und Ende des Zylinders zeigen, daß der Prozeß völlig isotherm vor sich geht. Auf Grund von zahlreichen Experimenten wird festgestellt, daß die Gasströmung durch poröse Medien folgendem Gesetz gehorcht:

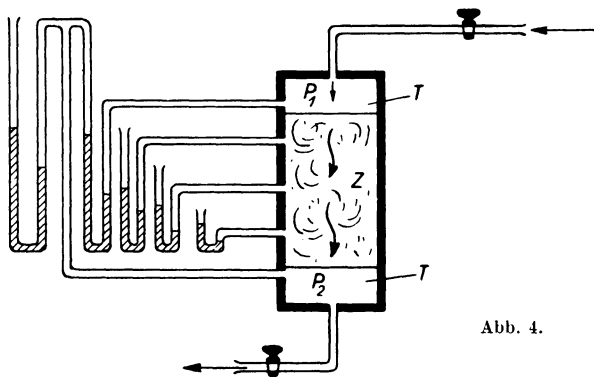


Abb. 4.

$$\frac{\Delta \bar{p}^2}{\Delta x} \cdot k = (\rho \cdot v)^n \quad (1)$$

Darin bedeuten:

n = Exponent, der zwischen den Werten 1 und 2 liegt und eine Funktion der Korngröße und der Porosität ist. n nimmt mit wachsender Porosität und Korngröße

zu, rückt aber, je feiner das Material ist, dicht an den Wert 1 heran. Diesen Wert werden wir auch für die folgenden Berechnungen nehmen, da gewöhnlicher Boden im allgemeinen eine sehr feine Porosität hat (vgl. auch die folgende Tabelle).

$\Delta \bar{p}^2$ = Die Differenz der Quadrate der Drucke zu beiden Seiten einer homogenen Materialschicht.

ρ = Die Dichte des Gases.

v = Die effektive Geschwindigkeit.

Δx = Die Dicke der Schicht, zu deren beiden Seiten die Druckdifferenz Δp besteht.

k = Proportionalitätsfaktor, hauptsächlich vom zu untersuchenden Material abhängig, kann als Durchlässigkeitskoeffizient angesehen werden. K hat für $n = 1$ die Dimension: $\text{sec}^3 \cdot \text{cm}/\text{gr}$ bzw.: Zeit/Druck.

Eine von *Muskat* und *Botset* durchgeführte theoretische Ableitung des oben erwähnten Gesetzes mit Hilfe einer Dimensions-Analyse kann im Rahmen dieser Arbeit nicht wiedergegeben werden, doch seien noch einige interessante Meßergebnisse und eine graphische Darstellung vom Durchfluß der Luft durch verschiedene Materialien angeführt (Abb. 5).

	Durchläss. K	Porosität f in Volumenprozent	n
1. Gesiebter Sand	1.04	44 %	1.1
2. Heterogener Sand	0.811	42 %	1.04
3. Sandstein \perp zur Schicht.....	0.009	19.7%	1.03

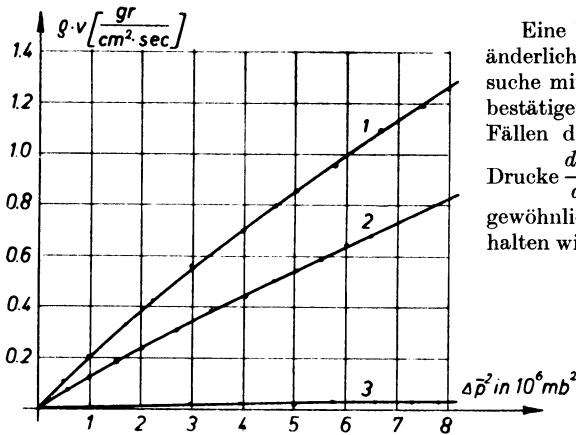


Abb. 5.

Eine Vielzahl weiterer Versuche (veränderliche Länge des Zylinders Z , Versuche mit radialer Ausströmung u. a. m.) bestätigen *Muskat* und *Botset*, daß in allen Fällen der Gradient der Quadrate der Drucke $\frac{d\bar{p}^2}{dx}$ proportional $(\rho \cdot v)^n$ ist. Für gewöhnliche Böden (n sehr nahe = 1) erhalten wir damit das Gesetz in der Form:

$$\left\| \left\| K \cdot \frac{d\bar{p}^2}{dx} = \rho \cdot v \right\| \right\| \quad (2)$$

Will man dies auf Änderungen des Luftdrucks im Erdboden anwenden, muß man den Massefluß ($\rho \cdot v$), eine sich Messungen entziehende Größe, irgendwie

umformen. *Lucke* und *Rose* verwenden hierzu die Kontinuitätsgleichung und die allgemeine Gasgleichung. Eine mathematische Umformung ergibt dann unter der Voraussetzung, daß die Temperatur T und die Porosität f konstant bleiben und bei Vernachlässigung kleiner Größen die folgende Formel, die der Wärmeleitungs- oder Diffusionsgleichung analog ist:

$$\left\| \left\| \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2 K R T_0 p_0}{f} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right\| \right\| \quad (3)$$

f = Porosität (Mittelwert)

R = Gaskonstante

T_0 = Temperatur (Mittelwert)

K = Durchlässigkeitskoeffizient

p_0 mittl. Luftdruck am Ort

p = Luftdruck

Deren Lösung ist in vielen Fällen möglich. Physikalisch darf man die Gleichung vielleicht dahingehend verstehen, daß man es beim Durchgang von Luft durch den Boden tatsächlich mit einem langsamen, dem Diffusionsvorgang sehr ähnlichen Vorgang zu tun hat.

Nun geben die Verfasser an der Erdoberfläche zur Zeit $t = 0$ eine beliebige Funktion für den Druck vor und berechnen, wie groß in einer gewissen Tiefe Phasenverschiebung und Amplitudenerniedrigung der Druckwelle geworden ist, wobei sie jedoch von der Voraussetzung ausgehen, daß der lufthaltige Teil des Bodens nach unten hin unbegrenzt, also nicht durch das Grundwasser abgeschlossen ist. Die Berechnung der Formel verläuft dann ganz analog der bekannten Bestimmung des *Temperaturganges* im Erdboden. *Lucke* und *Rose* erhalten so z. B. bei Sandböden in 1 m Tiefe schon Abnahmen der Druckamplitude von 30 bis 40%, Werte, die auch *v. Eimern* bei seinen Betrachtungen benutzt, die aber schon gefühlsmäßig recht hoch erscheinen. In Wirklichkeit kann bei einem Anstieg des äußeren Luftdrucks die Luft, die in den Boden strömt, sich nach unten hin *nicht* beliebig weit bewegen, sondern sie kann überhaupt nur bis zur Grenzfläche der wassergesättigten Schicht im Boden gelangen. Diese Grenzfläche, die sich nur durch Sickerwasser- und Verdunstungseinfluß verändert, wird als feste Wand angesehen. Analog zu ähnlichen Problemen der Wärmeleitung, die weiter unten erwähnt werden, herrscht

an dieser Grenzfläche $[\xi]$ die Randbedingung $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$.

Ein zweiter wichtiger Punkt, dem wohl nicht nur *Lucke* und *Rose*, sondern auch *v. Eimern* zu wenig Beachtung schenken, ist die Erfassung der Porosität des Bodens. Man muß hier die Tatsache beachten, daß auch in der lufthaltigen Zone ein großer Teil der Poren mit Wasser gefüllt ist. Man kann also nicht bei Betrachtung der Luftdurchlässigkeit des Bodens Porositätswerte für trockene Böden anwenden. Die dem Erdboden tatsächlich für den Luftdurchgang zur Verfügung stehenden Porenhohlräume sind stets kleiner und nehmen meist mit wachsender Tiefe ab. Zu ihrer Kennzeichnung sei der Begriff „effektive Porosität“ eingeführt. Diese effektive Porosität ist stets kleiner als die im allgemeinen einen (trockenen) Boden charakterisierende Porosität schlechthin und nimmt meist nach unten hin ab.

Soll nun die Differentialgleichung $\frac{\partial p}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ unter den neuen Bedingungen des von x abhängigen λ und $\left[\frac{\partial p}{\partial x}\right]_{\xi} = 0$ gelöst werden, so führt dies auf mathematische Schwierigkeiten, vor allem wenn man es in ähnlich allgemeiner Form wie *Lucke* und *Rose* versucht. Das Analogon in der Theorie der Wärmeleitung wäre ein Stab oder eine Schicht von endlicher Länge, an deren einer Seite eine Temperaturfunktion $f(T)$ vorgegeben ist, deren anderes Ende adiabatisch abgeschützt ist, $\left(\left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]_{\xi} = 0\right)$, und bei der schließlich das Wärmeleitvermögen eine mehr oder weniger unbekannte Funktion der Dicke x ist. Eine solche

Funktion ist allgemein nicht lösbar. Es werden deshalb zwei vereinfachende Momente eingeführt: Einmal sei die am Erdboden vorgegebene Druckfunktion periodisch. Dann wird auch die zu berechnende Druckfunktion im Boden periodisch sein, wobei wir von vornherein Phasenverschiebung und Amplitudenerniedrigung vermuten. Zweitens wird mit einer mittleren effektiven Porosität gerechnet, die als konstant angesehen wird. Ihre Größe und Abhängigkeit von hydrologischen Faktoren wird weiter unten erörtert.

6. Berechnung des Bodendrucks und Auswertung der Formeln

Die unter diesen Voraussetzungen durchgeführte Rechnung liefert als allgemeine Lösung die Endformel:

$$P(x, \xi; t) = C_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |C_n| \left(\frac{e^{q_n(2\xi-x)} \cdot \cos\left(2\pi n \frac{t}{T} + \gamma_n - q_n x\right) + e^{-q_n x} \cdot \cos\left(2\pi n \frac{t}{T} + \gamma_n + 2q_n \xi - q_n x\right)}{2[\cosh(2q_n \xi) + \cos(2q_n \xi)]} + \frac{e^{q_n x} \cdot \cos\left(2\pi n \frac{t}{T} + \gamma_n + q_n x - 2q_n \xi\right) + e^{-q_n(2\xi-x)} \cdot \cos\left(2\pi n \frac{t}{T} + \gamma_n + q_n x\right)}{2[\cosh(2q_n \xi) + \cos(2q_n \xi)]} \right)$$

Darin bedeuten (wie auch in den noch folgenden Formeln):

x = Tiefe im Boden,

ξ = Tiefe der Grenzfläche zwischen wassergesättigter und lufthaltiger Zone,

$q_n = \sqrt{\frac{|n| \cdot \pi}{\lambda \cdot T}}$; $\lambda = \frac{2KR T_0 p_0}{\xi}$; $|C_n|$ = Amplitude und γ_n = Phase der n -ten Partialwelle.

Für unser Grundwasserproblem interessiert aber hauptsächlich der Druck an der Stelle $x = \xi$. Während, wie erwähnt, im Brunnen der Außendruck herrscht, wirkt auf das übrige Wasser im Boden der zu berechnende Druck der Grundluft. Denken wir uns weiter als die dem mittleren Luftdruck überlagerte Störfunktion nicht nur eine periodische Funktion, sondern eine reine cos-Funktion, so erhält man als gesuchte Druckfunktion in der Tiefe $x = \xi$ die relativ einfache Formel:

$$P(\xi, t) = \frac{e^{q\xi} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T} - q\xi\right) + e^{-q\xi} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + q\xi\right)}{\cosh \cdot (2q\xi) + \cos(2q\xi)} \left(q \text{ hier} = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda \cdot T}} \right) \quad (5)$$

Aus den Klammern im Zähler entnimmt man, daß die ursprüngliche Phase $2\pi \frac{t}{T}$ der aufgeprägten cos-Schwingung verschoben ist. Da wegen $e^{q\xi} \geq e^{-q\xi}$ der erste Summand im Zähler stets größer ist als der zweite, überwiegt die negative Phasenverschiebung $-q\xi$, wie schon vor der Rechnung vermutet. Außerdem tritt eine Amplitudenerniedrigung auf, wie am besten aus dem Nenner ersichtlich ist, der für kleine $q\xi$ nur wenig größer als 2 ist, für größere schnell anwächst. Mit dieser Formel läßt sich nun für cos-ähnliche Luftdruckschwingungen berechnen, wie sich der Druck der Grundluft an der Grenzfläche der wassergesättigten Zone verhält. Man kann ferner die Druck-

differenz zwischen Grund- und Außenluft zu irgendeinem Zeitpunkt berechnen und mit dem Fall bzw. Anstieg des Brunnenspiegels vergleichen.

Zur zahlenmäßigen Berechnung der Formel (5) muß man sich zunächst über die darin enthaltenen Konstanten, insbesondere über Porosität und Durchlässigkeit, ein klares Bild machen (es war $q = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda \cdot T}}$ und $\lambda = \frac{2 K R T_0 p_0}{f}$).

Nun sind bodenkundliche Zahlenwerte keine Materialkonstanten im üblichen Sinne, da kein Boden dem anderen völlig gleicht. So sind auch die effektive Porosität und erst recht die mittlere effektive Porosität und Luftdurchlässigkeit eines bestimmten Bodens exakt nicht anzugeben, da sie von der Bodenfeuchtigkeit und der Grundwasserführung abhängen; daß diese Größen nicht nur örtlichen, sondern auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, wurde bereits erwähnt. Für die mittlere effektive Porosität bleiben zwischen den beiden Extremwerten 0% (völlig luftundurchlässiger Boden) und 40% (bis zum Grundwasserspiegel hin völlig ausgetrockneter Boden), zunächst alle Möglichkeiten offen.

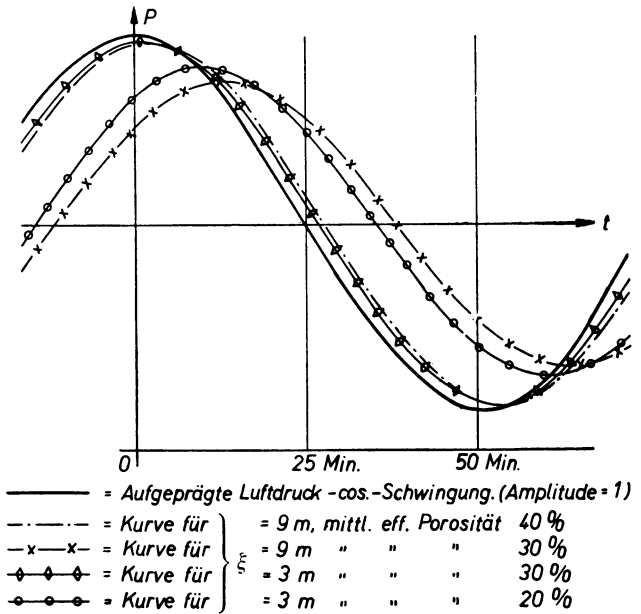


Abb. 6.

Literaturangaben von H. Reich [9] und im Landolt-Börnstein [14] lassen auf Mittelwerte der mittleren effektiven Porosität von 15 bis 30% bei Sand- und Kiesböden im gemäßigt feuchten Klima schließen.

Die Abhängigkeit des Durchlässigkeitskoeffizienten K von der mittleren effektiven Porosität und die Berechnung von λ an Hand der zur Verfügung stehenden Werte für K , T_0 ($= 15^0$) und p_0 ($= 1015 \text{ mb}$) wurde graphisch ausgeführt und kann hier übergangen werden. Bevor Vergleiche zwischen Theorie und Meßergebnissen gezogen werden, seien der Anschaulichkeit halber einige Beispiele für die Veränderung des Drucks im Boden gebracht. Auf Grund unserer Endformel (5) wurde für eine Außendruck-cos-Schwingung der Periode $T = 100$ Minuten und für verschiedene mittlere effektive Porositäten und Grundwassertiefen berechnet und in Abb. 6 dargestellt, wie sich die Schwingung am Grundwasserspiegel eingestellt hat. Die verschiedene Phasen-

verschiebung und Amplitudenerniedrigung ist gut zu erkennen. Da jedoch die Druckdifferenz zwischen Außen- und Bodendruckverlauf als eigentliche Ursache der Brunnenpiegelschwankung angesehen wurde, wurde diese

Differenz noch besonders berechnet und aufgetragen (Abb. 7). Wenn man von der Reibung des Wassers im Boden zunächst absieht und die in Abb. 7 dargestellten Druckdifferenzen *direkt* als Brunnenpiegelschwankung ansieht, lohnt sich schon eine vergleichende Betrachtung mit den Ergebnissen der Registrierungen. Deutlich

läßt sich auf Abb. 7 das verblüffende, in 4. erwähnte Vorzeichen der Wassermaxima vor die Luftdruckmaxima erkennen. Dieser Effekt folgte *hier* rein mathematisch

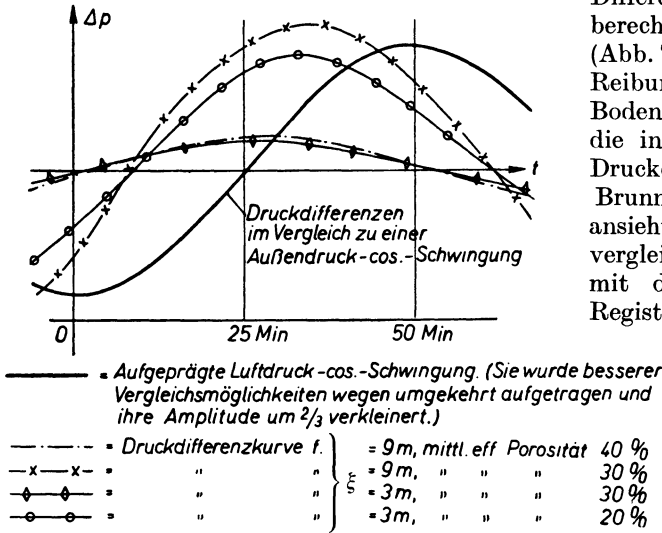


Abb. 7.

durch Berechnung der Formel (5). Auch die in 4. erwähnten anderen Besonderheiten unserer Streifen lassen sich mühelos mathematisch folgern (so z. B. die A-Typen einfach aus dem Größerwerden von q mit kleiner werdender Periode T).

Zweckmäßigerweise beschränkt man sich bei allen eingehenderen Vergleichen zwischen Theorie und Registrierungen auf cos-Schwingungen und auf die Größenberechnungen der Amplitude der Druckdifferenz (\sim Brunnenpiegelschwankung), die, wie gezeigt, mit wachsendem T abnimmt. Ordnet man der Amplitude des Außendruckes stets den Wert 1 bzw. 100% zu, so erhält man nach längerer Rechnung die Abhängigkeit der Druckdifferenzamplitude von der Periode T . Dieser wichtige Zusammenhang wurde in Abb. 8 für verschiedene mittlere effektive Porositäten durch die ausgezogenen Linien dargestellt. Um nun einen Vergleich zwischen diesen errechneten Kurven und unseren Registrierstreifen zu ermöglichen, um also festzustellen, ob die rechnerisch ermittelten Druckdifferenzen den tatsächlichen Brunnenwasserständen entsprechen, wurde folgendermaßen verfahren: Aus dem mehr als einjährigen Registriermaterial wurden alle eingeschwungenen cos-ähnlichen Luftdruckschwingungen betrachtet und mit den zugehörigen Brunnenkurven verglichen. Das Amplitudenverhältnis Luftdruck zu Grundwasser wurde bei den verschiedensten Perioden ermittelt und in Abb. 8 mit eingetragen (gestrichelte Kurve). Diese „Brunnenkurve“ zeigt zwar bei größeren Perioden eine gewisse Ähnlichkeit mit den errechneten Druckdifferenzen, zeigt aber

bei kleineren Perioden einen völlig anderen Verlauf, was von Reibungseinflüssen des Wassers im Boden herrühren dürfte (s. nächster Abschnitt!). Zu unserer Brunnenkurve (Abb. 8) ergibt sich für die größeren Perioden durch Kombination der Abb. 8 und 9 eine mittlere effektive Porosität von

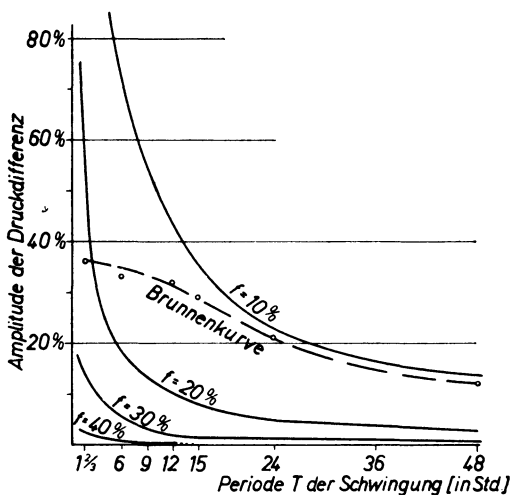


Abb. 8.

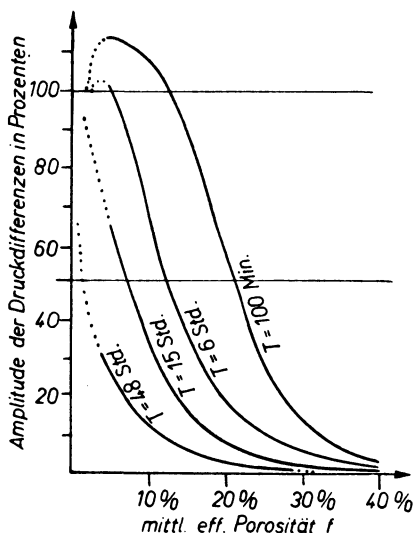


Abb. 9.

11%. Die Amplituden der Brunnenkurve (Abb. 8) betragen nur 14 bis maximal 36% der Amplituden der Außendruck-cos-Schwingung. Auch die kürzesten — nicht etwa cos-förmigen —, bei Gewittern festgestellten Luftdruckzacken werden von der Brunnenkurve maximal nur zu 45% wiedergegeben.

Zur Erklärung der Diskrepanz zwischen Messung und Rechnung bei den kleinen Perioden (Abb. 8) erscheint am wahrscheinlichsten die Annahme, daß zum größten Teil die Reibung des Wassers im Boden für das Auseinanderlaufen der Kurven verantwortlich ist, daß also das Grundwasser einem schnellen Wechsel der Druckdifferenz nicht sofort folgen kann. Um diesen Reibungseffekt abschätzen zu können, wurden im Brunnen einige Schöpfversuche unternommen, bei denen in kürzester Zeit bis zu 130 Liter abgeschöpft wurden und später wieder hineingegossen wurden. Dabei zeigt sich, daß das Nachströmen wie das Abfließen des Wassers in einer e -Funktion vor sich geht (Abb. 10). Die Halbwertszeit liegt bei 50 Minuten. Natürlich würde das Wasser ähnlich lange brauchen, um sich auf eine plötzlich auftretende Druckdifferenz einzustellen. Während bei den großen Perioden eine Halbwertszeit von 50 Min. nicht ins Gewicht fällt, kann sie bei den kleineren Perioden den scheinbaren Widerspruch zwischen Messung und Rechnung wohl zum großen Teil erklären. Außerdem spielt aber bei den kleineren Perioden wohl noch folgender Effekt eine Rolle, der eine weitere Verzögerung des Wasserzu- oder -abflusses bewirken dürfte: Der Außendruck wirkt sich nicht *nur* auf den

Brunnenspiegel aus, sondern auch auf dessen nähere Umgebung. Das Bodenwasser in den dem Brunnenrohr direkt benachbarten Gesteinspartien wird die Schwankungen des Brunnenspiegels mitmachen. Es müssen also größere Wassermengen transportiert werden, als wenn nur das Brunnenrohr allein gefüllt oder entleert zu werden brauchte. Während aber bei den größeren Perioden Zeit genug vorhanden ist, diesen zusätzlichen Wassertransport im Boden zu bewältigen, werden die kleineren Perioden stärker benachteiligt, als

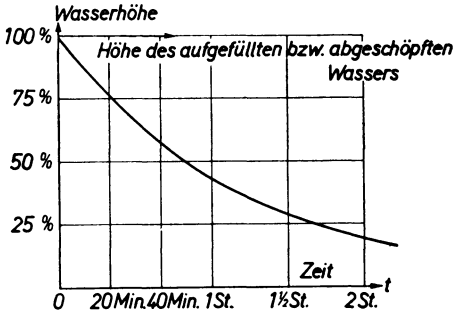


Abb. 10.

man auf Grund der Abschöpfkurve schließen könnte (bei einem Anstieg um 5 cm, was bei einer 24stündigen Periode einem Druckunterschied von 25 mb entsprechen würde, fließen in den Brunnen über 600 Liter Wasser!).

Etwaige unterirdisch eingeschlossene Luftpolster könnten eine gleichmäßige Vergrößerung der Brunnenspiegelschwankungen für alle Perioden verursachen. Für das Auseinanderlaufen der Kurven (Abb. 8) bei den kleinen Perioden können sie auf keinen Fall herangezogen werden.

Vielleicht tragen sie etwas zum relativ hohen Kurvenverlauf der Brunnenspiegelschwankungen (Abb. 8) bei, was den errechneten Wert der mittleren effektiven Porosität etwas verkleinern würde. Wegen der großen Ähnlichkeit der gemessenen Brunnenspiegelschwankungen mit der darüberliegenden berechneten Druckdifferenzkurve müssen wir jedoch den Prozentsatz, den etwaige eingeschlossene Luftpolster zu dem Effekt beitragen, für sehr gering halten.

Man darf also wohl mit Sicherheit annehmen, daß der gesamte Reibungskomplex für das Auseinanderlaufen der Kurven in Abb. 8 verantwortlich ist. Demgegenüber ist wohl von geringerer Bedeutung die Adhäsion bzw. das Beharrungsvermögen des Kapillarwassers, das sich ja in der Nähe des Brunnens — wenn auch vielleicht geringfügig — mit verändern muß. Auch horizontale Unterschiede in der effektiven Porosität des Bodens können im Sinne des Auseinanderlaufens der Kurven wirken. Alle diese Faktoren im einzelnen abzuschätzen oder gar zu berechnen erscheint nicht möglich.

Auf den Reibungseffekt bzw. die begrenzte Fließgeschwindigkeit des unterirdischen Wassers ist vermutlich auch die Tatsache zurückzuführen, daß kein Brunnen von den in der Literatur erwähnten mehr als 33% der Luftdruckschwankungen wiedergibt. Dieser Wert entspricht auch unserem Meßbrunnen bei kleineren Perioden (Abb. 8). Bei einem anderen in Inheiden befindlichen Brunnen in einem artesischen Quellgebiet stellten wir maximal bis zu 50% der Luftdruckschwankungen fest; doch dürfte es sich hier um einen Ausnahmefall handeln, da das Wasser aus 100 bis 200 m Tiefe aus einem noch dazu sehr ergiebigen Grundwassergebiet kommt. Interessant ist ferner, daß ein in Frankfurt a. M.-Ginnheim in einem Brunnen stationiertes Gerät überhaupt nur auf kurze Perioden bzw. kurzzeitige Druckschwankungen an-

sprach. Da bei diesen beiden anderen Brunnen künstliche Eingriffe in den Grundwasserkörper stattfinden, können wir keine so eingehenden quantitativen Untersuchungen durchführen wie bei dem Meßbrunnen im Palmengarten. Qualitativ gesehen bestätigen jedoch auch die Ergebnisse aus den beiden anderen Brunnen eindeutig die Richtigkeit der *Theorie der Druckdifferenzen*.

Es besteht eine Ähnlichkeit zwischen unseren Brunnenspiegelregistrierungen und den Aufzeichnungen von Variometern, die bekanntlich auch Druckdifferenzen anzeigen. Während aber bei gewöhnlichen Variometern die Halbwertszeit (Zeit, in der der Innendruck gleich der Hälfte des Außendrucks ist) um 100 sec liegt, beträgt sie bei unserem Grundwasserproblem über 5 Stunden, wie sich aus theoretischen Überlegungen ergibt, auf die hier verzichtet sei. Auch Variometer zeigen — in noch stärkerem Maße als unser Brunnenspiegel — Verzerrungen der Art unserer A- und B-Typen, und mit Ausnahme der Reibungserscheinungen können wir die Anzeige des Brunnenspiegels als ein *Variometer mit großer Halbwertszeit* ansehen.

7. Allgemeine Betrachtungen

Weyde [1] stellte rein statistisch eine verstärkte Reaktion des Grundwasserspiegels bei starkem Wind fest. Zu den gleichen Ergebnissen kommen auch wir. Starker Wind ist meist mit dem schnellen Durchzug von Druckänderungsgebieten oder gar mit einer Front verkoppelt. Dies prägt sich im Durchgang durch schnelle Druckänderung, kleine Schwingungsperioden oder steile Zacken aus. Diese Erscheinungen wiederum verursachen, wie erwähnt, große Druckdifferenzen und demzufolge starke Schwankungen des Brunnenspiegels. Während wir heute derartige scharfe, kleine Druckänderungen mit Feindruckschreibern registrieren, hatte man um 1900 diese Geräte noch nicht zur Verfügung. Sie wurden aber auch späterhin nie zu einem Vergleich mit den Grundwasserschwankungen herangezogen. Da man wohl mit Sicherheit annehmen darf, daß auch die von *Weyde* untersuchten Brunnen auf kleine Perioden und scharfe Druckänderungen verstärkt ansprachen, wurden wohl damals — wie heute — so unterschiedliche Ergebnisse gefunden. Auch *Weyde* stellt ja — genau wie wir — bei Gewittern die stärksten Ausschläge fest. Bei Versuchen mit Brunnen in Moorböden findet er gar keinen Effekt. Dies dürfte jedoch ebenfalls leicht erklärlich sein, denn im Moor steht das Grundwasser so dicht an der Erdoberfläche, daß sich keine Druckdifferenz von Bedeutung ausbilden kann.

In anderen Brunnen, bei denen kein Effekt festzustellen ist, wird entweder das Grundwasser ebenfalls dicht unterhalb der Erdoberfläche anzutreffen sein oder Durchlässigkeit und mittlere effektive Porosität sind sehr groß. Diese beiden wichtigen Faktoren können in besonderen Fällen durch Tiergänge, Höhlen und Spalten (z. B. in klüftigem Gestein) so anwachsen, daß sich ebenfalls keine nennenswerte Druckdifferenz ausbilden kann. Ferner kann eine evtl. Verschlammung des Brunnens eine Rolle spielen. Auch kann die Ergiebigkeit des durch den Brunnen erschlossenen Grundwassergebietes so gering, seine Fließgeschwindigkeit so klein sein, daß aus diesen Gründen kein Effekt festzustellen ist.

Die Abweichung der Messungen *v. Eimerns* [6] von den unseren dürften zum größten Teil durch die verschiedenen Bodenverhältnisse (Grundwasser bei *v. Eimern* steht im Lehm) und den höheren Grundwasserstand erklärt sein. Dazu kommt die Tatsache, daß das Gelände um unseren Meßbrunnen herum in einer Ausdehnung von 450 m² betoniert und bebaut ist. Einmal werden hierdurch die Luftdurchlässigkeit und die mittlere effektive Porosität herabgesetzt, was vielleicht das für eine Grundwassertiefe von nur 3,50 m relativ starke Auftreten des Effekts erklären kann. Zur Brunnenkurve der Abb. 8 berechneten wir ja eine mittlere effektive Porosität von 11%, ein für Sand- und Kiesböden immerhin etwas kleiner Wert. Zum anderen kommt das Sickerwasser infolge der Betonierung nicht direkt, sondern auf einem großen Umweg an den Brunnen heran, so daß in einem großen Teil des über dem Grundwasser liegenden Bodenluftkörpers die mittlere effektive Porosität zeitlich nahezu konstant bleibt. Nur so ist es meines Erachtens zu erklären, daß wir zwischen feuchter und trockener Witterung, Sommer und Winter, keinen Unterschied in der Amplitudenverhältnis Luftdruck- zu Grundwasserkurve feststellen können.

Obwohl also angenommen werden darf, daß unser Meßbrunnen in bezug auf die Geringfügigkeit des Niederschlagseinflusses und die Gleichmäßigkeit der Kurvenwiedergabe tatsächlich einen Sonderfall darstellen könnte, so ändert dies meines Erachtens nichts an der Bedeutung der Druckdifferenzen, die sich bei einer bestimmten Grundwassertiefe und bei geeigneten Böden immer ausbilden und durch Registrierungen nachweisen lassen werden.

Mit der Theorie der Druckdifferenzen läßt sich auch die unterschiedliche Ergiebigkeit von Quellen bei wechselndem Luftdruck leicht erklären. Bekanntlich steigt oft die Ergiebigkeit einer Quelle bei sinkendem oder tiefem Luftdruck. *Zunker* [5] und *Koehne* [6] sind der Ansicht, daß auch hier bei sinkendem Luftdruck öfters Gelegenheit zum Freiwerden von Gasbläschen gegeben ist, was eine größere Ergiebigkeit der Quelle zur Folge haben würde. Da aber — wie u. a. auch *E. Mueller* [10] berichtet — die Quellergiebigkeit bei fallendem wie bei steigendem Luftdruck gleich stark auf den Druckgang zu reagieren scheint, liegt es wegen der unter 3. geschilderten Gründe nahe, den Einfluß solcher Gasbläschen für unbedeutend zu halten. Den Druckdifferenzen ist auch hier eine entscheidende Bedeutung beizumessen. Die Verhältnisse liegen nämlich ganz ähnlich wie bei den Brunnen spiegeln. Durch den Quellaustritt ist ein Grundwasserkörper mit dem äußeren Luftdruck verbunden. Sonst herrscht aber im Gestein nur der Druck der Grundluft. Auch hier können sich u. U. größere Druckdifferenzen ausbilden. Analog zu höheren und tieferen Brunnen spiegelhöhen folgt hier verstärkte bzw. abgeschwächte Schüttung der Quelle. Auch eine Feinstruktur, ähnlich wie unser Brunnen Spiegel sie liefert, müßte sich durch geeignete Registriergeräte an Quellen nachweisen lassen.

Desgleichen dürften die Verhältnisse in artesischen Quellgebieten ähnlich liegen. Gerade ein artesischer Brunnen wird im allgemeinen einen Einfluß des Luftdrucks aufweisen, um so stärker, je undurchlässiger und mächtiger die oberen Bodenschichten sind. Der bereits erwähnte Brunnen in Inheiden

garantiert durch eine 100 bis 200 m dicke, wenig klüftige Basaltschicht eine starke Luftdruckabhängigkeit des Wasserausflusses.

Inwieweit man berechtigt ist, die bei unserem Meßbrunnen im Palmengarten von Frankfurt a. M. gewonnenen Ergebnisse auch auf andere Grundwasserverhältnisse zu übertragen, kann natürlich letzten Endes nur experimentell gezeigt werden. Die durchgeführten kombinierten Feinregistrierungen von Luftdruck und Grundwasser haben jedenfalls zu folgenden interessanten Ergebnissen geführt: In der Meteorologie können Brunnenkurven dem Studium der Luftdruckfeinregistrierungen dienen, da gerade die Feinheiten im Druckgang relativ am stärksten vergrößert werden. Eine größere Bedeutung wird man aber derartigen kombinierten Registrierungen von seiten der Hydrologie und Geophysik beimessen. Einerseits können alle laufenden Grundwassermessungen an gewissen Stellen durch Luftdruckeinfluß bis zu 10 cm verfälscht sein (!). Andererseits kann man aus Größe und Art registrierter Brunnenpiegelschwankungen, insbesondere durch Darstellungen ähnlicher Art wie Abb. 8, bestimmte Hinweise für Aufbau, Struktur des Bodens und Bodenatmung finden und mittlere Werte von Porosität, Luftdurchlässigkeit und Durchfeuchtung berechnen.

Zusammenfassung

Laufende Feinregistrierungen von Luftdruck und Grundwasser zeigen, daß eine weitgehende Abhängigkeit des Brunnenpiegels vom Luftdruck vorhanden ist. Als Ursache hierfür werden Druckdifferenzen angesehen, die sich durch Nachhinken des auf dem Grundwasser im Boden lastenden Luftdrucks gegenüber dem Außendruck ausbilden. Je undurchlässiger und mächtiger die oberen Bodenschichten sind, desto größer werden bei Luftdruckschwankungen Druckdifferenz und Brunnenpiegelschwankung. Diese Schwankungen geben einerseits, ähnlich wie ein präziser, kostspieliger Barograph, alle Feinheiten der Luftdruckkurve zuverlässig wieder. Sie sind andererseits als Kriterien für Bodenatmung, Durchfeuchtung und mittlere Porosität der oberen Bodenschicht anzusehen.

Literatur

- [1] *Weyde, Franz*: Die Abhängigkeit des Grundwasserspiegels vom Luftdruck. Das Wetter 1911, Bd. 28.
- [2] *Koehne, W.*: Grundwasserkunde, Stuttgart 1928.
- [3] *Koehne, W.*: Das unterirdische Wasser, Handbuch der Geophysik, Band X, Lieferung 1, S. 183ff.
- [4] *Keen, B. A.*: The limited role of capillarity ... 1. Intern. Congr. of Soil Science Vol. II, S. 504—511.
- [5] *Zunker, F.*: Das Verhalten des Bodens zum Wasser. Handbuch der Bodenlehre, 6. Band.
- [6] *van Eimern, R.*: Meteorologisch bedingte Kleinschwankungen des Grundwasserstandes. Ann. d. Meteor. 1950, S. 215ff.
- [7] *Lucke, O. und Rose, S.*: Wie pflanzen sich Luftdruckschwingungen im Erdboden fort? Meteor. Zeitschrift 55 (1938), S. 215ff.
- [8] *Muskat, M. und Botsch, H. G.*: Gas Flow through porous Materials. Vol. 1, Bd. 2, in Physics 1931, S. 27ff.
- [9] *Reich, H.*: Eigenschaften der Gesteine. Handbuch der Geophysik, Bd. VI.

- [10] Müller, E.: Quellen und Grundwasser und ihre Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren. Diss. Gießen 1936.
- [11] Sommerfeld, A.: Partielle Differentialgleichungen der Physik.
- [12] Jahnke, F. und Emden, E.: Funktionentafeln.
- [13] Hayashi, K.: Fünfstellige Tafeln der Kreis- und Hyperbelfunktionen.
- [14] Landolt, H. H. und Börnstein, Y.: Geophysikalische Tabellen
- [15] Kleinschmidt, E.: Handbuch der meteorologischen Instrumente, S. 329ff.

17. Dezember 1952

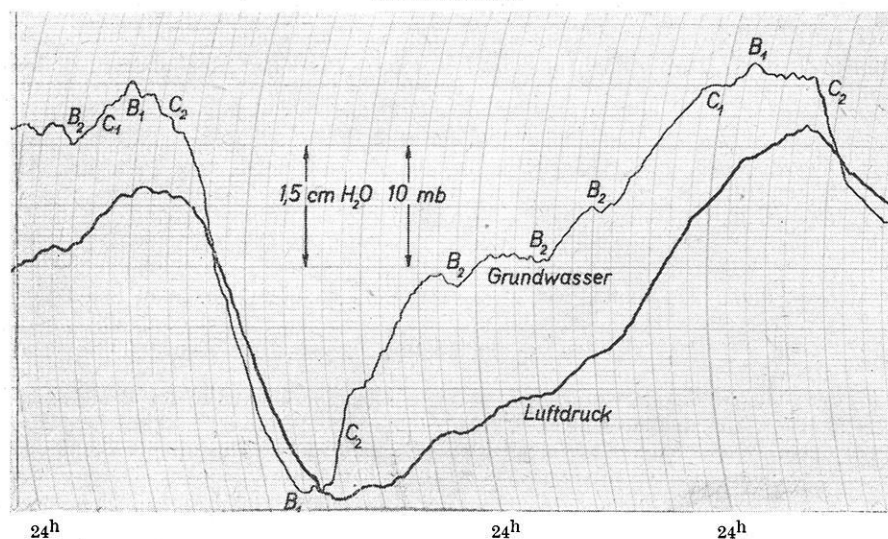


Abb. 11a.

21. August 1952

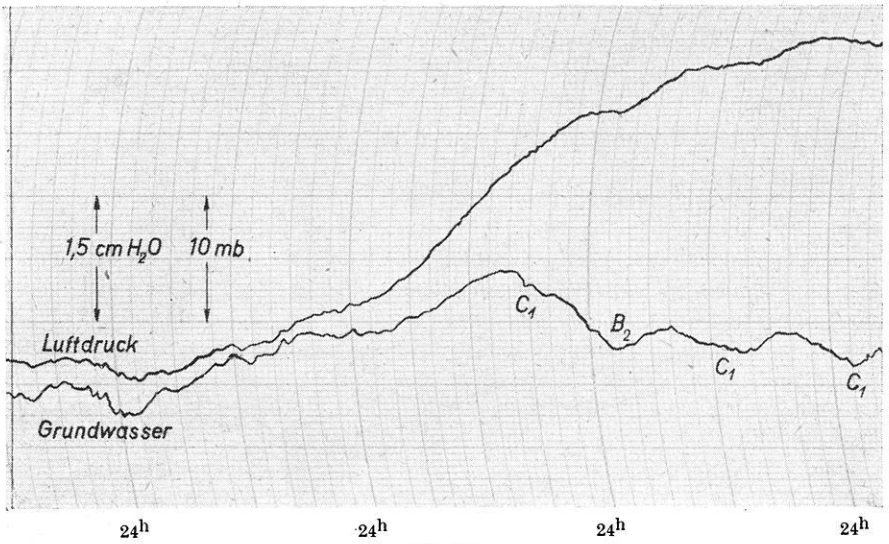


Abb. 11b.

13. August 1952

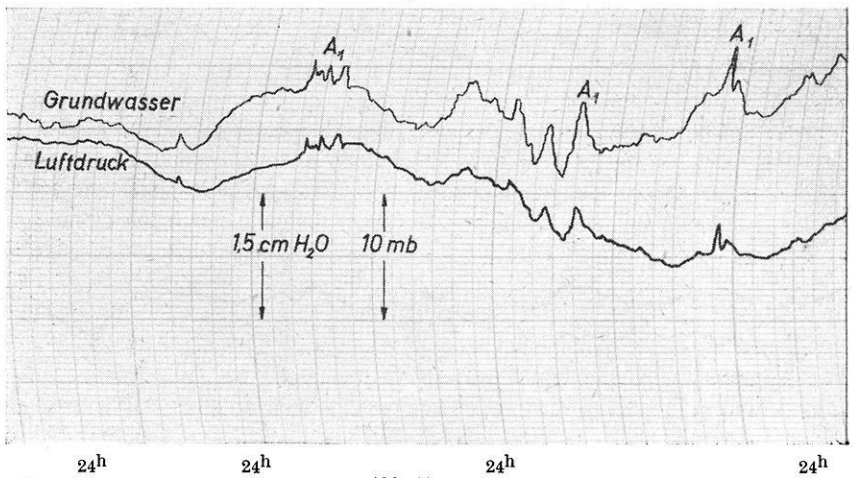


Abb. 11a-c.
Wöchentliche Registrierungen von Luftdruck und Grundwasser

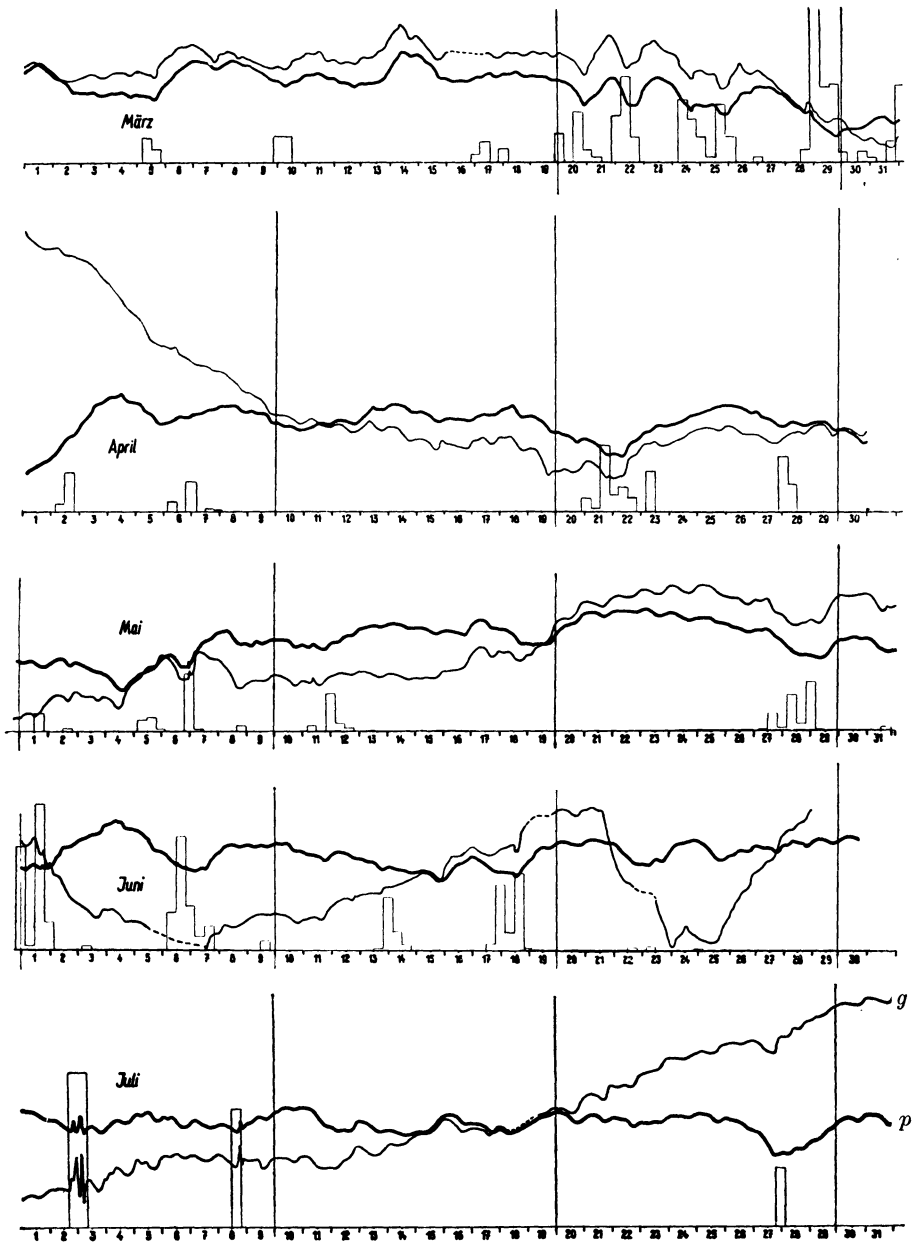


Abb. 12.

Monatliche Aufzeichnungen von Luftdruck p —, Grundwasser g — und Niederschlag \square
 Die Luftdruckkurven schließen von Monat zu Monat an; die Grundwasserkurven sind der Darstellung wegen für jeden Monat eingepaßt