©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Versuche zur Bodenatmung

Von

Wilhelm Schmidt

korr. Mitglied der Akad. d. Wiss.

und

Paul Lehmann

(Aus der Lehrkanzel für Meteorologie und Klimatologie an der Hochschule für Bodenkultur in Wien)

(Mit 7 Textfiguren)

(Vorgelegt in der Sitzung am 12. Dezember 1929)

I. Versuche.

§ 1. Grundgedanke. Für die meteorologischen Verhältnisse auf der Erde, insbesondere in dem für das Leben wichtigen Bereich, spielt der Boden nicht bloß dadurch eine ausschlaggebende Rolle, daß an seiner Oberfläche den Energieströmen andere Wege gewiesen werden, daß er Wärme aufspeichert und zu anderen Zeiten wieder abgibt; oder daß er in mancher Beziehung ähnlich auf das Niederschlagswasser wirkt — vielmehr auch dadurch, daß er immer in geringerer oder größerer Menge Luft enthält, die für das Wurzelwachstum der meisten Pflanzen, für das Gedeihen der wichtigsten Bodenbakterien unumgänglich notwendig ist. Maßgebend wirkt aber nicht der gesamte Luftgehalt, sondern nur jener Teil, der, verbraucht, sich immer wieder erneuern kann, jener also, der mit der Außenluft noch in Verbindung steht. Aus diesem Grund können die gebräuchlichen Verfahren, den Luftgehalt des Bodens zu bestimmen, nichts wirklich Brauchbares geben, denn sie unterscheiden diese beiden Teile nicht. Die Versuche, den Luftgehalt vornehmlich aus seinen Wirkungen zu erfassen, wie dies bei den gewöhnlich so genannten Beobachtungen der Bodenatmung geschieht, oder aber auch durch Registrieren der Luftdruckschwankungen im Boden, alle diese scheitern, wie unten gezeigt wird, an der Ungeeignetheit der Mittel, die den natürlichen Verhältnissen durchaus nicht gerecht werden. Und das war der Anstoß für uns, einmal im Experiment den obwaltenden Verhältnissen in einem bestimmten Fall genauer nachzugehen.

§ 2. Versuchsanordnung. Der Grundgedanke war, eine Bodenprobe in ein Gefäß mit festen Wänden luftdicht einzuschließen und ober ihr Schwankungen des Luftdrucks zu erzeugen, etwa durch einen Zylinder mit hin- und hergehendem Kolben. Diese Druckschwankungen mußten verschiedene Ausschläge aufweisen, je nachdem mehr oder weniger Volum im Boden an ihnen teilnahm. Zu variieren war, um gegebenenfalls auch deren Einfluß festzustellen, die Dauer der Luftdruckschwankungen, ferner, als wesentliches

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Bestimmungsstück, der Wassergehalt der Bodenprobe. Den Bedingungen entsprach die im folgenden beschriebene Anordnung.

Ein 81 *cm* hoher, 19·4 *cm* weiter Zinkblechzylinder, »Kessel«, (*K*, siehe Fig. 1) wurde bis 76 *cm* mit der Bodenprobe gefüllt, knapp ober ihr durch einen Deckel luftdicht verschlossen, der nur drei Ansätze (1, 2, 3) für die benötigten Rohrverbindungen enthielt. Auf

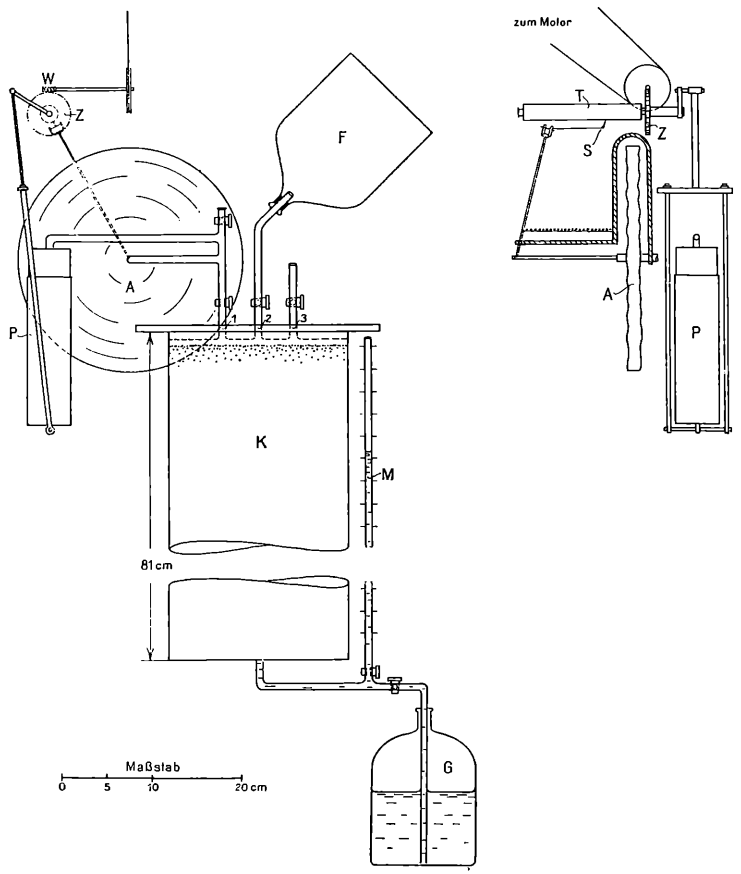


Fig. 1. Versuchseinrichtung, schematisch. Rechts oben Pumpe und registrierender Teil von der Seite gesehen.

einem solchen (1) saß, mit kurzer weiter Leitung verbunden, der maschinelle Teil auf, bestehend aus der Pumpe (*P*) zur Erzeugung der Druckschwankungen, einer großen Aneroiddose (*A*) zu ihrer Messung und der Antriebsvorrichtung für Pumpe und Registriertrommel (*T*). Die Pumpe war, um Dichthalten durch Öl zu erleichtern, senkrecht angeordnet; auf- und abbewegt wurde der äußere Mantel einfach von einer Kurbel auf der Achse des Antriebsrades (*Z*) aus. Die Pleuelstange war lang genug, um die Druck-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

schwankungen als reine Sinuswellen ansehen zu können, wie sich ja auch in den Registrierungen zeigt (vgl. Fig. 2, 6). Der Zylinderquerschnitt von P betrug 11·34 cm^2, der Hub konnte durch Verändern der Kurbellänge von 2·2 bis 9·8 cm verändert werden, woraus als Volumsänderung 24·9 bis 112·6 cm^3 folgt. Diese Abmessungen erwiesen sich als recht günstig — am meisten benützt wurde das größte Hubvolum.

Die Aneroiddose (A) hatte 24·2 cm Durchmesser. Sie war ziemlich weich, gab bei einem Druckunterschied von 10 cm Wasser 0·28 cm Ausschlag, zeigte aber doch keine Nachwirkung. Ihre Dickenänderung wurde unter Anwendung einer Spiralfeder, die zugleich die Dose unter schwachen Zug setzte und Achsenluft ausschaltete, mit etwa 16facher Vergrößerung auf einen Schreibhebel übertragen. Seine zugeschärfte feine Spitze (S) schrieb auf einer berußten glatten Messingtrommel (T), die auf die Achse des Antriebsrades (Z) aufgesetzt werden konnte. Es war das dieselbe Achse, auf der anderseits auch die Pumpenkurbel aufsaß, was folgenden Vorteil mit sich brachte: Wird eine Reihe von Druckwellen erzeugt, so entspricht jeder Phase innerhalb der Schwingung auch ein bestimmter Ausschlag, der sich, wenn wirklich alles im Gleichgewicht ist, immer wiederholen muß; man braucht also bloß eine einzige Welle aufzuzeichnen, und das geschieht bei unserer Anordnung eben dadurch, daß Registriertrommel und Pumpenbewegung gekoppelt sind, so daß ein Umlauf der Trommel auch einer Druckwelle entspricht. Läßt man mehrere Umläufe nacheinander registrieren, so hat man ein einfaches Mittel, die Konstanz zu prüfen. Die berußte Walze wurde nach besonderem Verfahren auf Papier abgedruckt, auf dem die Welle erschien und nach dem Fixieren bequem ausgemessen werden konnte. Die Schwankungsdauer wurde durch Umschalten eines Vorgeleges und Regulieren des Motors verändert, der durch Schnurlauf und Wurmtrieb (W) das Zahnrad (Z) antrieb.

§ 3. Grundlagen der Berechnung des beweglichen Luftvolums. Die Aneroiddose war zwar von vornherein geeicht worden mit der Absicht, aus den Ausschlägen bei angeschaltetem und bei abgeschaltetem Kessel das in der Bodenprobe mitwirkende Luftvolum zu ermitteln. Dazu hätte man aber das Volum v_p in Pumpe und Aneroid kennen müssen, und zwar nicht das wahre, sondern ein scheinbares; denn infolge der Nachgiebigkeit der Dose wird bei Druckanstieg mehr aufgenommen, als dem festen Inhalt entspricht, genau so als hätten wir ein wesentlich größeres Volumen v zwischen starren Wänden eingeschlossen. Und eben dessen Größe ist erst durch besonderen Versuch zu bestimmen.

Es werden dazu verschiedene Luftvolumina bekannten Inhalts an die Öffnung 2 angeschlossen, wie es in der Fig. 1 durch die angeschaltete Flasche F angedeutet ist. Die beim Arbeiten der Pumpe aufgezeichneten Ausschläge müssen sich dann verkehrt verhalten wie die mitspielenden Volumina, was die rechnerische Ermittlung des beweglichen Luftvolumens (so soll der mit der Außenluft

©Akademie d

in Verbindung stehende Anteil genannt werden) ermöglicht. Wir wollen hier zunächst die Bezeichnungen festlegen, die zum Teil auch im folgenden gebraucht werden:

Luftvolumen der Pumpe (samt Aneroiddose und Zuleitung)...			v_p		in Liter
in der Bodenprobe (»bewegliches Luftvolumen«).			v_b		
der Zusatzflaschen bzw.	v_I		v_{II}	v_{III}	
Ausschlag der aufgezeichneten Schwingung bei Anschluß der Pumpe allein			a_p		
bei Anschluß der Bodenprobe....			a_b		
bei weiterem Anschluß der drei Zusatzflaschen bzw.	a_I		a_{II}	a_{III}	
durch Interpolation und Rechnung ausgeglichen..			A		
Rechengröße zur Ermittlung der Volumina (siehe unten).....	c_I		c_{II}	c_{III}	
ausgeglichen			C		
Schwingungsdauer.....			T		in Sekunden
kennzeichnende, charakteristische..			T_k		
Wassergehalt der Bodenprobe bis 80 *cm* Tiefe, umgerechnet auf 1 m^2 Oberfläche			W		in Liter
Luftgehalt der Bodenprobe, beweglicher (»scheinbarer«), in gleicher Weise gerechnet			L		
Abschnürungszahl $\triangle L/\triangle W - 1$			S		

Man hat nun, wenn bloß die Pumpe angeschlossen ist:

$$v_p = c/a_p,$$

ferner bei Anschluß des Kessels mit der Bodenprobe:

$$v_b + v_p = c/a_b,$$

dann bei Anschluß der Zusatzflaschen:

$$v_I + v_b + v_p = c/a_I \text{ usw.},$$

wobei c eine noch zu ermittelnde Konstante ist. Man findet aus diesen Gleichungen:

$$c = v_I/(1/a_I - 1/a_b) \text{ usw.},$$

damit weiters:

$$v_p = c/a_p,$$

und das gesuchte bewegliche Luftvolum:

$$v_b = c.(1/a_b - 1/a_p).$$

Da die Ausschläge a, beziehungsweise deren reziproke Werte in Differenzen vorkommen, müssen sie sehr genau bestimmt werden — das ist aber dank den fein geschriebenen Kurven leicht möglich, wie man aus der Wiedergabe des Abdruckes von Versuch 192 oder auch 292 (Fig. 2) ersieht. Jedesmal sind fünf Wellenlinien geschrieben, deren Ausschläge vom größten absteigend der Reihe nach a_p, a_b, a_I, a_{II}, a_{III} ergeben. Beim ersten Beispiel wurde,

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

um die Linien leichter auseinanderhalten zu können, die Walze nach den ersten drei Aufnahmen um 180° verdreht.

Die Verwendung verschiedener Zusatzvolumina, rund 2, 4 und 7 *l*, sollte die Zuverlässigkeit der Bestimmung erhöhen. Die mit ihnen erhaltenen verschiedenen Werte c_{I}, c_{II}, c_{III} stimmten im allgemeinen gut miteinander überein, weshalb bei einem Teil der Versuche bloß ein einziges Zusatzvolum angewandt wurde. Über die Vornahme des dann noch notwendigen Ausgleichs siehe unten § 8.

§ 4. Die Bodenprobe und ihr Wassergehalt. Da der Wassergehalt der Bodenprobe ein wesentliches Bestimmungsstück für deren physikalischen Zustand darstellt und vor allem auf die Luftbewegung darin einwirkt, mußte dafür gesorgt werden, daß man ihn verändern konnte, ohne den Kessel, dessen Deckel ja mit Paraffin vergossen war, zu öffnen. Es war dazu an seinem Boden ein kurzer Rohrstutzen vorgesehen, durch den sich Wasser zuführen oder absaugen ließ. Da jede heftigere Strömung die Struktur des Bodens wesentlich beeinflussen konnte, mußte man dabei sehr vorsichtig zu Werke gehen: alle solchen Veränderungen wurden nur sehr langsam vorgenommen in der Weise, daß durch einen engen Schlauch ein in seiner Höhe verstellbares Wassergefäß (*G*) angeschlossen wurde. Nach jeder Verstellung mußte mindestens eine Reihe von Stunden gewartet werden, ehe das Gleichgewicht voll erreicht war; dies insbesondere bei den extremen Lagen (volle Sättigung, beziehungsweise Absenkung des »Grundwasserspiegels« auf rund 300 *cm* unter der Sandoberfläche). Deshalb konnte auch nicht der freie Wasserspiegel in der Füllflasche als Bezugshöhe genommen werden, sondern nur der Stand eines Manometers (*M*), der schließlich nach Abschalten der Flasche auftrat. Wir machen übrigens davon keinen weiteren Gebrauch, sondern beziehen alles auf den Wassergehalt der Probe, von absoluter Trockenheit aus gezählt; wir rechnen dabei auf 1 *qm* Fläche um (bei 80 *cm* Tiefe, wie unsere Versuchsanordnung es ergab), Bezeichnung *W*.

Noch wichtiger war es, wirklich eine voll definierte Ausgangslage zu erhalten. Ein Boden braucht geraume Zeit, ehe er seine endgültige Lagerung annimmt, und insbesondere bei Änderungen des Wassergehaltes treten Verschiebungen auf. Unseren Versuchen kam da zu Hilfe, daß wir die Bodenprobe im Kessel übernahmen, nachdem sie bereits eine Reihe von Wasserfüllungen und Entleerungen durchgemacht hatte.

Unsere Versuche stellten wir vorläufig nur an einer Probe an, an »Türkenschanzsand«, der den natürlichen Boden in der Umgebung des Türkenschanzparkes (Wien, XVIII.) bildet und dort gegraben wird. Besonderen Vorteil hatte es für uns, daß dieser Sand in seinen gewöhnlichen physikalischen Eigenschaften, insbesondere aber in seinem Verhalten verschiedenem Wassergehalt (und verschiedenem Grundwasserstand) gegenüber von Prof. Rob. Chr. Fischer (Hochschule für Bodenkultur) nach seiner neuen Methode genauer untersucht worden war. Ihm verdanken wir folgende Angaben:

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

in Verbindung stehende Anteil genannt werden) ermöglicht. Wir wollen hier zunächst die Bezeichnungen festlegen, die zum Teil auch im folgenden gebraucht werden:

Luftvolumen der Pumpe (samt Aneroiddose und Zuleitung)...		v_p		in Liter
in der Bodenprobe (»bewegliches Luftvolumen«).		v_b		
der Zusatzflaschen bzw.	v_I	v_{II}	v_{III}	
Ausschlag der aufgezeichneten Schwingung bei Anschluß der Pumpe allein ..		a_p		
bei Anschluß der Bodenprobe.....		a_b		
bei weiterem Anschluß der drei Zusatzflaschen bzw.	a_I	a_{II}	a_{III}	
durch Interpolation und Rechnung ausgeglichen..		A		
Rechengröße zur Ermittlung der Volumina (siehe unten).....	c_I	c_{II}	c_{III}	
ausgeglichen		C		
Schwingungsdauer...		T		in Sekunden
kennzeichnende, charakteristische..		T_k		
Wassergehalt der Bodenprobe bis 80 *cm* Tiefe, umgerechnet auf 1 m^2 Oberfläche		W		in Liter
Luftgehalt der Bodenprobe, beweglicher (»scheinbarer«), in gleicher Weise gerechnet		L		
Abschnürungszahl $\triangle L/\triangle W - 1$		S		

Man hat nun, wenn bloß die Pumpe angeschlossen ist:

$$v_p = c/a_p,$$

ferner bei Anschluß des Kessels mit der Bodenprobe:

$$v_b + v_p = c/a_b,$$

dann bei Anschluß der Zusatzflaschen:

$$v_I + v_b + v_p = c/a_I \text{ usw.},$$

wobei c eine noch zu ermittelnde Konstante ist. Man findet aus diesen Gleichungen:

$$c = v_I/(1/a_I - 1/a_b) \text{ usw.},$$

damit weiters:

$$v_p = c/a_p,$$

und das gesuchte bewegliche Luftvolum:

$$v_b = c.(1/a_b - 1/a_p).$$

Da die Ausschläge a, beziehungsweise deren reziproke Werte in Differenzen vorkommen, müssen sie sehr genau bestimmt werden — das ist aber dank den fein geschriebenen Kurven leicht möglich, wie man aus der Wiedergabe des Abdruckes von Versuch 192 oder auch 292 (Fig. 2) ersieht. Jedesmal sind fünf Wellenlinien geschrieben, deren Ausschläge vom größten absteigend der Reihe nach a_p, a_b, a_I, a_{II}, a_{III} ergeben. Beim ersten Beispiel wurde,

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

um die Linien leichter auseinanderhalten zu können, die Walze nach den ersten drei Aufnahmen um 180° verdreht.

Die Verwendung verschiedener Zusatzvolumina, rund 2, 4 und 7 *l*, sollte die Zuverlässigkeit der Bestimmung erhöhen. Die mit ihnen erhaltenen verschiedenen Werte c_{I}, c_{II}, c_{III} stimmten im allgemeinen gut miteinander überein, weshalb bei einem Teil der Versuche bloß ein einziges Zusatzvolum angewandt wurde. Über die Vornahme des dann noch notwendigen Ausgleichs siehe unten § 8.

§ 4. Die Bodenprobe und ihr Wassergehalt. Da der Wassergehalt der Bodenprobe ein wesentliches Bestimmungsstück für deren physikalischen Zustand darstellt und vor allem auf die Luftbewegung darin einwirkt, mußte dafür gesorgt werden, daß man ihn verändern konnte, ohne den Kessel, dessen Deckel ja mit Paraffin vergossen war, zu öffnen. Es war dazu an seinem Boden ein kurzer Rohrstutzen vorgesehen, durch den sich Wasser zuführen oder absaugen ließ. Da jede heftigere Strömung die Struktur des Bodens wesentlich beeinflussen konnte, mußte man dabei sehr vorsichtig zu Werke gehen: alle solchen Veränderungen wurden nur sehr langsam vorgenommen in der Weise, daß durch einen engen Schlauch ein in seiner Höhe verstellbares Wassergefäß (*G*) angeschlossen wurde. Nach jeder Verstellung mußte mindestens eine Reihe von Stunden gewartet werden, ehe das Gleichgewicht voll erreicht war; dies insbesondere bei den extremen Lagen (volle Sättigung, beziehungsweise Absenkung des »Grundwasserspiegels« auf rund 300 *cm* unter der Sandoberfläche). Deshalb konnte auch nicht der freie Wasserspiegel in der Füllflasche als Bezugshöhe genommen werden, sondern nur der Stand eines Manometers (*M*), der schließlich nach Abschalten der Flasche auftrat. Wir machen übrigens davon keinen weiteren Gebrauch, sondern beziehen alles auf den Wassergehalt der Probe, von absoluter Trockenheit aus gezählt; wir rechnen dabei auf 1 *qm* Fläche um (bei 80 *cm* Tiefe, wie unsere Versuchsanordnung es ergab), Bezeichnung *W*.

Noch wichtiger war es, wirklich eine voll definierte Ausgangslage zu erhalten. Ein Boden braucht geraume Zeit, ehe er seine endgültige Lagerung annimmt, und insbesondere bei Änderungen des Wassergehaltes treten Verschiebungen auf. Unseren Versuchen kam da zu Hilfe, daß wir die Bodenprobe im Kessel übernahmen, nachdem sie bereits eine Reihe von Wasserfüllungen und Entleerungen durchgemacht hatte.

Unsere Versuche stellten wir vorläufig nur an einer Probe an, an »Türkenschanzsand«, der den natürlichen Boden in der Umgebung des Türkenschanzparkes (Wien, XVIII.) bildet und dort gegraben wird. Besonderen Vorteil hatte es für uns, daß dieser Sand in seinen gewöhnlichen physikalischen Eigenschaften, insbesondere aber in seinem Verhalten verschiedenem Wassergehalt (und verschiedenem Grundwasserstand) gegenüber von Prof. Rob. Chr. Fischer (Hochschule für Bodenkultur) nach seiner neuen Methode genauer untersucht worden war. Ihm verdanken wir folgende Angaben:

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Eisenschüssiger Sand mit hohem Kalkgehalt:

Spezifisches Gewicht	2·647		
	in lockerster Lagerung	in dichtester Lagerung	beim Versuch
Lagerungsdichte	1·226	1·573	1·44
Porenprozent..... ..	..53·68	40·77	45·6%
Porenziffer (nach Terzaghi)....	0·813	1·457	1·193

Verdichtungsfähigkeit (nach Terzaghi). 0·792
Relative Dichte im Untersuchungszustand. 0·41, also ziemlich dichte Lagerung.

Zusammensetzung:

Sand (> 0·2 *mm* Durchmesser)	14·53%.
Sand, fein (0·2—0·1 *mm*)	..64·57%.
Mo, grob (0·1—0·05 *mm*) ..	14·34%.
Mo, fein, Schluff und Kolloidschlamm.	6·56%.

II. Ergebnisse.

§ 5. Veränderung der maßgebenden Bestimmungsstücke. Mit der Einrichtung wurden nun in einem Zeitraum von 6 Monaten 370 Versuche ausgeführt; unter ihnen befanden sich allerdings eine Reihe von Eichungen und Blindproben, dafür wurden andere Male wieder die Kurven für zwei Schwingungsdauern auf eine Trommel geschrieben, so daß obige Zahl annähernd auch die der bestimmten Punkte darstellt.

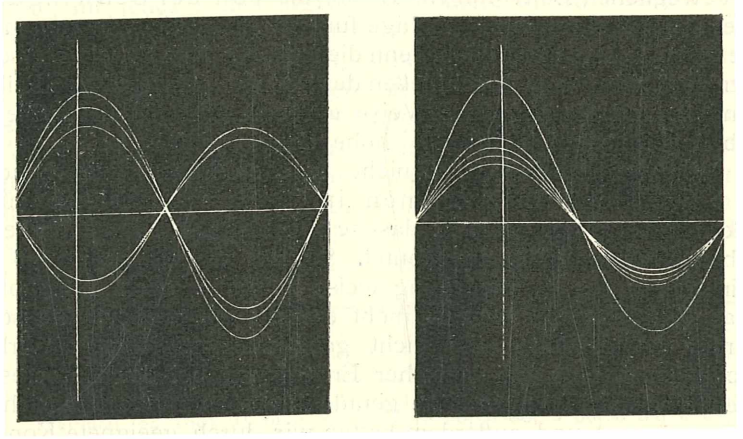
Die Versuchsbedingungen wurden nun nach zwei Richtungen verändert, sowohl nach dem Wassergehalt der Probe wie nach der Schwingungsdauer der Luftdruckwellen. Wir gingen zunächst von einem geringeren Wassergehalt $W = 150\ l$, wie oben umgerechnet, aus. Zunächst ließen wir W langsam ansteigen, wobei für jede Stufe eine Reihe Versuche bei verschiedenen T gemacht wurden. Schließlich war ein Wert $W = 270\ l$ erreicht worden; von diesem Stand an drang Wasser nur äußerst langsam in den Boden ein, wenn auch sicher noch nicht die volle Sättigung erzielt war. Wir konnten die Füllflasche tagelang in Verbindung mit dem Kessel lassen, ohne daß irgend merklicher Übergang von Wasser stattfand.

Von diesem Stand an wurde Wasser wieder in Stufen entzogen bis herunter zu $W = 130\ l$, was die untere mit unseren Mitteln erreichbare Grenze darstellte; dann hinauf auf 215 l, herunter zu 130, so daß zwei volle Zykeln beschrieben wurden. Im Zusammenhang von Manometerstand und Wassergehalt traten zwar sehr schön die von Prof. Rob. Fischer beobachteten und studierten Hysteresisschleifen auf, es war aber schon beim zweiten Kreisprozeß ein vollständiges Übereinstimmen eingetreten, den erreichten Endzustand andeutend. Es wäre nun wohl zu erwarten gewesen, daß etwas von dieser Hysteresiserscheinung, die offenbar auf eine andere Form des Festhaltens des kapillaren Wassers zurückgeht, auch im Gehalt an beweglicher Luft deutlich werden müßte. Das

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

scheint nun nicht der Fall zu sein, wenigstens nicht in einem Maße, daß man es aus den Versuchsfehlern glatt herausschälen könnte. Wir durften so alle Versuche wie eine einzige Reihe behandeln. Bei den ersten 81 Versuchen bestand der Verdacht, es sei eine Dichtung nicht vollständig gewesen; sie wurden deshalb nicht mitverwendet, obwohl sich deren allgemeine Ergebnisse vollständig mit den aus den späteren Versuchen deckten.

Wie schon erwähnt, wurde bei jeder Stufe im Wassergehalt W die Schwingungsdauer T der Druckschwankungen verändert. Deren äußerste Werte waren 0·9 Sekunden auf der einen Seite, denn von da ab störten die unvermeidlichen Erschütterungen von



a) *b)*

Fig. 2.. Kurvenbilder der Versuche 192 und 292.[1]

a) Versuch 192 vom 19. September 1927, Schwingungsdauer $T = 8{\cdot}7$ Sek., Wasserspiegel des Manometers 46 *cm* unter der Bodenoberfläche, Wassergehalt $W = 245$ *l*, Luftgehalt $L = 55$ *l*;

b) Versuch 292 vom 5. Oktober 1927. Schwingungsdauer $T = 9{\cdot}9$ Sek., Wasserspiegel des Manometers 97 *cm* unter der Bodenoberfläche, Wassergehalt $W = 144$ *l*, Luftgehalt $L = 253$ *l*.

der Übertragung der Drehung her allzusehr — auf der anderen Seite 320 Sekunden, denn von da ab währte es doch ziemlich lange, bis der Endzustand der Schwingung ziemlich erreicht war, und die Kurven schlossen auch dann nicht immer schön zusammen, wenn man eine Reihe von vollen Umläufen abgewartet hatte, ehe man mit der Aufzeichnung begann; es bewirkten da die während eines Umlaufes eintretenden Temperaturänderungen irgendeines freien Teiles sofort eine Verlagerung des Nullpunktes. Aus diesem Grund gingen wir in der Mehrzahl der Reihen nur bis $T = 80$ hinauf, was nach den späteren Feststellungen vollkommen genügte.

[1] Leider sind im Druckstock die seitlichen Ränder geglättet worden, wodurch ein Teil der Kurven verloren ging. In den Originalen schließen die Kurvenzüge genau zusammen.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

§ 6. Abhängigkeit von den maßgebenden Bedingungen; Beispiele. Schon aus den bloßen Anblick der Kurven, von denen zwei Beispiele in Fig. 2 gebracht sind, ergibt sich sofort die ausgesprochene, schließlich auch selbstverständliche Abhängigkeit des beweglichen Luftvolumens L vom Wassergehalt W. In Fig. 2*a*, bei $W = 245$, ist der Unterschied im Ausschlag von der äußersten Kurve, bei der bloß die Pumpe angeschlossen war, zur zweiten, bei der noch das Innere des Kessels daranhing, also zwischen a_p und a_b nach unserer früheren Bezeichnung, wesentlich kleiner als in Fig. 2*b*, die bei $W = 144$ geschrieben wurde.[1]

Daneben stellte sich aber eine zweite Abhängigkeit des so erhaltenen beweglichen Luftvolumens L ein, die von der Schwingungsdauer T. Daß sich die Ausschläge für sehr kurze Schwingungen verringern, ist selbstverständlich, denn die Luft, die dem Druckunterschied folgen muß, wird beim Durchfließen der Bodenkapillaren durch Reibung gehindert, und die auf diese Weise ein- und ausströmenden Mengen ergeben gerade bei kleinem W hohe Geschwindigkeiten.

Wir werden deshalb L nicht in allen Fällen kurzerhand als das bewegliche Luftvolumen im Boden bezeichnen dürfen, sondern müssen hinzusetzen: das scheinbare, wie ja schon bei der Zeichenerklärung (§ 3) angedeutet. Seltsam war es aber, daß eine Verringerung der v_b beziehungsweise L-Werte auch für große T eintrat. Zunächst war es gar nicht einzusehen, woher eine solche stammen sollte, denn eine nicht ganz auszuschließende Wirkung verschieden starker adiabatischer Erwärmung bei der Kompression in den einzelnen Räumen hätte gerade in entgegengesetzter Richtung wirken müssen; und außerdem hatten wir durch geeignete Kontrollversuche nachgewiesen, daß die Wirkung als unterhalb der Fehlergrenzen der Versuche gelegen anzunehmen war. Erst die unten, § 13, auseinandergesetzten Durchströmungsversuche führten uns auf die Erklärung aus einer Art Ventilwirkung.

§ 7. Vorgang bei der endgültigen Auswertung. Ganz einfach war es nicht, die doppelte Abhängigkeit der L von W wie von T rein herauszuschälen, besonders wo zunächst die Versuchsbedingungen nicht in irgendeinem Element ganz zusammenfielen, dann aber auch eine merkliche Streuung der Einzelwerte zu erwarten war, die sowohl in ungenauer Einstellung oder Beibehaltung von W oder T, in ungenauem Arbeiten irgendeines Teiles der Übertragung oder schließlich in Fehlern in der Ablesung der Kurven begründet sein mochte. Immerhin genügte die Anzahl der Versuche zu vollkommen sicherem Interpolieren. Wie dabei vorgegangen wurde, sei hier auseinandergesetzt, weil sich die Zuverlässigkeit unserer Schlußfolgerungen erst aus der Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse und unserer Bearbeitung beurteilen läßt.

---

[1] Die drei folgenden Kurven geben jedesmal die Schwankungen des Druckes nach Anschalten der drei Zusatzflaschen wieder, sie sind zur Ermittlung der a_{I} bis a_{III} nötig.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Zunächst wäre es wohl nicht richtig gewesen, zur Berechnung des einzelnen Versuches immer gerade das a_p zu nehmen, das bei ihm gemessen wurde: jeder Fehler in der Messung oder Registrierung dieses Wertes wäre in die Endwerte mit eingegangen. Bei der Gleichförmigkeit unserer Versuchseinrichtung — es war nur von Versuch 189 ab eine Abänderung eingeführt worden — schien es viel besser, ein mittleres a_p anzunehmen. Dabei zeigte es sich aber, daß es etwas von der Schwingungsdauer abhing, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht; und zwar vornehmlich bis $T = 50$. Weiterhin bleibt es dann gleich. Es war nicht ganz klar, woher diese Erscheinung stammen konnte, wahrscheinlich von einem geringfügigeren Einfluß in der Aneroidanordnung. Jedenfalls war es das sicherste, für jedes T das zugehörige mittlere a_p zu bestimmen und die so erhaltenen A der weiteren Auswertung zugrundezulegen.

Eine ähnliche, nur ausgesprochenere Abhängigkeit von T wies auch die Rechengröße c auf. Bei den meisten Versuchen waren zur Sicherheit drei Zusatzvolumina angeschlossen worden und hatten die Werte c_{I}, c_{II} und c_{III} geliefert. Diese drei Werte wurden jedesmal gemittelt, graphisch ausgeglichen und zur Bestimmung der v_b, beziehungsweise der daraus umgerechneten L verwendet. Auch ihre Werte sind aus folgender Tabelle zu ersehen, wobei, wie für die A, nach den beiden Teilen unserer Versuchsreihe getrennt ist.

T. Sek.		1	2	5	10	20	50	100	150	200
A. cm	Versuch 82–188	6·06	6·02	5·97	5·93	5·90	5·86	5·84	5·84	5·84
	189–370	5·11	5·07	5·03	5·01	5·00	4·97	4·97	4·97	4·97
$C/1000$	Versuch 82–188	59·0	57·3	55·5	53·9	52·2	48·9	45·8	44·1	43·2
	189–370	59·0	57·3	56·0	54·7	53·1	50·2	46·7	44·7	43·8

Wie sich die Rechnung in bestimmten Fällen gestaltete, möge an den beiden Beispielen der Versuche 192 und 292 gezeigt werden; (vgl. auch Fig. 2).

Versuch	T	W	a_{I}	a_{II}	a_{III}	a_b	A	$c/1000$	$C/1000$
Nr. 192	8·7	245	3·70	3·21	2·64	4·98	5·01	55·2	55·1
292	9·9	144	2·65	2·39	2·10	5·00	5·01	54·8	54·8

Versuch	v_p	v_b[1]	v_b[2]	L
Nr. 192	10·8	1·80	1·85	55
292	10·7	7·40	7·64	253

[1] Ergebnis der Rechnung.
[2] Ausgeglichener Wert zum Vergleich.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

es den Anschein, als würde es etwas gegen niedrigere Schwingungsdauern verschoben, wenn der Wassergehalt zunimmt; schließlich wäre das auch begreiflich, denn bei geringerem Luftgehalt im Boden werden auch die Strömungsgeschwindigkeiten, die zum Ausgleich

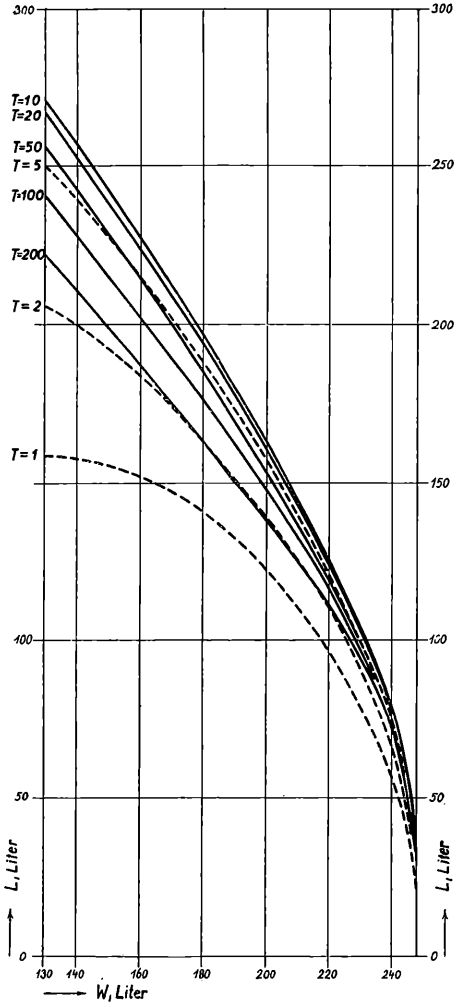


Fig. 4. Abhängigkeit des Luftgehaltes L von dem Wassergehalt W für verschiedene Schwingungsdauern T. L und W in Liter unter 1 *qm* Bodenoberfläche bis zu 80 *cm* Tiefe, T in Sekunden, vgl. § 3.

notwendig sind, geringer, die zurückzulegenden Kapillarwege kürzer, und damit schwindet der Reibungseinfluß. Auf der anderen Seite wird der Abfall des L von T_k zu großen T hin ebenfalls geringer, ja für die unterste Reihe ($W = 130$) kann man bereits ab $T = 50$ einheitliches Verhalten annehmen.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

§ 10. Abhängigkeit vom Wassergehalt. Wir gehen nun zu der zweiten Darstellung über, zu dem nach bestimmten Schwingungsdauern T abgestuften Zusammenhang zwischen scheinbarem beweglichem Luftvolumen L und Wassergehalt W (Fig. 4). Die Kurven für T unter 10 sind gestrichelt, die für höhere T ausgezogen. Bei $T = 10$ haben wir jedenfalls den größten scheinbaren Gehalt an beweglicher Bodenluft, den wir nun für den wirklichen ansehen müssen, weder wesentlich eingeschränkt durch die erschwerte Strömung innerhalb der Kapillaren wie bei raschen Druckschwankungen, noch auch durch die Ventilwirkung wie bei den langsamen. Die Grenze zwischen beiden ist durch die kennzeichnende Schwingungsdauer T_k gegeben, die insofern ihren Namen rechtfertigt, als tatsächlich in ihr eine Angabe erblickt werden muß, die ein wesent-

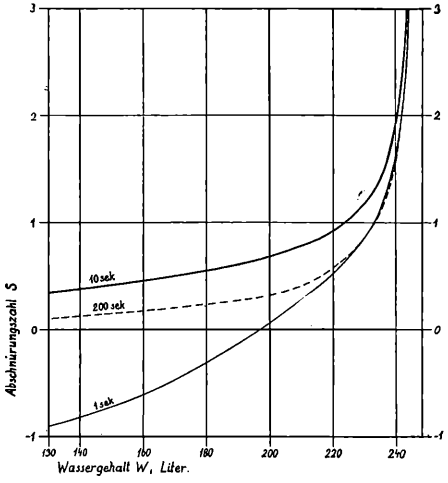


Fig. Abhängigkeit der Abschnürungszahl S vom Wassergehalt W für drei verschiedene Schwingungsdauern T. Einheiten siehe § 3.

liches Bestimmungsstück des Bodens im augenblicklichen Zustand darstellt. Sie hängt, wenn überhaupt, nur in geringem Maß von W ab, sicher aber von der Lagerung, je nachdem ob sie lockerer oder fester ist.

Macht man mit unserer Einrichtung den Versuch, ohne Betätigung der Pumpe jenen Druckverlauf aufzunehmen, der sich einstellt, wenn man Wasser dem Boden zuführt, so zeigt sich, daß der Druck ansteigt, solange Wasser zufließt, daß aber im Augenblick des Absperrens sofort wieder Druckgleichheit eintritt. Wir haben es mit einer reinen Verdrängungserscheinung zu tun, und von vornherein würde man annehmen, es müßte sich das bewegliche Luftvolum L um denselben Betrag verringern, wie der Wassergehalt W zunimmt; es müßte also in unserem Schaubild eine unter 45° gegen die Achsen geneigte Linie auftreten. Sehen wir nun die Kurve an, die etwa für $T = 10$ (als in jedem Fall T_k naheliegend) den tatsächlichen Verlauf

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

wiedergibt, so fällt uns ihre wesentlich größere Neigung auf: schon bei geringer Sättigung des Bodens entspricht einer Zunahme des W um 100 l eine Abnahme des L um 135 l!

§ 11. Vorgang der Abschnürung bei der kennzeichnenden Schwingungsdauer. Wie ist das möglich? Wohl nur auf die Weise, daß das einfließende Wasser nicht auf allen Wegen gleich schnell vorwärtsdringt, sondern auf manchen, nicht gerade den engsten, aber sicher auch nicht den weitesten, um ein Stück vorauseilt. Es kann oft vorkommen, daß dabei ein Luftvolumen, das sich etwa in einer Erweiterung befand, die nach allen Seiten nur enge Ausgänge hatte, abgetrennt, von der Außenluft abgeschnürt wird. Ist im Boden pflanzliches Leben vorhanden, das Sauerstoff braucht, so wird die abgesperrte Luft bald an diesem Bestandteil verarmen, es ist schließlich so, als ob diese Luft überhaupt nicht vorhanden wäre. Ja noch mehr, auch an den Druckschwankungen im Freien, die doch nach unseren früheren Versuchen sonst recht gut in den Boden eindringen, kann sie vom Augenblick der Abschnürung an nicht mehr teilnehmen, denn die Menisken der abschließenden Wassertropfen werden sich bei den vorkommenden Druckänderungen nur äußerst wenig verschieben. In unserem Beispiel würden also 35 l Bodenluft L abgeschnürt, wenn 100 l Wasser W zufließen.

Dieser Vorgang des Abschnürens von Luftmassen im Boden scheint so wichtig, daß wir vorschlagen, das Verhältnis des abgeschnürten Luftvolumens zum eindringenden Wasservolumen als Abschnürungszahl zu bezeichnen. Verschwinden also $\triangle L$ Liter an beweglicher Bodenluft, wenn ich $\triangle W$ Liter Wasser zuführe, so wäre die Abschnürungszahl S gegeben durch:

$$S = \triangle L / \triangle W - 1.$$

Der Abfall der Linien in der Darstellung Fig. 4 wird nun immer steiler, zu je höherem W man übergeht, es verschwindet immer mehr Luft durch Abschnürung, bis z. B. bei ziemlich hoher Sättigung, bei $W = 250$, für jeden Liter zugeführten Wassers 8 l Luft verschwinden, also das Wasser das siebenfache Volum Luft abschnürt. Um die Verhältnisse klarer wiederzugeben, ist in Fig. 5 die so definierte Abschnürungszahl S (für $T = 10$) punktweise bestimmt und zeichnerisch dargestellt worden: S nimmt bei wachsendem Wassergehalt von 0·35 an zu, zunächst nur wenig, bei $W = 225$ erreicht es aber schon den Wert 1, bei $W = 240$ wird es gleich 2, der weitere Anstieg erfolgt sehr steil.

Es mag immerhin der Fall sein, daß ein wesentlicher Umstand, der starkes Abschnüren fördert, in der langsamen Zufuhr von Wasser liegt, die ja bei unseren Versuchen von vornherein gegeben war. Sicher sind die Werte aber bereits sehr gut definiert, wenn man nur nicht stürmisch Wasser zuführt, denn wir konnten eben bei den verschiedenen Reihen die Verhältnisse sehr gut reproduzieren.

§ 12. Abschnürungszahl für andere Schwingungsdauern. Wir hatten uns im Vorigen auf die charakteristische Schwingungs-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

dauer T_k beschränkt, bei welcher das Maximum an beweglicher Bodenluft vorhanden ist. Gehen wir auf längere T über, so finden wir zunächst im L-W-Schaubild (Fig. 4) ähnlichen Kurvenverlauf wie für T_k, aber mit geringerer Neigung, also auch mit geringerem S. Klarer ersichtlich ist dies im S-W-Schaubild (Fig. 5) in dem auch der Verlauf für $T = 200$ eingetragen ist. S erlangt bei $W = 130$ den Wert 0·1 gegenüber früher 0·35, bei $W = 200$ den Wert 0·33 gegen 0·69. Der Abstand verringert sich aber weiterhin, bis schließlich bei sehr großer Sättigung fast die gleichen Werte erreicht werden wie früher.

Wir können dieses Verhalten vielleicht so ausdrücken: Bei unserer kennzeichnenden Schwingungsdauer besteht offenbar der ungestörteste Zusammenhang zwischen Boden- und Außenluft, deshalb schnürt das hinzutretende Wasser mehr Luft ab; bei $T > T_k$ wird aber, mindestens scheinbar, d. i. der Wirkung nach, ein Teil der Luft schon durch die aus anderen Versuchen (siehe § 13) folgende Ventilwirkung gegen außen abgesperrt, die Wasserzufuhr kann sich dann nicht im gleichen Maß äußern.

Anders sind die Verhältnisse für $T < T_k$, in unserem Falle für Schwingungsdauern von weniger als 10 Sekunden. Da verlaufen im L-W-Schaubild, Fig. 4, die Kurven viel flacher, man fühlt da, insbesondere bei geringem W, den Einfluß einer Wasserzufuhr viel weniger, ja es wäre denkbar, daß bei recht geringen Schwingungsdauern, für sehr rasche Wellen, überhaupt kein Einfluß mehr merkbar bleibt, die Linien also waagrecht verlaufen, beziehungsweise im L-T-Schaubild (Fig. 3) zusammenfallen, wie es ja schon für $T = 1$ Sekunde fast der Fall ist. Eine Folge der raschen Wechsel im Druck ist es ja, daß nur die Luft in den obersten Bodenschichten mit der Außenluft in Austausch tritt; was dann noch in der Tiefe vorgeht, hat nicht viel Einfluß, so daß man weniger von der Veränderung des W verspürt, insbesondere wenn der Boden recht trocken ist. Bei hohem W aber treten im Gegensatz dazu die Veränderungen, die durch Wasserzufuhr erfolgen, gerade in den obersten Bodenschichten auf, sie machen sich deshalb in den scheinbaren L-Werten glatt bemerkbar, S wird so hoch, wie es sonst nur bei langem T der Fall ist.

Eine formale Folge davon ist es, daß man gelegentlich zu negativen Werten von S kommt, wie es in Fig. 5 für $T = 1$ der Fall ist. Negativ bleibt es da bis gegen $W = 200$, wo von der Wirkung einer Abschnürung gerade nichts zu merken ist, dafür erfolgt der weitere Anstieg um so rascher. Für hohe W kann die Behinderung des Strömens in den Bodenkapillaren nicht mehr die Abschnürungserscheinung überdecken.

§ 13. Durchströmversuche. Oben war öfter die Rede von der »Ventilwirkung«, die bei langsamen Druckschwankungen merklich wird. Sie wurde erschlossen aus Durchströmversuchen, die unter Verwendung des wesentlichsten Teils unserer Apparatur vorgenommen wurden. An zylindrischen Tiegeln von annähernd 5 *cm* Durchmesser und 10 *cm* Höhe war die Grundfläche durch ein feinmaschiges, etwas

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

wiedergibt, so fällt uns ihre wesentlich größere Neigung auf: schon bei geringer Sättigung des Bodens entspricht einer Zunahme des W um 100 l eine Abnahme des L um 135 l!

§ 11. Vorgang der Abschnürung bei der kennzeichnenden Schwingungsdauer. Wie ist das möglich? Wohl nur auf die Weise, daß das einfließende Wasser nicht auf allen Wegen gleich schnell vorwärtsdringt, sondern auf manchen, nicht gerade den engsten, aber sicher auch nicht den weitesten, um ein Stück vorauseilt. Es kann oft vorkommen, daß dabei ein Luftvolumen, das sich etwa in einer Erweiterung befand, die nach allen Seiten nur enge Ausgänge hatte, abgetrennt, von der Außenluft abgeschnürt wird. Ist im Boden pflanzliches Leben vorhanden, das Sauerstoff braucht, so wird die abgesperrte Luft bald an diesem Bestandteil verarmen, es ist schließlich so, als ob diese Luft überhaupt nicht vorhanden wäre. Ja noch mehr, auch an den Druckschwankungen im Freien, die doch nach unseren früheren Versuchen sonst recht gut in den Boden eindringen, kann sie vom Augenblick der Abschnürung an nicht mehr teilnehmen, denn die Menisken der abschließenden Wassertropfen werden sich bei den vorkommenden Druckänderungen nur äußerst wenig verschieben. In unserem Beispiel würden also 35 l Bodenluft L abgeschnürt, wenn 100 l Wasser W zufließen.

Dieser Vorgang des Abschnürens von Luftmassen im Boden scheint so wichtig, daß wir vorschlagen, das Verhältnis des abgeschnürten Luftvolumens zum eindringenden Wasservolumen als Abschnürungszahl zu bezeichnen. Verschwinden also $\triangle L$ Liter an beweglicher Bodenluft, wenn ich $\triangle W$ Liter Wasser zuführe, so wäre die Abschnürungszahl S gegeben durch:

$$S = \triangle L / \triangle W - 1.$$

Der Abfall der Linien in der Darstellung Fig. 4 wird nun immer steiler, zu je höherem W man übergeht, es verschwindet immer mehr Luft durch Abschnürung, bis z. B. bei ziemlich hoher Sättigung, bei $W = 250$, für jeden Liter zugeführten Wassers 8 l Luft verschwinden, also das Wasser das siebenfache Volum Luft abschnürt. Um die Verhältnisse klarer wiederzugeben, ist in Fig. 5 die so definierte Abschnürungszahl S (für $T = 10$) punktweise bestimmt und zeichnerisch dargestellt worden: S nimmt bei wachsendem Wassergehalt von 0·35 an zu, zunächst nur wenig, bei $W = 225$ erreicht es aber schon den Wert 1, bei $W = 240$ wird es gleich 2, der weitere Anstieg erfolgt sehr steil.

Es mag immerhin der Fall sein, daß ein wesentlicher Umstand, der starkes Abschnüren fördert, in der langsamen Zufuhr von Wasser liegt, die ja bei unseren Versuchen von vornherein gegeben war. Sicher sind die Werte aber bereits sehr gut definiert, wenn man nur nicht stürmisch Wasser zuführt, denn wir konnten eben bei den verschiedenen Reihen die Verhältnisse sehr gut reproduzieren.

§ 12. Abschnürungszahl für andere Schwingungsdauern. Wir hatten uns im Vorigen auf die charakteristische Schwingungs-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

dauer T_k beschränkt, bei welcher das Maximum an beweglicher Bodenluft vorhanden ist. Gehen wir auf längere T über, so finden wir zunächst im L-W-Schaubild (Fig. 4) ähnlichen Kurvenverlauf wie für T_k, aber mit geringerer Neigung, also auch mit geringerem S. Klarer ersichtlich ist dies im S-W-Schaubild (Fig. 5) in dem auch der Verlauf für $T = 200$ eingetragen ist. S erlangt bei $W = 130$ den Wert 0·1 gegenüber früher 0·35, bei $W = 200$ den Wert 0·33 gegen 0·69. Der Abstand verringert sich aber weiterhin, bis schließlich bei sehr großer Sättigung fast die gleichen Werte erreicht werden wie früher.

Wir können dieses Verhalten vielleicht so ausdrücken: Bei unserer kennzeichnenden Schwingungsdauer besteht offenbar der ungestörteste Zusammenhang zwischen Boden- und Außenluft, deshalb schnürt das hinzutretende Wasser mehr Luft ab; bei $T > T_k$ wird aber, mindestens scheinbar, d. i. der Wirkung nach, ein Teil der Luft schon durch die aus anderen Versuchen (siehe § 13) folgende Ventilwirkung gegen außen abgesperrt, die Wasserzufuhr kann sich dann nicht im gleichen Maß äußern.

Anders sind die Verhältnisse für $T < T_k$, in unserem Falle für Schwingungsdauern von weniger als 10 Sekunden. Da verlaufen im L-W-Schaubild, Fig. 4, die Kurven viel flacher, man fühlt da, insbesondere bei geringem W, den Einfluß einer Wasserzufuhr viel weniger, ja es wäre denkbar, daß bei recht geringen Schwingungsdauern, für sehr rasche Wellen, überhaupt kein Einfluß mehr merkbar bleibt, die Linien also waagrecht verlaufen, beziehungsweise im L-T-Schaubild (Fig. 3) zusammenfallen, wie es ja schon für $T = 1$ Sekunde fast der Fall ist. Eine Folge der raschen Wechsel im Druck ist es ja, daß nur die Luft in den obersten Bodenschichten mit der Außenluft in Austausch tritt; was dann noch in der Tiefe vorgeht, hat nicht viel Einfluß, so daß man weniger von der Veränderung des W verspürt, insbesondere wenn der Boden recht trocken ist. Bei hohem W aber treten im Gegensatz dazu die Veränderungen, die durch Wasserzufuhr erfolgen, gerade in den obersten Bodenschichten auf, sie machen sich deshalb in den scheinbaren L-Werten glatt bemerkbar, S wird so hoch, wie es sonst nur bei langem T der Fall ist.

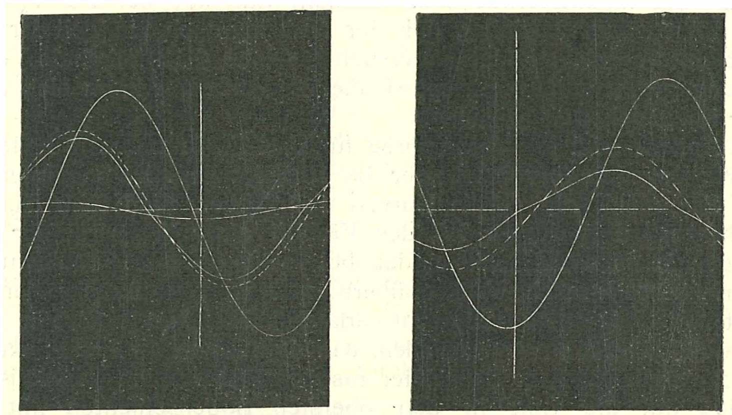
Eine formale Folge davon ist es, daß man gelegentlich zu negativen Werten von S kommt, wie es in Fig. 5 für $T = 1$ der Fall ist. Negativ bleibt es da bis gegen $W = 200$, wo von der Wirkung einer Abschnürung gerade nichts zu merken ist, dafür erfolgt der weitere Anstieg um so rascher. Für hohe W kann die Behinderung des Strömens in den Bodenkapillaren nicht mehr die Abschnürungserscheinung überdecken.

§ 13. Durchströmversuche. Oben war öfter die Rede von der »Ventilwirkung«, die bei langsamen Druckschwankungen merklich wird. Sie wurde erschlossen aus Durchströmversuchen, die unter Verwendung des wesentlichsten Teils unserer Apparatur vorgenommen wurden. An zylindrischen Tiegeln von annähernd 5 *cm* Durchmesser und 10 *cm* Höhe war die Grundfläche durch ein feinmaschiges, etwas

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

abgestütztes Drahtnetz ersetzt. Nachdem in sie die Bodenproben (269 beziehungsweise 90 *g*) eingerüttelt worden waren, wurden sie durch gut abgedichtete Deckel verschlossen. In diese eingelötet waren Rohrstutzen, um sie an Stelle des Kessels an die Pumpe anzuschließen. Aufgezeichnet und auf Papier übertragen wurde auf gleiche Weise wie früher. Wir gingen wieder so vor, daß für jeden Wassergehalt, der durch Wägung der Tiegel bestimmt war, eine Reihe von Schwingungen mit verschiedenen Perioden durchgeführt wurde. Allerdings mußte man sich bei den schnellsten Schwankungen davor hüten, daß die Druckunterschiede zu groß wurden und den trockeneren Sand aufwirbelten; sonst boten sich keine Schwierigkeiten.

Im allgemeinen ergaben sich schön geschriebene Sinuskurven, mit schwacher Verringerung des Ausschlages und schwacher Phasen-



a) *b)*

Fig. 6. Kurvenbilder der Durchströmungsversuche XLVIII und LXXV.[1]
a) Versuch XLVIII bei Wassergehalt $W = 152\,l$, Schwingungsdauer $T = 96 \cdot 2$ Sek.
b) Versuch LXXV bei Wassergehalt $W = 168\,l$, Schwingungsdauer $T = 167 \cdot 5$ Sek.

verschiebung gegenüber der unter Abschluß geschriebenen Kontrollkurve, so lange nur der Wassergehalt höher blieb oder die Schwingungsdauer entsprechend kurz war; erklärlich daraus, daß in beiden Fällen die Annäherung an den Gleichgewichtszustand erschwert war. Mit zunehmendem T sank der Ausschlag und näherte sich die zeitliche Verschiebung einer Viertelwelle.

Da trat nun in manchen Fällen, gerade bei hohen T, eine unerwartete Erscheinung ein: die Linienzüge wichen deutlich von reinen Sinuswellen ab, gerade beim Durchgang durch die Nullinie zeigte sich ein ziemlich scharfer Knick. Fig. 6 bringt dafür zwei Belege. Fig. 6*a* zeigt bei $T = 96$ Sek. zunächst die reine Schwingung bei abgeschlossenem Tiegel, dann eine gestrichelte Kurve, die unter Anschluß einer gleichmäßig ausgezogenen Glaskapillare geschrieben wurde, an diese Kurve angeschmiegt die Druckkurve des

[1] Vgl. auch hiezu die Fußnote zu Fig. 2.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

einen Tiegels bei 40 *g* Wasser auf 269 *g* trockenen Bodens, endlich ganz wenig gewellt die Kurve des zweiten Tiegels bei Füllung mit 90 *g* Boden und 11 *g* Wasser. Gerade der Vergleich der von der Kapillare geschriebenen Kurve mit der gleichlaufenden des Tiegels läßt den Knick in dieser sehr deutlich hervortreten. Noch klarer ist dies in Fig. 6*b*. Neben der Grundkurve und der von der Glaskapillare geschriebenen noch jene des ersten Tiegels mit 59 *g* Wasserfüllung bei 168 Sekunden Schwingungsdauer, die letzte mit überraschend starker Abweichung.

Der Verlauf der Linien weist darauf hin, daß sich der Strömungswiderstand zeitlich ändert: beim Durchgang durch die Nullage, also bei Gleichheit des Druckes außen und innen, wird jedesmal der Widerstand geringer, kenntlich an dem langsameren Anstieg. Ist aber einmal der größte Ausschlag erreicht, so wird die Neigung des Kurvenzuges stärker: der Strömungswiderstand ist größer. Da man nun die Lagerungsverhältnisse gerade bei Fehlen jedes Überdruckes als die normalen ansehen muß, so ergibt sich daraus, daß jeder einseitig wirkende Druck den Strömungswiderstand erhöht. Diese Erhöhung stellt sich erst mit der Zeit ein, nicht bei raschen Schwingungen, sondern nur bei langen. Schon den Kurven sieht man an, daß nicht einseitige Einstellung der Apparatur die Ursache der Unsymmetrie sein konnte; die Schwankung ist ja auf der Druck- und Saugseite gleich ausgebildet. Die Erscheinung konnte mit den gleichen Mitteln jederzeit reproduziert werden, sie trat aber nur dann auf, wenn die Schicht nicht zu dünn war, anderseits aber wieder nicht, als der zweite Tiegel vollkommen mit Sand vollgepreßt war und dieser daher keine Bewegungsfreiheit mehr hatte.

§ 14. Ventilwirkung. Es hält schwer, ein leicht statistisch faßbares Kriterium für diese Abweichung von der reinen Form zu finden. Wir kamen schließlich auf folgendes Auskunftsmittel:

Wäre die Strömung im Boden glatt mit der durch einfache Kapillaren zu vergleichen, so müßte sich bei derselben Versuchsanordnung in beiden Fällen durchaus dasselbe Verhältnis zwischen Amplituden und Phasen ergeben. Das tritt nun tatsächlich ein, solange bei Sand die Schicht verhältnismäßig seicht (z. B. beim zweiten Tiegel) oder ziemlich trocken ist, wo auch jedesmal schöne Sinuskurven geschrieben wurden. Bei dickerer und feuchter Lage stellt sich aber sofort der Knick ein, und wenn man nun die Phase durch die Eintrittszeit des größten Ausschlages mißt, so verspätet sie sich merklich gegenüber jener, die eine Glaskapillare bei derselben Amplitude liefert; die letzteren Zahlen waren leicht dadurch zu bekommen, daß die Schwingungsdauer variiert wurde — die theoretische Berechnung wäre bei dem variablen Volumen der Pumpe kaum zu brauchen gewesen. Die folgende Zusammenstellung gibt nun für vier Stufen im Ausschlag den so ermittelten Phasenunterschied gegenüber der Vergleichskapillare wieder, unter Zugrundelegung einer größeren Anzahl von Versuchen.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Ausschlag	4·8	3·6	2·4	1·2 *cm*	
Zweiter Tiegel, 3·3 *cm* Sandschicht, $W = 38$ ..	0·5	1·0	1·6	1·6°	Phasenunterschied gegenüber Glaskapillare bei gleichem Ausschlag
Erster Tiegel, 10 *cm* Sandschicht, $W = 61$ ..	0·5	2·4	3·5	5·4°	
Erster Tiegel, 10 *cm* Sandschicht, $W = 177$.	1·0	4·5	7·2	8·6°	

Mit zunehmendem Wassergehalt (umgerechnet in dieselben Einheiten, die wir früher verwandten) bei dickerer Lage wachsende Phasenverschiebung, sobald der Ausschlag kleiner wird, d. h. die Schwingungsdauer anwächst; die höchsten verwendbaren Werte lagen bei T etwas über 200, weiterhin war meist der Ausschlag schon zu gering, als daß man genau hätte messen können.

Die oben als Ventilwirkung erklärte Erscheinung ist also gesetzmäßig erkennbar, sie wirkt am klarsten bei großen Schwingungsdauern so, als ob irgendwelche den Weg verlegende Teilchen erst Zeit brauchten, um in die Sperrstellung zu kommen. Jedenfalls haben wir hier eine besondere Auswirkung der Struktur des Bodens, wohl aus dem Nebeinander von festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen hervorgehend, vor uns.

Vielleicht mag noch dazu bemerkt werden, daß die Ventilwirkung nicht ausschließlich auf die stärkst gesättigten Proben beschränkt bleibt: wir konnten bei Wiederholung der Versuche, die nun zwei Jahre nach den anderen vorgenommen wurden, auch bei recht trockenem Boden, ferner aber auch bei geknickten Glaskapillaren oder recht unsymmetrischen dieselbe Erscheinung feststellen. Es wäre demnach nicht ausgeschlossen, sie nicht etwa auf eine Art Verlegung der Luftbahnen durch Wasser oder vielleicht Körnchen zurückzuführen, sondern vielleicht auf eine Änderung der Strömungsform. Darauf soll aber, da wir nicht mehr als Vermutungen aufstellen könnten, nicht eingegangen werden.

III. Anwendungen.

§ 15. Die wichtigsten verwendbaren Ergebnisse. Im Vorstehenden haben wir die Ergebnisse unserer Versuche auseinandergesetzt, die sich zwar nur auf eine bestimmte Bodensorte beziehen, aber bei entsprechender Vorsicht jedenfalls übertragbar sind, insbesondere wohl ziemlich glatt auch für andere Sandböden gelten. Zumindest zeigen sie, was vorkommen kann, und etwas von den verwickelten Verhältnissen wird man in jeder Bodenprobe erwarten müssen. Da sich vielleicht erst nach einiger Zeit Gelegenheit ergeben dürfte, dieselben Untersuchungen auch für andere Bedin-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

gungen[1] oder auch an anderen Böden zu machen und es insbesondere ausgedehnter Verbereitungen bedarf, will man das Verfahren auf den gewachsenen Boden im Freien anwenden, ist es wohl nicht unrichtig, wenn wir die bisherigen Ergebnisse, die ja innerhalb bestimmter Grenzen sicherlich typisch sind, den Fachmännern unterbreiten.

Als wichtigstes Ergebnis können wir nun anführen, daß nach unserer Methode tatsächlich zwischen der in einer bestimmten Bodenprobe enthaltenen Luft und der beweglichen unterschieden werden kann. Wenn man den Luftgehalt[2] auf die gewöhnliche Weise aus Dichte der Bodenprobe und spezifischem Gewicht bestimmt, so erhält man, soweit man dabei richtig vorgeht (es sind sogar negative Kapazitäten ermittelt worden!), nur die insgesamt enthaltene Luft, man erfährt noch nicht, welcher Bruchteil davon beweglich ist, mit der Außenluft in ungehinderter Verbindung steht. Nur dieser kann aber für die pflanzliche Tätigkeit in Betracht kommen, nur er liefert ständig den benötigten Sauerstoff nach, gleichgültig ob dieser von den Organismen unmittelbar oder durch Vermittlung einer Wasserschicht aufgenommen wird.

Für dieses bewegliche Luftvolumen haben wir nun nachgewiesen, daß es nur einen Bruchteil des gesamten Luftgehaltes ausmacht und unter anderem, wie erklärlich, ausgesprochen abhängt vom Wassergehalt. Ansteigendes Bodenwasser kann ein Mehrfaches seines Volumens an beweglicher Bodenluft verschwinden lassen, indem offenbar die Ausgänge lufterfüllter Hohlräume zwischen den einzelnen Körnchen durch kapillar eindringendes Wasser abgesperrt werden.

§ 16. Begriff der Bodenatmung. Soweit aber die Luft beweglich blieb, setzt sie sich in überraschend kurzer Zeit mit dem Druck der Außenluft ins Gleichgewicht. Druckschwankungen von etwa 5 Sekunden waren bei unseren Versuchen so gut wie vollkommen ausgeglichen, nur bei kürzeren trat Nachhinken ein. Wenn von anderer Seite manchmal starke Druckunterschiede zwischen Boden- und Außenluft wahrgenommen wurden, so dürften sie entweder nur unter ganz besonderen Bedingungen zustandegekommen sein und sich auch nur kurz gehalten haben, oder aber sie hatten ihre Ursache in nicht entsprechender Versuchsanordnung. So fielen die täglichen Druckschwankungen, die Börnstein[3] im Boden in 1 *m* Tiefe registrierte, sicher deshalb wesentlich kräftiger aus als die in Luft, weil die Asphaltüberdeckung des Hofes der Landwirtschaftlichen

---

[1] Z. B. anderem Anstieg von Wasser, vielleicht Benetzen von oben her, oder nach künstlicher Lockerung.

[2] Wir vermeiden hier ausdrücklich den Ausdruck »Luftkapazität«, wie wir auch früher nie von »Wasserkapazität« gesprochen haben, weil dieser Ausdruck von vornherein dem Sprachgefühl widersteht, unlogisch ist und insbesondere im Vergleich mit längst eingebürgerten Begriffen exakter Wissenschaft zu Mißverständnissen Anlaß gibt; »Kapazität« ist nichts anderes als eine »Fähigkeit« und darf auf keinen Fall zur Beschreibung des augenblicklichen Zustandes verwendet werden. Höchstens der Begriff der minimalen Wasserkapazität könnte noch als richtig bezeichnet zugestanden werden.

[3] Met. Zeitschr., *28*, 361 (1911); Phys. Zeitschr., *12*, 771 (1911).

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Hochschule in Berlin bis knapp an den engen Streifen freien Bodens, in dem die Versuche gemacht wurden, heranreichte; der ganze unter der undurchlässigen Schicht abgesperrte Luftraum im Boden wirkte als Gasthermometer und beeinflußte so den Druck an der Meßstelle.

Nun haben die Druckschwankungen im Freien und ihr Eindringen in den Boden die Bedeutung, daß damit immer Massenverschiebungen verknüpft sind: bei sinkendem Druck tritt Luft aus dem Boden aus, und zwar in einer Menge, die proportional ist der Druckverminderung einerseits, dem Gehalt an beweglicher Luft im Boden andererseits,[1] bei steigendem Druck wandert Luft in entsprechendem Ausmaß hinein. Bei diesem Vorgang, den wir nun mit viel mehr Berechtigung als es bisher geschah »Bodenatmung« nennen können,[2] werden alle Eigenschaften, durch die sich die Bodenluft von der außen unterscheidet, gegeneinander ausgeglichen, beide werden gemischt. Und das in viel ausgiebigerer Weise als es je durch Diffusion der Fall sein kann. Geradeso wie der Austausch in der freien Luft die Verbreitung und den Ausgleich von Temperatur, Wasserdampfgehalt usw. ungeheuer viel rascher vornimmt als es durch die Molekularbewegung geschieht, haben wir auch hier mit einer viel wirksameren Überführung von Kohlensäure, Sauerstoff, vielleicht auch Wasserdampf zu rechnen — vorausgesetzt, daß sich tatsächlich im Luftdruck geeignete Schwankungen finden.

§ 17. Kurzdauernde Luftdruckschwankungen. Solche kommen nun sicher vor. Es sind das aber nicht die bisher ausschließlich in Betracht gezogenen langdauernden, die sich etwa in einem Abstieg von einem Tag zum andern äußern, es sind das kurzdauernde Schwankungen, die sehr häufig auftreten, die aber fast nicht beobachtet und beachtet wurden. Die gewöhnlichen Einrichtungen zur Luftdruckmessung geben sie nicht wieder, sie gehen bei ihnen vollkommen in der elastischen Beanspruchung der einzelnen Hebel, der Achsenluft und der Reibung unter. Nur besondere Geräte schreiben sie auf und für diese Zwecke hat sich vor den anderen Konstruktionen (wie dem Hefner-Alteneck'schen Variometer, der Toepler'schen Drucklibelle, dem Richard'schen Statoskop) vor allem der Variograph sehr gut bewährt.[3] Er ist wohl der einzige, der auf Registrierungen so langer Dauer zurückblicken kann

[1] Drückt man die Druckverminderung in Bruchteilen des Gesamtdruckes aus, so braucht man sie nur mit dem Luftgehalt zu multiplizieren, um die austretenden Luftmengen zu erhalten.

[2] Bisher dachte man bei dem Ausdruck meist nur an den Umsatz von Kohlensäure gegen Sauerstoff, und zwar auf dem Wege der Diffusion. Nun haben wir aber auch im Boden den gleichen Vorgang wie beim gewöhnlichen Atmen, einen abwechselnd ein- und ausgehenden Luftstrom, der für alle zu transportierenden Bestandteile, auch den Wasserdampf, als Träger wirkt.

[3] Bauart: Wiener Sitzungsber., mathem.-naturw. Kl., *118*, IIa, 885 (1909); einige Auswertungen: ebenda, *119*, IIa 1101 (1910), ebenda, *122*, IIa, 905 (1913). Auch Met. Zeitschr., *29*, 406 (1912), ebenda, *31*, 170 (1914). Vgl. auch Suzuki, ebenda, *42*, 377 (1925).

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

(mit Unterbrechungen seit 1909 bis jetzt), er gestattet auch beliebige Vergrößerung gerade der kurzen Wellen durch den einfachen Kunstgriff, daß nicht der Druckverlauf p selbst, sondern der Differentialquotient nach der Zeit, dp/dt, aufgeschrieben wird. Diese kurzen Luftdruckschwankungen müssen nun als ganz besondere Erscheinungen aufgefaßt werden. Sie gehen keinesfalls immer mit den groben Änderungen parallel: sie sind zwar bei böigem Wetter recht groß, aber sowohl bei steigendem wie auch bei fallendem Luftdruck gelegentlich sehr gering. Insbesondere bringt Wind rasche Luftdruckwechsel, und zwar nicht etwa bloß jene, die durch unmittelbaren Anprall der Luftströmung entstehen. Anderseits treten recht starke Schwankungen im Druck oft auf, wenn am Boden Windstille herrscht, in der Höhe aber, etwa über der kalten Bodeninversion, warmer Wind weht. Am intensivsten kann sich dies in Gebirgstälern vor und nach Föhn einstellen, aber auch im Flachland, öfter in der winterlichen Jahreshälfte, etwa vor dem Durchbrechen warmen Westwindes aus der Höhe.

§ 18. Beispiele kurzdauernder Luftdruckschwankungen. Beispiele dafür, den Aufzeichnungen von Wien und Innsbruck entnommen, bringt Fig. 7, zum Teil von windigen Tagen mit den bezeichnenden kurzen Schwankungen im Druck (die allerkürzesten sind dabei noch ausgedämpft), zum Teil von ruhigeren mit langen Wellen; als Beispiel noch ganz ruhige Tage mit verschwindenden Druckänderungen und schließlich der Ausschlag, den ein Druckanstieg von 20 *mm* Hg, über den ganzen Tag gleichförmig verteilt, ergeben würde.

Allerdings darf man sich nicht durch den Anblick der Kurven, in der Figur der gewellten Begrenzungslinien der schwarzen Flächen, leiten lassen. Der Variograph zeichnet ja nicht den Luftdruck selbst auf, sondern dessen Änderungsgeschwindigkeit, und so könnte es leicht sein, daß die kurzdauernden Schwingungen, auch wenn sie im Variogramm am stärksten hervortreten, dennoch nicht dieselbe Schwankungssumme (die Anstiege oder die Abwärtsbewegungen für sich fortlaufend zusammengezählt) und damit nicht denselben Luftaustausch mit dem Freien aufwiesen wie langsamere. Man gewinnt aber eine schnelle Übersicht, wenn man im Variogramm einfach die von der Nullinie aus nach oben oder unten durch die Kurve abgeschlossenen Flächenstücke zusammenzählt, planimetriert; das ergibt ja wieder die Schwankungssumme. In den Beispielen der Fig. 7, wo diese Flächen geschwärzt erscheinen, liefert das immerhin größere Beträge, jedenfalls vielfach höhere als z. B. ein Anstieg des Drucks von einem Tag zum nächsten um 20 *mm* Quecksilbersäule. Ein solcher würde eine mittlere Druckänderung von $0 \cdot 12 \cdot 10^{-3}$ *mm* Hg in der Sekunde mit sich bringen, die ihm entsprechende Linie läge ganz knapp ober der Nullinie unserer Figuren; selbst in diesem extrem angenommenen Fall käme die zwischen beiden befindliche Fläche gegenüber den meisten früheren gar nicht in Betracht, ja man hätte geradezu die ruhigsten Stunden der ungestörtesten Tage

©Akademie d

auszusuchen, um mit der Summe der kurzen Schwankungen darunter zu bleiben.

Dabei sind, wie schon erwähnt, die kürzesten Schwankungsdauern gar nicht voll zu ihrem Recht gekommen, sie wurden gedämpft, mit wesentlich zu kleinem Ausschlag aufgezeichnet. Um möglichst genaue Belege zu haben, wurden deshalb für zwei Tage,

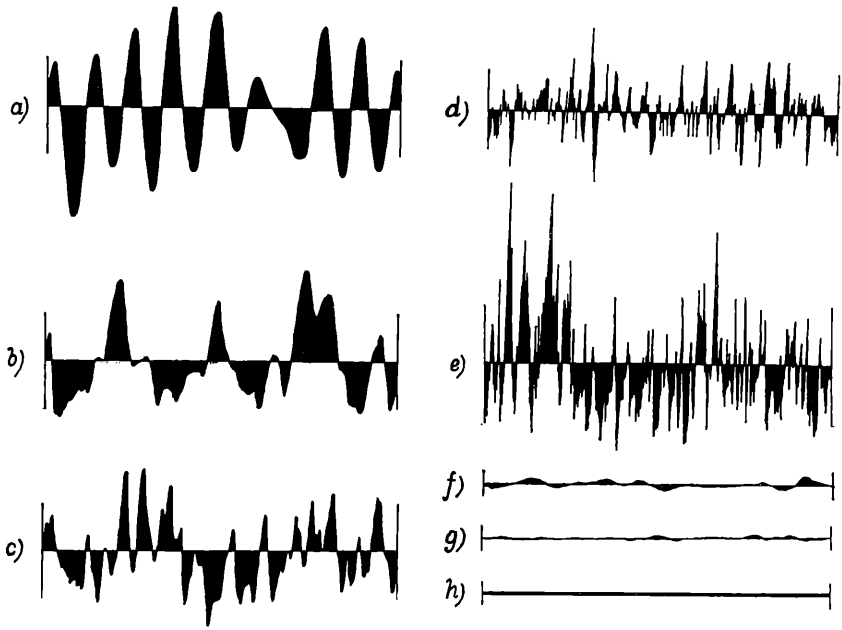


Fig. 7. Ausschnitte aus Variographenaufzeichnungen während je einer Stunde; kurze Luftdruckschwankungen, aufgeschrieben durch die Änderungsgeschwindigkeit des Luftdrucks mit der Zeit, vgl. § 17. Flächen zwischen den Kurven und der Nulllinie geschwärzt, um die Schwankungssummen hervortreten zu lassen.

a) Aus Innsbruck, 21. Jänner 1910, bei kalter Luft mit Windstille im Tale und föhnartiger Strömung in der Höhe.
b) Aus Wien (wie auch die übrigen Beispiele), 31. Jänner 1913, bei Windstille und starker Bodeninversion.
c) 1. Februar 1913, sehr schwache Luftbewegung bei Bodeninversion.
d) 6. November 1913, windiges Wetter.
e) 15. Dezember 1913, stürmischer, böiger Wind.
f) und *g)* 14. Juni 1913, von einem der ruhigsten und ungestörtesten Tage, das letzte Beispiel von der ruhigsten Stunde dieses Tages.
h) Die Fläche, die einem Anstieg des Luftruckes (also einer Schwankungssumme) von 20 *mm* Quecksilber im Laufe eines Tages entsprechen würde.

einen windigen mit raschen Druckänderungen und einen ruhigen mit langsamen Schwingungen, die Schwankungsbeträge für jede Welle für sich ermittelt, in geeigneter Weise unter der Annahme reiner Sinuswellen umgerechnet. So wurden, nach den von den einzelnen Schwingungsdauern gelieferten Teilbeträgen gesondert, nachstehende Schwankungssummen (Tabelle p. 845) erhalten.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Schwankungssummen nach Variographenaufzeichnungen.

Schwingungsdauer, min. ..	0·8	1·2	1·6	1·9	2·2	2·6	2·9	3·2	3·6
Schwankungssumme, *mm* Hg 17. 8. 1913..	9·36	10·81	8·81	15·02	8·24	9·72	4·04	3·52	3·31
Schwankungssumme, *mm* Hg 31. 1. 1913..	0·31	0·06	0·11	0·28	0·76	1·34	0·90	5·15	2·23
Schwingungsdauer, min.	3·9	4·3	4·6	0·9	5·3	5·6	5·9	6·4	8·4
Schwankungssumme, *mm* Hg 17. 8 1913..	3·02	1·17	1·56	0·33	0·66		0·58	0·27	
Schwankungssumme, *mm* Hg 31. 1. 1913..	2·80	1·56	6·29	2·07	1·21	0·65	4·93	5·10	27·90

Schwingungsdauer, min. ..	11·8	25·3	27·6	Summe	während ... Stunden	Schwankungssumme, auf 24 Stunden umgerechnet
Schwankungssumme, *mm* Hg 17. 8. 1913..				80·42	13·8	139·9
Schwankungssumme, *mm* Hg 31. 1. 1913..	12·00	49·70	49·30	174·65	10·8	388·0

Am windigen 17. August entfielen die größten Teilbeträge auf die kürzesten noch ausgemessenen Schwingungsdauern, ja es liegt nahe anzunehmen, daß durch die Außerachtlassung noch kürzerer ein wesentlicher Beitrag zur Gesamtsumme ausfiel.[1] Am windstillen 31. Jänner 1913 lieferten die langsamen Wellen das meiste. Rechnet man von den der Auswertung unterworfenen Zeiten auf den ganzen Tag um, dann kommt man vom 17. August aus auf 140 *mm* Hg/Tag, vom 31. Jänner aus aber auf fast 390 *mm* Hg/Tag. Selbst ganz kleine Schwankungen vom 14. Juni 1913 hätten, umgerechnet, 22 *mm* Hg/Tag erreicht.

§ 19. Bodenatmung und Kohlensäureumsatz. Wir wollen nun nachsehen, was die Wirkung der Luftdruckschwankungen in einem möglichen, allerdings etwas extremeren Fall sein kann, z. B. an einem Tag, dessen Schwankungssumme, die Abstiege alle zusammengezählt, 380 *mm* Hg beträgt. An einem solchen würde die Hälfte der im Boden befindlichen Luft, soweit sie beweglich ist, mit der Außenluft gemischt werden, sie würde zu diesem Bruchteil erneuert, wenn der äußere Druck 760 *mg* Hg beträgt. Ist der Luftgehalt in unserem Boden, bei geringem Wassergehalt, $L = 200\,l$ auf $1\,m^2$ (bis 80 *cm*), dann würden $100\,l$ Luft aus dem Boden in Absätzen hinausbefördert. Steigt der Wassergehalt, dann wird der Luftumsatz fortschreitend kleiner, eben nach den Angaben unserer Figur 4, aber auch bei ziemlich gesättigtem Boden wären es noch

[1] Für solche Kurven ergibt die Auswertung auf jeden Fall erheblich zu wenig, da unwillkürlich kurze Wellen neben längeren nicht recht berücksichtigt werden.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

20 *l*. Wir wollen rechnen, wieviel dies bei zwei Umsätzen ausmacht, die für das Pflanzenleben wichtig sind, den von Kohlensäure und von Wasserdampf.

Kohlensäure entsteht zum großen Teil im Boden durch Bakterien- und Wurzeltätigkeit; die Bodenluft ist deshalb ziemlich reich daran. Wir setzen einen auf den ersten Anblick hohen Wert ein, 1%, der bereits für Pflanzen giftig zu wirken beginnt. Damit erhalten wir für die obigen zwei Fälle 1 *l*, beziehungsweise 0·2 *l* oder rund 2, beziehungsweise 0·4 *g/qm* Tag. Das ist wesentlich weniger als man nach verschiedenen Versuchen, beziehungsweise Berechnungen ermittelt hat. Lundegårdh führt z. B.[1] für die Bodenatmung ungedüngter Böden 0·4 *g/qm* Stunde an. Nun wird durch eigentliche Luftströmungen bedeutend mehr an den Beimengungen transportiert als durch den langsamen Diffusionsvorgang, haben wir doch das entsprechende Beispiel schon von der Luft im Freien.[2] Wir kommen also wieder zum Schluß, daß die Angaben aus den Untersuchungen des Kohlensäuregehaltes und der Bodenatmung, insbesondere wenn man sie auf Diffusionsvorgänge stützt, miteinander unvereinbar sind; sie widersprechen den einfachsten, allgemein bekannten physikalischen Gesetzen; und doch müßte jede Behauptung zunächt mit ihnen in Einklang gebracht werden — es ist das eine notwendige, allerdings noch nicht hinreichende Bedingung für ihre Richtigkeit.

§ 20. Bisherige Versuche über Bodenatmung. Gerade bei Lundegårdh's Ableitungen ist dies nun nicht der Fall. Er stützt seine Angaben auf zweierlei Beobachtungsreihen, einmal auf Beobachtungen der Kohlensäureproduktion in verschiedenen Schichten, dann auf seine Bestimmungen der Bodenatmung. Wir können zeigen, daß beide Wege fehlerhaft verwendet sind.

Zunächst die Kohlensäureproduktion; wenn ich Bodenproben aus ihrem natürlichen Zusammenhang nehme und anderen Bedingungen aussetze, insbesondere die Struktur, damit auch die Zufuhr von Sauerstoff, ebenso die Temperatur ändere (Lundegårdh's »Kolbenmethode«), dann darf ich nicht annehmen, dieselbe Kohlensäuremenge entstehend zu finden, wie in der festgepackten, gegen die Sauerstoffzufuhr weitgehend abgesperrten Lagerung im Boden, Die Wirklichkeit muß zuweilen weit hinter dieser maximalen Menge zurückbleiben.

Zweitens das Berechnen der Diffusion. Wenn wirklich die Diffusion jene Rolle spielt, die ihr für die Versorgung der Luft im Freien aus dem Boden zugeschrieben wird, dann muß für jede Schicht im Boden das Grundgesetz der Diffusion erfüllt sein: daß die transportierte Kohlensäuremenge gleich ist dem Produkt aus dem senkrechten Gefälle des Partialdrucks der Kohlensäure und dem Diffusionskoeffizienten der Kohlensäure in Luft. Romell hat

[1] Lundegårdh, Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur, Jena 1924, p. 173.
[2] W. Schmidt, Der Massenaustausch in freier Luft, Hamburg 1925.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

die Zusammenhänge richtig dargestellt und verwendet, allerdings unter günstigen Bedingungen in der Rechnung.[1] Er erreichte dadurch knapp die Durchlüftungen, die als mittlere angenommen werden; die wesentlich darüber liegenden, die von manchen Seiten als Messungsergebnis angeführt werden, muß er aber ablehnen. Lundegårdh hinwieder geht bloß von den erwähnten Produktionszahlen aus, rechnet zusammen, wieviel in jeder Schicht erzeugt wird, und was dann als Summe, von unten auf zusammengezählt, aufscheint, muß an die Luft abgeführt werden. Das gibt dann überraschend hohe Mengen, die natürlich allen Beobachtungen genügen würden; sie würden aber in den oberflächennahen Schichten ein ganz unmöglich hohes Gefälle des Partialdrucks der Kohlensäure erfordern und daraus folgte in den tieferen Schichten ein sehr großer Kohlensäuregehalt, ein Vielfaches von dem, was beobachtet wurde.

Drittens die Bestimmung der Bodenatmung. Das Verfahren, einfach eine Glocke über den Boden zu stülpen oder mit ihrem Rand ein Stück in ihn einzutreiben und dann zu bestimmen, in welchem Maß sich die Kohlensäure unter ihr anreichert, kann auf keinen Fall zu richtigen Werten führen, wenn nicht darauf geachtet wird, daß die entsprechenden Druckbedingungen, die für ein freies Bodenstück gelten würden, auch dabei eingehalten sind. Wenn man also annimmt, daß die reine Diffussion allein wirkt, dann müßte jede Druckänderung unter der Glocke vollkommen ausgeschlossen sein, auch jede, die durch Temperaturänderung entstand — und darauf wurde offenbar bei keinem der Versuche Rücksicht genommen; ferner müßte bei äußeren Druckschwankungen auch jedes Überströmen der Luft durch den Boden um den unteren Rand der Glocke herum hintangehalten werden — und das ist nach unseren Ergebnissen kaum so leicht möglich und wurde offenbar auch nicht angestrebt. Die Werte sind also sicher höher als sie reine Diffusion liefern würde.

Nimmt man anderseits an — und das müssen wir nun tun —, daß nicht die Diffusion als solche den Vorgang allein regelt, sondern in weitem Maß das Ein- und Ausströmen von Luft als Träger der Kohlensäuremengen, dann müßte man solche Atmungsversuche in der Weise anstellen, daß sich innerhalb der Glocke dieselben Druckschwankungen einstellen, wie außerhalb. Technisch wäre die Frage nicht leicht zu lösen, denn ein einfaches Offenhalten eines Verbindungsrohres zwischen innen und außen genügt nicht — es würde da jeder Windstoß schon stören —, aber ausführbar wäre der Versuch immerhin.

§ 21. Bodenatmung durch Luftdruckschwankungen. Wir sehen also, daß die für Diffusion ins Feld geführten Beweise entweder der entsprechenden Grundlagen noch entbehren oder aber in sich noch nicht in Übereinstimmung gebracht werden konnten.

---

[1] Romell, Luftväxlingen i Marken som ekologisk Faktor, Stockholm 1922. Er nahm z. B. 60% Porenquerschnitt (Porositätsziffer) an.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die Schwierigkeiten heben sich nun, wenn wir die Mitwirkung der Luftdruckschwankungen bei der Bodenatmung heranziehen, wie sie unsere Versuche ergeben haben. Ich führe gerade hier Romell an, der ausdrücklich auf die Wirkung von Luftdruckänderungen eingeht: er erklärt mit Recht, daß die Wirkung der auf gewöhnliche Weise beobachteten Luftdruckänderungen, sogar die der Schwankungen während einer Sturmperiode, so gut wie verschwindet, bemerkt aber von den »Mikrobarischen Variationen«, Schwankungen von 4 bis 20 Minuten Dauer: »Diese verlaufen zwar sehr schnell, sie sind aber von so geringer Amplitude — sie sind an einem gewöhnlichen Barometer nicht einmal bemerkbar —, daß sie gar nicht in Betracht kommen.«[1]

Wir werden nun nach unseren Kenntnissen umgekehrt sagen: Diese Schwankungen haben zwar einen kleinen Ausschlag — er ist übrigens nicht allzu selten in der Größenordnung von Millimetern Quecksilber —, sie folgen aber so oft aufeinander, daß sie in ihrer Gesamtwirkung ein Vielfaches von dem erreichen, was den langsameren Schwankungen zugeschrieben werden könnte. Sie transportieren gewaltige Mengen Luft, denn Druckunterschiede im Boden und im Freien gleichen sich rasch genug aus. Auch der rasche Wechsel schadet nicht, wir brauchen nicht etwa anzunehmen, daß bloß die obersten Schichten erneuert werden, und, da die Schichten dort nicht genug Kohlensäure aus sich selbst nachliefern könnten, doch daran verarmen, so daß die Atmung an Kohlensäure herabgesetzt werde. Wir haben uns den Vorgang vielmehr folgendermaßen vorzustellen: Tritt Druckerhöhung ein, so wird die kohlensäurearme Außenluft in jeder der Kapillaren so strömen, daß sie in der Mitte weit voraneilt, daß die Randschichten hingegen gewissermaßen haften bleiben und für den Augenblick den höheren Kohlensäuregehalt beibehalten, der ihrer Tiefe eigentümlich ist. Es tritt dann Diffusion ein, indem in jedem Röhrchen die Kohlensäure von außen gegen die Achse hin wandert, und der Ausgleich kann sehr rasch erreicht sein, da nun der Diffusionsweg so außerordentlich kurz ist. Anderseits muß die frische Luft um so weiter in die Tiefe vordringen, was neuerdings den Umsatz steigert.[2]

Rein formal erfolgen übrigens die Vorgänge ganz analog den Gesetzen der Diffusion, wie das ja auch bei den Umsätzen in freier Luft der Fall ist; da kann man die Wirkungen des Luftaustausches mit denselben Formeln behandeln mit dem einzigen Unterschied, daß man den Diffusionskoeffizienten durch den meist viel größeren des Austausches zu ersetzen hat. Es wäre wohl aussichtsreich, diese Übertragung auch auf den Boden zu machen.

---

[1] A. a. O., p. 42.

[2] Ein Analogon zur Erhöhung der Wirkung durch den Ersatz der langen Diffusionswege (wie sie die volle Längserstreckung der Bodenkapillaren fordert) durch die kurzen (quer zum Durchmesser) haben wir übrigens auf einem anderen Gebiet, der Abgabe von Wasserdampf im Blatt, vor uns, wo auch der Diffusionsweg durch die Spaltöffnungen so kurz wird, daß ihm entlang viel gefördert werden kann.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die raschen Schwankungen des Druckes — das steht nun nach unseren Ausführungen fest — spielen also eine ausschlaggebende Rolle in der Bodenatmung, im Eindringen von Sauerstoff in den Boden, in der Versorgung der freien Luft mit jener Kohlensäure, die durch Zerfall, durch die Tätigkeit der Wurzeln und der Bodenbakterien entsteht.[1] Wir werden nach dem Ergebnis unserer Versuche und nach meteorologischen Beobachtungstatsachen sofort eine Reihe von Folgerungen daran knüpfen.

§ 22. Folgerungen für die Wechsel im Kohlensäuregehalt. Zunächst brauchen wir uns nicht zu verwundern, daß der im Freien beobachtete Kohlensäuregehalt so außerordentlich stark und scheinbar ohne klaren Zusammenhang mit den Witterungsbedingungen wechselt; das ist nun selbstverständlich, da ja das offenbar ausschlaggebende Element, die raschen Druckschwankungen, noch nie damit in Beziehung gesetzt wurde. Die Abgabe von Kohlensäure seitens des Bodens ist sicher sehr hoch bei windigem Wetter, nur ist dann keine Erhöhung des Gehaltes in der freien Luft zu beobachten, da gleichzeitig auch der Austausch in ihr sehr hoch ist, die Zufuhr demnach, soweit die Pflanzen nicht unmittelbar davon verbrauchen, sehr große Schichtdicken ergreift. Die größte Anreicherung, die aber noch keinen zwingenden Rückschluß auf die Intensität von Entstehung im Boden oder Aufnahme durch die Pflanzen gestattet, müßte sich knapp ober der Erdoberfläche einstellen, wenn die Druckschwankungen bei Windstille auftreten, wie die in zwei Beispielen der Fig. 7: der Austausch, das Hinwegführen in der freien Luft ist dann gering, die Anreicherung um so stärker. Aus dem gleichen Grund ist der allgemein im Wald etwas höhere Kohlensäuregehalt vor allem auf den geringeren Austausch im Schutz zurückzuführen.

Der Zusammenhang mit den zeitlichen Änderungen des Wetters wird aber nicht allein durch die verschiedene Intensität der Luftdruckschwankungen gegeben, sondern hängt ebenso auch vom Zustand des Bodens ab: erhöhter Wassergehalt nach Niederschlägen hindert nicht bloß das Durchströmen (das würde meist weniger in Betracht kommen), sondern vermindert durch Verdrängen und durch Abschnüren den Gehalt an Bodenluft im ganzen und der zum Austausch kommende Betrag ist entsprechend geringer. Die beste Durchlüftung weisen tiefgründige, lockere Böden auf, doch wird auch dichterer Boden, unterschichtet von sehr lockerem mit großen Lufträumen, gut durchspült.

Bei den bedeutenden Schwankungen der Durchlüftung ist es natürlich, daß man den Gehalt der Bodenluft an Kohlensäure mitunter recht verschieden findet, selbst wenn keine Unterschiede in den erzeugten Mengen anzunehmen sind: zu allen Zeiten mit starker

[1] Nur in extremen Fällen kann die Wirkung eigentlicher Diffusion demgegenüber noch merklich bleiben: für die allerobersten Schichten, und zwar dann, wenn das vorhandene Luftvolum sehr klein ist, insbesondere wenn in größerer Tiefe jede bewegliche Luft fehlt.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Atmung weniger Kohlensäure, und zwar gerade in den obersten Schichten, und umgekehrt.

Auch räumliche Unterschiede der Bodenatmung liegen nun nahe: ein Abhang, der den ankommenden Winden ausgesetzt ist, erfährt alle die kleinen Druckschwankungen, die in einem windgeschützten Talgrund schon sehr ausgeglichen und abgeschwächt sind. Freie Höhen sind ihnen mehr unterworfen, dafür haben tiefe Lagen, insbesondere Täler, öfter jene längerdauernden Schwankungen, die entstehen, wenn unten kalte Luftmassen lagern und darüber warmer Wind wegstreicht — Extrem: Föhn, vgl. Fig. 7.

§ 23. Berechnung der Umlagerung von Wasser im Boden. Wir haben im Vorliegenden den Umsatz an Kohlensäure besprochen als den am meisten behandelten. Ganz parallel liegen die Verhältnisse für die Versorgung des Bodens mit Sauerstoff aus der Außenluft, ebenso aber die für die Umsätze an Wasserdampf. Bodenluft ist meist sehr hoch gesättigt; zu Zeiten, da der Dampfgehalt der Luft im Freien gering ist, tritt notgedrungen die entsprechende Abgabe ein, also, um bei dem einen extremeren Beispiel zu bleiben, jene Abgabe, die durch Ausströmen von 100 *l* gesättigter Luft und Aufnahme der gleichen Menge wasserdampfärmerer aus dem Freien bedingt ist. Deren Dampfdruck wollen wir gleich 6 *mm* Hg setzen (Taupunkt 3·7°), während sich jener der Bodenluft, wenn wir die Temperatur dort zu 15° annehmen, zu 12·8 errechnet. Das ergibt als Differenz 6·8 *mm* Hg, d. i. einen Bruchteil von 6·8/760 der zum Austausch kommenden Bodenluft als Menge Wasserdampfes. Es wären das rund 0·9 *l* Wasserdampf bei 760 *mm* Hg Druck. In Niederschlagshöhe ausgedrückt, käme das, da es sich auf 1 m^2 bezieht, gleich 0·0007 *mm*! Das ist eine äußerst kleine Menge, selbst unter den günstig angenommenen Bedingungen nur der tausendste Teil von dem, was ein schwacher Taufall liefert, und wir werden daraus sofort verschiedene Schlüsse ziehen.

Zunächst braucht uns die Kleinheit der Zahl gar nicht zu wundern; sie hätte uns von vornherein durch die vollkommene Analogie (nach der Übertragung der Austauschlehre von der freien Luft sogar auch quantitativ) mit den Kohlensäureumsätzen nahegelegt werden müssen. Daß bei diesen die Vorgänge für das Pflanzenleben doch eine große Bedeutung haben, jene der Wasserumsätze aber offenbar nicht, hängt einfach damit zusammen, daß ein sehr geringer Kohlensäuregehalt schon wirksam wird.

Das gleiche ungünstige Ergebnis folgt nun auch für die von so manchen Seiten als möglich, sogar als ausschlaggebend hingestellten Umlagerungen von Wasser im Boden. Man geht davon aus, daß an Stellen mit höherer Temperatur, Sättigung vorausgesetzt, höherer Dampfdruck herrscht als in kühleren Schichten; das soll eine Überdestillation und eine Anreicherung von Wasser an den kalten Stellen bedingen. Auf diese Weise sollen Mengen umgelagert werden, die für die Wasserversorgung der Pflanzen, ja für die ganze Verteilung des Bodenwassers maßgebend wären.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

§ 24. Kritik der Ansichten über die Wirkung der Diffusionsströme. Wir wollen nachholen, was bei Aufstellung jener Lehre versäumt wurde, und einmal wirklich berechnen, wie groß die Leistung der Diffusion des Wasserdampfes durch lufterfüllte Bodenkapillaren beim vorhandenen Dampfdruckgefälle sein kann. Aber eigentlich brauchen wir die Rechnung gar nicht durchzuführen, wir sind dessen ja schon durch die einfache Analogie mit der Kohlensäure enthoben. Der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft ist von derselben Größenordnung wie der der Kohlensäure, bei 0° Temperatur 0·20 gegen 0·14, es folgt daraus dasselbe Verhältnis der durch Diffusionsvorgänge übertragenen Mengen zu den größeren durch Austausch übermittelten, und wenn wir oben diese schon so winzig klein gefunden haben, so gilt dies um so mehr von den durch Diffusionsströme überdestillierten.

Schon die Berechnung nach der Diffusionsgleichung erweist jene Theorie als unhaltbar; sie entspricht aber noch einer anderen zwingenden Forderung nicht: an jeder Stelle von Verdampfung verschwindet nämlich eine Wärmemenge von etwa 580 kal. für jedes Gramm verdampften Wassers, die gleiche taucht an der Stelle der Kondensation wieder auf (Verdampfungs-, beziehungsweise Kondensationswärme). Nehmen wir nun an, daß nur die geringfügige Menge, die 1 *mm* Niederschlagshöhe entsprechen würde, in den tieferen Bodenschichten, etwa in der Nähe des Grundwasserspiegels verschwinde, um in höheren Schichten wieder aufzutreten, dann würden dort auf jeden Quadratmeter 580 *kg*/kal. verbraucht werden, hier ebensoviel auftauchen. Angenommen, die Ablagerung spiele sich in einer 5 *cm* dicken Schicht ab, deren spezifische Wärme (auf die Einheit des Volumens bezogen) etwa gleich 1 sei, dann ergäbe das schon eine Erwärmung um fast 12°; und wenn man mit Mengen rechnet, die praktisch in Betracht kommen, dann vielleicht eine ebensolche Erwärmung in einer 50 *cm* dicken Schicht. Nun hat man nie derartige Temperaturänderungen beobachtet, ja auch kleine Bruchteile davon hätten bei den Messungen der Bodentemperatur nicht entgehen können, denn da läßt sich das Fortwandern der Temperaturwellen in die Tiefe hinab, läßt sich der gesamte Wärmeumsatz ziemlich genau erfassen und rechnerisch verfolgen.[1] Schon aus diesem Grunde hätte die Theorie, die insbesondere in Rußland einigen Boden gewonnen hat, aufgegeben werden müssen.

§ 25. Zusammenfassung. Allgemeine Bodenkunde wird immer auf sichere Kenntnisse der physikalischen Grundlagen und auf Beherrschung physikalischer Forschungsmethoden angewiesen sein. Dazu gehört auch das Experiment, das uns z. B. im vorliegenden Fall doch instand gesetzt hat, die verwickelten Verhältnisse,

[1] Es müßte ja, da man das Verdunsten im allgemeinen nahe an die Grenze des Grundwassers verlegt, in jenen Tiefen ein dauerndes Temperaturminimum bestehen — das Gegenteil zu den Meßbefunden.

wie sie schon unter einfachen Bedingungen auftreten, klarzulegen (§§ 2 bis 5).

Wenn für einen sandigen Boden nachgewiesen wurde, wie durch ansteigendes Wasser Luft nicht nur ausgetrieben, sondern auch abgesperrt, für die Umsätze im Boden ausgeschaltet wird; wenn gezeigt wurde, wie dies alles sich auswirkt auf die Bewegungsfähigkeit der Luft im Boden, sobald Luftdruckänderungen an der Oberfläche auftreten, so sind dies sicherlich charakteristische bodenkundliche Angaben, die sich mit entsprechender Sorgfalt auf andere Fälle übertragen lassen (§§ 6 bis 14).

Heranziehung meteorologischer Beobachtungen ist wieder notwendig, wenn man die Folgerungen jener Tatsachen ziehen will, ja man sollte die Grenze der Wetter- oder der Klimakunde nicht, wie es eigentlich immer noch geschieht, an die Erdoberfläche verlegen, sondern die Meteorologie insbesondere in den Gebieten der Temperatur und der Wasserführung auch in die obersten Bodenschichten hinein treiben, soweit eben zeitliche Schwankungen merklich werden, soweit auch der Lebensraum der Pflanzen reicht. Wir konnten so nachweisen, daß es die bisher vollkommen vernachlässigten kurzen Luftdruckschwankungen sind, die man als maßgebend für die Bodenatmung, als hauptsächlichste Träger der Umsätze von Kohlensäure aus dem Boden, von Sauerstoff in den Boden hinein anzunehmen hat, und daß ihre zeitliche und örtliche Verteilung, von der uns erst wenige Züge bekannt sind, die scheinbare Unabhängigkeit beobachteter hoher Kohlensäuregehalte von Witterungszuständen bedingt (§§ 16 bis 22). Ferner wurde auch auf Grund der vollkommenen Analogie zwischen Wasserdampf- und Kohlensäuregehalt nachgewiesen, daß nie von einer irgendwie erheblich werdenden Kondensation von Wasser im Boden im Wege von Diffusionsströmen die Rede sein darf (§§ 23, 24). Auf jeden Fall konnten auch die Methoden der Bestimmung der Bodenatmung auf direktem oder indirektem Weg einer scharfen Kritik unterzogen und die Wege angegeben werden, auf welchen sie zu verbessern wären (§ 20).

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Untersuchung der Turbulenz in der freien Luft mit Unterstützung der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft in Berlin ausgeführt. Sie soll dazu beitragen, eine empfindliche Lücke in unseren Vorstellungen von den lebenswichtigen Umsätzen von Kohlensäure, Sauerstoff und Wasserdampf auszufüllen und insbesondere jene Vorgänge klarlegen, in denen Atmosphäre und Boden in Wechselwirkung treten.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

Jahr/Year: 1929

Band/Volume: 138_2a

Autor(en)/Author(s): Schmidt Wilhelm F., Lehmann Paul

Artikel/Article: Versuche zur Bodenatmung. 823-852