

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Forstverein
<b>Band:</b>	121 (1970)
<b>Heft:</b>	4
<b>Artikel:</b>	Beitrag zur Kenntnis von vier Laubmischwaldstandorten im Lehrwald der ETH
<b>Autor:</b>	Flühler, H. / Gysi, C.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-766901">https://doi.org/10.5169/seals-766901</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.01.2026

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

# **Beitrag zur Kenntnis von vier Laubmischwaldstandorten im Lehrwald der ETH**

Von *H. Flühler und Ch. Gysi*

(an der Professur für Bodenphysik ETH, c/o Eidg. forstl. Versuchsanstalt,  
Birmensdorf/Zürich)

Oxf. 181.3:114

## **Teil II Wasserhaushalt**

### *Inhalt*

#### **Einleitung**

1. Die Witterung in der Vegetationsperiode 1967
2. Die Wasserbindung als Funktion der Zeit und Bodentiefe
  - 2.1 Begriffe, Meßtechnik, Versuchsanlage und Darstellung der Ergebnisse
  - 2.2 Die Schwankungen des Wasserspiegels
  - 2.3 Die zeitliche Veränderung der Saugspannung im ungesättigten Boden
3. Wassersorption des natürlich gelagerten Bodens und Verwertbarkeit des Bodenwassers
  - 3.1 Begriffe, Methoden und Darstellung
  - 3.2 Die zeitliche Veränderung der verwertbaren Wassermenge
  - 3.3 Zusammensetzung des Porenvolumens nach Wasserbindung, Verwertbarkeit und Luftanteil
4. Schlußfolgerungen

#### **Einleitung**

Die vier im 1. Teil dieses Beitrages beschriebenen Laubmischwaldstandorte lassen sich anhand der untersuchten Wasserhaushaltsfaktoren eindeutig voneinander unterscheiden (SZF 1970/Nr. 3).

Eines der Untersuchungsobjekte liegt im Ahorn-Eschen-Wald, eines im feuchten Eichen-Hagebuchen-Wald und zwei im frischen Buchenmischwald.

Wir untersuchten die Veränderungen der Wasserbindung im Laufe der Vegetationsperiode 1967 und verfolgten die Bewegungen des Wasserspiegels. Die Geschwindigkeit der natürlichen Entwässerung und das Angebot an pflanzenverwertbarem Wasser sind von Standort zu Standort sehr verschie-

den. Im Laufe der Vegetationsperiode änderte nicht nur die Menge an verwertbarem Bodenwasser, sondern auch ihre örtliche Verteilung im Bodenprofil. Ebenso verhalten sich Anteil und Verteilung der luftgefüllten Poren. Diese Merkmale sind standortsspezifisch.

Der Wasserhaushalt wird aber nicht nur von den Bodeneigenschaften und der geologischen Unterlage geprägt, auch die Vegetation selbst hat einen maßgeblichen Einfluß. Sie hält einen Teil des Niederschlags zurück und entzieht dem Boden bedeutende Mengen Wasser. Wenn wir in dieser Arbeit auf Zusammenhänge zwischen Boden und Wasserhaushalt hinweisen, dann geschieht das unter der Voraussetzung, daß der Boden nur ein Ausschnitt und Ausdruck des ganzen Standortes ist.

Das Hauptgewicht liegt deshalb nicht auf der Kausalität solcher Zusammenhänge, sondern auf der Feststellung gewisser Fakten wie zum Beispiel Wasserangebot und Durchlüftungszustand.

### 1. Die Witterung in der Vegetationsperiode 1967

In der Figur 1 sind die monatlichen Niederschläge des Untersuchungsjahres 1967 und die mittleren monatlichen Niederschlagsmengen von 1901 bis 1960 der MZA Zürich aufgezeichnet (Uttlinger, 1966).

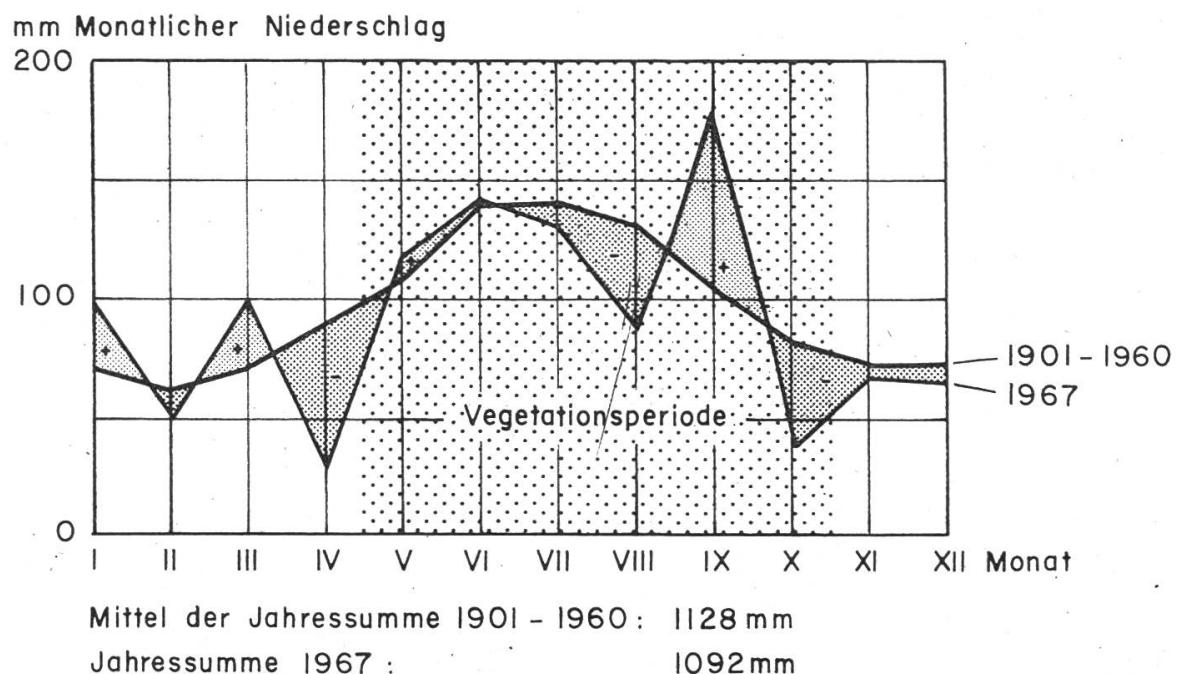


Fig. 1

Monatliche Niederschläge 1967 und langjährige Monatsniederschlagsmittel der Vergleichsstation MZA Zürich

Dem Witterungsbericht der Meteorologischen Zentralanstalt (Th. Guttermann, 1967) entnehmen wir folgende Beurteilung des Witterungsverlaufes 1967:

«Das Jahr 1967 ist gekennzeichnet durch hohe Temperaturüberschüsse, meist etwas unternormale Niederschlagsmengen und leicht erhöhte Sonnenscheindauer . . . Die Jahressummen der Niederschläge der einzelnen Stationen liegen im allgemeinen bis 10% unter dem Mittel.»

Im Vergleich zum langjährigen Mittel waren die Monate April, August und Oktober sehr trocken, der Monat September sehr naß. Bis auf die erste Hälfte des Aprils liegen diese Monate innerhalb der Vegetationsperiode. Die etwas unter-, aber nicht abnormalen Niederschlagsmengen und die hohen Temperaturen bewirkten sicher einen eher überdurchschnittlichen Wasserkonsum. In Jahren, die in klimatischer Hinsicht nicht wesentlich vom langjährigen Mittel abweichen, ist deshalb eher etwas mehr Bodenwasser verfügbar als in der Vegetationsperiode 1967. Die Berechnung des Angebots an verwertbarem Wasser, basierend auf den Untersuchungsergebnissen der Vegetationsperiode 1967, ergeben also ein pessimistisches Bild des Wasserhaushaltes in den Böden der vier Standorte. Die Unterschiede im Wasserhaushalt der vier Böden treten in trockeneren Perioden besonders deutlich hervor. Die eher trockene Vegetationsperiode des Jahres 1967 war deshalb ein willkommener Zufall.

## 2. Die Wasserbindung als Funktion der Zeit und Bodentiefe

### 2.1 Begriffe, Meßtechnik, Versuchsanlage und Darstellung der Ergebnisse

Im Bodenwasser wirken Zug- und Druckkräfte. Die Zugkräfte resultieren aus der kapillaren Attraktion in den Poren und der Oberflächenspannung jener Wasserfilme, welche die Bodenteilchen umhüllen. Druckkräfte sind vor allem unterhalb eines Wasserspiegels wirksam. Beziehen wir diese Kräfte auf eine Fläche, dann sprechen wir einerseits vom positiven, hydrostatischen Druck und andererseits von der Saugspannung. Diese positiven und negativen Druckgrößen mißt man als Gewicht einer Wassersäule von 1 cm<sup>2</sup> Querschnitt und einer bestimmten Höhe h. Als Maßeinheit verwendet man eine Länge, in der Regel WScm (=Wassersäule-cm). Eine Saugspannung von beispielsweise 100 WScm entspricht der Zugkraft, die von einer 100 cm hohen Wassersäule auf einen Quadratzentimeter der Aufhängefläche ausgeübt wird. Wenn eine Pflanze Wasser aufnehmen will, dann muß sie diese Kraft, mit der das Wasser an dem Boden gebunden ist, überwinden.

Der gesamte Energieinhalt des Bodenwassers pro Masseneinheit beträgt:

$$\Psi_{\text{tot}} = \Psi + \Psi_g \quad (\text{Richard, F. 1969}) \quad (1)$$

Mit  $\Psi_g$  bezeichnet man das Gravitationspotential, also die Lageenergie pro Masseneinheit. Das Wasserpotential  $\Psi$  setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_p \quad (2)$$

Unter dem Matrixpotential  $\Psi_m$  versteht man die Bindungsenergie pro Masseneinheit Wasser.  $\Psi_m$  ist numerisch gleich der Saugspannung ( $-p$ ). Die Dimension des Matrixpotentials  $\Psi_m$  ist Energie pro Masse, die der Saugspannung Kraft pro Fläche.

Das Druckpotential  $\Psi_p$  ist nur dann größer als Null, wenn am beobachteten Ort ein positiver hydrostatischer Druck herrscht, das heißt dann, wenn dieser Ort unterhalb des Wasserspiegels liegt. Bei Wassersättigung, also unterhalb des Wasserspiegels, ist das Matrixpotential  $\Psi_m$  gleich Null, das heißt  $\Psi \sim \Psi_p$ . Oberhalb des Wasserspiegels ist das Druckpotential gleich Null, das heißt  $\Psi \sim \Psi_m$ .

In unserer Felduntersuchung haben wir die zeitliche Veränderung von  $\Psi$  in vier verschiedenen Tiefen des natürlich gelagerten Bodens verfolgt. Als Meßinstrument verwendeten wir das Tensiometer (Brülhart, 1969).

Quecksilbermanometer, bestehend aus einem  
offenen Hg.- Gefäß und einer  
PVC - Kapillare

Rohr mit möglichst gut entlüftetem  
Wasser gefüllt.

Bodentiefe z

Poröse Tonkerze, in innigem Kontakt  
mit dem Boden

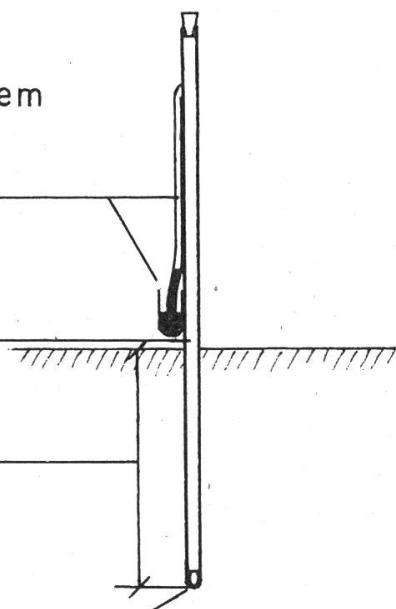


Fig. 2

Schematische Darstellung des Tensiometers

Ein Tensiometer besteht aus einer wassergefüllten, porösen Tonkerze, die mit einem Manometer verbunden ist. Die Wasserfäden in den feinen Poren der Tonkerze verbinden das Bodenwasser mit dem Wasser im Innern des Tensiometers und übertragen die im Bodenwasser wirksame Spannung auf das Manometer. Durch Wasseraustausch zwischen Boden und Tonkerze paßt sich die Steighöhe der Manometerflüssigkeit der herrschenden Wasserspannung im Tensiometer-Boden-System an. Mit Tensiometern können wir Saugspannungen bis 800 WScm (= 0,8 at) messen.

Nähert sich der Unterdruck dem Wert 1000 WScm, dann wird vorerst die im Wasser gelöste Luft frei, da die Löslichkeit der Gase in Wasser mit sinkendem Druck kleiner wird. Bei einer weiteren Druckverminderung, also

einer Erhöhung der Zugspannung im Tensiometerwasser, geht ein Teil dieses Wassers in die gasförmige Phase über, das heißt, es verdampft, da der Siedepunkt dank Druckerniedrigung erreicht ist. Wasser ist in der flüssigen Form inkompressibel, deshalb eignet es sich zur Übertragung von Spannungen. In der gasförmigen Phase ist das Volumen vom Druck abhängig. Steigt der Unterdruck in einem Tensiometer, das teilweise mit Luft oder Wasserdampf gefüllt ist, dann wird das Volumen dieses gasförmigen Anteils vergrößert. Damit sich ein neues Gleichgewicht einstellt, muß also entsprechend dieser Volumenvergrößerung zusätzlich Wasser aus der Kerze in den umgebenden Boden austreten. Bildet sich im Tensiometer Luft oder Wasserdampf, dann wird der Feuchtigkeitsgehalt an der Meßstelle zu stark durch das Meßgerät selbst beeinflußt. Deshalb ist der Meßbereich des Tensiometers bei 800 WScm begrenzt.

Auf jedem der vier Standorte wurden 36 Tensiometer systematisch auf einer Fläche von  $9 \times 6$  m angeordnet. Die Tensiometer reichten in folgende Tiefen:

- 12 Tensiometer 10 cm tief unter die Bodenoberfläche
- 12 Tensiometer 50 cm tief unter die Bodenoberfläche
- 6 Tensiometer 100 cm tief unter die Bodenoberfläche
- 6 Tensiometer 150 cm tief unter die Bodenoberfläche

Da wir pro Horizont verhältnismäßig wenig Tensiometer setzen konnten, waren wir auf einen möglichst homogen durchwurzelten Bodenraum angewiesen. Deshalb haben wir bei der Wahl der Versuchsflächen den Einflußbereich von Altbäumen gemieden. Diese entziehen dem Boden lokal mehr Wasser und verursachen eine inhomogenere Saugspannungsverteilung als ein jüngerer Bestand (J. Gottesmann, 1969). Die Tensiometerablesungen erfolgten in der Regel fünfmal wöchentlich. Im Hangbuchen- und Eichen-Hagebuchen-Wald erstreckten sich die Messungen über  $8\frac{1}{2}$  Monate, vom 8. März bis 22. November, im Plateaubuchenwald und Ahorn-Eschen-Wald über 7 Monate, vom 21. April bis 22. November 1967.

Die Meßwerte wurden für jede Versuchsfläche horizontweise gemittelt. Mit jeder Ablesung erhielten wir für jeden Standort eine Information über die vertikale Saugspannungsverteilung, das heißt die momentanen, durchschnittlichen Saugspannungswerte in den Tiefen 10, 50, 100, 150 cm. Durch lineares Interpolieren ermittelten wir die Lage der Saugspannungen von 0,20; 180; 690 WScm. Mit anderen Worten, wir berechneten die vertikale Ausdehnung jener Bodenräume, in welchen die Saugspannung innerhalb eines bestimmten Saugspannungsbereiches lag. Wir stellten so die vertikale Verteilung von fünf Saugspannungsbereichen dar, die nachstehend aufgeführt sind.

Das Aneinanderreihen der Momentablesungen ergab uns die Saugspannungsbereiche als Funktion der Zeit und Bodentiefe (hinterste, zusammengefaltete Darstellung 7, Darstellungsart nach A. Brühlhart).

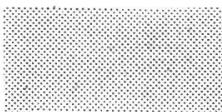
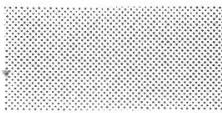
Darstellung 7 zeigt die zeitliche Entwicklung

- der täglichen Niederschläge (oberstes Figurenband)
- der vertikalen Saugspannungsverteilung (Figurenbänder A)
- des Angebots an schwer und leicht verwertbarem Wasser (Figurenbänder B).

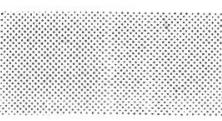
Für eine ökologische Interpretation ist die Unterteilung in fünf Saugspannungsbereiche zu fein. Aus zwei Gründen war es aber dennoch notwendig, so fein zu gliedern:

Erstens beabsichtigten wir die zeitliche *Veränderung* der vertikalen Saugspannungsverteilung möglichst deutlich zu veranschaulichen, da diese für die ausgewählten Standorte kennzeichnend ist. Zweitens ist die Darstellung 7 die *Grundlage* für die Berechnung des Angebots an verwertbarem Wasser und mußte deshalb möglichst genau sein (vergleiche Abschnitt 3).

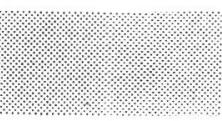
Das Angebot an verwertbarem Wasser und die Durchlüftungsverhältnisse ändern sich mit zunehmender Saugspannung kontinuierlich. Die Wahl der Grenzen ist bis zu einem gewissen Grad willkürlich. Die zwischen den angenommenen Saugspannungsgrenzen liegenden Werte weisen jedoch wie im folgenden gezeigt wird, charakteristische Eigenschaften auf (vergleiche Darstellung 7).

<i>Signatur</i>	<i>Saugspannungsbereich</i>	<i>Eigenschaften</i>
	$\Psi_m = 0, \Psi_p \geq 0 \text{ WScm}$ positiver, hydrostatischer Druck	Wirkt im Bodenwasser ein positiver hydrostatischer Druck, dann sind praktisch alle Hohlräume mit Wasser gefüllt. Der Boden ist mit Wasser gesättigt.
	$0 < \Psi_m \leq 20 \text{ WScm}$	Der Boden ist nahezu mit Wasser gesättigt. Nur die größten Grobporen sind entleert. Die mit Luft gefüllten Poren bilden in der Regel kein zusammenhängendes Bodenluftsystem. Die Linie der Saugspannung 0 WScm zeigt uns die Lage des Wasserspiegels. In bindigen Böden mit hohem Kapillarsaum ist der Übergang vom gesättigten zum partiell entwässerten Bodenraum von der Pflanze aus gesehen bedeutungslos. Für die Wurzeln sind die Wachstumsbedingungen unmittelbar ober- und unterhalb des Wasserspiegels nicht wesentlich verschieden. Der Begriff «Wasserspiegel» impliziert in solchen Fällen eine physiologisch gesehen falsche Vorstellung, da damit nicht die Grenzfläche zwischen gut und schlecht durchlüfteten Bodenräumen gemeint ist, sondern nur der oberste Ort des vollständig mit Wasser gesättigten Bodenbereichs.

Liegt die Saugspannung innerhalb dieser ersten beiden Saugspannungsbereiche ( $\Psi \leq 20$  WScm), dann begegnen die Wurzeln einem Luxusangebot an verwertbarem Wasser. Ein wesentliches Glied des pflanzlichen Energiehaushaltes ist der Sauerstoff. Dauert der Zustand des Wasserüberflusses längere Zeit an, dann verarmt das Bodenwasser an Sauerstoff. Die Empfindlichkeit gegen Sauerstoffmangel ist von Baumart zu Baumart sehr verschieden. Die Wurzeln der Fichte beispielsweise reagieren auf Sauerstoffarmut sehr empfindlich, während diejenigen der Schwarzerle weitgehend unempfindlich sind.

	$20 < \Psi_m \leq 180$ WScm	Ein großer Teil der Grobporen ist entleert. Der Boden ist immer noch sehr feucht.
	$180 < \Psi_m \leq 690$ WScm	Die Schwerkraft und die Vegetation haben dem Boden das nur leicht gebundene Wasser entzogen. In diesem Zustand ist der Boden gut durchlüftet.

Liegt der Wassergehalt eines Bodens im Bereich der Saugspannungen 20 bis 690 WScm, dann ist in der Regel genügend leicht verwertbares Wasser vorhanden. Die Wasserversorgung bietet der Pflanze in diesem Fall keine Probleme. Höchstens im untersten Teil dieses Saugspannungsbereichs können Durchlüftungsprobleme entstehen.

	$\Psi_m > 690$ WScm	Der Vorrat an leicht verwertbarem Wasser ist nahezu erschöpft. Wasser ist laut Definition dann leicht verwertbar, wenn es mit weniger als 800 WScm (0,8 at) an den Boden gebunden ist. Im Bereich zwischen 800–1000 WScm verlangsamen die Pflanzen ihr Wachstum (Rose 1966). Die Wasseraufnahme ist erschwert. Die Pflanze muß auf der einen Seite eine höhere Bindungsenergie überwinden. Auf der anderen Seite ist der Wassernachschub im Boden und in der Pflanze selbst infolge der geringen Wasserleitfähigkeit gehemmt. Steigt die Saugspannung von 0–690 WScm, dann nimmt die leicht verwertbare Wassermenge in allen Horizonten der vier Standorte um mehr als 90 % ab.
---	---------------------	---

## 2.2 Die Schwankungen des Wasserspiegels

Die Schwankungen des Wasserspiegels in den Böden der vier Standorte bestätigen die Untersuchungen über die Grundwasserverhältnisse, die H. Leib und Gut und Sp. Dafis (1963) in einem angrenzenden Gebiet

des Lehrwaldes unternommen haben: «Die maximale Grundwasserhöhe wird allgemein kurz nach der Schneeschmelze, zumeist vor Beginn der Vegetationsperiode (März, April) erreicht. Im September oder Oktober erreicht sie in den meisten Jahren den tiefsten Stand.»

Der mit Wasser gesättigte Bodenkörper der untersuchten Standorte ist nur wenige Meter mächtig. Die schlecht durchlässige, wasserstauende Schicht ist oberflächennah. Im Unterboden dieser Standorte, das heißt in jenem Teil des Bodenprofils, der vom Wasserstau am häufigsten erfaßt wird, bewegt sich das Wasser außerordentlich langsam. Die Durchlässigkeitskoeffizienten ( $k_s$ -Werte) dieser dichten Horizonte liegen in der Größenordnung von  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  cm/sec, bzw. von Zentimetern oder Millimetern pro Tag.

Die im vorangegangenen Abschnitt 2.1 gemachten Überlegungen zur Bedeutung des Wasserspiegels für den Lebensraum der Wurzeln zeigten, daß der Wasserspiegel keine physiologische Schwelle ist. Es ist weitgehend von der Baumart abhängig, ob ein häufig wassergesättigter Bodenraum durch die Wurzeln erschließbar ist. Trotzdem legen wir auf die Bewegungen des Wasserspiegels einen gewissen Wert, da diese ein offenkundiger, leicht meßbarer Ausdruck für die natürliche Entwässerungsfähigkeit des betreffenden Standortes sind. Der Verlauf der Wasserspiegelschwankungen gibt uns Hinweise auf die Dauer der Perioden schlechter Bodenlüftung. Die sich im Laufe der Vegetationsperiode verändernde Lage des Wasserspiegels ist aus dem Verlauf der 0-WScm-Linie in der Darstellung 7 ersichtlich:

- Anfang April stand der Wasserspiegel im Eichen-Hagebuchen-Wald 30 bis 60 cm tief unter der Bodenoberfläche. Während der zwei niederschlagsarmen Wochen vor dem Laubausbruch, vom 10.—25. April, sank der Wasserspiegel um 90 cm bis in eine Tiefe von 150 cm. In diesem Zeitpunkt reichte der Wasserspiegel im Ahorn-Eschen-Wald bis 70 cm tief unter die Bodenoberfläche.
- In den Monaten Mai und Juni schwankte der Wasserspiegel im Ahorn-Eschen-Wald meist zwischen 30—70 cm, im Eichen-Hagebuchen-Wald zwischen 30—180 cm Bodentiefe. Nach der niederschlagsreichen Periode vom 7.—15. Juni sank der Wasserspiegel im Eichen-Hagebuchen-Wald täglich um 10 cm, im Ahorn-Eschen-Wald um 4 bis 5 cm. Im Profil des Eichen-Hagebuchen-Waldes bewegte sich das Wasser im gesättigten Bereich schneller. Diese Feststellung deckt sich mit den Aussagen, die wir in der Standortsbeschreibung (Flühler und Gysi, 1970) anhand der im Laboratorium bestimmten gesättigten Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten ( $k_s$ -Werte) gemacht haben.
- In den 180 cm tief gesteckten Grundwasserrohren war im Eichen-Hagebuchen-Wald vom 5. Juli an kein Wasserspiegel mehr zu beobachten. Im Ahorn-Eschen-Wald hingegen sank der Wasserspiegel einzig Ende August/Anfang September tiefer als 180 cm. In der übrigen Zeit der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode befand er sich stets tiefer als 120 cm, beeinflußte aber

die Feuchtigkeitsverteilung im Wurzelraum von unten her. In dieser Zeitspanne, als die Bäume den Kontakt mit dem Wasserspiegel verloren hatten, nahmen die Saugspannungswerte im Boden des Ahorn-Eschen-Waldes von oben nach unten deutlich ab, das heißt die Wassergehalte nahmen mit der Tiefe zu. Im Eichen-Hagebuchen-Wald wurden in 150 cm Tiefe oft höhere Saugspannungswerte gemessen als im darüberliegenden Meßhorizont. Dieser Boden zeigt die Tendenz, von unten her auszutrocknen. Der Ahorn-Eschen-Wald wird praktisch immer von einem Wasserspiegel beeinflußt. In diesem Standort schwankt der Wasserspiegel sehr häufig innerhalb des Wurzelraumes. Er bewegt sich langsamer als im Eichen-Hagebuchen-Wald. Der Bestand des Eichen-Hagebuchen-Waldes wurde nur am Anfang der Vegetationsperiode vom Wasserspiegel beeinflußt.

In den beiden Buchenmischwald-Standorten stellte sich in der Vegetationsperiode nur kurzfristig ein Wasserspiegel ein. In dieser Zeitspanne reichten die Niederschläge in der Regel nicht aus, Teile des Wurzelraumes ganz zu sättigen, da das Wasser versickern kann oder durch die Vegetation entzogen wurde. Nur während der Vegetationsruhe oder bei außerordentlich hohen Niederschlägen in der Vegetationsperiode stellt sich in diesen Böden ein Wasserspiegel ein.

Die Dauer der Staunässe nach Beginn der Vegetationsperiode war auf den vier Standorten recht verschieden. In der nachstehenden Tabelle vergleichen wir die Zahl der Tage, an denen der Wasserspiegel nach dem 25. April den untersten Teil des Wurzelraumes erfaßte (120 cm) bzw. die Zahl der Tage, an denen der Wasserspiegel bis 50 cm unterhalb die Oberfläche, das heißt in den Wurzelraum hineinreichte:

*Tabelle 1*

<i>Standort</i>	<i>Zahl der Tage, an denen die Lage des Wasserspiegels höher als 120 cm bzw. 50 cm unter der Bodenoberfläche war</i>	
Plateaubuchenwald	13	3
Hangbuchenwald	19	8
Eichen-Hagebuchen-Wald	30	8
Ahorn-Eschen-Wald	89	20
Dauer der Vegetationsperiode: 180 Tage		

Bezeichnen wir einen Boden dann als normaldurchlässig, wenn er 2 bis 3 Tage nach profilmfassender Sättigung soweit entwässert ist, daß er für das pflanzliche Wachstum einerseits genügende Wasserreserven und anderseits

eine ausreichende Durchlüftung aufweist, dann dürfen wir die beiden Buchenmischwaldstandorte in diese Kategorien einreihen.

Der Boden des Eichen-Hagebuchen-Waldes ist gehemmt durchlässig, da er langsamer entwässert wird; der Boden des Ahorn-Eschen-Waldes ist unvollkommen durchlässig; er ist periodisch staunaß.

### 2.3 Die zeitliche Veränderung der Saugspannung im ungesättigten Boden

Die Saugspannung  $-p$  und das Potential  $\Psi$  verändert sich, vereinfacht dargestellt, mit der Zeit und Bodentiefe,  $\Psi = f(t, z)$ . Diese Funktion ist in der Darstellung 7 in den Figurenbändern A dargestellt. Die Zeitachse ist horizontal, die Bodentiefe vertikal orientiert. Die Neigung der Linien gleicher Saugspannung in einer bestimmten Tiefe  $z$  ist gleich der partiell nach der Zeit abgeleiteten Funktion  $\Psi = f(t, z)$ , also  $\left(\frac{\partial \Psi}{\partial t}\right)_z = \text{const.}$  Für unsere Berechnungen können wir den Differentialquotienten nicht verwenden, da wir die dazugehörige Funktion  $\Psi = f(t, z)$  nicht kennen. An dieser Stelle verwenden wir eine Annäherung, den Differenzenquotienten  $\frac{\Delta \Psi}{\Delta t}$ . Die Potentialänderung  $\frac{\Delta \Psi}{\Delta t}$  ist numerisch gleich der Saugspannungsänderung  $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ . Wir betrachten also die Saugspannungsänderung  $\Delta p$  (WScm) in der Tiefe  $z$  während des Zeitintervalls  $\Delta t$  (Tage).

In der Figur 3 ist die durchschnittliche, tägliche Saugspannungsänderung  $\frac{\Delta p}{\Delta t}$  der einzelnen Meßhorizonte dargestellt. Diese Werte wurden für zwei hinsichtlich Witterungs- und Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse verschiedene Perioden berechnet: Für den feuchten Monat Mai und die trockene Herbstperiode September/Oktober.

Die Saugspannungsänderungen in den vier Meßtiefen sind gegenseitig voneinander abhängig und dürfen deshalb nicht aus ihrer Umgebung gelöst betrachtet werden. Die Darstellung der vier täglichen Saugspannungsänderungen ergeben in beiden Perioden für jeden Standort ein ähnliches Bild (Fig. 3). Vorderhand ist es uns nicht möglich, ursächliche Zusammenhänge zwischen den Saugspannungsänderungen einerseits und Witterung, Vegetation, Profilaufbau und Struktureigenschaften der Horizonte andererseits eindeutig nachzuweisen. Verschiedene Aussagen über den Wasserhaushalt, die auf Grund anderer Untersuchungen im ersten Teil dieser Arbeit gemacht wurden, scheinen sich aber zu bestätigen.

- Die Darstellungen der täglichen Saugspannungsänderungen des Ahorn-Eschen-Waldes Fig. 3 zeigen sowohl im Mai wie auch im September/Oktober ähnliche Tendenzen. Der obere Profilteil des Eichen-Hagebuchen-Waldes wird schneller benetzt als jener im Ahorn-Eschen-Wald. Der Boden des Eichen-Hagebuchen-Waldes ist offenbar durchlässiger,

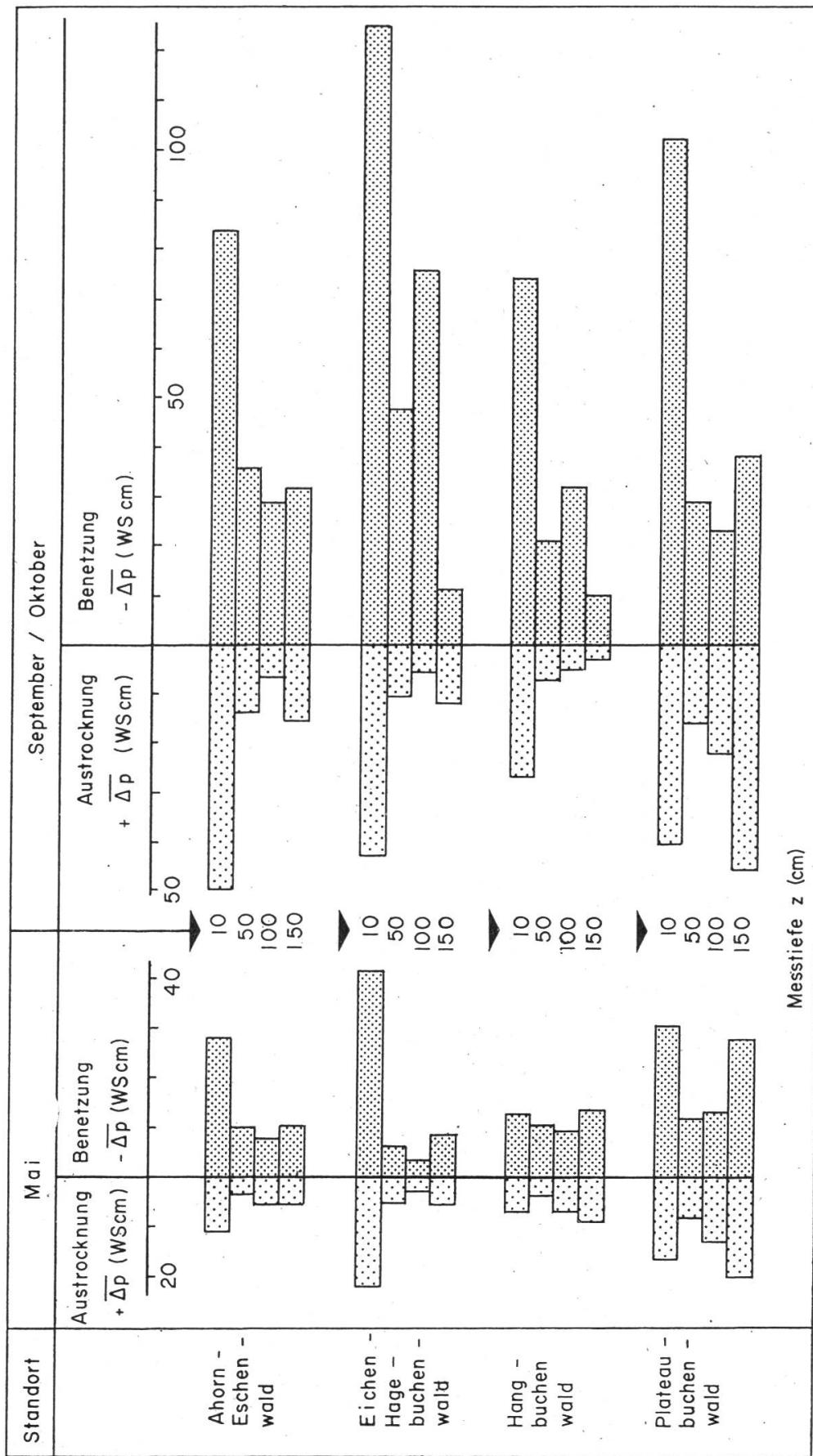


Fig. 3

Durchschnittliche, tägliche Saugspannungsänderung ( $\pm \overline{\Delta p}$ ) der vier Laubmischwaldstandorte in der Frühjahrs- und Herbstperiode, dargestellt in den Tiefen 10, 50, 100, 150 cm.

besser drainiert. Anhand der Durchlässigkeitskoeffizienten  $k_s$  und der Lagerungsdichte  $\varrho_a$  kamen wir zum gleichen Schluß (Tabellen 2 und 4, I. Teil).

- Die Saugspannungen ändern im A<sub>1</sub>-Horizont am schnellsten. Der Trocknungsvorgang im Plateaubuchenwald macht dabei eine Ausnahme. Dort ändert die Saugspannung im untersten Horizont eher schneller als im Humushorizont. Im Humushorizont ändern die Saugspannungen bzw. die Wassergehalte wohl deshalb so schnell, weil dieser Bodenbereich am intensivsten durchwurzelt und aufgelockert ist. Der Wasserkonsum und die Durchlässigkeit sind in diesem Horizont daher besonders groß.
- Im feuchten Monat Mai waren die Saugspannungsänderungen im Hangbuchenwald profilmässig sehr ähnlich. Die Unterschiede zwischen den  $\overline{\Delta p}$ -Werten einer Meßtiefe in der feuchten und trockenen Periode sind im Hangbuchenwald gering. Diese beiden Feststellungen deuten darauf hin, daß der Wasserhaushalt dieses Standortes sehr ausgeglichen ist.
- Der unterste Meßhorizont im Plateaubuchenwald zeigt stets wesentlich grössere Saugspannungsänderungen als die mittleren Profilteile. Das hängt mit dem höheren Tongehalt und der schlechteren Durchlässigkeit der beiden B<sub>T</sub>-Horizonte zusammen (vergleiche Tabelle 8, I. Teil).

Mit der Berechnung der durchschnittlichen, täglichen Saugspannungsänderungen versuchten wir die verschiedenartige, geometrische Anordnung der Saugspannungsbereiche (Darstellung 7, Figurenbänder A) numerisch auszudrücken: Im Ahorn-Eschen- und Eichen-Hagebuchen-Wald verlaufen die Saugspannungsbänder vorwiegend horizontal oder schwach geneigt. In diesen Böden reagieren die tieferen Bodenschichten auf eine oberflächliche Austrocknung langsamer. Sie lassen das Bodenwasser nur langsam durchtreten. In den Böden des Hang- und Plateaubuchenwaldes sind die Saugspannungsbänder stark geneigt bis vertikal. Die Saugspannungen ändern sich im ganzen Profilteil mehr oder weniger gleichzeitig und ähnlich. Die Saugspannung gleicht sich rasch im ganzen Profil aus.

### **3. Wassersorption des natürlich gelagerten Bodens und Verwertbarkeit des Bodenwassers**

#### *3.1 Begriffe, Methoden und Darstellung*

Mit dem Tensiometer messen wir Bindungskräfte. Die Bindungskräfte sagen nur indirekt etwas über den Wassergehalt aus. Die Saugspannung ist die unter Feldbedingungen leicht meßbare Eingangsgröße zu der im Laboratorium an natürlich gelagerten Bodenproben bestimmten Sorptionskurve.

Die Sorptionskurve ist die graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Saugspannung und Wassergehalt und ist ein Ausdruck der Struktur des Bodens. Auf jedem Standort wurde die Sorptionskurve in vier Tiefen bestimmt. Bei folgenden Saugspannungen wurden die dazugehörigen Wasser-

gehalte gemessen: 1, 20, 80, 345, 690, 15 000 WScm. Die Sorptionskurve ist ein wichtiger Bestandteil dieser Wasserhaushaltsuntersuchung. Die Porengrößenverteilung basiert auf den Werten der Sorptionskurve (Tabellen 2, 4, 6, 8, I. Teil). Die Sorptionskurve war auch Grundlage aller Wasserhaushaltsberechnungen. Anhand der im Feld gemessenen Saugspannungen und der Sorptionskurve ermittelten wir Wassergehaltsschwankungen in den vier Böden.

Im wassergesättigten Boden beträgt die Saugspannung 0 WScm. — Unter dem Einfluß eines Rückstaus treten im freien Bodenwasser Druckkräfte auf. In solchen Fällen lesen wir am Tensiometer einen positiven hydrostatischen Druck ab. Die Saugspannung  $-p$  bzw. das Matrixpotential  $\Psi_m$  ist Null. Der positive hydrostatische Druck bzw. das Druckpotential  $\Psi_p$  hat mit der Sorption des Bodenwassers nichts zu tun.

Der Wassergehalt bei 1 WScm Saugspannung in Volumenprozent ausgedrückt entspricht in bindigen Böden angenähert dem Wasservolumen bei Sättigung und darf als Maß für das totale Porenvolumen betrachtet werden.

Der kleinste in der Sorptionskurve eingezeichnete Wassergehalt entspricht der Saugspannung von 15 000 WScm. Diesen Wassergehalt nennt man «permanenter Welkepunkt» (PWP). Wasser, das mit mehr als 15 000 WScm an die Bodenmasse gebunden ist, kann von der Pflanze in der Regel nicht mehr aufgenommen werden. Es wird *nicht verwertbares Wasser*  $w_{nv}$  ( $\%_v$ ) genannt (Fig. 4).

Aus der Differenz der Wassergehalte bei  $\Psi_{\text{momentan}}$  und  $\Psi_{\text{PWP}}$ , also «momentaner Wassergehalt minus nicht verwertbare Wassermenge», ergibt sich der Volumenanteil des für die Pflanze *verwertbaren Wassers*  $w_v$  ( $\%_v$ ) (Fig. 4).

Multiplizieren wir diesen Volumenanteil mit der Mächtigkeit des Bodenraumes, in welchem diese Saugspannung festgestellt wurde, dann erhalten wir die im Augenblick vorhandene, verwertbare Wassermenge.

Der Begriff «verwertbares Wasser» wird gelegentlich auch im Sinne einer Kapazität gebraucht. In diesem Fall ist die Differenz der Wassergehalte bei Feldkapazität und beim permanenten Welkepunkt gemeint ( $\Psi_m = 345$  bzw. 15 000 WScm). Für ein bestimmtes Bodenmaterial ist diese Wassergehaltsdifferenz eine zeitunabhängige, konstante Größe.

In dieser Arbeit brauchen wir den Ausdruck «verwertbares Wasser» als eine zeitabhängige, durch die momentan herrschende Saugspannung bestimmte Größe. Je stärker das Wasser im Boden gebunden ist, desto mehr Energie muß die Pflanze für dessen Aufnahme aufbringen. Ist das Wasser mit mehr als 800 WScm an die Bodenmasse gebunden, dann verlangsamt die Pflanze infolge der erschwerten Wasseraufnahme ihre Transpiration und infolgedessen auch ihr Wachstum (Rose, 1966). Es wäre demzufolge sinnvoll gewesen, in der Darstellung 7 statt der 690-WScm-Linie die 800-WScm-Linie einzuleichen. Übersteigt die Saugspannung 700 WScm, dann begin-

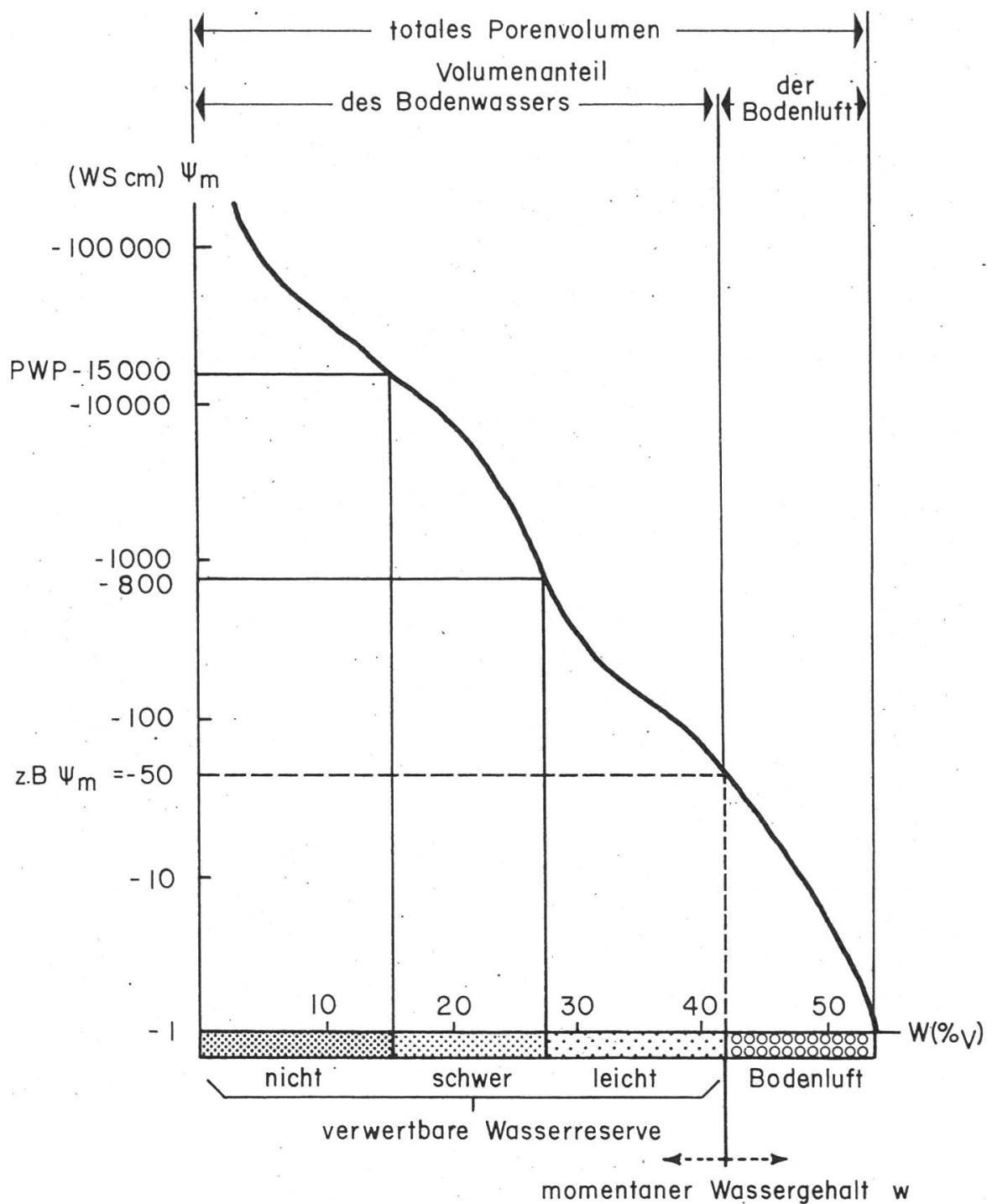


Fig. 4

Abhängigkeit des Wassergehaltes  $w$  (%V), der Wasserverwertbarkeit und des Luftanteils von der Saugspannung  $-p$  bzw. vom Matrixpotential  $\Psi_m$

nen die Tensiometer jedoch wegen der Siedepunkterniedrigung auszufallen (vergleiche Abschnitt 2.1). Aus methodischen Gründen war es deshalb angezeigt, jenen Bereich, innerhalb welchem die Saugspannung vor allem im zweiten Teil der Vegetationsperiode am häufigsten schwankte (180–750 WScm),

mit einem Saugspannungswert abzugrenzen, der sich möglichst aus allen verfügbaren und nicht nur aus einzelnen Meßwerten ergab. Gestützt auf diese Überlegungen wählten wir den Wert 690 WScm als obere Grenze dieses Saugspannungsbereiches. Wie schon erwähnt, ist bei  $\Psi_m = 690$  WScm in allen untersuchten Horizonten mehr als 90% des leicht verwertbaren Wassers aufgebraucht oder versickert. Oberhalb dieser absichtlich etwas zu tief gewählten Limite ist also praktisch kein leicht verwertbares Wasser mehr vorhanden.

In der Darstellung 7 ist in den Figurenbändern B die zeitliche Veränderung der verwertbaren Wassermenge aufgezeichnet. Die Maßeinheit der seitlich angebrachten Skala ist Liter pro m<sup>2</sup> Oberfläche und 120 cm Wurzelraumtiefe. Die im Wurzelraum vorhandene, verwertbare Wasserreserve wurde wie folgt ermittelt:

1. Bei der Feldaufnahme gliederten wir das Profil in Horizonte. Die jedem der Horizonte entnommenen Proben und die daran bestimmten Sorptionskurven sind für die betreffenden Horizonte repräsentativ. Innerhalb des in allen vier Standorten etwa gleich mächtigen Wurzelraumes (0 bis 120 cm) unterscheiden wir im Plateaubuchenwaldprofil vier, in den drei anderen Profilen drei verschiedene Horizonte.
2. Wir kennen für jeden Ablesungstag die Saugspannungswerte der vier Meßtiefen, und wir wissen auf Grund der Darstellung 7 (Figurenbänder A), in welchen Bodentiefen die Saugspannungen innerhalb eines bestimmten Bereiches liegen. Aus der Sorptionskurve eines bestimmten Horizontes lasen wir für jeden Saugspannungsbereich den mittleren Wassergehalt heraus. Diesen unterteilten wir in einen leicht und schwer verwertbaren Anteil. Der nicht verwertbare Anteil wurde vorderhand nicht berücksichtigt.
3. Diese leicht und schwer verwertbaren Anteile, in Volumenprozenten ausgedrückt, multiplizierten wir mit der Mächtigkeit jenes Bodenraumes, in dem die Saugspannungen innerhalb dieses bestimmten Saugspannungsbereiches lagen.
4. Für jeden Horizont erhielten wir also eine bestimmte, in diesem Augenblick leicht und schwer verwertbare Wassermenge. Diese Wassermengen ergaben zusammen, in Litern ausgedrückt, das Angebot an verwertbarem Wasser, das pro 120 cm Wurzelraumtiefe und pro Quadratmeter Bodenoberfläche der Pflanze zur Verfügung stand.

### *3.2 Die zeitliche Veränderung der verwertbaren Wassermenge*

Als Summenkurve über die gesamte Wurzelraumtiefe zeigt die verwertbare Wassermenge, dargestellt in den Figurenbändern B in der Darstellung 7, wieviel Wasser dem Bestand zur Verfügung steht. Diese Wasserreserve ist aber nur dann vollumfänglich verfügbar, wenn der Boden homogen durchwurzelt ist. Nicht nur die Menge, auch die örtliche Zugänglichkeit für die

Pflanzenwurzeln ist entscheidend. Mit unserer Untersuchung erfaßten wir nur die potentiell verfügbare Wasserreserve. Ob der Bestand diese tatsächlich ausschöpfen kann, hängt davon ab, wie gut er diesen Boden zu erschließen vermag. Die Frage, wieviel Wasser tatsächlich zugänglich ist, hängt eng mit anderen Problemen zusammen:

- Wie sind die verwertbaren Wasserreserven im heterogenen Boden über den Wurzelraum verteilt?
- Welche Rolle spielen dabei vereinzelte Wurzeln, die deutlich tiefer reichen als der im Profil erkennbare und angenommene Wurzelraum?
- Wie sieht das Wurzelbild bestimmter Baumarten auf verschiedenen Böden aus?
- Wie schnell bewegt sich das Wasser im ungesättigten Boden zu einer Wurzel hin, die die Saugspannung in ihrer unmittelbaren Umgebung wesentlich erhöht?
- Wie schnell wächst die Wurzel aus einer Zone schlechter Wasserversorgung in feuchtere Bodenpartien? Reagiert sie überhaupt hydrotropisch? Wird sie über besser mit Wasser versorgte Zweige des Wurzelsystems mit Wasser versorgt?

In diesem Fragenkomplex haben wir einen Schritt getan, indem wir versuchten, das Wasserangebot im Wurzelraum zu erfassen.

Eine Wassergehaltsabnahme kann auf die Transpiration der Vegetation, auf die Evaporation, den Abfluß oder auf eine Kombination dieser Faktoren zurückgeführt werden. Die Darstellung 7 erlaubt keine Berechnung einer Wasserbilanz, da wir die einzelnen Faktoren nicht kennen.

Aus der Darstellung der verwertbaren Wassermenge (Darstellung 7 B) ist ersichtlich, daß während der Vegetationsperiode in allen vier Böden stets eine gewisse Wasserreserve vorhanden war. Ende August erreichte der Vorrat an verwertbarem Wasser seinen Tiefststand. Im Plateaubuchenwald waren in diesem Zeitpunkt noch 60 Liter, im Ahorn-Eschen-Wald 100 Liter, im Eichen-Hagebuchen-Wald noch rund 120 Liter pro m<sup>2</sup> Bodenoberfläche und 120 cm Bodentiefe vorhanden. Vergleichen wir die maximale (vom 9. Juni) mit dieser minimalen Wasserreserve, dann stellen wir fest, daß der verwertbare Wasservorrat im Plateaubuchenwald um 80 %, im Ahorn-Eschen-Wald um 70 %, im Eichen-Hagebuchen-Wald um 60 % und im Hangbuchenwald um 50 % des Höchstwertes reduziert wurde. Der Vorrat an leicht verwertbarem Wasser am Ende der hochsommerlichen Trockenperiode (Ende August) betrug im Hangbuchenwald und im Ahorn-Eschen-Wald 5–10 Liter, im Eichen-Hagebuchen-Wald knapp 5 Liter pro m<sup>2</sup> Bodenoberfläche und 120 cm Wurzelraumtiefe. Abgesehen von wenigen Tagen in der ersten Hälfte des Augusts, war im Plateaubuchenwald schon seit Mitte Juli kein leicht verwertbares Wasser mehr vorhanden. Es ist durchaus möglich, daß in dieser Zeit die erschwerte Wasseraufnahme das Wachstum des Bestandes hemmte. Ende August war im Plateaubuchenwald, wie gesagt, noch 60 Liter verwert-

bares Wasser pro  $m^2$  Bodenoberfläche und 120 cm Wurzeltiefe vorhanden. Dies entspricht etwa 60 mm Niederschlag. An sonnigen Tagen transpiriert die Vegetation bis zu 4 mm pro Tag. Die noch verfügbare Wasserreserve würde also für 15 weitere trockene Tage ausreichen. Von Tag zu Tag nähme die Saugspannung aber zu. Für die Aufnahme dieses Wassers müßte die Pflanze von Tag zu Tag mehr Energie aufbringen.

Während der Trockenperioden der zweiten Augusthälfte nimmt die verwertbare Wassermenge gemäß Darstellung 7 B nicht ab, sondern bleibt bei 60 Litern konstant. In dieser trockensten Zeitspanne des Jahres 1967 wurde aber sicher ein Teil der noch vorhandenen verwertbaren Wassermenge verbraucht. Die Zunahme der Saugspannungen kann bei Werten von  $\Psi_m > 690 \text{ WScm}$  wegen des beschränkten Tensiometermeßbereiches nicht mehr verfolgt werden. Sobald dieser Saugspannungswert überschritten wurde, mußten wir mit dem mittleren Wassergehalt im Saugspannungsbereich von 690–15 000 WScm rechnen, gleichgültig, ob die Saugspannungen eher an der unteren oder oberen Grenze dieses Bereiches lagen. Vom Moment an, wo im ganzen Profil Saugspannungen von mehr als 690 WScm herrschten, ist die verwertbare Wassermenge in unserer Rechnung konstant. In Wirklichkeit dürfte dieser Wert anfänglich etwas zu klein, mit fortschreitender Austrocknung jedoch etwas zu hoch sein. Da nicht einmal im A<sub>1</sub>-Horizont der permanente Welkepunkt erreicht wurde – die Krautschicht verdorrte ja nicht –, ist anzunehmen, daß das wirkliche Minimum an verwertbarem Wasser im Plateaubuchenwald nicht wesentlich unter dem berechneten (60 Liter) liegt.

In Figur 5 ist dargestellt, wie der Humushorizont, der mittlere und der untere Teil des Wurzelraumes mit schwer und leicht verwertbarem Wasser versorgt sind, wenn das Wasserangebot maximal (9. Juni), mittel (26. Juni) oder klein (31. Juli) ist.

Am 9. Juni, nach dem größten Niederschlag der Vegetationsperiode, waren alle Profile bis nahe an die Oberfläche mit Wasser gesättigt. In diesem Zeitpunkt ist auf allen vier Standorten im ganzen Profil reichlich leicht verwertbares Wasser vorhanden ( $> 100 \text{ Liter/m}^2$  Bodenoberfläche 120 cm Wurzelraum).

Obwohl vom 9. bis 26. Juni insgesamt 39 mm Niederschlag fielen – die Interzeption des Bestandes kennen wir allerdings nicht –, wurde dem A<sub>1</sub>-Horizont fast alles leicht verwertbare Wasser entzogen. Einzig im Hangbuchenwald ist noch ein nennenswerter Anteil an leicht verwertbarem Wasser festgestellt worden, nämlich 8 Liter pro  $m^2$  Bodenoberfläche und 30 cm Horizonttiefe. Der Verlust an verwertbarem Wasser in diesem Horizont war im Hangbuchenwald den anderen Standorten gegenüber geringer. Das liegt vermutlich an der schattigen, nordexponierten Lage, am geringen Wasserkonsum der schütteren Krautschicht und an der dicken Streuauflage.

Am Ende der ersten längeren, regenarmen Periode, am 31. Juli, war im

Plateaubuchenwald der Vorrat an leicht verwertbarem Wasser erschöpft und der schwer verwertbare Anteil schon auf die Hälfte reduziert (Darstellung 7 und Figur 5). Im Hangbuchenwald war in diesem Zeitpunkt in allen drei Profilteilen noch etwas leicht verwertbares Wasser vorhanden, nämlich  $\frac{1}{10}$  dl pro Liter Boden, also rund 1 Volumenprozent – bei Wassersättigung beträgt der Anteil leicht verwertbaren Wassers in den verschiedenen Horizonten des Hangbuchenwaldes 8–15 Volumenprozent. Selbst wenn der Boden des Hangbuchenwaldes lokal etwas stärker austrocknete, stieg die Saugspannung sicher nicht soweit über 690 WScm, daß die Wasseraufnahme wesentlich erschwert worden wäre.

Im Eichen-Hagebuchen-Wald trocknete nur der Humushorizont soweit aus, daß kein leicht verwertbares Wasser mehr verfügbar war. Im Ahorn-Eschen-Wald hingegen, einem Standort, den man gerne mit dem Prädikat «naß» versieht, war nur noch im untersten Teil des Wurzelraumes leicht verwertbares Wasser vorhanden, dort allerdings reichlich (Figur 5). Dieser Standort kann für jene Baumarten trocken sein, die den sonst oft vernässt, sauerstoffarmen mittleren Profilteil nicht oder nur schlecht zu durchwurzeln vermögen, und deren Wurzeln kaum in den unteren Profilteil vordringen. So erstaunlich es klingen mag, für standortsfremde Baumarten war im Versuchsjahr die staunasse Senke des Ahorn-Eschen-Waldes mindestens so trocken wie die normal drainierte Kuppe des Plateaubuchenwaldes. Standortsfremd in diesem Sinn sind jene Baumarten, die wegen der häufigen Staunässe flach wurzeln und deshalb in Trockenperioden mit dem feuchten Unterboden keinen Kontakt mehr haben.

Einzig im Plateaubuchenwald war während sieben Wochen nur noch schwer verwertbares Wasser verfügbar. Im Ahorn-Eschen-Wald war die Vegetation während zwei, im Eichen-Hagebuchen-Wald während einer Woche ausschließlich auf schwer verwertbares Wasser angewiesen. Im Hangbuchenwald blieb die schwer verwertbare Wassermenge durchwegs konstant (Darstellung 7). Das heißt aber nicht, daß die Vegetation dieses Standortes ausnahmslos leicht verwertbares Wasser aufnehmen konnte. Es ist anzunehmen, daß die Saugspannungen in der unmittelbaren Umgebung der Wurzeln gelegentlich größer waren als 690 WScm, daß lokal auch schwer verwertbares Wasser aufgenommen wurde.

Ein weiterer Unterschied im Wasserhaushalt der vier Standorte ist die Geschwindigkeit, mit der das verwertbare Wasser abnimmt, ferner auch die Amplitude der Schwankungen dieser Wassermengen. Die Geschwindigkeit, mit der das Angebot an leicht verwertbarem Wasser ändert, nimmt in den untersuchten Böden in der Reihenfolge Ahorn-Eschen-, Eichen-Hagebuchen-, Hangbuchen- und Plateaubuchen-Wald zu. Man vergleiche beispielsweise die Schwankungen der leicht verwertbaren Wassermenge im Monat Juni. Diese Unterschiede sind unter anderem ein Ausdruck der Profildurchlässigkeit.

 schwer verwertbares Wasser ( $l/m^2$ )  
 leicht verwertbares Wasser ( $l/m^2$ )

Der Wurzelraum ist in drei Teile gegliedert (z in cm)

- Humushorizont
- mittlerer Teil des Wurzelraumes
- unterer Teil des Wurzelraumes

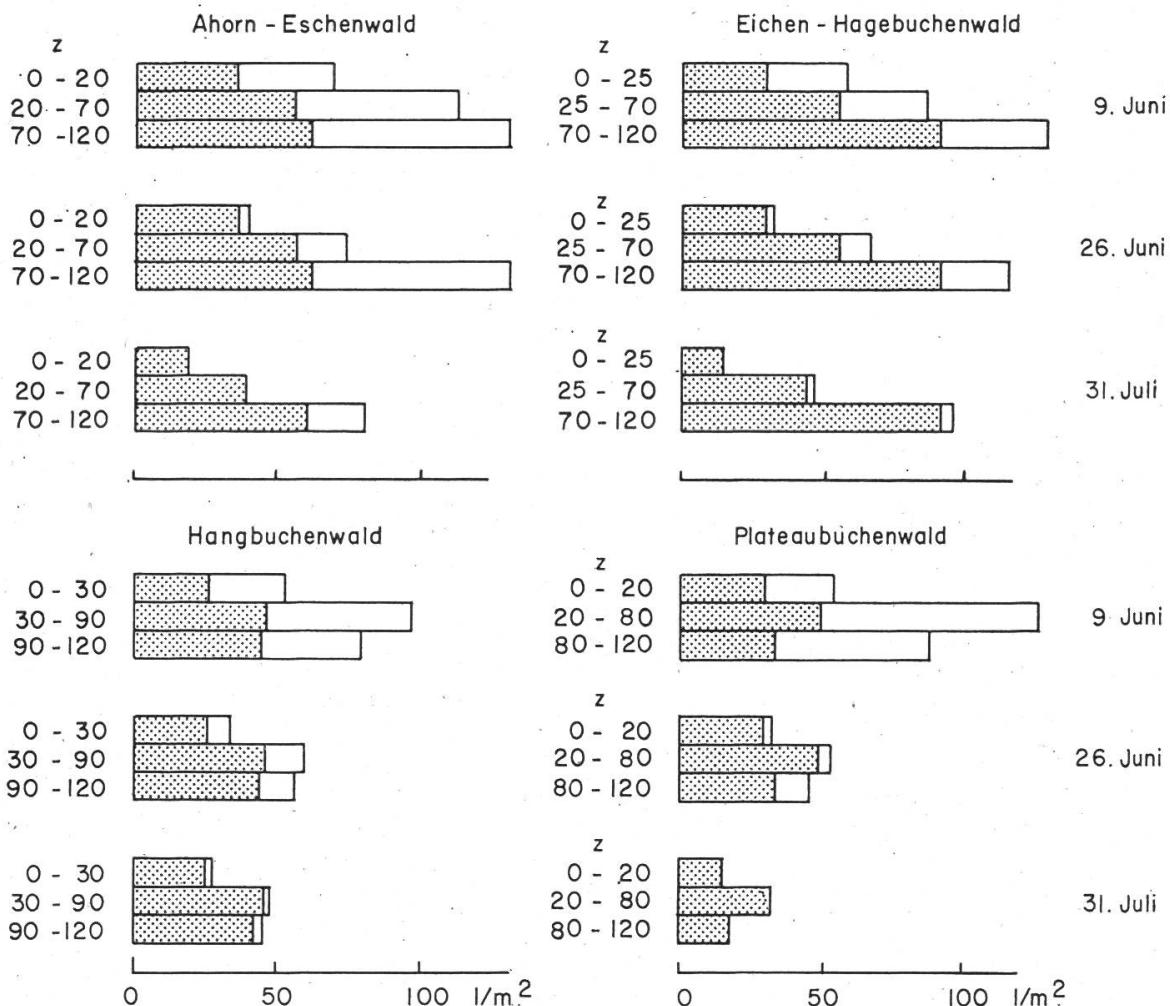


Fig. 5.

Anteile des schwer und leicht verwertbaren Wassers im Wurzelraum  
an drei bestimmten Tagen der Vegetationsperiode

Im Ahorn-Eschen-Wald bleibt des Wasser wochenlang aufgestaut; die Wassergehaltsabnahme wird vermutlich durch den Wasserverbrauch der Vegetation beeinflußt, da seitliches Wegfließen aus topographischen Gründen kaum ins Gewicht fallen kann und die Sickerbewegung, wie gezeigt wird, höchstens einen halben Liter pro Tag und Quadratmeter Bodenoberfläche ausmachen kann: Die Fließgeschwindigkeit ist  $v = k_s \cdot i$ . Im gesättigten Bereich (5) liegt der Gradient  $i$  zwischen Null und Eins, das heißt  $v \leq k_s$ . Der  $k_s$ -Wert des untersten Horizontes beträgt etwa 0,5 mm/Tag.

Im Plateaubuchenwald versickert das leicht gebundene Wasser rasch. Der Wasserverlust durch die Sickerbewegung ist sehr viel größer als im nahezu undurchlässigen Ahorn-Eschen-Waldboden.

Die verschiedenen großen Höchstmengen (Darstellung 7, zum Beispiel 9. Juni) schwer verwertbaren Wassers lassen Unterschiede in den Sorptions-eigenschaften der vier Profile erkennen. Im Bereich zwischen 690 und 15 000 WScm Saugspannung bindet der tonreiche Boden des Eichen-Hage-buchen-Waldes etwa anderthalbmal soviel Wasser wie die staubreicheren Böden des Plateau- und Hangbuchenwaldes.

### *3.3 Zusammensetzung des Porenvolumens nach Wasserbindung, Verwertbarkeit und Luftanteil*

In Figur 6 sind die Volumenanteile der festen Bodenmasse, der Boden-luft, des leicht, schwer und nicht verwertbaren Wassers dargestellt: Neben-einander die drei Figuren eines Standortes an drei Tagen, die sich hinsichtlich Feuchtigkeitsverhältnissen stark unterscheiden.

Die vier Figuren der vier Standorte an einem bestimmten Tag sind unter-einander angeordnet. Die Profiltiefe ist senkrecht dargestellt. In der Waag-rechten sind die Volumenanteile der einzelnen Komponenten in Volumen-prozenten aufsummiert.

Der Anteil an nicht verwertbarem Wasser ist groß. Sogar im nassesten Zeitpunkt der Vegetationsperiode, am 9. Juni, war innerhalb des Wurzel-raumes höchstens gleichviel oder weniger Wasser verwertbar wie nicht ver-wertbar.

Nach dem intensiven Regen vom 7./8. Juni waren in allen vier Böden alle Poren bis 20–30 cm unter die Bodenoberfläche mit Wasser gefüllt. In diesem Zeitpunkt waren die Wurzeln auf den im Bodenwasser gelösten Sauerstoff angewiesen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Sauerstoffs durch Diffusion ist in der Luft 10 000mal größer als im Wasser. Selbst wenn nur einzelne mit Luft gefüllte Poren bis in größere Tiefen reichen, ist die Sauerstoffversorgung schon wesentlich verbessert. Bei Saugspannungen über 20 WScm sind die größten Poren entleert, der Durchlüftungszustand des Bodens also verbessert. Am 26. Juni waren die Saugspannungen bis in folgende Tiefen größer als 20 WScm:

im Ahorn-Eschen-Wald 50 cm

im Eichen-Hagebuchen-Wald 100 cm

im Hang- und Plateaubuchenwald im ganzen Profil.

Am 31. Juli waren alle vier Böden soweit entwässert, daß wir annehmen dürfen, daß die Sauerstoffversorgung für das Wurzelwachstum nicht mehr limitierend ist.

Im Plateau- und Hangbuchenwald kann nur bei lang anhaltenden Regen-fällen oder während der Schneeschmelze Sauerstoffmangel entstehen, da der Wasserspiegel in diesen Böden sehr rasch absinkt.

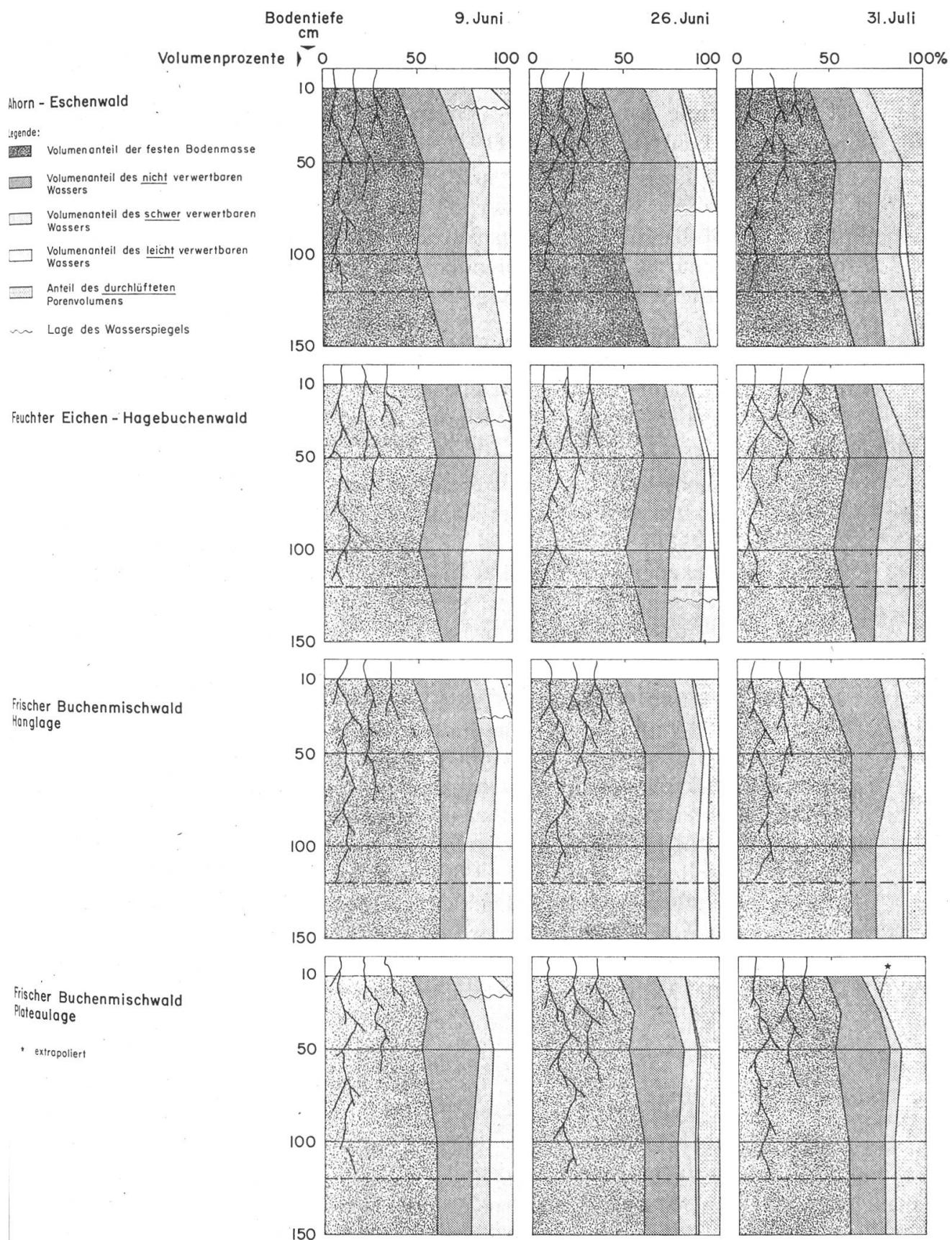


Fig. 6

Volumenanteile der festen Bodenmasse, der Bodenluft, des leicht, schwer und nicht verwertbaren Bodenwassers an drei bestimmten Tagen der Vegetationszeit

#### 4. Schlußfolgerungen

Die vorliegende Arbeit ist eine Analyse des Wasserhaushaltes von vier Standorten im Lehrrevier der ETH.

Die im I. Teil tabellierten physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften dienten zur Charakterisierung der Standorte. Die Kenntnis der zeitlichen Veränderung der Saugspannungsverteilung im Profil und der Sorptionseigenschaften der betreffenden Böden erlaubt uns, quantitative Aussagen über die Wasserversorgung, Dauer und Grad der Vernässung und Durchlüftung zu machen.

Die Dauer jener Perioden, in denen die Wasserversorgung oder der Durchlüftungszustand für das Wurzelwachstum kritisch war, gibt uns Hinweise, unter welchen Witterungsbedingungen der eine Standort als trocken, der andere als vernäßt bezeichnet werden muß.

- Folgende Eigenschaften sind für die einzelnen Standorte kennzeichnend:
- Im Ahorn-Eschen-Wald war der Oberboden mehrere Wochen physiologisch trocken. Für flachwurzelnde Baumarten kann der Ahorn-Eschen-Wald ein trockener Standort sein. In den Sommermonaten liegt die Wasserreserve vor allem im dichten, unteren Profilteil, der in der übrigen Zeit staunäßig und sauerstoffarm ist. Die Fichte beispielsweise vermag solche Bodenräume nicht zu erschließen.
  - Die Wasserversorgung im Buchenmischwald auf dem Plateau ist in Trockenperioden knapp, wird aber nur in eigentlichen Trockenjahren und nur für empfindliche Baumarten kritisch werden. In den trockenen Sommermonaten kann sich der Bestand infolge erschwerter Wasseraufnahmeverbedingungen sicher nicht optimal entwickeln. Während etwa 50 Tagen betrug die im 120 cm tiefen Wurzelraum pro Quadratmeter Bodenoberfläche vorhandene, verwertbare Wassermenge weniger als 60 Liter. Zusammen mit 39 mm Niederschlag, der höchstens zur Hälfte in den Boden eindringen kann, waren größtenteils etwa 800 000 l/ha potentiell verfügbar. Da nicht alle Bodenpartien durch Wurzeln erschlossen sind, stand der Vegetation vermutlich eher noch weniger Wasser zur Verfügung. An einem schönen Sommertag transpiriert ein Buchenwald mindestens 4 mm Wasser, also mehr als 40 000 l/ha. Die potentiell verfügbare Wasserreserve von 800 000 l/ha hätte bei dieser Transpirationsrate höchstens 20 Tage gereicht. Dieser Vergleich der Größenordnungen zeigt, daß im Plateaubuchenwald in längeren Trockenperioden Wachstumsreduktionen durchaus möglich sind.
  - Der Wasserhaushalt des Eichen-Hagebuchen-Waldes zeigt eine gewisse Verwandtschaft zu dem des Ahorn-Eschen-Waldes. Der Einfluß der Stauwässer ist aber weniger ausgeprägt. Der Boden ist durchlässiger, besser drainiert und durchlüftet. Baumarten, die leicht unter Sauerstoffmangel

- leiden und dichte Bodenpartien meiden, verfügen auf diesem Standort zwar über einen mächtigeren zugänglichen Bodenraum als im Ahorn-Eschen-Wald, werden aber in der zweiten Hälfte der Vegetationsruhe oder in niederschlagsreichen Jahren durch einen oberflächennahen Wasserspiegel in ihrer Vitalität gehemmt.
- Den ausgeglichensten Wasser- und Lufthaushalt stellten wir im Buchenmischwald in Hanglage fest. Die Ertragsfähigkeit dieses Standortes ist besonders hoch. Die 39 m hohen Buchen sprechen ein beredtes Zeugnis.

## Résumé

### **Contribution à la connaissance de quatre stations de la forêt feuillue mélangée dans la forêt d'enseignement de l'EPF**

#### *Deuxième partie : Régime hydrique*

Le travail présenté est une analyse des variations de la teneur en eau de quatre sols de différentes stations de la forêt d'enseignement de l'EPF.

Au laboratoire, on a analysé les propriétés physiques et chimiques des sols; les résultats de ces analyses, présentés dans la première partie, ont mis en évidence les différences pédologiques qui existent entre les quatre stations. Sur le terrain, à l'aide de tensiomètres, on a mesuré, à intervalles réguliers, l'énergie de rétention de l'eau par le sol. Ces mesures ont permis de déterminer les facteurs écologiques suivants : la teneur du sol en eau utilisable par les plantes, la durée et le degré d'engorgement et les conditions d'aération du profil.

Bien que ces mesures n'aient été faites que durant quelques mois, elles permettent cependant de dire, pour chaque station, à quelle période et pour quelles conditions climatiques un sol est physiologiquement sec, ou au contraire, engorgé par l'eau, donc asphyxiant.

Les résultats obtenus pour chaque station sont résumés ci-dessous :

- Dans la frênaie mêlée d'érable, la partie supérieure du sol a été physiologiquement sèche durant plusieurs semaines. La frênaie à érable peut donc être une station sèche pour les essences à racines traçantes. En été, l'eau utile se trouve avant tout dans la partie inférieure du profil; à cette profondeur, le sol est compact, pauvre en oxygène durant la période d'engorgement; cette zone ne peut pas être colonisée par les racines de l'épicéa par exemple.
- Dans la hêtraie de plateau, des dégâts dus à la sécheresse sont à craindre uniquement durant les années très pauvres en précipitations, et cela, pour des essences exigeantes en eau. Durant un été normalement sec, les réserves du sol en eau ne sont pas suffisantes pour assurer aux arbres une alimentation normale. Cependant l'arbre n'en souffre pas; on observe une diminution de la transpiration provoquant un ralentissement de la croissance. Le calcul rapide, présenté ci-dessous, montre clairement ce phénomène : Pendant 50 jours consécutifs, nous avons mesuré une quantité d'eau utile inférieure à 60 l/m<sup>2</sup> pour une profondeur

- de 120 cm. Durant cette période, les précipitations ont été de 39 mm. Si nous considérons que la moitié de cette eau a pénétré dans le sol, l'eau utilisable par les plantes pour ces 50 jours, a été de 80 l/m<sup>2</sup> ou de 800 000 l/ha. Dans des conditions normales (quantité d'eau suffisante) une hêtraie tanspire, par un beau jour d'été, 4 mm d'eau; cela représente une quantité d'eau de 40 000 l/ha. Pour épuiser la réserve du sol (800 000 l/ha), il aurait donc fallu 20 jours.
- Le bilan de l'eau pour le sol de la chênaie à charme présente les mêmes caractéristiques que celui de la frênaie à érable. Le sol est cependant plus perméable, mieux drainé et mieux aéré. A la fin de l'hiver et à la suite de précipitations abondantes, le profil est inondé jusqu'en surface; les essences sensibles à un engorgement temporaire de leurs racines peuvent alors en souffrir.
  - Dans la hêtraie de pente, nous avons toujours observé un bon équilibre entre l'eau disponible et l'aération du profil. C'est une des raisons de la bonne fertilité de cette station; la présence de hêtres hauts de 39 m en est la preuve.

*Traduction Ch. Werlen*

#### *Literatur*

*Brühlhart, T.: Jahreszeitliche Veränderungen der Wasserbindung und Wasserbewegung in Waldböden des schweizerischen Mittellandes. Mitteilungen der schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Band 44, 1969.*

*Flühler, H. und Gysi, Ch.: Beitrag zur Kenntnis von vier Laubmischwaldstandorten im Lehrwald der ETH, I. Teil Bodenfaktoren, SZF 1970 Nr. 3.*

*Gottesmann, J.: Untersuchung über den Einfluß von Altbäumen auf den Wasserhaushalt im Boden (nicht veröffentlichte Diplomarbeit), 1969.*

*Gutermann, Th.: Witterungsbericht des Jahres 1967, MZA Zürich, 1967.*

*Leibundgut, H. und Dafis, Sp.: Untersuchungen über die Grundwasserverhältnisse im Lehrwald Albisriederberg. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 1963, 1/2.*

*Richard, F.: Grundlagen der bodenphysikalischen Standortserkundung. Beiheft der SZF Nr. 46 (Festschrift H. Leibundgut 1969).*

*Rose, C. W.: Agricultural Physics, The Commonwealth Int. Library, Phys. Division, Pergamon Press, Oxford 1966, S. 203.*

*Uttinger, H.: Klimatologie der Schweiz, E, Niederschlag 4. Teil MZA Zürich 1966.*

---

*Abbildung 7 (Zickzack)*

Faktoren des Wasserhaushaltes

