

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse  
**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein  
**Band:** 131 (1980)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Zur Wasserbilanz eines Einzelbaumes innerhalb eines Waldbestands  
**Autor:** Borer, F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-766544>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 08.02.2025

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

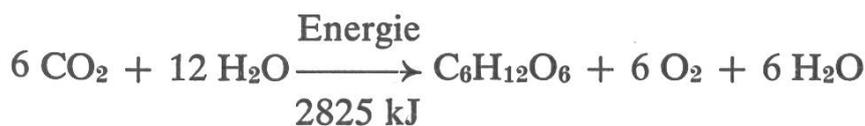
# Zur Wasserbilanz eines Einzelbaums innerhalb eines Waldbestands<sup>1</sup>

Von *F. Borer*  
(Professur für Bodenphysik ETHZ)

Oxf.: 181.31

## 1. Einleitung und Fragestellung

Die Existenz eines jeden Baums beruht auf der Nutzbarmachung der Photosynthese-Reaktion:



Der Glucose-Ring  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  bildet den Grundbaustein für das Wachstum jeder grünen Pflanze. Eine ausreichende Stoffproduktion hängt somit, neben andern Faktoren, in entscheidendem Masse von der Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers ab.

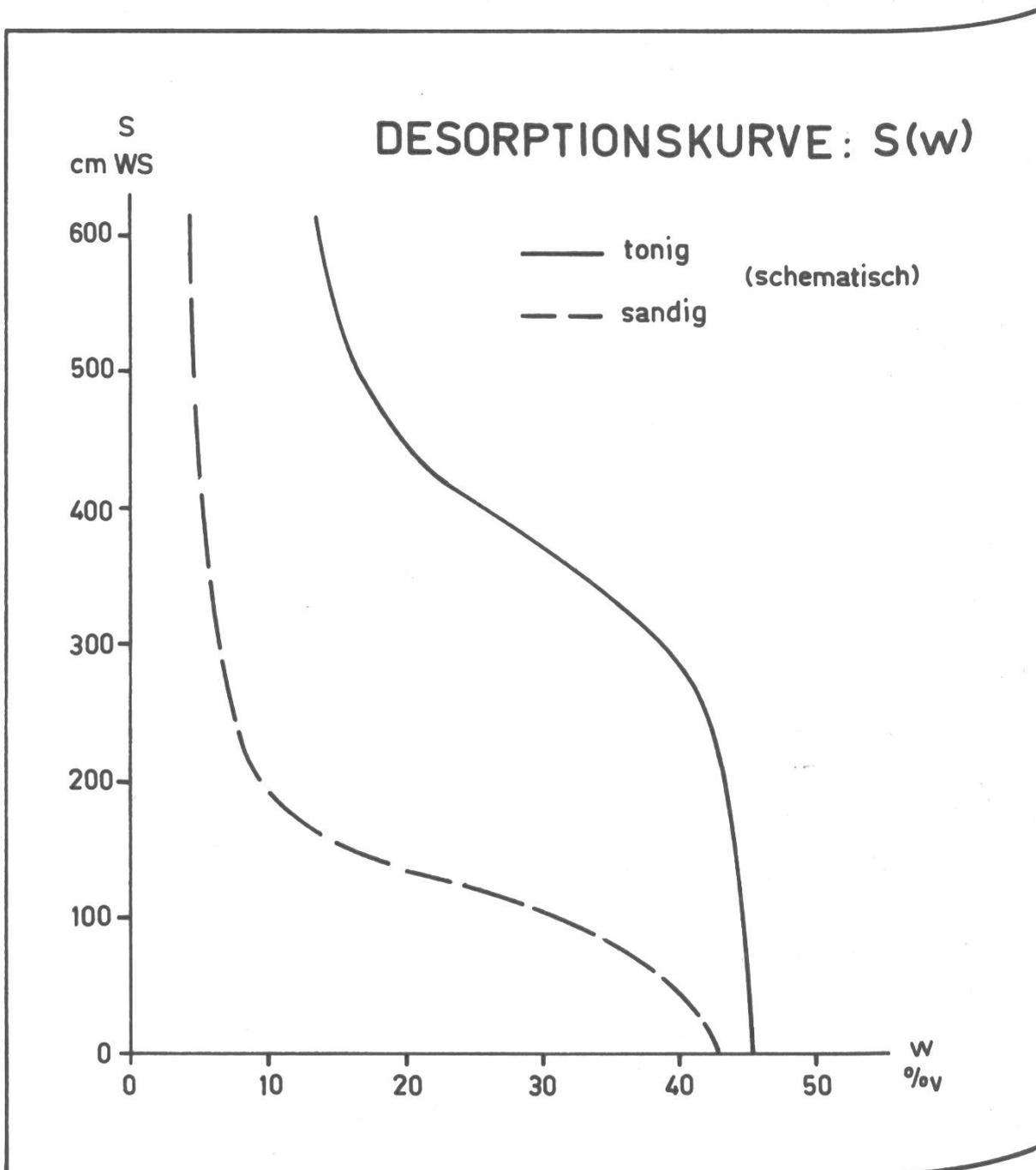
Das Wasser im Boden ist, je nach Sättigungsgrad, mehr oder weniger stark an die festen Bodenbestandteile gebunden. Durch die Wirkung der Oberflächenspannung an der Grenzfläche zwischen Wasser- und Luftphase in den Bodenporen kapillarer Grössenordnung (Poren kleiner ca. 1 mm) erfolgt so die Meniskusbildung (Kapillareffekt). Diese führt zur Bindung des Bodenwassers an der festen Bodenmatrix entgegen der auf das Wasser einwirkenden Gravitationskraft. Energetisch betrachtet bedeutet dies, dass die Pflanze zur Wasseraufnahme mit ihren Wurzeln im wasserungesättigten Bereich Energie aufwenden muss.

Als Mass für die Bindeenergie des Wassers im Boden ist der Begriff der Saugspannung als negativer Druck, auch Kapillardruck genannt, am geläufigsten. In der Dimension eines Drucks beschreibt sie, auch pflanzenphysiologisch gut verständlich, den Betrag an Energie, der von der Pflanze aufgewendet werden muss, um dem Boden überhaupt Wasser entziehen zu können.

<sup>1</sup> Überarbeitete Fassung eines Vortrags, gehalten am 13. November 1978 im Rahmen der Forst- und holzwirtschaftlichen Kolloquien an der ETH Zürich.

Die Saugspannung  $S$  (cm WS) ist eine Funktion des Wassergehalts  $w$  (%v: Volumenprozent Wasser des Bodenvolumens). Die Darstellung dieser Funktion ist geläufig unter dem Namen «Desorptionskurve», da durch sie der Saugspannungsverlauf während eines Entwässerungsvorgangs beschrieben wird. Vergleiche dazu als Beispiel einer Desorptionskurve die Abbildung 1.

Abbildung 1. Beispiel einer Desorptionskurve:  $S = f(w)$ .



Zur Beurteilung der Pflanzenverfügbarkeit des Wassers wird mit der Einführung von Saugspannungsklassen SK folgende Nomenklatur verwendet: (Vergleiche Tabelle 1)

Tabelle 1. Definition der Saugspannungsklassen.

SK	Saugspannungsbereich cm WS	Pflanzenverwertbarkeit des Wassers
1	1—80	leicht entfernbares Wasser («Gravitationswasser»)
2	80—690	leicht verwertbares Wasser
3	690—15 000	schwer verwertbares Wasser
4	> 15 000	nicht verwertbares Wasser

Der für diese Betrachtung relevanteste Bereich wird somit derjenige der SK 2 (80—690 cm WS). Die Wasserkapazität eines Bodens in diesem Saugspannungsbereich wird entscheidend für die dem Baum zur Verfügung stehende Wassermenge. Vergleiche auch *Richard* (1979).

Eine Bodenwasserbilanz im Bereich des Wurzelraums stellt somit eine Möglichkeit dar, die Steuerung der Holzproduktion durch das Wasserangebot zu erfassen, und vor allem auf die Wasserhaushalts-Dynamik hinzuweisen. Dieser Kenntnis kommt innerhalb der Standortsbeurteilung eine zentrale Bedeutung zu. Es ist jedoch noch ein anderer Aspekt zu berücksichtigen: Das Wasserangebot eines beliebigen Bodens kann je nach artspezifischen Bodenansprüchen eines Baums, zu klein, in vielen Fällen aber auch zu hoch sein, indem dem Wurzelsystem keine ausreichende Belüftung mehr gesichert ist. *Flühler* (1973) schätzt als Grenzwert für den aeroben Zustand in den Bodenporen einen minimalen Bodenvolumenanteil der Luft von 6 %; *Wilde* (1962), zit. in *Köstler et al.* (1968), gibt als Voraussetzung für ein befriedigendes Wachstum einen Luftgehalt von ca. 10 %<sub>v</sub> an.

Es leuchtet somit auch ein, dass ein gesättigter Boden wohl das maximale, aber nicht das optimale Wasserangebot für die Pflanzenwurzel darstellt.

#### Der Problematik

- des Wasserangebots und der Wasserverfügbarkeit als Funktion der Zeit
- der Rolle des Bodenprofilaufbaus
- der Grundwasseranreicherung unter Wald und
- der Trockensubstanz-Produktion

gelten die nachfolgenden Ausführungen, dargestellt am Beispiel eines Einzelbaums innerhalb eines Bestands.

Das Ganze soll ein Beitrag sein zur optimalen Erfassung und Ausnützung der Ertragsfähigkeit im Sinne von *Leibundgut* (1966).

Eine fehlerhafte Standortsbeurteilung führt zumindest, ohne primär schlimmere Folgen zu zeigen, langfristig gesehen doch zu Ertragseinbussen

aufgrund nicht optimaler Wuchsleistung, verbunden mit mittlerer bis schlechter Holzqualität.

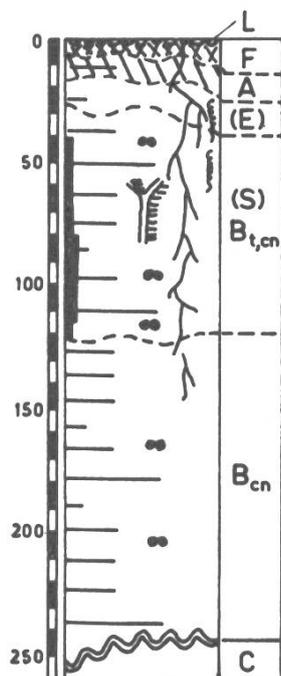
## 2. Daten zur Versuchsanlage; Methodik

Auf einer Versuchsfläche im «Oberforst», Gemeinde Möhlin, Kanton Aargau, wurde eine zirka 85jährige Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*, var. *viridis*) ausgewählt.

Die Pflanzengesellschaft entspricht einem typischen Waldmeister-Buchenwald (*Galio odorati-Fagetum typicum*); nach *Ellenberg* und *Klötzli* (1972), Einheit Nummer 7.

Der Boden, in *Richard, Lüscher* und *Strobel* (1980) als Lokalform «Oberforst» behandelt, gilt nach diesen Autoren als «stark saure Moderparabraunerde, leicht pseudovergleyt, aus Löss» mit folgender Horizontfolge (Abbildung 2):

Abbildung 2. Bodenprofil «Oberforst», Möhlin. Nach *Richard, Lüscher* und *Strobel* (1980).



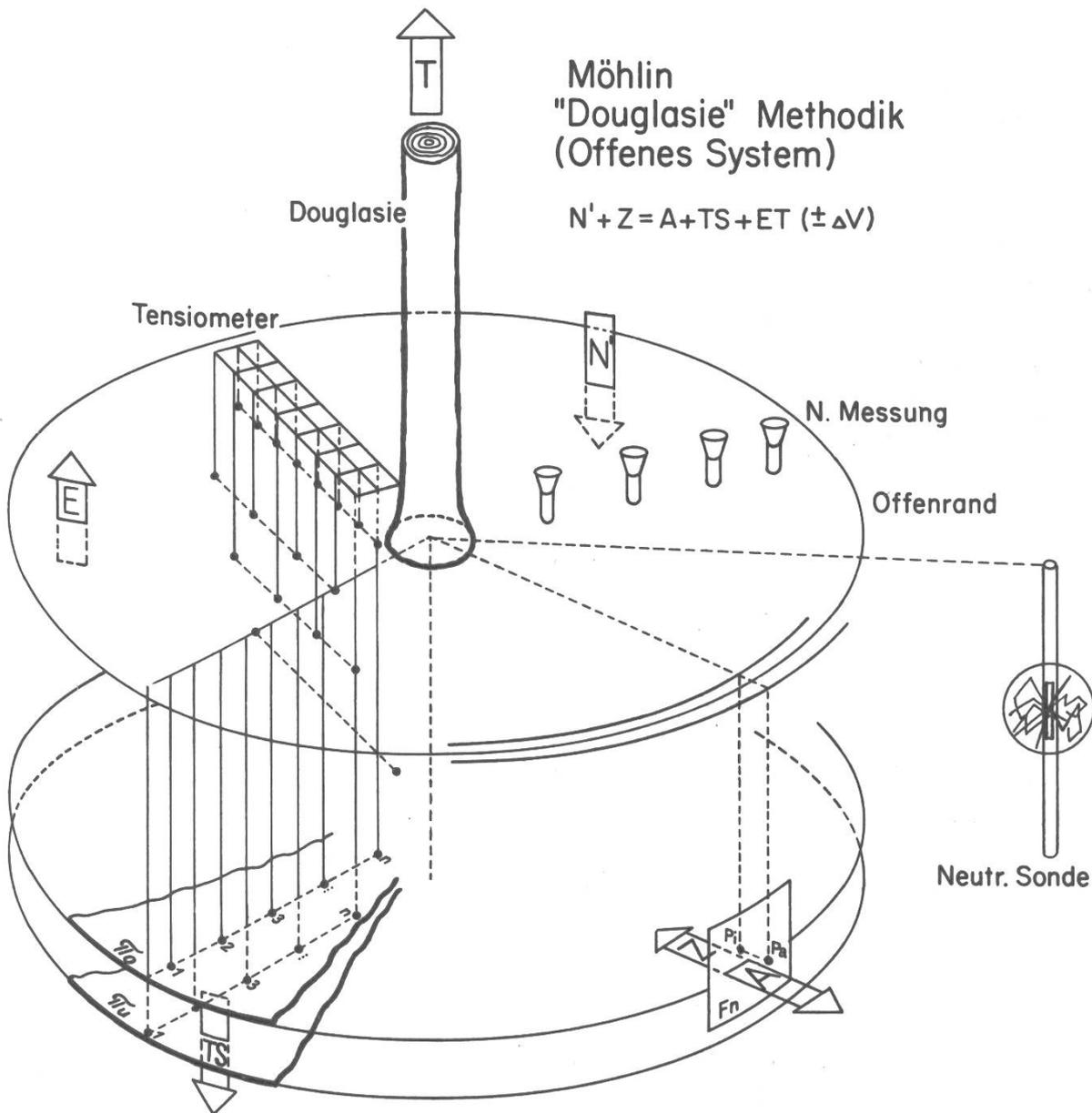
Unter dem Moder (L/F/A<sub>h</sub>-Horizonte) von geringer Mächtigkeit (20—25 cm) schliesst nach einem nur schwach erkennbaren Auswaschungs-(E)-Horizont im B-Horizont eine Verdichtungszone zwischen ungefähr 40—120 cm Bodentiefe an. Die Verdichtung nimmt ab 80 cm zu und verursacht eine stark gehemmte Sickerung (Stauschicht). Als Folge davon ist der Boden in dieser Tiefe temporär wassergesättigt, was zu einer leichten Pseudovergleyung geführt hat. Darunter nimmt die Verdichtung wiederum ab und in ca. 240 bis 260 cm Tiefe tritt die Kalkgrenze auf, mit wiederum stark gehemmter vertikaler Sickerung. Das pH des Bodens liegt von der Oberfläche bis zur Kalkgrenze zwischen 3,5 und 4.

Die untersuchte Douglasie weist im April 1975 einen BHD von 81 cm, eine Höhe von 42,35 m und eine Stamm-Masse von 7,54 m<sup>3</sup> auf. Im Jahre 1975 betrug der Höhenzuwachs 45 cm.

Die methodische Auslegung des Versuchs basiert auf einer Bilanzgleichung. Bezogen auf einen imaginären Wurzelraum in geometrischer Zylinderform (Vergleiche Abbildung 3) wird folgende Beziehung formuliert:

Die Zufuhr von Wasser in Form von durchtropfendem Niederschlag N' (= Freiland-Niederschlag N — Interzeption I) und von seitlichem Sickerge-

Abbildung 3. Methodik der Untersuchung.



winn im Boden (Z), ist gleich der Summe aus seitlichem Sickerverlust A, Tiefensickerung TS, Evapotranspiration ET und der Vorratsveränderung des Wassers im Wurzelraum  $\Delta V$ :

$$N' + Z = A + TS + ET \pm \Delta V$$

Als Mass für den Wasserverbrauch wird nicht die direkte Wasseraufnahme durch die Wurzeln, sondern der Wasserverlust des Wurzelraums durch stomatäre Transpiration des Baums (T) + oberflächliche Evaporation E = Evapotranspiration ET, bestimmt. Der Betrag der Evaporation E kann unter normalen Witterungsbedingungen als sehr klein angenommen werden.

Es wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die Wasseraufnahme gleich dem Wasserverbrauch sei. Bei Betrachtungen über längere Messzeiträume von einigen Tagen bis zu Wochen und mehr, ist dies vertretbar. Vom Betrag

der Wasseraufnahme wäre allerdings noch der Wasseranteil abzuziehen, der im Baum selbst in die organische Substanz eingebaut, und somit im Pflanzkörper zurückgehalten wird. Die Größenordnung dieses Anteils wird später noch abgeschätzt und soll die Vertretbarkeit der oben getroffenen Annahme bestätigen.

Die Versuchsanlage mit einer Bodenoberfläche von 176 m<sup>2</sup> (Kreis mit Radius 7,5 m) und einer Tiefe von 3 m war mit 450 einfachen Tensiometern, 48 automatisch registrierten Tensiometern und ca. 50 Neutronensonden-Messstellen bestückt. Dazu kamen für kurze Zeit 10 automatisch registrierte Klimasensoren. Das untersuchte Bodenvolumen war somit durchschnittlich pro m<sup>3</sup> mit einem Messinstrument (Tensiometer) ausgerüstet.

Um die Wasserpotentiale zu bestimmen, wurden unter anderem auch die bereits erwähnten Saugspannungen verwendet. Zur Bestimmung des Wasservorrats im Wurzelraum verwendete man die für die ausgeschiedenen Bodenhorizonte repräsentativen Desorptionskurven, das heisst horizontspezifische Beziehungen von Saugspannung  $S$  und Wassergehalt  $w$ :  $S = f(w)$ .

Die Flussberechnungen basieren alle auf der Anwendung des Darcy-Gesetzes für Potentialströmungen.

Die Messungen erfolgten während den Vegetationsperioden 1975 und 1976 mit insgesamt je 62 Vollablesungen, und zwar in den Zeiträumen vom 21. April bis 17. November 1975 beziehungsweise vom 20. April bis 8. November 1976.

### 3. Resultate und Interpretation

#### 3.1 Gesamtbilanz

In Tabelle 2 werden als erstes die Bilanzierungsergebnisse der beiden Messperioden aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass alle Werte in mm Wasserschichthöhe angegeben werden, das heisst 1 mm entspricht 1 Liter Wasser/m<sup>2</sup>. Auf den 3 m tiefen Untersuchungsraum bezogen, bedeutet eine Wasservorratsveränderung von 1 %<sub>v</sub> somit eine Änderung der Wasserschichthöhe von 30 mm.

TW = Tageswert

N = Freiland-Niederschlag    N' = Bestandes-Niederschlag

I = Interzeption (N — N')

TS = Tiefensickerung

LF = Lateraler Fluss = seitlicher Abfluss A — seitlicher Zufluss Z

ET = Evapotranspiration ≈ Wasseraufnahme durch die Wurzeln

ΔV = Vorratsveränderung = w<sub>E</sub> — w<sub>A</sub>

w<sub>A</sub> = Anfangs-Wassergehalt

w<sub>E</sub> = End-Wassergehalt

Tabelle 2. Vergleich der Gesamt-Wasserbilanzen.

	Messperiode 1975		Messperiode 1976		% - Anteil des Wertes von 1976 am Wert von 1975
	21. 4. bis 17. 11. 1975 (210 Tage)		20. 4. bis 8. 11. 1976 (202 Tage)		
	Summe	Mittl. TW	Summe	Mittl. TW	
N'	537,8 mm	2,56 mm	349,0 mm	1,73 mm	68
TS	23,6 mm	0,11 mm	13,3 mm	0,07 mm	64
LF	10,0 mm	0,05 mm	12,2 mm	0,06 mm	120
ET	500,9 mm	2,38 mm	295,9 mm	1,46 mm	61
$\Delta V$	+ 0,11 % (+ 3,3 mm)		+ 0,92 %v (+ 27,7 mm)		
$w_A$	37,75 %v		35,41 %v		
$w_E$	37,86 %v		36,33 %v		
	Jahres-Niederschlag				
	1975		1976		
Feld: N	1021,4 mm		758,9 mm		74
Wald: N'	831,5 mm		613,1 mm		74
Interzept. I	189,9 mm		145,8 mm		77
	19 %		19 %		

Bei einer Interpretation dieser Zusammenstellung fallen als erstes die um zirka 1/3 reduzierten Werte des Jahres 1976 für den Niederschlag N', die Tiefensickerung TS und die Evapotranspiration ET auf.

Dieses Ergebnis ist einleuchtend unter Berücksichtigung des Witterungsverlaufs der beiden Jahre. Kann 1975 noch einigermaßen als Normaljahr angesprochen werden, so stellt das Jahr 1976 eindeutig ein Trockenjahr dar: Erreichen doch die Jahresniederschläge in Möhlin MZA nur 69 % des langjährigen Mittels, und gemäss der Quantilstatistik nach *Uttinger* (1964) liegen im Jahre 1976 während der Vegetationsperiode, ausser den Monatswerten September und Oktober, alle Monatswerte im «trockenen», der Wert des Monats Juni sogar im «sehr trockenen» Bereich.

Beim Vergleich der Niederschläge N' in der Gesamtbilanz (Tabelle 2) mit der Evapotranspiration ET des Baums, liegt der Anteil der ET am anfallenden Niederschlag bei 93 % (1975) respektive 85 % (1976).

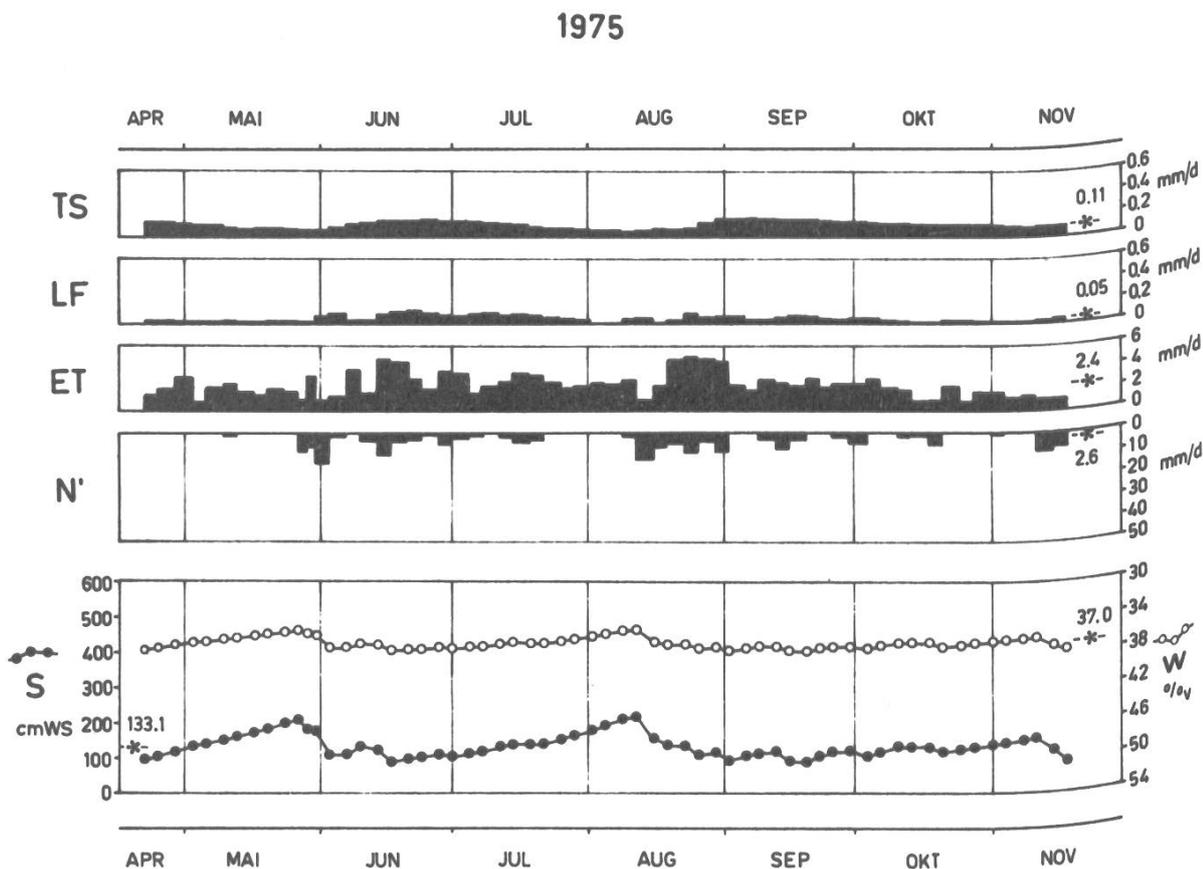
Der laterale Fluss LF nimmt nur einen relativ kleinen Wert an und scheint wenig vom Witterungsverlauf beeinflusst.

Eine deutliche Reduktion erfährt der Anteil der Tiefensickerung TS von 23,6 mm (1975) auf 13,3 mm (1976). Wie klein dieser Betrag, der dem Grundwasser während der Vegetationsperiode tatsächlich zur Verfügung stehen würde, tatsächlich ist, soll folgende Umrechnung zur Darstellung brin-

gen: 23,6 mm Tiefensickerung für die 210 Tage dauernde Vegetationsperiode entsprechen einer mittleren Tagesrate von 0,11 mm, was bei Gradient 1 einer Sickergeschwindigkeit von  $1,3 \cdot 10^{-7}$  cm/sec entspricht. Dieser Wert stellt eine reale Grösse dar, wie dies aus unabhängigen Flussbestimmungen ebenfalls hervorgeht. Dies bedeutet, dass das Sickerwasser 89 Tage benötigt, um 1 cm der vertikalen Sickerstrecke zurückzulegen.

In Abbildung 4 ist die Bilanzierung für die ganze Vegetationsperiode 1975 dargestellt. Dabei entsprechen die Bilanzgrössen für die jeweils 3 bis 3½ Tage dauernden Messperioden mittleren Tageswerten in mm Wasserschichthöhe.

Abbildung 4. Saugspannungsentwicklung und Bilanzglieder für die Vegetationsperiode 1975 vom 21. 4. bis 17. 11. 1975.  
— \* —: jeweilige Mittelwerte über die ganze Periode.



Der Verlauf des Saugspannungsmittelwerts für den ganzen Wurzelraum charakterisiert den grundsätzlichen Witterungsverlauf: Auf einen relativ trockenen Mai mit einem anschliessenden, mit Wasser weit besser versorgten Juni folgt ab zirka Mitte Juli bis ins 1. Drittel August wiederum eine trockenere Phase. Diese wird abgelöst durch eine nasse Periode in der 2. Hälfte August

und zwei normal mit Wasser versorgte Phasen in den Monaten September und Oktober.

Der Verlauf der Evapotranspirationsrate ET hängt eng mit der Wasserversorgung zusammen, was deutlich aus den im Juni und August/September errechneten Tagesraten von bis zu 5 mm hervorgeht. Diese Maximalwerte von 5 mm bedeuten für diesen Baum einen Verbrauch von 880 Litern Wasser pro Tag.

Die zwei angesprochenen Perioden mit Höchst-ET-Raten fallen jedoch auch zusammen mit der für die Douglasie im natürlichen Verbreitungsgebiet (Nordamerika) als typisch beschriebenen Eigenschaft der Periodisierung des Hauptwachstums in zwei Schüben, der eine im Mai/Juni, der andere im August/September. Zehnder (1975). Es ist nun möglich, dass eine genetische Information bis zu einem gewissen Grad die Douglasie auch auf unsern Standorten zu einem zweiphasig erhöhten Wachstumsgang führt.

Im übrigen entspricht auch der Witterungsverlauf des Jahres 1975, in abgeschwächtem Masse, der Klimasituation mit Sommertrockenheit. Durch diese mögliche Überlagerung zweier verschiedener Ursachen für die höheren ET-Raten kann keine eindeutige Aussage über den Grund dieses Auftretens gemacht werden.

Aus diesem Kapitel folgen, zusammengefasst, folgende Ergebnisse:

- Der untersuchte Baum verbraucht auf dem gewählten Standort während der beiden Vegetationsperioden 1975 und 1976 angenähert 85—95 % des Bestandes-Niederschlags  $N'$  ( $= N - I$ ).
- Die höchsten ET-Raten liegen bei 4—5 mm pro Tag, gehäuft auftretend in den Monaten Juni und August.
- Eine Tiefensickerung während der Vegetationsperiode ist praktisch auszuschliessen.

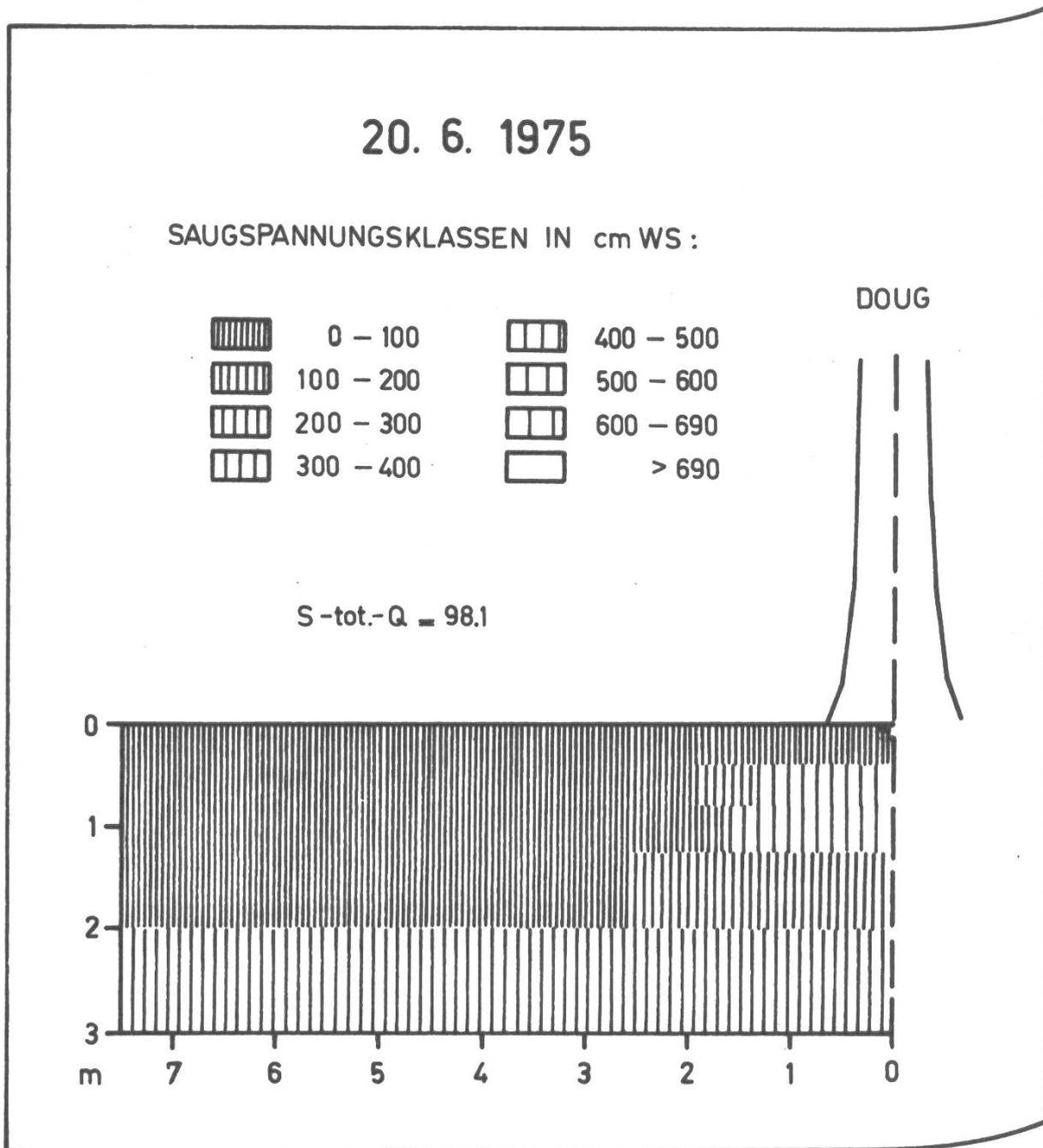
### 3.2 Vergleich zweier kurzperiodischer Bilanzen

Angeregt durch das Auftreten einer 34 Tage dauernden Periode ohne Niederschlag vom 3. Juni bis zum 8. Juli 1976, wird die Wasserbilanz über diese Periode mit der entsprechenden Periode des Vorjahrs verglichen.

Während der Periode «Juni 75» (2. 6. bis 7. 7. 1975, 35 Tage) wird der Wurzelraum regelmässig mit Niederschlägen versorgt, als Folge bleibt dem Wurzelraum ein gleichmässiges Wasserangebot während der ganzen Periode erhalten.

Die Saugspannungen, die direkten Einfluss auf den durch die Pflanze zum Wasserentzug aufzubietenden Energiebetrag ausüben, bleiben konstant im Bereich von etwa 100 cm WS, was einem optimalen Wasserversorgungszustand unter aeroben Bedingungen entspricht (Abbildung 5).

Abbildung 5. Saugspannungsverteilung im Wurzelraum, dargestellt an der halben Radial-Schnittfläche durch den Wurzelraum, Datum: 20. 6. 1975.



Während der Messperiode «Juni 76» (3. 6. bis 9. 7. 1976, 36 Tage) herrschen grundsätzlich andere äussere Bedingungen: Ausbleibende Niederschläge führen zu einer steten Wassergehaltsabnahme im Wurzelraum und einer entsprechenden Saugspannungszunahme.

Die durchschnittlichen Tagestemperaturen steigen von 8,4 °C bis 25 °C, verbunden mit einer Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit.

Die Auswirkungen dieser zwei stark unterschiedlich gearteten Witterungsbedingungen auf die Bilanzgrössen sind in den Abbildungen 6 und 7 ersichtlich.

Abbildung 6. Darstellung der Bilanzgrößen und des Saugspannungsverlaufs während der «Juni 75»-Periode.

— \* —: jeweilige Mittelwerte über die ganze Periode.

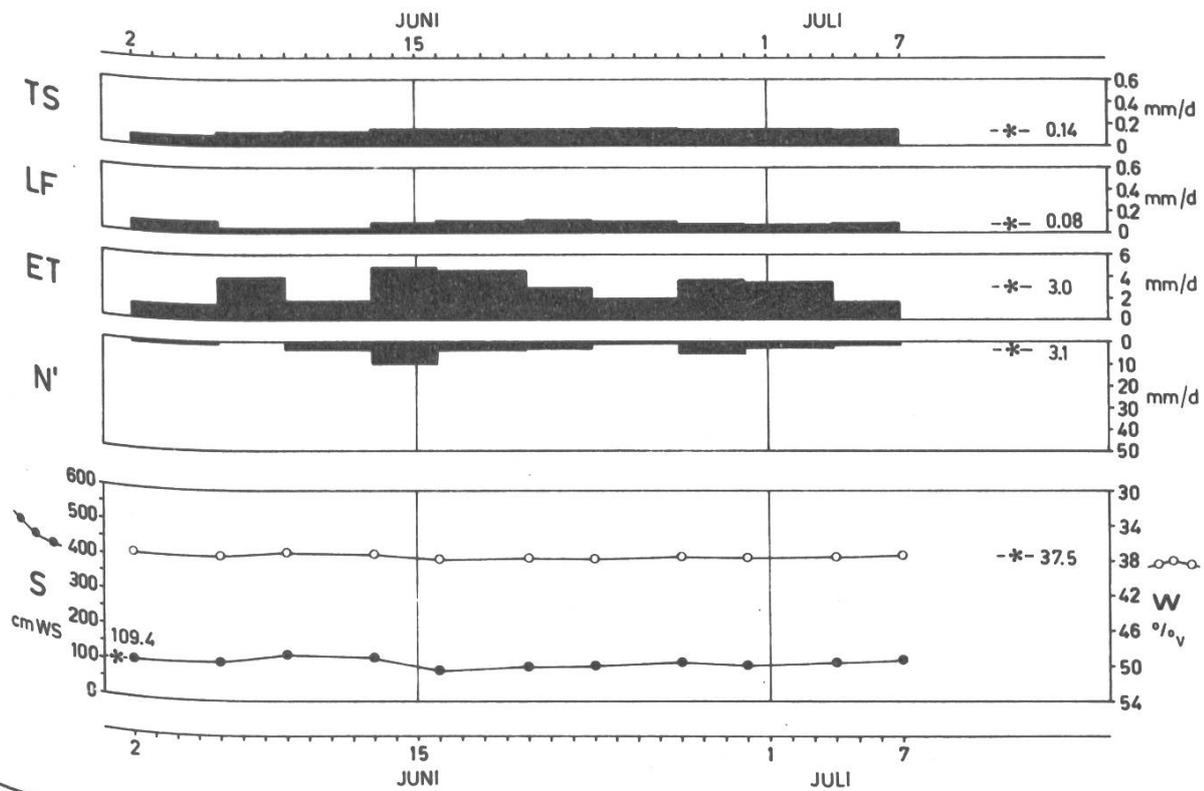
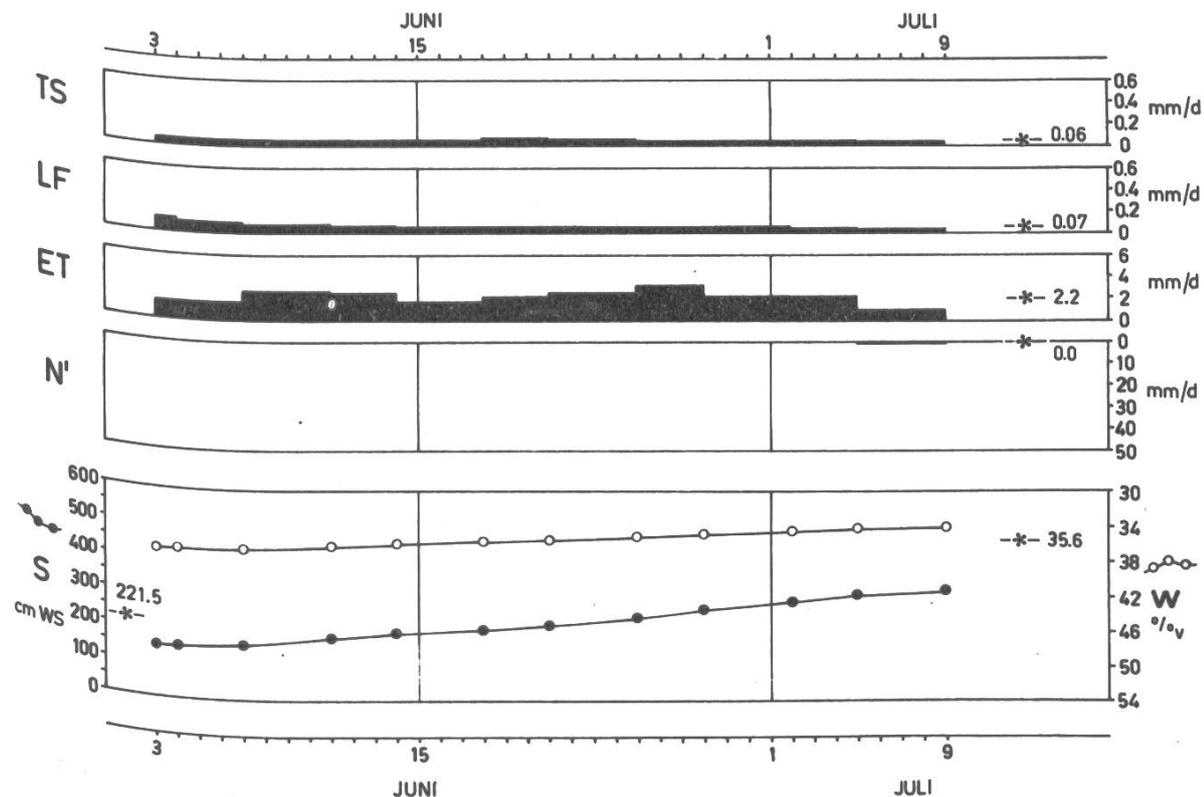


Abbildung 7. Darstellung der Bilanzgrößen und des Saugspannungsverlaufs während der «Juni 76»-Periode.

— \* —: jeweilige Mittelwerte über die ganze Periode.



Die Analyse der ET-Raten für die «Juni 75»-Periode zeigt ein relativ rasches Ansprechen der Evapotranspiration ET auf die unterschiedlich anfallenden Niederschläge.

Dies ist begründet durch den von *Item* (1974) eingehend besprochenen Vorgang, dass gerade im Saugspannungsbereich von 50—200 cm WS die Evapotranspirationstätigkeit empfindlich auf schon geringe Saugspannungsveränderungen reagiert. Die Transpiration wird somit schon bei einem kleinen Wasserdefizit von einigen wenigen ‰ unter dem Sättigungswert spürbar eingeschränkt. Bei Wasserinfiltration als Folge von neuen Niederschlägen sinken die Saugspannungen wieder ab, und die Transpirationsrate wird unter gleichen äusseren Bedingungen auch wieder ansteigen.

Der beobachtete Baum transpiriert unter diesen, bodenhydrologisch gesehen, beinahe optimalen Bedingungen während der ganzen Periode durchschnittlich 3 mm/d, bei etwa gleich grossem Niederschlag auf die Bodenoberfläche von 3,1 mm/d. Die Tiefensickerungsrate TS, über die ganze Periode gemittelt, liegt bei 0,14 mm/d.

Die höchsten Tageswerte während dieser Periode sind für die ET bei 4,8 mm, für die Tiefensickerung bei 0,16 mm.

In der «Juni 76»-Periode wird die Evapotranspiration ET durch die kontinuierlich ansteigenden Saugspannungen im Boden stark eingeschränkt und erreicht nur noch einen Tagesmittelwert von 2,2 mm, über die ganze Periode gemittelt. Da kein Niederschlag zu verzeichnen ist, geht dieser Wasserentzug voll auf das Konto eines Abbaus des Wasservorrats im Wurzelraum von 36,9 ‰ auf 34,1 ‰. Die ohnehin schon kleine Tiefensickerungsrate wird noch einmal eingeschränkt und vermindert sich auf durchschnittlich 0,06 mm/d.

Unter den während dieser Periode herrschenden Witterungsbedingungen muss berücksichtigt werden, dass die Annahme « $ET \approx$  Wasseraufnahme durch die Wurzeln», nicht mehr zutreffen kann. Aufgrund von Messdaten und Gradientenberechnungen muss ein wesentlicher Anteil (bis zu 1 mm/d) der Evaporation E allein zugeschrieben werden, was den effektiven Transpirationsbetrag auf zirka 1,2 bis 1,5 mm/d reduziert.

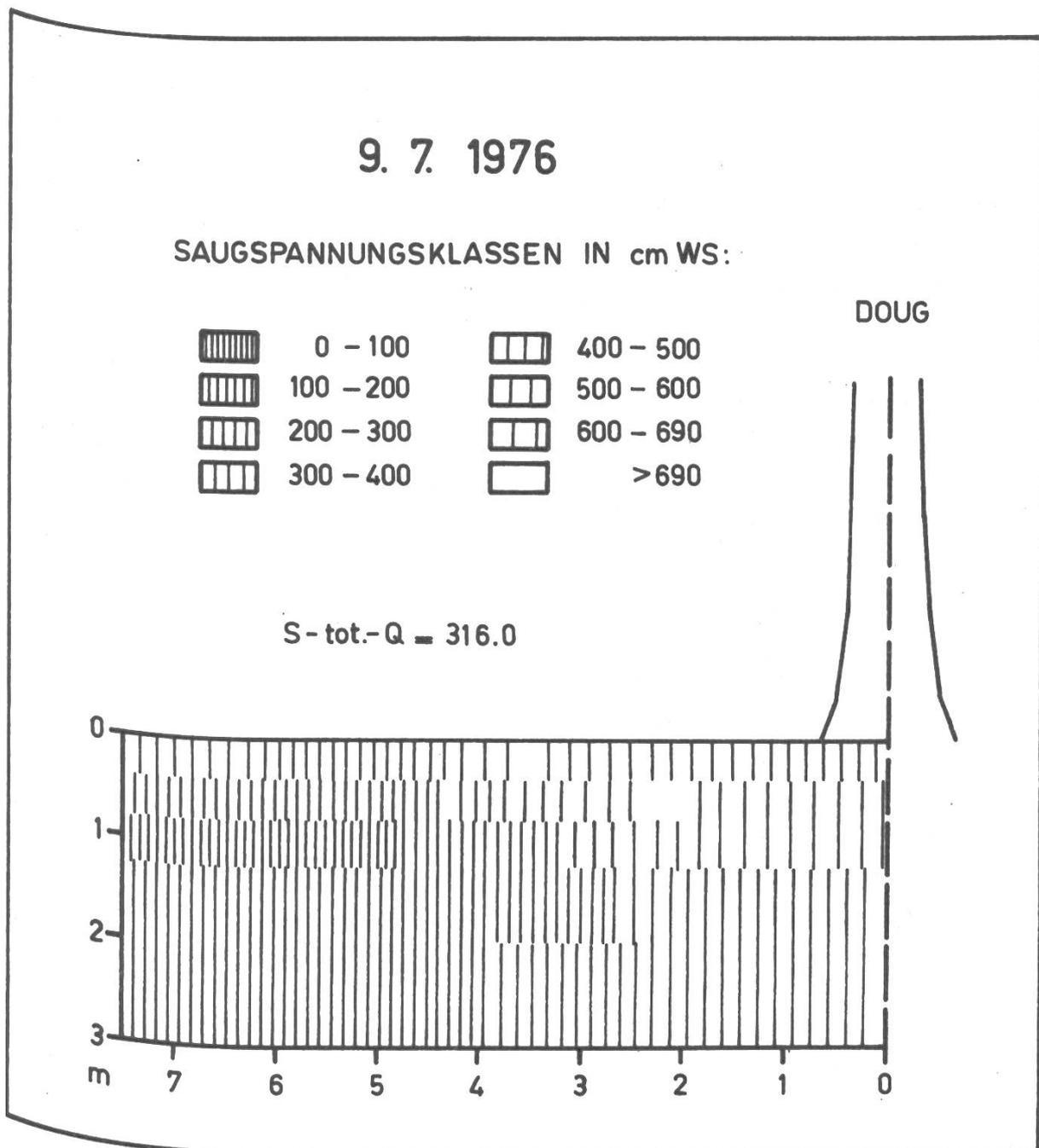
Der grösste berechnete ET-Tageswert während der ganzen Periode erreicht 2,7 mm/d, und dies zu Beginn der 34 Tage dauernden niederschlagsfreien Periode. Die vermutlich relativ grosse Evaporation E während dieser Zeitspanne wird begründet durch eine Gradientenumkehr der Bodenwasserflüsse bis in 100 cm Tiefe. Das heisst, dass während dieser Periode im Bereich von 0 bis 100 cm Tiefe der Wasserfluss aufwärts gerichtet war.

Bei der Beurteilung dieser Trockenperiode bezüglich einer physiologischen Schädigung des Baums, kann fast mit Sicherheit angenommen werden, dass auf diesem Standort die Massenleistung des Baums auf Null oder nahezu Null zurückging und dass das für die Wurzeln noch erreichbare

Wasser lediglich zur Aufrechterhaltung des physiologischen Systems verwendet wurde.

Da jedoch die Saugspannungen im Wurzelraum, mit Ausnahme der zentralen Zone um die Herzwurzel, zum Teil noch im Bereich des leicht verwertbaren Wassers (Saugspannung < 690 cm WS) lagen (vergleiche Abbildung 8), kann mit ebenso grosser Sicherheit vermutet werden, dass der Baum keinem eigentlichen Wasserstress ausgesetzt war und somit keine irreversible Trockenschäden eintraten. Diese Aussage lässt sich jedoch kaum auf junge

Abbildung 8. Saugspannungsverteilung im Wurzelraum, dargestellt an der halben Radial-Schnittfläche durch den Wurzelraum, Datum: 9. 7. 1976.



Kulturen mit noch mässig entwickeltem, und deshalb flachgründigem Wurzelwerk ausdehnen.

Zudem ist diese Einschätzung nicht zu verallgemeinern, sondern sie ist an den zu Beginn beschriebenen Bodentyp gebunden.

#### Zusammenfassung Kapitel 3.2:

- Die leicht pseudovergleyte, staubreiche, stark saure Parabraunerde bewirkt mit ihren bezüglich Wasserversorgung in günstigen Bodentiefen liegenden Stauzonen, dass fast alle auf den Boden auftreffenden Niederschläge unmittelbar oder als bereitstehender Vorrat der Pflanze zur Verfügung stehen. Die Gefährdung von Baumbeständen mittleren bis höhern Alters ist auf solchen Böden während langen Trockenperioden stark vermindert.
- Hingegen wäre wohl auf einer sandigen Schotterbraunerde (zum Beispiel Lokalform «Winzlerboden») bei gleichen Witterungsverhältnissen das Eintreten von Trockenschäden für die Douglasie nicht zu vermeiden gewesen.
- Die Evapotranspirationsrate reagiert sehr fein auf Saugspannungsveränderungen im Bereich von zirka 50—200 cm WS, das heisst, schon relativ kleine Wassersättigungsdefizite schränken die Wasseraufnahme stark ein.

### 3.3 Schätzung der Trockensubstanz-Produktion

Für die praktische Forstwirtschaft interessiert auf einem gegebenen Standort nach erfolgter waldbaulicher Tätigkeit letzten Endes die produzierte Biomasse, insbesondere der Anteil an Stammholz, als bestverwertbarem Nutzholz.

Es soll hier ansatzweise versucht werden, mittels des errechneten Wasserverbrauchs auf die produzierte Biomasse zu schliessen. Leider steht und fällt diese Methode mit der Qualität des verwendeten Transpirationskoeffizienten. Dieser Transpirationskoeffizient TK ist definiert als Transpirationsmenge Wasser in g/ g erzeugter Trockensubstanz.

Aus Angaben in verschiedenen Arbeiten (zum Beispiel *Eidmann* [1943], *Eidmann* [1962] und *Eidmann/Schwenke* [1967], alle zitiert in *Köstler et. al.* [1968]) treten die Birke und die Aspe bezüglich des Wasserverbrauchs als «Verschwender-Baumarten» hervor, ebenso die Lärche unter den Nadelhölzern. Uneinheitlich ist die Beurteilung der Effizienz der Douglasie. Teils gilt sie als sehr effektiver Wasserverbraucher, teils eher als «reichlicher Wasserverbraucher». Diese uneinheitliche Beurteilung liegt wohl am nur dürftig vorliegenden Datenmaterial.

Für die folgende Rechnung soll ein mittlerer TK von 400 g H<sub>2</sub>O/ g Trockensubstanz angenommen werden. Das heisst, vom aufgenommenen Wasser

werden 0,25 % in der Trockensubstanz angelegt, der Rest von 99,75 % wird transpiriert.

Der baum-frische Biomassen-Zuwachs errechnet sich somit als:

$$\text{Biomasse frisch} = \frac{ET_{\text{tot}} \cdot A_{\text{Wu}} \cdot \rho_{\text{HOH}}}{TK \cdot \rho_{\text{Htro}} \cdot 10^3} \text{ in m}^3$$

wobei für die Vegetationsperiode 1975 eingesetzt wird:

$ET_{\text{tot}}$	= 500,9	Totale ET	(L/m <sup>2</sup> oder dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
$A_{\text{Wu}}$	= 176	Versuchsfläche	(m <sup>2</sup> )
TK	= 400	Transpirationskoeffizient	(kg/kg)
$\rho_{\text{Htro}}$	= 0,47	Trockendichte Douglasie	(kg/dm <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{HOH}}$	= 0,99	Dichte Wasser	(kg/dm <sup>3</sup> )

Daraus errechnet sich die frische Biomasse von 0,46 m<sup>3</sup>. Unter der Annahme eines 60%igen Anteils des Derbholzes an der effektiv produzierten Holzmasse ergibt sich so ein Derbholzzuwachs von 0,28 m<sup>3</sup> für diesen einzelnen Baum. Bei einer Standfläche dieser Douglasie von 150 m<sup>2</sup> resultiert, extrapoliert, ein jährlicher Zuwachs von 15,83 m<sup>3</sup>/ha.

Ein Vergleich dieses Werts mit den Massentafeln zeigt, dass diese Grösse durchaus im Bereich des Möglichen liegen würde.

Es sei hier jedoch noch einmal darauf verwiesen, dass diese Rechnung

1. nur den rechnerischen Zusammenhang zwischen Wasserverbrauch und Massenleistung mittels des Transpirations-Koeffizienten TK aufzeigen wollte, und da
2. die Güte dieses TK mangels ausreichenden Datenmaterials nicht genügt,
3. die ganze Verknüpfung der Standortgüte bezüglich des optimalen Wasserangebots mit den ertragskundlichen Gegebenheiten erst sehr generell erfasst werden kann.

### 3.4 Der Waldboden als Grundwasserspender

Bereits im Kapitel 3.1 wurde auf die zu vernachlässigend kleine Tiefensickerungsrate während der Vegetationsperiode hingewiesen. Diese wohl noch messbaren Wassermengen stellen, wasserwirtschaftlich gesehen, nichts dar.

Etwas interessantere Zahlen bietet hingegen die Zwischen-Vegetationszeit zwischen Ende Vegetationsperiode 1975 und Anfang Vegetationsperiode 1976, das heisst zwischen dem 17. 11. 1975 und dem 20. 4. 1976. Während dieser 155 Tage dauernden Periode fielen 192 mm Niederschlag auf die Bodenoberfläche im Bestand. Im gleichen Zeitraum verringerte sich zudem der Boden-Wasservorrat um 2,45 %<sub>v</sub> oder 74 mm. Somit gingen dem Messvolumen total rund 265 mm Wasser verloren.

Saugspannungsuntersuchungen während dieser Zeit deuten darauf hin, dass mindestens ein kleiner Teil dieses totalen Wasserverlusts von 265 mm der Evaporation E beziehungsweise der Transpiration T während des Winterhalbjahrs zugeschrieben werden muss.

Dazu muss auch angenommen werden, dass durch die Wasseraufnahme der Wurzeln, die vor Beginn der oberirdisch in Erscheinung tretenden Vegetationsperiode einsetzt, der Wasserverlust zu hoch geschätzt wird. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann gleichwohl postuliert werden, dass für das Winterhalbjahr Tiefensickerungsraten im Bereich von 1 mm/d, also der 10- bis 15fache Betrag der TS-Rate während der Vegetationsperiode, zu erwarten sind.

Dies wiederum bedeutet eine respektable Wassermenge, nämlich rund 1/6 bis 1/7 eines Jahres-Niederschlags, die als potentielle Grundwasserspense zur Verfügung steht.

#### 4. Zusammenfassung

Anhand eines forstlich-bodenphysikalischen Projekts zum Wasserhaushalt eines Einzelbaums innerhalb eines Waldbestands wurden die folgenden generellen Bilanzierungswerte errechnet:

- Auf dem beschriebenen Standort verbraucht der Baum während der Vegetationsperiode rund 85—90 % des Bestandesniederschlags. Circa 20 % des Freiland-Niederschlags werden interzeptiert.
- Die höchsten ET-Tageswerte liegen bei 5 mm und diese setzen eine relativ hohe Wassersättigung im Boden (mit kleinen Saugspannungen) voraus.
- Die Tiefensickerung TS während der Vegetationsperiode ist für diesen Standort vernachlässigbar klein; ausserhalb der Vegetationsperiode können jedoch etwa 1 mm/d als potentielle Grundwasserspense veranschlagt werden.

In allgemeiner Form können somit folgende Aussagen gemacht werden:

- Das Wasserangebot im Wurzelraum eines Baums steuert in starkem Masse die Evapotranspiration und somit das Wachstum eines Baums.
- Das Wasserangebot für die Baumwurzeln als Funktion der Zeit ist einerseits von der aktuellen Versorgungslage (Niederschläge), andererseits jedoch in entscheidendem Masse vom Aufbau des Bodenprofils am jeweiligen Standort abhängig.
- Die gleichen physikalischen Bodeneigenschaften können je nach Standortsansprüchen der verschiedenen Baumarten negative oder äusserst positive Effekte zeigen. (Als Beispiel wird in dieser Arbeit auf die grosse

Rolle der gehemmten Sickerung hingewiesen, die eine Stauschicht in bestimmter Tiefe auslösen kann.)

### 5. Folgerungen für die forstliche Praxis

Viele öko-physiologische Aussagen können auf einem gegebenen Standort in der Regel nicht generell, sondern nur spezifisch, das heisst auf bestimmte Baumarten bezogen werden.

Die langfristig sich zweckmässig auswirkende Baumartenwahl ist nur möglich, wenn die Standortverhältnisse genügend bekannt sind, das heisst wenn neben Klima, Relief und pflanzensoziologischer Einordnung auch die Bodeneigenschaften eines Standorts ausreichend untersucht worden sind.

Bei der statischen Interpretation eines Bodenprofils muss zwischen den Bodeneigenschaften an sich und deren ökologischen Auswirkungen unterschieden werden. So hat zum Beispiel dieselbe «durchwurzelbare Bodentiefe» je nach Skelettgehalt des Bodens aus ökologischer Sicht eine unterschiedlich grosse «Gründigkeit». In gleichem Sinne bieten zum Beispiel zwei wassergesättigte Böden gleicher Feinerde-Zusammensetzung, einmal mit, einmal ohne Skelett, dem gleichen Wurzelwerk ganz unterschiedliche nutzbare Wasserkapazitäten an.

Neben der statischen Betrachtung spielt die Dynamik der Wasserversorgung eine grosse Rolle. Witterungsbedingte Extremsituationen, wie anhaltende Nässe oder Trockenperioden, sind in der Beurteilung der ausreichenden Wasserversorgung miteinzubeziehen. Dabei müssen insbesondere auch 50- bis 100jährige Ereignisse bodenkundlich beurteilt werden (Einflüsse von Trockenheit, Wind, Nässe zum Beispiel auf Standfestigkeit usw.).

Evapotranspirationen (Wasserverbrauch), wie sie hier an einem Beispiel und in andern Untersuchungen unter verschiedenen Bedingungen errechnet wurden, können helfen, Schätzungen über die Dauer einer ausreichenden Wasserversorgung in Trockenzeiten, respektive die Dauer eines tolerierbaren anaeroben Zustands in zu nassen Perioden, anzustellen.

Im weitern ist die Kenntnis der artspezifischen Ausbildung des Wurzelwerks als Funktion des Baumalters und der Bodeneigenschaften wichtig. Vor allem zu flachgründige Böden können im jungen Baumalter noch sichtbar gute Wuchsmöglichkeiten versprechen, die sie im ältern Baumstadium, wenn eine grössere Wurzelraumtiefe nötig wird, nicht mehr halten können.

Aus öko-physiologischen Gründen ist es angezeigt, den Stand- und Wurzelraum eines Bestands durch Mischung von tauglichen Baumarten auszunützen, was zudem für die Erhaltung der standörtlichen Produktionskraft besonders günstig ist. Bei extremen Standortverhältnissen, wie zum Beispiel bei Bodenvernässungen können einzelne Baumarten, wie Schwarzerle, Aspe,

Eschen und Weidenarten besonders günstige biologische Meliorationen auslösen, die für später einzubringende, ökonomisch erwünschte Wertträger bedeutungsvoll sind.

Die gründliche Kenntnis der makromorphologisch im Felde feststellbaren Bodeneigenschaften mehrerer repräsentativer Bodenformen eines Gebiets sollte den Forstmann ohne grosse Schwierigkeiten in die Lage versetzen, öko-physiologische Eigenschaften nicht untersuchter Böden durch Analogieschlüsse respektive Interpolationen zu bekannten Formen für forstlich-praktische Zwecke hinreichend genau zu bestimmen. Für die forstliche Praxis wird in Form der Publikation von Richard, Lüscher und Strobel (1980): «Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz», die in mehreren Bänden als Sonderserie der EAFV-Veröffentlichungen erscheinen wird, eine Hilfe zur noch besseren Standortsbeurteilung zur Verfügung stehen.

Organisiert durch die IUFRO wurde in einem internationalen Methodenvergleich, bei dem auch die Schweiz beteiligt war, deutlich gezeigt, dass für eine zweckmässige forstliche Standortskartierung und -beurteilung kombinierte vegetations- und bodenkundliche Methoden besonders gut geeignet sind (Ellenberg, Herausgeber [1967]). Diese Feststellung gilt auch heute noch.

### Dank

Diese Ausführungen sind Ausschnitte aus einer Dissertationsarbeit, die unter der verständnisvollen Leitung von Prof. Dr. F. Richard und Prof. Dr. Th. Dracos entstanden ist.

Die Versuchsfläche wurde uns von der Gemeinde Möhlin (Gemeindeam-  
mann Herr F. Metzger) ohne jede Einschränkung zur Verfügung gestellt. Der  
Gemeindeförster, Herr J. Steck, und seine Mitarbeiter liessen uns jede ange-  
forderte Hilfe bei der oft mühsamen Feldarbeit zukommen.

Viele Anregungen erhielt ich in Diskussionen mit Freunden und Kolle-  
gen der Professur für Bodenphysik ETH sowie der EAFV.

Allen namentlich und nicht namentlich aufgeführten Personen, die gehol-  
fen haben, diese Arbeit zu einem guten Abschluss zu bringen, möchte ich  
herzlich danken. Mein ganz spezieller Dank gilt Herrn W. Attinger, Förster  
an der Professur für Bodenphysik, der durch seine fachkundige und zuver-  
lässige Mitarbeit im Felde viel zum guten Gelingen dieser Untersuchung bei-  
getragen hat.

## Résumé

### Du bilan hydrique d'un arbre isolé à l'intérieur d'un peuplement

L'auteur commente des résultats obtenus lors d'une étude effectuée en 1975 et 1976 sur le régime de l'eau d'un douglas dans le peuplement.

Le *Pseudotsuga menziesii* var. *viridis* étudié consomme pendant la période de végétation d'une année normale (1975) en moyenne 2,4 mm/jour; les valeurs maximales atteignent 5 mm/jour durant mai/juin et août/septembre.

Lors d'une année sèche (1976), la consommation d'eau (et par conséquent l'activité d'assimilation) est fortement réduite. Pourtant la plante ne souffre pas de la sécheresse sur la station de Möhlin (AG).

Pendant la période de végétation, la percolation en profondeur est négligeable, si bien qu'un apport à la nappe phréatique est exclu. Durant la période de repos de la végétation, par contre, la quantité d'eau qui s'infiltré en profondeur est de 1 mm/jour, ce qui correspond à un apport potentiel à la nappe phréatique considérable. Cette quantité d'eau correspond à 1/7—1/6 des précipitations annuelles moyennes.

L'auteur remarque que ces valeurs sont spécifiques à la station et doivent être réadaptées selon le type de sol.

En utilisant le coefficient de transpiration on peut calculer approximativement la croissance annuelle. L'exemple cité ci-dessus nous indique surtout la corrélation étroite entre les calculs du régime de l'eau et les mesures de la production forestière.

Traduction: L. Froidevaux

### Literatur

- Ellenberg, H. (Hrsg.) (1967): Vegetations- und bodenkundliche Methoden der forstlichen Standortskartierungen. Veröffentlichungen des Geobot. Inst. der ETH, Stiftung Rübél, Heft 39, 298 S. Zürich
- Ellenberg, H. und Klötzli, F. (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 48, 4: 489—930
- Flühler, H. (1973): Sauerstoffdiffusion im Boden. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 49, 2: 125—250
- Item, H. (1974): Ein Modell für den Wasserhaushalt eines Laubwaldes. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 50, 3: 137—331
- Köstler, J. N., Brückner, E. und Bibelriether, H. (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. 284 S., Hamburg und Berlin, Paul Parey
- Leibundgut, H. (1966): Die Waldpflege. 192 S., Bern, Paul Haupt
- Richard, F. (1979): Bodenphysik. Vorlesung ETH Z. Vervielfältigung
- Richard, F., Lüscher, P. und Strobel, T. (1980): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Band II, Hrsg.: Eidg. Anst. forstl. Versuchswes.
- Uttinger, H. (1964): Niederschlag. Klimatologie der Schweiz, E. 1.—3. Teil: Mittl. Niederschlagsmengen. 124 S., Ann. schweiz. met. ZA, Beiheft 5
- Zehnder, H. (1975): Die Douglasie im Kanton Aargau. Der Schweizer Förster 111, 3: 92—96

