

Diss. Nr. 4729

EIN MODELL
FUER DEN WASSERHAUSHALT EINES LAUBWALDES
UNTER BESONDERER BERUECKSICHTIGUNG
DER FUNKTIONELLEN ZUSAMMENHAENGE ZWISCHEN WITTERUNGSFAKTOREN,
BODENWASSERGEHALT UND EVAPOTRANSPIRATION

A B H A N D L U N G

zur Erlangung
des Titels eines Doktors der Naturwissenschaften
der
E I D G E N O E S S I S C H E N T E C H N I S C H E N
H O C H S C H U L E Z U E R I C H

Vorgelegt von

H A N S I T E M
Dipl. sc. nat. ETH
geboren am 14. Juli 1944
von Mathon (Kt. Graubünden)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. F. Richard, Referent
PD Dr. P. Schmid, Korreferent

1974

Separatdruck aus Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes. Bd. 50

Ein Modell für den Wasserhaushalt eines Laubwaldes unter besonderer Berücksichtigung der funktionellen Zusammenhänge zwischen Witterungsfaktoren, Bodenwassergehalt und Evapotranspiration

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, ein mathematisches Modell zu finden, das den Wasserhaushalt eines Waldes in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen beschreibt. Den Anstoss dafür bilden vor allem drei Gesichtspunkte. Der erste Beweggrund ist das Interesse für das gegenseitige Ineinandergreifen aller am Wassertransport in einer Vegetationsdecke beteiligten Einzelvorgänge. Ein Funktionsmodell vermag hievon ein ziemlich anschauliches und detailliertes Bild zu liefern. Einen zweiten Schwerpunkt bildet das Streben nach besserer Kenntnis der einzelnen kausalen Zusammenhänge. Diesbezüglich dürften die Auswertungen anhand empirischer Befunde etliche neue Hinweise geben. Als direkte praktische Anwendung sollte sich schliesslich mittels der gesuchten Beziehung der Bodenwassergehalt zu irgend einem Zeitpunkt der Vegetationsperiode aus jenem im Frühjahr und meteorologischen Beobachtungen für das dazwischenliegende Intervall berechnen lassen. Mit Hilfe solcherart ermittelter Feuchtigkeitswerte könnte zum Beispiel der Einfluss eines eventuell auftretenden Wassermangels auf den Massenzuwachs der Bäume studiert werden.

Schon viele Forscher haben sich mit der Evapotranspiration verschiedenartiger Vegetation und langfristigen Wasserbilanzen beschäftigt. Die Verdunstung wird häufig mit der Formel von Penman berechnet (Seite 61). Sein Ansatz beruht teils auf physikalischen Gesetzen, teils auf Beobachtungen. Er drückt die Evaporation einer freien Wasserfläche als Funktion von potentieller Einstrahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit aus. Meist wird dann angenommen, unter genau entsprechenden atmosphärischen Bedingungen sei die Verdunstung an irgendwelchen anderen Oberflächen proportional zu jener offenen Wassers. Für Laubwald errechnete man aus Jahresbilanzen einen Proportionalitätsfaktor von rund 0,95.

Eine Anzahl agrarwissenschaftlicher Studien wurden dem Zusammenhang zwischen der Bodensaugspannung im Wurzelraum und der

Evapotranspiration einer Vegetationsdecke gewidmet. Es wurde immer beobachtet, dass die Verdunstung der Pflanzen innerhalb eines gewissen Bereichs der Bodensaugspannung fast gleich blieb wie bei Wassersättigung. Erst über einer von der untersuchten Kultur abhängigen Saugspannungsgrenze stellte sich dann eine ziemlich rasche Abnahme der Transpiration ein. Dieser kritische Punkt lag bei Saugspannungen zwischen 0,3 und 4 bar (siehe Aufstellung S. 199). In besonders genau durchgeführten Experimenten zeigte sich zudem, dass bereits bei niedrigeren Saugspannungen der Wasserentzug aus dem Wurzelraum mit sinkendem Wassergehalt geringfügig abnimmt. Wie auch theoretisch zu erwarten war, entspricht daher die Beziehung zwischen Transpiration und Bodenwassergehalt einer s-förmigen Kurve (Figur 49).

Die Evapotranspiration bei gesättigtem Boden bezeichnet man als potentielle Evapotranspiration. Ihr Wert ist abhängig von der Bodenbedeckung und den jeweils herrschenden Witterungsverhältnissen.

Die Bodensaugspannungen dürften unter sonst vergleichbaren Bedingungen für Waldbestände meist niedriger sein als bei landwirtschaftlichen Kulturen. Man nahm deshalb bis heute an, der Bodenwassergehalt habe in mitteleuropäischen Klimaverhältnissen keinen wesentlichen Einfluss auf die Verdunstung der Bäume. Immerhin wurde gezeigt, dass ein Grundwasserspiegel die Evapotranspiration eines Waldes auf extrem durchlässigem Boden beachtlich zu erhöhen vermag.

In der Literatur finden sich nur spezielle Untersuchungen einzelner Vorgänge im Wasserhaushalt an verschiedenen Kulturpflanzen auf immer wieder anderen Böden. Die vorhandenen Ergebnisse werden nun in einem Modell miteinander verknüpft, wodurch sich ein formal vollständiger Ansatz ergibt. Für den Wald sind jedoch die zur Charakterisierung der Vegetation einzusetzenden Parameterwerte nicht bekannt. Sie müssen aus Feldmessungen in einem Bestand geschätzt werden.

Der jeweilige Wassergehalt im Wurzelraum eines Versuchsobjekts mit gegebenen Boden- und Vegetations-Eigenschaften wird durch die Witterungsverhältnisse in einem längeren vorangehenden Zeit-

abschnitt bestimmt. Sobald die Saugspannung einen Einfluss auf die Verdunstung ausübt, hängt die Wasserabgabe an die Atmosphäre ebenfalls von der Vorgeschichte ab. Umgekehrt beeinflusst die Einschränkung der Evapotranspiration den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchtigkeit. Ein Funktionsmodell vermag auch derart komplexe Wechselwirkungen zu erfassen.

Der Modellansatz stützt sich auf die Annahme, dass die potentielle Evapotranspiration eines Waldbestandes unter entsprechenden Umweltbedingungen proportional zu demjenigen Wert sei, den man mit der Penman-Formel für freies Wasser berechnet. Natürlich kann die Benetzung der Blattoberflächen durch einen Niederschlag den Proportionalitätsfaktor verändern. Die Luftfeuchtigkeit im Kronenraum steigt dann erheblich über jene im freien Land an, während zugleich eine viel grössere verdunstende Fläche beinahe ohne Widerstand Wasser abgibt. Diesen Gegebenheiten trägt das Modell mittels verschiedener Parameterwerte für trockenes bzw. nasses Laub Rechnung. Weiter wird berücksichtigt, dass die Blätter in den Kronen wie auch in der Krautschicht am Tag nach einem Niederschlag immer noch feucht sein können. Spezielle Beachtung verdient der Einfluss des Windes auf die Evapotranspiration der Bäume. Die Penman-Formel ist ursprünglich für ziemlich glatte Oberflächen gedacht; der Waldbestand weist jedoch eine extrem hohe Rauigkeit auf. Wegen der entstehenden Turbulenzen ist das Windprofil über Wald anders geformt als jenes über offenem Land; zudem bringt die beachtliche Mächtigkeit des Kronenraums ganz andere Diffusionsverhältnisse mit sich. Für die hierdurch notwendige Umrechnung der in 2 m Höhe über Freiland gemessenen Geschwindigkeiten wird ein dritter Parameter eingeführt. Schliesslich sind noch drei weitere Parameterwerte zum Beschreiben der Beziehungen zwischen potentieller Evapotranspiration, Bodenwassergehalt und aktueller Verdunstung erforderlich. Insgesamt müssen also sechs offen gebliebene Parameterwerte aus Feldmessungen für einen Waldbestand geschätzt werden.

Die empirischen Daten, welche für die Schätzung dieser Parameterwerte erforderlich waren, wurden von Brühlhart (1969) publiziert. Mit Tensiometern bestimmte er in Intervallen von 2-3 Tagen die Saugspannungen in mehreren Tiefen in und unter dem Wurzelraum. Daraus ergab sich der Wassergehalt und aus den Gradienten der Wasserspannung überdies die Tiefensickerung. Die ebenfalls registrierten Niederschläge neben dem Bestand erlaubten hernach die Ermittlung der Evapotranspiration. Damit kann die Wasserbilanz für jeden Messabschnitt aus den vorhandenen Daten berechnet werden. Die Witterungsaufzeichnungen schliesslich stehen von Stationen des schweizerischen meteorologischen Beobachtungsnetzes zur Verfügung.

Die Schätzung der offengebliebenen Parameterwerte mit der Methode der kleinsten Quadrate führt zu folgenden Ergebnissen:

- Unter gleichen atmosphärischen Bedingungen ist die potentielle Evapotranspiration des untersuchten Laubmischwaldes rund doppelt so gross wie jene einer freien Wasserfläche oder etwa zweieinhalbmals so hoch wie diejenige einer Maiskultur (Figuren 58 und 59).
- Zwischen der potentiellen Evapotranspiration des Waldes mit trockenem resp. feuchtem Laub lässt sich kein gesicherter Unterschied feststellen.
- Im Laubwald ist der Einfluss des Windes auf die Evapotranspiration erheblich grösser als für relativ glatte Oberflächen (etwa Wasser oder Gras etc.). Aufgrund der Resultate kann nicht entschieden werden, wieviel jede der möglichen Ursachen zu dieser Erhöhung beiträgt.
- Bei gegebener potentieller Evapotranspiration nähern Arcustangensfunktionen die Abhängigkeit der aktuellen Verdunstung der Bäume vom Bodenwassergehalt im Rahmen der experimentellen Genauigkeit recht gut an.
- Der betrachtete Laubwald reagiert viel empfindlicher auf die Austrocknung des Bodens als die zum Vergleich herangezogenen

Kulturpflanzen (Figuren 51 und 52). An warmen Sommertagen schränkt er seine Wasserabgabe an die Atmosphäre bereits bei Saugspannungen über etwa 0,05 bar wesentlich ein. Dafür gibt es verschiedene mögliche Ursachen, vor allem eine geringere Wurzelichte, Unterschiede in der Reaktion der Spaltöffnungen sowie auch der längere Transportweg und die grössere Förderhöhe vom Boden bis zum Laubwerk der Bäume.

Entgegen der bisher oft verwendeten Arbeitshypothese weicht also das Verdunstungsverhalten des hier untersuchten Waldbestandes stark von demjenigen landwirtschaftlicher Kulturen ab.

Die der Auswertung zugrunde liegenden Vegetationsperioden 1965 und 1966 waren im Vergleich zum langjährigen Mittel sehr nass beziehungsweise eher nass. Dennoch hat der Laubmischwald in dieser Zeit seine Verdunstung an mehr als der Hälfte der Tage gegenüber der jeweiligen potentiellen Evapotranspiration um mindestens 30 % eingeschränkt. Für mehr als ein Drittel der Tage überstieg die Reduktion sogar 40 %. Die für Wald respektive Mais rechnerisch bestimmten jährlichen Verdunstungssummen verhalten sich zueinander ähnlich wie in der Literatur verzeichnete Messwerte vor und nach der Rodung einer Versuchsfläche.

Die für 1965 und 1966 von nur einem Waldbestand vorliegenden Daten haben eine erste Schätzung der Parameter lediglich für diesen speziellen Fall erlaubt. Eine Kontrolle dieser quantitativen Angaben wird erst anhand weiterer Feldversuche möglich sein. Ganz besonders trifft das auch für eine Verallgemeinerung des Modells hinsichtlich anderer Baumarten und Böden zu.

Immerhin haben unsere Untersuchungen klar erwiesen, dass ein Laubmischwald zwar in Perioden mit nasser Witterung durch seine Evapotranspiration erheblich mehr Wasser an die Atmosphäre abgibt als landwirtschaftliche Kulturen, in trockenen Zeitabschnitten hingegen bedeutend weniger.