

Die Entwicklung der Zielsetzung und der Methoden beiLysimeteruntersuchungen

W.C. Visser

**BIBLIOTHEEK DE HAAFF**

Droevendaalsesteeg 3a

Postbus 241

6700 AE Wageningen

Zielsetzung

Lysimeteruntersuchungen fingen in den Niederlanden an als Studien mit Bezug auf den Regenanteil, der durch die ungesättigte Zone des Bodenprofils nach tieferen Schichten absickerte und das Grundwasser - im Sinne des frei durch den Unterboden strömenden Wassers - vermehrte. Die Zielsetzung war hier, einen Eindruck zu bekommen von der Wassermenge, die den tieferen Schichten für die Trinkwasserversorgung entzogen wird, oder die auf Flussläufe und Polder zum Abfließen kommen konnte (1).

Es handelte sich um Bilanzfiguren über längere Zeitabschnitte, ein oder mehrere Jahre. Die Wasserentnahme für die Trinkwasserversorgung schöpfte aus einem grossen Speicher und man hatte kein Bedürfnis, über kürzere Zeitabschnitte informiert zu sein. Für wasserwirtschaftliche Zwecke waren auch Informationen über längere Zeit zweckmässig, weil man über Qualmwassermengen mehr zu erfahren wünschte und auch hier kurzfristige Schwankungen nicht in Betracht kamen (2).

Es waren im Anfang Fragen des Abflusses und der Speicherung auf lange Dauer, welche Anlass gaben Lysimeter zu bauen; Verdunstungsstudien wurden nicht angestrebt. Diesen alten Lysimetern fehlten denn auch alle Möglichkeiten, kurzdauernde Änderungen zu bestimmen, Verdunstungen zu berechnen, gespeicherte Wassermengen zu wiegen.

Aus Wassermangelgebieten und aus wissenschaftlichen Überlegungen kam der Anreiz, die Verdunstungsmengen zu bestimmen. Wo Wasser Mangelware ist, werden tägliche Wasserverluste interessant. Aber auch in humiden Gebie-



ten wurden diese kurzdauernden Schwankungen wichtiger. Wasseraufnahme und -abgabe wurden nicht länger auf das ganze Profil bezogen, sondern mussten mit Hinsicht auf das Pflanzenwachstum schichtweise bekannt sein. Abfluss war nicht nur interessant als Jahresmenge, sondern man wollte in kurzen Zeitabschnitten erfolgende Abflüsse ermitteln können, was für Höchstspenden von Flüssen, Hochwasservorhersage, Überschwemmungswahrscheinlichkeiten u. s. w. wichtig war. Der Lysimeter wurde von einer Vorrichtung zum Studium von stetigen Problemen zu einem Apparat, womit unstatige Erscheinungen erfasst und gedeutet werden sollten. Die wiegbaren Lysimeter genügten zu diesem Zweck nicht mehr. Es mussten selbstschreibende Wiegevorrichtungen und Wassergehaltsbestimmungen der einzelnen Schichten mit selbstschreibenden Abfluss- und Regenmessern kombiniert werden. Die Pflanzen, die die Wasserbilanz durch Interzeption sowie Verdunstungsabdrosselung beeinflussen, sollten hydrologisch besser beschrieben werden, der Boden sollte genauer definiert werden als Wasserleiter und Wasserspeicherer. Der Lysimeter ist in kurzer Zeit ein komplexes Gerät geworden, womit man die neuesten Kenntnisse auf den Gebieten der Bodenphysik, Hydrologie, Pflanzenphysiologie und Klimatologie mit einander zu verknüpfen sucht.

Diese Entwicklung hat sich in den Niederlanden ziemlich rasch vollzogen. Vor 10 Jahren wurde die Verdunstung interessant, die Verteilung der Entziehung über die Schichten aber noch nicht. Auch die Versickerung des Regens und die zeitweilige Anhäufung in den aufeinander folgenden Schichten waren noch kein Objekt spezieller Studien. Jetzt da mit der Neutronensonde die Wassergehaltsbestimmung so viel bequemer geworden ist, kann ein viel breiteres Programm angegriffen werden.

Das heutige Programm umfasst das Studium der Speicherung, der Anreicherung oder des Entzugs in den verschiedenen Schichten und Zeitabschnitten, des Abflusses in kleinster Zeitspanne, aber auch in längere, bis zu Jahresspende, der Verteilung des Regens über die Schichten, der Absickerungsgeschwindigkeit und der Verdunstung ebenfalls in kleinster Zeitspanne, differenziert nach Jahreszeit, Klima und Pflanzenbestand.

Praktisch richtet das Programm sich auf die Probleme der Wasserversorgung, der Wasserwirtschaft und der Land- und Forstwirtschaft. Technisch handelt es sich dabei um beziehungsweise die Vermehrung der Grundwasservorräte, die Fragen über Qualmwasser und Abflussspenden und um die Verdunstung und die Verfügbarkeit der Wasservorräte in den einzelnen Bodenschichten.

### Entwicklung in der Apparatur

Das Gefäss. In den Niederlanden wurden schon früh tiefe Lysimeter mit Grundwasser benutzt (2). Die übliche Frage der landwirtschaftlich erwünschten Entwässerungstiefe musste schon hierzu führen. Grössen von  $1 \text{ m}^2$  und  $1 \text{ m}$  Tiefe waren üblich, mit einer Tendenz nach Vergrösserung der Fläche und Tiefe (3). Die Entwicklung ist in der Richtung von Wagbarkeit fortgeschritten.

Die Wagung. Von den vielen Methoden, die jetzt ausgearbeitet sind, findet man in den Niederlanden zwei Systeme vertreten. Das System mit Schnellwaage ist von MAKKINK ausgearbeitet worden (4); das mit hydraulischer Waage mit Druckdosen von VISSER (5). Teilweise ausbalanzierte Gefässe mit Messung der restenden Gewichts differenzen, Brückenwaagen oder Gefässe, welche in schwereren Lösungen wie Zinksulfat treiben oder auf dem Gegendruck eines manometerähnlichen, kreisförmigen Quecksilberverschlusses, sind nicht vertreten.

Die Wassergehaltsprofile. Die Bestimmung der Wassergehaltsprofile mit Nylon- oder Gipsblocken ist öfters versucht worden, hat sich aber nicht bewährt. Mit Tensimetern wäre in den feuchteren Schichten zweifellos etwas anzufangen, aber dieses Messungsverfahren ist nicht ausgearbeitet worden, wahrscheinlich wegen der Schwierigkeiten, denen man in den trockenen Schichten begegnete.

Das Verfahren mit der Neutronen sonde und  $\gamma$ -Strahlungsmessung haben sich jeder anderen Methode überlegen gezeigt und würden jetzt allgemeine Anwendung verdienen, wenn die Apparate nicht so teuer wären.

Die Regenmessung. Die Regenmessung gibt in der Lysimetertechnik noch immer ziemlich grosse Schwierigkeiten, die nicht zu beheben sind, weil es keine Absolutmessung gibt und weil der Begriff Regen nicht genau

definiert ist. Die praktische Definition 'Regen ist das was die üblichen Regenstationen an Regen messen' ist für auf Anwendung gerichtete Forschung am einfachsten, belastet aber das Lysimeterstudium mit einem ziemlich grossen Fehler der Regenmessung. Die genaue Erfassung des Regens fordert eine genaue Verantwortung der Randeinflüsse und der Verdunstung während des Regenfalls und kurz nachher. Mit selbstschreibenden Waagen für den Lysimeter sind die Schwierigkeiten vielleicht zu beheben, da bei kurzer Regendauer in einfacher Weise, und bei längerer Regendauer mit Korrekturen für Verdunstung aus Strahlungsmessungen, der wirklich auf den Lysimeter gefallene Regen zu bestimmen ist. Diese Regenmenge kann nachher mit der praktischen Regenmessung korreliert werden.

Die Verdunstungsmessung. Die Verdunstung lässt sich bis jetzt noch nicht auf einfache Weise direkt messen. Die Methodik mit Plastikzelt ist für Lysimeter noch nicht angewandt worden. Diese Messung ist zu diskontinuierlich für bequeme Einschaltung in ein kontinuierliches Messverfahren. Die Bestimmung aus Differenzmessungen wurde in dem wägbaren Lysimeter erst möglich.

Der vertikale Dampftransport wird in den Niederlanden schon seit vielen Jahren von DEY im Rottegatpolder studiert (6). Wenn diese Methode ausgearbeitet sein wird, wird es eine wertvolle Bestimmung der Gebietsverdunstung sein. Das Verfahren ist aber weniger auf Lysimeterstudien gerichtet. Eine Bestimmung der Verdunstung eines gewissen Bestandes, der eine beschränkte Fläche bedeckt, wird nicht leicht gelingen. Die Begrenzung des Gebietes wird bei der Methode des vertikalen Dampftransportes immer schwierig sein.

Die Methode der abgeschnittenen Pflanzenteile steht in starkem Verdacht, eine Verdunstung zu messen, die für unbeschädigte Pflanzen nicht gültig ist. Als Messung der Verdunstung kommt diese Methode nicht in Betracht.

Viel Mühe gibt man sich, das Verdunstungsvermögen der Atmosphäre zu bestimmen. Viele Berechnungsmethoden sind entworfen worden, die jetzt alle eine gute Genauigkeit besitzen. In den Niederlanden sind Verfeinerungen der Penmanmethode von MAKKINK und von RIJTEMA ausgearbeitet worden. Auch Verdunstungsmessungen von freier Wasseroberfläche oder von feuchten Papier- oder Porzellanplatten werden benutzt, die letzteren mit weniger Erfolg. Verdunstung von scharf definierten Pflanzenbeständen auf Böden, welche hinreichend mit Wasser versehen sind, um maximale Verdunstung zu ermöglichen, wird nicht benutzt, obwohl diese Art von Popofflysimetern wert-

voll sein könnte. In dieser Hinsicht ist es wichtig, wie man sein Studium begrenzen möchte. Nimmt man einstrahlende Energie als wichtigsten Messwert, dann kann ein wissenschaftliches Studium vertretbar sein, aber bestimmt nicht einfach etwas lehren über die Verdunstung eines reichlich mit Wasser versehenen Pflanzenbestandes. Man kann aber auch die Verdunstung eines solchen Bestandes sofort messen und sich viele Studien ersparen.

Die hydrologische Problematik kann ganz schön gelöst werden mit Relativzahlen wie Verdunstung des offenen Wassers, bestimmt an einer Pfanne. Es ist immer möglich, ein Rechenverfahren so zu gestalten, dass man die Relativzahlen damit in den Absolutwert umwandeln kann.

Einige inhärente Ursachen von Unsicherheit. Die Beschreibung des Klimas mit Regendaten und Daten für Verdunstungskapazität der Atmosphäre ist nicht vollständig. Durch Taubildung und Befeuchtung bei Nebel kann mehr Wasser zugeführt werden als mit Regen allein erfolgt. Durch seitliche Einströmung von ungesättigter Luft kann mehr Verdunstung stattfinden als sich erklären lässt aus der auf die Fläche einstrahlenden Energie.

Interzeption und Stammabfluss ändern den Wasserzufluss aus Regen nach Stelle und Zeit. Interzeptionswasser kommt entweder gar nicht oder verspätet auf die Bodenoberfläche herunter. Stammabfluss konzentriert das Wasser auf einige wenigen Stellen, wo es den Boden sättigt und zu dem Grundwasser abfließt, während es bei gleichmässiger Verteilung vielleicht in der Bodenkrume festgehalten werden könnte.

Oberflächentransport bei Starkregen kann seitlichen Abfluss und lokalisiertes Einsickern zur Folge haben. Genau wie die vorhergenannten Einflüsse kompliziert dies die Wasserbilanz.

Alle die hier genannten Punkte haben die Eigenschaft, dass man sie zahlenmässig nur schwer erfassen kann und es keine Prüfungsmethoden gibt, so dass man seine Daten nicht einwandfrei überprüfen kann. Auf verschiedene Weise wird versucht, diesen Mangel zu beseitigen. Der Lysimeter wird in der Mitte eines grösseren Gebietes mit gleichem Pflanzenbestand gestellt. Über die Bodenoberfläche aufragende Gefässränder schalten Oberflächenabfluss aus. Kurz geschnittener Graswuchs beseitigt Interzeption. Es entstehen dann aber unnatürliche Verhältnisse. Es wird der Mühe wert sein zu erwägen, ob nicht Interzeptions- und Oberflächenabflussmessungen in das Lysimeterstudium aufgenommen werden müssen. Im allgemeinen werden die doch ziemlich teureren Lysimeter nicht so stark ausgebeutet wie es möglich und technisch und wissenschaftlich wertvoll wäre.

### Fortschritte in der Abflussberechnung

Die älteren Lysimeteruntersuchungen sind bei näherer Betrachtung immer Abflussstudien gewesen. Weil man keine Möglichkeiten hatte, Speicherung und Verdunstung zu trennen, und nur nicht-prüfbare Voraussetzungen über beide Bilanzglieder machen konnte, sind die Äusserungen über Verdunstung spekulativ gewesen. Der Lysimeter ist denn auch damals zur Bestimmung der Vermehrung des Bodenwassers entworfen worden.

Die einfache Korrelation zwischen Regen und Abfluss. Es hat sich schon bald herausgestellt, dass Regen und Abfluss in einfacher Weise zusammenhängen, wenn man nur mit Jahresmengen arbeitet. Der Abfluss ist bei gut wasserhaltenden Böden der über einen bestimmten Wert hinaus anfallenden Regenmenge gleich. Dieser Mindestwert wurde dann der Verdunstung gleichgesetzt. Es gab jedoch Lysimeter, wo dieser einfache Zusammenhang nicht gefunden wurde, da nur ein gewisser Prozentsatz des den Mindestwert übersteigenden Regens zum Abfluss kommt. Auch nicht-geradlinige Beziehungen wurden gefunden.

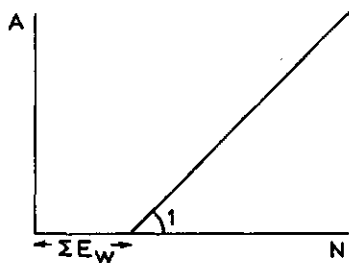


Fig. 1. Bei Böden mit grossem Feuchteinhalt und im allgemeinen nicht gehemmter Verdunstung wird aller Regen, welcher über die potentielle Verdunstung hinaus fällt, zum Abfluss gelangen

Von diesem komplizierteren Zusammenhang kann man sich folgendermassen ein Bild machen. Wenn während kürzerer oder längerer Zeit die Bodenfeuchtigkeit zu niedrig ist, um die Verdunstung in vollem Umfang zu ermöglichen, wird der Verdunstungswert, der in der Regen-Abfluss Relation auftritt, niedriger ausfallen. Wenn das Übermass an Regen doch ganz zum Abfluss kommt, dann wird die Neigungstangente im Diagramm 2 gleich 1 bleiben, aber die Linien werden sich bei niedrigem Regenfall nach links verschieben. Gleichmässig verteilter Regen wird bei zunehmendem Jahresniederschlag zu einer Darstellung führen, in der der Zusammenhang sich nach rechts und nach höheren Abfluss-

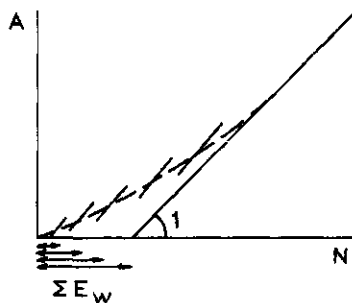


Fig. 2. Böden mit ungehemmter Verdunstung, wenn Wasser verfügbar ist, aber mit Zeitabschnitten, wenn kein Wasser verfügbar ist, werden bei geringem Regen eine kleinere Verdunstung aufzeigen als bei grösseren Regenmengen. In dieser Situation wird der Zusammenhang zwischen A und N nicht linear sein

werten verschiebt. Schliesslich wird die Regenmenge genügen um die Verdunstung das ganze Jahr unbehindert auf der klimatologisch bedingten Maximalhöhe zu erhalten. Der Verdunstungspunkt auf der horizontalen Achse wird sich nicht weiter nach rechts verschieben, und die Linien für verschiedene Regenverteilungen werden zusammenfallen.

In Wirklichkeit wird aber bei einer kleinen Regenmenge in einem trockenen Profil der Zuwachs des Abflusses nicht dem Zuwachs des Regens gleich sein. Ein Teil wird abfliessen, ein Teil wird verdunsten, ein Teil wird gespeichert werden. Anstatt eines eins-zu-eins-Verhältnis zwischen Regen und Abfluss wird ein kleinerer Anstieg des Abflusses auftreten. Der Zusammenhang zwischen Regen und Abfluss kann ohne die Wasserspeicherung als differenzierenden Kennwert nicht gut beschrieben werden.

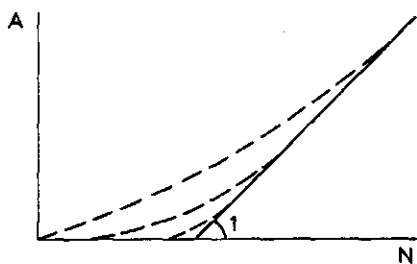


Fig. 3. Bei den weniger wasserhaltenden Böden wird zeitweise ein Teil des Regenwassers gespeichert werden und wird weniger verdunsten als durch Regen zugeführt wird. Das  $\Delta A/\Delta N$  Verhältnis wird kleiner sein je grösser das Wassergehaltsdefizit im Boden ist. Dieser Zusammenhang führt zu flächeren, gekrümmten Kurven

Schliesslich wird die Unregelmässigkeit der Regenverteilung im Sommer Einfluss auf die Verdunstung haben. Im Winter mit niedrigen Verdunstungswerten wird dieser Einfluss klein sein. Dieser Zeiteinfluss fordert wegen der unstätigen Strömungen die bekannten schwierigen Lösungen, welche für die Berechnung von Abflusspenden wichtig sein würden, aber bis jetzt bei Lysimeteruntersuchungen noch wenig beachtet worden sind. Abflussberechnungen mit stätigem Charakter haben viele Untersucher gemacht. Durch gewisse Voraussetzungen über Verdunstung oder Speicherung hat man versucht, eine Lösung herbeizuführen. Im Winter kann man die Verdunstung der des offenen Wassers gleichsetzen. Für ganze Jahre kann man die Speicherungsänderung gleich Null setzen. Für die Sommermonate wird man mit diesen Voraussetzungen aber niemals zuverlässige Verdunstungswerte bekommen. Für eine Beschreibung des Abflusses sind diese - meist graphischen - Methoden aber wertvoll.

Das mathematische Abflussstudium.

Mathematisch ist der Zusammenhang zwischen Regen und Abfluss mit grosser Genauigkeit zu beschreiben (7). Der erste Teil der Gleichung (1) nach STOL sagt aus wie gross der Reduktionsfaktor ist, womit der Regen in den Abfluss umgerechnet werden kann. Daneben steht der Teil, der aussagt, wie gross die Verzögerung ist, womit der Regen durch die ungesättigte Zone absickert und als Abfluss hervortritt.

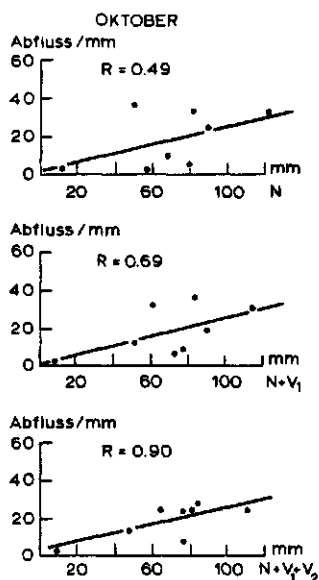


Fig. 4. Graphische Darstellung der Ergebnisse von Berechnungen des Zusammenhanges zwischen Regen und Abfluss nach Gleichung 1, 3 und 4 in Tabelle 1. R ist der Korrelationskoeffizient



Der Abfluss in einem gewissen Zeitabschnitt wird in Beziehung gesetzt zu dem Regen in einem Zeitabschnitt von gleicher Länge, der aber um k Tage früher anfängt und endet. Aber Regen, der an einem gewissen Tag fällt, wird erst in verschiedenen Tagen allmählich zum Abfluss kommen. Theoretische Betrachtungen über Kapillarität zeigen, dass man mit einer e-Funktion diese Absickerung darstellen kann.

Als Formel kann man benutzen:

$$A = b \left( N + \sum_{i=1}^k V_i \right) + \sum_{t=k+1}^{k+m} e^{-\alpha t} V_t + a \quad (1)$$

Hier ist b der Reduktionsfaktor, der die Speicherung und Verdunstung darstellt. Die Summierung zwischen 1 und k besagt, dass k Tage Verschiebung der Zeitabschnitte für Regen und Abfluss in Rechnung gebracht werden soll. Die Summierung zwischen k+1 und k+n stellt die Zahl der Tage dar, in denen von einem Regen noch eine nicht zu vernachlässigende Wassermenge zur Absickerung kommt. Die V-Werte geben den Unterschied an Regen am i<sup>ten</sup> Tag vor Anfang und Ende des Zeitabschnittes wieder. Der a-Wert ist eine Nullpunktkorrektur, die die Vernachlässigung der Verdunstung und Speicherung ausgleicht.

Die jetzigen Untersuchungen richten sich auf das Aufstellen von zyklischen Funktionen für a und b, welche der Formel eine Gültigkeit für das ganze Jahr geben. Das Resultat dieser Berechnung wird in Tabelle 1 gegeben.

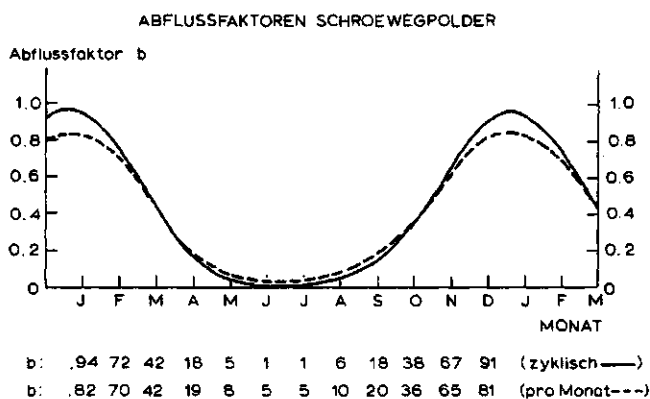
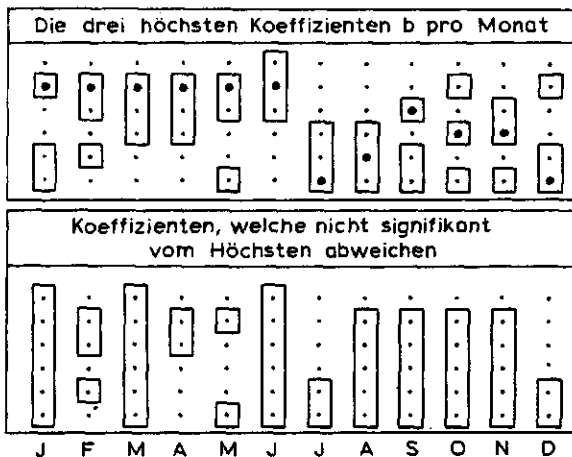


Fig. 5. Der Abflussfaktor, berechnet in zyklischem Zusammenhang über das Jahr oder ohne diesen Zusammenhang als unabhängige monatliche Werte zeigt wie im Winter nahezu aller im Sommer nahezu kein Regen abfließt.

Tabelle I

Korrelationskoeffizienten Abflussberechnung Schroewegpolder											Gleichung		Nr.		
											$N$	$\sum_{i=1}^k v_i$		$\sum_{i=1}^k e^{-\alpha t} v_i$	
90	89	64	15	-41	98	77	53	82	49	93	76	$N$			1
93	99	88	98	99	99	77	73	94	89	98	89	$N$	$+V_1, V_2, V_3$		2
93	95	83	97	80	97	84	75	98	69	99	88	$N+V_1$	$+V_2, V_3, V_4$		3
92	93	80	73	77	96	87	82	94	90	99	88	$N+V_1+V_2$	$+V_3, V_4, V_5$		4
94	97	78	71	71	96	99	93	96	89	96	94	$N+V_1+\dots+V_3$	$+V_4, V_5, V_6$		5
94	94	79	70	96	96	99	92	94	89	99	98	$N+V_1+\dots+V_4$	$+V_5, V_6, V_7$		6



Dass diese Berechnungen eine ziemlich hohe Genauigkeit der Ausgleichung erreichen, findet seine Ursache in dem genau zyklischen Gang der Verdunstungskapazität der Atmosphäre. Die wirkliche Verdunstung findet man grossenteils in  $b$  wieder. Sobald aber eine Formel für Verdunstung, Speicherung und Abfluss hergestellt wird, verschwinden der  $a$ - und  $b$ -Wert und wird die wirkliche Verdunstung hier anstatt dieser Konstanten eingeführt.

Fortschritte der Verdunstungsberechnung

Die grosse Schwierigkeit bei der Berechnung der Wasserbilanz ist immer die Trennung von Speicherung und Verdunstung gewesen. Sobald man mit wägbaren Lysimetern oder bequemen Wassergehaltsbestimmungen diese Trennung vornehmen konnte, wurde es möglich, beträchtliche Fortschritte in der Bilanzberechnung zu machen.

Was man hier anstreben kann, ist Folgendes.

Die graphisch-numerische Verdunstungsberechnung. Einen weiteren Schritt vorwärts verdankt man MAKKINK und VAN HEEMST ( 9 ), die in einer Veröffentlichung alle Ansichten über den Wasserentzugsvorgang in einer Synthese zusammengestellt haben.

Die Verdunstung ist abhängig von aufgefangener Strahlung und daher vom Bedeckungsgrad des Bodens durch die Pflanzendecke. Im Frühling und im Herbst wird der Boden teilweise unbewachsen sein, was die Verdunstung reduzieren wird (siehe Fig. 7).

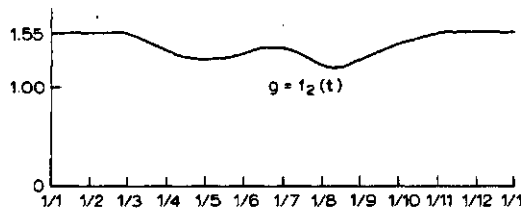


Fig. 7. Änderung des Einflusses vom Bedeckungsgrad des Bodens durch das Gewächs während des Jahres (nach MAKKINK)

Einen weiteren Einfluss auf die Verdunstung haben Länge, Farbe, Biegsamkeit und weitere Struktureigenschaften des Pflanzenbestandes. Diese Struktureigenschaften, zusammengestellt zu einem Pflanzenfaktor, sind zeitabhängig.

Neben dieser Entzugskapazität steht die Angebotskapazität. Das Regenwasser, das zum Abfluss nach Drän oder Graben kommt, kann die Pflanze nicht ausnützen.

Durch Abflussmessungen ist es möglich, einen Zusammenhang zwischen dem Wasserinhalt des Bodens und der abgeflossener Menge zu bestimmen. Auch kapillarer Aufstieg soll in Betracht gezogen werden. Dieser Aufstieg wird als Funktion der Ungesättigtheit ausgedrückt und kann mit einem statistischen Verfahren festgestellt werden.

Qualmwasser kann zur Regenmenge geschlagen werden. Öfters kann es schwierig sein dieses Bilanzglied zu bestimmen, aber im von MAKKINK gegebenen Beispiel war der Qualmwasserzufuhr bekannt.

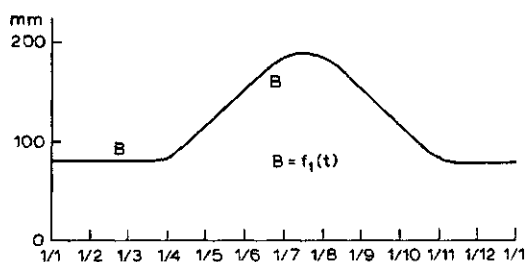


Fig. 8. Änderung der Menge des für die Pflanze zugänglichen Wassers während des Jahres (nach MAKKINK)

Wichtig ist, dass zu dem Problem Stellung genommen wird, ob die Pflanze mit ihren Wurzeln an das Wasser heranwächst oder mit kapillaren Kräften das Wasser anzieht. Der erste Standpunkt wird von MAKKINK vertreten, und in der Berechnung wird die Menge des für die Pflanze erreichbaren Wassers im Sommer beträchtlich grösser genommen als im Frühling oder im Herbst. Für diesen Zusammenhang siehe Fig. 8.

Die Bearbeitung der Daten findet statt nach einem Tag-für-Tag summierenden Verfahren, Magazinbuchhaltung genannt. Das Rechenverfahren nimmt die Integration vor, womit die Mengenänderungen des gespeicherten Wassers verfolgt werden können. Diese Berechnungstechnik eignet sich sehr dazu um von elektronischen Rechenmaschinen ausgeführt zu werden. Die Reaktionsfunktionen für den Einfluss der Pflanzen kann in diese Maschinen als Tabelle eingeführt werden. Es ist einfach, verschiedene Alternativen von der Maschine durchrechnen zu lassen und die auszuwählen, welche die besten Resultate gibt. Prüfung der Genauigkeit ist immer möglich durch Vergleichung der berechneten und gemessenen Abflussmengen.

Eine Korrelation in der Berechnung MAKKINKS von 0.91 zeigt, dass eine erfreuliche Genauigkeit für praktische Fälle - wie hier für einen Polder - erreicht werden kann.

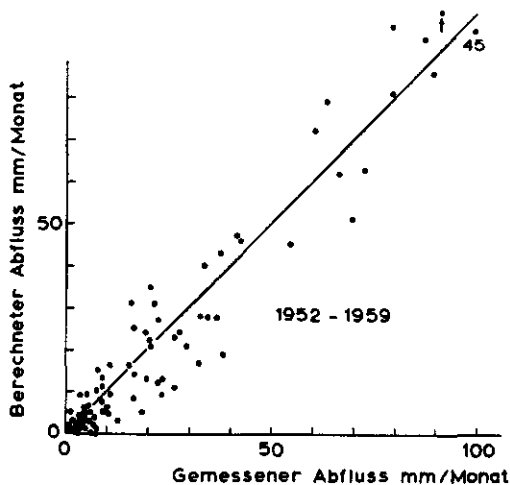


Fig. 9. Überprüfung der Ergebnisse der graphisch-numerischen Verdunstungsberechnung an die gemessenen Abflusswerte (nach MAKKINK)

In diesem Berechnungsschema findet man alle prinzipiell wichtigen Zusammenhänge, welche die Wasserbilanz beherrschen. Der nächste Schritt, alle diese Eigenschaften in physisch-physiologisch gerechter Weise auszudrücken, um zu einer exakten mathematischen Definition zu gelangen, kann jetzt getan werden.

Die Verdunstung mathematisch betrachtet

Die Ableitung der Verdunstungsformel, obwohl mathematisch wenig schwierig, ist infolge der vielen Boden-, Klima- und Pflanzeigenschaften etwas verwickelt. Das Prinzip wird hier gegeben. Weiter kann auf die Beiträge VISSERS in den Sitzungsberichten der Tagungen in Montpellier und Lüttich verwiesen werden (5; 10).

Strömung durch den Boden. Strömung von Wasser wird der Darcy-Formel gehorchen müssen. Die Strömung durch den Boden nach der Wurzel kann man beschreiben als Strömung innerhalb des zylinderförmigen Bereichs  $d$  um eine Wurzel. Das Wasser ausserhalb dieses Zylinders fliesst nach einer anderen Wurzel. Die Wurzel darf man einem Brunnen gleichsetzen, aber für die Durchlässigkeit soll die Ungesättigtheit des Bodens berücksichtigt werden. Die Formel wird entwickelt wie bei Brunnentheorien üblich. Das Wasser, das durch einen Zylinder mit Radius  $x$  strömt, fliesst in einer Menge  $q$ :

$$q = \pi (d^2 - x^2) E \quad (2.1)$$

Hier gibt  $\pi (d^2 - x^2)$  die Fläche ausserhalb des Zylinders mit Radius  $x$ , aber innerhalb des Bereichs  $d$  der Wurzel an, welche pro Flächeneinheit  $E$  mm Wasser spendet. Diese Wassermenge fliesst durch den Zylindermantel mit Fläche:

$$F = 2\pi x l_w \quad (2.2)$$

Hier ist  $2\pi x$  der Umkreis des Zylinders und  $l_w$  die totale Länge der Wurzel.

Die kapillare Durchlässigkeit  $k_c$  kann der Kapillaritätstheorie entnommen werden und schreibt sich:

$$k_c = \frac{\beta k_s}{\psi_m} \quad (2.3) \quad \text{mit} \quad \psi = \frac{0.3}{D} \quad (2.4)$$

Hier ist  $\beta$  ein Durchlässigkeitsbeiwert,  $\psi$  die kapillare Spannung,  $D$  der kapillare Durchmesser, und  $k_s$  die gesättigte Durchlässigkeit.

Zur Stelle des Kreisradius  $x$  ist schliesslich das Gefälle  $i$ :

$$i = \frac{d\psi}{dx} \quad (2.5)$$

Man kann schreiben:

$$\begin{aligned}
 \psi_2 - \psi_w &= q \frac{l_{s1}}{k_1 F_{p1}} \\
 \psi_3 - \psi_2 &= q \frac{l_{s2}}{k_2 F_{p2}} \\
 \psi_4 - \psi_3 &= q \frac{l_{s3}}{k_3 F_{p3}} \\
 &\dots \\
 \psi_a - \psi_w &= q \left( \frac{l_{s1}}{k_1 F_{p1}} + \frac{l_{s2}}{k_2 F_{p2}} + \dots + \frac{l_{su}}{k_u F_{pu}} \right) \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Wir nennen den inversen Wert des Ausdrucks in Klammern  $\alpha$  und setzen im Fall mit  $\psi_w = 0$  - das heisst mit ungespanntem Wasser an der Wurzelgrenzfläche - die transportierte Wassermenge gleich  $q_0$ . Weiter werden  $q$  und  $q_0$  - Wassermengen pro Pflanze - mittels der Zahl der Pflanzen  $h_p$  pro Flächeneinheit umgesetzt in Verdunstungswerte  $gE_0$  und  $E$ .

Man kann jetzt  $\psi_w$  lösen

$$\alpha (\psi_a - \psi_w) = q \quad (4.2)$$

$$\alpha \psi_a = q_0 \quad (4.3)$$

$$q = E/h_p \quad (4.4)$$

$$q_0 = gE_0/h_p \quad (4.5)$$

$$\psi_w = \frac{gE_0 - E}{h_p \alpha} \quad (5)$$

Die Verdunstungsformel.

Substituiert man den Wert für  $\psi_w$  aus der Formel für die Strömung durch die Pflanze in die Formel für Strömung im Boden, dann erhält man:

$$\left( gE_0 - E \right)^{m-1} \left( v^m - \frac{E}{A} \right) = P \quad (6.1)$$

In dieser Formel ist die Beziehung zwischen Spannung und Wassergehalt aus der Kapillaritätstheorie benutzt, die aussagt, dass:

$$\frac{1}{\psi} = \frac{C' v^a}{(v_{mm} - v)^2} = \pm C v^a \quad (7.1)$$

Die vereinfachte letzte Formel gilt nur für etwas trockene Böden.

In dieser Formel ist eine gewisse Zahl von Kennzahlen zusammengebündelt. Die Symbolen haben folgende Bedeutung.

$g$  ist ein Umrechnungsfaktor, welcher die berechnete Verdunstungskapazität der Atmosphäre umrechnet in die Verdunstung einer in ungespanntem Wasser stehenden Pflanze.

$n$  ist der Exponent in der Formel, welcher den Zusammenhang zwischen der kapillaren Spannung und der kapillaren Durchlässigkeit angibt. Öfters kann hier der Wert 2 eingesetzt werden.

$m$  ist das Produkt  $(n-1)a$ , worin  $a$  der Exponent ist, welcher in der Desorptionsformel den Zusammenhang zwischen der Spannung und dem Wassergehalt  $v$  angibt. Für  $a$  kann öfters 3 eingesetzt werden.

$$A = C Q R \qquad C = \frac{4.03^m}{m-1}$$

$$Q = \frac{G k_s L}{D_{max}^m}$$

$$R = \frac{1}{d^2 \left\{ \ln \left( \frac{d}{r} \right)^2 - 1 \right\}} \qquad (7.2)$$

$A$  ist ein Wasserverfügbarkeitsfaktor, indem  $G$  eine Konstante aus der Desorptionskurve ist,  $k_s$  ist die gesättigte Durchlässigkeit,  $D_{max}$  der Durchmesser der grössten Kapillare und  $L$  die Dicke der berücksichtigten durchwurzelten Schicht.  $d$  ist weiter der Radius des von jeder Wurzel entwässerten Zylinders und  $r$  ist der Wurzelradius.

$P$  ist ein Mass für die Entzugskapazität der Pflanze und ist aufgebaut aus:

$$P = (\alpha h_p)^{m-1} \qquad \alpha = 1 / \sum_{i=1}^k (l_{si} / k_i F_{pi}) \qquad (7.3)$$

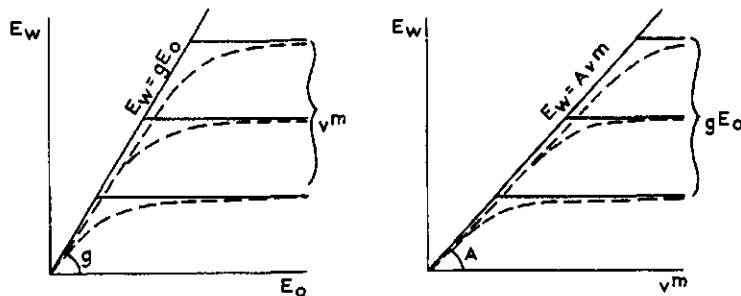


Fig. 11. Zusammenhang zwischen  $E_w$  und  $E_o$  für verschiedene Werte von  $v$  oder zwischen  $E_w$  und  $v^m$  für verschiedene Werte  $g E_o$  nach der Verdunstungsformel

Hier ist  $h_p$  die Zahl der Pflanzen pro Flächeneinheit und  $l_{si}$ ,  $k_i$  und  $F_{pi}$  die Länge, Durchlässigkeit und Strömungsfläche der auf einander folgenden Teilstrecken  $i$  des Strömungsweges durch die Pflanze.

Diese Formel gibt in mathematischer Darstellung was von MAKKINK in Fig. 6 graphisch gegeben wurde. Das Resultat von Gefäßversuchen von HALLAIRE ist ebenfalls genau im Einklang mit dieser Beschreibung der Verdunstung (11).

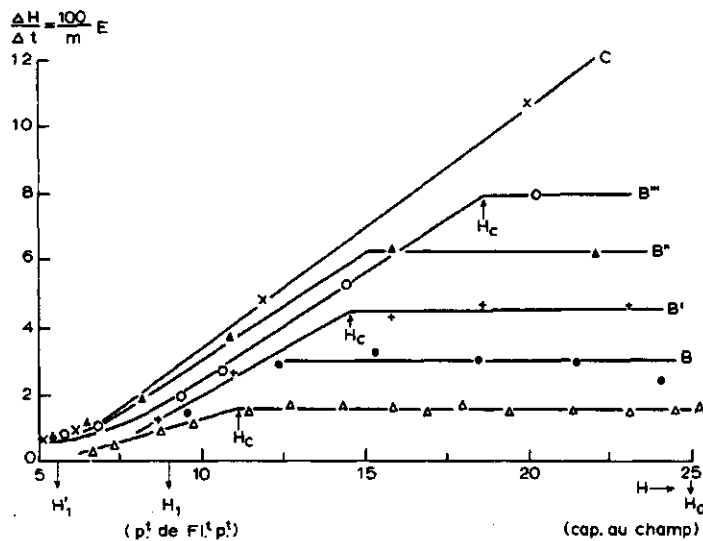


Fig. 12. Ergebnisse eines Topfversuches über den Einfluss verschiedenlich höherer potentieller Verdunstung A, B, C und verschiedener Bodenwassergehalte  $H$  auf die wirkliche Verdunstung  $E$  (nach HALLAIRE)

Einfluss von schichtweisen Unterschieden im Feuchtigkeitszustand. In gleicher Weise wie für eine einzige Schicht kann auch die Verdunstung für mehrere Schichten abgeleitet werden. Mit einer ganz kleinen Vernachlässigung erhält man die Formel:

$$(gE_0 - E)^{m-1} \left\{ \sum_{i=1}^p (A_i v_i^m) - E \right\} = P \sum_{i=1}^p A_i \quad (6.2)$$

In dieser Formel gibt  $p$  die Zahl der Schichten an.

Nach den jetzt verfügbaren Erfahrungen nimmt der Wert von  $A$  schnell ab mit zunehmender Tiefe.

#### Formeln für den praktischen Gebrauch

Es hat sich herausgestellt, dass der Wert  $P$  für die Entzugskapazität der Pflanze sehr wenig Einfluss ausübt und ohne weiteres gleich Null gesetzt werden kann. Die Formel zerfällt bei dieser Voraussetzung in zwei Teile:



$$E = g E_0 \quad (8.1)$$

$$E = A_1 v_1^m + A_2 v_2^m + \dots + A_p v_p^m \quad (8.2)$$

Die erste Formel ist gültig oberhalb des Wertes:

$$g E_0 = A_1 v_1^m + A_2 v_2^m + \dots + A_p v_p^m \quad (8.3)$$

Die zweite Formel gilt unterhalb dieses Grenzwertes der unbehinderten Verdunstung.

Die beiden Formeln geben die Asymptoten der Verdunstungskurve. Der Grenzwert ist der Schnittpunkt der beiden Asymptoten.

Es ist interessant festzustellen, dass unterhalb des Grenzwertes die Verdunstung nur durch die Bodenfeuchtigkeit beherrscht wird und die Verdunstungskapazität  $gE_0$  keinen Einfluss hat. Oberhalb des Grenzwertes ist die Verdunstung dagegen ganz klimatisch bedingt und hat der Bodenwassergehalt keinen Einfluss. Das Gesetz der begrenzenden Faktoren ist hier offenbar gültig und die abgeleitete Formel beschreibt das genannte Gesetz.

Die Entzugsgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit, womit einer gewissen Schicht Wasser entzogen wird, ist von der Verfügbarkeit des Wassers in dieser Schicht bedingt. Der Anteil jeder Schicht in der totalen Verdunstung wird dargestellt als:

$$\text{unterhalb des Grenzwertes: } E_i = A_i v_i^m \quad (9.1)$$

$$\text{oberhalb des Grenzwertes: } E_i = \frac{A_i v_i^m}{A_1 v_1^m + A_2 v_2^m + \dots + A_p v_p^m} g E_0 \quad (9.2)$$

Die hier gegebenen Entzugswerte  $E_i$  sind Tagesentzüge. Man kann jetzt aber auch durch Integration eine Formel für den Verdunstungsvorgang für längere Zeitabschnitte aufstellen.

Dazu ist zu bedenken, dass  $v = I/L$  ist und  $E = dI/dt$ .  $I$  ist die Menge an Bodenfeuchtigkeit in einer Schicht mit Dicke  $L$ .

Die Differentialgleichung lässt sich wie folgt für die trockene Strecke aufstellen:

$$E_i = -\frac{dI_i}{dt} = \frac{A_i}{L^m} I_i^m \quad (10.1)$$

$$t = \frac{L^m}{(m-1)A_i} \left\{ \frac{l}{I_{it}^{m-1}} - \frac{l}{I_{i0}^{m-1}} \right\} \quad (10.2)$$

$$t = \frac{L^m}{(m-1)A_i^{1/m}} \left\{ \frac{l}{E_{it}^{m-1}} - \frac{l}{E_{i0}^{m-1}} \right\} \quad (10.3)$$

In der integrierten Formel findet man die Wassermenge  $I_i$  und den Verdunstungsanteil  $E_i$  für die  $i^{te}$  Schicht und die Zeitpunkte  $t = 0$  und  $t$  gegeben. Die dritte Formel sagt aus, wie lange es dauert, ehe der Entzug von  $E_{i0}$  bis  $E_{it}$  herabgesunken ist. Bei einschichtigem Entzug ist dieser Entzug sofort an die Verdunstung gleich. Bei mehrschichtigen Fällen müssen die  $E_{it}$ -Werte zusammengezählt werden.

Für die Wassergehalte oberhalb des Grenzwertes wird die Berechnung verwickelter. Die Differentialgleichung lautet:

$$\frac{A_1 I_1^m + A_2 I_2^m + \dots + A_p I_p^m}{A_1 I_1^m} dI_1 = \frac{A_1 I_1^m + A_2 I_2^m + \dots + A_p I_p^m}{A_2 I_2^m} dI_2 = \dots = -g E_0 dt \quad (11.1)$$

Die Wassergehalte verhalten sich in den Schichten  $i$  und  $j$  wie:

$$\frac{l}{A_i I_{it}^{m-1}} - \frac{l}{A_i I_{i0}^{m-1}} = \frac{l}{A_j I_{jt}^{m-1}} - \frac{l}{A_j I_{j0}^{m-1}} = \delta \quad (11.2)$$

$\delta$  ist die Integrationskonstante.

Durch  $I_0$  und  $I_t$  werden wieder Anfang und Ende der Zeitspanne angegeben, in der die Verdunstung vor sich geht.

Mittels diesen Zusammenhanges kann man jetzt den Wassergehalt aller tieferen Schichten im Gehalt der obersten Schicht ausdrücken.

Für ein Zweischichtenprofil wird die Entzugskurve gegeben durch:

$$g E_0 t = I_{i0} \left\{ 1 + \frac{l}{\left\{ \frac{A_2}{A_1} (1 - \delta A_1 I_{i0}^{m-1}) \right\}^{1/m-1}} \right\} - I_{it} \left\{ 1 + \frac{l}{\left\{ \frac{A_2}{A_1} (1 - \delta A_1 I_{it}^{m-1}) \right\}^{1/m-1}} \right\} \quad (11.3)$$

Für Mehrschichtenprofile wird die Integration verwickelter, aber das Prinzip wird deutlich sein. Eine Tag-für-Tag Berechnung wird hier aber aus praktischen Gründen zu bevorzugen sein.

Was an diesen Formeln eine nähere Überlegung wert ist, ist dass anfänglich der Entzug in den oberen Schichten durch höhere A-Werte gross sein muss und in tieferen Schichten kleiner. Wenn aber der Wassergehalt in der obersten Schicht niedriger wird und der Entzug da abnimmt, ist in tieferen Schichten der Wassergehalt noch höher und wird die Pflanze da hauptsächlich Wasser entziehen. Es ist nicht nötig, das Auswachsen der Wurzel vor auszusetzen um ein Umschalten auf Entzug aus den tieferen Schichten zu erklären. Auswachsen der Wurzel würde sich zeigen durch Inkonzanz der A-Werte. Es ist zu erwarten, dass eine solche Inkonzanz nur schwierig einwandfrei zu beweisen sein wird.

### Die Wasserbilanzberechnung in einfacher Ausführung

Die Berechnung der Wasserbilanz aus Daten eines nicht-wägbaren Lysimeters kann auf Grund der gefundenen Relation zwischen Verdunstung und Wasservorrat jetzt vorgenommen werden. Relativ einfach ist die Berechnung, wenn man das Bodenvolumen des Lysimeters als eine einzige Schicht mit homogener Wasserverteilung und gleichmässigem Wasserentzug betrachtet. Die höheren Wassergehalte, im unteren Teil durch Grundwasser und zeitweilig im oberen Teil durch Regen, kann man gewiss nicht straflos durch Benutzung der einfachen Schreibweise der Formel 7.1 vernachlässigen, aber bei einer einfacheren Berechnung muss man manchmal einen grösseren Fehler hinnehmen.

Die Berechnung stützt sich auf zwei Formeln, die Bilanz- und die Verdunstungsformel. Diese Formeln werden wie folgt zusammengestellt:

$$\begin{aligned} N - D &= (I_2 - I_1) + E \\ \text{oder} \quad \begin{cases} E &= \frac{A}{L^m} \left( \frac{I_1 + I_2}{2} \right)^m \\ E &= q E_0 \end{cases} & (12.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{oder} \quad \begin{cases} N - A &= (I_2 - I_1) + \frac{A}{L^m} \left( \frac{I_1 + I_2}{2} \right)^m \\ N - A &= (I_2 - I_1) + q E_0 \end{cases} & (12.2) \end{aligned}$$

Niederschlag N und Abfluss D sind bekannt. Man wählt einmal einen Wert für  $I_1$ , für  $A/L^m$  und für m. Jetzt kann man  $I_2$  berechnen. Dieser  $I_2$ -Wert wird dann als Anfangswert für den zweiten Tag genommen und  $I_3$  wird berech-

net. Wenn so eine längere Zeitspanne durchgerechnet wird und immer der Kleinere der beiden Werte für E benutzt wird, wird sich herausstellen, dass die I-Werte allmählich zu gross oder zu klein werden. Der Einfluss des ersten  $I_1$ -Wertes wird allmählich zu vernachlässigen sein und wird für eine längere Zeitspanne zu grosse oder zu kleine I-Werte nicht erklären können. Wenn man die Berechnung mit anderen Werten von  $A/L^m$  und m wiederholt, werden Kombinationen gefunden werden, welche glaubwürdigere Resultate geben. Grössere Ungenauigkeiten in den geschätzten Werten der Konstanten kann man so beseitigen. Eine genauere Prüfung bekommt man aber, wenn man die berechneten Wassergehalte gegen den Abfluss einträgt, wie es von MAKKINK in seiner Veröffentlichung beschrieben wird. Die Kombination, welche die genaueste Relation zwischen Abfluss und Wasserinhalt gibt, kann als die bessere betrachtet werden.

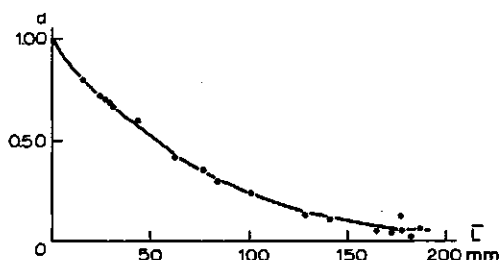


Fig. 13. Der Zusammenhang zwischen Porenraum minus Bodenwassergehalt L wurde von MAKKINK benutzt als Kennwert für den Abfluss d und gibt eine einfache Möglichkeit zum Überprüfen der besten Kombination der gewählten Konstanten

Man fängt am besten mit zwei  $I_1$ -Werten an, der eine voraussichtlich zu hoch, der andere zu niedrig, und sieht an der Konvergenz der zwei Kurven, wo ein etwaiger Fehler im I-Wert sich nicht weiter fortpflanzt. Vom Zeitpunkt an wo die Konvergenz genügend fortgeschritten ist, kann man die Genauigkeit mit der Relation zwischen Wassergehalt und Abfluss überprüfen.

#### Die genaue Berechnung der Wasserbilanz

Eine genauere Bilanzberechnung erfordert eine Aufspaltung des Bodenvolumens des Lysimeters in mehrere Schichten, von denen Entzug und Anreicherung gesondert berechnet werden. Es können dann für jede Schicht die geltenden Wasserverfügbarkeitswerte A gewählt und am Abfluss überprüft werden. Besonders das Durchsickern von Regen erfordert in dieser Berechnung alle Aufmerksamkeit.

Das mathematische Vorgehen kann am besten an einem Rechenschema verdeutlicht werden. Die Verteilung von Regen und Verdunstung über die verschiedenen Schichten ist für den Regentag und zwei nachfolgende Tage gegeben. Es wird um das Schema hier einfach zu halten angenommen, dass an den zwei nachfolgenden Tagen kein Regen fällt. Siehe Tabelle 2.

Regen  $N_0$  und Verdunstungskapazität  $E_0$  sind gegeben. Den Wasserinhalt der aufeinander folgenden Schichten  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  usw. soll man einmal schätzen. Weiter werden die Gleichgewichtswassergehalte  $I_{w1}$ ,  $I_{w2}$  usw. bestimmt oder geschätzt. Diese Gleichgewichtswassergehalte sind die Gehalte, bei denen eben kein Abfluss nach tieferen Schichten auftritt. Der Unterschied  $I_{w1} - I_{01}$  zeigt, ob gegen die Schwerkraft Wasser festgehalten werden kann, so dass ein Teil des Regens nicht abfließt. In Spalte 4 des Regentages wird  $N_{01}$  nur gleich oder kleiner als  $N_0$  genommen. Höhere Werte sind als gespeicherter Regen von vorhergehenden Tagen zu betrachten, was auf andere Weise berücksichtigt wird.

In Spalte 2 des ersten Tages wird der Abfluss berechnet als die Wassermenge, die die Grenzflächen zwischen aufeinander folgenden Schichten passiert. Die Berechnung findet statt mit der Formel:

$$A = N e^{-\alpha L t} \quad (13)$$

Hier ist  $L$  die Tiefe der Grenzfläche unter Bodenoberfläche und  $t$  die Zahl der Tage nach Regenfall. Die Schichten nimmt man am besten von gleicher Dicke und als Tiefe der Grenzflächen daher  $1l$ ,  $2l$ ,  $3l$ , usw.

In Spalte 3 wird der Unterschied berechnet zwischen den Wassermengen, welche die untere und obere Grenzfläche einer Schicht passiert sind. Dieser Unterschied ist der gespeicherte Regen.

In Spalte 4 wird diese gespeicherte Regenmenge zu dem Wasserinhalt  $I_{01}$  des Regentages gezählt, was schichtweise den Wasserinhalt des ersten Tages gibt. Aus diesem Wasserinhalt wird in Spalte 5 die Verdunstung  $E_{1i}$  berechnet. Bestimmt werden wieder die beiden Werte für Entzug bei ungehemmter und gehemmter Verdunstung und der kleinere der beiden wird gewählt.

Die Verdunstung verringert die Menge des absickernden Regens. In Spalte 6 wird dieser Verringerung dadurch Rechnung getragen, dass der Regen reduziert wird nach dem Verhältnis von gespeichertem Regen minus Verdunstung  $\{\Delta(N-A) - E\}$  zu gespeichertem Regen. Dieser reduzierte Regen dient zur Berechnung vom Abfluss des zweiten Tages.

Tabelle 2

RECHENSHEMA FÜR DIE ANALYSE DER WASSERBILANZ

Schicht	Regentag				
	Feuchteinhalt	Feuchteinhalt bei Gleichgewichtssituation	Regen	Regenüberschuss	
1	$I_{o1}$	$I_{wi}$	$N_{o1}$	$N_{o1}$	
2	$I_{o2}$	$I_{w2}$	$N_{o2}$	$N_{o2}$	
3	$I_{o3}$	$I_{w3}$	$N_{o3}$	$N_{o3}$	
1	$I_{o1}$	$I_{w1}$	$N_{o1}$	$N_{o1} = I_{w1} - I_{o1} + N_{o1}$	
2	$I_{o2}$	$I_{w2}$	$N_{o2}$	$I_{w1+2} - I_{o1+2} + N_{o1+2}$	
3	$I_{o3}$	$I_{w3}$	$N_{o3}$	$I_{w1+2+3} - I_{o1+2+3} + N_{o1+2+3}$	

Schicht	Erster Tag						
	Abfluss	Gespeicherter Regen	Feuchteinhalt	Potentielle Verdunstung	Verdunstung	Korrigierter Regen	
1	$A_{11}$	$\Delta(N-A)_{11}$	$I_{11}$	$gE_{o1}$	$E_{11}$	$N_{11}$	
2	$N_{o1}e^{-\alpha t}$	$N_o - N_{o1}e^{-\alpha t} = \Delta_{11}$	$I_{o1} + \Delta(N-A)_{11}$		$E_{11}$	$N_{o1} (1 - \frac{E_{11}}{\Delta(N-A)_{11}})$	
3	$N_{o2}e^{-2\alpha t}$	$(N_{o1} - N_{o2}e^{-\alpha t})e^{-\alpha t}$	$I_{o2} + \Delta(N-A)_{12}$		$E_{12}$	$N_{o2} (1 - \frac{E_{12}}{\Delta(N-A)_{12}})$	
1	$N_{o3}e^{-3\alpha t}$	$(N_{o2} - N_{o3}e^{-\alpha t})e^{-2\alpha t}$	$I_{o3} + \Delta(N-A)_{13}$		$E_{13}$	$N_{o3} (1 - \frac{E_{13}}{\Delta(N-A)_{13}})$	

Schicht	Zweiter Tag						
	Abfluss	Gespeicherter Regen	Feuchteinhalt	Potentielle Verdunstung	Verdunstung	Korrigierter Regen	
1	$A_{21}$	$\Delta(N-A)_{21}$	$I_{21}$	$gE_{o2}$	$E_{21}$	$N_{21}$	
2	$N_{11}e^{-2\alpha t}$	$N_o - N_{11}e^{-2\alpha t}$	$I_{11} + \Delta(N-A)_{21} - E_{11}$		$E_{21}$	$N_{11} (1 - \frac{E_{21}}{\Delta(N-A)_{21}})$	
3	$N_{12}e^{-4\alpha t}$	$(N_{11} - N_{12}e^{-2\alpha t})e^{-2\alpha t}$	$I_{12} + \Delta(N-A)_{22} - E_{12}$		$E_{22}$	$N_{12} (1 - \frac{E_{22}}{\Delta(N-A)_{22}})$	
1	$N_{13}e^{-6\alpha t}$	$(N_{12} - N_{13}e^{-2\alpha t})e^{-4\alpha t}$	$I_{13} + \Delta(N-A)_{23} - E_{13}$		$E_{23}$	$N_{13} (1 - \frac{E_{23}}{\Delta(N-A)_{23}})$	

Für diesen zweiten Tag wird das gleiche Rechenschema wie beim ersten Tag benutzt. Eine Ausnahme ist nur, dass wenn Regen auch am ersten Tag gefallen ist, am zweiten Tag eine zusätzliche Menge gespeicherter Regen in Spalte 4 zugezählt wird. Das erhöht den Wasserinhalt und daher die Verdunstung. Man kann für den Wasserinhalt daher schreiben:

$$I_{o2i} = I_{o1i} + \Delta(N-A)_{o2i} + \Delta(N-A)_{11i} \quad (14)$$

Hier gibt die erste Indexzahl die Nummer des Regentages. Die zweite Zahl gibt die Anzahl Tage nach dem Regenfall, an denen ein weiteres Durchsickern dieses Regens auftritt. Die dritte Indexzahl zeigt die Nummer der Schicht an.

Diese Berechnung soll für jeden Regentag die Wasserverteilung über so viele Tage verfolgen, bis die ganze Regenmenge verdunstet oder zum Abfluss gekommen ist (Tabelle 2).

Der Abfluss der tiefsten Schicht, summiert für alle Regentage, gibt den Abfluss, der am Lysimeter gemessen wurde. Die Summe der E-Werte aller Schichten gibt die Tagesverdunstung. Die Summe der Wasserinhalte aller Schichten gibt die Gesamtmenge des gespeicherten Wassers. Der schichtweise differenzierte Wasserinhalt des ersten Tages dient als Ausgangswasserinhalt für den nächsten Regentag.

Geschätzt müssen werden: die Anfangsfeuchtegehalte  $I_{oi}$  und die Gleichgewichtsgehalte  $I_{wi}$ . Diese können aber durch die auftretende Konvergenz nach dem Durchrechnen einer gewissen Zeitspanne allmählich zu richtigen Werten führen.

Weiter müssen geschätzt werden:  $\alpha$ ,  $g$ ,  $A_i$  und  $m_i$ . Hier muss man wieder das Resultat verschiedener Kombinationen durchrechnen, die berechneten und gemessenen Abflüsse miteinander vergleichen und die Schätzungen so ändern, dass der kleinste Fehler erreicht wird.

### Einige Beispiele

Die Verdunstungsformel ist bis März 1963 an 8 Fälle geprüft worden, nämlich drei Baumgärten im Freien, drei mit Gras bewachsenen Lysimetergefäßen auf Sinderhoeve und zwei Graslysimetern im Binnenveld. Der Wasserinhalt der Baumgärten und der Sinderhoevegefäße ist mit einer Neutronen-





sonde bestimmt worden; die Binnenveldlysimeter sind normale gewogene Lysimeter. Aufspaltung des Bodenvolumens in mehreren Schichten ist noch nicht versucht. Ein Programm für eine elektronische Rechenmaschine wird jetzt angefertigt, womit die einfache Bearbeitungsmethode durchgerechnet werden kann. Um die Anpassungsfähigkeit der Formel in Einzelheiten zu überprüfen, braucht man Neutronensondemessungen aus sehr unterschiedlichen klimatologischen und Feuchtigkeitsbedingungen.

Beim benutzten graphischen Ausgleichsverfahren wird zunächst der  $gE_0$ -Wert auf einen Mittelwert zurückgeführt, so dass nur  $E$  und  $v$  als einzige Variablen auftreten. Dann wird  $v$  herauskorrigiert und der Zusammenhang zwischen  $E$  und  $E_0$  graphisch dargestellt.

Als Beispiele werden diese beiden Figuren für einen der Baumgärten und einen der Binnenveldlysimeter dargestellt (Fig. 14 und 15). Bedacht soll werden, dass bei einer anderen Wahl der Mittelwerte für  $gE_0$  und  $v$ , auf die korrigiert worden ist, der ansteigende Teil der Kurve gleich bleiben würde, der wagrechte Teil aber eine andere Lage bekäme. Der Grenzpunkt der potentiellen Verdunstung würde sich verschieben. Der Grenzpunkt in diesen Figuren hat daher keine spezielle Bedeutung.

### Zusammenfassung

In den 70 Jahren, in denen in den Niederlanden wissenschaftlich Lysimeterforschung getrieben wird, kann man eine Entwicklung erkennen, welche allmählich an Breite und Tiefe zunimmt. Waren anfangs die Studien hauptsächlich auf den Abfluss gerichtet, mit der Konstruktion des wägbaren Lysimeters wurde die Verdunstung während kürzerer Zeitspannen zugänglich. Die Neutronensonde hat in letzterer Zeit noch weitere Möglichkeiten eröffnet, so dass man jetzt im freien Feld Beobachtungen machen kann und nicht mehr Lysimetergefässe benötigt. In dieser Weise sind Forstbestände oder Obstbäume in den Bereich von Verdunstungsstudien gekommen und hat man eine grosse Freiheit gewonnen, sich spezielle hydrologische, pedologische oder botanische Untersuchungsobjekte zu wählen.

9. MAKKINK, G.F. en H.D.J. VAN HEEMST. 1962. Het berekenen van de waterbalans van de Schroewegpolder op Walcheren. Versl. van Landbouwk. Ond. nr. 68.2.
10. VISSER, W.C. 1963. Moisture requirements of crops and rate of moisture depletion of the soil. Vortrag 16. Internationale Studiedagen over Waterproblemen, Lüttich.
11. HALLAIRE, M. 1961. Irrigation et utilisation des réserves naturelles. Annales Agronomiques, vol. 12, nr. 1.