[*From the* TRANSACTIONS OF THE THIRD INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE. Vol. I., 1935.]

DIE BEZIEHUNGEN ZWISCHEN WASSERABFLUSS, *GRUNDWASSERSTAND*, *DRANENTFERNUNG* UND WASSERDURCHLASSIGKEIT. KONTROLLVERSUCHE AN SANDBODEN

S. B. HOOGHOUDT

(*Bodenkundliches Institut Groningen. Direktor: Dr. D. J. Hissink*)

Schon früher (1) hatte ich gezeigt, wie man die Durchlässigkeit und andere Konstanten bei Böden mit Einzelkorn-Struktur im Laboratorium genau bestimmen kann. Bei Böden mit einer davon abweichenden Struktur müssen die genannten Konstanten auf dem Felde festgestellt werden.

Nun haben verschiedene Forscher eine ziemlich gleichlautende Beziehung gefunden zwischen der Wassermenge, die den Dränen (Abzugsgräben) auf den laufenden Meter von *einer* Seite zufliesst (Q; Dimensionen l^2t^{-1}), dem gegenseitigen Abstand der Dräne (2e), dem Durchlässigkeits-Koeffizienten (K) und dem Stande des Grundwassers oberhalb der Dränflächen (y) in einem Abstande x vom Drän. Diese Beziehung lautet in ihrer allgemeinen Form:

$$Q\left(x-\frac{2e}{x^2}\right)=\frac{1}{2}\,Ky^2 \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (1)$$

und geht, sobald oberhalb der Dräne Wasser bis zur Höhe h_0 steht, über in die Gleichung:

K

$$Q\left(x-\frac{x^2}{2e}\right)=\frac{1}{2}\,Ky^2-\frac{1}{2}\,Kh_0^2 \quad \ldots\ \ldots\ \ldots \quad (1a).$$

Wenn Q, 2e, x, y und eventuell h_0 bekannt sind, lässt sich K berechnen.

Die Gleichungen (1) und (1a) gelten nur für (a) homogene Böden und (b) wenn der Boden unterhalb der Dräne undurchlässig ist. Nun ist aber die Durchlässigkeit des Bodens in natürlicher Lagerung selten gleichartig; selbst Sandboden, bei dem die mechanische Zusammenstellung unverändert bleibt, ist es nicht (p und p_0 wechseln oft mit der Tiefe (1). Trotzdem sind solche Berechnungen in der Praxis wohl anwendbar, wenn sich Gleichungen für heterogene Böden aufstellen lassen, wobei zugleich der Fall näher untersucht werden muss, dass der Boden unterhalb der Dräne durchlässig ist. Die Möglichkeit einer Anwendung bei heterogenem Boden ist nun gegeben, wenn sich für folgende Fälle Gleichungen aufstellen lassen:

(*a*) der Boden besteht aus scharf abgegrenzten Schichten von verschiedener Durchlässigkeit, deren jede in sich selbst homogen ist, und

(*b*) die *Durchlässigkeit im Boden verändert sich kontinuierlich zufolge* der einen oder anderen Funktion mit der Tiefe unter der Erdoberfläche.

Es ist mir nun gelungen, solche Gleichungen aufzustellen. Betrachten wir vorläufig nur den Fall, dass der Boden unterhalb der Dräne undurchlässig ist und dass über den Dränen kein Wasser steht. Dann lautet die Gleichung im Falle a), wenn sich p verschiedene Schichten oberhalb der Dräne befinden, die phreatische Oberfläche mitten zwischen den Dränen in der p^{ten} Schicht verläuft, K_1, K_2, K_3 usw. die Durchlässigkeits-Koeffizienten der 1, 2, 3 usw. — Schicht oberhalb der Dräne vorstellen, h_1, h_2, h_3 usw. die Abstände zwischen der Oberfläche der 1, 2, 3 usw. — Schicht und der Dränfläche darstellen und $n_1=\frac{K_1}{K_2}$, $n_2=\frac{K_2}{K_3}$, $n_3=\frac{K_3}{K_4}$, usw. bedeuten:

$$Q\left(x-\frac{x^2}{2e}\right)=\frac{1}{2}y^2K_p+h_1K_1y(1-n_1)+h_2K_2y(1-n_2)+h_3K_3y(1-n_3)$$
$$+\ldots\ldots h_{p-1}K_{p-1}y(1-n_{p-1})+\ +\frac{1}{2}h_1^2K_1(n_1-1)+\frac{1}{2}h_2^2K_2(n_2-1)+$$
$$\frac{1}{2}h_3^2K_3(n_3-1)+\ldots\ldots\frac{1}{2}h^2_{p-1}K_{p-1}\binom{n-1}{p-1} \quad \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots \quad (2).$$

Ist also $p=3$, so kommen alle Faktoren mit den Indices 3 oder darüber in Wegfall, während Ausdruck $\frac{1}{2}\,y^2K_p$ in $\frac{1}{2}\,y^2K_3$ übergeht, usw. Ferner ist die Gleichung 1 als die einfachste in dieser Reihe von Gleichungen anzusehen, was übrigens auch bei Gleichung 4 der Fall ist, da K_0 dann für die ganze Schicht gilt.

Im Falle (b) besteht folglich ein Zusammenhang zwischen dem Durchlässigkeits-Koeffizienten K_0 für eine sehr dünne Schicht hart oberhalb der Dräne und dem Koeffizienten K_y für eine sehr dünne Schicht auf einer Höhe y oberhalb der Dräne. Diese Funktion lässt sich stets zurückführen auf die Formel:

$$K_y=K_0+ay+by^2+cy^3+\ .\ .\ .\ .\ \text{usw.} \quad \ldots\ \ldots \quad (3),$$

wobei a, b, c, usw. Konstanten sind. Die Gleichung für die Strömung des Wassers lautet dann:

$$Q\left(x-\frac{x^2}{2e}\right)=\frac{1}{2}K_0y^2+\frac{1}{2\cdot 3}ay^3+\frac{1}{3\cdot 4}by^4+\frac{1}{4\cdot 5}cy^5+\ \ldots\ \text{usw}\ \ldots\ \ldots \qquad (4).$$

Auch für Kombinationen der Fälle (a) und (b) lassen sich Gleichungen aufstellen.

Staut sich über den Dränen das Wasser bis zu einer Höhe h_0, dann erfährt die Gleichung 4 insofern eine Änderung, als von den Ausdrücken rechts vom Gleichheitszeichen dieselben Ausdrücke abgezogen werden, nachdem man in ihnen y^2, y^3, usw. ersetzt hat durch h_0^2, h_0^3, usw. (Gleichung 4a). Die Umwandlung der Gleichung 2 ist weniger einfach klarzulegen, da diese abhängig ist von der Schicht oberhalb der Dränflächen, in welcher sich die Wasseroberfläche über den Dränen befindet. *Tritt diese z.B. in der* m^{ten} Schicht ($m<p$) über den Dränen auf ($m<p$), dann ändert sich die Gleichung 2 wie folgt:

$$Q\left(x-\frac{x^2}{2e}\right)=\frac{1}{2}K_py^2+h_1K_1y(1-n_1)+h_2K_2y(1-n_2)+h_3K_3y(1-n_3)$$

$$+\ \ldots\ldots\ h_{p-1}K_{p-1}y\binom{1-n}{p-1}+\frac{1}{2}K_mh^2_m(n_m-1)+\frac{1}{2}K_m+1h^2_{m+1}$$

$$(n_{m+1}-1)\ \ldots\ldots\ \frac{1}{2}K_{p-1}h^2_{p-1}(n_{p-1}-1)+K_1h_1h_0(n_1-1)+K_2h_2h_0$$

$$(n_2-1)+K_3h_3h_0{}'n_3-1)\ \ldots\ldots+K_{m-1}h_{m-1}h_0(n_{m-1}-1)-\frac{1}{2}K_mh^2_0 \qquad (2a).$$

Ist $p=3$ und $m=2$, so kommen alle Ausdrücke mit den Indices 3 oder darüber in Wegfall, während in dem ersten Faktor rechts vom Gleichheitszeichen $p=3$ und in dem letzten $m=2$ wird, usw.

Betrachten wir nun den Fall, dass der Boden unterhalb der Dräne durchlässig und von der gleichen Grössenordnung wie oberhalb der Dräne ist. (Ist die Durchlässigkeit viel geringer als oberhalb der Dräne, so braucht die Strömung unterhalb der Dräne nicht berücksichtigt zu werden.) Liegt die undurchlässige Schicht nicht zu tief unter den Dränen, dann wird der Druckverlust für die vertikal gerichtete Komponente der Strömung klein sein gegenüber dem Verlust für die horizontal gerichtete Komponente, sodass die obengenannten Gleichungen 2a und 4a angewandt werden können. Die y-Werte, die Schichten im Profil ebenso wie die K_0- (und andere K-) Werte, müssen nun aber von der undurchlässigen Schicht ab errechnet werden, während, falls sich über den Dränen kein Wasser staut, h_0 gleich ist dem Abstand von den Dränen bis zu der undurchlässigen Schicht. Legt man die gewöhnlichen Dränabstände von etwa 10-20 m zugrunde, so kann sich die undurchlässige Schicht bis zu 1 oder 2 m unterhalb der Dräne befinden, ohne dass grosse Fehler gemacht werden.

Schliesslich kann man noch die Frage stellen, wie die Gleichungen für heterogenen Boden praktisch angewandt werden können. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden.

1. Der Boden hat auch bei natürlicher Lage Einzelkorn-Struktur, sodass die Durchlässigkeitszahlen von Schicht zu Schicht im Laboratorium auf die natürlichen Verhältnisse (p, p_0 und η (1)) umgerechnet werden können, wodurch die Funktion bekannt wird, nach welcher sich die Durchlässigkeit unterhalb der Erdoberfläche verändert. In diesem Fall, der sich indessen meistens auf Sandböden beschränken wird, die *infiltriert* werden, lassen sich die Gleichungen 2a, 4a oder Kombinationen von ihnen anwenden. Dabei erhalten — infolge der gerade entgegengesetzten Stromrichtung — die Faktoren mit h_0 nun ein

positives und die mit y ein negatives Zeichen (Gleichung 4a), oder (Gleichung 2a) alle Faktoren rechts vom Gleichheits zeichen ein negatives zeichen; nur in der Faktoren $\frac{1}{2} K_m h_m^2 (n_m-1)$ usw. wird m in p verändert und bleibt das + zeichen ($m > p$).

Die obenstehenden Berechnungen wurden auf Infiltrationsversuchsfeldern im Wieringermeer-Polder praktisch erprobt und erzielten dort ausgezeichnete Resultate.

2. Bei Böden mit einer Struktur in natürlicher Lagerung kann man sich folgender Methode bedienen. In die Gleichungen 2 und 4 ist, wenn die Grundwasserstände (y_0) in der Mitte zwischen den Dränen bestimmt werden, einzusetzen :

$$Q = f\,(y_0) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5).$$

Diese Funktion wird experimentell bestimmt, indem man jeden Tag den Grundwasserstand und Wasserabfluss feststellt (z.B. 1 Mal im Tag), hiervon Wochendurchschnitte berechnet und die errechneten Zahlen in ein Diagramm einträgt, dessen x-Achse den Abstand der phreatischen Oberfläche von der Dränfläche (y_0) und dessen y-Achse den Wasserabfluss angibt. In den Fällen, in welchen diese $Q : y_0$-Linie bestimmt wurde, war die Streuung der einzelnen Punkte klein genug, um die $Q : y_0$-Linien hinreichend genau konstruieren zu können. Kommen nun im Profil keine scharf abgegrenzten Schichten vor, dann wird die Gleichung 4 angewandt. Wählt man z.B. 4 Punkte auf der $Q : y_0$-Linie, so erhält man durch diese Angaben 4 Gleichungen, sodass also im ganzen 4 Konstanten berechnet werden können, was meistens mehr als ausreichend sein dürfte. Die Gleichung

$$K_y = K_0 + ay + by^2 + cy^3 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (6)$$

ist nun also vollständig bekannt und damit die Durchlässigkeit in jeder Schicht.

Befindet sich über den Dränen Wasser, dann muss auf die gleiche Weise auch $Q = f\,(h_0)$ bestimmt werden. Bei dem gleichen Q werden so h_0 aus der $Q : h_0$-Linie und y_0 aus der $Q : y_0$-Linie bekannt. Auch jetzt sind wieder 4 Punkte auf jeder Linie auszuwählen (d.h. bei denselben 4 Q-Werten), sodass nun bei Anwendung der Gleichung 4a wieder die Gleichung 6 bestimmt werden kann. Kommen im Profil stark abgegrenzte Schichten vor, so werden die Gleichungen 2 oder 2a gebraucht. Die Anzahl der Punkte, die hierbei auf der $Q : h_0$-Linie bezw. der $Q : h_0$-Linie und der $Q : y_0$-Linie bestimmt wird, ergibt sich aus der Zahl der Schichten.

Ist schliesslich der Boden unterhalb der Dräne durchlässig oder wird mit dieser Möglichkeit gerechnet, dann wird die Formel 2a oder 4a angewandt, wobei y_0 und h_0 von der undurchlässigen Schicht ab oder was dafür gilt, errechnet werden. Ist die Schicht unterhalb der Dräne undurchlässig, dann ergibt sich das wohl bei der Berechnung.

Auf dem Versuchsstück B 45 liessen sich diese Linien bis zur Erdoberfläche und in späteren Jahren bis zu 10-20 cm unterhalb der Erdoberfläche verfolgen. Die erzielten Resultate waren sehr gut.

In den obenstehenden Ausführungen wurde nichts von einer Kontrolle der Richtigkeit der hier aufgestellten Gleichungen gesagt. Eine solche Kontrolle lässt sich nur dann exakt durchführen, wenn alle Verhältnisse genau bekannt sind. Die Gleichungen wurden deshalb mittels eines grossen Kastens von 10 $\times 2 \times 2$ m, in welchem Dräne senkrecht zur Längsrichtung angebracht waren kontrolliert. Den Kasten wurde mit Sandboden gefüllt. Auf weitere Einzelheiten kann hier verzichtet werden. Bis heute ergaben die Messungen in homogenem Boden (heterogener Boden ist noch nicht untersucht) die folgenden Resultate:

1. Geben Dräne Wasser, dann tritt zwischen diesen Dränen eine gewölbte phreatische Oberfläche auf, deren Krümmung für den Fall, dass die Dräne auf 0; 30; 60 und 90 cm oberhalb der undurchlässigen Schicht liegen, sehr gut mit der aus den Gleichungen berechneten Krümmung übereinstimmt; nur bis ungefähr 3 m Entfernung von den Dränen ändert sich das Gefälle etwas weniger schnell als man aus der Gleichung schliessen würde.

2. Die durch die Gleichungen berechneten und im Laboratorium auf andere Weise bestimmten K-Werte (Sandboden in Einzelkornstruktur 1) stimmen gut überein, auch wenn die undurchlässige Schicht sich 90 cm unterhalb der Dränfläche befindet.

3. Während der Messungen bleiben die berechneten K-Werte entweder konstant oder fast konstant. Hieraus folgt gleichzeitig, dass die Längsströmung in der kapillaren Schicht höchstens in der Grössenordnung einer nicht in Rechnung zu stellenden Korrektur liegt (die kapillare Schicht war hier aber nur 20 cm dick).

4. Aus Obenstehendem folgt also bereits, dass sich bei homogenem Boden die Gleichungen hinreichend genau (10%) als zutreffend erwiesen haben.

LITERATUR

[1] Hooghoudt, S. B., *Versl. Landbk. Onderz.*, S. 215, 1934; s.a. *C.R. d. l. prem. Com. d. l'As. Int. de la Sc. du Sol*, Versailles, S. 213, 1934.

__GLEICHUNG 2.__(Entwässerung): $Q\,(x-\frac{x^2}{2e}) = \frac{1}{2}\, y^2 K_p + h_1 K_1 y(1-n_1) + h_2 K_2 y(1-n_2) +$

$+ h_3 K_3 y(1-n_3) + \dots\dots h_{p-1} .K_{p-1} .y(1-n_{p-1}) + \frac{1}{2}\, h_1^2 K_1 (n_1 -1) + \frac{1}{2}\, h_2^2 K_2 (n_2 -1) +$

$+ \frac{1}{2}\, h_3^2 K_3 (n_3 -1) + \dots\dots \frac{1}{2}\, h_{p-1}^2 .K_{p-1} .(n_{p-1} -1)$

__GLEICHUNG 2a.__(Entwässerung; $m < p$): $Q\,(x-\frac{x^2}{2e}) = \frac{1}{2}\, K_p y^2 + h_1 K_1 y(1-n_1) +$

$h_2 K_2 y(1-n_2) + h_3 K_3 y(1-n_3) + \dots\dots h_{p-1} .K_{p-1} .y(1-n_{p-1}) + \frac{1}{2}\, K_m h_m^2 (n_m -1) + \frac{1}{2}\, K_{m+1} .$

$.h_{m+1}^2 .(n_{m+1} -1) + \dots\dots + \frac{1}{2}\, K_{p-1} .h_{p-1}^2 .(n_{p-1} -1) + K_1 h_1 h_0 (n_1 -1) + K_2 h_2 h_0 (n_2 -1) +$

$+ K_3 h_3 h_0 (n_3 -1) \dots\dots + K_{m-1} .h_{m-1} .h_0 .(n_{m-1} -1) - \frac{1}{2}\, K_m h_0^2$