

6. Die Bohrlöchermethode zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Bodens und ihr Nutzen für die Praxis

Von *S. B. Hooghoudt*

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

I. Kurze Besprechung der Bohrlöchermethode.

In den «Transactions of the Third International Congress of Soil Science, Oxford, 1935», Volume I, S. 382, findet sich eine kurze Abhandlung über die Bohrlöchermethode zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Bodens. Die Untersuchungen waren damals noch nicht beendet. Wir haben sie nachher sowohl mit homogenen als auch mit schichtartig aufgebauten Böden fortgesetzt. Diese Untersuchungen sind jetzt endgültig abgeschlossen. Die Theorie der Wasserströmung im Boden, sowie die Resultate der obengenannten Untersuchungen und die Anwendung in der Praxis haben wir in einer ausführlich abgefaßten Publikation besprochen (1). Ich muß mich hier damit begnügen, die Formeln anzugeben, die für die Anwendung der Methode wichtig sein können. Zu beachten ist, daß die seit dem Kongreß in Oxford fortgesetzten Untersuchungen eine kleine Abänderung der Formeln — namentlich für heterogene Böden — notwendig gemacht haben. Bevor ich die Formeln bespreche, will ich noch schnell erläutern, worauf sich diese Methode zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Bodens gründet.

In allen Böden, die verhältnismäßig dicht unterhalb der Erdoberfläche eine zusammenhängende phreatische Oberfläche aufweisen, — so wie man es überall in den tieferliegenden Teilen der Niederlande antrifft — wird ein Bohrloch, das einen Halbmesser von 0,06 bis 0,10 m und eine Tiefe von 1 bis 2 m hat, sich nach einiger Zeit bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser füllen. Der Wasserstand im Bohrloch gibt die Lage der phreatischen Oberfläche im Boden um das Bohrloch herum an. Wenn man jetzt das Bohrloch bis zu einer willkürlich zu wählenden Tiefe (meistens ungefähr bis 5 bis 10 cm oberhalb des Bohrlochbodens) leer schöpft, dann wird natürlich wieder Wasser aus dem Boden um das Bohrloch herum ins Bohrloch fließen: die phreatische Oberfläche im Boden um das Bohrloch herum ist jetzt ja höher als die Wasserfläche im Bohrloch, und so entsteht ein Druckgefälle im Grundwasser nach dem Bohrloch. Man wird verstehen, daß die Steiggeschwindigkeit des Wassers, nachdem man Wasser aus dem Bohrloch geschöpft hat, um so größer ist, je größer die Durchlässigkeit des Bodens ist. Weiter wird die Steiggeschwindigkeit

keit von verschiedenen Faktoren abhängen, z. B. vom Abstand zwischen dem ursprünglichen Wasserstand und der Tiefe, bis zu der das Bohrloch ausgeschöpft worden ist usw.

Die Theorie der Wasserströmung nach dem Bohrloch im Boden und die zahlreichen Kontrolluntersuchungen im Laboratorium, die wir mit der größten Genauigkeit angestellt haben und bei denen alle Verhältnisse genau bekannt waren, haben es möglich gemacht, die Formeln aufzustellen, aus denen sich mit Hilfe der in der besprochenen Weise ermittelten Steiggeschwindigkeit die Durchlässigkeits-Koeffizienten in m je 24 Stunden mit ausreichender Genauigkeit berechnen lassen.

Für homogene Böden (oder für homogen gedachte Böden¹⁾, und für den Fall, daß die Bodenschicht unterhalb des Bohrlochbodens durchlässig ist, lautet die Gleichung:

$$k = \frac{523\,000 r^2 \cdot \log \frac{y_0}{y}}{t} \cdot \frac{H}{H + 0,5 r} = 523\,000 r^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{H}{H + 0,5 r} \quad (1)$$

Hierin bedeutet k den Durchlässigkeits-Koeffizienten in m je 24 Stunden, r den Halbmesser des Bohrloches in m, H den Abstand der phreatischen Oberfläche vom Bohrlochboden in m, y_0 und y den Abstand der Wasserfläche im Bohrloch zur Zeit $t = 0$ und $t = t$

von der phreatischen Oberfläche in m und $\log \frac{y_0}{y} : t = \operatorname{tg} \alpha$. Wenn der Boden unterhalb des Bohrlochbodens undurchlässig ist, so fällt

der Faktor $\frac{H}{H + 0,5 r}$ aus.

Wenn im Profil oberhalb des Bohrlochbodens zwei scharf abgegrenzte Schichten von verschiedener Durchlässigkeit vorkommen, und wenn die erste Schicht oberhalb des Bohrlochbodens eine Dicke h_1 und einen k-Koeffizienten k_1 , die darüberliegende Schicht einen k-Koeffizienten k_2 und die unterhalb des Bohrlochbodens liegende Schicht einen k-Koeffizienten k_3 hat und wenn der Abstand der phreatischen Oberfläche von der Oberfläche der erstgenannten Schicht h_2 ist, dann lautet die Gleichung:

$$h_1 k_1 + h_2 k_2 + 0,5 k_3 r = 523\,000 r^2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

und für drei Schichten oberhalb des Bohrlochbodens:

$$h_1 k_1 + h_2 k_2 + h_3 k_3 + 0,5 k_4 r = 523\,000 r^2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

und so weiter. Für praktische Zwecke nimmt man $k_3 = k_1$ (Gleichung 2) oder $k_4 = k_1$ (Gleichung 3). In bezug auf die Gleichung für heterogene Böden gilt dasselbe, was bei der Gleichung für homogene Böden bemerkt wurde. Wenn in Wirklichkeit keine scharf abgegrenzten Schichten vorkommen, dann ermittelt man den schein-

¹⁾ Wenn der Boden in Wirklichkeit heterogen ist, so bestimmt man eine Art Mittelwert, den ich «scheinbare Durchlässigkeit» nenne (siehe Nr. 1 und Nr. 4 des Literaturverzeichnisses).

baren k -Koeffizienten der beiden angenommenen Schichten (siehe die Fußnote auf S. 43).

Zu beachten ist erstens, daß man, wenn man den k -Koeffizienten in cm pro Sekunde ausdrücken will, *den k -Koeffizienten, den man mit den obengenannten Formeln berechnet hat, durch 864 dividieren muß, und daß man also die Einzelfaktoren nicht in cm und Sekunden ausdrücken darf.* (Der Zifferfaktor 523 000 hat nämlich noch die totale Dimension (l^{-1}) ; siehe Nr. 1 des Literaturverzeichnisses.)

Zweitens ist zu beachten, daß die Temperatur des Grundwassers von Einfluß auf die Durchlässigkeit des Bodens ist (2). Wenn man den k -Koeffizienten auf eine gewisse Temperatur (z. B. 10° C) umrechnen will, dann müssen alle rechten Seiten der obengenannten

Gleichungen mit $\frac{\eta_t}{\eta_{10}}$ multipliziert werden (η_t ist hier die Zähigkeit des Wassers bei t° C und η_{10} die Zähigkeit des Wassers bei 10° C). Im allgemeinen wird das aber nicht notwendig sein.

Über die Technik der Messungen und namentlich der Ermittlung der Steiggeschwindigkeit des Wassers, nachdem man das Bohrloch ausgeschöpft hat, werde ich hier nicht weiter sprechen (siehe Nr. 1 des Literaturverzeichnisses). Dagegen werde ich noch einiges über die Anwendung der Gleichung mitteilen.

Es wird klar sein, daß man bei der Anwendung der Gleichung für homogene Böden, gleichviel ob der Boden unterhalb des Bohrlochbodens durchlässig ist oder nicht, eigentlich die Durchlässigkeit der Schicht zwischen der Wasserfläche im Bohrloch und dem Bohr-

lochboden bestimmt, da der Faktor $\frac{H}{H + 0,5 r}$ wenig von eins abweicht,

also r in bezug auf H klein ist. Ähnliches treffen wir bei der Anwendung der Gleichungen für heterogene Böden an, da der Einfluß des Faktors $0,5 k_3 r$ bzw. $0,5 k_4 r$ meistens klein ist. Man wird verstehen, daß, wenn man ein Bohrloch bis zu einer gewissen Tiefe (z. B. 1,0 m) gemacht hat, man bei diesen Messungen nur die Gleichung für homogene Böden anwenden kann, d. h. daß man nur die Durchlässigkeit der ganzen Bodenschicht von der phreatischen Oberfläche im Bohrloch bis zum Boden des Bohrloches ermitteln kann. Man nimmt dann an, daß die Bodenschicht unterhalb des Bohrloches ebenso durchlässig ist wie die Schicht oberhalb des Bohrlochbodens. Wenn man wissen will, wie groß die Durchlässigkeit des Bodens unterhalb des Bohrlochbodens ist, dann muß man dasselbe Bohrloch weiter ausbohren (z. B. bis 1,5 m). Man wartet erst, bis die Wasserfläche wieder im Gleichgewicht ist, und fängt von neuem an, die Steiggeschwindigkeit auf die bekannte Weise zu ermitteln. Man kann die Gleichung jetzt für zwei Schichten anwenden, da h_1 , h_2 und k_2 in dieser Gleichung bekannt sind (k_3 wird gleich k_1 genommen). Auf ähnliche Weise — man muß das Bohrloch erst wieder tiefer ausbohren, dann warten, bis die Wasserfläche im Gleichgewicht steht usw. — kann man die Gleichung für drei Schichten anwenden, da h_1 , h_2 , h_3 , k_2 und k_3 jetzt in dieser Gleichung bekannt sind und man wieder $k_4 = k_1$ nehmen kann. Wenn z. B. der ursprüngliche Stand des Grundwassers 50 cm

unterhalb der Erdoberfläche ist, so kann man z. B. den k-Koeffizienten der Schicht von 50—100 cm, 100—150 cm, 150—200 cm usw. unterhalb der Erdoberfläche ermitteln. Das Bohrloch ist dann während der ersten Messung 100 cm, während der zweiten Messung 150 cm und während der dritten Messung 200 cm tief usw. Wir können also die Durchlässigkeit des Bodens an sich und die Änderung, die in der Durchlässigkeit bei zunehmender Tiefe unterhalb der Erdoberfläche eintritt, ermitteln. Hieraus kann man natürlich schließen, bis zu welcher Tiefe der Boden noch eine nicht zu vernachlässigende Durchlässigkeit aufweist.

Die obengenannten Daten bestimmen gerade das Einzelentwässerungsbedürfnis und lassen das Ergebnis gewisser Einzelentwässerungsanlagen im voraus berechnen. Mit dieser Frage wollen wir uns im nächsten Abschnitt eingehender befassen.

Zum Schluß muß ich noch darauf aufmerksam machen, daß es in den Niederlanden durchaus nicht zutrifft, daß die Durchlässigkeit um so geringer wird, je schwerer der Boden ist, so wie es in anderen Ländern wohl der Fall zu sein scheint (3). Hier kommen im Gegenteil sehr schwere Tonböden mit mehr als 60% Ton vor, die durchlässiger sind als manche Sandböden. Ohne Zweifel hängt das damit zusammen, daß diese Böden verhältnismäßig noch sehr jung sind.

II. Die Bedeutung der durch die Bohrlöcherermittelten Daten für die Praxis.

Im vorhergehenden Abschnitt haben wir gesehen, daß die Bohrlöcherermethode es uns möglich macht, die Durchlässigkeit mehrerer Bodenschichten bis zu jeder gewünschten Tiefe zu ermitteln. Wir können hieraus schließen, wie die Durchlässigkeit im Profil und die größere oder geringere Tiefe unterhalb der Erdoberfläche zusammenhängen. Hieraus ergibt sich, bis zu welcher Tiefe der Boden noch eine nicht zu vernachlässigende Durchlässigkeit aufweist. Wir wissen schon, daß diese Daten von großer Bedeutung sind, weil sie es ermöglichen, das Ergebnis gewisser Dränanlagen im voraus zu berechnen.

Um das Vorhergehende verstehen zu können, werden wir jetzt die zwei wichtigsten Bodentypen besprechen, nämlich Böden mit einem sehr großen und solche mit einem sehr kleinen Einzelentwässerungsbedürfnis. Die Theorie der Wasserströmung im Boden nach den Dränsträngen, Gräben usw. zeigt uns, durch was ein großes oder ein kleines Einzelentwässerungsbedürfnis entsteht und welche Faktoren hierbei eine Rolle spielen. Ich kann hier leider nicht auf Einzelheiten eingehen, möchte aber auf eine ausführliche Abhandlung (4) hinweisen, die im Laufe dieses Jahres publiziert werden wird. Hier muß ich mich damit begnügen, die Faktoren zu besprechen, die das Einzelentwässerungsbedürfnis beherrschen. Danach werden wir die Hauptkennzeichen der obengenannten zwei Bodentypen eingehender behandeln und sehen, welches Resultat man erzielt, wenn diese Böden auf eine gewisse Weise gedränt werden. Letzteres werden wir dann mit den auf zwei Entwässerungs-Versuchsfeldern experimentell gefundenen Daten weiter erläutern.

Ohne daß ich die Theorie der Wasserströmung bespreche, wird es klar sein, daß das Einzelentwässerungsbedürfnis um so kleiner sein wird, je größer die Durchlässigkeit des Bodens ist. Weiter wird die Dicke der Schicht — namentlich unterhalb der Dränstränge und bis wo die Durchlässigkeit nicht allzu gering geworden ist — von großer Bedeutung sein. Das Regenwasser, das auf das Land zwischen zwei Dränsträngen fällt, wird ja — insofern es nicht verdampft oder von den Pflanzen verbraucht oder aber vom Boden festgehalten wird — erst senkrecht hinab bis zu der phreatischen Oberfläche sinken und danach in der Bodenschicht unterhalb dieser Oberfläche in mehr oder weniger waagerechter Richtung nach den Dränsträngen fließen. Je dicker unter sonst gleichen Umständen diese Schicht unter der phreatischen Oberfläche ist, um so kleiner ist der Widerstand, auf den das Wasser, wenn es nach den Dränsträngen fließt, stößt, und um so größer kann die Entfernung der Dränstränge bei demselben Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen sein. Weiter ist es wichtig, auf welche Weise sich die Durchlässigkeit im Profil bei zunehmender Tiefe unter der Erdoberfläche ändert. Wenn z. B. in zwei Böden die Dräntiefe ebenso wie die mittlere Durchlässigkeit des Bodens oberhalb der Dränstränge gleich ist, und wenn im einen Fall die Durchlässigkeit mit der Tiefe abnimmt, während der Boden im anderen Fall homogen ist, dann wird der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen bei gleichem Abfluß von überflüssigem Regenwasser im ersten Fall natürlich höher sein wie im zweiten Fall.

Zum Schluß will ich noch bemerken, daß das Ergebnis einer gewissen Dränung in einem gewissen Boden — d. h. also die Höhe des Grundwasserstandes in der Mitte zwischen den Dränsträngen, vom Niveau der Dränstränge ab gerechnet — natürlich auch noch von der Tiefe der Dränung, von der Entfernung der Dränstränge und von der Tatsache abhängt, ob oberhalb der Dränstränge Wasser vorkommt oder nicht. Der Einfluß der Dräntiefe äußert sich bei gleicher Entfernung der Dränstränge darin, daß bei einer größeren Dräntiefe bei gleichem Grundwasserstand unterhalb der Erdoberfläche ein größeres Gefälle im Grundwasser möglich ist, wenn beidemal kein Wasser oberhalb der Dränstränge steht. Denn der Druckunterschied ist ebenso groß wie der Höhenunterschied der Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen und oberhalb der Dränstränge¹⁾ und wird im gegebenen Fall größer, wenn die Dräntiefe zunimmt. Weiter folgt hieraus, daß die Wirkung der größeren Dräntiefe, wenn Wasser oberhalb der Dränstränge vorkommt, um so kleiner wird, je höher die Wasserfläche oberhalb der Dränstränge steht. Im selben Boden und bei gleicher Entfernung der Dränstränge gibt es dann keinen wesentlichen Unterschied zwischen dem Ergebnis der Dränung bei verschiedener Tiefe, wenn der Wasserstand oberhalb der tieferliegenden Dränstränge gerade bis zu

¹⁾ Wenn sich kein Wasser oberhalb der Dränstränge befindet, dann stimmt die Lage der phreatischen Oberfläche hier mit dem Niveau der Dränstränge überein.

dem waagerechten Niveau der höherliegenden Dränstränge reicht und hier kein Wasser oberhalb der Dränstränge vorkommt.

Aus dem Vorhergehenden folgt also, daß das Dränungsbedürfnis um so größer ist, je geringer die Durchlässigkeit ist, je schneller die Durchlässigkeit mit der Tiefe unter der Erdoberfläche abnimmt, und je kleiner die Dicke der durchlässigen Schicht ist. Der Boden, der diese Eigenschaften in hohem Maße aufweist, führt das Wasser auf eine bestimmte Weise ab, wenn man ihn dränt. Ein solcher Boden hat natürlich ein großes Dränungsbedürfnis (Typus I). Umgekehrt hat ein Boden ein geringes Dränungsbedürfnis, wenn er sehr durchlässig ist und namentlich bis tief unterhalb der Erdoberfläche durchlässig bleibt (Typus II).

A. Bodentypus I. Kurze Besprechung einiger Ergebnisse des Entwässerungs-Versuchsfeldes B 45 in der Nähe von Kolhorn.

Angenommen, ein Boden sei völlig undurchlässig, dann könnte das überflüssige Regenwasser nur oberhalb der Erdoberfläche nach den Drängräben fließen. Dies kommt praktisch nicht vor, weil doch auf jeden Fall die oberste Schicht durch die Bearbeitung oder durch das Eintrocknen des Bodens im Sommer eine gewisse Durchlässigkeit für Wasser bekommen hat. Der äußerste Fall ist also dann der, wo die Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe unter der Erdoberfläche sehr schnell abnimmt. Sehr dicht unter der Erdoberfläche ist die Durchlässigkeit also schon gering, unterhalb der Dränstränge ist sie jedenfalls gleich Null.

Selbstverständlich wird die größte Wassermenge durch den Boden hindurch nach den Dränsträngen fließen, wenn der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen gerade bis zu der Erdoberfläche gestiegen ist. Wenn die Durchlässigkeit dicht unter der Erdoberfläche schon gering ist, wie in unserem Fall, dann bleibt die Wassermenge, die auch bei kleiner Entfernung der Dränstränge durch den Boden hindurch abfließt, im Verhältnis zum Regenfall gering. Die Folge ist, daß wir bei fortwährendem Regen sehr hohe Grundwasserstände bis zu der Erdoberfläche erwarten können, während eine Menge Regenwasser oberhalb der Erdoberfläche nach den Drängräben abfließt (die Durchlässigkeit des Bodens in den Drängräben ist für derartige Böden von großer Bedeutung, da die Dränstränge hier größtenteils wie offene Gräben wirken).

Weiter werden an trockenen Tagen mit einer starken Verdunstung nach einem starken Regen zuerst die Pfützen an der Erdoberfläche eintrocknen, wonach der Grundwasserstand schnell sinken wird. In einem derartigen Boden wird die Anzahl der nicht kapillaren Räume mit frei beweglichem Wasser sehr gering sein, da sonst die Durchlässigkeit wohl größer wäre. Das heißt, daß die Wassermenge, die abgeführt werden muß, um den Grundwasserstand um 1 cm fallen zu lassen, sehr gering ist, so daß bei einer starken Verdunstung der Grundwasserstand schnell fallen wird. Die Folge ist also, daß die Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen, wenn regnerische und trockene Zeiten miteinander abwechseln, wie es im

Laufe eines Jahres immer der Fall ist, starken Änderungen ausgesetzt sind. In einer graphischen Darstellung, in der die Zeit auf der Abszissenachse und der Grundwasserstand unter der Erdoberfläche in Zentimetern auf der Ordinatenachse angegeben ist, hat also die Linie, die die Änderungen des Grundwasserstandes im Laufe der Zeit anzeigt, einen sehr unregelmäßigen Verlauf. Ein derartiger Fall ist auf dem Entwässerungs-Versuchsfeld B 45 (schwerer Ton) im neuen Wieringermeerpolder im ersten Jahre nach der Trockenlegung des Polders (1930) vorgekommen. Die Durchlässigkeit des Bodens war damals gering, nahm mit der Tiefe unter der Erdoberfläche ab und war unterhalb der Dränstränge (Tiefe 95 cm) so gering, daß man sie ruhig außer Betracht lassen konnte. Eine Beschreibung dieses Versuchsfeldes ist in den Verhandlungen der 6. Kommission der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft, Groningen, 1932, Teil A, S. 188, enthalten (5). Hier muß ich mich damit begnügen, darauf aufmerksam zu machen, daß auf diesem Versuchsfeld Teile mit Dränsträngen in einer Entfernung von 10 m, 15 m und 20 m vorhanden sind, weiter Teile mit 60 cm tiefen offenen Gräben in einer Entfernung von 10 m, 15 m und 20 m und endlich Teile ohne eine Einzelentwässerung (sog. «nicht entwässerte» Abteilungen). Auf den Teilen mit Dränsträngen und mit offenen Gräben hatte man in der Mitte zwischen den Dränsträngen und zwischen den offenen Gräben Grundwasserstandsröhren eingebracht, ebenso auf den nicht entwässerten Teilen. Die Wasserstände in diesen Röhren wurden täglich gemessen, ebenso wie der Abfluß der Dränstränge und der offenen Gräben. In der Abb. 1 sind die Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen mit einer Entfernung von 10 m, 15 m und 20 m und der Grundwasserstand mitten auf dem nicht entwässerten Felde angegeben, wie sie im Laufe des Jahres 1931 gemessen worden sind.

Hieraus sehen wir, daß die Grundwasserstände in regnerischen Zeiten überall sehr hoch sind — ungefähr bis zu der Erdoberfläche — und daß sie in trockenen Zeiten um vieles fallen, so daß die Grundwasserstandslinien einen sehr unregelmäßigen Verlauf haben. Weiter zeigt sich, daß die Änderungen der Grundwasserstände bei den einzelnen Strangentfernungen ungefähr ebenso groß sind wie die Änderungen der Grundwasserstände auf den nicht entwässerten Teilen. Hieraus folgt, daß der Grundwasserstand hauptsächlich von dem Regenfall und der Verdunstung abhängt (Vegetation war damals noch keine vorhanden), und daß der Abfluß von Regenwasser *durch den Boden hindurch* nach den Dränsträngen nur einen geringen Einfluß ausübt. Letzteres ist verständlich, weil die größte Regenwassermenge, die durch den Boden hindurch abfließen kann, ohne daß ein Wasserabfluß auf der Erdoberfläche stattfindet, im Verhältnis zum Regenfall sehr gering ist. Auf diesem Versuchsfeld ist denn auch im Laufe des genannten Jahres in regnerischen Zeiten oft Wasser auf der Erdoberfläche abgeflossen. Umgekehrt war in trockenen Zeiten die Verdunstung viel größer als der Wasserabfluß durch den Boden hindurch nach den Dränsträngen, zumal da die niedrigen Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen den letzteren noch verkleinern.

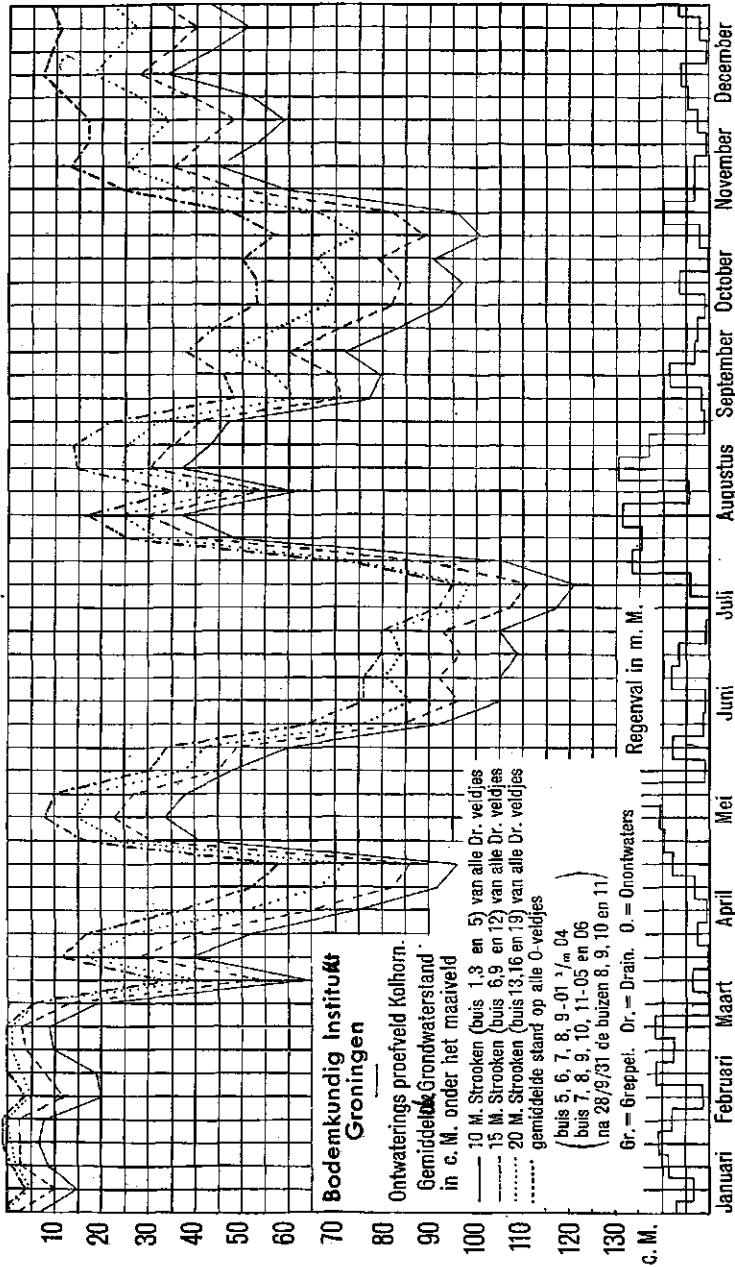


Abb. 1. **Erläuterung:** Alle Grundwasserstände sind in cm unter der Erdoberfläche (Nied.: Maaiveld) angegeben.
 — Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 10 m.
 - - - - - Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 15 m.
 Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 20 m.
 Grundwasserstand auf dem nicht entwässerten Teil.

Daß übrigens noch ein Teil des Regenwassers durch den Boden hindurch abfließt, beweist die Tatsache, daß die Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen bei einer Strangentfernung von 10 m am tiefsten sind, dann folgen die Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen bei einer Strangentfernung von 15 m, dann bei einer Strangentfernung von 20 m, während die Grundwasserstände auf den nicht entwässerten Teilen am höchsten sind; alles stimmt also mit der Theorie der Wasserströmung durch den Boden hindurch nach den Dränsträngen, Gräben usw. überein.

In der Abb. 2 sind die Grundwasserstandslinien im Laufe des Jahres 1931 dargestellt, wie sie aus den gemessenen Grundwasserständen in der Mitte zwischen den Dränsträngen und zwischen den offenen Gräben in einer Entfernung von 10 m entstanden sind. Die Grundwasserstände sind fast gleich, obgleich die Grabentiefe 60 cm und die Dräntiefe 95 cm ist. Eine tiefere Lage hat hier also keine Wirkung gehabt, wie im voraus zu erwarten war. Die Durchlässigkeit der Schicht von 60—95 cm unter der Erdoberfläche ist ja so gering, daß der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den tiefer liegenden Dränsträngen ungeachtet des größeren Gefälles (oberhalb der Dränstränge befand sich im Jahre 1931 sehr wahrscheinlich kein Wasser) ungefähr bis zu derselben Höhe steigen mußte, um die gleiche Wassermenge abführen zu können. In diesem Fall ist auch die Tatsache von Bedeutung, daß der Grundwasserstand namentlich vom Regenfall und von der Verdunstung abhängt, während der Abfluß des Wassers durch den Boden hindurch nur eine geringe Rolle spielt, die um so geringer ist, als der Unterschied im Wasserabfluß zufolge des Unterschiedes in der Tiefenlage nur sehr klein ist. Hiervon abgesehen aber ist eine tiefere Lage niemals von Einfluß, wenn die Durchlässigkeit mit der Tiefe unter der Erdoberfläche abnimmt und wenn die Durchlässigkeit des Bodens in der Schicht zwischen den seichter und den tiefer liegenden Dränsträngen gegenüber der Durchlässigkeit der Schicht oberhalb der seichter gelagerten Dränstränge gering ist, während der Boden unterhalb der am tiefsten liegenden Dränstränge als undurchlässig aufgefaßt werden kann.¹⁾

Zum Schluß will ich noch bemerken, daß der geringe Vorteil einer tieferen Lage der Dränstränge bei solchen Bodentypen ganz

¹⁾ Wir würden das sehr leicht mit mathematischen Betrachtungen erläutern können. Ohne auf die Ableitung der dazu zu benutzenden Gleichungen einzugehen, werden wir uns hier mit einem Zahlenbeispiel begnügen und einmal den Grundwasserstand berechnen zwischen Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 10 m, wenn die Dränstränge im einen Fall 1 m tief und im anderen Fall 1,5 m tief liegen, und wenn weiter kein Wasser oberhalb der Dränstränge vorkommt, die undurchlässige Schicht 1,5 m tief liegt und der Boden über dieser undurchlässigen Schicht nach der Funktion: $k_y = y^2$ zunimmt, worin k_y den k-Koeffizienten in einer Höhe von y m oberhalb dieser Schicht vorstellt. In diesem Fall ist:

$$S = \frac{(H_0^4 - h_0^4)}{6e^2},$$

worin S der Abfluß der Dränstränge in m je 24 Stunden ist, H_0 und h_0 die Grundwasserstände in m in der Mitte zwischen den Dränsträngen und über den Dränsträngen, gerechnet vom Niveau der undurchlässigen Schicht ab, bedeuten und

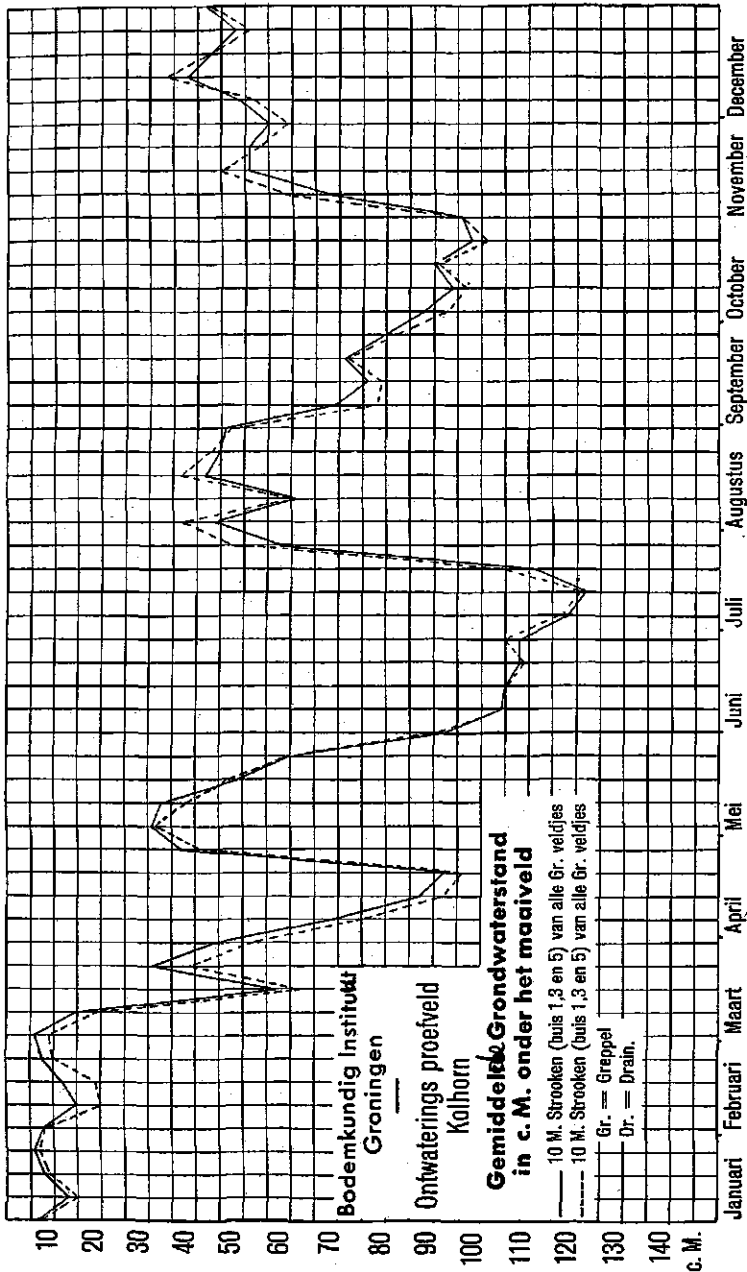


Abb. 2. Erläuterung: Alle Grundwasserstände sind in cm unter der Erdoberfläche (Nied.: Maaiveld) angegeben.
 ——— Grundwasserstand in der Mitte zwischen offenen Gräben mit einer Grabenentfernung von 10 m.
 - - - - - Grundwasserstand in der Mitte zwischen Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 10 m.

verloren geht, wenn die Durchlässigkeit der Drängräben so sehr abnimmt, daß sich oberhalb der Dränstränge Wasser zeigt. Ein völlig durchlässiger Drängraben ist für diese Böden von der größten Bedeutung. Auch kann man voraussagen, daß in diesen Böden alle maschinell hergestellten Dränstränge schlechte Resultate erzielen, wenn dabei nicht gleichzeitig für einen völlig durchlässigen Drängraben gesorgt wird.

Kurz gefaßt können wir sagen, daß Bodentypen mit einem großen Einzelentwässerungsbedürfnis in regnerischen Zeiten und mit einer kleinen Verdunstung hohe Grundwasserstände aufweisen, während diese Grundwasserstände sich beim Übergang von regnerischen in trockene Zeiten und umgekehrt sehr ändern. Die Grundwasserstände in diesen Böden hängen namentlich vom Regenfall und von der Verdunstung ab, während der Abfluß des überflüssigen Regenwassers durch den Boden hindurch nur einen geringen Einfluß ausübt. Eine große Dräntiefe ist hier nicht von Bedeutung²⁾, wohl aber ein sehr durchlässiger Drängraben. Es ist einleuchtend, daß die Strangentfernung hier gering sein muß.

B. Typus II. Kurze Besprechung einiger Ergebnisse des Entwässerungs-Versuchsfeldes im Rietwijkerorderpolder in der Nähe von Amsterdam.

Der andere Bodentypus hat ein sehr geringes Dränungsbedürfnis. Diese Böden bleiben noch tief unter der Erdoberfläche sehr durchlässig. Dies scheint z. B. mit dem IJpolder in der Nähe von Amsterdam, der aus schwerem Tonboden besteht, der Fall zu sein. Man benutzt hier wenigstens nur Seitengräben, die sogar 150 m voneinander entfernt sind. Andere Einzelentwässerungssysteme gibt es nicht.

Bei diesem Bodentypus wird, auch wenn die Dränstränge in einer großen Entfernung voneinander liegen, ein kleiner Überdruck (Unterschied zwischen dem Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen und über den Dränsträngen) genügen, um eine große Menge überflüssigen Regenwassers abzuführen. Wenn z. B. ein Überdruck von 10 cm genügt, um einen überflüssigen Regenfall von 5 mm je 24 Stunden abzuführen, so folgt hieraus, daß die Änderung des Grundwasserstandes, wenn der überflüssige Regenfall von

e die halbe Strangentfernung vorstellt. Wenn in beiden Fällen der Abfluß z. B. 5 mm = 0,005 m je 24 Stunden ist, so ist für eine Dränung bei einer Tiefe von 1,0 m $h = 1,5 - 1,0 = 0,5$ m, so daß $H_0 = 0,949$ m ist oder $1,500 - 0,949 = 0,551$ m = 55,1 cm unter der Erdoberfläche. Für die Dränung mit einer Tiefe von 1,5 m ist $h_0 = 0$, so daß $H_0 = 0,931$ m oder $1,500 - 0,931 = 0,569$ m = 56,9 cm unter der Erdoberfläche.

Obgleich also im einen Fall die Dränstränge um 50 cm tiefer liegen, ist der Unterschied zwischen den Grundwasserständen nur 1,8 cm. Ähnliches treffen wir auch auf dem obengenannten Versuchsfeld B 45 im Jahre 1931 an, wenn die Durchlässigkeit des Bodens hier verhältnismäßig auch viel kleiner war als im Zahlenbeispiel.

²⁾ Dies kann möglicherweise anders kommen, wenn nämlich zufolge der Dränung eine große Verbesserung der Durchlässigkeit des Bodens eintritt, und zwar zufolge einer Ribbildung, die durch das Eintrocknen des Bodens entsteht, wie sich das im Wieringermeerpolder erwarten läßt. Hierauf kann ich nicht weiter eingehen.

0 bis zu 5 mm zunimmt, nur 10 cm betragen kann. Wenn man weiter erwägt, daß gerade in diesen Böden die Anzahl nicht kapillarer Räume oder von Räumen mit nur geringer kapillarer Steighöhe sehr groß sein wird, und daß also viel Wasser verdunsten muß, um den Grundwasserstand um 1 cm fallen zu lassen, so folgt hieraus, daß sich der Grundwasserstand in diesen Böden im Laufe des Jahres nur wenig ändern wird. Die Dränstränge und Gräben usw. sind ja imstande, den Grundwasserstand immer niedrig zu halten.

Andrerseits wird die Strangentfernung, wenn der Boden an sich weniger durchlässig ist — wie im obengenannten Fall —, aber noch bis sehr tief unter der Erdoberfläche durchlässig bleibt, einen großen Einfluß ausüben, insofern der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen, wenn diese zu weit voneinander entfernt liegen, zu hoch steigen wird. Die Änderungen des Grundwasserstandes im Laufe eines Jahres werden den bei dem ersten Typus besprochenen ähnlich sein, da auch jetzt wieder die Wassermenge, die durch den Boden hindurch abfließen kann, gegenüber dem Regenfall, der Verdunstung und dem Wasserverbrauch der Pflanzen gering ist. Für denselben Boden aber kann bei einer geeigneten, verhältnismäßig viel kleineren Strangentfernung die Wassermenge, die durch den Boden hindurch nach den Dränsträngen abfließt, wieder groß genug sein, um große Mengen überflüssigen Regenwassers abzuführen. Je größer die Durchlässigkeit des Bodens an sich ist — während die Tiefe, bis wohin die Boden durchlässig bleibt, gleich ist —, um so größer kann die Strangentfernung sein, während die Grundwasserstände immer niedrig bleiben.

Auf dem Entwässerungs-Versuchsfeld im Rietwijkerorderpolder in der Nähe von Amsterdam¹⁾ treffen wir einen Fall an, wo die Strangentfernung schon einen wahrnehmbaren Einfluß auf die Änderungen des Grundwasserstandes im Laufe des Jahres ausübt. Hier sind Grundwasserstandsröhren in der Mitte zwischen den Dränsträngen (Tiefe 102 cm unter der Erdoberfläche) mit einer Entfernung von 10 m, 15 m und 20 m voneinander, in der Mitte zwischen den offenen Gräben mit einer Tiefe von 60 cm und einer Entfernung von 10 m voneinander, sowie mitten auf dem nicht entwässerten Teil eingebracht. Die Grundwasserstände und der Abfluß der Dränstränge und der offenen Gräben werden täglich gemessen.

In der Abb. 3 sind die Grundwasserstände dargestellt, wie sie in den Monaten November 1935 bis zum Februar 1936 ermittelt worden sind. Hieraus sieht man, daß die Änderungen in den Grundwasserständen in der Mitte zwischen den Dränsträngen mit einer Entfernung von 10 m voneinander und in den Grundwasserständen in der Mitte zwischen den offenen Gräben mit einer Entfernung von 10 m voneinander recht klein waren: im ersten Fall nämlich von 90 bis zu 102 cm und im zweiten Fall von 50 bis 60 cm unterhalb der

¹⁾ Der Boden enthält von 0—40 cm unterhalb der Erdoberfläche etwa 40 % Ton, 40 % Humus und 20 % Sand. Darunter folgt Ton oder lehmiger Ton mit nur einigen Prozenten Humus. Tiefer hinunter wird der Boden leichter und enthält in einer Tiefe von 150 cm ungefähr 20 % Ton. Der Boden in den Schichten, die tiefer liegen als 40 cm unter der Erdoberfläche, enthält immer viel CaCO₃.

Erdoberfläche, während der Maximalabfluß des überflüssigen Regenwassers den Abflußmessungen nach 5 mm je 24 Stunden betrug. Für die Grundwasserstände zwischen den Dränsträngen mit einer Entfernung von 15 m voneinander waren die obengenannten Änderungen etwas größer, nämlich von 82 bis zu 102 cm, und für die Grundwasserstände zwischen den Dränsträngen mit einer Entfernung von 20 m voneinander wieder etwas größer, nämlich von 75 bis zu 102 cm, während der Maximalabfluß beidemal ebenfalls ungefähr 5 mm je 24 Stunden betrug. Die obengenannten Änderungen der Grundwasserstände waren auf dem nicht entwässerten Teil am größten, nämlich von 14 bis zu 53 cm unter der Erdoberfläche. Die Änderungen der Grundwasserstände werden also um so größer, je größer die Strang- oder Grabenentfernung ist¹⁾, wie die Theorie der Wasserströmung im Boden es hätte voraussagen können.

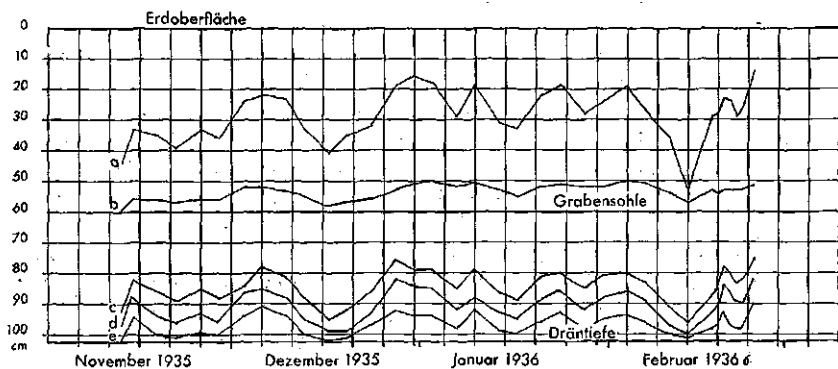


Abb. 3

Erläuterung: Alle Grundwasserstände sind in cm unter der Erdoberfläche angegeben.

- a Grundwasserstand auf dem nicht entwässerten Teil.
- b Grundwasserstand in der Mitte zwischen offenen Gräben mit einer Grabenentfernung von 10 m.
- c Grundwasserstand in der Mitte zwischen Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 20 m.
- d Grundwasserstand in der Mitte zwischen Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 15 m.
- e Grundwasserstand in der Mitte zwischen Dränsträngen mit einer Strangentfernung von 10 m.

Wenn wir weiter die Grundwasserstandslinien für die Dränstränge mit einer Entfernung von 10 m voneinander auf beiden genannten Versuchsfeldern vergleichen, dann sehen wir ganz deutlich den großen Unterschied. Die Ursachen davon haben wir schon besprochen. Den Boden im Rietwijkerorderpolder können wir weiter noch an Hand der Resultate der Bohrlöchermethode zur Ermittlung der Durchlässigkeit kontrollieren.

Auf einem Grundstück von ungefähr 67 ha, das an dieses Versuchsfeld grenzt, sind nämlich in regelmäßigen Entfernungen vonein-

¹⁾ Das nicht entwässerte Grundstück ist 300 m lang und 135 m breit und ist von einem Seitengraben umgeben.

ander 67 Bohrlöcher gebohrt werden, in denen die Durchlässigkeit mit Hilfe der Bohrlöchermethode ermittelt worden ist. Diese Durchlässigkeit änderte sich in regelmäßigen Abständen nur recht wenig und war im Mittel 0,74 m je 24 Stunden für die Schicht von ungefähr 70 bis 150 cm unter der Erdoberfläche (die Tiefe der Bohrlöcher war 150 cm). Zuzufolge der Homogenität des Grundstückes kann angenommen werden, daß die Durchlässigkeit des Bodens des Versuchsfeldes (dieses wurde im Sommer des Jahres 1935 angelegt) ebenfalls 0,74 m je 24 Stunden ist. Auch der Boden, der tiefer liegt, wird im Anfang wenigstens noch dieselbe Durchlässigkeit behalten. Nehmen wir an, daß der Boden bis zu einer Tiefe von 2 m dieselbe Durchlässigkeit behält und darunter undurchlässig ist, so sind wir imstande, die gemessenen Grundwasserstände quantitativ zu erklären¹⁾. Die Berechnungen müssen dieses Mal mit Hilfe der Gleichung:

$$S = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e^2}$$

ausgeführt werden, worin S den Abfluß in m je 24 Stunden, k den Durchlässigkeits-Koeffizienten in m je 24 Stunden, e die halbe Strangentfernung und H_0 und h_0 die Grundwasserstände in m in der Mitte zwischen den Dränsträngen und über den Dränsträngen, gerechnet vom Niveau der Dränstränge ab, bedeuten. Wenn S also 5 mm = 0,005 m je 24 Stunden, k = 0,74 m je 24 Stunden, e gleich 5 m, 7,5 m und 10 m, h_0 für die gedränten Teile 2,00 — 1,02 = 0,98 m und für die Teile zwischen den offenen Gräben 2,00 — 0,60 = 1,40 m

Strang- oder Grabenentfernung	Der Abfluß ist 5 mm je 24 Stunden		
	Grundwasserstände in cm unterhalb der Erdoberfläche, wie wir sie berechnet haben	Grundwasserstände in cm unterhalb der Erdoberfläche, wie sie experimentell ermittelt worden sind	
Dränstränge {	10 m	94	90
	15 m	84	82
	20 m	72	75
Gräben	10 m	54	51

¹⁾ Leider machte Zeitmangel es uns damals unmöglich, die Bohrlöcher tiefer auszubohren, um die Durchlässigkeit der Schicht von 1,5 m bis zu 2 m und tieferer Schichten experimentell zu ermitteln. Das ist aber in der letzten Zeit (1937) geschehen. In einem Teil der Bohrlöcher (35 Stück; am weitesten entfernt vom Entwässerungsversuchsfelde) wurden die k-Bestimmungen der Schicht bis zu 1,5 m Tiefe wiederholt. Im Mittel wurde jetzt (1937) $k = 0,91$ gefunden, während in den gleichen Bohrlöchern im Jahre 1936 $k = 0,79$ ermittelt worden ist. Der Unterschied ist sehr gering (Abweichung 7% des Mittelwertes). Weiter war die Durchlässigkeit der Schicht von 1,5 m bis zu 2 m im Mittel 0,86, während die Durchlässigkeit der Schicht unterhalb 2 m so klein war, daß sie vernachlässigt werden kann. Hieraus folgt, daß der Boden tatsächlich bis zu 2 m homogen (k im Mittel 0,74 oder 0,89) und unterhalb 2 m undurchlässig ist. Nimmt man für die obigen Berechnungen $k = 0,89$ an (der Wert 0,74 ist wahrscheinlich besser, s. o.), so bekommt man 95, 87, 77 und 55 cm anstatt 94, 84, 72 und 54 cm. Wie zu erwarten war, werden die Resultate durch diese Änderung des k-Werts kaum beeinflusst, weil H_0 proportional der Wurzel aus k ist.

der Oberfläche der undurchlässigen Schicht.

ist, dann kann man die H_0 -Werte berechnen und in m, und also auch in cm, unter der Erdoberfläche umrechnen, indem man sie von 2,00 abzieht. In der umstehenden Tabelle sind diese Werte und die experimentell ermittelten Werte bei demselben Abfluß angegeben.

Aus der Tabelle sieht man, daß die berechneten und die experimentell ermittelten Grundwasserstände miteinander übereinstimmen. Hieraus folgt also, daß in einem bis 2 m unter der Erdoberfläche durchlässigen Boden mit einem k-Koeffizienten von 0,74 m je 24 Stunden, der mit einer Strangentfernung von 10 m und einer Tiefe von 1,02 m gedränt wird, der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen infolge eines überflüssigen Regenfalls von 5 mm je 24 Stunden nur bis zu einer Höhe von 10 cm über das Niveau der Dränstränge steigt. Wenn der Boden aber nur bis zu der Tiefe der Dränstränge (1,02 m) eine Durchlässigkeit von 0,74 m je 24 Stunden hätte, während der Boden darunter undurchlässig wäre, dann wäre der Grundwasserstand bei einem Abfluß von 5 mm je 24 Stunden und bei einer Strangentfernung von 10 m bis zu 61 cm unter die Erdoberfläche gestiegen (h_0 ist jetzt gleich 0). Der Grundwasserstand wäre dann also von 102 bis zu 61 cm gestiegen, wenn der überflüssige Regenfall von 0 bis zu 5 mm je 24 Stunden zugenommen hätte. Die große Bedeutung einer durchlässigen Bodenschicht unterhalb der Dränstränge geht hieraus recht deutlich hervor.

Was den Einfluß der Strangentfernung betrifft, können wir ganz kurz sein. Sowohl experimentell als den Berechnungen nach sehen wir, daß die Grundwasserstände zwischen den Dränsträngen bei einer Strangentfernung von 10 m am niedrigsten sind, dann folgt die Dränung mit einer Strangentfernung von 15 m, dann die mit einer Strangentfernung von 20 m, während die Grundwasserstände auf dem nicht entwässerten Teil am höchsten sind. Wir treffen hier also auch in dieser Hinsicht völlige Übereinstimmung mit der Theorie der Wasserströmung im Boden an. Es ist interessant, den Einfluß der Tiefe der Einzelentwässerungssysteme zu studieren. Sowohl den experimentell ermittelten wie den berechneten Grundwasserständen nach ist der Tiefenunterschied der Grundwasserstände in der Mitte zwischen den Dränsträngen und zwischen den offenen Gräben mit einer Entfernung von 10 m ungefähr dem Unterschied in Tiefe der Grabensohle und der Dränstränge gleich (nämlich 0,42 m; der Unterschied zwischen den Grundwasserständen ist der Berechnung nach 0,40 m und der experimentellen Ermittlung nach 0,39 m). Die Tatsache, daß erstens der Boden bis zu einer Tiefe von 2 m durchlässig ist, während zweitens die Schicht von 0,60 bis 1,02 m unter der Erdoberfläche ungefähr dieselbe Durchlässigkeit hat wie die Schicht von 40 bis zu 60 cm unter der Erdoberfläche, führt zu diesen Resultaten. Wenn der Boden nur bis zu 1,02 m unter der Erdoberfläche durchlässig wäre (k auch gleich 0,74 m je 24 Stunden), während der Boden darunter undurchlässig wäre, so wäre bei einem Abfluß von 5 mm je 24 Stunden der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen bei einer Entfernung von 10 m 61 cm unter der Erdoberfläche und der Grundwasserstand zwischen den Gräben bei einer Entfernung von 10 m ($h_0 = 0,42$ m) 43 cm unter der Erdoberfläche.

Ein Tiefenunterschied von 42 cm hätte jetzt nur einen Unterschied der Grundwasserstände von 18 cm ($61 - 43 = 18$) herbeigeführt. Nur wenn der Boden auch unterhalb der am tiefsten liegenden Dränstränge bis in große Tiefe durchlässig bleibt und der Boden zwischen den höher und den tiefer liegenden Dränsträngen dieselbe Durchlässigkeit hat wie die Schicht oberhalb der höher liegenden Dränstränge, nur dann wird der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen um so viel fallen, als die Dräntiefe größer ist.

Weiter folgt aus der Abb. 3, daß man bei einer tieferen Lage der Dränstränge die Entfernung größer machen kann, wie auch aus der Theorie der Wasserströmung im Boden hervorgeht. Wir sehen ja sogar, daß der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den Dränsträngen bei einer Strangentfernung von 20 m niedriger ist als der Grundwasserstand in der Mitte zwischen den offenen Gräben bei einer Entfernung von 10 m.

Weiter wird es klar sein, daß in der Praxis zwischen den meist ausgesprochenen Typen mehrere Übergänge vorkommen, deren Eigenschaften zwischen denen der besprochenen äußersten Typen liegen.

Im vorhergehenden habe ich gezeigt, daß drei Punkte für die Bodenbeschaffenheit und das Entwässerungsbedürfnis maßgebend sind, nämlich: erstens die Durchlässigkeit des Bodens an sich, zweitens die Weise, in der sich die Durchlässigkeit zugleich mit der Tiefe unter der Erdoberfläche ändert, und drittens die Tiefe, bis zu der der Boden durchlässig bleibt. Mit dem, was ich im Abschnitt I über die Bohrlöchermethode zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Bodens gesagt habe, hoffe ich klargemacht zu haben, daß die obengenannten Faktoren sehr gut mit Hilfe der Bohrlöchermethode ermittelt werden können, so daß die Bedeutung dieser Methode für die Praxis klar einzusehen ist. Ich hoffe, daß es genügt, hier wenigstens ein Beispiel kurz behandelt zu haben, so daß es nicht nötig ist, noch andere Beispiele anzuführen.

Literatur.

1. Hooghoudt S. B. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, No 4; Bepaling van den doorlaatfactor van den grond met behulp van pompproeven (z. g. Boorgatenmethode); Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, 1936, S. 449—541.
2. Hooghoudt S. B. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, No 2; De doorlatendheid, de maximale capillaire stijghoogte, de hoeveelheid hangwater, de grootheid van Porchet en het specifiek oppervlak. De methoden ter bepaling van deze grootheden en hun onderling verband; Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, 1934, S. 215—345.
3. Janota R. Neue Richtlinien für die Wahl der Dräntiefe und die Festsetzung der Dränabstände in der Tschechoslowakischen Republik; Transactions of the sixth Commission of the International Society of Soil Science, Groningen, Volume A, S. 97—108.
4. Hooghoudt S. B. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond No. 6; Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, 1937, S. 461—676.
5. Zuur A. Von der Entsalzung des Bodens auf dem Entwässerungs-Versuchsfeld in der Nähe von Kolhorn; Transactions of the sixth Commission of the International Society of Soil Science, Groningen, 1932, Volume A, S. 188—201.