

Sonderdruck aus „Zeitschrift für Kulturtechnik“

3. Jahrgang, Heft 2 (1962), S. 84—90

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der photomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

VERLAG PAUL PAREY · BERLIN UND HAMBURG

*Aus dem Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
in Wageningen, Nederland*

Wie beeinflußt das Speicherungsvermögen den Dränabstand

Von W. C. VISSER

Inhaltsübersicht:

1. Einführung — 2. Das Speicherungsvermögen in Formeln für nicht-stetige Strömungen — 3. Das Speicherungsvermögen in den stetigen Dränformeln — 4. Die Kontinuitätsgleichung — 5. Die quasi-stetige Dränformel — 6. Die Angleichung an die stetigen Formeln — 7. Die speicherungsabhängige Drängleichung — 8. Zusammenfassung — Literaturverzeichnis.

Contents:

1. Introduction — 2. The Moisture Storage Capacity in Formulae for Non-Steady Flow — 3. The Moisture Storage Capacity in the Steady-State Drain Spacing Formulae — 4. The Continuity Equation — 5. The Quasi-Steady State Drain Spacing Formula — 6. The Approximation to the Steady-State Formulae — 7. The Draining Equation Taking into Account Storage — 8. Summary — Bibliography.

1. Einführung

In den üblichen Formeln für die Berechnung des Dränabstandes findet man das Speicherungsvermögen des Bodens für Wasser nicht in expliziter Form angegeben. Es ist aber ungenannt im Abflußfaktor enthalten. Dieser Faktor bezieht sich auf den Höchstabfluß, der unter den jeweilig vorhergesehenen Klimabedingungen einer Dränung zugrunde gelegt werden soll. In den Niederlanden wurde dieser Faktor ermittelt, und es wird mit einer Höhe von 5—7 mm/Tag gerechnet. Auch wenn ein Regen von 30—40 mm auftritt, kann mit diesem Höchstabfluß gerechnet und der Regen abgeleitet werden, weil der Wasserüberschuß zeitweilig in dem lufthaltigen Porenvolumen gespeichert werden kann.

Es ist üblich, den Abflußfaktor für alle Bodenprofile konstant einzusetzen. Ein Speicherungsmaß wird nicht bestimmt, obgleich es klar ist, daß dabei gewisse Profileinflüsse vernachlässigt werden. Bei Böden mit kleinerem Speicherungsvermögen müßte ein höherer Abflußfaktor zugrunde gelegt werden als bei Böden mit größerem luftgefülltem Porenvolumen, wenn man einen zu hohen Grundwasserstand vermeiden will. Dichte undurchlässige Böden werden bei Anwendung der Formeln, die den Einfluß des Speicherungsvermögens nicht berücksichtigen, mit zu weitem Dränabstand gedränt, lockere Böden dagegen dränt man mit zu geringem Abstand.

Es erscheint daher notwendig, eine Dränformel zu entwickeln, in der das Speicherungsvermögen enthalten ist und sein Einfluß berücksichtigt wird. Es wird hier gezeigt

werden, daß dies durch Erweiterung der Formel von HOOGHOUTD sehr leicht möglich ist.

2. Das Speichungsvermögen in Formeln für nicht-stetige Strömungen

Die Formeln für nicht-stetige Strömungen zeigen schon, wie man das Speichungsvermögen berücksichtigen muß. Diese Formeln findet man in der Form (1, 2):

$$q = a \left\{ 1 - \beta \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} e^{-an^2 t} \right\} \quad [1]$$

s = Regenmenge
 q = Abfluß
 L = Dränabstand
 k = Durchlässigkeit
 D = Höhe des Wasserträgers
 μ = Speichungsvermögen
 t = Zeit
 e = Grundzahl des natürlichen Logarithmus
 n = Reihe der ungeraden Zahlen von 0 bis ∞

$$a = \frac{s L^2}{8 k D} \qquad \beta = \frac{32}{\pi^3}$$

$$\gamma = \frac{n^2 \pi^2 k D t}{\mu L^2}$$

Wie man sieht, hängt der Abfluß nur durch γ mit dem Speichungsvermögen zusammen. Aus dem Wert von γ ergibt sich, daß eine Änderung von μ in den nicht-stetigen Formeln eine kompensierende Änderung von L^2 mit sich bringt. Wird eine Berechnung des Dränabstandes für mittlere Bedingungen durchgeführt, wobei der unbekannte μ -Wert eine gewisse mittlere Größe hat, dann wird ein bestimmter Dränabstand L gefunden. Wäre der μ -Wert in Wirklichkeit 10 % höher gewesen, dann würde — wegen des μ - L^2 -Verhältnisses — ein um 5 % niedriger Dränabstand ermittelt worden sein.

3. Das Speichungsvermögen in den stetigen Dränformeln

In stetigen Dränformeln ist für einen μ -Wert kein Platz. Man nimmt an, daß Abfluß und Druckhöhe sich nicht ändern, so daß kein Wasser gespeichert werden muß. Bei Anwendung von stetigen Dränformeln hilft man sich durch die Wahl des Abflußbeiwertes s , der die Unstetigkeit des Klimas berücksichtigt. Hier ist die Frage zu lösen, ob der μ - L^2 -Zusammenhang, den die unstetigen Formeln aufweisen, auch in die stetigen Formeln eingebaut werden kann. Dazu muß erst eine Formel aufgestellt werden, welche zwar von denselben Voraussetzungen ausgeht wie die stetigen Formeln, dazu aber einen Zeitfaktor enthält. Es handelt sich um eine quasi-stetige Dränformel.

4. Die Kontinuitätsgleichung

Für die Strömungsformel ist es eine Voraussetzung, daß Wasser nicht zusammenpressbar ist. Das Wasser, das einem Bodenwürfel mehr zufließt als abläuft, wird in ihm gespeichert, d. h. man findet es als Zunahme der Speicherung wieder. Wenn s_z die zufließende und s_a die abfließende Wassermenge pro Zeiteinheit darstellt, dann wird in einer Zeit Δt die Speicherung zunehmen und sich eine Erhöhung des Grundwasserspiegels um Δm ergeben. Diese Erhöhung Δm mit dem Speichungsvermögen multipliziert ergibt die gleiche Wassermenge wie das Abflußdefizit.

Diesen Zusammenhang kann man durch folgende Formel ausdrücken:

$$(s_z - s_a) \Delta t = \mu \Delta m \quad [2]$$

Es ist aber bekannt, daß das Speichungsvermögen — die Wassermenge die benötigt wird, um die Grundwassertiefe um eine Einheit zu verändern — klein ist, wenn der Grundwasserstand nahe der Oberfläche ist, und mit zunehmender Grundwassertiefe bis zu einem Höchstwert größer wird. Diesen Zusammenhang kann man in Annäherung an die Wirklichkeit linear annehmen und schreiben:

$$\mu = \gamma (h - m) \quad [3]$$

wobei h die Tiefe ist, bei der μ den Wert 0 erreicht, — also der Grundwasserspiegel an die Oberfläche kommt — und m die variabel gedachte Höhe des Grundwasserspiegels über dem Niveau der Dränrohre ist.

Für den Abfluß s_a kann man die Hooghoudtformel verwenden:

$$s_a = \alpha m + \beta m^2 \quad [4] \quad k_u = \text{Durchlässigkeit unterhalb des Dränniveaus}$$

$$\alpha = \frac{8 k_u D}{L^2} \quad \beta = \frac{4 k_o}{L^2} \quad k_o = \text{Durchlässigkeit oberhalb des Dränniveaus}$$

Wenn man Formel [3] und [4] in [2] einsetzt, so erhält man eine Gleichung, aus der durch Integrieren die quasi-stetige Dränformel zu berechnen ist.

5. Die quasi-stetige Dränformel

Es entsteht durch Substitution der Formeln [3] und [4] in [2] folgende Gleichung:

$$(s_z - \alpha m - \beta m^2) dt = \gamma (h - m) dm \quad [5]$$

Durch Integration erhält man:

$$e^{\frac{2\beta t}{\gamma}} = \left(\frac{R+Z}{R+Z_o}\right)^{1+\frac{Z_h}{R}} \left(\frac{R-Z}{R-Z_o}\right)^{1-\frac{Z_h}{R}} \quad [6]$$

Hier ist:

$$R = \sqrt{\frac{s_z}{\beta} + \left(\frac{\alpha}{2\beta}\right)^2} \quad Z_o = m_o + \frac{\alpha}{2\beta}$$

$$Z = \sqrt{\frac{s_a}{\beta} + \left(\frac{\alpha}{2\beta}\right)^2} = m + \frac{\alpha}{2\beta} \quad Z_h = h + \frac{\alpha}{2\beta}$$

m_o = Druckhöhe über Dränniveau am Anfang
 m = Druckhöhe über Dränniveau nach einer Zeit t

Die Formeln für R , Z , usw. stammen aus Formel [4]. Die Formel [6] ist eine nicht-stetige Dränformel, in die man die wirklichen Regenmengen einsetzen und mit der man für aufeinander folgende Tage m_o und m berechnen kann. Der m -Wert des ersten Tages gilt dann wieder als m -Wert für den zweiten. So kann man für schwere Regenperioden Schritt für Schritt den Höchstabfluß berechnen und für ein Klima, für das in der Praxis kein Abflußfaktor bekannt ist, einen solchen Faktor feststellen.

6. Die Angleichung an die stetigen Formeln

Bei nicht-stetigen Strömungen ist es zweckmäßig, die Abflußfaktoren aus Trockenwetterabläufen und einem maximal zulässigen Grundwasserstand zu definieren. Im ersten kurzen Zeitabschnitt wird der nicht-stetige Abfluß gleich dem stetigen Abfluß

sein, wo die Regendichte gleich dem Abfluß ist. Höhere Regen- und Abflußintensitäten werden durch die Annahme ausgeschlossen, daß hier der Wasserspiegel einen Höchstwert besitzt.

Als Abflußfaktor definieren wir den Abfluß ohne Regen am ersten Tag des Trockenwetters mit:

$S_z = 0$ und $t = 1$ Dann gilt:

$$\begin{aligned} R = \frac{\alpha}{2\beta} \quad R + Z = m + \frac{\alpha}{\beta} \quad R - Z = m \quad 1 + \frac{Z_h}{R} = 2 \left(1 + \frac{\beta h}{\alpha} \right) \\ R + Z_0 = m_0 + \frac{\alpha}{\beta} \quad R - Z_0 = m_0 \quad 1 - \frac{Z_h}{R} = -2 \frac{\beta h}{\alpha} \end{aligned}$$

Setzt man weiter $\frac{m}{m_0} = P$ dann gilt:

$$\frac{R + Z}{R + Z_0} = \frac{P + \frac{\alpha}{m_0\beta}}{1 + \frac{\alpha}{m_0\beta}} \quad \frac{R - Z}{R - Z_0} = P$$

Für die Formel [6] kann jetzt geschrieben werden:

$$e^{\frac{\beta}{\gamma}} = \left(\frac{P + \frac{\alpha}{m_0\beta}}{1 + \frac{\alpha}{m_0\beta}} \right)^{1 + \frac{\beta h}{\alpha}} \cdot \frac{\beta h}{\alpha} \quad [7]$$

Den Wert von $\frac{\alpha}{m_0\beta}$ kann man, wenn k_u ungefähr k_0 ist, wie folgt schätzen:

$$\frac{\alpha}{m_0\beta} = \frac{8 k_u D}{L^2} \times \frac{L^3}{4 k_0} \times \frac{1}{m_0} = \frac{2D}{m_0}$$

Der Wert von D beträgt einige Meter, der von m_0 einige Dezimeter und der $\frac{\alpha}{m_0\beta}$ liegt in der Größenordnung von 10. Weiter kann man als Dränkriterium P gleich 0,9 wählen. Das besagt, daß nach dem ersten trockenen Tage $m = 0,9 m_0$ ist. Ist $m = 50$ cm, so bedeutet es, daß der Wasserstand um 5 cm absinkt und daß bei einem Wert von $\mu = 10\%$ ein Abfluß von 5 mm stattgefunden hat.

P ist also ungefähr gleich 1. Der Wert des Teils der Formel [7], der in Klammern steht, kann also gleich 1 gesetzt werden. (Nur für Böden, bei denen m_0 groß, D , $\frac{k_u}{k_0}$ und P aber klein sind, kann der Wert des eingeklammerten Teils zu sehr von 1 abweichen, so daß mit den wirklichen Werten zu rechnen ist.)

Daher schreiben wir jetzt anstatt der Formel [7]:

$$\begin{aligned} e^{\frac{\beta}{\gamma}} &= P \frac{\beta h}{\alpha} \\ \frac{1}{\gamma} &= \frac{h}{\alpha} \ln P \end{aligned}$$

oder mit

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{8 k_u D}{L^2} \\ \frac{8 k_u D}{L^2} &= \gamma h \ln P \end{aligned}$$

Ersetzen wir $8 k_u D$ durch c als hydrologische Konstante für ein bestimmtes Profil und γh durch μ_d als Speichervermögen bei einer Grundwassertiefe, die gleich dem Dränniveau ist, so erhalten wir:

$$\mu_d L^2 = \frac{-c}{\ln P} \quad [8]$$

Wenn noch L^2 aus Formel [4] hier substituiert wird, so können wir schließlich schreiben:

$$\frac{s}{\mu_d} = - \left(\frac{8 k_u D m + 4 k_o m^2}{c} \right) \ln P \quad [9]$$

Wenn alle in Klammern stehenden Werte gleich bleiben und wenn man auch für P — das Kriterium für die Geschwindigkeit des Absinkens des Grundwasserstandes — den Wert konstant beibehält, dann wird den Unterschieden des Speicherungsvermögens Rechnung getragen, wenn man den Abflußfaktor für unterschiedlichen Luftgehalt wie folgt reduziert:

$$\frac{s_1}{\mu_1} = \frac{s_2}{\mu_2} \quad [10]$$

Bei einem Grundwasserstand, der sich in gleicher Höhe wie das Dränniveau befindet, gehört zu einem Boden mit dem doppelten Speicherungsvermögen nur ein halb so großer Abflußfaktor.

7. Die speicherungsabhängige Drängleichung

Die allgemeine Fassung der Hooghoudtformel, die das Speicherungsvermögen berücksichtigt, kann jetzt ergänzt werden:

$$L^2 = \frac{8 k_u D}{\frac{\mu}{\mu_d} s} m + \frac{4 k_o}{\frac{\mu}{\mu_d} s} m^2 \quad [11]$$

In dieser Formel ist $\bar{\mu}$ das Speicherungsvermögen, für das man die erwünschte Höhe des s -Wertes bei dem jeweils vorherrschenden Klima des Drängebietes genau bestimmt hat. Mit Formel [6] ist dies mit Hilfe der Regendaten aus der Vergangenheit möglich, wenn man zum Beispiel in einem Dränversuchsfeld die Werte α , β , γ und h bestimmt hat. Der im Versuchsfeld gefundene s -Wert kann jetzt für jedes Projekt benutzt werden, wenn nur k_n , k_o , D und μ_d bekannt sind. Diese Bestimmungen sind üblich bei Vorversuchen für Dränungen; es kommt hier nur die Bestimmung von μ_d hinzu. Man kann μ_d entweder aus hydrologischen Beobachtungen gewinnen oder aber aus dem Luftgehalt der Wurzelzone bei Grundwassertiefen, die gleich dem Dränniveau sind.

Unter den Bedingungen, die in den Niederlanden vorherrschen, beträgt das Speicherungsvermögen, das sich aus der Bestimmung des Luftgehaltes ergibt, für Böden aus marinen Sedimenten mit mittlerem Tongehalt 20 %. Bei Sandböden konnte häufig ein Luftgehalt von 40 % ermittelt werden. Wenn in Tonböden mit einem Abflußfaktor von 7 mm/Tag gute Erfahrungen gemacht wurden, dann könnte man für Sandböden, für die, da hier eine Dränung weniger üblich ist, keine so sicheren Erfahrungen vorliegen, den Abflußfaktor auf 3,5 mm/Tag festlegen. Wenn man den Einfluß von μ_d nicht berücksichtigen würde, entstünden um 40 % zu hohe Kosten für die Dränung.

Nimmt man in die Hooghoudt-Gleichung μ_d und $\bar{\mu}$ mit auf, dann schaltet man einen Ungenauigkeitseinfluß aus. Unter gleichen Klimabedingungen kann man durch die größere Genauigkeit eine wesentliche Kosteneinsparung erreichen. Die Hooghoudtformel besitzt mit diesem Zusatz einen breiteren Gültigkeitsbereich.

8. Zusammenfassung

In Formeln für stetige Grundwasserströmungen ist das Speicherungsvermögen des Bodens nicht ausdrücklich angegeben. Eine stetige Strömung verändert die Grundwassertiefe nicht; deshalb ist das Speicherungsvermögen in diesem Zusammenhang belanglos.

Die Dränabstandsformeln werden jedoch als nicht-stetige Funktionen verwendet, in denen die Veränderung der Strömung mit der Beurteilung des Dränabflusses in Zusammenhang gebracht werden. In einem Boden mit einem hohen Prozentsatz an luftführendem Porenraum läßt der gleiche Regenschauer den Grundwasserspiegel weniger ansteigen als in einem Boden mit einem geringen luftführenden Porenraum, der deshalb enger gedrängt werden muß.

Die Formeln für nicht-stetige Strömungen zeigen, daß der Dränabstand sich umgekehrt proportional zur Quadratwurzel des luftführenden Porenraumes verändert. Dies gilt auch dann, wenn eine quasi-stetige Dränformel wie [6] von HOOGHOUTD's stetiger Formel abgeleitet wird. Nach Vornahme einiger Vereinfachungen kann demonstriert werden, daß die Beziehung in Formel [10] in dem Sinne gilt, daß in einem Sonderfall das Verhältnis zwischen dem Maß des tatsächlichen Abflusses und dem tatsächlichen Prozentsatz an luftführendem Porenraum auch dem Verhältnis zwischen dem durchschnittlichen Abflußmaß und dem durchschnittlichen Prozentsatz an luftführendem Porenraum entspricht. Diese Durchschnittswerte können als empirische Werte gebraucht werden; es können aber auch spezielle Werte aus Dränversuchen benutzt werden.

Wenn das Feuchtespeicherungsvermögen oder der luftführende Porenraum in HOOGHOUTD's Dränabstandsformel wie in Formel [11] eingeführt werden, dann wird die Veränderung der Bodeneigenschaften, die zusammen mit dem Klima das Abflußmaß bestimmen, ausdrücklich in Rechnung gestellt. Damit wird eine genauere Übertragung von Ergebnissen praktischer Erfahrung oder von Dränversuchen auf spezielle Probleme ermöglicht.

Summary: How does moisture storage capacity influence drain spacing

In formulae concerning steady-state groundwater flow, the storage capacity of the soil does not enter into the expressing formula. A steady-state flow does not change groundwater depth, and storage capacity is therefore irrelevant.

The drain spacing formulae, however, are used as non-steady state functions, in which the changes in flow are brought together in the criterion for drain-discharge. In a soil with a high percentage of drainable pore space, the same rain shower will give a smaller rise of the water table than in a soil with a low drainable pore space, which must therefore be narrower drained.

The formulae for non-steady state flow show, that the drain spacing varies inversely with the square root of the drainable pore space. This also holds true, if a quasi-steady state formula as [6] is derived from HOOGHOUTD's steady-state formula. After some simplifications, the relation in formula [10] may be shown to hold, expressing that for a special case the ratio between the actual discharge criterion and the actual percentage of drainable pore space is equal to the ratio of the average discharge criterion and the average percentage of drainable pore space. These average

values may be the empirical values which are in use. Special data of a drainage experiment may also be used, however.

If the moisture storage capacity or drainable pore space is inserted in the drain spacing formula of HOOGHOUT, as is done in formula [11], the variation in soil properties, which together with the climate determines the discharge criterion, is allowed for in an explicit way. This makes a more accurate transfer of results from practical experience or drainage experiments to special problems possible.

Literaturverzeichnis

1. BOUSSINESQ, J., 1877: Note sur le mouvement des eaux souterraines. Essai sur la théorie des eaux courantes. — Mémoires, l'Académie des Sciences, vol. 23, pp. 242—281.
2. DUMM, L. D., 1954: Drain spacing formula. — Agric. Engineering, vol. 35, pp. 726—730.

Anschritt des Verfassers: ir. W. C. VISSER im Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding in Wageningen, Postbus 35, Prinses Marijkeweg 17. Nederland.