

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Delov, K.; Diankov, Z.

Einfluß des Luftanteils auf die Hysteresisparameter bei der Bodenwassersättigung

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104084>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Delov, K.; Diankov, Z. (1998): Einfluß des Luftanteils auf die Hysteresisparameter bei der Bodenwassersättigung. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): 100 Jahre Hubert-Engels-Laboratorium - Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung-Perspektiven. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 13. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 391-400.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Einfluß des Luftanteiles auf die Hysterisisparameter bei der Bodenwassersättigung

Zusammenfassung

Die Implementierung der Hysterisis bei der Betrachtung der Bodenwasserdynamik nach dem Modell von *van Genuchten - Mualem* wird durch die Festlegung entsprechender Werte mancher Parameter in Abhängigkeit von der Richtung des Vorganges (Sorptions oder Desorption) erreicht. Trotz seiner unbestreitbaren Vorteile beschreibt dieses Modell (mit der Berücksichtigung der Hysterisis) die Beziehungen bei Vollsättigung nur näherungsweise. Der Grund dafür liegt in der Vernachlässigung der Wirkung der eingeschlossenen Luftmenge bei der Sorption. Diese Vernachlässigung führt zu gewissen Ungenauigkeiten bei der Betrachtung der Be- und Entwässerungsvorgänge im Boden.

Der gegenständliche Artikel hat zum Ziel, die Rolle des Luftgehaltes auf die Hysterisisparameter zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden Versuche mit einer Bodensäule mit einem Durchmesser von 19 cm und einer Höhe von 216 cm durchgeführt. In sechs verschiedenen Punkten wurden Tensiometer eingebaut, die das Druckpotential in der Säule maßen. Der Wasseranteil wurde durch die Radioisotopenmethode bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, daß bei der Sorption nie eine volle Sättigung zu erreichen ist. Die Sättigung in der Zone des positiven hydraulischen Druckes tritt nicht sofort ein. Das zeigt, daß die eingeschlossene Luft weiter unter der Wirkung des hydraulischen Druckes und der allmählichen Diffusion hinausgeführt wird. Diese Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit, im mathematischen Modell das Verhalten der Luft während des Sättigungsvorganges und die Verminderung ihres Anteils bei langzeitigem positiven Druck zu berücksichtigen.

Die Versuchsergebnisse sind graphisch dargestellt.

1. Einleitung

Die wasserungesättigte Zone im Boden formiert sich im Raum von der Bodenoberfläche bis zum Bereich der vollen Wassersättigung (Grundwasserspiegel). In dieser Zone verlaufen eine Reihe hydrologischer Vorgänge - Infiltration, Verdunstung, Grundwasserneubildung, Wasserentnahme der Pflanzenwurzeln, Salztransport u.s.w. Die Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten der Bodenwasserbewegung hat theoretische und praktische Bedeutung, sowohl für eine Erklärung der Vorgänge als auch bei der Suche von Methoden und Mitteln

für eine Regelung des Bodenwasserregimes in dieser Zone durch eine Steuerung des Grundwasserspiegels.

Die mathematische Modellierung der Wasserbewegung in der Aerationzone beruht auf dem von Richards [6] durch folgende Differentialgleichung ausgedrückten Modell (hier in eindimensionaler Form):

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k[\theta(\psi)] \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + et \quad (1)$$

wo ψ - Wasserdruck (Wasserspannung) [m], veränderlich mit der Zeit; t - Zeit [s]; z - vertikale Koordinate [m], nach oben gerichtet; $k[\theta(\psi)]$ - hydraulische Leitfähigkeit [m/s]; ihre Werte ändern sich in Abhängigkeit von der Saugspannung ψ ; $C \equiv \partial \theta / \partial \psi$ - Kapazität der Wassersättigung (entspricht mathematisch gesehen der Neigung der Kurve $\theta - \psi$); θ - Wasseranteil [m³/m³]; et - Quellen- oder Senkenterm; dient der Simulation der Evapotranspiration oder der Wasserentnahme durch die Pflanzenwurzeln, sind.

Die Verwendung der Abhängigkeit (1) führt zu einer Verallgemeinerung der Beschreibung der Wasserbewegung sowohl in der ungesättigten als auch in der wassergesättigten Zone. Im Fall der vollen Wassersättigung $\theta = \theta_{\max}$ ($C(\theta) = 0$) entspricht die hydraulische Leitfähigkeit k dem konstanten Wert des Durchlässigkeitsbeiwertes k_0 und die Gleichung (1) wird zu:

$$\left| k_0 \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right| = \left| k_0 \frac{\partial h}{\partial z} \right| = const. \quad (2)$$

In dieser Form entspricht die Gleichung dem Gesetz von Darcy. Hierin bezeichnet $h = -|\psi| + z$ das hydraulische Potential und die "Saugspannung" bekommt einen negativen Wert, d. h. es liegt positives Druckpotential in der gesättigten Zone vor.

Bei der Verwendung der Gleichung (1) zur Lösung praktischer Aufgaben ist die Kenntnis der wichtigen Abhängigkeiten der hydraulischen Leitfähigkeit und des Wasseranteiles von der Wasserspannung $k(\psi)$ und $\theta(\psi)$ von grundlegender Bedeutung. Die gegenwärtigen Verfahren zur Entwicklung und Lösung vieler zusammengestellter mathematischer Modelle übersteigen die Fähigkeiten, die an diesen Modellen beteiligten Parameterfunktionen mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, meistens bei weitem [5].

Mit der Bestimmung der Zusammenhänge $\theta(\psi)$ und $k[\theta(\psi)]$ beweist man ein wesentliches Faktum, das in einer Ungleichartigkeit dieser Funktionen für den Prozeß der Steigerung der θ -Werte (Sorptions) und für den Prozeß der Verminderung dieser Werte (Desorption) besteht [2, 3, 4, 5]. Diese bewiesene Hysterisis beruht einerseits auf der Bodenstruktur und andererseits auf der

eingeschlossenen Luft in den Bodenporen, die beim Be- und Entwässerungsvorgang verschiedenes Verhalten hat. Einfluß auf die Hysterese haben auch das Quellen oder das Schrumpfen des Bodens. Die Nichtberücksichtigung dieser Umstände kann bei einer Prognose der Vorgänge in der Aerationzone zu wesentlichen Abweichungen von der Wirklichkeit führen [1, 2, 5]. Verschiedene Untersuchungen [2, 4, 8] zeigten außerdem, daß bei einer Steigerung der Grundwasseroberfläche bis zu einer bestimmten Höhe (z) die volle Wassersättigung (100 %) der Bodenporen nicht sofort erreicht wird (bei $\psi = 0$ bleibt θ kleiner als θ_{\max}). Das Vorhandensein von eingeschlossener Luft bewirkt nicht nur eine Veränderung (Verminderung) des k -Wertes in der wassergesättigten Zone, sondern auch der Bodenwassercharakteristik $\theta - \psi$. Der Luftgehalt wird von verschiedenen Autoren diskutiert [2, 4, 8]. Man kann im allgemeinen behaupten, daß die eingeschlossene Luft die Versuchskurven $\theta - \psi$ in Richtung des niedrigeren Wassergehaltes verschiebt, wenn ψ gegen Null geht. Sehr oft führen die Versuche zur Bestimmung der Parameterfunktionen an ein- und derselben Bodenprobe zu verschiedenen Resultaten. Das kann mit unterschiedlichen Wasseranteilen am Anfang der Versuche und ihren Auswirkungen auf die Zusammenhänge bzw. Verbindungen der (teilweise) luftgefüllten Poren erklärt werden. Sogar bei gleichem Bodenwassergehalt können sich die Luftbläschen je nach der Geschwindigkeit der Wassersättigung des einzelnen Versuches auf verschiedene Weise vereinigen, was die Art und die Geschwindigkeit ihrer Befreiung bzw. ihres Entweichens beeinflusst. Unter der Einwirkung des steigenden Grundwasserspiegels werden die verbliebenen Luftblasen komprimiert oder teilweise im Wasser gelöst [8]. Dieses Verhalten spielt bei der quantitativen Bestimmung der Parameterfunktionen eine maßgebliche Rolle. Die Bestrebung nach einer genaueren Erfassung der Strömungsvorgänge in den mathematischen Modellen erfordert weitere Forschungen über den Einfluß des Luftgehaltes beim Übergang vom wasserungesättigten zum wassergesättigten Zustand und umgekehrt.

Die folgende Darstellung gibt manche Ergebnisse über die hysteresen Eigenschaften einer konkreten Bodenart in Bulgarien unter dem Aspekt ihrer Verwendung in einem komplexen mathematischen Modell für die Grundwasserströmung wider, wobei sowohl die Aeration- als auch die Grundwasserzone betrachtet wird.

2. Versuchsmethodik

Im weiteren werden Labor-Experimente mit einer bestimmten Bodenart betrachtet, die in der bulgarischen Donauniederung "Karaboas" vorkommt. Die Umstände in dieser Niederung gestatten eine Regelung der Grundwasseroberfläche durch Dränssysteme, die mittels Sperranlagen in den Entwässerungs-

kanälen vorgenommen wird. Mit dieser Technik erzielt man eine ausreichende kapillare Nachlieferung in die Wurzelzone und die Notwendigkeit oberirdischer Bewässerung entfällt.

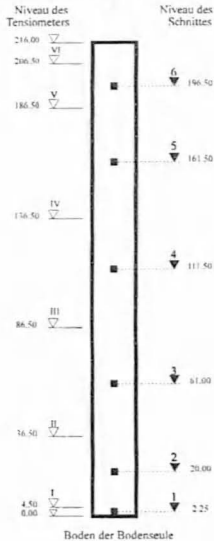


Abb. 1

Bodensäule einem kollimierten Strahl des Radio-Isotops Cs-137 ausgesetzt wurde, und aus einem Sensor. Die Daten der durch die Bodensäule hindurchgetretenen Strahlungsintensität des Cs-137 wurden vom Sensor auf ein Schreibgerät übertragen. Der Blei-Container und der Sensor wurden auf eine Hebebühne gestellt, so daß durch das Anheben oder Absenken derselben

Zum Zweck der Untersuchung wurde der Boden in ein Plexiglasrohr mit 19 cm Durchmesser und 216 cm Höhe eingebaut. Im Laufe des Experimentes wurden am Boden des Zylinders verschiedene Standrohrspiegelhöhen eingestellt. Die sich dadurch im Bereich der gesamten Bodensäule ergebenden Vorgänge wurden in den auftretenden ungesättigten und gesättigten Zonen näher studiert (Abb. 1).

Die Messung der ein- oder ausfließenden Wassermenge gab die Möglichkeit, die Wasserbilanz in der ganzen Bodensäule zu berechnen. Zur Vermeidung der Verdunstung wurde das Plexiglasrohr oben abgedeckt. Der Wasserdruck ($p/(\rho \cdot g)$), resp. die Saugspannung ψ wurde durch Piezo-/Tensiometer gemessen, die in 6 Punkten entlang der Bodensäule eingebaut wurden. Zur Bestimmung des Wasseranteiles (θ) wurde die Radioisotopenmethode verwendet. Die entsprechende Einrichtung bestand aus einem Blei-Container, in dem die

entlang der Bodensäule in einer Zeitperiode (~15 min) die Wassergehaltsverteilung über die Tiefe erfaßt werden konnte. In einer Zeitdauer von zwei Jahren konnten verschiedene Varianten von Bodenwasserregimen beobachtet werden. Nach der Bearbeitung der erhaltenen Daten zur Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen den Größen Saugspannung (ψ) und Wasseranteil (θ) konnten deutlich zwei Arten von Abhängigkeiten (Abb. 2) festgestellt werden, wobei die erste Art bei Erhöhung des Wasseranteiles (Linie 2) und die zweite bei seiner Verminderung (Linie 1)

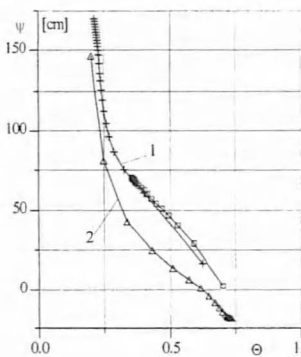


Abb. 2

auftrat. Die beiden Arten von Abhängigkeiten beweisen die Existenz des hysterese Verhalten. Für einen Vergleich der Versuchsergebnisse zwischen den einzelnen Schnitten wurde der Wassergehalt in dimensionsloser Form als effektive Sättigung Θ :

$$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (3)$$

dargestellt, wobei θ der aktuelle Wasseranteil, $\theta_s = \theta_{\max}$ der maximale Wasseranteil entsprechend der vollen Porosität und θ_r der Restwasseranteil bei einem Unterdruck von 15 bar bedeuten. Aus den Versuchen wurde einen Wert von 6,26 % für θ_r ermittelt.

3. Ergebnisse

Die Forschungsergebnisse führen zu Kurvenfamilien $\theta - \psi$ für sechs horizontale Säulenschnitte, deren Lage sich jeweils genau zwischen zwei übereinander installierten Tensiometern befindet. Die Vorgänge der Bewässerung und der Entwässerung wurden für sieben sprunghafte (augenblickliche) Veränderungen des Druckes am Boden der Bodensäule betrachtet. Diese Veränderungen wurden in folgender Reihenfolge ausgeführt: 1. 216→5 cm; 2. 5→124 cm; 3. 124→216 cm; 4. 216→124 cm; 5. 124→216 cm; 6. 216→5 cm und 7. 5→216 cm (die erste Zahl entspricht der Versuchsnummer, die zweite dem Druck vor und die dritte dem Druck nach der Änderung auf das neue Niveau). Demzufolge lag in vier der sieben Versuche eine Bewässerung und in drei eine Entwässerung der Bodensäule vor. Die Beobachtungsdauer des Vorganges zwischen zwei Druckveränderungen war unterschiedlich; sie betrug im kürzesten Fall 28 Tage (beim Versuch 2. 5→124 cm) und im längsten 167 Tage (beim Versuch 4. 216→124 cm). Die erhaltenen Kurven können sowohl einzeln (für die verschiedenen Schnitte) als auch zusammen behandelt werden. Die Abbildungen 3a und 4a stellen die Beziehungen zwischen dem Wassergehalt und der Wasserspannung und zwischen dem Wassergehalt und dem Zeitpunkt während der Versuche im Schnitt 6 dar, die Abbildungen 3b und 4b jene im Schnitt 5. Leider sind die durch die Säulenhöhe begrenzten Saugspannungsveränderungen ziemlich klein ($\psi_{\max} \approx 210 \text{ cm}$). Im Kommentar zu den Ergebnissen sind die Daten des I. und des II. Schnittes nicht erwähnt, weil der Boden auf dem Niveau

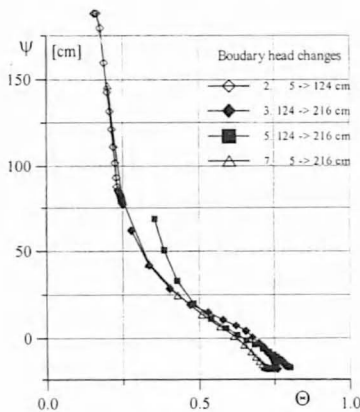


Abb. 3a

Die erhaltenen Kurven können sowohl einzeln (für die verschiedenen Schnitte) als auch zusammen behandelt werden. Die Abbildungen 3a und 4a stellen die Beziehungen zwischen dem Wassergehalt und der Wasserspannung und zwischen dem Wassergehalt und dem Zeitpunkt während der Versuche im Schnitt 6 dar, die Abbildungen 3b und 4b jene im Schnitt 5. Leider sind die durch die Säulenhöhe begrenzten Saugspannungsveränderungen ziemlich klein ($\psi_{\max} \approx 210 \text{ cm}$). Im Kommentar zu den Ergebnissen sind die Daten des I. und des II. Schnittes nicht erwähnt, weil der Boden auf dem Niveau

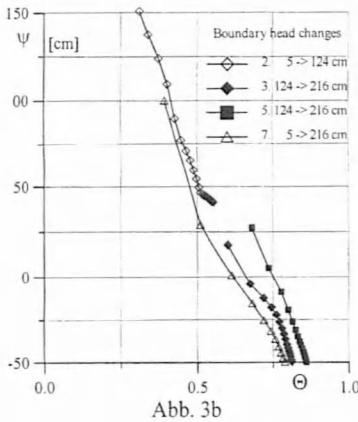


Abb. 3b

dieser Schnitte während der gesamten Beobachtungsdauer "völlig" gesättigt war und nur ganz schwache Veränderungen der anwesenden Luft sichtbar waren.

Die Verarbeitung der experimentellen Daten zeigt einige interessante Tatsachen auf, die mit den Be- und Entwässerungsvorgängen verbunden sind und denen gewöhnlich wenig Bedeutung beigemessen wird. Unsere Forschungen belegen, daß diese Vorgänge oft einen wesentlichen Einfluß auf das gesamte Bild der Bodenwasserbewegung ausüben. Eine interessante und auch wesentliche

Besonderheit ist dem Verlauf der Bewässerungskurven im Bereich mit positiven Druckpotentialen ($\psi \leq 0$) zu entnehmen. Die Kurven 3, 5 und 7 in den Abbildungen 3a und 3b zeigen deutlich, daß sich der Wassergehalt in diesem Fall weiter erhöht. Für die Schnitte in der ungesättigten Zone kann diese Erhöhung mit dem kapillaren Sättigungsvorgang erklärt werden. In der gesättigten Zone muß die Erklärung in der Veränderung des Luftanteiles gesucht werden. Das vorhandene Luftvolumen ändert sich infolge des positiven Druckes und durch die Vorgänge der Lösung der Luft und des Entweichens der Luftbläschen aus dem Boden bzw. des Aufsteigens im Boden ziemlich langsam. Zum Beispiel erhöht sich die effektive Sättigung (für den Schnitt 6, siehe Abb. 1) bei den Kurven 3, 5 und 7 aus den Abb. 3a und 4a um 12 - 13 Prozent (von 0.62 auf 0.74 für Kurve 7; von 0.63 auf 0.76 für Kurve 5 und von 0.68 auf 0.81 für Kurve 3) für den ganzen Zeitabschnitt mit positivem Druckpotential. Besonders groß ist diese Änderung in den ersten 5 bis 10 Tagen nach dem

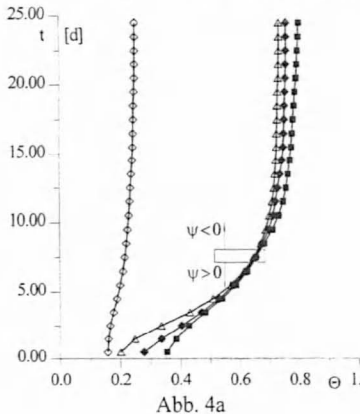


Abb. 4a

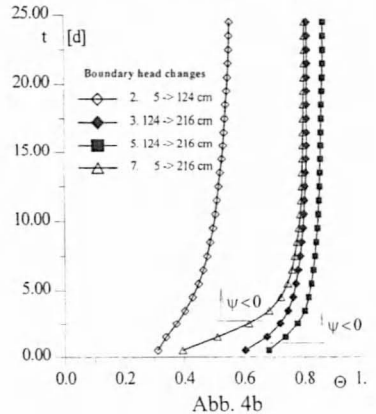


Abb. 4b

Vorzeichenwechsel von ψ von + auf $-$. Für dieselben Kurven in den Abb. 3b und 4b (Schnitt 5) beträgt die Erhöhung bis zu 16 %. Aus den Abbildungen 3a und 3b ist erkennbar, daß die effektive Sättigung in den ersten 8 - 10 Tagen nach dem Unterschreiten des Wertes Null für die Saugspannung stärker zunimmt, weil der (positive) Druck in diesem Zeitabschnitt noch relativ steil ansteigt.

Eine andere Tatsache ist mit der Lage jener Kurven verbunden, die aufeinanderfolgende Be- und Entwässerungsvorgänge ergaben. In den Abbildungen 5a und 5b ist der Effekt der Kurvenverschiebung von der

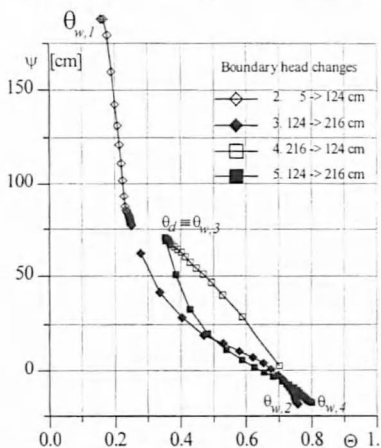


Abb. 5a

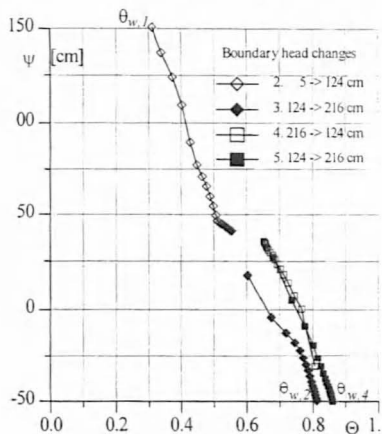


Abb. 5b

Bewässerungskurve 5. 124→216 cm

gegenüber der Kurve der früheren Bewässerung 3. 124→216 cm gut sichtbar. Der frühere Bewässerungsvorgang begann bei einer ziemlich niedrigen effektiven Sättigung des Bodens $\Theta_{w,1}$ und erreichte am Ende den Wert $\Theta_{w,2}$. Bei der anschließenden Entwässerung erhielt die effektive Sättigung des Schnittes einen anderen Wert Θ_d ($\psi \approx 70$ cm), und $\Theta_{w,2} > \Theta_d > \Theta_{w,1}$. Demzufolge begann die nächste Bewässerung bei der effektiven Sättigung von $\Theta_{w,3} = \Theta_d$ und endete mit dem Wert $\Theta_{w,4} > \Theta_{w,2}$. Die Ursache dieses Effektes liegt wieder im Verhalten der eingeschlossenen Luft. Nach der ersten Bewässerung blieb im Boden eine gewisse Menge eingeschlossener Luft zurück, weil der Boden am Anfang etwas trockener war. So konnte das eintretende Wasser schnell die größeren Kapillaren auffüllen, und die feinere bleiben isoliert, voll mit Luft, die keinen Weg zum Verlassen des Bodens findet. Bei der Entwässerung werden einige dieser Wege wieder frei und die zuvor eingeschlossene Luft findet nun die Möglichkeit zur Entweichung aus

den feineren Poren vor, die infolgedessen mit Wasser aufgefüllt werden, wenn auch die allgemeine Tendenz in Richtung der Abnahme des Wassergehaltes geht. Bei der erneuten Bewässerung ist das luftgefüllte Porenvolumen nicht mehr so groß und es kann ein größerer Bodenwassergehalt erreichen werden. Dieses Ergebnis bestätigt die Schlußfolgerungen von *Stonestrom* und *Rubin* [8] für die Existenz der Hysteresis auch im Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Luftanteil im Boden. Wenn von den verschiedenen Versuchen alle erhaltenen Kurven für die untersuchten Schichten in einem gemeinsamen Koordinatensystem eingetragen werden, kann man einen Überblick über einen großen Teil des Variationsgebietes des Wassergehaltes im Zusammenhang mit dem Druck für den konkreten Bodentyp (Wasserspannung-Wasseranteilsbeziehung) gewinnen. In der Abb. 6 sind sämtliche Verteilungen $\theta(\psi)$, die von den durchgeführten Experimenten in den Schnitten 1 bis 6 der Bodensäule erhalten wurden, eingezeichnet. Es ist klar, daß die vorhandenen Kurven nur einen Teil des Gesamtbereiches der Hysteresis bestreichen, der nur durch eine experimentelle Variation des Wassergehaltes über den ganzen Bereich der effektiven Sättigung von der Vollsättigung θ_{\max} bis zum Restwassergehalt θ_r zu erhalten wäre. Der volle Umfang wird durch die sogenannten Hauptkurven (Hüllkurven) $\theta_d^m(\psi)$ und $\theta_w^m(\psi)$ charakterisiert, die hier theoretisch durch die Verwendung des parametrischen Zusammenhanges nach *van Genuchten* (nur für positive Werte des Druckes) ermittelt wurden und in der Abbildung fett dargestellt sind. Es ist die allgemeine Tendenz in der Veränderung der Kurven zu beachten - für höher gelegene Schnitte sind diese Kurven nach links verschoben und haben eine steilere Form; d. h. die Kurven dieser Schnitte haben einen niedrigeren Höchstwert der effektiven Sättigung als jene, die von den tiefer gelegenen erhalten wurden. Eine Erklärung dafür kann in den Umständen gefunden werden, unter denen die Be- und Entwässerungsvorgänge ablaufen. Infolge der verschiedenen Dauer des Sättigungsvorganges in den verschiedenen Schnitten entlang der Säule ist der Luftanteil in den höheren Schichten größerer. Je größer der erreichte Endwert der effektiven Sättigung ist, desto näher liegt die betrachtete Desorptionskurve bei der Hauptdesorptionskurve. Umgekehrt liegt die Sorptionskurve umso näher bei der Hauptsorptionskurve, je kleiner die effektive Sättigung am Beginn war. Diese Tatsachen können am besten mit dem unterschiedlichen Luftanteil, der sich in den verschiedenen Schichten in jedem Augenblick der Vorgangsentwicklung befindet, erklärt werden. Mit der Zunahme der Saugspannung $\psi \rightarrow \infty$ ist eine Tendenz der Kurvenvereinigung $\theta_d^m(\psi)$ mit $\theta_w^m(\psi)$ zu beobachten. Beim umgekehrten Vorgang ($\psi \rightarrow 0$) fehlt eine solche Vereinigung. Die Tendenz für ein weiteres Ansteigen des Wassergehaltes kann für positiven Druck $-\psi = (p/\gamma) > 0$, der längere Zeit im Boden

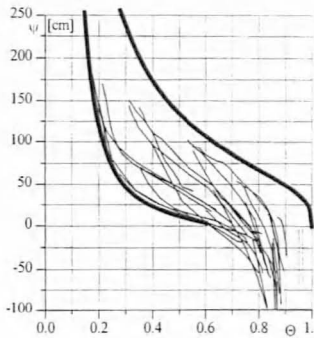


Abb. 6

auftritt, beobachtet werden. In diesem Fall hängt der Vorgang des Entweichens der Luft vom Wassergehalt (vom Sättigungsgrad) zu Beginn der Bewässerung, vor dem Anwachsen des hydrostatischen Niveaus bis und über dem beobachteten Schnitt und von der Geschwindigkeit dieses Anwachsens ab. Er verläuft jedes Mal auf unterschiedliche Art und Weise, sogar bei ein- und derselben Anfangs-sättigung.

4. Schlußfolgerungen

Zur Bestimmung der Kurvenfamilien $\Theta(\psi)$ für verschiedene Fälle der Be- und Entwässerung wurden Laborversuche mit einer Bodensäule durchgeführt, die mit einem konkreten Boden aus dem Gebiet "Karaboas" in der Donauniederung befüllt wurde. Die Experimente zeigen deutlich die Existenz des Hysteresiseffekts in der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung. Die erhaltenen Ergebnisse demonstrieren die bedeutende Wirkung des eingeschlossenen Luftanteiles auf diesen funktionalen Zusammenhang, der beim Bewässerungsvorgang zu einer bis zu 16 % geringeren effektiven Sättigung als beim Entwässerungsvorgang bei der Saugspannung $\psi = 0$ führt. Daraus ist der Schluß zu ziehen, daß die Hysteresiskurven ab dem Nulldruck nicht ident sind, sondern auch bei positiven Werten des Druckpotentials einen unterschiedlichen Verlauf aufweisen. Die Änderung des Wassergehaltes erfolgt jedoch sehr langsam infolge der Wirkung des Druckes und besonders durch die Lösung der eingeschlossenen Luft in der wäßrigen Phase und ihr Entweichen in Bereichen mit freier Atmosphäre. Das kann eventuell zu einem vollständigen Zusammenschließen (closed form) der Hysteresiskurven nach längerer Zeit führen, wenn zwischenzeitlich kein umgekehrter Vorgang der Änderung des Wassergehaltes einsetzt. Selbst wenn dieser Zusammenschluß vorliegt, bedeutet das nicht, daß der Boden eine volle Sättigung erreicht hat. Die effektive Sättigung beträgt etwa 95 - 96 % (das kann an Hand der ersten zwei Schnitte festgestellt werden, die sich während der ganzen Dauer der Experimente immer unter positivem Druck befanden). Diese Besonderheiten zeigen, daß man vorsichtig sein muß, wenn man den von *van Genuchten* vorgeschlagenen parametrischen Zusammenhang $\Theta(\psi)$ verwendet. Dieser Zusammenhang kann nicht die Wassergehaltsänderungen bei positiven Drücken widerspiegeln, das heißt, daß er für einen gewissen Bereich realer Vorgänge nicht verwendbar ist. Wenn die von *van Genuchten* aufgestellte Beziehung [7] in den mathematischen

Modellen trotzdem verwendet wird, folgen daraus einige Annahmen und Vereinfachungen, die auf die Genauigkeit der Simulation maßgeblichen Einfluß haben. Einige Autoren [2, 4] haben Modifikationen des Modells von *van Genuchten* vorgeschlagen, die die Lufteinschlüsse bei der Bewässerung des Bodens widerspiegeln. Leider beschreiben auch diese modifizierten Modelle die realen Vorgänge bei positiven Drücken nicht. Es erweist sich daher als notwendig, weitere Experimente zur Präzisierung des Zusammenhanges durchzuführen. Sie sind aber zeitraubend und verlangen die Verwendung einer speziellen Apparatur. In einer großen Reihe von Fällen, besonders bei der Berechnung praktischer Aufgaben, ist eine statistische Schätzung der Wassergehaltsänderung θ für verschiedene Böden ausreichend. Eine solche Schätzung ist bei einer fachgemäßen Inkludierung in das mathematische Modell vom Gesichtspunkt des Ingenieurs für gewöhnlich ausreichend genau für die Bestimmung der Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone. Das heißt, wenn es keine guten Daten für die Parameterfunktionen $k(\psi)$ und $\theta(\psi)$ zur Verfügung gibt, muß wenigstens eine statistische Abschätzung des Hysterisiseffekts im Modell eingeschlossen werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Diankov, Z., Kr. Delov, et al.: Water Movement in the Unsaturated Zone of Soil, Project report, Institut of Water Problems (BASc), arh. No. 380/05.12.1995
- [2] Lenhard, R. J., J. C. Parker, J. J. Kaluarachchi: Comparing Simulated and Experimental Hysteretic Two-Phase Transient Fluid Flow Phenomena, Water Resources Research (WRR), vol. 27, No. 8, 1991
- [3] Luckner, L., G. Peschke, G. Schreiber: Digitale Simulation der Strömungsvorgänge in der Aerationzone, Acta Hydrophysica, Bd. XXIII, H. 4, 1978
- [4] Luckner, L., M. Th. van Genuchten, D. R. Nielsen: A Consistent Set of Parametric Models for Two-Phase Flow of Immiscible Fluids in the Subsurface, WRR, vol. 25, No. 10, 1989
- [5] Nielsen, D. R., M. Th. van Genuchten, J. W. Biggar: Water Flow and Solute Transport Processes in the Unsaturated Zone, WRR, vol. 22, No. 9, 1986
- [6] Richards L. A.: Capillary conduction of liquids in porous mediums, Physics, I, 1931
- [7] van Genuchten, M. Th.: A closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44, 1980
- [8] Stonestrom, D. A., J. Rubin: Water Content Dependence of Trapped Air in Two Soils, WRR, vol. 25, No. 9, 1989

Oberassistent Dipl.-Ing. K. Delov
 Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie - Sofia
 Bulgarien, 1421 Sofia, Hristo Smiranski Str. 1
 e-mail: delov_fhe@uacg.acad.bg

Prof. Dr.-Ing. Z. Diankov
 Institut für Wasserprobleme, BADW - Sofia
 Bulgarien, 1113 Sofia, G. Bonchev Str. Block 1
 e-mail: zdiankov@bgcict.acad.bg