

Grundwasseraufstieg in mehrschichtigen schluffigen und lehmigen Sandböden

Capillary Rise from the Groundwater Table in Silty and Loamy Multi-layered Sand Soils

U. SCHMIDHALTER und J. J. OERTLI

Sandböden, kapillarer Wasseraufstieg, Grundwasserstand, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit
Sand soils, capillary rise, groundwater table, unsaturated hydraulic conductivity

1. Einleitung

Die Kenntnis der Höhe des kapillaren Wasseraufstiegs aus dem Grundwasser ist erforderlich für die Optimierung des pflanzlichen Wasserhaushalts, die Gewährleistung eines sparsamen und effektiven Wassereinsatzes bei der Beregnung, die Durchführung meliorativer Maßnahmen, beispielsweise Dränierungs- und Bewässerungsprojekte, und für die Abschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen wie Absenkung des Grundwasserspiegels durch Grundwasserentnahme oder Flußregulierung.

Die vorliegende Arbeit wurde ausgeführt, um den Einfluß einer Absenkung des Grundwasserspiegels durch Grundwasserentnahme abzuschätzen, woraus eine Verschlechterung der Wasserversorgung landwirtschaftlicher Kulturen resultieren könnte. Für eine Beurteilung, insbesondere Nachweis und Voraussage der Auswirkungen solcher Eingriffe, sind genaue Kenntnisse über den kapillaren Grundwasseraufstieg erforderlich.

Bei den untersuchten Böden handelt es sich um schluffige und lehmige alluviale Sandböden. RENGGER et al. (1984) geben an, daß das Ertragsoptimum auf Sandböden (feinkörniger Mittelsand) bei einem Grundwasserspiegel von 0,5–0,9 m unter Geländeoberfläche erreicht wird. Die Grundwasserdynamik der untersuchten Standorte, die sich im Rhônental (Schweiz), in der Nähe von Brigerbad befinden, ist durch Hochwasserstand im Sommer und Niedrigwasserstand im Winter geprägt. Das Rhônental weist ein ausgeprägtes kontinentales Klima auf.

Basierend auf dem Darcy-Gesetz, der im Boden vorherrschenden Wasserspannung und der Kenntnis der bodenspezifischen Wasserleitfähigkeit läßt sich unter gegebenen atmosphärischen Bedingungen für jeden beliebigen Boden die kapillare Aufstiegsrate und -höhe aus dem Grundwasser bestimmen (BLOEMEN, 1980; RENGGER et al., 1984; SCHMIDHALTER und OERTLI, 1988).

Die Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanzen kann durch die Angabe der Bodenwasserspannung charakterisiert werden. Die Verfügbarkeit ist häufig in einem Wasserspannungsbereich von 200–300 cm Wassersäule (ca. 0,2–0,3 bar) optimal, und nimmt dann zunehmend ab, d.h. die Pflanzen leiden unter Wasserstreß. Oberhalb 1000 cm Wassersäule (WS) ist bereits mit deutlichen Einbußen in der Ertragsleistung zu rechnen, unterhalb von ca. 100 cm WS ist der Boden zu feucht, die Pflanzen können unter Sauerstoffmangel leiden.

2. Material und Methoden

Korngrößenverteilung und pF-Kurven von drei verschiedenen Standorten (Standortsbezeichnungen 14, 701 und 801) wurden horizontweise in vierfacher Wiederholung mit Standardmethoden bestimmt (KLUTE, 1986). Die Textur der Feinerde wurde mit der Pipettenmethode bestimmt und die Fraktionierung des Sandes durch Trockensiebung. Die Sandfraktionen wurden in Grobsand (0,5–1,0 und 1,0–2,0 mm), Mittelsand (0,25–0,5 mm), Feinsand (0,1–0,25 mm) und Staubsand (0,05–0,1 mm) unterteilt. Die Textur des Standortes 14 wurde mit der Fühlprobe bestimmt. Für die Untersuchung der pF-Kurvencharakteristik wurden aus drei resp. vier Bodenhorizonten 4 Bodenzylinder mit einem Volumen von 100 cm³ entnommen.

Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit, $K(h)$ -Beziehung, wurde an 44 Zylinderproben mit einem Volumen von je 68,5 cm³ bestimmt. Zu diesem Zweck wurden aus repräsentativen Bodenhorizonten vier Zylinderproben entnommen. Der Boden des Standortes 701 wurde in vier verschiedene Horizonte unterteilt (0–16, 16–58, 58–89 und 89–130 cm). Die untersuchten Horizonttiefen für die Standorte 801 und 14 waren 22–65, 65–85 und 85–120 cm, resp. 0–32, 32–57, 57–97 und 97–110 cm.

Die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erfolgte mit „one-step“ Druckausfluß-Experimenten mittels einer Parameterschätzungsmethode (KOOL, PARKER und VAN GENUCHTEN, 1985). Die experimentelle Prozedur beinhaltet die kontinuierliche Messung des kumulativen Wasserausflusses von einer vertikal aufgestellten, anfänglich wassergesättigten, zylindrischen Bodenprobe, an deren Unterseite sich eine gesättigt bleibende poröse Keramikplatte befindet und an deren Oberseite die pneumatische Druckhöhe in einem Schritt auf 10 m erhöht wird. Die pneumatischen Potentiale werden zur unteren Grenzbedingung übertragen und die vertikale Distanz x ist positiv nach unten gerichtet. Erforderlich ist eine Lösung der Richards-Gleichung, welche für den eindimensionalen Fall folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K(h) (\partial h / \partial x - 1)] \quad [1]$$

wobei $C = d\theta/dh$ die Wasserkapazität bezeichnet. Die Anfangs- und Grenzbedingungen lauten

$$h = h_0(x) \quad t = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad [2a]$$

$$\partial h / \partial x = 1 \quad t > 0, \quad x = 0 \quad [2b]$$

$$h = h_L - h^a \quad t > 0, \quad x = L \quad [2c]$$

wobei $x = 0$ sich an der Oberseite der Bodenprobe und $x = L$ sich an der Unterseite der Keramikplatte befindet; h_L bezeichnet die Druckhöhe an der Unterseite der Keramikplatte; $h_a = \Delta p / \rho g$, wobei Δp den pneumatischen Druck angibt, der auf die Bodenprobe angewandt wird, g die Fallbeschleunigung und ρ die Dichte des Wassers. Die Lösung von Gleichung [1] wird durch eine modifizierte Version (KOOL, PARKER und VAN GENUCHTEN, 1985) des Galerkin finiten Elementmodells von VAN GENUCHTEN erhalten. Der kumulative Ausfluß $Q(t)$ wird berechnet mit

$$Q(t) = A \int_0^t [\theta(x, 0) - \theta(x, t)] dx \quad [3]$$

wobei A die Fläche der Bodenprobe senkrecht zum Fluß darstellt.

Es wird angenommen, daß die hydraulischen Bodeneigenschaften durch das van Genuchten-Parametermodell (VAN GENUCHTEN, 1980), modifiziert durch KOOL und PARKER (1987), beschrieben werden:

Der Hauptentwässerungsast der $\theta(h)$ -Beziehung wird beschrieben durch

$$\theta = \theta_r + (\theta_s^d - \theta_r) [1 + (-\alpha^d h)^{-m}] \text{ für } h < 0 \text{ und } \theta = \theta_s^d \text{ für } h \geq 0 \quad [4]$$

und die nichthysteretische $K(\theta)$ Beziehung ist gegeben durch

$$K = K_s S_e^\gamma [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad [5]$$

wo θ_r den Restwassergehalt angibt, θ_s^d den gesättigten Wassergehalt, der einer Druckhöhe von 0 (Saugspannung = 0 cm WS) entspricht; $K_s = K_s(\theta_s^d)$ gibt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit an und $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s^d - \theta_r)$ die effektive Sättigung; $m = 1 - 1/n$; γ wurde mit 0,5 angenommen (MUALEM, 1976). θ_s^d , K_s und θ_r wurden an den gleichen Proben, bei denen die Ausflußkurven bestimmt wurden, experimentell gemessen. Für die Berechnung der unbekanntenen Parameter, α^d und n , wurde das von KOOL und PARKER (1987) entwickelte Computerprogramm SFIT

Tab. 1: Van Genuchten-Modell Parameter für die Standorte 14, 701 und 801
 Table 1: Van Genuchten-model parameters for sites 14, 701 and 801

Standort	Bodentiefe	α^d	S.E.	n	S.E.	R ²	θ_r	θ_r^d	K _s
	cm	cm ⁻¹					cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	cm h ⁻¹
14	0-32	0.0340	0.0010	1.385	0.003	0.964	0.038	0.449	6.29
14	32-57	0.0490	0.0010	1.785	0.016	0.937	0.021	0.491	10.14
14	57-97	0.0620	0.0120	4.696	1.469	0.704	0.012	0.460	32.38
14	97-110	0.0380	0.0003	2.270	0.035	0.868	0.029	0.581	4.04
701	0-16	0.0450	0.0010	1.833	0.018	0.922	0.013	0.376	7.14
701	16-58	0.1310	0.0340	1.214	0.097	0.962	0.035	0.468	8.75
701	58-89	0.1120	0.0340	4.998	0.280	0.909	0.022	0.515	9.38
701	89-130	0.1180	0.0780	2.035	1.034	0.803	0.011	0.408	38.28
801	22-65	0.0230	0.0080	1.295	0.009	0.944	0.093	0.367	3.26
801	65-85	0.9160	0.0100	1.331	0.025	0.968	0.052	0.474	3.60
801	85-130	0.1690	0.0600	2.647	0.285	0.873	0.034	0.529	13.00

α^d und n sind empirische Parameter
 θ_r und θ_r^d geben den Restwassergehalt resp. den Sättigungswassergehalt an
 K_s ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
 S.E. gibt den Standardfehler an und R² die Güte der Parameterschätzung

verwendet, welches durch Lösung des allgemeinen nichtlinearen Kleinstquadratproblems den vorausgesagten an den gemessenen kumulativen Ausfluß anpaßt.

Die Ergebnisse der experimentellen Bestimmungen der Parameter θ_r^d , K_s und θ_r , wie auch die Schätzwerte der unbekannt Parameter α^d und n, sowie ihre Standardfehler, sind als Mittelwerte der jeweiligen Horizonte in Tabelle 1 angegeben. Die Güte der Parameterschätzung wird durch das Bestimmtheitsmaß R² beschrieben. Die Übereinstimmung zwischen Schätzung und Messung war mit wenigen Ausnahmen hoch.

Basierend auf der Integration der Darcy-Gleichung (SCHMIDHALTER, 1986) wurde der kapillare Grundwasseraufstieg unter stationären Bedingungen für verschiedene Grundwassertiefen berechnet. Mit einem in FORTRAN 77 geschriebenen Computerprogramm wurde der kapillare Wasseraufstieg unter Spezifikation der K(θ) bzw. der K(h)-Beziehung für beliebige Mehrschichtprofile berechnet.

3. Wasserversorgung und Grundwasseraufstieg

Zur Wasserversorgung der Pflanzen im Untersuchungsgebiet tragen die Niederschläge bei, das im Boden gespeicherte Wasser und das Grundwasser. Grundwasserabsenkungen verändern den Wasserhaushalt primär durch eine Reduktion der kapillaren Aufstiegsrate und -höhe, und sekundär — in kleinerem Ausmaß — durch eine Reduktion des Kapillarraums, wodurch die Menge des im Boden gespeicherten Wassers reduziert werden kann.

Die Textur der Standorte 801 und 701 ist in Abbildung 1 angegeben. Angaben zur Textur des Standortes 14 finden sich in Abschnitt 3.3 und Abbildung 5. Die pF-Kurvencharakteristika der drei Standorte sind in Abbildung 2 angegeben. In den Abbildungen 3, 4 und 5 sind die kapillaren Aufstiegshöhen angegeben, die sich bei Aufstiegsraten von 0,6, 0,8, 1,5, 3 und 5 mm/Tag ergeben. Die Ergebnisse sind für die drei Standorte für Grundwassertiefen zwischen 90–130 cm resp. 90–150 cm angegeben. Als ergänzende Information sind in den Abbildungen 3, 4 und zusätzlich die dominierenden Sandfraktionen angegeben. Grob- und Mittelsand wurden in eine Fraktion zusammengefaßt.

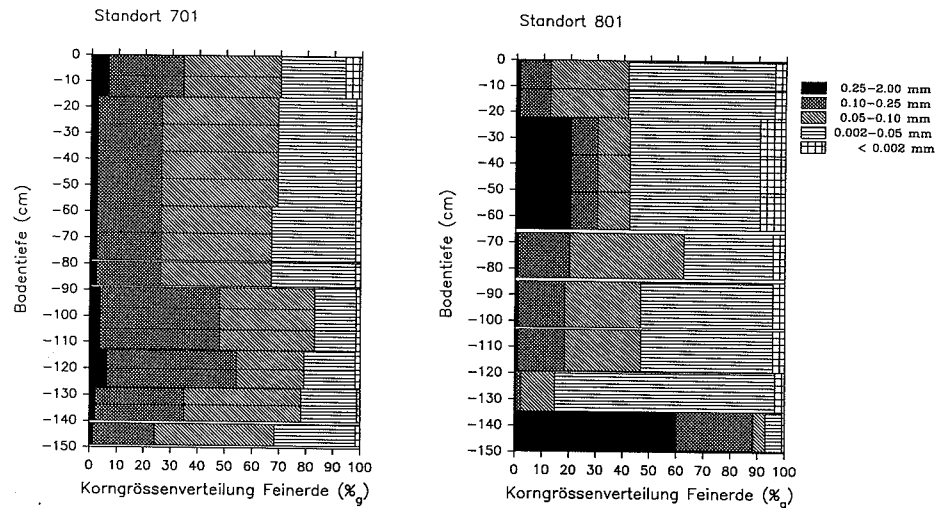


Abb. 1: Korngrößenverteilung der Böden der Standorte 701 und 801. Die Fraktionsgrößen sind in der Legende angegeben

Fig. 1: Particle-size distribution for the soils of the sites 701 and 801. Particle-size limits are as indicated in the legend of the figure

Mit einer kapillaren Aufstiegsrate von 5 mm/Tag kann die Wasserversorgung der Pflanzen während eines durchschnittlichen Sommertags vollständig durch die Nachlieferung aus dem Grundwasser gedeckt werden. Der Einfluß von Grundwasserabsenkungen zwischen 90–150 cm unter Flur ist aus der Abbildung 3 ersichtlich. Bei höheren Grundwasserständen oberhalb 90 cm Bodentiefe ist auf diesen Standorten mit keinen resp. nur geringen Auswirkungen einer Grundwasserabsenkung zu rechnen.

3.1 Standort 701

Der Grundwasserstand befindet sich meistens oberhalb 150 cm unter Flur. Der Hauptwurzelhorizont dieses Standortes findet sich in 0–25 cm Tiefe, kleinere Mengen von Wurzeln finden sich auch noch in 80 cm Tiefe. Der untersuchte Boden weist ein hohes kapillares Nachlieferungsvermögen auf. Die Konsequenzen, die sich aus der Absenkung des Grundwasserspiegels in 90–130 cm Bodentiefe ergeben, sind relativ klein (Abb. 3). In Abbildung 3 sind kapillare Aufstiegshöhen für Aufstiegsraten von 0,6–5,0 mm/Tag angegeben. Als Triebkraft für den Aufstieg wurden Wasserspannungen von 10–1000 cm WS angenommen. Die Ergebnisse zeigen, daß die Berechnungen sich bei Wasserspannungen im Bereich von 100–1000 cm WS nicht wesentlich unterscheiden.

Absenkungen von 10–30 cm ergeben bei kapillaren Aufstiegsraten zwischen 0,6 und 5 mm/Tag relativ kleine Reduktionen in der Aufstiegshöhe. Bei einer Grundwassertiefe von 90 cm müssen die Wurzeln bei einer kapillaren Aufstiegsrate von $v = 5$ mm/Tag 53 cm tief wachsen resp. 32 cm bei einer kapillaren Aufstiegsrate von 0,6 mm/Tag, um mit den entsprechenden Wassermengen versorgt zu werden. Bei 150 cm Grundwassertiefe betragen diese Tiefen 108 cm resp. 65 cm.

Der Boden weist einen hohen Anteil gut verfügbaren Wassers auf (Abb. 2). Bei einer Grundwassertiefe von 100 cm beträgt der Anteil leicht verfügbaren Wassers (Wasserspannungsbereich 80 cm WS bis 1400 cm WS) 26,5 cm in 0–100 cm Bodentiefe. Dieser deckt den Bedarf der Pflanzen, bei einer Evapotranspirationsrate von 5 mm/Tag,

während 53 Tagen. Rechnet man noch das schwerer verfügbare Wasser dazu, das zwischen 1400–3500 cm WS gebunden ist, erhöht sich dieser Wert auf 65 Tage.

Erniedrigt man den Grundwasserstand von 100 auf 140 cm, so ergibt sich eine Reduktion der Verfügbarkeit von 13 Tagen (leicht verfügbares Wasser bis 1400 cm WS). Die zur Verfügung stehenden Wasserreserven sind somit erheblich und werden ergänzt durch die Nachlieferung aus dem Grundwasser resp. den Beitrag der Niederschläge. Die Wasserversorgung ist somit gewährleistet und es kann mit einer genügenden Wasserversorgung auch bei Berücksichtigung eines kleineren Wurzelraums gerechnet werden.

Beim untersuchten Standort handelt es sich um einen günstigen Standort sowohl bezüglich der Wasserspeicherung wie auch bezüglich der Wassernachlieferung aus dem Grundwasser. Es ergeben sich keine Probleme bei einer Reduktion der Grundwassertiefe um 10–30 cm in 0–100 cm Bodentiefe. Die Folgen einer Grundwasserabsenkung von 10–20 cm bei Grundwassertiefen von 90–130 cm sind ebenfalls gering. Bei Grundwasserabsenkungen auf 130–150 cm Bodentiefe erfolgt eine mäßige bis mittlere Reduktion der Wassernachlieferung. Bei gleichbleibender Wasserversorgung müßten die Pflanzen 10 cm tiefer mit ihren Wurzeln wachsen.

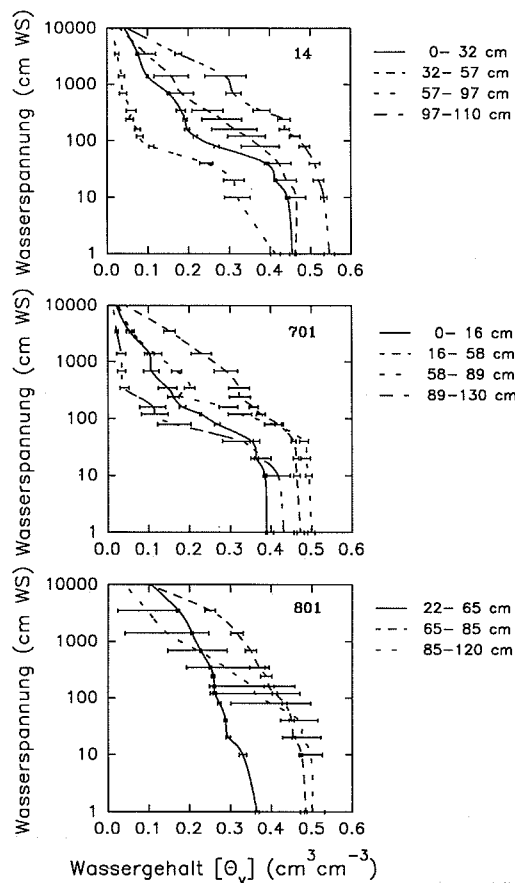


Abb. 2: *pF*-Kurven für vier resp. drei Bodenhorizonte der Standorte 14, 701 und 801. Querbalken geben die Standardabweichung an

Fig. 2: Desorption curves for four and three soil horizons of the sites 14 and 701, respectively

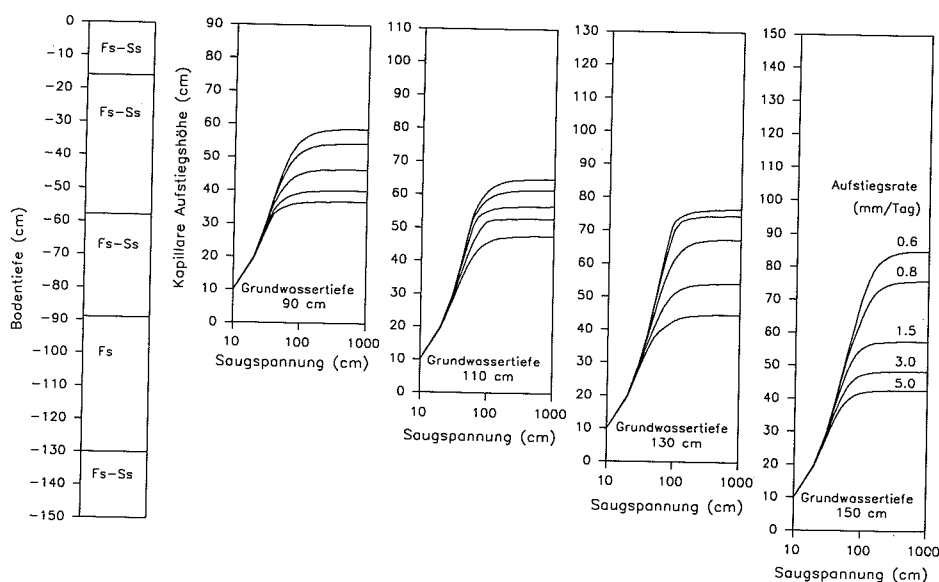


Abb. 3: Standort 701: Kapillare Aufstiegshöhen für Aufstiegsraten von 0,6–0,5 mm/Tag bei Grundwassertiefen von 90–150 cm. Die Horizontgrenzen des untersuchten Bodens sind in der linken Darstellung angegeben. Die Abkürzungen Gs (Grob- und Mittelsand), Fs (Feinsand) und Ss (Staubsand) bezeichnen die dominierenden Sandfraktionen

Fig. 3: Site 701: Capillary rise calculated for capillary rates of 0.6–0.5 mm/day and groundwater depths of 90–150 cm

3.2 Standort 801

In 0–27 cm Tiefe findet sich ein schluffiger Horizont. In 27–62 cm Tiefe folgt ein sandig-kiesiger Horizont. Die Sandfraktion weist Fraktionen vom Staubsand bis Grobsand auf. In diesem Horizont finden sich 3–50 mm grobes Kies und Steine. Diesem Horizont folgt in 62–89 cm Tiefe ein sandiger (-schluffiger) Horizont, in dem die Staubsandfraktion überwiegt. Der darunterliegende Horizont in 89–120 cm Tiefe ist ähnlich zusammengesetzt. In 120–135 cm Tiefe folgt ein schluffreicher Horizont. An diesen schließt ein grob-mittelsandiger Horizont bis 150 cm Tiefe an. Diesem folgt bis 155 cm Tiefe ein mittelsandiger-grobsandiger Horizont. In 155–170 cm Tiefe findet sich ein grobsandiger, Kiese und Schotter enthaltender Horizont. Die Wurzeln reichen bis in 85 cm Tiefe. Die Hauptwurzelzone liegt in 22–65 cm Tiefe.

Der untersuchte Boden weist bei Grundwassertiefen von 90 cm und weniger unter Flur ein hohes Nachlieferungsvermögen von Wasser aus dem Grundwasser auf. Eine Absenkung auf 100 cm bewirkt eine Reduktion der kapillaren Nachlieferungsrate (Abb. 4). Die Nachlieferung ist jedoch noch genügend groß, um die Pflanzen ausreichend mit Wasser zu versorgen. Eine Absenkung auf 110 cm Tiefe ergibt insbesondere bei niedrigen kapillaren Aufstiegsraten, $v = 0,6$ resp. $0,8$ mm/Tag, einen deutlichen Rückgang in der Aufstiegshöhe. Limitierend ist die hydraulische Leitfähigkeit der Schicht 22–65 cm. In dieser erfolgt ein sehr rascher Rückgang der Leitfähigkeit bei Wasserspannungen, die höher sind als 20–30 cm. Eine Absenkung um 20 cm auf 130 cm Tiefe ergibt bei allen kapillaren Aufstiegsraten eine Erniedrigung der Aufstiegshöhe um ca. 20 cm. Die kapillare Aufstiegshöhe ist bei einer Grundwassertiefe von 130 cm relativ klein und beträgt bei kapillaren Aufstiegsraten von

0,6–5 mm/Tag 22–33 cm. Dies bedingt, daß die Wurzeln bis in eine Tiefe von 100 cm Tiefe wachsen müssen, um das Grundwasser nutzen zu können. Eine Absenkung bis auf 135 cm Tiefe hat relativ wenig Konsequenzen, da die in dieser Tiefe vorhandene schluffreiche Schicht genügend Wasser in den darüberliegenden Horizont zu liefern vermag. Eine Absenkung in den grob-mittelsandigen Horizont, in 135–145 cm Tiefe resp. noch tiefer, hat zur Folge, daß die kapillare Aufstiegshöhe zu gering ist, daß das Grundwasser einen nennenswerten Beitrag zur Wasserversorgung der Pflanzen leisten kann. Mit größeren Folgen ist auf diesem Boden somit bei Absenkungen über die Tiefe von 140 cm zu rechnen.

Die Berechnung der leicht verfügbaren Wassermenge (120–1400 cm WS) ergibt für eine Bodentiefe von 0–100 cm eine Menge von 16,3 cm (Abb. 2). Berücksichtigt man zusätzlich das bis 3500 cm WS gespeicherte Wasser, ergeben sich 21,6 cm Wasser. Diese Mengen reichen bei einer Evapotranspiration von 5 mm/Tag für 33 resp. 43 Tage. Eine Absenkung des Grundwassers ändert wenig an der verfügbaren Wassermenge, da dieser Boden einen hohen Schluffanteil aufweist. In einem niederschlagsarmen Sommer ergibt sich auf diesem Standort bei tiefen Grundwasserständen (> 135 cm) ein eindeutiger Bedarf für eine Zusatzbewässerung. Die Vegetation wird auf diesem wie auch auf allen anderen untersuchten Standorten jedoch durch den im Sommer herrschenden Grundwasserhochstand begünstigt. Bei tiefem Grundwasserstand im Winterhalbjahr ist der Wasserbedarf klein und kann weitgehend durch das im Boden gespeicherte Wasser bzw. durch Niederschläge gedeckt werden.

3.3 Standort 14

Der erste Horizont reicht bis in 32 cm Tiefe. In 32–57 cm Tiefe folgt eine staub-/mittelsandige Schicht, an die eine fein-/mittelsandige Schicht, in 57–97 cm Tiefe, anschließt. In 97–110 cm Tiefe folgt eine feinsandige Schicht, an die eine feinsandige(mittelsandige) Schicht bis 126 cm anschließt. Der Hauptwurzelschizont der

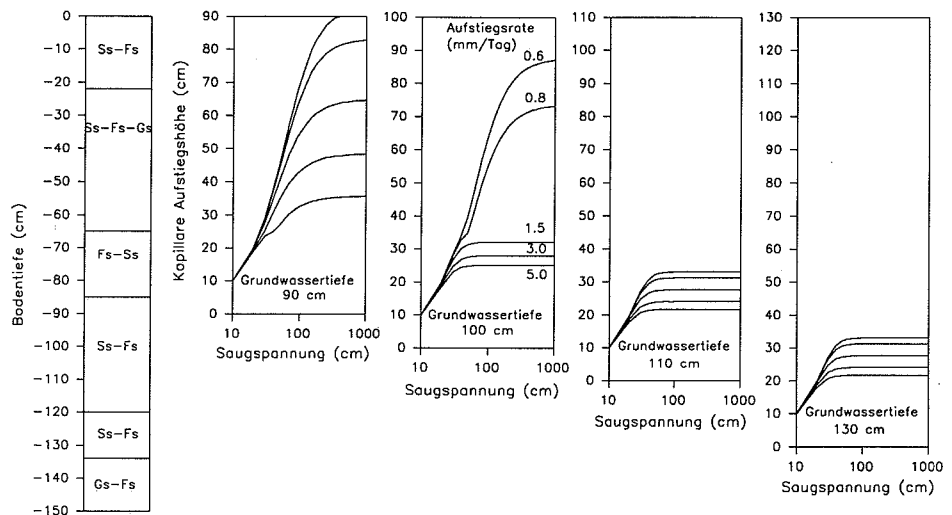


Abb. 4: Standort 801: Kapillare Aufstiegshöhen für Aufstiegsraten von 0,6–0,5 mm/Tag bei Grundwassertiefen von 90–130 cm

Fig. 4: Site 801: Capillary rise calculated for capillary rates of 0.6–0.5 mm/day and groundwater depths of 90–130 cm

vorgängigen Kultur ist aufgrund der verbliebenen Reste in 0–60 cm Tiefe anzunehmen. In der Tiefe zwischen 126–220 cm findet sich eine staubsandige, leicht schluffige Schicht, die stark reduziert ist. Dies deutet darauf hin, daß der Grundwasserstand sich meistens oberhalb dieser Tiefe befindet.

Hydraulisch wird dieser Standort durch die feinsandig-mittelsandige Schicht im dritten Horizont geprägt. Deren gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist sehr hoch. Im ungesättigten Zustand geht sie jedoch sehr rasch und stark zurück. Dies ist auch aufgrund der pF-Kurve erkennbar (Abb. 2). Dieser Boden entwässert sich bereits bei niedrigen Wasserspannungen. Bei einer Absenkung des Grundwassers von 100 auf 110 cm ergibt sich ein deutlicher Rückgang in der kapillaren Aufstiegshöhe bei niedrigen Aufstiegsraten (Abb. 5). Stärkere Reduktionen der kapillaren Aufstiegshöhen, bei Aufstiegsraten von 3 resp. 1,5 mm/Tag, ergeben sich auch bei einer Grundwasserabsenkung von 90 auf 100 cm. Bei weiteren Grundwasserabsenkungen auf 120–140 cm unter Flur werden die kapillaren Aufstiegshöhen nicht wesentlich verändert.

Der untersuchte Standort ist bei einem tiefen Grundwasserstand bewässerungsbedürftig. Das leicht verfügbare Wasser (120–1400 cm WS), das in 0–100 cm Bodentiefe gespeichert ist, reicht bei einer täglichen Evapotranspiration von 5 mm/Tag während 20 Tagen. Berücksichtigt man zusätzlich das zwischen 1400–3500 cm WS gespeicherte Wasser, erhöhen sich diese Werte um 6 Tage. Die zur Verfügung stehende Wassermenge ist niedriger anzunehmen, da der effektive Wurzelraum eher kleiner ist. Bei einer Grundwassertiefe von 140 cm werden 1,5–5 mm/Tag bis in 90–95 cm unter Flur nachgeliefert. Kleinere Raten werden nur unwesentlich höher geliefert. Die Wurzeln müßten somit bis in diese Tiefe wachsen, um das Grundwasser ausnutzen zu können. Dies ist bei einjährigen Kulturen erst in einem späteren Vegetationszeitpunkt der Fall. Die Wasserversorgung der Pflanzen wird durch den sommerlichen Grundwasserhochstand begünstigt. Bei Absenkungen über 140 cm unter Flur ist der Beitrag des

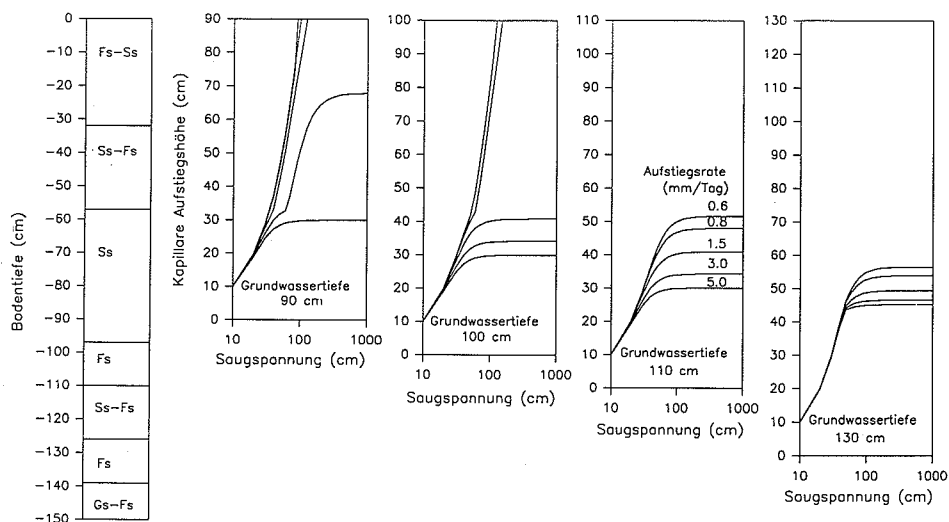


Abb. 5: Standort 14: Kapillare Aufstiegshöhen für Aufstiegsraten von 0,6–0,5 mm/Tag bei Grundwassertiefen von 90–130 cm

Fig. 5: Site 14: Capillary rise calculated for capillary rates of 0.6–0.5 mm/day and groundwater depths of 90–130 cm

Grundwassers zur Wasserversorgung der Pflanzen klein. Absenkungen über diese Tiefe sollten vermieden werden.

4. **Schlußfolgerungen**

Auf den untersuchten Standorten werden Grundwassertiefen von 90 cm unter Flur und höher als optimal für die Wasserversorgung der Pflanzen betrachtet, dies stimmt mit Angaben von RENGGER et al. (1984) überein. Die Versorgung mit Grundwasser kann je nach Standort auch noch bei 110 cm unter Flur optimal sein, eine stärkere Abnahme in der Wassernachlieferung ergibt sich bei 110–130 cm. Kein nennenswerter Beitrag zur Wasserversorgung erfolgt je nach Standort bei Grundwassertiefen zwischen 135–160 cm. Für die Beurteilung des kapillaren Wasseraufstiegs ist neben der Kenntnis der Textur der Feinerde auch die Kenntnis des Skelettanteils erforderlich. Auf dem Standort 801 ergibt sich durch das Vorhandensein einer Schicht mit ca. 20% Mittel- und Grobsand, die zudem wesentliche Grobskelettanteile aufweist, ein wesentlicher Rückgang des kapillaren Aufstiegs, der in diesem Fall wenig durch die Schichtdicke beeinflußt wird. In mehrschichtigen Böden lassen sich durch Kenntnis der Desorptionscharakteristika der Bodenhorizonte hydraulisch limitierende Schichten abschätzen. Dies wird durch die bei tiefen Wasserspannungen rasch entwässernden Horizonte in 57–97 cm Tiefe (Standort 14) und in 22–65 cm Tiefe (Standort 801) illustriert. Diese Horizonte beeinflussen wesentlich das kapillare Aufstiegsvermögen. Die Kenntnis der Desorptionscharakteristika ist viel einfacher zu ermitteln als die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Es ist wünschenswert, mehr und bessere Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen der Textur und der hydraulischen Leitfähigkeit zu ermitteln.

5. **Zusammenfassung**

Für eine Beurteilung der Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen, aber auch die Optimierung des Wassereinsatzes auf bewässerungsbedürftigen grundwasserbeeinflußten Standorten, sind genaue Kenntnisse des kapillaren Grundwasseraufstiegs erforderlich. In einem Gebiet, das schluffige und lehmige, mehrfach geschichtete Sandböden aufweist, wurden die Folgen einer Grundwasserabsenkung für die landwirtschaftliche Nutzung untersucht. Die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erfolgte mit one-step Druckausfluß-Experimenten. Für Aufstiegsraten von 0,6–5 mm/Tag wurden die kapillaren Aufstiegshöhen basierend auf der Integration der Darcy-Gleichung für Grundwassertiefen von 90–150 cm berechnet. Auf den untersuchten Standorten werden Grundwassertiefen von 90 cm als optimal betrachtet. Die Wassernachlieferung geht bei Absenkungen des Grundwasserstandes in 110–130 cm Bodentiefe deutlich zurück. Bei einer Absenkung in 135–160 cm Tiefe liefert das Grundwasser keinen nennenswerten Beitrag zur Wasserversorgung der Pflanzen. Die Bedeutung hydraulisch limitierender Bodenhorizonte wird illustriert.

Summary

The height and rate of capillary rise from groundwater must be known to predict the effects of lowering groundwater levels and the resulting consequences for the plants' water supply. Based on the integration of Darcy's law and the measurement of the unsaturated hydraulic conductivity the effects of lowering the groundwater level were investigated in three silty and loamy multi-layered sand soils. The height of capillary rise was calculated for rates of 0.6–5 mm/day and groundwater depths varying between 90 to 150 cm. Groundwater depths of 90 cm revealed to be optimal for plant growth on these sites. Lowering the groundwater level to 110–130 cm depth markedly decreased

the water supply. At groundwater depths of 135–160 cm there was no further contribution to the plants' water supply. The significance of hydraulically limiting soil layers in multi-layered soil profiles is illustrated.

Literaturverzeichnis

- BLOEMEN, G. W., 1980: Calculation of steady state capillary rise from the groundwater table in multi-layered soil profiles. — *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, **143**, 701–719.
- KLUTE, A. (Ed.), 1986: *Methods of soil analysis. — Part 1 — Physical and mineralogical analysis.* Second edition. ASSA, SSSA, Inc. Publisher. Agronomy 9.
- KOOL, J. B., J. C. PARKER and M. TH. VAN GENUCHTEN, 1985: Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory and numerical studies. — *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**, 1348–1354.
- KOOL, J. B. and J. C. PARKER, 1987: Estimating soil hydraulic properties from transient flow experiments: SFIT user's guide. — *Soil and Environmental Sciences*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. — *Water Resour. Res.* **12**, 513–522.
- RENGER, M., O. STREBEL und H. SPONAGEL, 1984: Einfluß von Grundwasserabsenkungen auf den Pflanzenertrag landwirtschaftlich genutzter Flächen. — *Wasser und Boden*, **36**, 499–502.
- SCHMIDHALTER, U., 1986: *Bodenversalzung im Unterwallis. Ursachen, Mechanismen und Meliorationsmaßnahmen.* — Diss Nr. 8052, ETH Zürich, 271 S.
- SCHMIDHALTER, U. und J. J. OERTLI, 1988: Grundwasseraufstieg. — *Landwirtschaft Schweiz*, **1**, 7, 405–410.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. — *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892–898.

Anschrift der Verfasser: Dr. Urs SCHMIDHALTER, Prof. Dr. J. J. OERTLI, ETH Zürich, Institut für Pflanzenwissenschaften, Versuchsstation Eschikon, CH-8315 Lindau.