

**Agrovoc descriptors:** soil water content; soil water potential; measurement; measuring instruments; equipment; methods

**Agris category codes:** P10, P30, U30

COBISS koda 1.02

## **Metode za merjenje količine vode v tleh 1. del: tenziometer**

Vesna ZUPANC<sup>1</sup>, Marina PINTAR<sup>2</sup>

Received: July 10, 2006; accepted: June 20, 2007

Delo je prispelo: 10. julija 2006; sprejeto: 20. junija 2007

### **IZVLEČEK**

Znanje o količini vode v tleh ali v substratu je pri raziskovalnem delu na področju agronomskih in okoljskih znanosti kot tudi v praksi pri rastlinski pridelavi nujno potrebno za uspešno delo in zanesljive rezultate. Za merjenje vode v tleh poznamo direktne in indirektno metode določanja vsebnosti vode. Merjenje količine vode v tleh s pomočjo tenziometra spada med posredne metode, pri kateri merimo matrični potencial vode. Tenziometer je sestavljen iz porozne keramične kapice, povezane z manometrom preko največkrat rigidne cevke napolnjene z vodo. Tenziometri delujejo na območju okoli 80 - 85 kPa (teoretično do 100 kPa). Uporabni so za uravnavanje namakanja, ne pa tudi za meritve matričnega potenciala vode v zelo suhih tleh.

**Ključne besede:** merjenje vode v tleh, matrični potencial vode, tenziometer

### **ABSTRACT**

#### **SOIL WATER MEASUREMENT METHODS 1<sup>st</sup> part: TENSIOMETER**

Soil water status is extremely important and necessary for successful work and reliable results in research in agronomy and environmental sciences as well as in practical applications in plant production. There are direct and indirect methods for soil water measurements. Measuring with tensiometers is an indirect method, based on water matric potential measurements. Tensiometers consist of porous ceramic cup connected to a vacuum gauge through a rigid water-filled tube. Working interval is between 80 – 85 kPa (theoretically up to 100 kPa), which makes them useful for irrigation scheduling, but unsuitable for water matric potential measurements in dry soils.

**Key words:** soil water measurement, soil water matric potential, tensiometer

<sup>1</sup> asist., dr., Biotehniška fakulteta, p.p.2995, 1001 Ljubljana, vesna.zupanc@bf.uni-lj.si

<sup>2</sup> prof., dr., Biotehniška fakulteta, p.p.2995, 1001 Ljubljana, marina.pintar@bf.uni-lj.si

## 1 UVOD

Tla so kompleksen sistem, sestavljen iz heterogene mešanice trdnih, tekočih in plinastih snovi. Trdno fazo predstavljajo mineralni delci in organska snov, ki so povezani v porozen prostor. V porah sta tekoča in plinasta faza tal. Tekočo fazo predstavlja talna raztopina, ki je največkrat voda s primesmi hranil in drugih snovi. Plinasto fazo tal predstavlja zrak, ujet v talne pore (Zupanc in Pintar, 2001; Pintar, 2006).

Za izračun vsebnosti vode v tleh, določitev lastnosti tal, ki vplivajo na tok vode v tleh ipd., uporabljamo razmerja med trdno, tekočo in plinasto fazo tal. V poroznem prostoru so pore izmenično zapolnjene s plinasto fazo oz. zrakom in tekočo fazo – talno raztopino oz. vodo (Zupanc in Pintar, 2001). Poznavanje koliko vode je v tleh ali v substratu, je pri raziskovalnem delu na področju agronomskih in okoljskih znanosti kot tudi v praksi pri rastlinski pridelavi nujno potrebno za uspešno delo in zanesljive rezultate.

Koliko vode se nahaja v porah tal, lahko izrazimo v masnem (g/g) ali volumskem ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) deležu. Uporaba volumskega deleža je ustreznejša od masnega, ker ga lahko neposredno vnesemo v izračune za količino vode, ki priteče v tla z dežjem ali namakanjem in se iz tal izgubi z evapotranspiracijo in drenažo. Volumsko razmerje je tudi enakovredno globinskemu razmerju tal, ki ustreza debelini plasti vode na enoto globine tal (Hillel, 1998; Adam, 2004).

Za merjenje količine vode v tleh poznamo direktne in indirektne metode. Metode se razlikujejo po zanesljivosti in ponovljivosti meritev, kako hitro so rezultati meritev uporabniku razpoložljivi, območjem meritev ter ceni opreme potrebne za meritve.

Pri direktni metodi (gravimetrična metoda) s sušenjem vzorca tal ali substrata (24 ur na  $105^\circ\text{C}$  za mineralna tla) neposredno določimo, kolikšno maso vode je vzorec vseboval. Gravimetrična metoda je splošno uporabljena kot standard posredne metode kljub njeni dolgotrajnosti in spreminjanju vzorca (destruktivnosti) tekom postopka meritve (Dirksen, 1999).

Pri posrednih metodah merjenja količine vode v tleh izkoristimo določeno lastnost trifaznega sistema tal (trdna snov – plin – tekočina). Prispevek opisuje merjenje količine vode v tleh s pomočjo tenziometra, ki spada med posredne metode merjenja količine vode v tleh. S tenziometrom količino vode izmerimo preko sile, s katero je voda vezana v tleh. Tenziometer torej ne izmeri, koliko vode je v tleh ali substratu, pač pa omogoča in situ meritve matričnega potenciala oz. t.i. tenzije vode v tleh (Hillel, 1998).

Prispevek opisuje merjenje količine vode v tleh s pomočjo tenziometra. Druge posredne meritve bomo opisali v drugem delu pregleda metod za merjenje količine vode v tleh.

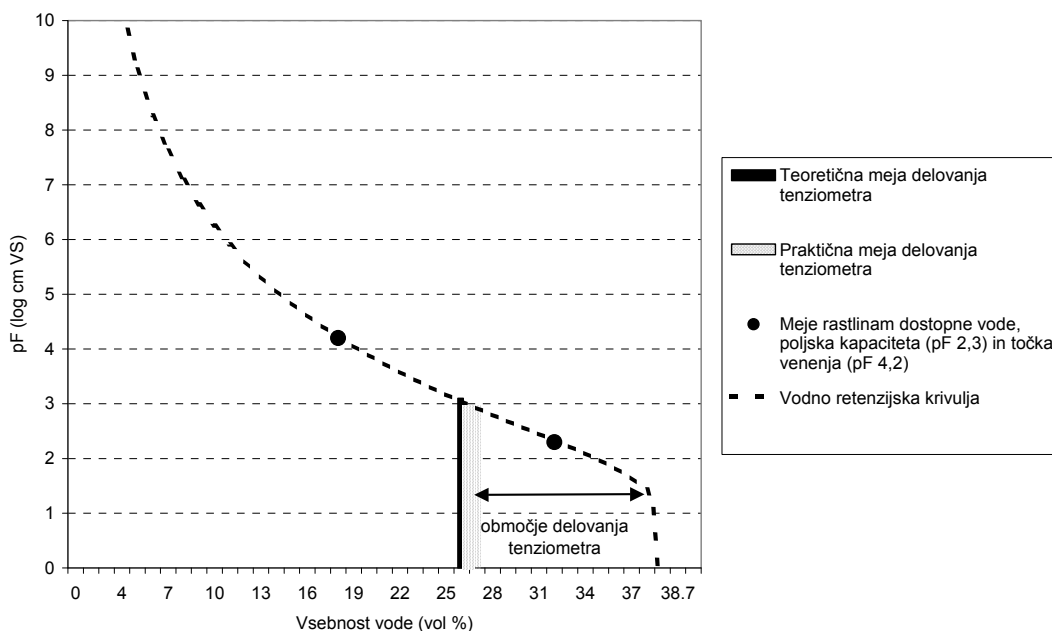
## 2 PRINCIP DELOVANJA

Potencialna energija talne vode je definirana kot delo, ki je potrebno za reverzibilni in izotermalni prenos masne enote vode iz danega referenčnega položaja na določeno točko v tleh. Vodni potencial je kazalec energijskega stanja vode. V nenasičeni coni (vadozna cona), kjer se nahaja večina korenin rastlin, določajo smer premika talne vode prostorske razlike matričnega potenciala vode.

Voda v tleh se na površino talnih delcev veže na dva različna načina. Prvi je adsorpcija molekul vode na površino talnih delcev preko Van der Valsovih sil. Drugi način je zadrževanje vode v tleh z menisknimi silami, ki se pojavijo na mestu kontakta dveh delcev (Hillel, 1998; Young in Sisson, 2002). Manjši je delež vode v tleh, večja je moč vezave. Matrični potencial je torej sestavljen iz adsorptivnih sil vode na talne delce ter kapilarnih sil znotraj por. Energija, potrebna za premaganje skupka teh sil, ustreza in je nasprotno enaka matričnemu potencialu. Tako ima matrični potencial vedno negativno vrednost v nenasičeni coni (Young in Sisson, 2002). Včasih so sile tenzije imenovali tudi kapilarni potencial. Ker pa je vezava vode na talne delce sestavljena tako iz adsorptivnih sil kot tudi kapilarnih – menisknih sil, so uvedli skupen pojem matrični potencial. To silo imenujemo sila vpijanja oz. sorpcije in jo v praksi večinoma izražamo v barih, pravilnejša pa je uporaba kPa (1 bar = 100 kPa). Ker govorimo o tenziji, je pred enoto negativen predznak. Tenzijo lahko izrazimo tudi v pF enotah (potential Force), ki so definirane kot negativni logaritem centimetrov vodnega stolpca (VS). Pretvorba 100 kPa oz. 1 bar ustreza višini 10 m VS oz. 1000 cm VS. Če želimo pretvoriti 100 kPa ali 1 bar, potem pretvorimo najprej v cm VS, te logaritmiramo, torej  $\log 1000 \text{ cm VS}$ , kar je 3 pF.

Energijsko ravnovesje med tenziometrom ter okoliškimi tlemi se doseže preko prehoda vode skozi porozno kapico tenziometra. Voda se giblje v smeri manjšega potenciala. Ko je matrični potencial vode v tleh okoli kapice manjši kot matrični potencial znotraj tenziometra, bo voda prehajala v okolico tal skozi pore kapice toliko časa, da se bo ustvarilo ravnovesje. Matrični potencial vode v okolici kapice ustreza podtlaku, ki se je pri ravnovesju ustvaril v tenziometru in ga odčitamo na merilcu podtlaka.

Podatek, ki ga preberemo na tenziometru, moramo s pomočjo krivulje tenzije (slika 1) spremeniti v količino vode, ki je v tleh (Pintar, 2006). Če želimo dobiti količino vode, moramo imeti vodno retenzijsko krivuljo za izbrana tla oz. substrat, ki ga uporabljamo v poskusu. Za pravilen nadzor dodajanja vode je potrebno imeti tako meritve matričnega potenciala vode v tleh ali substratu, kot poznati vodnoretenzijske lastnosti tal ali substrata.



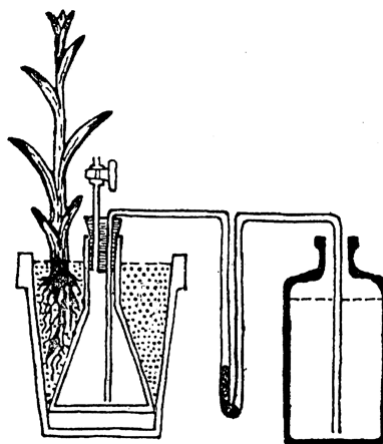
Slika 1: Primer poljubne vodno retenzijske krivulje (vsebnost vode v tleh v odnosu s silo vezave vode) ter na njej označeno območje delovanja tenziometra (0 – 3 pF).

Figure 1: Arbitrary water retention curve (water content vs. soil water suction) and the marked tensiometer working range (0 – 3 pF).

### 3 TENZIOMETER

Začetki tenziometrije segajo v zgodnje leto 1907, ko je Edgar Buckingham v svoji študiji *Studies on the movement of soil moisture* zapisal, da se sile, ki vežejo vodo v tleh lahko izražajo s kapilarnim potencialom. Če hočemo odstraniti iz tal vodo, ki je vezana v njih, je treba opraviti določeno delo (Buckingham, 1907). Izvirni načrt in obliko tenziometra je leta 1908 opisal Burton E. Livingston, kot sistem za uravnavanje vlage pri lončnicah (Slika 2). Splošno razširjeno in pogosto citirano uporabo tenziometra za merjenje matričnega potenciala vode v tleh pa je opisal Willard Gardner s sodelavci (1922). Prvi robustni načrt za uporabo na terenu pripisujejo Lorenzu A. Richardsu v zgodnjih dvajsetih letih dvajsetega stoletja (Or, 2001).

Tipičen tenziometer je sestavljen iz porozne keramične kapice, povezane z merilcem podtlaka preko največkrat toge cevke napolnjene z vodo (Slika 3). Keramična kapica je narejena iz keramike z zelo finimi porami. Služi kot vmesnik med vodo v tleh ter vodo v tenziometru. Prosto prepušča vodo, meniskus, ki je posledica površinske napetosti vode, pa do določene meje preprečuje vstop zraku. Ker je kapica v neposrednem stiku s tlemi, mora prenesti tudi obremenitve namestitve inštrumenta v tla v najrazličnejših razmerah (zbita, grobo peščena tla, ipd).

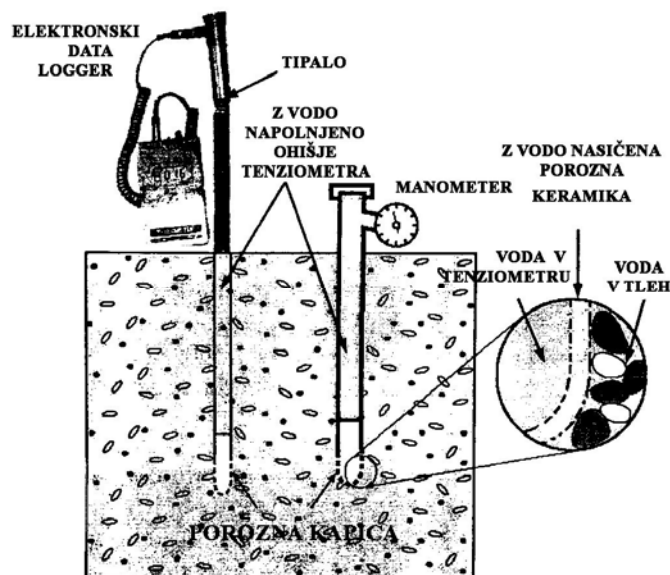


Slika 2: Skica Livingstonovega sistema za uravnavanje vlage v tleh (Livingston, 1908), ki vsebuje vse elemente modernega tenziometra za avtomatski nadzor vsebnosti vode v lončnem substratu (Or, 2001).

Figure 2: Livingston's design for self regulating system for soil water (Livingston, 1908), which uses all the elements of a modern tensiometer for automatically controlled soil water status of potted plants (Or, 2001).

Merilec za merjenje podtlaka, ki se ustvari v ohišju tenziometra, je lahko manometer ali elektronski prevodnik pritiska. Pri uporabi na terenu moramo upoštevati občutljivost merilca pritiska ter reakcijski čas.

Ohišje tenziometra je največkrat toga cevka. Vsi deli tenziometra so napolnjeni z vodo. Porozna kapica je v tesnem stiku s tlemi na globini oz. mestu, kjer želimo meriti vsebnost vode oz. tenzijo, s katero je voda v okoliških tleh vezana (Slika 3).



Slika 3: Skica tenziometra (levo z elektronskim prevodnikom pritiska, desno s klasičnim manometrom), nameščenega v talnem profilu (Or, 2001).

Figure 3: Tensiometer design (left with digital pressure transducer, right with classical manometer) in the soil profile (Or, 2001).

#### 4 UPORABA APARATA

Tenziometer se uporablja v agronomiji in okoljskih znanostih predvsem za merjenje matričnega potenciala vode v tleh, prav tako se lahko uporablja za določevanje hidravličnih lastnosti tal, monitoring bogatenja podtalnice ter sledenje prenosa onesnažil. V praksi se tenziometri uporabljajo za uravnavanje statusa vode v tleh ali lončnem substratu z namakanjem. Tenziometri so preprosti za uporabo ter ne potrebujejo zunanjega napajanja z energijo (Young in Sisson, 2002).

Tenziometri so uporabni samo za podtlake do blizu 100 kPa (1 bar oz. 1 atm), to se pravi, da je mogoče izmeriti potenciale samo na vlažnem delu vodno retenzijske krivulje, to je od pF 0 do pF 3 (Kovačič, 1967). Rastlinam dostopna voda v tleh je med točko venenja (pF 4,2) ter poljsko kapaciteto (med 1,8 in 2,5 pF). To pomeni, da tenziometri merijo le v delu območja rastlinam dostopne vode. V tem razponu se gibljejo optimalne količine vode za sadje, vrtnine, poljska dela.

Praktične meritve potekajo do 85 kPa (2,97 pF). Ko je vsebnost vode v tleh na mejni točki, pride do vstopa zraka skozi pore keramične kapice. Posledica je znatno zmanjšanje podtlaka v cevki (ohišju) tenziometra. Meritve niso več skladne z dejanskim stanjem matričnega potenciala v tleh. Pri grobo zrnatih tleh se to lahko zgodi že prej, ko so tla še vlažna. Porozna kapica ima kontrolirano porazdelitev por tako, da lahko ostane nasičena, dokler matrični potencial okoli nje ne doseže 100 kPa (1000 cm VS).

Ozmotski potencial talne raztopine (npr. soli raztopljene v talni vodi) ne vpliva na meritve, ker se raztopljene snovi skozi porozno kapico lahko neovirano premikajo.

Ker delujejo na območju okoli 80 – 85 kPa (teoretično do 100 kPa), pomeni, da tenziometri niso uporabni za meritve matričnega potenciala vode v zelo suhih tleh. Prav tako niso primerni za poskuse, kjer se ugotavlja vpliv sušnega stresa, saj prenehajo delovati še v relativno vlažnem območju. Med in po sušnem obdobju jih je potrebno vzdrževati (cevno ohišje napolniti z vodo).

Pred namestitvijo na želeno merilno mesto v talnem profilu tenziometer namočimo v vodi. Če tenziometer nameščamo v zbita tla, predhodno vanje zavrtamo s svedrom, ki mora natančno ustrezati premeru kapice in ohišja tenziometra. Tenziometer s keramično kapico v tla namestimo previdno, tako da pri tem kapice ne poškodujemo in pazimo, da je stik s tlemi dober. Ko je tenziometer nameščen, tla vpijajo vodo skozi porozno kapico. Pri tem podtlak v tenziometru naraste, dokler podtlak v tenziometru ni v ravnotežju s matričnim potencialom vode v tleh okoli keramične kapice. Počakamo, da se stanje uravnovesi in odčitamo vrednost na barometru (Slika 4).

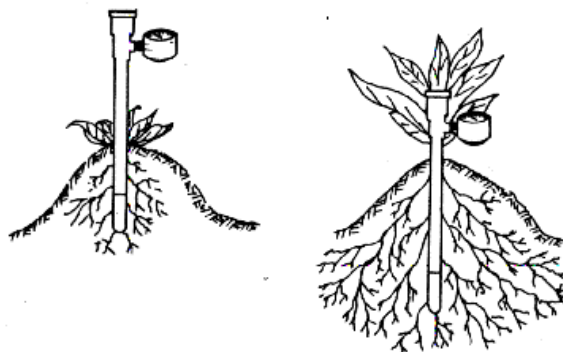
Meritve s tenziometrom so točkovne in nam podajo stanje vode v neposredni okolici korenin (Slika 5). V primeru, ko imamo rastline s plitvejšimi koreninami, za reprezentativen podatek zadošča uporaba posameznega tenziometra.



Slika 4: Primer dveh odčitkov na števcu manometra, levo dovolj vode, desno manj vode, kazalec se premika proti mejni vrednosti, ko tenziometer še deluje (85 kPa).

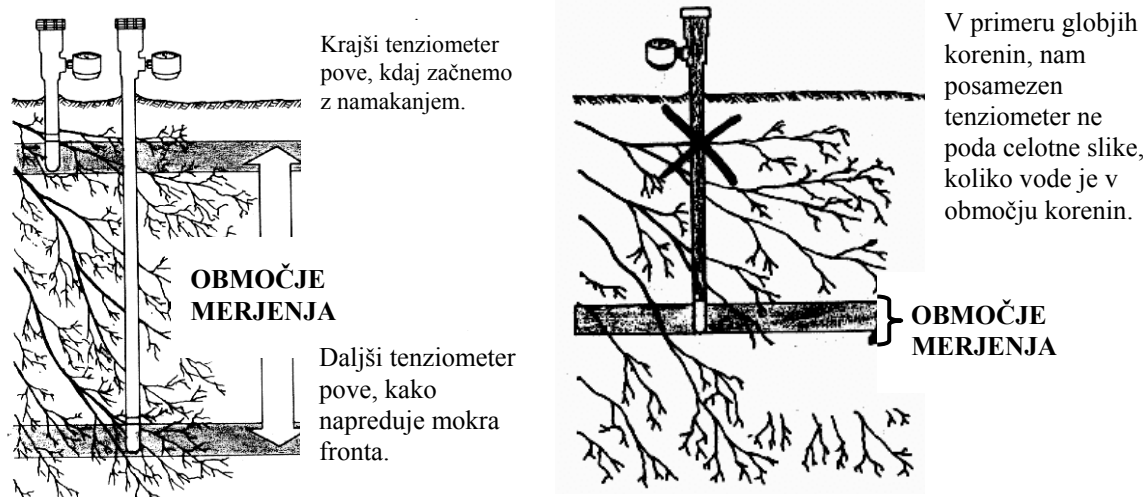
Figure 4: Example of two readings on manometer scale, left adequate water status, right low water status, cursor is moving towards boundary tensiometer working range (85 kPa).

Pri rastlinah z globljimi koreninami nam meritve z zgolj enim tenziometrom (Slika 6) ne povedo dovolj natančno, kakšno je stanje vode v tleh. Večina rastlin črpa glavino vode iz zgornje polovice do treh četrtin območja koreninskega spleta. Če želimo slediti gibanju vode, moramo uporabiti več tenziometrov, tako da lahko s pomočjo razlike v matričnem potencialu vidimo, v kateri smeri se giblje vodna fronta oz. ali je količina vode, ki smo jo v namakalnem obroku nanegli, dosegla željeno globino korenin. Priporočene globine za namestitev tenziometra glede na globine korenin različnih rastlin so v preglednici 1.



Slika 5: Uporaba tenziometra z enim tenziometrom na merilno mesto.

Figure 5: Tensiometer application in a one-instrument station.



Slika 6: Uporaba tenziometra z dvema oz. posameznim tenziometrom na merilno mesto (levo pravilno, desno nepravilno)

Figure 6: Tensiometer application with two or single tensiometer on measuring station (left correct, right wrong)

Preglednica 1: Globine namestitve tenziometra za merjenje količine vode v tleh (Tekinel in Čevik, 1993)

Table 1: Tensiometer installation depth for soil water measurements (Tekinel and Čevik, 1993)

Poljščina	Kratek tenziometer (cm)	Dolg tenziometer (cm)	Poljščina	Kratek tenziometer (cm)	Dolg tenziometer (cm)
zelje	30	50	čebula	30	45
nageljni	30	—	paprika	35	50
korenje	30	60	krompir	25	45
cvetača	30	60	sladek krompir	45	60
zelena	25	50	redkev	30	—
kumare	30	45	špinača	30	45
jajčevce	30	45	buče	35	50
česen	30	45	jagode	15	30
solata	30	—	paradižnik	30	45
melone	30	45	lubnice	30	45

#### 4 ZAKLJUČEK

Razvoj tenziometra sega v začetek dvajsetega stoletja, izvorna oblika in princip te metode pa se je ohranila do danes. Zaradi preprostosti metode in cenovne dostopnosti so ena izmed najpogosteje uporabljenih naprav za uravnavanje količine vode v tleh.



Tenziometri so naprave, ki jih uporabljamo za merjenje matričnega potenciala vode. Delujejo v območju od 80 – 85 kPa (od zasičenega stanja z vodo do 2,9 pF), kar pomeni, da delujejo na mokrem območju vodno retenzijske krivulje in niso uporabni za ugotavljanje vodnega stresa oziroma merjenje statusa vode v suhih tleh.

## 5 LITERATURA

- Adam, G. 2004. Primerjava različnih naprav za posredno merjenje volumskega deleža vode v tleh, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, 48 s.
- Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. Bureau of Soils Bulletin, USDA 38: 1–61.
- Gardner, W., Israelsen, O.W., Edlesfsen, N.E. Clyde, D. 1922. The capillary potential function and its relation to irrigation practice. Povzetek. Phys. rev. 20:196.
- Hillel, D. 1998 Environmental Soil Physics. Academic Press, 771 s.
- Klute, A., ed. 1986. Methods of soil analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods – Agronomy Monograph no. 9, American Society of Agronomy, SSSA, 1188 s.
- Livingston, B.E. 1908. A method for controlling plant moisture. Plant World 21: 202 – 208.
- Topp, G.C., Ferré, P.A. (TY) 2002. The Soil Solution Phase: Water Content. V: Dane, J.H., Topp, C.G. (Ur.). Methods of Soil Analysis, pt. 4.: Physical Methods. Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, Wisconsin, USA, s. 417-545.
- Kovačič, E. 1966. Hidrotehnične melioracije II. del, Tla in voda, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG, 222 s.
- Or, D. 2001. Who Invented the Tensiometer? Soil Sci. Soc. Am. J 65:1-3.
- Pintar, M. 2006 Osnove namakanja s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v zahodni, osrednji in južni Sloveniji . MKGP, Ljubljana 55 s.
- Pintar, M. 2006 Študijsko gradivo pri predmetu: Melioracije (visokošolski strokovni študij). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo.
- Tekinel, O.; Çevik, B. 1993. Recent developments in greenhouse crop irrigation in the Mediterranean region. 2nd ISHS Symposium on Protected Cultivation of Solanacea in Mild Winter Climates, 13–16 Apr, Çukurova University, Adana, Turkey. International Society for Horticultural Science, Çukurova University, Adana, Turkey. 92:12–32.
- Topp, G.C., Ferré, P.A. 2002. The Soil Solution Phase: Water Content. V: Dane, J.H., Topp, C.G. (Eds.). Methods of Soil Analysis, pt. 4.: Physical Methods. Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, Wisconsin, USA, s. 417-545.
- Young, M. H., Sisson, J.B. 2002. Tensiometry. V: Methods of soil analysis. Dane J. H., Topp G. C. 2002 (ur.). Wisconsin, Madison, Soil Sci. Soc. Am. s. 575 – 608.
- Zupanc V., Pintar M. 2001. Melioracije in urejanje kmetijskih zemljišč, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, (gradivo za vaje) 66 s.