ANALÝZA POKLESU HLADINY PODZEMNÍ VODY NA SVAHU

Jirka Pavlásek

Pro stanovení výšky a průběhu infiltrace na mělkých svažitých půdách je důležité znát hloubku hladiny podzemní vody. Její hloubku v jednotlivých částech svahu jsme schopni určit, pokud známe její tvar. Tvar hladiny podzemní vody na svahu lze stanovit z Boussinesqových rovnic. Při analýze výsledků poklesu hladiny podzemní vody na zadešťovacím modelu byla stanovena metoda pro výpočet změn tvaru hladiny po ukončení srážkové události.

Klíčové slova: hladina podzemní vody

For estimation of infiltration on shallow steep soils is important to know the groundwater table height. We can estimate this height in individual part of slope if we know the shape of water table. Shape of groundwater table on slope we can derive from Boussinesq's equations. By the analysis results of water table drawdown on rainfall simulator were estimated method for computation of groundwater table change after end of rainfall event.

Key words: groundwater table

ÚVOD

Základní rovnice pro řešení drenážní soustavy na svahu odvodil Boussinesq v roce 1877 a 1904. V prvním případě uvažoval, že proudnice jsou rovnoběžné s nepropustným podložím a proto i potenciál je konstantní v rovině kolmé na nepropustnou vrstvu. V druhém případě uvažoval, že v mírnějších svazích lze předpokládat horizontální proudění vzhledem k malému sklonu nepropustného podloží. Tento předpoklad byl potvrzen Townerem (1975), když porovnával výsledky s analogickým modelem.

Lesaffre (1987) odvodil rovnice pro ustálené proudění pro obě Boussinesqovy aproximace a po úpravě získal shodné řešení pro oba případy ve tvaru:

$$\frac{d}{du}\cdot\left(h\cdot\frac{dh}{du}-2\cdot\sigma\cdot h\right)+1=0 \qquad (1)$$

kde: h výška hladiny podzemní vody (m)

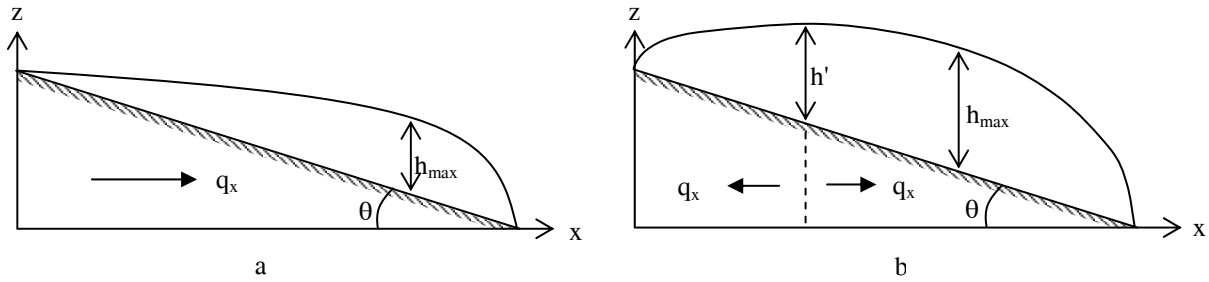
$$u=\sqrt{P/k}\cdot x \qquad (2)$$

$$\sigma=\frac{s\cdot(1-P/k)}{2\cdot\sqrt{P/k}} \quad \text{pro Boussinesqovu první aproximaci} \qquad (3a)$$

$$\sigma=\frac{s}{2\cdot\sqrt{P/k}} \quad \text{pro Boussinesqovu druhou aproximaci} \qquad (3b)$$

kde: s svah = tan (θ)
P přítok na hladinu podzemní vody ($m.s^{-1}$)
k nasycená hydraulická vodivost ($m.s^{-1}$)
x vzdálenost na ose x (m)

Henderson a Wooding (1964) a Wooding a Chapman (1966) poznamenávají, že při řešení proudění mezi drény se tvar hladiny podzemní vody mění při podle směru proudění. Při řešení rovnice 1 nastává tato změna při hodnotě $\sigma = 1$. Při hodnotách $\sigma < 1$ je proudění rozděleno mezi oba drény, při hodnotách $\sigma > 1$ proudí voda pouze ke spodnímu drénu – obr.1.



Obr.1. Proudění podzemní vody mezi dvěma drény pro Boussinesqovu první aproximaci:
a - $\sigma > 1$ voda proudí pouze ke spodnímu drénu
b - $\sigma < 1$ voda proudí k hornímu i spodnímu drénu

Fig.1. Groundwater flow between two drains for Boussinesq's first approximation:
a - $\sigma > 1$ water flow only towards lower drain
b - $\sigma < 1$ water flow towards upper and lower drain

METODIKA

Teorie Proudění na svahu

Pokud chceme řešit proudění podzemní vody na svahu předpokládáme, že vzdálenost horního a dolního konce hladiny není konstantní, ale se snižujícím se maximem se pohybuje se svahu směrem k dolnímu okraji svahu. Po ukončení srážkové události postupně ustává infiltrace a tím i přítok na hladinu podzemní vody. S poklesem hladiny se zkracuje vzdálenost mezi horním a dolním koncem hladiny podzemní vody.

Předpokladem řešení je, že hladina podzemní vody si zachovává svůj tvar, který je ovlivněn pouze sklonem svahu. Tento tvar je odvozen za předpokladu, že na hladinu podzemní vody nepřitéká žádná voda a tudíž na jejím horním konci voda neproudí. Pro splnění této podmínky musí mít v tomto místě hladina nulový sklon. Při analýze tvaru hladiny pomocí rovnice 1 zjistíme, že takovýto tvar má hladina pro hodnotu $\sigma = 1$.

Integrací rovnice 1 (tvar pro druhou Boussinesqovu aproximaci) a následnou úpravou pro hodnotu $\sigma = 1$ získáme implicitní řešení výšky hladiny podzemní vody ve tvaru:

$$x = \frac{h_D - \frac{s}{2}}{\frac{h}{x} - \frac{s}{2}} \cdot \exp\left[\frac{s}{2} \cdot \frac{h_D - \frac{h}{x}}{\left(\frac{h}{x} - \frac{s}{2}\right)\left(h_D - \frac{s}{2}\right)} \right] \cdot L \qquad (4)$$

kde:
- x vzdálenost ve směru osy x (m)
- h výška hladiny podzemní vody (m)
- h_D výška hladiny podzemní vody na dolním konci svahu(m)
- s sklon nepropustného podloží
- L vzdálenost mezi horním a dolním koncem hladiny podzemní vody (m)

Po analýze počátečního stavu (konec přítoku na hladinu) se uvažuje stálý tvar hladiny podzemní vody odvozený pro daný svah pomocí rovnice 4. Vzdálenost mezi horním a dolním koncem hladiny se mění rychlostí nasycené hydraulické vodivosti půdního materiálu dle vztahu:

$$L(t) = L - t.k \qquad (5)$$

kde: $L(t)$ vzdálenost mezi horním a dolním koncem hladin podzemní vody (m)
L počáteční vzdálenost mezi horním a dolním koncem hladin podzemní vody (m)
t čas od konce přítoku vody na hladinu podzemní vody (s)
k nasycená hydraulická vodivost ($m.s^{-1}$)

Laboratorní experiment

Pro studii proudění podzemní vody na svahu byly použity data z fyzikálního modelu s parametry, které uvádí Klerk (1992). Dešťový simulátor použitý pro laboratorní simulaci je umístěn v hydraulické laboratoři Zemědělské univerzity ve Wageningenu v Holandsku a byl postaven Technickým a fyzikálním servisem zemědělské university.

Zkoumaný půdní materiál je umístěn v kontejneru o rozměrech 5,8 x 2,5 x 0,55 m. Tento kontejner lze naklánět v rozmezí 0 – 22 % pomocí hydraulického mechanizmu. Nad kontejnerem ve výšce 2,44 m jsou umístěny čtyři žlaby, každý se třemi tryskami pro zadešťování. Intenzita zadešťování je určována frekvencí se kterou se trysky pohybují nad otvory žlabů. Tato frekvence je elektronicky regulovaná programovatelnou kontrolní jednotkou.

Při experimentu byl půdní materiál na svahu 10 % o průměrné hydraulické vodivosti 0,0276 $m.min^{-1}$ zadešťován do doby, kdy se stabilizovala hladina podzemní vody na určité úrovni a vzniklo ustálené proudění. Po dosažení ustáleného proudění probíhalo zadešťování ještě po dobu 12 hod. Přibližně po této době se vypnul dešťový simulátor a pokles hladiny byl automaticky snímán tenzometry rozmístěnými po třech v pěti řadách.

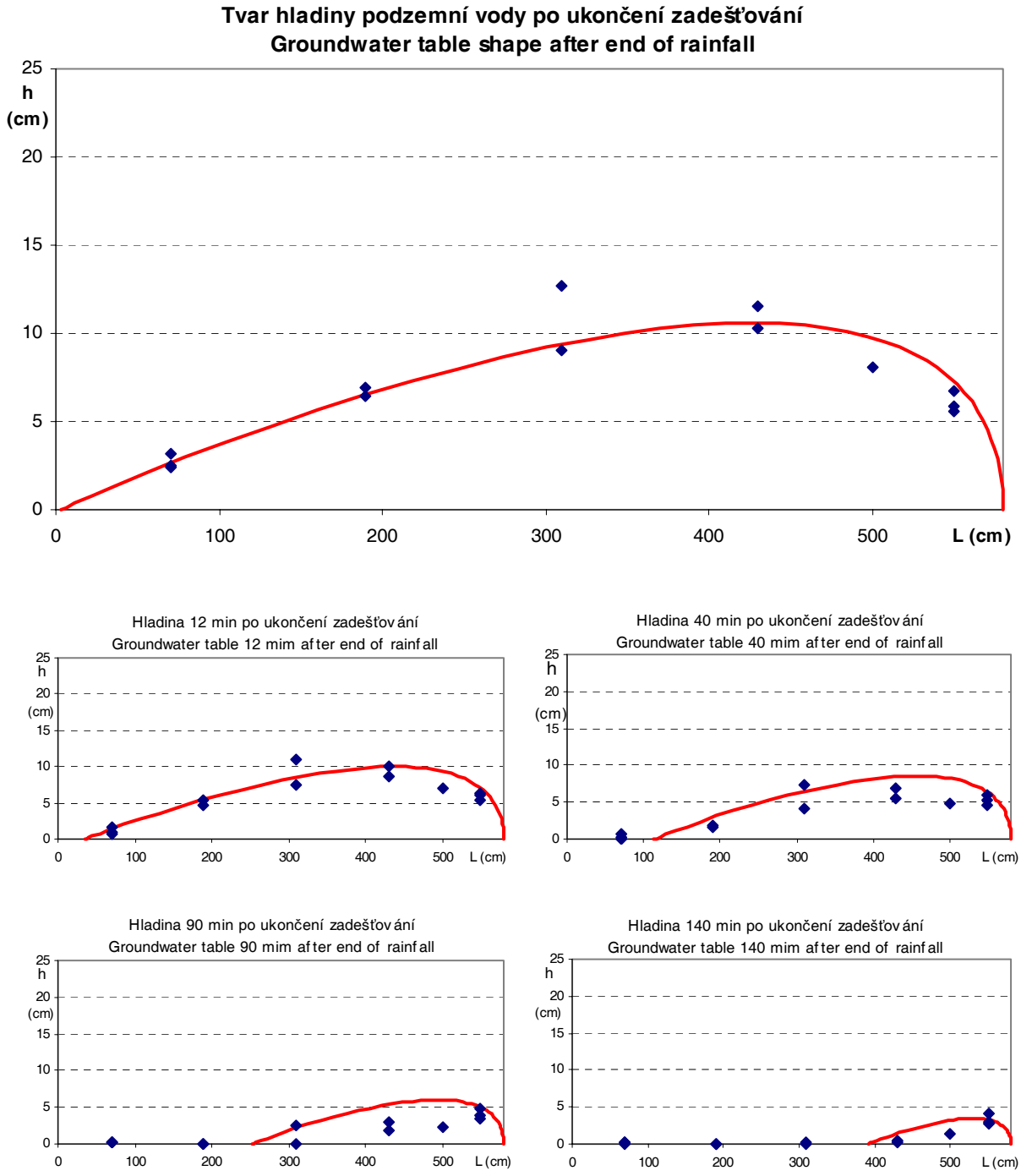
Při vyhodnocování dat z experimentu byly vyloučeny data nefunkčních nebo chybně měřících tenzometrů a výška hladiny byly kalibrovány pro každý tenzometr zvlášť.

Porovnání výsledků

Výpočet tvaru hladiny byl proveden v programu Microsoft® Excel 2000 a hodnoty poměru h/x v rovnici 4 byly voleny z intervalu $(0;s_o)$ s krokem 1/50. Při výpočtu byl půdní materiál uvažován jako homogenní a isotropní. Výška hladiny na dolním konci svahu (h_D) se zvolila rovna nule.

Platnost odvozeného postupu byla ověřována na svahu o sklonech 5 %, 10 % a 18 %. Jako počátek pro výpočet byl zvolen okamžik, kdy se hladina na horním okraji kontejneru začala posouvat směrem k dolnímu konci.

VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr.2. Pokles hladiny podzemní vody po ukončení zadešťování
(sklon svahu s = 10 %, nasycená hydraulická vodivost k = 0,0276 m.min^{-1})
body – výška hladiny snímaná tenzometry
plná čára – tvar hladiny podzemní vody vypočtený pomocí rovnic 4 a 5

Fig.2. Groundwater table drawdown after end of rainfall
(slope of hillside s = 10 %, saturated hydraulic conductivity k = 0,0276 m.min-1)
points – groundwater table level read by tesometers
solid line – groundwater table shape computed with equations 4 and 5

I když byly data z tenzometrů kalibrovány pro každý přístroj zvlášť, byly rozdíly v naměřených hodnotách pro stejnou vzdálenost od horního okraje až 30 %. Tyto chyby mohly být způsobeny jednak nepřesností přístrojů, která se pro dané přístroje pohybuje kolem 10 %, ale také nehomogenitou materiálu, kterým byl kontejner naplněn.

Výsledky získané pomocí rovnic 4 a 5 pro sklon nepropustného podloží 10 % jsou znázorněny na obr. 2. Současně s vykreslením hladiny podzemní vody jsou zde vykresleny i hodnoty naměřené tenzometry při laboratorním experimentu. Výsledky se sklonů 5 % a 18 % jsou obdobné. Chování hladiny podzemní vody potvrzují teoretický předpoklad řešení uvedený v metodice. Tento předpoklad je nutné ověřit i u materiálů s nižší hodnotou nasycené hydraulické vodivosti.

Modelování poklesu hladiny bylo provedeno pouze s použitím hodnot sklonu svahu, nasycené hydraulické vodivosti a počáteční vzdálenosti horního a dolního konce hladiny podzemní vody. Ve výpočtu nebyla použita hodnota efektivní pórovitosti. Pro výpočet odtoku podzemní vody je však nutné tuto hodnotu použít.

ZÁVĚR

Na základě druhé Boussinesqovy aproximace byl odvozen vztah pro modelování poklesu hladiny podzemní vody na svahu po přítoku vody na hladinu podzemní vody. Základem tohoto řešení je, že hladina podzemní vody si zachovává svůj tvar, který je určen pouze sklonem svahu. Pokud není žádný přítok na hladinu, pohybuje se horní konec hladiny směrem se svahu rychlostí koeficientu nasycené hydraulické vodivosti a úměrně tomuto koeficientu se snižuje i maximální výška hladiny nad nepropustným podložím.

Při porovnání výsledků z laboratorního experimentu a hodnot vypočtených pomocí rovnic 4 a 5 můžeme konstatovat, že vypočtené hodnoty vystihují chování hladiny podzemní vody a to i přesto, že k výpočtu nebyla použita efektivní pórovitost.

Literatura

Henderson, F. M., Wooding, R. A. (1964): Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration. Journal of Geophysical Research, 69 (8), 1531-1540.

Klerk, F. R. (1992): The Programmable Rainfall Simulator. Wageningen Agricultural University.

Lesaffre, B. (1987): Analytical formulae for traverse drainage of sloping lands with constant rainfall. Irrigation and Drainage System, 1 (1), 105-121.

Towner, G. D. (1975): Drainage of groundwater resting on a sloping bed with uniform rainfall. Water Resources Research, 11 (1), 144-147.

Wooding, R. A., Chapman, T. G. (1966): Groundwater flow over a sloping impermeable layer, 1. Applications of the Dupuit-Forchheimer assumption. Journal of Geophysical Research, 71 (12), 2895-2902.

Autor

Jirka Pavlásek, Katedra vodního hospodářství, Fakulta lesnická a environmentální ČZU Praha, Kamýcká 1176, 165 21 Praha 6 – Suchdol, pavlasek@fle.czu.cz