

NUMERICKÁ SIMULACE FUNKCE REGULAČNÍ DRENÁŽE

JIŘÍ ŠIMŮNEK, TOMÁŠ VOGEL, MOJMÍR SOUKUP

V článku je dokumentována možnost použití numerického modelu založeného na dvourozměrném řešení Richardsovy rovnice k simulaci funkce regulační drenáže. Výsledky terénního experimentu a jeho počítačová simulace jsou srovnány na základě měřených a modelem předpovězených hladin podzemní vody. Bylo dosaženo vysoké shody v blízkosti drénu. V ose mezi drény byla shoda nižší. Rozdílly jsou vysvětleny variabilitou půdních vlastností. Dále jsou prezentovány vybrané informace získané numerickou simulací daného problému.

Jiří Šimůnek, Tomáš Vogel, Mojmír Soukup: Numerical Simulation of the Function of Regulation Drainage. *Vodohosp. Čas.*, 38, 1990, 6; 25 refs, 12 figs, 1 table.

The possibility of using the simulation model based on the numerical solution of Richard's equation in connection with problems of regulation drainage is documented. Results of measured experiment and its computer simulation are compared on the basis of measured and modeled groundwater levels. The agreement in the vicinity of the drain was high. In the center between the drains the predictability of groundwater level was lower. The differences are explained by variability of soil properties. Other informations obtained by numerical simulation of regulation drainage are discussed.

KEY WORDS: Finite Elements, Richards Equation, Drainage.

1. Úvod

Klasické odvodňovací systémy fungují prakticky bez možnosti regulace. Kvalitativně novým typem melioračního opatření jsou řízené drenážní systémy, které umožňují nejen optimalizaci vlhkostního režimu půd, ale i racionální hospodaření s vodou. Při budování takových systémů připadají v úvahu především dvě možnosti: drenáž s ovládaným odtokem (tzv. retardanční drenáž a regulační drenáž). Naše studie se zaměří na druhý z obou typů.

Regulační drenáž je tvořena systémem drénů, umožňujících ovládnutí úrovně hladiny podzemní vody. Změnami polohy hladiny podzemní vody se docílí optimalizace vlhkostního režimu v kořenové zóně půdy s ohledem na růstovou

Ing. Jiří Šimůnek, Ing. Tomáš Vogel, Ing. Mojmír Soukup, Výzkumný ústav pro zárodnění zemědělských půd, Žabovřeská 250, 156 00 Praha 5-Zbraslav.

fázi rostliny a vývoj klimatických a hydrologických faktorů. K tomu se využívá možnost dvoustranné funkce regulačního drénu, umožňující vyvolat nejen drenážní proudění podzemní vody z půdy do drénu, ale i naopak tlakovou infiltraci vody z drénů do půdního prostředí. Pokud je hladina podzemní vody vyšší než hladina optimální, regulační drén plní funkci odvodňovací a pracuje jako klasická drenáž. Když je do systému přivedena voda pod tlakem, který je vyšší než tlak v okolním půdním prostředí, začne probíhat proces tlakové infiltrace vody z drénů do půdy, v důsledku toho začne stoupat úroveň hladiny podzemní vody až do dosažení rovnovážných poměrů.

Klasický přístup k popisu obou funkcí regulační drenáže spočívá v řešení Laplaceovy, resp. Boussinesqovy rovnice. Na řešení obou rovnic bylo použito široké spektrum metod od konformní transformace prostřednictvím metody hodografu až po metody analogií (štěrbinový model HELE-SHAW) (např. Hooghoudt [12], Ernst [8], Childs [4], van Schilfgaarde [21], Dvořák [7], Youngs [25], Lovel a Youngs [13]). Většina autorů se však věnuje především odvodňovací fázi. Všechny fáze provozního cyklu regulační drenáže v Československu řešil Radčenko [17, 18, 19].

Použití Laplaceovy nebo Boussinesqovy rovnice ovšem vyžaduje přijetí řady zjednodušujících předpokladů, jejichž použití je diskutabilní (Vachaud et al. [20]). V případě Laplaceovy rovnice se jedná především o předpoklad, že pohyb je omezen pouze na nasycenou oblast a případná dotace přes oblast nenasyčené zóny je chápána jako „black-box“ systém. Kapacitní koeficient v rovnici pohybu hladiny, který je silně závislý na poloze hladiny podzemní vody vzhledem k půdnímu povrchu (Childs [3]), bývá chybně uvažován jako drenážní porovitost. V případě Boussinesqovy rovnice k těmto předpokladům ještě přistupuje předpoklad Dupuita — Forchheimerova o dostatečně malém zakřivení hladiny podzemní vody, umožňující předpokládat konstantní tlakovou výšku na jakékoli vertikále.

V případě pohybující se hladiny podzemní vody a současného proudění v nasycené i nenasyčené zóně je nutné uvažovat obě oblasti jako celek, aby bylo možné lépe ocenit jejich vzájemnou vazbu a získat měnící se profil vlhkosti a tlaku v nenasyčené zóně. Exaktní řešení tohoto problému je možné získat aplikací Richardsovy rovnice pro celou oblast proudění zahrnující obě zóny nasycení (Neuman [14], Vogel [22], Vogel et al. [23]).

Aby bylo možné popsat problém v celé jeho komplexnosti zahrnující nejen rozdělení oblasti proudění na dvě zóny, ale též heterogenitu a anizotropii půdního profilu a nestacionární charakter okrajových podmínek, jsou i v drenážní teorii v poslední době stále častěji používány numerické metody řešení Richardsovy rovnice (Fipps et al. [10], Barcelo a Nieber [1, 2], Nieber a Walter [15], Nour el-Din et al. [16], Vogel et al. [23]).

2. Matematický popis

Matematický model

Dvourozměrné izotermní darcyovské proudění vody v částečně nasyceném pevném pórovitém prostředí při zanedbání vlivu plynné fáze je možno popsat modifikovanou Richardsovou rovnicí:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(h) \left[K_{xx}^A \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xz}^A \frac{\partial h}{\partial z} + K_{zz}^A \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(h) \left[K_{xz}^A \frac{\partial h}{\partial x} + K_{zz}^A \frac{\partial h}{\partial z} + K_{zz}^A \right] \right\} - S(h), \quad (1)$$

kde h je tlaková výška [L], K — hydraulická vodivost [L/T], C — specifická vodní kapacita [L⁻¹], S — propadový (extrakční) člen [T⁻¹], x a z jsou prostorové souřadnice [L], t je čas [T]. Předpokládá se, že pro hydraulickou vodivost platí:

$$K = K(h)K^A, \quad K(h) = K_s K_r(h), \quad (2)$$

kde K_s je nasycená hydraulická vodivost, $K_r(h)$ — relativní nenasyčená hydraulická vodivost a K^A je tenzor anisotropie (Vogel [22]).

Hydraulické vlastnosti pórovitého prostředí jsou zastoupeny dvojicí hydraulických charakteristik $K(h)$ a $\vartheta(h)$. Hystereze těchto funkcí se neuvažuje. Pro analytické vyjádření obou charakteristik jsou použity vztahy navržené van Genuchtenem [11] a upravené Voglem [22]:

$$\vartheta(h) = \vartheta_a + (\vartheta_m - \vartheta_a) [1 + (-ah)^n]^{-m} \quad \text{pro } h < h_s, \quad (3)$$

$$\vartheta(h) = \vartheta_s \quad \text{pro } h \geq h_s,$$

$$K(h) = k_r K_r(\vartheta(h)) \quad \text{pro } h \leq h_k, \quad (4)$$

$$K(h) = K_k + (h - h_k)(K_s - K_k)/(h_s - h_k) \quad \text{pro } h \in (h_k, h_s),$$

$$K(h) = K_s \quad \text{pro } h \geq h_s,$$

kde

$$K_r(\vartheta) = \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_k} \right)^{1/2} \left[\frac{F(\vartheta_r) - F(\vartheta)}{F(\vartheta_r) - F(\vartheta_k)} \right]^2 \frac{K_k}{K_s}, \quad (5)$$

$$F(\vartheta) = \left[1 - \left(\frac{\vartheta - \vartheta_a}{\vartheta_m - \vartheta_a} \right)^{1/m} \right]^m, \quad (6)$$

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1,$$

$$\vartheta = (\vartheta - \vartheta_r)/(\vartheta_s - \vartheta_r),$$

$$\vartheta_k = (\vartheta_k - \vartheta_r)/(\vartheta_s - \vartheta_r),$$

a kde ϑ , a ϑ_s označuje reziduální a nasycenou vlhkost, h_s — vstupní hodnota vzduchu, ϑ_k a h_k jsou hodnoty vlhkosti a tlaku odpovídající experimentálně určené hodnotě nenasyčené vodivosti K_k . Jestliže $\vartheta_a = \vartheta_r$, $\vartheta_m = \vartheta_k = \vartheta_s$ a $K_k = K_s$, pak se vztahy (3) — (6) redukuje na původní tvar van Genuchtenův [11].

Extrakční člen S v rovnici (1) je definován jako objem vody odebraný za jednotku času z jednotkového objemu kořenové zóny v důsledku transpirace vegetačním krytem. Feddes et al. [9] zavedli pro extrakční člen vyjádření:

$$S(h) = a(h)S^*, \quad (7)$$

kde $a(h)$ je předepsaná funkce sáního tlaku v půdě a S^* — potenciální bodová intenzita odběru vody v kořenové zóně. $a(h) \in \langle 0, 1 \rangle$ je redukční funkce, pro kterou platí: $a(h) = 1$ mezi h_2 a h_3 , $a(h) = 0$ při $h < h_4$ a $h > h_1$ a probíhá lineárně mezi h_4 a h_3 a mezi h_2 a h_1 ; h_1 je bod, při jehož dosažení ustává odběr vody kořeny vlivem nedostatečného obsahu vzduchu; h_4 je bod vadnutí; h_2 a h_3 vymezují tlakový interval odpovídající optimálnímu rozpětí vlhkosti z hlediska maximální transpirace rostlin. Vogel [22] vyjádřil S^* ve tvaru

$$S^* = \beta(x, z) T^* \quad (8)$$

kde T^* je potenciální transpirace [L/T] a $\beta(x, z)$ je normalizovaná funkce popisující rozdělení kořenové extrakce uvnitř kořenové zóny [1/L²]. Pro skutečnou intenzitu kořenové extrakce potom platí:

$$S(h, x, z) = a(h, x, z) \beta(x, z) T^*. \quad (9)$$

Pro řešení rov. (1) je nezbytná znalost počátečního stavu a okrajových podmínek. Jejich obecný popis je možné nalézt v lit. Vogel et al. [23]. Konkrétní formulace počátečních a okrajových podmínek — viz. kap. 4.

Numerický model

Rovnice (1) byla řešena numericky. Pro prostorovou diskretizaci byla použita metoda konečných prvků a pro časovou diskretizaci metoda konečných diferencí, plně implicitní schéma. Podrobný popis numerického řešení dvourozměrného problému obsahuje zpráva Vogel [22] a Vogel et al. [23]. Výsled-

ný systém časově závislých obyčejných diferenciálních rovnic s nelineárními koeficienty má tvar:

$$\left(A_{nm}(t_j) + \frac{F_{nm}(t_j)}{t} \right) h_m(t_j) = \frac{F_{nm}(t_j)}{t} h_m(t_{j-1}) + Q_n(t_j) - B_n(t_j) - D_n(t_j) \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

kde

$$A_{mm} = \sum_E \frac{1}{4A_E} K [K_{xx}^A b_m b_n + K_{xz}^A (c_m b_n + b_m c_n) + K_{zz}^A c_n c_m], \quad (11)$$

$$F_{nm} = \sum_E \frac{A_E}{12} (3C + C_n) \delta_{nm}, \quad (12)$$

$$B_n = \sum_E 0,5 K (K_{xz}^A b_n + K_{zz}^A c_n), \quad (13)$$

$$D_n = \sum_E \frac{A_E}{12} (3S + S_n), \quad (14)$$

$$b_m = z_n - z_k, \quad c_m = x_k - x_n. \quad (15)$$

Hodnoty s pruhem značí proměnnou průměrovanou přes daný element, δ_{nm} — Kroneckerovo delta a Q_n je předepsaný tok daným územem.

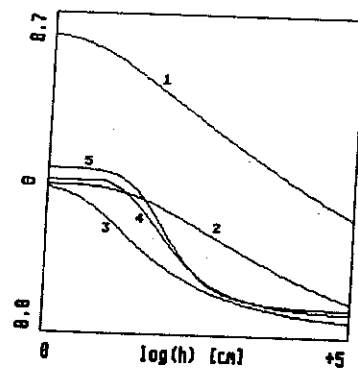
3. Popis experimentální plochy a objektu regulační drenáže

Experimentální plocha se nachází v prakticky rovinném území (sklon < 1 ‰) na přechodu terasového stupně Labe do měkkého reliéfu slinové pahorkatiny (Damašková et al. [5, 6]). Půdní pokryv je velmi komplikovaný, nevyrovnaný a mozaikovitý, vlastností půd se mění na krátké vzdálenosti. Geneticky je půdní pokryv tvořen převážně asociací pseudoglejů a oglejených rendzin. Půdotvorným substrátem jsou vrstvy čtvrtohorních vátych písků či terasových šterkopísků s podložím vápenitých nebo odvápněných zvětralin druhohorního slínu. Překryvný materiál je tvořen zpravidla střídáním málo propustných slabších či silnějších vložek, proplátek a hnízd jílovitého slínu v propustnějším písčitém materiálu. Tento propustný materiál tvoří prostorově souvislou zónu, která umožňuje šíření vlhkosti při závlaze. Spodní slíny v hloubce cca 1–2 m se místy zvedají až 50 cm pod povrch terénu, výjimečně zaklesají hlouběji.

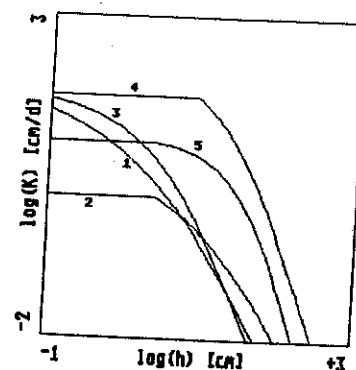
Regulační systém navržený AGP Praha závod Pardubice tvoří uzavřený systém. Odvodňovací fáze je umožněna přečerpáváním vody podobně jako u systému poldru. Síť paralelních drénů o rozchodu 8–16 m je opatřena regu-

lačními prvky, které ovládají výšku hladiny podzemní vody v systému v rozmezí 0,4–0,9 m pod terémem. Regulační drenáž je napojena na zdroj vody v horní vyrovnávací nádrži (700 m³), která je doplňována výtlačným řadem z dolní akumulací nádrže (rovněž 700 m³). Regulační drenážní skupina je z jedné strany při závlaze podporována vzdutím potoka a přilehlé kanálové sítě.

V regulované oblasti byly situovány dva řezu vybavené pozorovacími vrty kolmé na drény. Řez A—A' je umístěn ve středu oblasti a jsou v něm sledovány hladiny podzemní vody ve vzdálenosti 2 m od drénu a v polovině rozchodu. Řez B—B' je situován rovněž kolmo na drény, ovšem na rozhraní regulované oblasti v dosahu působnosti odvodňovacího drénu tak, aby byly zachyceny případné ztráty.



Obr. 1. Retenční křivky $h(\theta)$.



Obr. 2. Hydraulické vodivosti $k(h)$.

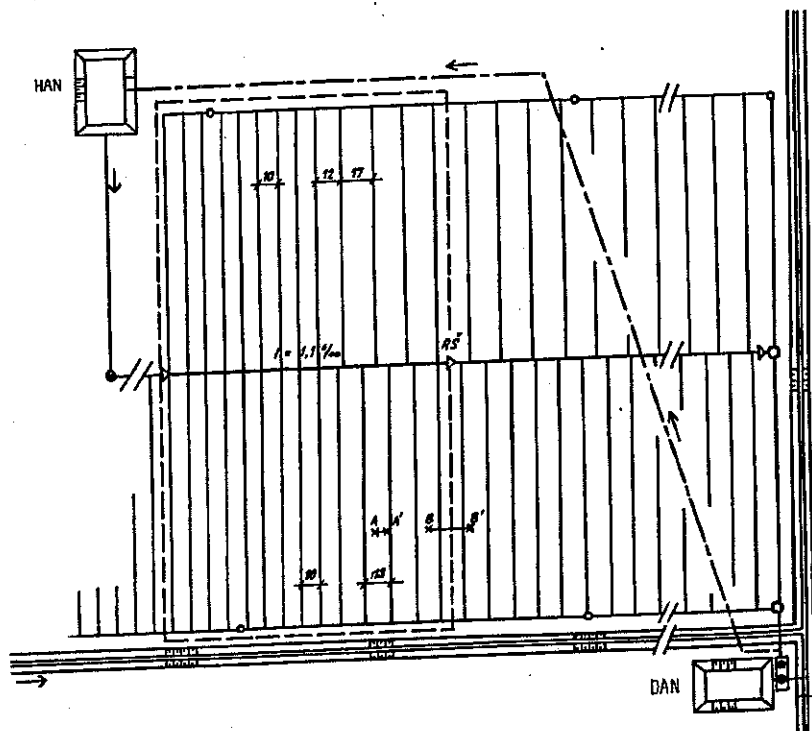
Tabulka 1. Parametry hydraulických vlastností (hl. [cm], a [cm⁻¹], K_r , K_s [cm d⁻¹])

č.	hl.	ϑ_r	$\vartheta_k = \vartheta_s$	ϑ_a	ϑ_m	a	n	$K_k = K_s$
1	0–35	0,326	0,658	-0,504	0,658	0,2034	1,043	252,0
2	-45	0,133	0,322	-0,221	0,325	0,0363	1,076	1,5
3	-75	0,045	0,324	0,016	0,324	0,1917	1,306	92,5
4	-100	0,054	0,331	0,045	0,344	0,0318	1,550	57,2
5	-110	0,057	0,357	0,057	0,358	0,0220	1,751	10,5

Protože bylo nemožné vystihnout přesně heterogenitu v celém profilu, pro výpočet byl použit „schematický profil“, skládající se ze šesti různých horizontů. Hydraulické charakteristiky jednotlivých horizontů jsou na obr. 1 a 2 a parametry jejich analytického vyjádření v tab. 1.

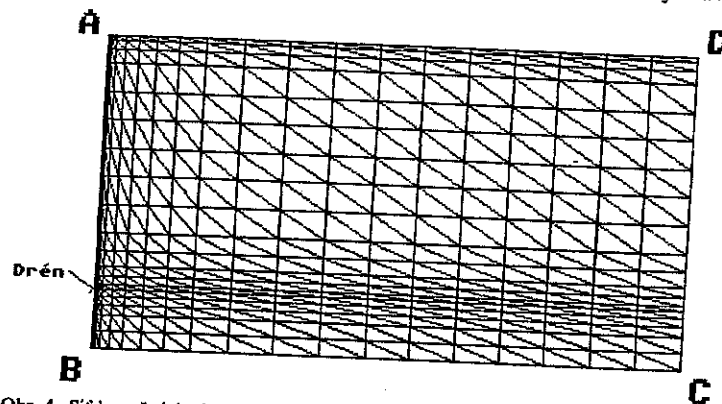
4. Výsledky numerické simulace a jejich diskuse

Byly provedeny dvě numerické simulace. První výpočet modeluje regulační cyklus délky 18 dnů v oblasti příčného řezu A—A' a druhý v oblasti řezu B—B' (obr. 3). Jelikož v prvním případě bylo možné předpokládat proudění osově symetrické kolem svislé osy procházející drénem a osy procházející středem mezi drény, bylo možné počítat pouze polovinu rozchodu. Oblast byla rozdělena na trojúhelníkové prvky se snahou o co nejpravdělnější síť a přitom o co nejmenší dělení v oblastech očekávaných nejvyšších rychlostí. Příklad sítě konečných elementů obsahující 400 uzlů a 722 prvků je na obr. 4. Na hranici AD byla uvažována okrajová podmínka ve formě normálových rychlostí. Tyto rychlosti se rovnají atmosférickým srážkám odpovídajícím reálně měřené meteorologické situaci. Transpirace rostlin byla simulována prostřednictvím extrakčního členu v 30cm kořenové zóně o parametrech redukční funkce extrakčního členu a : $h_1 = -10$ cm, $h_2 = -200$ cm, $h_3 = -800$ cm, $h_4 = -8000$ cm. Na hranicích AB, BC a CD byly uvažovány normálové rychlosti rovné nule, což odpovídalo buď nepropustné hranici (BC), nebo tokovému rozhraní na osách symetrie (AB, CD). Počáteční hladina podzemní vody byla uvažována 10 cm pod úrovní drénu a v nenasycené oblasti byl předpokládán rovnovážný stav.



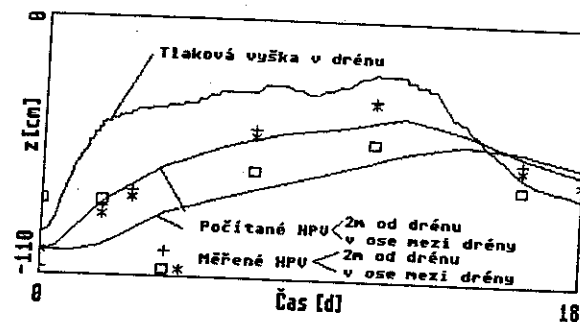
Obr. 3. Situace experimentální plochy; ——— hranice regulované plochy, - - - - - výtlačný řad, RŠ — regulační šachta, HAN — horní akumulční nádrž, DAN — dolní akumulční nádrž.

né meteorologické situaci. Transpirace rostlin byla simulována prostřednictvím extrakčního členu v 30cm kořenové zóně o parametrech redukční funkce extrakčního členu a : $h_1 = -10$ cm, $h_2 = -200$ cm, $h_3 = -800$ cm, $h_4 = -8000$ cm. Na hranicích AB, BC a CD byly uvažovány normálové rychlosti rovné nule, což odpovídalo buď nepropustné hranici (BC), nebo tokovému rozhraní na osách symetrie (AB, CD). Počáteční hladina podzemní vody byla uvažována 10 cm pod úrovní drénu a v nenasycené oblasti byl předpokládán rovnovážný stav.



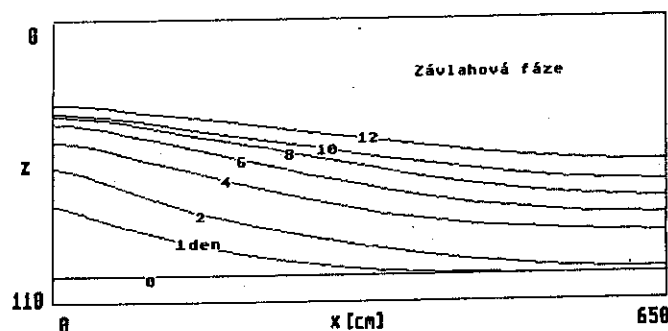
Obr. 4. Síť konečných elementů pro první simulaci.

Regulační drén byl modelován formou tlakového bodového zdroje, resp. propadu s předepsanou měřenou hodnotou tlaku. Velikost této hodnoty lze nalézt na obr. 5. Na tomto obrázku je také vykresleno srovnání mezi počítanými a měřenými hladinami podzemní vody. Plné čáry znázorňují počítané hladiny, bodové hodnoty měřené hladiny v pozorovacích vrtech. Z obr. 5 je zřejmé, že zatímco

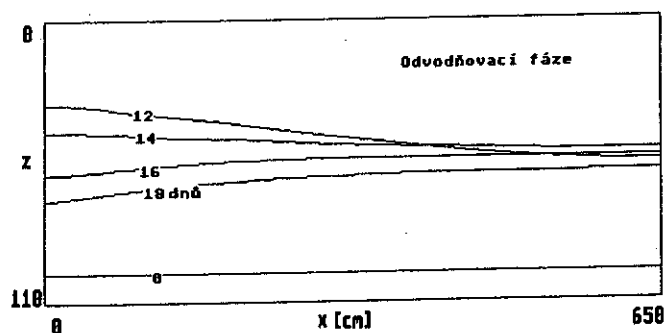


Obr. 5. Srovnání měřených a počítaných hladin podzemní vody.

ve vzdálenosti 2 m od drénu je vysoká shoda mezi hodnotami počítanými a měřenými, v ose mezi drény je shoda menší. V ose mezi drény byly k dispozici dvě měření ve vrtech. První pozorovací vrt se nacházel přímo v řezu A—A' (na obr. 5 znázorněn křížkem), druhý v oblasti řezu B—B' (obdélníček), ale ještě v části neovlivněné poklesem hladiny směrem k odvodňovacím drénům.



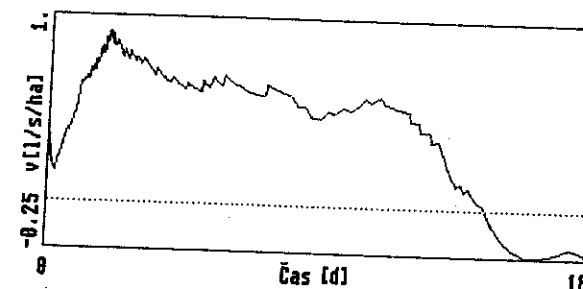
Obr. 6. Pohyb hladiny podzemní vody — závlahová fáze.



Obr. 7. Pohyb hladiny podzemní vody — odvodňovací fáze.

Na obr. 6 je vykresleno postupné stoupaní hladiny podzemní vody v půdním profilu během závlahové fáze. Na obr. 7 je znázorněna následující fáze. Za povšimnutí stojí, že zatímco v profilu v ose drénu dochází již po 12. dnu k poklesu hladiny (což odpovídá poklesu tlaku v regulačním drénu), v ose mezi drény hladina nadále stoupá, dosahuje nejvyšší hodnoty kolem 14. dne a až po 16. dnu se dostává na úroveň nižší než ve 12. dnu.

Zpravidla se regulační cyklus dělí na tři fáze, na fázi klesání hladiny podzemní vody, stoupaní hladiny a její udržování. Jedná se však o teoretické dělení. Odlišení jednotlivých fází ve skutečných provozních podmínkách je nesnadné. Např. z obr. 6 a 7 je zřejmé, že hladina podzemní vody v ose drénu vykazuje pouze nepatrné zvýšení mezi šestým a dvanáctým dnem, ale značný pohyb v ose mezi drény. Naproti tomu mezi dvanáctým a osmnáctým dnem, kdy dochází k výraznému poklesu hladiny v ose regulačního drénu, mezi drény nastávají pouze nevýznamné změny. Naše dělení na fázi odvodňovací a závlahovou je motivováno především snahou o přehlednější prezentaci výsledků a je určováno vzestupem, resp. poklesem tlaku v regulačním drénu.

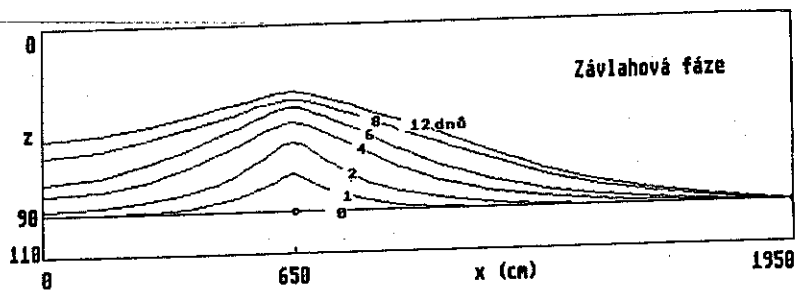


Obr. 8. Drenážní přítok/odtok.

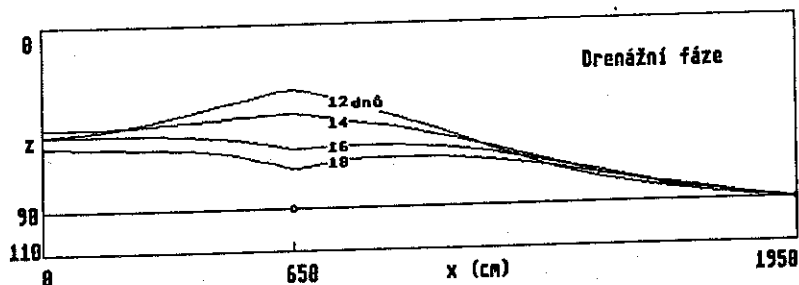
Na obr. 8 je vykreslen přítok z regulačního drénu do půdního profilu. Nevyrovnanost vypočteného přítoku s občasnými změnami je způsobena diskretizací tlakové podmínky v regulačním drénu. Plynulá křivka popisující změny tlaku v drénu byla rozdělena na nestejně velké intervaly (podle rychlosti změny tlaku), které byly charakterizovány konstantní hodnotou. Záporné hodnoty rychlosti přítoku v závěrečné fázi představují drenážní odtok z půdního profilu.

Druhá numerická simulace modeluje regulační cyklus na hranici regulované drenážní skupiny v dosahu klasického odvodňovacího drénu. Počítaná oblast znázorňující jeden a půl rozchodu drénu byla v tomto případě rozdělena na 1292 trojúhelníkových prvků a 702 uzlů. Tokové rozhraní bylo uvažováno v ose mezi regulačními drény a v ose odvodňovacího drénu. Na obr. 9 je vykresleno stoupaní hladiny podzemní vody v půdním profilu během závlahové fáze. Na obr. 10 je znázorněna následující odvodňovací fáze. V tomto případě byla počáteční hladina podzemní vody uvažována v úrovni drénů. Srovnáním obr. 6 a obr. 9 je zřejmé, že odvodňovací drén ležící mimo regulovanou oblast neovlivňuje významně oblast uvnitř regulované drenážní skupiny. Pouze přítok z hraničního regulačního drénu do půdního profilu je vyšší.

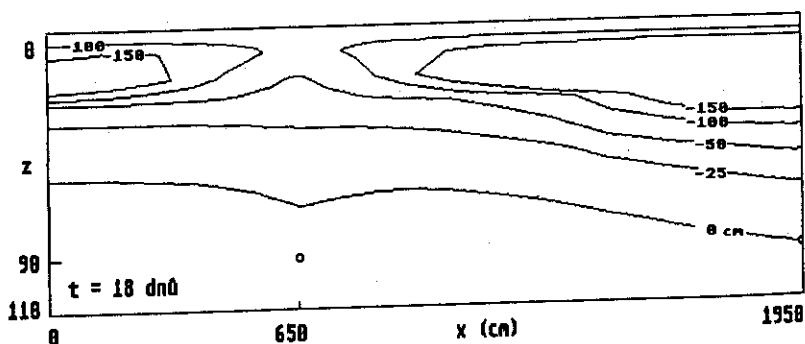
Na obr. 11, resp. 12 je vykreslen tlakový profil v půdním profilu na konci závlahové, resp. odvodňovací fáze. Vlivem transpirace došlo ke značnému



Obr. 9. Pohyb hladiny podzemní vody — závlahová fáze.

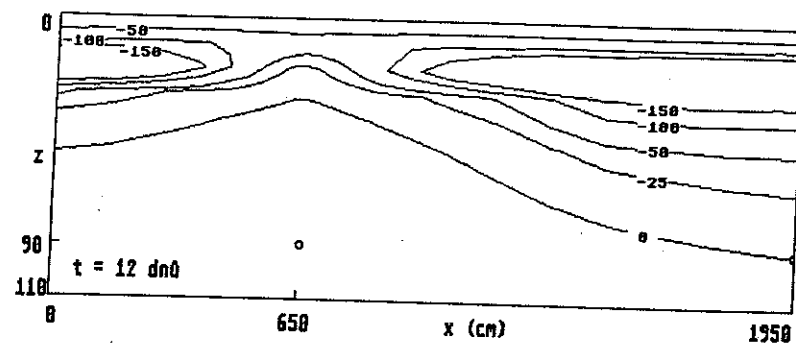


Obr. 10. Pohyb hladiny podzemní vody — odvodňovací fáze.



Obr. 11. Tlakový profil na konci závlahové fáze.

zvýšení sacího tlaku v kořenové zóně. Přestože během závlahové fáze dochází k značnému zvýšení hladiny podzemní vody, dotace kořenové zóny podzemní vodou je značně ztížena vlivem velmi málo propustné vrstvy v hloubce 35—45 cm pod povrchem. Malá hydraulická vodivost této vrstvy je kompenzována vysokým tlakovým gradientem v této části (levá část obr. 11).



Obr. 12. Tlakový profil na konci odvodňovací fáze.

Význam regulování hladiny podzemní vody lze nejlépe dokumentovat na hodnotách simulovaných sacích tlaků v kořenové zóně. Zatímco v oblasti ovlivňované regulací během celého počítaného období sací tlak v kořenové zóně nepřekročil hodnotu -300 cm, na konci simulovaného období vystoupila jeho hodnota nad odvodňovacím drénem na -600 cm.

Závěr

V článku je dokumentována možnost použití numerického simulačního modelu v souvislosti s problémy regulační drenáže. Výsledky měřeného experimentu a jeho počítačové simulace byly srovnávány na základě měřených a modelem předpovězených hladin podzemní vody. Přestože veškerá vstupní data popisující hydraulické vlastnosti půdního profilu byla měřena nezávisle na daném experimentu, bylo dosaženo dobré shody mezi měřenými a počítanými hodnotami (vyšší shoda v blízkosti drénů, nižší uprostřed mezi drény). Rozdíly je možné vysvětlit vysokou variabilitou půdních vlastností na experimentální ploše.

V další části jsou prezentovány vybrané informace, které lze numerickou simulací daného problému obdržet a jejichž prostřednictvím lze získat hlubší pochopení procesů probíhajících při regulaci vodního režimu.

Seznam symbolů

a	— parametr retenční křivky [L ⁻¹],
A_E	— plocha konečného elementu [L ²],
b_n, c_n	— pomocné souřadnicové funkce [L],
C	— hydraulická kapacita [L ⁻¹],
h	— tlaková výška [L],
h_k	— tlaková výška odpovídající nenasyčené vodivosti K_k [L],
h_s	— tlaková výška odpovídající vstupní hodnotě vzduchu [L],
K	— hydraulická vodivost [L T ⁻¹],
K^A	— tensor anizotropie [—],
K_r	— relativní hydraulická vodivost [—],
K_s	— nasycená hydraulická vodivost [L T ⁻¹],
K_u	— nenasyčená hydraulická vodivost [L T ⁻¹],
N	— počet uzlů,
n, m	— parametry retenční křivky [—],
S	— propadový (extrakční) člen [T ⁻¹],
S^*	— potenciální bodová intenzita propadu [T ⁻¹],
t	— čas [T],
T^*	— potenciální transpirace [L T ⁻¹],
x	— horizontální souřadnice [L],
z	— vertikální souřadnice [L],
α	— redukční funkce [—],
β	— distribuční funkce [—],
δ_{mn}	— Kroneckerovo delta [—],
θ	— objemová vlhkost [—],
θ_k	— objemová vlhkost odpovídající h_k [—],
θ_A, θ_m	— parametry retenční křivky [—],
θ_r	— residuální objemová vlhkost [—],
θ_s	— nasycená objemová vlhkost [—],
θ, θ_k	— efektivní objemová vlhkost [—].

LITERATURA

- [1] BARCELO, M. D.—NIEBER, J. L.: Simulation of natural soil pipes in a soil profile. *Am. Soc. Agric. Eng.*, Orlando, Fla. 1981.
- [2] BARCELO, M. D.—NIEBER, J. L.: Influence of soil pipe networks on catchment hydrology. *Am. Soc. Agric. Eng.*, Madison, Univ. of Wisc. 1982.
- [3] CHILDS, E. C.: A treatment of the capillary fringe in the theory of drainage. II. Modifications due to an impermeable sub-stratum. *J. Soil Sci.*, 1960, 11, 293—304.
- [4] CHILDS, E. C.: An introduction to the physical basis of soil water phenomena. London, John Wiley & Sons 1969.
- [5] DAMAŠKOVÁ, H. et al.: Návrh základních parametrů řešení a vypracování modelu řešení. [Závěrečná zpráva.] Praha, VÚ ZPP 1986.
- [6] DAMAŠKOVÁ, H. et al.: Podklady pro řešení modelu a návrh výpočetních postupů. [Závěrečná zpráva.] Praha, VÚ ZPP 1988.
- [7] DVORÁK, P.: Podklady pro navrhování odvodňovacích staveb. Praha, ČVUT 1981.

- [8] ERNST, L. F.: Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. *Onderz. Versl. Landbouwk. 1962.*
- [9] FEDDES, R. A.—KOWALIK, P. J.—ZARADNY, H.: Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs*, Wageningen, Pudoc 1978.
- [10] FIPPS, G.—SKAGGS, R. W.—NIEBER, J. L.: Drains as a boundary condition in finite elements. *Wat. Resour. Res.*, vol. 22, 1986, no. 11, s. 1613—1621.
- [11] GENUCHTEN, R., van: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model. *Wat. Resour. Program. Dept. of Civil Engineering*, N. J., Princeton University 1978.
- [12] HOOGHOUTD, S. B.: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond. 7. Algemeene beschouwing van het probleem van de detail ontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen. *Onderz. Versl. Landbouwk. 1940.*
- [13] LOVEL, C. J.—YOUNGS, E. G.: A comparison of steady-state landdrainage equations. *Agric. Wat. Managem.* 1984, 9, 1—21.
- [14] NEUMAN, S. P.: Saturated-unsaturated seepage by finite elements. *Proc. ASCE, J. Hydraul. Div.*, 99, HY12, 1973, 2230—2250.
- [15] NIEBER, J. L.—WALTER, M. F.: Two-dimensional soil moisture flow in a sloping rectangular region: Experimental and numerical studies. *Wat. Resour. Res.*, Vol. 17, 1981, No. 6, s. 1722—1730.
- [16] NOUR EL-DIN, M. M.—KING, I. P.—TANJI, K. K.: Salinity management model: II. 1- and 2-D applications. *J. of Irrig. and Drain. Eng.*, 113, 4, 1987, 454—468.
- [17] RADČENKO, I.: Nestacionárne drenážne prúdenie podzemnej vody a jeho riešenie na hydraulickom kontinuálnom analógone. [Kandidátska dizertácia.] Bratislava, ÚHH SAV 1970.
- [18] RADČENKO, I.: Neustálené drenážne prúdenie v podmienkach regulácie úrovne hladiny podzemnej vody drenážnym systémom. *Vodohosp. Čas.*, 19, 1971, č. 2, s. 146—179.
- [19] RADČENKO, I.: Tlaková infiltrácia vody z drenov do pôdneho prostredia. *Vodohosp. Čas.*, 22, 1974, č. 4, s. 385—401.
- [20] VACHAUD, G.—VAUCLIN, M.—HAVERKAMP, R.: Towards a physically based analysis of transient water table flow problems. IFIP Working conference on modelling and simulation of water resources systems. Gent, North Holland Publishing Company 1975.
- [21] SCHILFGAARDE, J., van: Drainage for agriculture. Monograph 17, American Society of Agronomy, Madison, Wisc. 1974.
- [22] VOGEL, T.: SWMII — Numerical model of two-dimensional flow in a variability saturated porous medium. Research report no. 87, Dep. of Hydraulics and Catchment Hydrology, Wageningen, Agricultural University 1987.
- [23] VOGEL, T.—ŠIMŮNEK, J.—ŠÍR, M.—DAMAŠKOVÁ, H.: Numerické modelování pohybu vody v půdě: Dvourozměrné řešení. [Výzk. zpráva VI-3-7/03/01.] Praha, VÚZPP 1987.
- [24] YEH, H. J.—KING, L. G.: Transient subsurface drainage on sloping irrigated land. *Am. Soc. Agric. Eng.*, Utah. Logan 1978.
- [25] YOUNGS, E. G.: The contribution of physics to land drainage. *J. Soil Sci.*, 34, 1983, 1—21.

Do redakcie došlo 21. 9. 1989
Diskusia otvorená do 30. 6. 1991

НУМЕРИЧЕСКАЯ СИМУЛЯЦИЯ ФУНКЦИИ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ДРЕНАЖИ

Иржи Шимунек, Томаш Вогел, Моймир Соукуп

В статье документируется возможность использования числовой модели, основанной на двухразмерном решении уравнения Ричардса, к симуляции функции регулирующей дренажи. Результаты полевого эксперимента и его нумерическая симуляция сравниваются на основе измеренных и предсказанных моделью уровней подземной воды. Большая степень согласия наблюдается вблизи дрена. В центре линии между дренами степень согласия меньше. Количественная разница в согласии объясняется изменениями почвенных свойств. Кроме этого представлены некоторые сведения, полученные с помощью числовой симуляции данной проблемы.

Список обозначений

- a — параметр зависимости капиллярного напора от влажности $[L^{-1}]$,
- A_E — площадь конечного элемента $[L^2]$,
- b_n, c_n — местная координатная функция для элемента $[L]$,
- C — гидравлическая емкость $[L^{-1}]$,
- h — капиллярный напор $[L]$,
- h_k — капиллярный напор принадлежащий ненасыщенной гидр. проводимости K_k $[L]$,
- h_a — капиллярный напор принадлежащий входной величине воздуха $[L]$,
- K — гидравлическая проводимость $[L T^{-1}]$,
- K^A — тензор анизотропии $[-]$,
- K_r — относительная гидравлическая проводимость $[-]$,
- K_s — насыщенная гидравлическая проводимость $[L T^{-1}]$,
- K_u — ненасыщенная гидравлическая проводимость $[L T^{-1}]$,
- N — число узлов $[-]$,
- n, m — параметры зависимости капиллярного напора от влажности $[-]$,
- S — корневой ток воды $[T^{-1}]$,
- S^* — потенциальная узловая интенсивность экстракции $[T^{-1}]$,
- t — время $[T]$,
- T^* — потенциальная транспирация $[L T^{-1}]$,
- x — горизонтальная координата $[L]$,
- z — вертикальная координата $[L]$,
- α — редукционная функция $[-]$,
- β — распределяющая функция $[-]$,
- δ_{nm} — дельта Кронекера $[-]$,
- θ — влажность $[-]$,
- θ_k — влажность принадлежащая h_k $[-]$,
- θ_A, θ_m — параметры зависимости капиллярного напора от влажности $[-]$,
- θ_r — остаточная влажность $[-]$,
- θ_s — насыщенная влажность $[-]$,
- θ_e, θ_k — эффективная влажность $[-]$.

Рис. 1. Ретенционные зависимости $h(\theta)$.

Рис. 2. Гидравлические проводимости $k(h)$.

Рис. 3. Ситуация экспериментальной площадки.

Рис. 4. Сеть конечных элементов для первой симуляции.

Рис. 5. Сравнение измеренных и вычисленных уровней подземной воды.

Рис. 6. Перемещение уровня подземной воды — фаза увлажнения.

Рис. 7. Перемещение уровня подземной воды — фаза дренирования.

Рис. 8. Дренажный приток/отток.

Рис. 9. Перемещение уровня подземной воды — фаза увлажнения.

Рис. 10. Перемещение уровня подземной воды — фаза дренирования.

Рис. 11. Профиль давлений в конце фазы увлажнения.

Рис. 12. Профиль давления в конце фазы дренирования.

Табл. 1. Параметры гидравлических свойств.

NUMERICAL SIMULATION OF THE FUNCTION OF REGULATION DRAINAGE

Jiří Šimunek, Tomáš Vogel, Mojmír Soukup

The possibility of using the simulation model based on the numerical solution of Richard's equation in connection with problems of regulation drainage is documented. Results of measured experiment and its computer simulation are compared on the basis of measured and modeled groundwater levels. The agreement in the vicinity of the drain was high. In the center between the drains the predictability of groundwater level was lower. The differences are explained by variability of soil properties. Other informations obtained by numerical simulation of regulation drainage are discussed.

List of symbols

- a — parameter of retention curve $[L^{-1}]$,
- A_E — area of triangle $[L^2]$,
- b_n, c_n — local coordinate function associated with n -th node $[L]$,
- C — hydraulic capacity $[L^{-1}]$,
- h — pressure head $[L]$,
- h_k — pressure head corresponding to K_k $[L]$,
- h_a — pressure head corresponding to air-entry value $[L]$,
- K — hydraulic conductivity $[L T^{-1}]$,
- K^A — tensor anisotropy $[-]$,
- K_r — relative hydraulic conductivity $[-]$,
- K_s — saturated hydraulic conductivity $[L T^{-1}]$,
- K_u — measured unsaturated hydraulic conductivity $[L T^{-1}]$,
- N — number of nodes,
- n, m — parameters of retention curve $[-]$,
- S — sink term $[T^{-1}]$,
- S^* — intensity of the potential transpiration demand $[T^{-1}]$,
- t — time $[T]$,
- T^* — potential transpiration rate $[L T^{-1}]$,
- x — horizontal coordinate $[L]$,
- z — vertical coordinate $[L]$,
- α — reduction function $[-]$,
- β — distribution function $[-]$,

δ_{mn} — Kronecker delta [—],
 θ — volumetric water content [—],
 θ_k — volumetric water content corresponding to h_k [—],
 θ_1, θ_m — parameters of retention curve [—],
 θ_r — residual volumetric water content [—],
 θ_s — saturated volumetric water content [—],
 Θ, Θ_k — effective volumetric water content [—].

Fig. 1. Water retention curve $h(\theta)$.

Fig. 2. Hydraulic conductivity $k(h)$.

Fig. 3. Scheme of the experimental field.

Fig. 4. Finite element mesh.

Fig. 5. The comparison of the measured and calculated groundwater levels.

Fig. 6. The movement of the groundwater level — irrigation phase.

Fig. 7. The movement of the groundwater level — drainage phase.

Fig. 8. Drainage/irrigation flux.

Fig. 9. The movement of the groundwater level — irrigation phase.

Fig. 10. The movement of the groundwater level — drainage phase.

Fig. 11. Pressure head profile at the end of the irrigation phase.

Fig. 12. Pressure head profile at the end of the drainage phase.

Table 1. Parameters of the hydraulic properties.