

**SIMULÁCIA TRANSPORTU CHLORIDOV  
ZO ZÁVLAHOVEJ VODY INFILTRÁCIU DO PÔDNEHO PROFILU**

Anežka Čelková

Prítomnosť alebo akumulácia nadmerného množstva rozpustených solí v pôdnej koreňovej zóne a ich negatívny vplyv na rast a produktivitu plodín je všeobecný problém, zvlášť v suchých a polosuchých regiónoch. Látky rozpustené v závlahovej vode rozličným spôsobom ovplyvňujú rast a vývoj rastlín, vlastnosti pôdy (fyzikálne, chemické, mikrobiologické) a stupeň ich vplyvu závisí od koncentrácie, spôsobu zavlažovania, množstva závlahovej vody a od zavlažovanej pôdy. Niektoré ióny v závlahových vodách alebo v hnojivách môžu byť pre rastliny v nadmernom množstve obzvlášť toxické. Týka sa to najmä sodíka, chloridov a bóru. Cieľom práce bolo pomocou numerického modelu HYDRUS 1D analyzovať prípad jednorozmerného transportu a akumulácie chloridových iónov v dvoch pôdnych profiloch aluviálnych kvartérnych sedimentov na Podunajskej rovine – oblasť Čenkovskej nivy, vplyvom infiltrácie mineralizovanej závlahovej vody do podpovrchového pórovitého prostredia. Za modelovú poľnohospodársku plodinu bola vytypovaná kukurica na siláž. Modelované bolo vegetačné obdobie roku 1993. Simuláciou boli získané koncentračné profily chloridových iónov v pôdnych profiloch a priebeh koncentrácie chloridov v koreňovej zóne pôdneho profilu po aplikácii troch dávok vysoko mineralizovanej závlahovej vody. Maximálna koncentrácia  $\text{Cl}^-$  v koreňovej zóne v obidvoch pôdnych profiloch dosiahla počas vegetačného obdobia pomerne vysokú úroveň ( $0,438 \text{ mg cm}^{-3}$ , resp.  $0,615 \text{ mg cm}^{-3} \text{ Cl}^-$ ), čo sú nevhodné podmienky na pestovanie plodín citlivejších na obsah chloridov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: pôdny profil, transport chloridov, závlahová voda, numerická simulácia, HYDRUS 1D

**SIMULATION OF CHLORIDE TRANSPORT FROM IRRIGATION WATER BY INFILTRATION INTO SOIL PROFILE.** The presence or accumulation of excessive amounts of dissolved salts in the soil root zone and their negative impact on crops productivity is a general problem especially in arid and semi-arid regions. Dissolved substances in irrigation water in different ways affect the soil properties (physical, chemical, microbiological), the growth and development of plants. The degree of their influence depends on their concentration, on the method of irrigation, amount of irrigation water and on the irrigated land. Some of ions in irrigation water or in fertilizers in excessive quantities may be very toxic for plants. This applies especially to sodium, chloride and boron. The aim of this article was by means of numerical model HYDRUS 1D to analyse the one-dimensional transport and accumulation of chloride ions into characteristic alluvium quaternary sediment profiles of Danube Lowlands, by infiltration of highly mineralized irrigation water. A dry year from the meteorology and hydrology point of view was chosen for simulation. The concentration profiles of chloride ions in two soil profiles, and the courses of chloride concentration in root zone in the soil profiles after application of three doses of highly mineralized irrigation water were obtained. The maximum values of  $\text{Cl}^-$  concentration in the root zone in both soil profiles reached relatively high values during the vegetation period ( $0.438 \text{ mg cm}^{-3}$  or  $0.615 \text{ mg cm}^{-3}$  of  $\text{Cl}^-$  ions), which are inappropriate conditions for growing crops more sensitive to chloride content.

KEY WORDS: soil profile, transport of chloride, irrigation water, numerical simulations, HYDRUS 1D

**Úvod**

Vhodnosť vody na závlahy ale aj na umelú infiltráciu v období sucha závisí od toho, ako sa dá voda využiť za

špecifických podmienok. Tieto zahŕňajú toleranciu plodín na soli, rôzne fyzikálne a chemické vlastnosti pôdy, manažment závlahových a infiltračných spôsobov a klimatické podmienky územia. Aplikáciou vhodných

schém vodného manažmentu môže byť účinne kontrolovaná pôdna salinita, avšak vzhľadom k nedostatku kvalitnej závlahovej vody je ťažké zabrániť jej zvyšovaniu. Vysoká úroveň salinity v pôdnej koreňovej zóne má všeobecne škodlivé účinky na rast a produktivitu rastlín, čo sa prejavuje redukciami rýchlosti transpirácie a rastu. Tento vplyv sa vzťahuje k celkovej koncentrácii elektrolytu v koreňovej zóne a je väčšinou nezávislý od zloženia pôdneho roztoku. Avšak niektoré ióny v závlahových vodách alebo v hnojivách môžu byť pre rastliny v nadmernom množstve obzvlášť toxické. Týka sa to najmä bóru, sodíka a chloridov (Ayers, Westcot, 1985; Maas, Hoffman, 1977; Xu, et al., 1999; Shannon, Grieve, 1999; Komosa, Górnjak, 2015; Geilfus, 2018). Pri objasňovaní procesov salinizácie pôd a pre vytýčenie stratégie pre jej kontrolu, má dôležitú úlohu numerické modelovanie. Numerické modely sú po kalibrácii prostredníctvom nameraných údajov aplikovateľné na veľkých územiach a sú využiteľné pri tvorbe scenárov kontroly salinity pôdy pre dané klimatické pomery a spôsoby obhospodarovania pôdy. Za týmto účelom bolo vyvinutých viacero modelov, pomocou ktorých je možné simulovať jedno-, dvoj- alebo troj-rozmerné transportné procesy v nenasýtenej a nasýtenej zóne pôdy, napríklad HYDRUS-1D a HYDRUS 2D/3D (Šimůnek, et al., 2008; Vogel, et al., 1996). Cieľom práce bolo pomocou numerického modelu HYDRUS-1D analyzovať prípad jednorozmerného transportu a akumulácie chloridových iónov v koreňovej zóne v dvoch pôdnych profiloch aluviálnych kvartérnych sedimentov na Podunajskej rovine - oblasť Čenkovskej nivy, vplyvom infiltrácie vysoko mineralizovanej závlahovej vody do podpovrchového pórovitého prostredia.

### Materiál a metódy

Na numerickú simuláciu transportu a akumulácie chloridov v dvoch pôdnych profiloch bol použitý numerický model HYDRUS 1D. Je to model konečných prvkov na simuláciu jednorozmerného pohybu vody, tepla a rozpustených látok v nenasýtenom – nasýtenom prostredí. Program numericky rieši Richardsovu rovnicu pre nasýtené – nenasýtené prúdenie vody a Fickove advektívno – disperzné rovnice pre transport látok (Šimůnek, et al., 2008). Rovnica prúdenia obsahuje termín prepadu na objasnenie adsorpcie vody koreňmi rastlín. Hydraulické vlastnosti nenasýtenej pôdy sú opísané van Genuchtenovým (1980), Brooks a Corey (1966) a modifikovaným van Genuchtenovým (1987) typom analytických funkcií. Rast koreňov je simulovaný pomocou logistickej rastovej funkcie. Zjednodušená verzia advektívno-disperznej rovnice opisuje transport látok v pórovitom prostredí s uvažovaním ich adsorpcie na pôdnych časticách (Nikodem, et al., 2010):

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho_d s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c}{\partial z} \quad (1)$$

kde

- $c$  – koncentrácia rozpustenej látky v kvapalnej [M L<sup>-3</sup>],
- $s$  – koncentrácia rozpustenej látky v tuhej fáze [M M<sup>-1</sup>]
- $\theta$  – objemová vlhkosť pôdy [L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>],
- $q$  – objemová hustota toku [L T<sup>-1</sup>],
- $\rho_d$  – objemová hmotnosť pôdy [M L<sup>-3</sup>],
- $D$  – disperzný koeficient [L<sup>2</sup> T<sup>-1</sup>].

Rovnica transportu rozpustených látok uvažuje s advektívno-disperzným transportom v tekutej fáze a difúziou v plynnej fáze. Disperzný koeficient obsahuje výraz, ktorý vyjadruje vplyv molekulárnej difúzie a tortuozity. Rovnice prúdenia a transportu sú numericky riešené použitím Galerkinovho typu lineárnych schém konečných prvkov. Model realizuje odhadový postup Marquardt-Lavenbergovho typu parametra pre inverzný odhad vybraných pôdnych hydraulických parametrov a parametrov transportu rozpustených látok pre merané údaje ustáleného a neustáleného prúdenia a transportné údaje. Model HYDRUS 1D vo variante HYDRUS-ET bol úspešne kalibrován na viacerých lokalitách Podunajskej roviny (Novák, et al., 1998).

Na simuláciu transportu a akumulácie Cl<sup>-</sup> iónov boli použité dva pôdne profily z juhovýchodnej časti Podunajskej roviny – oblasť Čenkovskej nivy (medzi Komáromom a Štúrovom). Za modelovú poľnohospodársku plodinu bola vytypovaná kukurica na siláž. Modelované bolo suché vegetačné obdobie roku 1993. Pre zabezpečenie vlhovej potreby plodiny a súčasné zvýšenie zásob podzemnej vody, boli simulované tri závlahové dávky rozložené počas vegetačného obdobia. Každá dávka bola simulovaná v trvaní siedmych dní s intenzitou 1cm deň<sup>-1</sup>:

1. závlahová dávka v dňoch T=177. deň – 183. deň,
2. závlahová dávka v dňoch T=196. deň – 202. deň,
3. závlahová dávka v dňoch T=210. deň – 216. deň.

Na závlahy bola použitá vysoko mineralizovaná podzemná voda, ktorej vstupná koncentrácia Cl<sup>-</sup> bola 0,295 mg cm<sup>-3</sup>. Na základe monitoringu kvality podzemných a kanálových vôd v záujmovej oblasti Čenkovskej nivy išlo o podzemnú vodu s maximálnou koncentráciou chloridov vyskytujúcou sa na záujmovom území Čenkovskej nivy (Čelková, 2002; Burger, Čelková, 2004a). Podľa STN 75 7143 (1999) a nariadenia vlády SR (2005) maximálna koncentrácia Cl<sup>-</sup> vo vode vhodná na závlahy je 0,300 mg cm<sup>-3</sup>.

### Popis pôdnych profilov

Pôdne profily S1 a S2 sa nachádzajú na území Čenkovskej nivy, ktorá sa rozprestiera vo východnej časti Podunajskej roviny na západ od Štúrova. Je to nízko položená údolná niva Dunaja, ktorá je na juhu ohraničená 23 kilometrovým úsekom rieky medzi km 1722 a 1745 a na severe oblúkovite sa tiahnucim terasovým stupňom, na okraji ktorého sú obce Moča, Búč, Júrsky

Chlm, Mužla a Obid. Vlastná údolná niva je široká od 2,5 až do 6 km a má celkovú rozlohu cca 66 km<sup>2</sup>. Jej povrch je rovinný. Na území prevládajú výšky terénu od 106,0 až do 108,0 m n.m. Najnižšie položené územie pod terasou má kóty okolo 105,0 m n.m. a najvyššie v Čenkovskom lese v strede oblasti 108,0-110,0 m n.m. (Burger, F., 2001 (a)).

Profil S1 reprezentuje ľahkú pôdu (pri sonde SHMÚ 520 – Kravany nad Dunajom). Povrch nepriepustného podlažia (neogén) je 1075 cm pod povrchom terénu. Hladina podzemnej vody v pozorovacej sonde fluktovala v rozmedzí 301 cm – 310 cm pod povrchom terénu. Počiatočné koncentrácie Cl<sup>-</sup> v pôdnej vode v profile S1 sú uvedené v tabuľke 1.

Profil S2 reprezentuje ťažkú pôdu (pri sonde SHMÚ 7432 – Mužla). Hladina podzemnej vody fluktovala medzi 247 cm – 257 cm pod povrchom terénu. Povrch nepriepustného podlažia je 796 cm pod povrchom terénu. Počiatočné koncentrácie Cl<sup>-</sup> v pôdnej vode v profile S2 sú uvedené v tabuľke 1.

Popis pôdných profilov S1 a S2 je uvedený v tabuľke 2.

### Vstupné parametre

Väčšina vstupných údajov pre matematické modelovanie prúdenia vody a transportu chloridov v pôdných profiloch bola získaná experimentálne. Časť potrebných údajov (klimatické a atmosférické údaje) pre stanicu Hurbanovo boli poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ). Hydraulické parametre nenasýtenej zóny a objemové hmotnosti boli určené z neporušených, resp. porušených vzoriek pôdy v laboratóriu a filtračné parametre zvodnených vrstiev hydrogeologického systému záujmového územia boli získané z výsledkov monitoringu a sú uvedené v prácach Burgera (1996; 2001a; 2001b). Hornú okrajovú podmienku na

povrchu pôdy predstavovali hlavné meteorologické charakteristiky namerané na meteorologickej stanici Hurbanovo: denné zrážkové úhrny a denné priemerné teploty vzduchu, tlak vodnej pary, rýchlosť vetra a trvanie slnečného svitu. Dolnú okrajovú podmienku predstavovala variabilná tlaková výška. Výsledky získané z modelu prúdenia vody sú opísané v práci Burgera a Čelkovej (2007).

Vstupné parametre do transportnej časti modelu boli získané nasledovne: počiatočné koncentrácie Cl<sup>-</sup> v pôdnej vode v profiloch S1 a S2 boli namerané v laboratóriu, distribučné koeficienty K<sub>d</sub> pre chloridy pre všetky pôdne druhy boli stanovené spracovaním experimentálnych údajov o migrácii indikačných roztokov (stopovačov) z laboratórnych experimentov, výsledky ktorých boli publikované v prácach: (Burger, Čelková, 2009; Slaboň, Čelková (1991), Čelková (2001), Kováčová (1998). Hodnoty pozdĺžnych disperzií D<sub>L</sub> pre chloridy boli získané z literatúry (Vanderborcht, Vereecken 2007), pričom bolo prihliadané na rôznu pôdnu textúru a transportnú vzdialenosť. Molekulárna difúzia bola zanedbaná vzhľadom k tomu, že v našom prípade je mechanická disperzia dominantná. Vybrané vstupné parametre do modelu prúdenia vody a transportu chloridov pre obidva pôdne profily S1 a S2 sú uvedené v tabuľke 3 a 4.

### Výsledky a diskusia

V príspevku sú vytvorené numerické modely transportu chloridov infiltráciou závlahovej vody do dvoch pôdných profilov aluviálnych kvartérnych sedimentov na Podunajskej rovine. Pomocou transportnej časti modelu HYDRUS 1D bol získaný priebeh koncentrácie chloridových iónov v dvoch pôdných profiloch na Čenkovskej nive, ktoré reprezentujú ľahkú pôdu (pôdny

**Tabuľka 1. Koncentrácia chloridov v pôdnej vode v pôdných profiloch S1 a S2**

**Table 1. The concentration of chloride ions in soil water in soil profiles S1 and S2**

S1		S2	
hĺbka [cm]	c <sub>Cl<sup>-</sup></sub> [mg cm <sup>-3</sup> ]	hĺbka [cm]	c <sub>Cl<sup>-</sup></sub> [mg cm <sup>-3</sup> ]
0 – 30	0,095	0 – 15	0,120
30 – 60	0,130	15 – 40	0,100
60 – 100	0,140	40 – 100	0,090

**Tabuľka 2. Popis pôdných profilov**

**Table 2. Description of soil profiles**

Pôdny profil	Hĺbka [cm]	Pôdny druh	Objemová hmotnosť [g cm <sup>-3</sup> ]
S1	0 – 365	piesočnatá pôda	1,50
	365 – 634	piesok	1,60
	634 – 1075	štrkopiesok	1,72
S2	0 – 15	ílovitohlinitá pôda	1,20
	15 – 43	ílovitohlinitá až hlinitá pôda	1,30
	43 – 158	hlinitopiesočnatá pôda	1,35
	158 – 411	piesočnatá pôda	1,60
	411 – 796	štrkopiesok	1,72

**Tabuľka 3. Vstupné parametre pre pôdny profil S1**  
**Table 3. Input parameters for soil profile S1**

Vstupné parametre	Hĺbka [cm]		
	0 – 365	365 – 634	634 - 1075
$K_s$ [cm day <sup>-1</sup> ]	1139,2	2177,2	1321,9
$\theta_s$ [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	0,43	0,43	0,43
$\rho$ [g cm <sup>-3</sup> ]	1,5	1,6	1,72
$D_L$ [cm]	5,0	5,0	5,0
$K_d$ [cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ]	0	0	0

$\theta_s$  – objemová vlhkosť pôdy pri plnom nasýtení,  $K_s$  – nasýtená hydraulická vodivosť,  $\rho$  – objemová hmotnosť,  $D_L$  – pozdĺžna disperzivita,  $K_d$  – distribučný koeficient

**Tabuľka 4. Vstupné parametre pre pôdny profil S2**  
**Table 4. Input parameters for soil profile S2**

Vstupné parametre	Hĺbka [cm]				
	0 – 15	15 – 43	43 – 158	158 – 411	411 – 796
$K_s$ [cm day <sup>-1</sup> ]	6,24	24,96	350,2	712,8	1321
$\theta_s$ [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	0,41	0,43	0,41	0,43	0,43
$\rho$ [g cm <sup>-3</sup> ]	1,2	1,3	1,35	1,6	1,72
$D_L$ [cm]	1,0	1,2	2,0	5,0	5,0
$K_d$ [cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> ]	0,07	0,05	0,005	0	0

$\theta_s$  – objemová vlhkosť pôdy pri plnom nasýtení,  $K_s$  – nasýtená hydraulická vodivosť,  $\rho$  – objemová hmotnosť,  $D_L$  – pozdĺžna disperzivita,  $K_d$  – distribučný koeficient

profil S1) a ťažkú pôdu (pôdny profil S2) v suchom vegetačnom období roku 1993, po aplikácii troch dávok vysoko mineralizovanej závlahovej vody v dňoch: T1 = 183. deň, T2 = 202. deň, T3 = 216. deň a v posledný deň simulácie T4 = 248. deň a priebeh koncentrácie chloridových iónov v koreňovej zóne v pôdnych profiloch počas vegetačného obdobia. Koncentračné profily iónov Cl<sup>-</sup> v pôdnych profiloch S1 a S2 sú uvedené na obr. 1 a obr. 2. Priebeh koncentrácie chloridových iónov počas vegetačného obdobia v koreňovej zóne profilov S1 a S2 je uvedený na obr. 3 a obr. 4.

Chloridy patria medzi neadsorbujúce ióny (resp. veľmi málo adsorbované), avšak pri ich transporte dochádza v dôsledku disperzie k postupnému znižovaniu ich koncentrácie. V profile S1 prenikajú do nižších vrstiev pôdneho profilu ako v profile S2. Na konci simulácie dosiahli chloridové ióny najvyššiu koncentráciu  $c_{Cl^-} = 0,503$  mg cm<sup>-3</sup> v hĺbke 150,5 cm (obr. 1). V koreňovej zóne pôdneho profilu S1 sa koncentrácia Cl<sup>-</sup> po každej závlahovej dávke postupne zvyšovala do T = 212. deň, kedy dosiahla maximálnu hodnotu  $c_{Cl^-} = 0,615$  mg cm<sup>-3</sup>, potom sa znižovala (obr. 2).

V pôdnom profile S2 dosiahli chloridové ióny na konci simulácie najvyššiu koncentráciu  $c_{Cl^-} = 0,555$  mg cm<sup>-3</sup> v hĺbke 51,5 cm (obr. 3). V koreňovej zóne pôdneho profilu S2 sa koncentrácia Cl<sup>-</sup> po každej závlahovej dávke postupne zvyšovala do konca simulácie t.j. do T = 248. deň, kedy dosiahla maximálnu hodnotu  $c_{Cl^-} = 0,438$  mg cm<sup>-3</sup> (obr. 4).

Z výsledkov simulácií vyplýva, že vplyvom troch dávok závlahovej vody dochádza k negatívnemu ovplyvneniu kvality pôdy v oboch sledovaných pôdnych profiloch, pričom na závlahy bola použitá podzemná voda s vysokým obsahom chloridových iónov ( $c_{Cl^-} = 0,295$

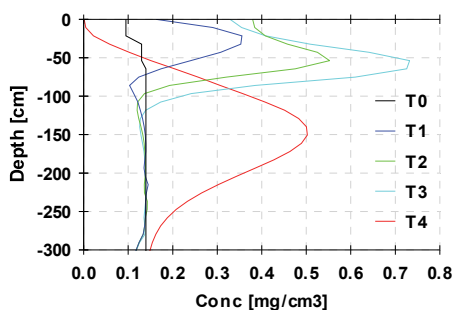
mg cm<sup>-3</sup>). V ľahkých pôdach (profil S1) bola najvyššia koncentrácia Cl<sup>-</sup> v koreňovej zóne na konci júla (T = 212. deň) a postupne klesala. V ťažkých pôdach (profil S2) sa chloridy v koreňovej zóne akumulovali do konca sledovaného vegetačného obdobia.

Môžeme konštatovať, že použitá závlahová voda s vysokým obsahom chloridových iónov môže nepriaznivo ovplyvňovať rast a výnosy niektorých druhov plodín citlivých na obsah chloridov v ľahkých aj ťažkých pôdach Podunajskej roviny, ktorú reprezentujú pôdne profily S1 a S2. Maximálne koncentrácie Cl<sup>-</sup> v koreňovej zóne v oboch pôdnych profiloch dosiahli počas vegetačného obdobia pomerne vysokú úroveň (0,438 – 0,615 mg cm<sup>-3</sup> Cl<sup>-</sup>), čím sú podľa FAO (Ayers, Westcot, 1985) vytvorené nevhodné podmienky na pestovanie plodín citlivejších na obsah chloridov. Sú to napr.: cibuľa, šalát, uhorky, hrášok, jahody a iné. Maximálna koncentrácia Cl<sup>-</sup> v pôdnom roztoku v koreňovej zóne, kedy nedochádza k zníženiu výnosov týchto plodín, je podľa FAO 0,355 mg cm<sup>-3</sup> Cl<sup>-</sup>. Ďatelina, zemiaky a kukurica sú tolerantnejšie k obsahu chloridov. U týchto plodín je hraničná koncentrácia Cl<sup>-</sup> 0,533 mg cm<sup>-3</sup>. Odolnejšími druhmi plodín vzhľadom na ich toleranciu na chloridy sú napr. jačmeň, pšenica a iné, pre ktoré je relatívna tolerancia 2,485 mg cm<sup>-3</sup> – 2,840 mg cm<sup>-3</sup> Cl<sup>-</sup> (Ayers, Westcot, 1985; Maas, 1977).

#### Záver

Na základe získaných výsledkov možno konštatovať, že infiltrácia s použitím závlahovej vody, akou je podzemná voda obsahujúca nadmerné množstvá solí, by mala byť značne redukovaná, pretože zvyšuje salinitu pôdy a to hlavne v koreňovej zóne.

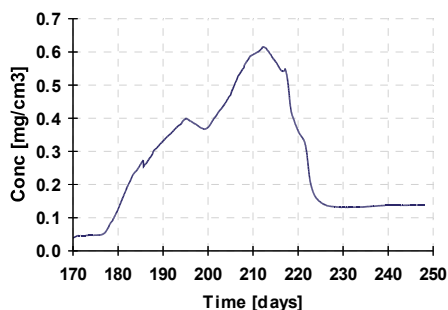
S1: Profile Information: Concentration



Obr. 1. Koncentračné profily chloridových iónov v pôdnom profile S1 v dňoch: T1=183, T2=202, T3=216 a T4=248.

Fig. 1. The concentration profiles of chloride ions in S1 soil profile in days: T1=183, T2=202, T3=216 a T4=248.

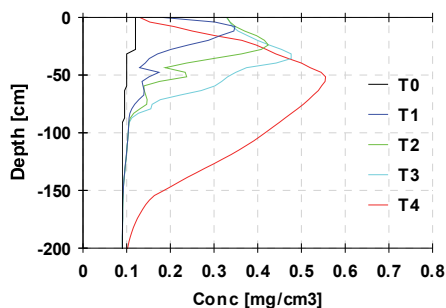
S1: Root Zone Concentration



Obr. 2. Priebeh koncentrácie chloridových iónov v koreňovej zóne pôdneho profilu S1.

Fig. 2. The course of chloride ions concentration in the root zone of the soil profile S1.

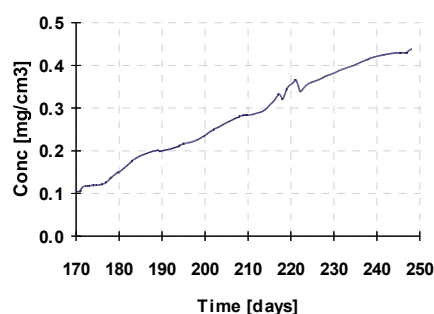
S2: Profile Information: Concentration



Obr. 3. Koncentračné profily chloridových iónov v pôdnom profile S2 v dňoch: T1=183, T2=202, T3=216 a T4=248.

Fig. 3. The concentration profiles of chloride ions in S2 soil profile in days: T1=183, T2=202, T3=216 a T4=248.

S2: Root Zone Concentration



Obr. 4. Priebeh koncentrácie chloridových iónov v koreňovej zóne pôdneho profilu S2.

Fig. 4. The course of chloride ions concentration in the root zone of the soil profile S2.

Do budúcnosti je potrebné vykonať ďalšie simulácie za účelom nájdenia takého optimálneho závlahového množstva, ktoré by zabezpečilo vlhkovú potrebu pestovaných plodín a to pri súčasnom neohrozovaní poľnohospodárskych pôd mineralizovanou závlahovou vodou. Do úvahy bude potrebné vziať aj vplyv takejto závlahy na toleranciu plodín na soli a tým aj na ich výnosy. Jednou z možných alternatív riešenia tejto problematiky na Čenkovskej nive, ktorá je aktuálna do budúcnosti hlavne vzhľadom na prognózovaný nástup suchých vegetačných období, je využívanie kvalitnejšej vody na závlahy prevažne z veľkých riek Dunaj a Váh.

#### Pod'akovanie

Táto publikácia bola vytvorená realizáciou projektu ITMS 26240120014 Centrum excelentnosti pre ochranu

a využívania krajiny a biodiverzitu, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja a bola podporovaná Vedeckou grantovou agentúrou VEGA prostredníctvom finančnej podpory grantu 2/0152/15.

#### Literatúra

- Ayers, R.S., Westcot, D.W. (1985): Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, FAO. Chapter 4 – Water quality assessment. Effects of Salts on Plants. Dostupné na internete: <http://www.fao.org/docrep/t0667e/t0667e07.htm#TopOfPage>
- Brooks, R.H., Corey, A.T. (1966): Properties of porous media affecting fluid flow. J. Irrig. Drainage Div., ASCE Proc., 72, 2, 61–88.
- Burger, F. (1996): Numerická simulácia akumulácie solí

- v pôde. Poľnohospodárstvo – časopis pre poľnohosp. vedy, 42, 3, 161–175.
- Burger, F. (2001a): Vlastnosti pôdnej pokryvej vrstvy hydrogeologického kolektora Čenkovskej nivy. Acta Hydrologica Slovaca, 2, 1, 3–8.
- Burger, F. (2001b): Hydraulické funkcie nenasýtenej zóny pôd údolnej nivy Dunaja. Acta Hydrologica Slovaca, 2,1, 24–28.
- Burger, F., Čelková, A. (2004): Interakcia závlahovej vody z povrchových tokov a pôdy z aspektu salinity a sodicity. Acta Hydrologica Slovaca, 5, 1, 112–121.
- Burger, F., Čelková, A. (2007): Numerical simulation of salts transport as a basis for irrigation management and crop selection – a case study in Danube Lowlands, Slovakia. Pollution and water resources. Columbia university seminar proceedings. Ed. G. J. Halasi-Kun, 76–110.
- Burger, F., Čelková, A. (2009): Salinizácia a kontaminácia podpovrchového environmentu. Monografia, CD-ROM, ISBN 978-80-89139-17-0, 329 s.
- Čelková, A. (2001): Disperzné koeficienty iónov zasoľujúcich látok v pôde. Acta Hydrol. Slovaca 2,1, 9–13.
- Čelková, A. (2002): Chemizmus podzemnej vody v alluvialnej nive ľavej strany Dunaja v úseku Komárno-Štúrovo. Acta Hydrologica Slovaca, 3, 1, 54 – 60.
- Geilfus, Ch.M. (2018): Review on the significance of chlorine for crop yield and quality. Plant Science, 270, 114–122.
- Komosa, A., Górnjak, T. (2015): The Effect of Chloride on Yield and Nutrient Interaction in Greenhouse Tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) Grown in Rockwool. Journal of Plant Nutrition, 38, 3, 355–370.
- Kováčová, V. (1998): Určovanie distribučných koeficientov sodíkových, amóniových, dusičnanových a chloridových iónov. Acta Hydrologica Slovaca, 1/1998, 181–185.
- Maas, E. V., Hoffman, G. J. (1977): Crop salt tolerance – Current Assessment. J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 103, 2, 115–134.
- Nariadenie vlády SR, (2005): Povrchové vody určené na závlahy. Dostupné na internete: <http://www.zbierka.sk>
- Nikodem, A., Kodešová, R., Drábek, O., Bubeníčková, L., Borůvka, L., Pavlů, L., Tajnecký, V. (2010): A Numerical Study of the Impact of Precipitation Redistribution in a Beech Forest Canopy on Water and Aluminum Transport in a Podzol. Vadose Zone J., 9, 238–251.
- Novák, V., Šútor, J., Majerčák, J., Šimunek, J., Van Genuchten, M.T. (1998): Modeling of Water and Solute Movement in the Unsaturated Zone of the Žitný Ostrov Region, ÚH SAV, ISBN 80 - 967808 - 5 - 9.
- Shannon, M.C., Grieve, C.M. (1999): Tolerance of vegetable crops to salinity. Scientia Horticulturae, 7, 5–38.
- Slaboň, S., Čelková, A. (1991): Migračné parametre iónov zasoľujúcich látok. Výskumná správa ÚHH SAV, Bratislava, 50 s.
- STN 75 7143 (1999): Kvalita vody. Závlahová voda.
- Šimunek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T. (2008): The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 4.0. HYDRUS Software Series 3, Dep. Environmental Sciences, Univ. Calif. Riverside, Riverside, CA.
- van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892–898.
- van Genuchten, M. T. (1987): A numerical model for water and solute movement in below the root zone. Research Report N. 121, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Vanderborght, J., Vereecken, H. (2007): Review of dispersivities for transport modeling in soils. Vadose Zone J., 6, 29–52.
- Vogel, T., Huang, K., Zhang, R., van Genuchten, M.T. (1996): The HYDRUS code for simulating one-dimensional water flow solute transport, and heat movement in variably-saturated media. Research Report No. 140, US Salinity Laboratory, USA.
- Xu, G., Magen, H., Tarchitzky, J., Kafkafi, U. (1999): Advances in Chloride Nutrition of Plants. Advances in Agronomy, Vol. 68, 110A, 97 – 110, 110B, 111–150.

## SIMULATION OF CHLORIDE TRANSPORT FROM IRRIGATION WATER BY INFILTRATION INTO SOIL PROFILE

The presence or accumulation of excessive amounts of dissolved salts in the soil root zone and their negative impact on crops yields is a general problem, especially in arid and semi-arid regions. The substances dissolved in irrigation water in different ways affect the soil properties (physical, chemical, microbiological), the growth and development of plants. The degree of their influence depends on concentration, method of irrigation, amount of irrigation water and on irrigated land. The high level of salinity in soil root zone has generally harmful effects on plant growth and yields. It leads to reduction in the rate of transpiration and growth of plants. This is related to the total concentration of the electrolyte in the root zone and it is mostly independent of the specific composition of soil solution. However, some ions in irrigation water or in fertilizers in

excessive amounts may be very toxic for plants. This applies especially to sodium, chloride and boron (Ayers, Westcot, 1985; Maas, Hoffman, 1977; Xu, et al., 1999; Shannon, Grieve, 1999; Komosa, Górnjak, 2015; Geilfus, 2018).

The aim of this article was by means of numerical model HYDRUS 1D to analyze the one-dimensional transport and accumulation of chloride ions into characteristic alluvium quaternary sediment profiles of Danube Lowlands, by infiltration of three doses of highly mineralized irrigation water.

Two soil profiles from the south-eastern part of the Danube Plain – Čenkovska Niva were used to simulate the transport and accumulation of Cl<sup>-</sup>. Soil profile S1 represents light soil and S2 represents heavy soil. The description of S1 and S2 soil profiles is given in Table

1. A dry vegetation period of 1993 year from the meteorology and hydrology point of view was chosen for simulation. Applications of three irrigation doses were simulated during the vegetation period to provide the crop's moisture requirement. The maize for silage was set as a model crop. Each dose was simulated over a period of seven days with an intensity of  $1 \text{ cm day}^{-1}$ . The groundwater with input value of  $\text{Cl}^-$  concentration of  $0.295 \text{ mg cm}^{-3}$  was used for irrigation. The initial values of chloride ions concentrations in soil water in soil profiles S1 and S2 are shown in Table 2.

Most of input data for mathematical modeling of water flow and chloride transport in soil profiles were obtained experimentally and they are presented in works: Burger, 1996; 2001a; 2001b; Čelková, 2001; Slaboň, Čelková, 1991; Kováčová, 1998; Burger, Čelková, 2009. Part of the necessary data (climatic and atmospheric data) for the Hurbanovo station were provided by SHMI. Longitudinal dispersion values  $D_L$  for chlorides were obtained from the literature (Vanderborght, Vereecken, 2007). Selected input parameters for the water flow and chloride transport model for both soil profiles S1 and S2 are shown in Table 3 and Table 4.

By using of transport model HYDRUS 1D, the courses of  $\text{Cl}^-$  ions concentrations in the two soil profiles of alluvial quaternary sediments on the Danube Plain (S1 and S2) were obtained during a dry vegetation period of year 1993 after application of three doses of highly mineralized irrigation water on days:  $T_1=183$ ,  $T_2=202$ ,  $T_3=216$  and on the last day of simulation  $T_4=248$ , and the courses of chloride ions concentration in the root zone in soil profiles S1 and S2 during the vegetation period were obtained. The concentration profiles of  $\text{Cl}^-$  ions in soil profiles S1 and S2 are shown in Figure 1 and Figure 3. The chloride ions concentrations during the vegetation period in the root zone of the S1 and S2 soil profiles are shown in Figure 2 and Figure 4.

The chlorides are among the non-adsorbent ions (or very slightly adsorbed), however due to their dispersion, they are gradually reduced in concentration during their transport in the soil profile. In S1 profile they penetrate lower than in S2 profile. At the end of the simulation, the  $\text{Cl}^-$  concentration in S1 soil profile reached the highest value  $c_{\text{Cl}^-}=0.503 \text{ mg cm}^{-3}$  at a depth of 150.5 cm (Figure 1). In the root zone of the soil profile S1, the concentration of  $\text{Cl}^-$  gradually increased after each irrigation dose. In  $T=212$  days the concentration of  $\text{Cl}^-$  reached maximum value  $c_{\text{Cl}^-}=0.615 \text{ mg cm}^{-3}$ , then decreased (Figure 2). In the S2 soil profile the concentration of  $\text{Cl}^-$  ions reached the highest

concentration  $c_{\text{Cl}^-}=0.555 \text{ mg cm}^{-3}$  at the end of simulation at a depth of 51.5 cm (Figure 3). In the root zone of the soil profile S2, the concentration of  $\text{Cl}^-$  gradually increased after each irrigation dose to the end of the simulation, i.e.,  $T=248$  days when reached the maximum value  $c_{\text{Cl}^-}=0.438 \text{ mg cm}^{-3}$  (Figure 4).

The results of the simulations show that three water doses of irrigation water, when the groundwater with a high content of chloride ions ( $c_{\text{Cl}^-}=0.295 \text{ mg cm}^{-3}$ ) was used as irrigation water, adversely affect the quality of two studied soil profiles in the root zone. In the light soils (soil profile S1), the highest concentrations of  $\text{Cl}^-$  in the root zone were in the middle of the vegetation period, in heavy soils (soil profile S2), the chlorides in the root zone were accumulated until the end of the vegetation period.

We can state that using of irrigation water with a high content of chloride ions can adversely affect the growth and yields of some kinds of crops sensitive to chloride content in light and heavy soils in Danube Plain, which represent soil profiles S1 and S2. The concentrations of  $\text{Cl}^-$  in the root zone in both soil profiles reached relatively high values ( $0.438\text{--}0.615 \text{ mg cm}^{-3} \text{ Cl}^-$ ) during the vegetation period, what are unsuitable conditions for growing of crops more sensitive to chloride content. They are for example: onion, lettuce, cucumbers, peas, strawberries and others. According to the FAO (Ayers, Westcot, 1985), the maximum value of  $\text{Cl}^-$  concentration in the root zone, when the yields of these crops are not reduced is  $0.355 \text{ mg cm}^{-3} \text{ Cl}^-$ , for clover, potatoes and maize the maximum value of  $\text{Cl}^-$  concentration is  $0.533 \text{ mg cm}^{-3} \text{ Cl}^-$ . More resistant crop species due to their chloride tolerance are e.g. barley, wheat and others, for which the relative tolerance is  $2.485 \text{ mg cm}^{-3} - 2.840 \text{ mg cm}^{-3} \text{ Cl}^-$  (Ayers, Westcot, 1985; Maas, 1977).

Based on the results it can be concluded that the irrigation using of mineralized irrigation water containing excessive amounts of salts should be greatly reduced because it significantly increases the salinity of the soil profile. For the future, further simulations need to be made to find such an optimal irrigation water amount that would ensure a water demand of crops and, while not to endanger agricultural soils with mineralized irrigation water. It will need to take into account also the impact of such irrigation on crop tolerance to salt and thus on their yields.

One of the possible alternatives to solving this issue in Čenkovska Niva, mainly due to the predicted onset of dry vegetation periods, is using of irrigation water with better quality, mainly from the large rivers such as Danube and Váh River.

Ing. Anežka Čelková  
Ústav hydrologie SAV  
Dúbravská cesta 9  
84104 Bratislava  
Slovenská republika  
Tel.: +42132293516  
E-mail: celkova@uh.savba.sk