

**NÁVRH, POSÚDENIE A REALIZÁCIA SANAČNÝCH OPATRENÍ ĽAVOSTRANNEJ
OCHRANNEJ HRÁDZE VÁHU V RKM 23,040 – 27,075**

Danka Grambličková, Emília Bednárová, Juraj Škvarka, Vladimír Chrobák

Úsek ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu v rkm 23,040 – 27,075 zabezpečuje protipovodňovú ochranu územia medzi obcou Komoča a mestom Kolárovo, v juhozápadnej časti Slovenska. Pri povodňových prietokoch vo Váhu boli opakovane na predmetnom úseku hrádze monitorované javy signalizujúce existenciu rizikových faktorov v telese a v podloží ochrannej hrádze. Uvedené skutočnosti boli v r. 2009 podnetom pre spracovanie návrhu sanačných opatrení s následným vypracovaním projektu a realizáciou navrhnutých sanačných opatrení v období máj – december 2013. Predkladaný článok zameriava pozornosť hlavne na návrh a posúdenie vplyvu sanačných opatrení na stabilitu ľavostrannej ochrannej hrádze a príľahlého územia na predmetnom úseku. Riešenie bolo uskutočnené metódou konečných prvkov. Článok tiež čiastočne zameriava pozornosť na fázu realizácie prijatých sanačných opatrení.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: ochranná hrádza, podložie, filtračné rýchlosti, filtračná stabilita, vztlak, sanačné opatrenia, metóda konečných prvkov

DESIGN, ASSESSMENT AND REMEDIATION OF THE LEFT FLOOD PROTECTION DIKE OF THE RIVER VÁH IN KM 23,040 – 27,075. The left-side section of the River Váh protection dike in km 23,040 – 27,075 provide flood protection of the area between Komoča municipality and Kolárovo town which are located in the southwestern part of Slovakia. During flood flows in the Váh River there were repeatedly monitored phenomena indicating the existence of risk factors in the body and in the subsoil of the protection dike. In 2009, these facts were an impulse for remedial action design followed by elaboration of the project and the implementation of the proposed remediation in the period of May - December 2013. This article focuses its attention mainly on the design and impact assessment of the remedial actions of the left dike's stability and adjacent area. The problem was solved by the finite element method. The article also partially focuses its attention to the phase of the remedial action implementation.

KEY WORDS: flood protection dyke, subsoil, filtration velocity, filtration stability, uplift, remediation measures, finite element method

Úvod

Riziko ohrozenia stability ochranných hrádzi možno usúdiť zo sprievodných znakov, zaznamenaných monitorovaním ich konštrukcií a ich príľahlých oblastí počas extrémneho hydrodynamického namáhania pri povodňových prietokoch. Tak tomu bolo aj v prípade ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu v rkm 23,040 – 27,075, keď hladina v tomto úseku dosahovala pri povodňových prietokoch v r. 2006 úroveň 112,71 m n.m. Pri tejto hladine sa objavili zamokrené plochy pozdĺž ochrannej hrádze v blízkosti vzdušnej päty, vývery s vyplavovaním jemnozrnných častíc z jej podložia a náznaky

dvíhania sa pokryvných vrstiev. Výskyt a poloha týchto negatívnych javov indikovali nadmerné priesaky resp. výskyt preferovaných ciest v podloží hrádze, s možnosťou narušenia jej stability v predmetnom úseku. Analýzou parametrov filtračného prúdenia, t.j. hladín, filtračných rýchlostí, hydraulických gradientov a vztlakov na pokryvné vrstvy pri extrémnych povodňových prietokoch možno túto hypotézu potvrdiť alebo vyvrátiť.

Posúdenie stability ochranných hrádzi pri hydrodynamickom namáhaní počas povodňových prietokov je problematika veľmi náročná nielen vzhľadom na ich náhodný charakter, ako napr. frekvencia výskytu, tvary

povodňových vln, dĺžky ich trvania a pod., ale aj ďalšie faktory prírodného prostredia. Výrazný vplyv tu zohrávajú napr. rozmanité morfológické a inžiniersko-geologické pomery, ktorých miera spoľahlivosti ich poznania je vzhľadom na líniový charakter týchto stavieb mnohokrát diskutabilná. Dôležitou súčasťou sú aj parametre hrádze a vlastnosti zemín, ktoré boli použité na jej výstavbu a ktoré sú s ohľadom na vek hrádzí priestorovo rozmanité (výška hrádze, sklony svahov, druhy zemín a iné).

V prípade ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu v rkm 23,040 – 27,075 bol k dispozícii pomerne skromný inžiniersko-geologický prieskum pozostávajúci z 11 prieskumných diel (Šikula, 2009), naznačujúci geologickú rozmanitosť podložja hrádze a príľahlého územia v rámci jej línie. Vzhľadom na túto skutočnosť bola k minimalizácii priesakov podloží hrádze, redukcii hydraulických gradientov, zmene tlakových pomerov v podloží a eliminácii zamokrenia vzdušného svahu hrádze navrhnutá zavesená podzemná tesniaca stena (ďalej PTS). Jej poloha bola uvažovaná v dvoch alternatívach – v osi hrádze a z lavičky na návodnom svahu. V príspevku sú ilustrované výsledky riešenia, zohľadňujúce polohu PTS v osi hrádze, nakoľko takto zvolená alternatíva sa vzhľadom na požadovaný účinok preukázala ako racionálna.

Optimalizácia jej hĺbky bola riešená formou parametrickej štúdie numerickým modelovaním, metódou konečných prvkov.

Princíp metódy numerického riešenia filtračného pohybu

Numerické riešenia filtračných úloh nestacionárneho prúdenia podzemných a priesakových vôd vyplývajú z rovnice (1) odvodenéj z rovnice kontinuity a Darcyho filtračného zákona (Thomas, S. D., Yuan, F., 1996):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x b \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y b \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - q \quad (1)$$

kde

h – je piezometrická výška (m),

k_x, k_y, k_z – koeficient filtrácie v smere osí x, y, z ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

t – čas (s),

S_s – špecifická zásobnosť (m^{-1}),

q – prítok resp. odtok (s^{-1}).

Priestorové numerické riešenia sú veľmi náročné z hľadiska tvorby vlastného numerického modelu ako i časových nárokov na výpočtový čas, s dopadom hlavne pri alternatívnych riešeniach úloh. Často, ak je to možné, sa preto nahrádza riešeniami v horizontálnej a vertikálnej rovine. Pri možnej aproximácii rovinným modelom integrujeme rovnicu (1) v hraniciach hrúbky b priepustnej vrstvy:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x b \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y b \frac{\partial h}{\partial y} \right) = (S_v + b S_s) \frac{\partial h}{\partial t} - Q \quad (2)$$

kde

b – je hrúbka priepustnej vrstvy pri tlakovom prúdení (m).

Pri prúdení s voľnou hladinou je:

S_v – koeficient zásobnosti voľnej hladiny (-),

$b = f(h)$, t.j. hrúbka saturovanej priepustnej vrstvy závisí od polohy voľnej hladiny podzemnej vody a rovnica je potom nelineárna,

Q – prítok resp. odtok ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Charakteristika riešeného úseku ochrannej hrádze Váhu, jej podložja a príľahlého územia

Ľavostranná ochranná hrádza Váhu medzi obcou Komoča a mestom Kolárovo je vybudovaná ako zemná homogénna, prevažne z ílovitých zemín s koeficientom filtrácie v ráde $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Kóta koruny hrádze sa pohybuje v rozpätí od 114,75 m n.m. v rkm 23,1 do 115,23 m n.m. v rkm 27,05, v priemere 115,0 m n.m. Jej výška nad terénom je premenlivá, v hraniciach od cca 4,4 m do cca 6,2 m. Šírka koruny hrádze je 4 m, lokálne aj viac. Sklon návodného svahu ochrannej hrádze je v hornej časti cca 1:3, v dolnej časti cca 1:6. Sklon vzdušného svahu je cca 1:3.

Povrchové pokryvné vrstvy podložja ochrannej hrádze v danom úseku tvoria jemnozrnné ílovité resp. hlinité zeminy s koeficientom filtrácie v ráde $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ich mocnosť je premenlivá od 1,5 do 2,5 m, lokálne až do 3 m. Pod nimi bol do hĺbky min. 50 m inžiniersko-geologickým prieskumom preukázaný výskyt piesčitých zemín (SP, S-F, SM) s koeficientom filtrácie v hraniciach od $1,41 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $4,87 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. U pieskov typu S-F, ktoré sa nachádzajú prevažne na kontakte s pokryvnými vrstvami – bezprostredne pod základovou škárou ochrannej hrádze bola preukázaná vysoká náchylnosť na sufóziu.

Územie v danom úseku má rovinný charakter. Príľahlé územie pozdĺž vzdušnej päty hrádze vykazuje lokálne terénne depresie do hĺbky cca 2,0 m. Priemerná hladina podzemných vôd bola zaznamenaná na kóte okolo 106,5 m n.m.

Výpočtový model a parametre povodňových prietokov

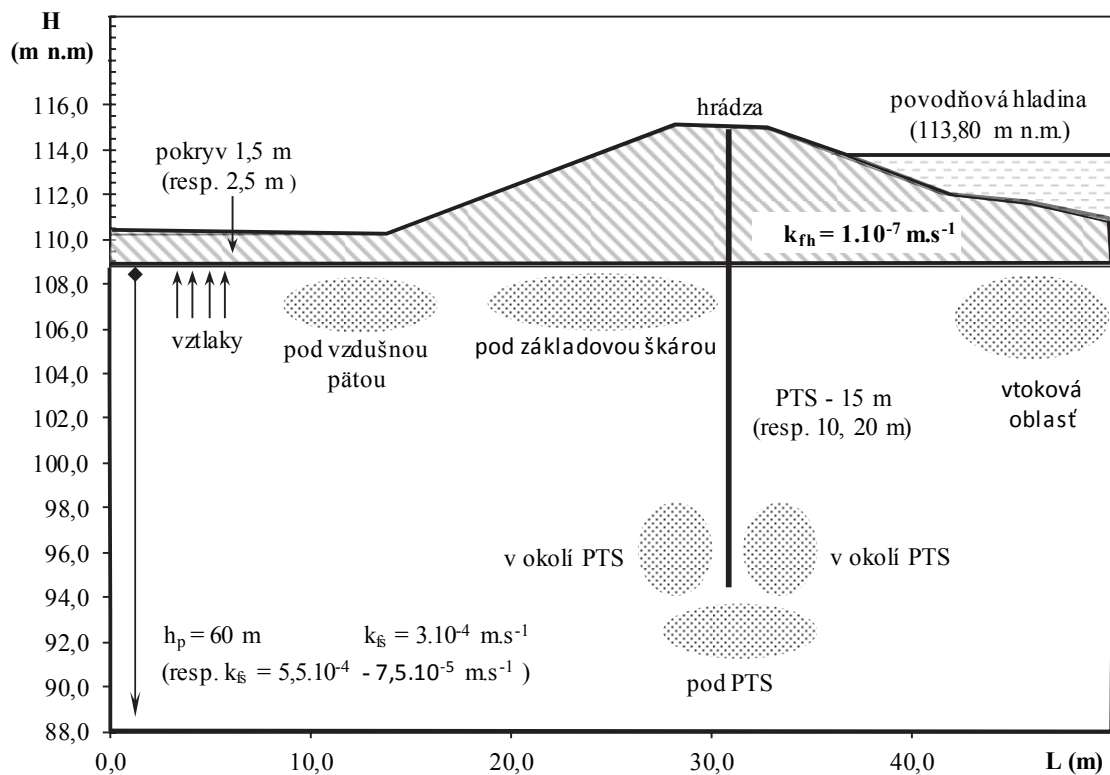
Vzhľadom na relatívne prijateľné diferencie (výšku hrádze, úroveň terénu, sklony svahov), bolo možné pre riešenie predmetnej problematiky vytypovať jeden výpočtový model (obr. 1). Sú v ňom zohľadnené rôzne varianty parametrov hrádze na danom úseku tak, aby sa výsledky riešenia s dostatočnou spoľahlivosťou dali aplikovať na celom skúmanom úseku (Bednárová, Grambličková, 2009).

Rozmanitosť geologických, čiastočne i morfológických podkladov podložja v predmetnom úseku si vyžiadalo parametrické riešenie daného problému. V súvislosti s podlozím akceptuje rôzne varianty hrúbky pokrývnej vrstvy (1,5 – 2,5 m) a premenlivé koeficienty filtrácie podložja v reálnych hraniciach výskytu (obr.1). Priepustnosť vodonosnej vrstvy v podloží hrádze determinuje intenzitu filtračného pohybu, ktorá je vyjadrená filtračnými rýchlostami. Na základe inžiniersko-geologického prieskumu, zo súboru 20-tich vzoriek bola vo výpočtoch uvažovaná hodnota koeficienta filtrácie týchto priepustných zemín $k_f = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Výsledky penetračných skúšok tiež potvrdili lokality, kde v horných polohách vodonosnej vrstvy bol výskyt prevažne kypkých pieskov do hĺbky 5 m, kým vo väčších hĺbkach ako 5 m boli preukázané prevažne piesky stredne uľahlé. Tento fakt bol vo výpočtoch zohľadnený alternatívnym riešením s koeficientom filtrácie pieskov do hĺbky 5 m $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Stredne uľahlým pieskom bol podobne priradený koeficient filtrácie $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Návrh parametrov priepustnosti podložja v možných hraniciach výskytu bol volený tak, aby boli postihnuté všetky extrémne hodnoty rizikových faktorov.

Na filtračnú stabilitu podložja má okrem priepustnosti vodonosných vrstiev významný vplyv aj dolná hranica pokrývnej vrstvy a poloha terénu. Na základe inžinier-

sko-geologického prieskumu sa dolná hranica pokrývných vrstiev v danej lokalite pohybovala prevažne od kóty 107,60 m n.m. do 108,6 m n.m., čo bolo uvažované aj v numerickom modeli rôznymi alternatívami riešenia. Polohe terénu bola priradená na základe inžiniersko-geologického prieskumu (ďalej I-G) priemerná hodnota 110,14 m n.m. Vo väzbe na polohu dolnej hranice pokrývnej vrstvy bola zvolená aj jej hrúbka.

Úloha bola riešená ako nestacionárne prúdenie s voľnou hladinou. Počiatočné podmienky tvorila v celej oblasti riešenia konštantná hodnota piezometrickéj výšky, identická s priemernou ustálenou hladinou podzemných vôd na kóte 106,5 m n. m získanou z hydrogeologického prieskumu. Nestacionárny jav bol definovaný povodňovou hladinou na kóte 113,88 m n.m. v dĺžke trvania 12 dní. Z toho vyplynula Dirichletova okrajová podmienka na celej hraničnej oblasti zo strany toku, t.j. na návodnom svahu hrádze, na teréne medzi hrádzou a tokom vrátane svahu toku. V telese hrádze bola uvažovaná zmiešaná okrajová podmienka - voľná hladina, ktorá sa modelovala v rôznych časových intervaloch od začiatku povodňových prietokov. Hranici kvázi nepriepustného podložja v hĺbke 60 m pod povrchom terénu bola pri riešení implicitne priradená Neumannova okrajová podmienka. Na ostatných častiach hranice riešenej oblasti v zázemí bol povolený priesak.



Obr. 1. Schéma riešenej oblasti, predpoklady výpočtu a skúmané rizikové faktory.

Fig. 1. Scheme of the area of interest, calculation assumptions and investigated risk factors.

Teleso ochrannej hrádze a pokryvné vrstvy boli uvažované s koeficientom filtrácie 10^{-7} m.s^{-1} vo všetkých riešených alternatívach.

Povodňové prietoky v tejto lokalite prezentujú kumuláciu povodňových prietokov vo Váhu a v Dunaji (Hydroconsulting s.r.o., 2009). Pri výskyte prietoku Q_{100} v Dunaji aj vo Váhu to predstavuje hladinu v rkm 23 na kóte 113,88 m n.m. Tieto údaje ako i dĺžka trvania povodňových prietokov 12 dní boli stanovené na základe pozorovaní Slovenským vodohospodárskym podnikom, š.p.

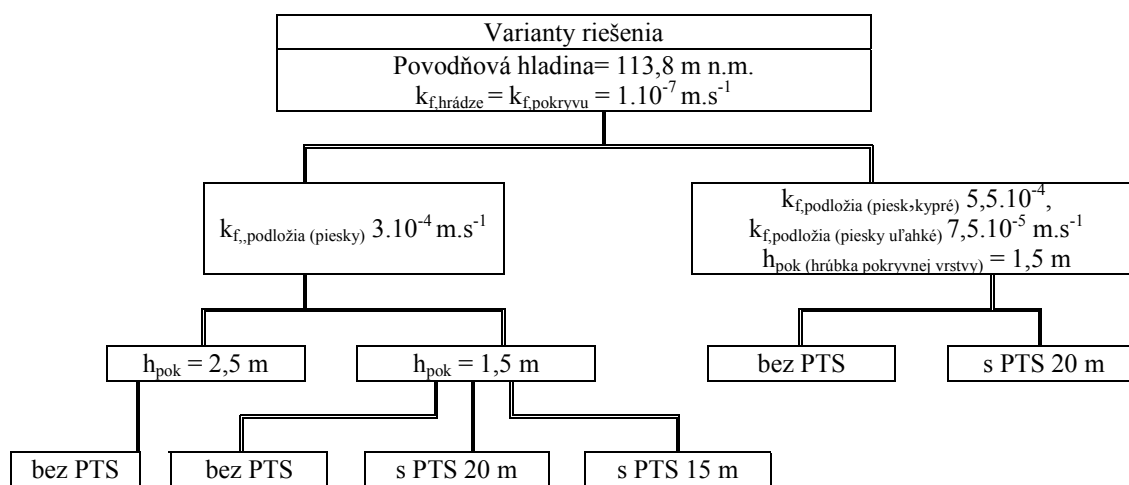
Analýzou parametrov filtračného prúdenia pri extrémnych povodňových prietokoch bolo možné posúdiť stabilitu ochrannej hrádze a v navrhnuť vhodné sanačné opatrenia. Na obr. 2 sú znázornené niektoré uvažované varianty riešenia. Získané výsledky z takto navrhnutých alternatív možno aplikovať pre celý riešený úsek ochrannej hrádze.

Posúdenie stability hrádze a priľahlého územia v prípade nechráneného podlažia (bez PTS)

Vzhľadom na geologickú skladbu podlažia ako aj odporované javy pri monitorovaní priľahlého územia počas povodní, bola analýza filtračného pohybu pri extrémnom hydrodynamickom namáhaní zameraná na vývoj namáhania pokryvných vrstiev vztlakom, na vývoj filtračných rýchlostí resp. gradientov v oblastiach výskytu sufózných pieskov (nebezpečie vzniku vnútornej sufózie a kontaktnej pozdĺžnej erózie) a na riziko zamokrenia úpätia vzdušného svahu hrádze a dotknutého priľahlého územia. Výsledky výpočtov pri extrémnom hydrodynamickom namáhaní s hladinou na úrovni odpovedajúcej Q_{100} s dĺžkou trvania 12 dní potvrdili v prípade nechráneného podlažia (bez PTS) prekročenie

všetkých sledovaných rizikových faktorov, t.j. rizika vzniku vnútornej sufózie, prelomenia pokryvných vrstiev vztlakom a podmáčania päty vzdušného svahu. Podmáčanie vzdušného svahu hrádze, priľahlého územia a prelomenie pokryvných vrstiev vztlakom bolo zaznamenané vo všetkých alternatívach numerického riešenia. Prekročenie kritického hydraulického gradientu bol, vzhľadom na potvrdený výskyt sufózných pieskov pod pokryvnými vrstvami, sledovaný v oblasti pod návodnou pätou hrádze, v podlaží pod korunou hrádze a v oblasti vzdušnej päty. Z numerických výsledkov vyplýva, že hodnotu hydraulických gradientov v podlaží pod korunou hrádze významne ovplyvňuje súčiniteľ filtrácie podlažia a hrúbka nenasýtenej zóny, determinovanej polohou dolnej hranice nepriepustnej pokryvnej vrstvy a uvažovanou ustálenou priemernou hladinou podzemných vôd 106,5 m n.m. Prekročený hydraulický gradient s dobou trvania viac ako 60 minút bol zaznamenaný najmä v podlaží s pokryvom hrúbky 1,5 m, čo predstavuje jeho rozhranie na úrovni cca 108,5. Pri výskyte nepriepustných pokryvných vrstiev siahajúcich do hĺbky rovnej, príp. väčšej ako 107,5 m n.m. (pokryv $\geq 2,5$ m), nebol hydraulický gradient pod korunou hrádze prekročený. Evidované bolo iba jeho krátkodobé prekročenie v oblasti vzdušnej päty a zanedbateľné bolo aj riziko zamokrenia vzdušného svahu hrádze, priľahlého územia a prelomenia pokryvných vrstiev vztlakom.

Naznačené výsledky riešenia analyzujúce vývoj parametrov filtračného prúdenia v podlaží ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu v sledovanom úseku pri extrémnom hydrodynamickom namáhaní Q_{100} , s dĺžkou trvania 12 dní potvrdili potrebu realizácie vhodných sanačných opatrení, ktoré by minimalizovali rizikové faktory na prijateľnú mieru.



Obr. 2. – Schéma riešených variantov geologickej skladby podlažia hrádze a sanačných opatrení s ohľadom na zabezpečenie filtračnej stability.

Fig. 2. Scheme of the solved alternatives in relation to the subsoil's variability and remedial action optimisation.

Návrh sanačných opatrení a ich posúdenie

Reálny výskyt sledovaných rizikových faktorov pri extrémnom hydrodynamickom namáhaní Q_{100} v prevažnej časti riešenej oblasti potvrdilo potrebu realizácie vhodných sanačných opatrení. Prekročený hydraulický gradient v podloží ochrannej hrádze s výskytom sufózných pieskov indikuje možnosť vzniku vnútornej sufózie resp. pozdĺžnej kontaktnej erózie s rizikom vyplavovania jemnozrnných frakcií z podložia. Elimináciu tohto negatívneho javu na prijateľnú mieru možno zabezpečiť podzemnou tesniacou stenou (PTS). V danom úseku, kde hĺbka neogénu je viac ako 60 m, bola k eliminácii priesakov telesom hrádze s prípadným výskytom prípustnejších polôh navrhnutá zavesená PTS z koruny ochrannej hrádze. Jej dĺžka bola uvažovaná v troch alternatívach – 10, 15 a 20 m pod korunou ochrannej hrádze. Vplyv takto navrhnutého opatrenia na zmenu filtračného režimu prúdenia podloží ochrannej hrádze, t.j. na redukciu hydraulických gradientov, zmenu tlakových pomerov v podloží a zamokrenie vzdušného svahu hrádze pri extrémnom hydrodynamickom zaťažení s dĺžkou trvania 12 dní, bolo predmetom optimalizácie jeho návrhu.

Podrobná numerická analýza potvrdila, že PTS dĺžky 15 m je postačujúca. Na obr. 3 a 4 je znázornený vývoj sledovaných rizikových faktorov v prípade navrhnutej 15 m dĺžky PTS z koruny hrádze v najnepriaznivejšom uvažovanom geologickom prostredí s hrúbkou pokryvnej vrstvy 1,5 m a so súčiniteľom filtrácie podložia rádovo 10^{-4} m.s⁻¹.

Vztlak na kryv v prípade realizácie PTS dĺžky 15 m v čase $T = 1, 5, 12$ dní od počiatku povodne je znázornený na obr. 3 čiarkovanou, bodkovanou a plnou čiarou. Z riešenia vyplýva, že kritický tlakový horizont, determinovaný hrúbkou pokryvu a geometriou vzdušného svahu hrádze, je prekročený už po prvom dni povodne. To signalizuje možnosť prelomenia kryvných vrstiev vztlakom (na obr. 3 - bodkovaná oblasť). Podobne sa potvrdilo aj zamokrenie vzdušného svahu hrádze. Predĺžovanie PTS (podobne ako i jej redukcia) má vzhľadom na vysokú priepustnosť podložia, v konečnom štádiu extrémneho namáhania minimálny dopad na zmenu tlakových pomerov. Potvrdili to výsledky predbežnej analýzy za predpokladu PTS dĺžky 10 m aj 20 m. Z výsledkov riešenia ďalej vyplýva, že PTS v prijateľnej miere redukuje hydraulický gradient v podloží a na úpätí vzdušného svahu ochrannej hrádze Váhu (obr. 4). Prekročenie hydraulických gradientov nebolo evidované ani v oblasti pod PTS, ani v jej bezprostrednom okolí. Kratšia PTS ako 15 m je vzhľadom na nedostatočnú redukciu filtračných rýchlostí pod kryvnými vrstvami neprijateľná.

Z výsledkov riešenia ďalej vyplýva, že PTS v prijateľnej miere redukuje hydraulický gradient v podloží a na úpätí vzdušného svahu ochrannej hrádze Váhu (na obr. 4). Prekročenie hydraulických gradientov nebolo evidované ani v oblasti pod PTS, ani v jej bezprostred-

nom okolí. Kratšia PTS ako 15 m je vzhľadom na nedostatočnú redukciu filtračných rýchlostí pod kryvnými vrstvami neprijateľná.

Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že redukciu tlakových pomerov a elimináciu podmäčania vzdušnej päty svahu nie je možné zabezpečiť zavesenou PTS. Účinné by bolo jej zaviazanie do nepriepustného podložia, avšak v danom geologickom a morfológickom prostredí, ale aj vzhľadom na podstatu funkcie ochrannej hrádze, by bol takýto prístup sanácie iracionálny.

Výsledky analýzy poukázali, že zavesená PTS v úseku s hrúbkou pokryvu menej ako 2,5 m, neeliminuje všetky rizikové faktory bezpečnosti ochrannej hrádze. V týchto úsekoch bolo odporúčané lokálne realizovať aj doplnujúce sanačné opatrenia. Osvedčené sú stabilizačné prísypy na úpätí vzdušného svahu ochrannej hrádze, siahajúce do vzdialenosti tzv. ochrannej zóny. Výška stabilizačných prísypov vyplýva z vypočítanej polohy dosahovaných tlakových horizontov a z polohy kritického tlakového horizontu (súvisí s hrúbkou kryvnej vrstvy). Na základe výpočtov a dostupných inžiniersko-geologických podkladov na úseku ľavostrannej ochrannej hrádze v rkm 23,040 – 27,075 medzi obcou Komoča a mestom Kolárovo to predstavuje prísyp o mocnosti max. cca 60 cm, čo znamená navýšenie terénu po výškovú úroveň maximálne do úrovne 110,80 m n.m. v oblasti vzdušnej päty ochrannej hrádze. Dĺžku stabilizačného prísypu treba spresniť na základe stabilitných výpočtov vzdušného svahu ochrannej hrádze. V tých úsekoch ochrannej hrádze, kde je mocnosť kryvnej vrstvy väčšia ako 2,5 m, nebola analýzou výpočtov potreba stabilizačných prísypov potvrdená. PTS eliminuje tlakové pomery v podloží na prijateľnú mieru.

Navrhnuté kombinované sanačné opatrenia redukovujú všetky rizikové faktory ohrozujúce stabilitu vzdušného svahu ochrannej hrádze v danej lokalite. Kým PTS redukuje maximálne hydraulické gradienty v podloží na prijateľnú mieru, stabilizačným prísypom sa eliminuje prelomenie kryvných vrstiev vztlakom.

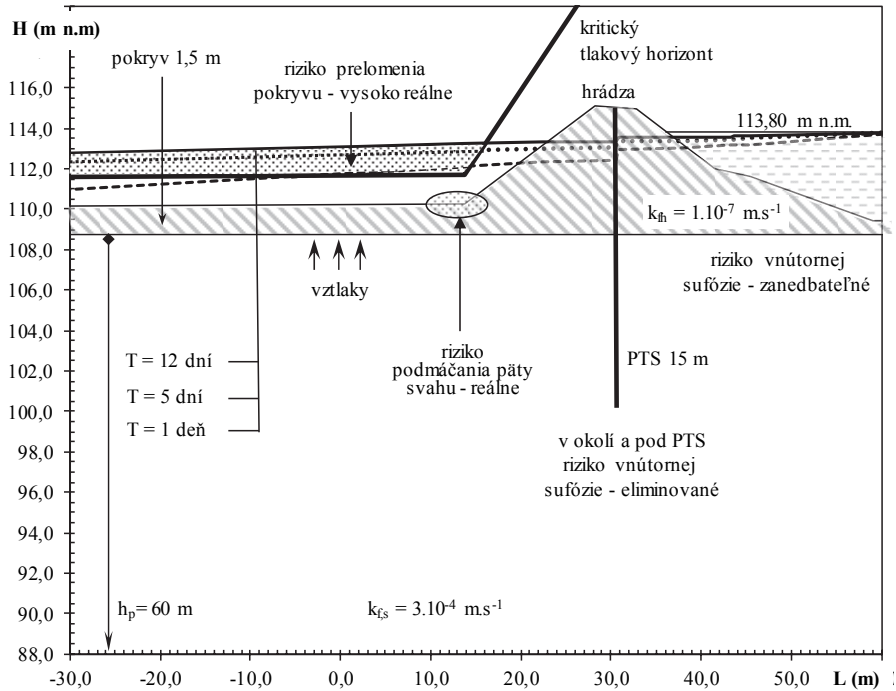
Realizácia sanačných opatrení

S cieľom zabezpečenia stability ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu v rkm 23,040 – 27,075 bola navrhnutá realizácia stavby „Utesnenie ĽOH Váhu v úseku Kolárovo-Komoča, hkm 22,966-27,594“, ktorá rieši uvedenú problematiku realizáciou PTS v celkovej dĺžke 4 628 m. Podľa údajov, poskytnutých SVP OZ Bratislava z marca 2016, sa realizovanými sanačnými opatreniami zvýšila bezpečnosť ochrannej hrádze pri súbehu povodňových prietokov Q_{100} na riekach Váh a Dunaj s dĺžkou trvania 12 dní pre cca 8000 obyvateľov na území o rozlohe 103 km².

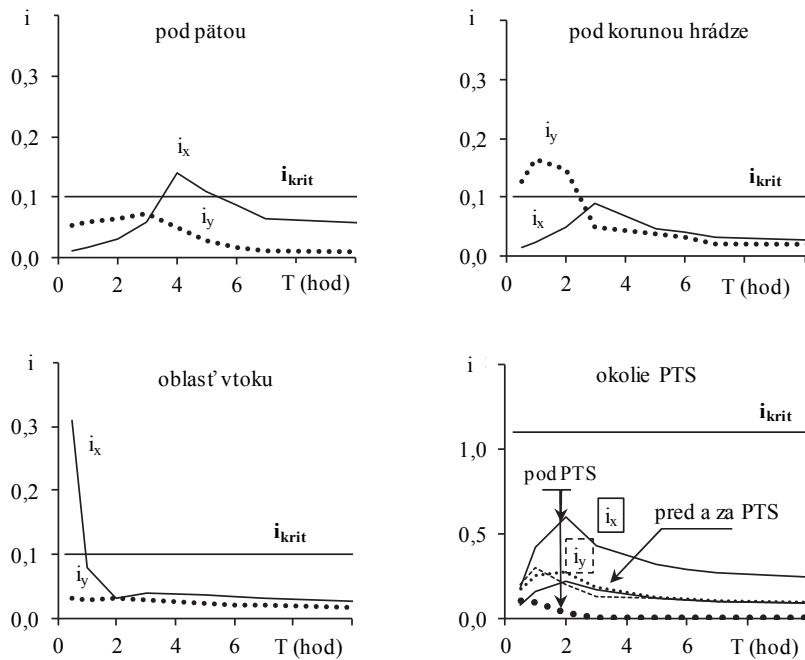
PTS bola budovaná z koruny hrádze (obr. 5), prechádza jej podloží do hĺbky 15 m od koruny hrádze. Hrúbka PTS je v celej hĺbke minimálne 30 cm (obr. 6) a bola

zhotovovaná bezvýkopovou technológiou – tryskovou injektážou, ktorá zabezpečila preinjektovanie preferovaných ciest v jej celom výškovom rozsahu. Suspenzia pre realizáciu PTS je zdravotne nezávadná zmes

cementu, bentonitu a vápencovej múčky, ktorá po zmiešaní s pôvodnou zemínou, resp. s materiálom hrádze dosiahla požadovanú priepustnosť s koeficientom filtrácie $k_f \leq 1.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$.



Obr. 3. Výsledky riešenia filtračného pohybu v podloží hrádze pri PTS = 15 m.
 Fig. 3. Results of the filter rate solution in the dike's subsoil with the cut-off wall = 15 m.



Obr. 4. Vývoj hydraulických gradientov v podloží hrádze pri PTS = 15 m.
 Fig. 4. Development of hydraulic gradient in the dike's subsoil with the cut-off wall = 15 m.



Obr. 5. Realizácia podzemnej tesniacej steny (foto: z archívu SVP, š.p., 2013).

Fig. 5. Cut-off wall under construction (photo: from the archive SVP, 2013).



Obr. 6. Odkop pre kontrolu hrúbky PTS (foto: z archívu SVP, š.p., 2013).

Fig. 6. Excavation for cut-off wall thickness inspection (photo: from the archive SVP, 2013).

Na telese hrádze a na vzdušnej päte hrádze boli vybudované meracie a pozorovacie zariadenia pre meranie hladiny podzemnej vody v čase normálnych aj povodňových prietokov.

Financovanie uvedenej stavby bolo zabezpečené z Kohézneho fondu Európskej únie v rámci Operačného programu Životné prostredie. Stavebné práce začali dňa 6.5.2013 a stavba bola odovzdaná a prevzatá 12.12.2013.

Záver

Z numerických výpočtov zameraných na analýzu filtračného režimu podloží a príľahlým územím ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu pri extrémnom zaťažení Q_{100} vyplýva že PTS s dĺžkou 15 m v dostatočnej miere redukuje maximálne filtračné rýchlosti v podloží a na úpätí vzdušného svahu ochrannej hrádze Váhu. Neboli preukázané prekročené ani hydraulické gradienty v oblasti pod PTS, ani v jej bezprostrednom okolí. Možno teda predpokladať, že realizáciou PTS sa eliminuje riziko vzniku vnútornej sufózie v podloží a zabezpečí sa filtračná stabilita podložia. Súčasne jej realizáciou z koruny hrádze sú eliminované aj prípadné preferované priesakové cesty telesom ochrannej hrádze. Rizikovým faktorom bol však výpočtami potvrdený aj nadmerný vztlak na pokryvné vrstvy a zatápanie príľahlého územia. Zavesená PTS síce predĺži priesakovú dráhu a primerane aj priesakové množstvá, no napriek tomu riziko zamokrenia vzdušného svahu hrádze a podhrádzia je stále reálne. Vzhľadom na charakter príľahlého chráneného územia však možno túto skutočnosť pripustiť (Hydroconsulting, s.r.o., júl 2009), a tak sa k doplnujúcim sanačným opatreniam nepristúpilo. Tu však treba upozorniť, že okrem zamokrenia úpätia vzdušného svahu hrádze a jej príľahlého územia

tu nemožno vylúčiť ani lokálne riziko prelomenie pokryvných vrstiev vztlakom. To nesie so sebou možnosť vzniku výronov s vyplavovaním jemných frakcií z podložia (vzhľadom na potvrdený výskyt sufózných pieskov pod pokryvnými vrstvami). Z poznatkov z I-G prieskumu však vyplýva, že takéto nebezpečné úseky sa v skúmanej lokalite vyskytujú len zriedka.

PodĎakovanie

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu VEGA 1/0452/17.

Literatúra

- Bednárová, E., Grambličková, D. (2009): Ľavostranná ochranná hrádza Váhu km 23,040-27,075. Návrh sanačných opatrení. SvF STU v Bratislave, Bratislava 66 s.
- Glaus, P., Babečka J. (2009): Utesnenie ľavostrannej ochrannej hrádze Váhu v úseku Kolárovo – Komoča, hkm 22,966-27,594. Dokumentácia pre vydanie stavebného povolenia. Hydroconsulting, s.r.o., Bratislava, júl 2009.
- Šikula, G. a kol (2009): Kolárovo – Komoča – utesnenie EOH Váhu v úseku hkm 23,040-27,075. Orientačný inžiniersko-geologický prieskum. EkoGeos zakladanie stavieb, s.r.o. Bratislava.
- Thomas, S. D., Yuan, F. (1996): Groundwater and the environment. The 2nd Annual Environmental Engineering Workshop. Groundwater modelling case studies. Qxford Geotechnika International. University of Durham.
- Vybraná výkresová dokumentácia – situácia dotknutého miesta, priečne profily ľavostrannej ochrannej hrádze. Hydroconsulting, s.r.o., Bratislava, 2009.
- Utesnenie EOH Váhu v úseku Kolárovo – Komoča, hkm 22,966-27,594. Správa po ukončení. SVP Bratislava, 2016.

DESIGN, ASSESSMENT AND REMEDIATION OF THE LEFT FLOOD PROTECTION DIKE OF THE RIVER VÁH IN KM 23,040 – 27,075

Primary signals of threatening the stability of flood protection dikes can be often detected by monitoring of dikes and their surrounding areas during extreme hydrodynamic loading during floods. Similarly it was also on selected sections of the left side dike of Váh River in km 23.040 – 27.075. Accumulation of observed negative effects testified threat to the stability of dike. Risk factors appeared: waterlogging of the downstream toe and slope of the dike, breaking of the overburden caused by uplift and exceeding of the critical hydraulic gradient. A detailed analysis of the development of filtration parameters in the body, subsoil and in the adjacent territory of a dike under extreme hydrodynamic loading with the water level corresponding to Q_{100} and with duration of 12 days confirmed this suspicion.

For this reason it was necessary to design and review optimal flood protection measures and analyse their effect on filtration flow in this locality. The elimination of exceeded hydraulic gradient in subsoil of dike to acceptable level can be ensured by the cut-off wall (COW). In the present section, where the depth of Neogene is more than 60 m, was designed suspended COW from the crest of the dike (to eliminate seepages through the body of dike with possible occurrence of permeable positions). Its length was considered in the two alternatives - 15 and 20 m below the crest of the dike. Optimisation process confirmed that it is sufficient implementation of the COW with a length of 15 m in the given engineering-geological conditions. It reduces to the acceptable level hydraulic gradient in the subsoil, near the downstream toe of the dike and in the area under the COW and in its immediate vicinity. Its effectivity of reducing uplift and waterlogging of the dike's downstream slope is little significant even negligible. Its extension to greater depths does not solve this

problem. What is needed is realization additional remedial action. Proven are stabilizing backfills on the toe of the downstream slope of the dike, extending to the so-called protection zone. The elimination of breaking the overburden by uplift can effectively contribute stabilizing backfill with thickness approximately 60 cm. This represents an increase in the terrain level up to a height of 110.80 m a.s.l. near the downstream toe of dike, locally without increasing - according to the exceeding of the critical horizon. The length of the stabilizing backfill should be specified on the base stability analysis of the downstream slope of the dike.

The proposed combined remedial measures reduce all risk factors threatening the stability of the downstream slope of the dike. While COW reduces the maximum gradients in the subsoil to acceptable levels, stabilizing backfill eliminates breaking of the overburden layers caused by uplift.

Remediation of the left side flood protection dike of Váh River in km 23.040 - 27.075 started in May 2013 and was completed in December 2013. Remediation consists of the suspended cut-off wall from dike's crest to a depth of 15 m below the crest to level 100 m a.s.l. across the whole analysed section of dike. Its minimum thickness is 30 cm and the estimated maximum permeability $1.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ (Hydroconsulting, s.r.o., July 2009). The implementation of additional remediation has not been realised. It should be noted that the risk of breaking of the overburden layers by uplift and waterlogging of the adjacent area still remains, which entails a possibility of occurrence of outflows with the risk of washout of the fine-grained fraction from subsoil (due to confirmed presence of a suffosive sands under overburden layers. Based on the knowledge gained from the E-G survey such dangerous sections on the site occur rarely.

RNDr. Danka Grambličková, PhD.
prof. Ing. Emília Bednárová, PhD.
Juraj Škvarka, Ing.
Katedra geotechniky SvF STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava
Tel.: 00421259274670
E-mail: danka.gramblickova@stuba.sk
emilia.bednarova@stuba.sk
juraj.skvarka@stuba.sk

Ing. Vladimír Chrobák
Slovenský vodohospodársky podnik, š.p., OZ Bratislava
Karloveská 2
841 04 Bratislava
Tel.: 0042160292347
E-mail: vladimir.chrobak@svp.sk