

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Peter Mackovjak

Autoreferát k dizertačnej práci

**POSÚDENIE FILTRAČNEJ STABILITY
OCHRANNÝCH HRÁDZÍ ONDAVY**

na získanie akademického titulu **philosophiae doctor (PhD.)**
v doktorandskom študijnom programe: **3629 Vodohospodárske inžinierstvo**

Bratislava, 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre geotechniky Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Peter MACKOVJAK

Školiteľ: prof. Ing. Emília BEDNÁROVÁ, PhD.
Katedra geotechniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti:
.....

.....
.....

.....
.....

Autoreferát bol rozoslaný:
Obhajoba dizertačnej práce sa konáo hod.
na Katedre geotechniky Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave,
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

.....
prof. Ing. Stanislav UNČÍK, PhD.
dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

OBSAH

1.	ÚVOD	1
2.	PROTIPOVODŇOVÁ OCHRANA VÝCHODOSLOVENSKEJ NÍŽINY	1
3.	ŠPECIFIKÁ A RIZIKOVÉ FAKTORY OCHRANNÝCH HRÁDZÍ	1
3.1	Filtračná stabilita	2
4.	CIEĽ DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
5.	POPIS GEOLOGICKEJ SKLADBY PODLOŽIA A SPRACOVANIE VÝSLEDKOV	5
5.1	Posúdenie náchylnosti zemín na sufóziu	8
5.2	Rizikové faktory filtračnej stability podložia ochranných hrádzí Ondavy.....	9
6.	POSÚDENIE FILTRAČNEJ STABILITY OCHRANNEJ HRÁDZE ONDAVY	9
7.	VÝSLEDKY RIEŠENIA	13
8.	ZÁVERY A ODPORÚČANIA PRE PRAX	20
	VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY.....	22
	PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA	23

1. ÚVOD

Charakteristickou črtou tokov oblasti Východoslovenskej nížiny je ich značná rozkolísanosť, determinovaná obdobím chudobným na vodu v tokoch na jednej strane, resp. s obdobím mimoriadne bohatým na veľké – až povodňové prietoky. Jedným z najvýznamnejších tokov v tejto oblasti je Ondava. Medzi závažné prvky pri ochrane územia pred povodňami patria ochranné hrádze (ďalej aj OH). Po konštrukčnej stránke a tiež svojimi parametrami to sú relatívne jednoduché hydrotechnické konštrukcie. Napriek tomu sa pri ich prevádzkovaní stretávame s mnohých problémami, ktoré vyplývajú predovšetkým z ich líniového charakteru, širokej variability geologických, morfológických a geotechnických pomerov, miery spoľahlivosti hydrologických podkladov, ako aj ich krátkodobého hydrodynamického namáhania. Cieľom dizertačnej práce je analýza miery vplyvu rôznych faktorov ovplyvňujúcich ich filtračnú stabilitu. Formou parametrických štúdií bol skúmaný vplyv geologickej skladby podložia, morfológie terénu, polohy toku od hrádze a tvar a dĺžka povodňovej vlny. Výsledky parametrických štúdií môžu byť nápomocné pri posudzovaní filtračnej stability ochranných hrádží v podobných prírodných podmienkach.

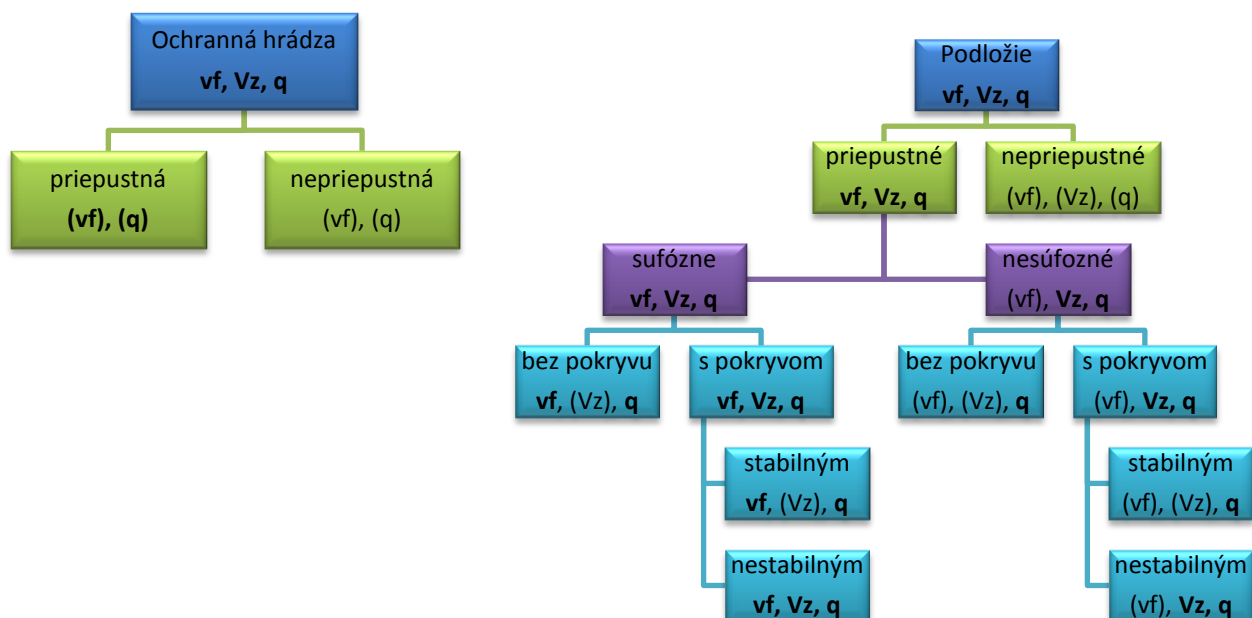
2. PROTIPOVODŇOVÁ OCHRANA VÝCHODOSLOVENSKEJ NÍŽINY

Ľudstvo od nepamäti využíva vodné plochy a toky k svojmu bytiu a rovnako tak dlho „zápasí“ s vodou v čase povodní. Aj napriek dlhodobému vývoju a pokroku ľudí v technickom smere nie sme schopní ani v súčasnosti plne chrániť svoje majetky a životy v boji s prírodou. Dlhodobé rady meraní a pozorovaní hydrologických údajov sú významným podkladom pri navrhovaní a projektovaní vodných stavieb na protipovodňovú ochranu (Tabuľka 2.1). Napriek tomu nás povodne v ostatných desaťročiach presvedčili o sile prírody a potrebe prehodnotiť bezpečnosť týchto vodných stavieb a overiť spoľahlivosť ich prevádzky. Častokrát je to iba otázka nedostatočnej údržby (zanesenie a zarastanie korýt tokov a inundačných území). Skúsenosti však ukazujú, že problémom sú aj zmeny klimatických podmienok, determinujúce napr. nadvyšovanie ochranných hrádží, zvyšovanie kapacity bezpečnostných priepadov veľkých vodných stavieb – priehrad a pod. Majúc na zreteľ protipovodňovú ochranu, tu treba podotknúť, že to nie je len úloha vodohospodárov, ale rovnako sa to týka činnosti v oblasti poľnohospodárstva, lesníctva, miestnych samospráv a pod.

3. ŠPECIFIKÁ A RIZIKOVÉ FAKTORY OCHRANNÝCH HRÁDŽÍ

Pri prevádzkovaní OH sa stretávame s mnohých problémami, ktorých príčina spočíva v špecifikách, ktorými sa líšia od iných vodných stavieb. Predovšetkým je to ich líniový charakter, široká variabilita geologických, morfológických a geotechnických pomerov, ich krátkodobé hydrodynamické namáhanie, často nepoznaná (vzhľadom na ich vek) samotná skladba hrádží atď. Mimo-riadne dôležité postavenie v súbore prírodných faktorov majú hydrologické podklady a miera ich spoľahlivosti, ktoré sú základom pre určenie výšky hrádze. Z tohto aspektu je potrebné poznať nielen hodnotu prietokov, resp. výšku hladiny, ale taktiež priebeh povodňových vln a dĺžku ich trvania, ktoré majú náhodný – stochastický charakter. Ďalšie faktory prírodného prostredia, vplývajúce na bezpečnosť OH – geologické, morfológické a geotechnické, sú široko variabilné, časovo aj priestorovo premenlivé, s ohľadom na líniový charakter hrádží. (Lukáč, M., Bednárová, E., 2006).

Pri navrhovaní a prevádzke ochranných hrádzi je potrebné uvažovať s množstvom rozličných rizikových faktorov, medzi ktoré najčastejšie patrí preliatie a porušenie filtračnej stability či už telesa alebo podložia OH. Veľký vplyv na stabilitu, ale aj na ich bezpečnosť, majú zeminy zabudované do telesa ochranných hrádzi a nachádzajúce sa v ich podloží. Z tohto hľadiska môžeme rizikové faktory bezpečnosti OH podľa (Bednárová, E., 2004) v súlade so schémou na Obr. 3.1 rozdeliť nasledovne:



Obr. 3.1 Rizikové faktory bezpečnosti ochranných hrádzi (zdroj: Bednárová, E., 2004)

Legenda:

- v_f filtračná rýchlosť – rizikový faktor porušenia filtračnej stability - vznik sufózných javov
- V_z vztlak – rizikový faktor porušenia filtračnej stability - prelomenia pokryvných vrstiev vztlakom
- q priesak – rizikový faktor spoločenský – zaplavenie územia
- v_f, V_z, q existencia rizikových faktorov – potreba sanačných opatrení
- $(v_f), (V_z), (q)$ z hľadiska možného vzniku rizika – bezpredmetné

3.1 Filtračná stabilita

Porušenie filtračnej stability z dôvodu vzniku sufózných javov je typické pre sypké (štrkovité a piesčité) zeminy. Jej vznik je podmienený dvoma kritériami, a **to geometrickým a hydraulickým kritériom**. V prípade homogénnych ochranných hrádzi (vybudovaných z málo priepustných zemín) sú rizikovými miestami vzniku sufózie kontakt hrádze s priepustným podložíom (pozdĺžna kontaktná erózia), alebo v oblasti priepustného podložia (vnútorná sufózia). Pri posudzovaní náchylnosti materiálu z hľadiska geometrického kritéria, ako sú veľkosť a tvar zŕn, rozloženie a tvar pórov a pod., sa vychádza z krivky zrnitosti. Niektorí autori uvádzajú ako smerodajný ukazovateľ číslo nerovnozrnosti C_u , alebo hmotnostný podiel jemnej ($d_{f,15}$ – ochranný filter) a hrubozrnej ($d_{z,85}$ – zemina zabudovaná do hrádze) frakcie a pod. (Lukáč, M., Bednárová, E., 2006).

Vyplavovanie jemnozrnných častíc tvoriacich skelet prostredia môže zapríčiniť zväčšenie pórovitosti, priepustnosti a aj sadnutie samotnej hrádze. Podľa Pavčiča je rozhodujúci tzv. maximálny prípustný priemer priesakových kanálikov (pórov) v zemine, ktorými môžu byť vyplavované jemnozrnné častice. Tento priemer zŕn možno vyjadriť vzorcom:

$$d_{0\max} = 0,455 \cdot \sqrt[n]{C_u} \cdot (1 + 0,05 \cdot C_u) \cdot \frac{n}{1-n} \cdot d_{17} \quad [mm] \quad (3.1)$$

kde C_u číslo nerovnozrnnosti, $C_u = d_{60}/d_{10}$
 n pórovitosť zeminy,
 d_{17} priemer zŕn pripadajúci na 17% prepadu.

Pre maximálny priemer zrna, ktoré sa vplyvom sufózie môže dostať do pohybu d_{suf} platí:

$$d_{suf} = 0,77 \cdot d_{0\max} \quad [mm] \quad (3.2)$$

Ak $d_{suf} < d_{\min}$, pričom $d_{\min}$ je minimálny priemer zrna v zemine, zemina nie je náchylná na sufóziu.

Za predpokladu, že určité minimálne vyplavenie najjemnejších častíc nie je pre konštrukciu rizikové, môžeme kritérium pre sufóziu zemín upraviť. Pri hrádzach (aj sypaných priehradách) sa zväčša pripúšťa vyplavenie 3 až 5 % častíc z celkového objemu zeminy. Potom upravené kritérium môžeme zapísať takto:

$$d_{suf} \leq (d_3 \div d_5) \quad (3.3)$$

kde d_3, d_5 priemer zŕn pripadajúci na 3, resp. 5 % prepadu,
 d_{suf} priemer zŕn náchylných na sufóziu.

Podľa Instrukcia (1965) zemina nie je náchylná na sufóziu, ak platí :

$$\frac{d_3}{d_{17}} \geq (0,32 + 0,016C_u) \sqrt[n]{C_u} \frac{n}{1-n} \quad (3.4)$$

kde d_x je priemer zrna (mm),
 C_u číslo nerovnozrnnosti (-),
 n pórovitosť (-).

Istomina, I. (1957) na základe experimentálnych meraní odporúča v závislosti od čísla nerovnozrnnosti tieto prípustné hydraulické gradienty :

$C_u < 10$	$I_{\text{prip}} = 0,4$	nesufózne zeminy
$10 < C_u < 20$	$I_{\text{prip}} = 0,2$	prechodná oblasť (môže, ale nemusí dochádzať k sufózii)
$C_u > 20$	$I_{\text{prip}} = 0,1$	sufózne zeminy

Z literatúry je známe geometrické kritérium pre posudzovanie filtračnej stability zemín podľa Wan & Fell. Zeminu možno považovať za nesufóznú, ak platí podmienka:

$$\frac{30}{\log\left(\frac{d_{90}}{d_{60}}\right)} < 80 \text{ a } \frac{15}{\log\left(\frac{d_{20}}{d_5}\right)} > 22 \quad (3.5)$$

kde d_i je priemer zŕn pripadajúci na i % prepadu (mm).

Ako už bolo spomenuté, pre vznik vnútornej sufózie je nevyhnutné, aby bolo splnené aj **hydraulické kritérium**, t. j. prekročenie kritickej hodnoty filtračnej rýchlosti v_{krit} resp. hydrau-

lického gradientu I_{krit} . Podľa Patraševa je kritický hydraulický gradient pre častice menšie ako d_{suf} vyjadrený nasledovne.

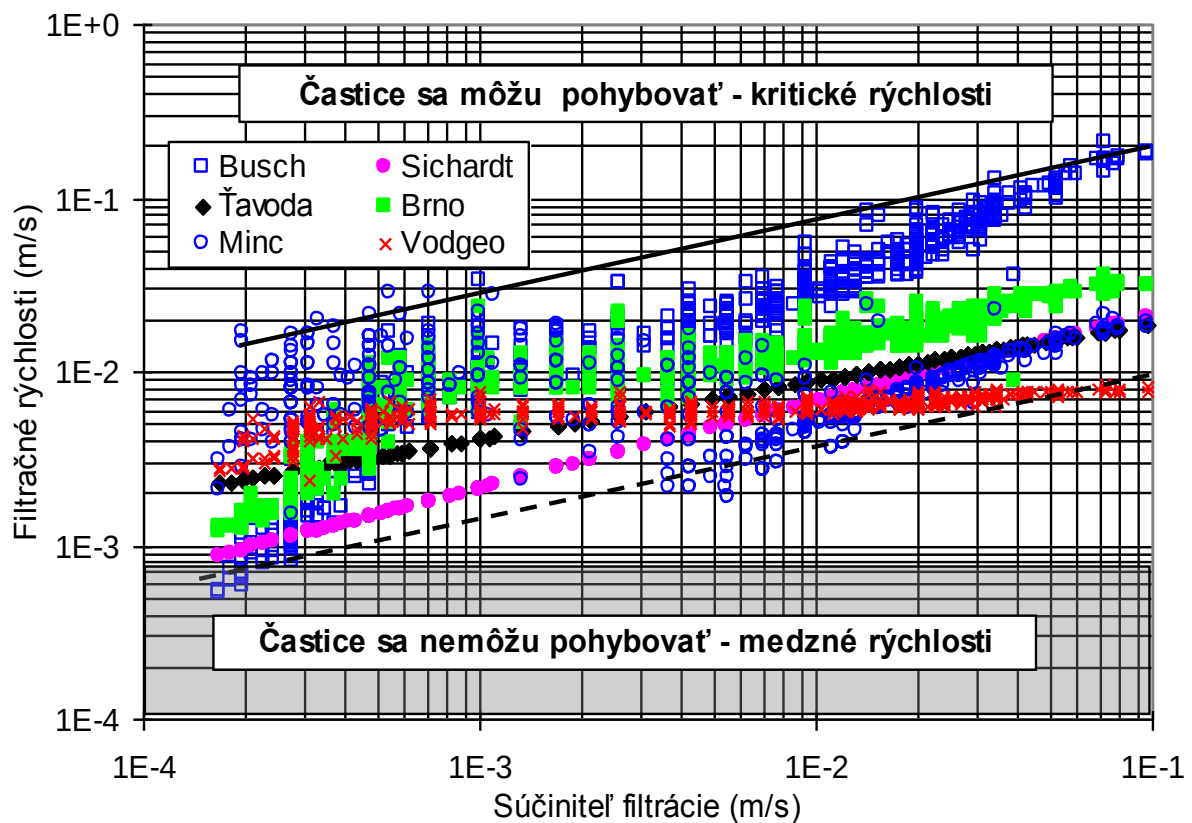
$$I_{krit} = 0,6 \cdot \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot [0,82 - 1,8n + 0,0062 (C_u - 5)] \cdot \sin \left(30^\circ + \frac{\nu}{8} \right) \cdot d_{suf} \sqrt{\frac{n \cdot g}{\nu \cdot k_f}} \quad (3.6)$$

Analogicky pre kritickú hodnotu filtračnej rýchlosti platí

$$v_{krit} = 0,6 \cdot \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot [0,82 - 1,8n + 0,0062 (C_u - 5)] \cdot \sin \left(30^\circ + \frac{\nu}{8} \right) \cdot d_{suf} \sqrt{\frac{n \cdot g \cdot k_f}{\nu}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.7)$$

Jedná sa o rýchlosť prúdenia, pri ktorej sa začínajú v póroch štrkovitých zemín pohybovať piesočnaté a prachovité častice.

Za účelom posúdenia rizika vzniku vnútornej sufózie sa v inžinierskej praxi využíva graf (Hulla, J., Cábel, J., 1997), podľa ktorého možno stanoviť kritickú filtračnú rýchlosť v závislosti na koeficiente filtrácie (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Medzné a kritické rýchlosti pre posudzovanie filtračnej stability štrkovitých zemín (Hulla, J., Cábel, J., 1997)

Autori pri jeho konštrukcii uplatnili výsledky experimentov od vyššie uvedených autorov. Je tu súhrn filtračných rýchlostí, pri ktorých nastáva pohyb jemných častíc v póroch štrkovitých a piesočnatých zemín v závislosti na koeficiente filtrácie.

4. CIEĽ DIZERTAČNEJ PRÁCE

Z doterajších poznatkov vieme, že najčastejšou príčinou prietrží poškodenia OH je ich prelievanie a priesaky. Súvisí to najmä s mierou spoľahlivosti hydrologických a geologických podkladov, technickým stavom korýt (ich zanášanie, stav zátopového územia tvoreného bermami v medzihrádzovom priestore a i.). Cieľom dizertačnej práce je podrobná analýza rizikových faktorov ochranných hrádzí Ondavy s ohľadom na konkrétne podmienky vodnej stavby. Podrobnejším popisom možných rizikových faktorov ohrozenia bezpečnosti vodnej stavby upozorniť na potrebu zvýšeného dohľadu zo strany vlastníka stavieb, venovať väčšiu pozornosť sanáciám v prípade poškodenia hrádze na takomto úseku. Výsledky dizertačnej práce poskytnúť prevádzkovateľovi vodnej stavby, ktoré by mohli slúžiť ako metodický návod pre riešenie problémov ochranných hrádzí v podmienkach podobného významu.

V súlade s týmito zámermi boli ciele dizertačnej práce stanovené takto:

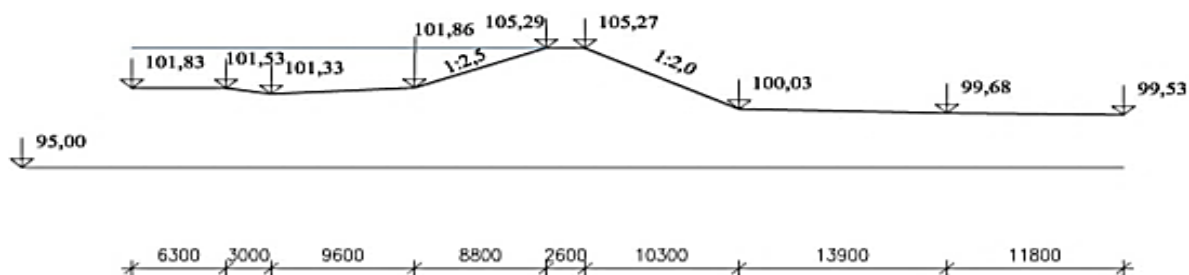
- štúdium všetkých dostupných podkladov z inžiniersko-geologických prieskumov, ktoré sa vykonali v minulosti pri výstavbe jednotlivých kanálov ústiacich do Ondavy a rovnako tak štúdium pozdĺžnych profilov OH Ondavy s cieľom vytypovania najrizikovejšieho priečneho profilu,
- pomocou programu Geo-Studio riešením nestacionárneho prúdenia podzemných a priesakových vôd metódou konečných prvkov (ďalej aj MKP) analyzovať rizikové faktory bezpečnosti OH Ondavy z hľadiska reálnych zmien geologickej skladby podložia, morfológických pomerov priľahlého územia a hydrologických parametrov povodňovej vlny,
- objasnenie miery vplyvu jednotlivých premenných (prírodných geologických, morfológických a hydrologických faktorov) riešiť formou parametrických štúdií,
- výstupy zosumarizovať do odporúčaní pre prax, s možnosťou využitia získaných poznatkov pri riešení problémov zvyšovania bezpečnosti ochranných hrádzí v podobných prírodných podmienkach.

5. POPIS GEOLOGICKEJ SKLADBY PODLOŽIA A SPRACOVANIE VÝSLEDKOV

Pri riešení popísanej úlohy bola vytypovaná oblasť pravostrannej ochrannej hrádze Ondavy (ďalej aj POH) v staničení od železničnej trate Michalovce - Trebišov po sútok Ondavy s Trnávkou (dĺžky cca 13,000 km), ktorá je charakteristická priamym úsekom koryta. Poznatky o materiáloch nachádzajúcich sa v telese ochrannej hrádze boli prevzaté z projektu Grman a kol., 2004. Za účelom zistenia geologickej skladby podložia POH Ondavy v skúmanom úseku som na základe dostupných projektov (Geofond, správca OH) preštudoval už zrealizované projekty s IGHP so stanovenými fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami materiálov jednotlivých vrstiev. Pozornosť bola zameraná na projekty vypracované v 80-tych rokoch v rámci vodohospodárskych úprav a odvodnenia pozemkov v pravostrannej oblasti toku Ondava (Petro, Ľ., 1984, Petro, Ľ., 1987, Mosendz, G., 1984, Danko, J., 1985), kedy bola vybudovaná sieť kanálov ústiacich do Ondavy. Spolu bolo preštudovaných 111 ks vrtných sond s popisom jednotlivých geologických vrstiev s ich fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami.

Z výsledkov štúdie vyplýva, že v 96,6 % skúmaných vrtov (107 ks) boli pokryvné vrstvy podložia do hĺbky $\geq 3,00$ m tvorené kvázi nepriepustnými zeminami. Jednalo sa prevažne o ílovitú hlinu až íl s priemernou **objemovou tiažou $17,0$ až $21,0 \text{ kN.m}^{-3}$ a koeficientom filtrácie rádovo od 1.10^{-11} až $3,7.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$** . V malom zastúpení, len okolo 3,6 % skúmaných vrtov (4 vrty), boli zistené tenké pokryvné vrstvy o hrúbke cca 1,00 m tvorené už spomínanými ílovitými hlinami s priepustným podložím, tvoreným prevažne pieskami s priemernou **priepustnosťou cca $2,7.10^{-6}$ až $2,5.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$** . Pri uvedenej skladbe podložia, t. j. tenká nepriepustná vrstva (pokryv) na priepustnom podloží, je najväčším rizikovým faktorom vztlak (V_z), pôsobením ktorého ako dôsledok hrozí riziko prelomenia pokryvných vrstiev. Jeho vplyv je však závislý od dĺžky trvania povodňových prietokov a výšky vzdutia povodňovej hladiny (poloha tlakovej čiary nad pokryvom za vzdušnou päťou OH). Nie je vylúčené ani riziko vzniku vnútornej sufózie, príp. aj pozdĺžnej kontaktnej erózie, ktoré je však podmienené geometrickým a hydraulickým kritériom.

Ďalším krokom v rámci štúdie POH Ondavy bolo nájsť „kritický - najrizikovejší“ profil hrádze v skúmanom staničení, t. j. najväčšiu výšku telesa hrádze nad terénom (vzdušná strana) a najstrmšie sklony svahov. Pre tento účel bol vytypovaný profil pravostrannej ochrannej hrádze Ondavy v staničení km 8,600 (obr. 5.1). Vybraný profil bol zameraný v roku 2004 v rámci projektu „Ondava – prestavba toku km 7,400 – 23,000“ (Kutný, J, 2004). Súčasťou zamerania bola aj miera zanesenia inundácie a profil koryta toku.



Obr. 5.1 Profil POH Ondavy v staničení km 8,600

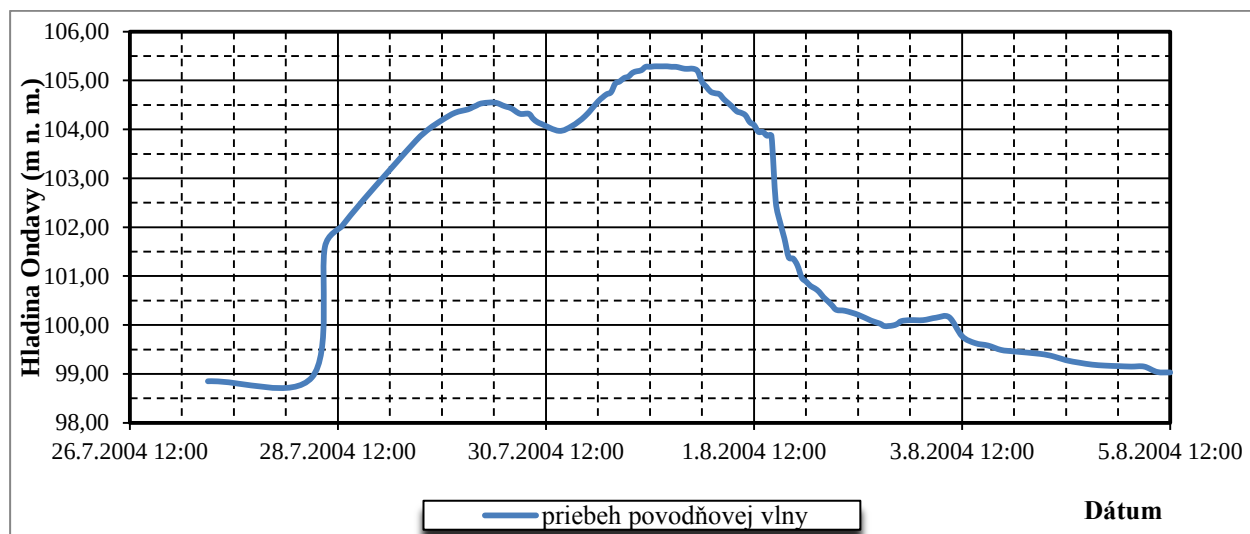
Skúmaný profil POH Ondavy sa nachádza blízko jestvujúcej čerpacej stanice (ďalej aj ČS) Július v rkm 17,100 (km 8,770). Geologická skladba podložia POH v danom úseku bola prevzatá z projektu (Petro, L., 1982), konkrétne z prieskumného vrtu VJČ-3 s kótou terénu 100,03 m n. m.:

POH Ondavy – vrt VJČ-3

1 vrstva	ílovitá hlina	1,10 m
2 vrstva	prachovitý piesok	0,60 m
3 vrstva	piesok	0,50 m
4 vrstva	zahlinený piesok	1,20 m
5 vrstva	íl	2,70 m
6 vrstva	ílovitá hlina	1,90 m
7 vrstva	piesok	7,00 m

Za zmienku stojí fakt, že v blízkosti vytypovaného profilu, pri ČS Július, počas povodne v roku 2004 došlo na vzdušnej päte POH Ondavy k vzniku výronovej plochy bez výnosu mate-

riálu. Jednalo o jeden z najväčších povodňových prietokov evidovaných na toku Ondava za obdobie pozorovaní a meraní. Z tohto dôvodu bol do riešeného modelu ako jeden zo vstupných údajov použitý priebeh povodňovej vlny za obdobie od 27.7.2004 od 6:00 hod. do 5.8.2004 do 12:00 hod. Kulminácia hladiny bola na úrovni koruny hrádze, t. j. 105,29 m n. m. (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Priebeh povodňovej vlny na Ondave v období od 27.7.2004 od 6:00 hod. do 5.8.2004 do 12:00 hod.

V nasledujúcej tabuľke č. 5.1 v stĺpci „Parametre z projektu“ sú uvedené fyzikálne a mechanické parametre jednotlivých vrstiev zemín v rámci geologickej skladby vrtu VJČ-3 prevzaté z technickej správy z geologického prieskumu (Petro, Ľ., 1982). Uvedený koeficient filtrácie bol stanovený laboratórne z kriviek zrnitosti podľa Mallet-Paquanta. Za pomoci programu GeoPerm boli následne z kriviek zrnitosti vypočítané koeficienty filtrácie aplikovaním empirických vzťahov podľa rôznych autorov z dostupnej literatúry. Z platných hodnôt sa následne vypočítali maximálne hodnoty koeficientov filtrácie jednotlivých zemín, ktoré sú uvedené v tabuľke 5.1 v stĺpci „Parametre z programu GeoPerm“.

Tabuľka 5.1 Vstupné parametre materiálov podložia

vrstva	Parametre z projektu							Parametre z programu GeoPerm
	Objem. tiaž KN.m ³	k_f m.s ⁻¹	φ_{ef} (°)	c_{ef} (kPa)	φ_u (°)	c_u (kPa)	E_{def} (MPa)	k_f m.s ⁻¹
hrádza	17,32 – 18,84	$5,87 \cdot 10^{-9}$ – $4,55 \cdot 10^{-8}$	< 25°	–		13,0 – 26,0	1,6 – 3,2	
1	18,0	$3,0 \cdot 10^{-9}$			4,30	115,0		$8,3 \cdot 10^{-9}$
2	18,5	$4,0 \cdot 10^{-5}$	26,0				$E_o=7,0$	$6,4 \cdot 10^{-6}$
3	18,5	$1,8 \cdot 10^{-3}$	33,0				$E_o=20,0$	$8,8 \cdot 10^{-5}$
4	18,5	$4,0 \cdot 10^{-5}$	26,0				$E_o=7,0$	$6,4 \cdot 10^{-6}$
5	18,0	$3,0 \cdot 10^{-9}$			0,00	25,0		$3,3 \cdot 10^{-9}$
6	18,5	$3,0 \cdot 10^{-9}$			4,30	115,0		$2,0 \cdot 10^{-9}$
7	18,5	$1,8 \cdot 10^{-3}$	33,0					$5,2 \cdot 10^{-5}$

5.1 Posúdenie náchylnosti zemín na sufóziu

Ochranné hrádze, ako aj ich podložie, sú vzhľadom na svoju funkciu krátkodobo namáhané počas povodňových prietokov prúdením podzemným a priesakových vôd, ktoré môžu v rôznom rozsahu zapríčiniť pohyb jemných častíc pórovitého prostredia a následne vyvolať zmenu jeho štruktúry a mechanických vlastností. Medzi nežiaduce javy, vyvolané prúdením vody v pórovitom prostredí, patrí sufózia. Uvedený jav je typický najmä pre sypké, t. j. štrkovité a piesčité zeminy. Inžiniersko-geologický prieskum skúmaného územia POH Ondavy preukázal existenciu vrstiev piesku. Analýzou ich kriviek zrnitosti bolo možné posúdiť geometrické a následne stanoviť hydraulické kritérium, ktoré je dôležité pri posudzovaní rizika porušenia filtračnej stability zemín v dôsledku vnútornej sufózie. Krivky zrnitosti zemín boli prevzaté z vrtu VJČ-3 (Petro, L., 1982).

Podklady pre posúdenie geometrického kritéria pre piesčité vrstvy v podloží pravostrannej ochrannej hrádze Ondavy dokumentujeme v tabuľke 5.2, kde sú stanovené hodnoty d_3 , d_5 , d_{10} , d_{15} , d_{17} , d_{20} , d_{25} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{90} . Pórovitosť pre piesky som zvolil $n=0,30$ a následne podľa Pavčiča vypočítal hodnoty $d_{0,max}$ (prípustný priemer priesakových kanálikov) a d_{suf} (maximálny priemer zrna, ktoré sa vplyvom sufózie môže dostať do pohybu).

Tabuľka 5.2 Charakteristické priemery zŕn odčítané z kriviek zrnitosti

Hĺbka	Trieda	d_3	d_5	d_{10}	d_{15}	d_{17}	d_{20}	d_{25}	d_{30}	d_{50}	d_{60}	d_{90}	$d_{0,max}$	d_{suf}
1,0-1,7	prach. piesok	0,000	0,0009	0,0190	0,0458	0,0547	0,0653	0,0801	0,0949	0,1557	0,1870	0,3750	0,0233	0,0179
1,7-2,2	piesok	0,002	0,0105	0,0612	0,0722	0,0766	0,0833	0,0801	0,0949	0,1557	0,1870	0,3750	0,0207	0,0160
2,2-3,4	zahl. piesok	0,000	0,0009	0,0190	0,0458	0,0547	0,0653	0,0801	0,0949	0,1557	0,1870	0,3750	0,0233	0,0179

V tabuľke 5.3 je uvedené posúdenie náchylnosti piesčitých zemín v podloží POH Ondavy na sufóziu podľa ďalších autorov, ktoré boli spracované programom GeoPerm.

Tabuľka 5.3 Geometrické kritérium – posúdenie náchylnosti materiálu na sufóziu

Hĺbka	Trieda zeminy	Zeims-Simplified	Zeims	Pavčič	Istomina	Wan-Fell	Kennley-Lau	Burenkova
1,0-1,7	prach. piesok	sufózne	sufózne	sufózne	nesufózne	sufózne	sufózne	nesufózne
1,7-2,2	piesok	nesufózne	sufózne	sufózne	nesufózne	sufózne	sufózne	sufózne
2,2-3,4	zahl. piesok	sufózne	sufózne	sufózne	nesufózne	sufózne	sufózne	nesufózne

Z posúdenia geometrického kritéria (Tabuľka 5.2, Tabuľka 5.3) je zrejmé, že náchylnosť pieskov na sufóziu, nachádzajúcich sa v podložných vrstvách pokryvu, je podľa jednotlivých autorov rôzna. Keďže výsledky analýzy nevyklúčujú jednoznačne porušenie filtračnej stability v dôsledku vzniku vnútornej sufózie v podloží OH Ondavy, bola im v rámci parametrických štúdií, numerickým modelovaním MKP programom GeoStudio, venovaná pozornosť.

5.2 Rizikové faktory filtračnej stability podložia ochranných hrádzí Ondavy

Na základe I-G prieskumu bola preukázaná existencia tenkých nestabilných pokryvných vrstiev na priepustnom podloží. Posúdením priepustných vrstiev bola potvrdená ich náchylnosť na sufóziu. V súlade so schémou na Obr. 3.1 sa teda jedná o geologickú skladbu podložia OH, ktorú tvorí nestabilný pokryv z málo priepustného až nepriepustného materiálu, v podloží ktorého sa nachádzajú priepustné piesčité zeminy, náchylné na sufóziu. Ďalším z rizikových faktorov pri uvedenej geologickej skladbe podložia je prelomenie nestabilného pokryvu v dôsledku pôsobenia vztlaku (V_z). Jeho vývoj je, okrem geologickej skladby podložia a parametrov pokryvu, závislý od dĺžky trvania povodňových prietokov, výšky vzdutia povodňovej hladiny, od morfológie terénu, polohy toku od OH a ďalších aspektov, ktoré sú v čase a priestore pri líniových stavbách premenlivé. Okrem rizika prelomenia pokryvu vztlakom je potrebné pri analýze skúmania vplyvu priesakov na bezpečnosť hrádze a jej podložia starostlivo sledovať aj vývoj filtračných rýchlostí, resp. hydraulických gradientov, ktoré sú z hľadiska posudzovania filtračnej stability na vnútornú sufóziu smerodajné. Ich kritické hodnoty môžu byť podľa rôznych autorov rôzne (Tabuľka 5.4).

Tabuľka 5.4 Hydraulické kritérium - kritické filtračné rýchlosti podľa rôznych autorov

Hĺbka	Trieda zeminy	Abramov	Sichardt	Schmieder	Ťavoda	Busch	VVÚVSH	Vodgeo
1,0-1,7	prach. piesok	3,5E-4	7,3E-5	1,7E-3	4,4E-4	6,5E-6	2,1E-4	1,6E-3
1,7-2,2	piesok	8,7E-4	2,8E-4	3,3E-3	1,1E-3	2,4E-5	9,1E-4	2,3E-3
2,2-3,4	zahl. piesok	3,5E-4	7,3E-5	1,7E-3	4,4E-4	6,5E-6	2,1E-4	1,6E-3

Pre hydraulické gradienty uplatňujeme kritérium, ktoré odporúča Istomina pre inžiniersku prax (Lukáč, M., Bednárová, E., 2006). Podľa nej sa kritické hodnoty hydraulických gradientov pohybujú v rozmedzí od 0,1 do 0,4, v závislosti podľa C_u , bez ohľadu na koeficient filtrácie (Tabuľka 5.5).

Tabuľka 5.5 Hydraulické kritérium – kritické gradienty podľa Istominy

Hĺbka	Trieda	C_u	I_{krit}
1,0-1,7	prach. piesok	3,1	0,4
1,7-2,2	piesok	9,8	0,4
2,2-3,4	zahl. piesok	3,1	0,4

6. POSÚDENIE FILTRAČNEJ STABILITY OCHRANNEJ HRÁDZE ONDAVY

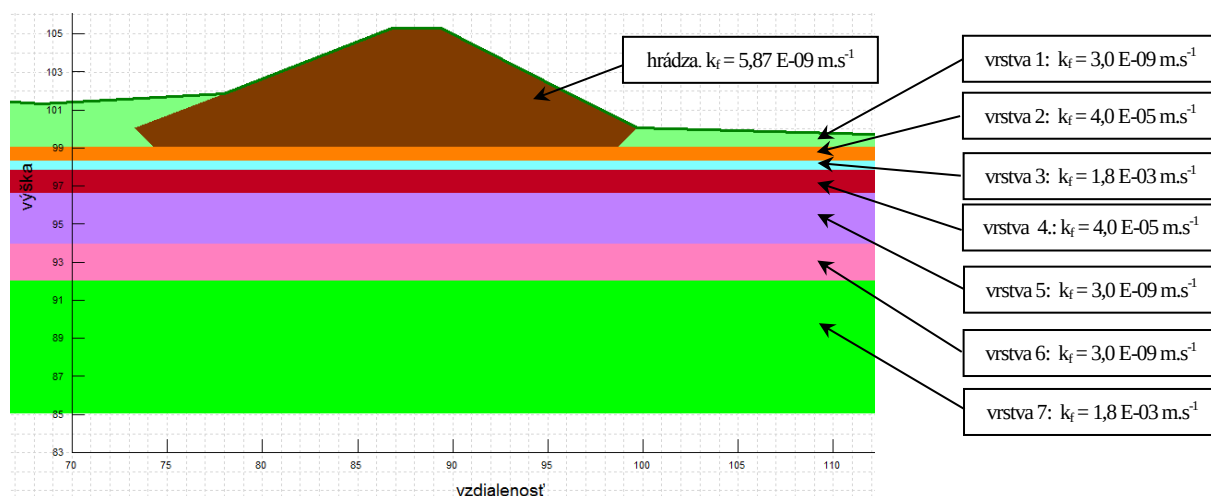
K riešeniu predkladaných filtračných úloh, súvisiacich s posúdením filtračnej stability zemín v telese a v podloží POH Ondavy, sme použili program Geo-Studio, modul Geo-Flow. Voľba tohto programu, využívajúceho MKP, vyplynula z charakteru úlohy, ktorá si vyžaduje analýzu vývoja filtračného pohybu telesom a podloží ochrannej hrádze pri extrémnom hydrodynamickom namáhaní – povodňových prietokoch. Z hľadiska teoretického sa jedná o riešenie nestacionárneho filtračného prúdenia.

Vplyv rôznej geologickej skladby podložja hrádzí s meniacimi sa fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami zemín, morfológie okolia terénu OH, polohy toku od OH a tvaru a trvania povodňovej vlny na mieru rizika porušenia filtračnej stability podložja ochranných hrádží Ondavy bol v predkladanej práci analyzovaný formou parametrickej štúdie, v šiestich variantoch A až F. Pri riešení jednotlivých „variant“ vychádzame z existujúcej geológie, prevzatej z vrtu VJČ-3, kritického priečneho profilu ochrannej hrádze v hkm 8,600 a známeho priebehu povodňovej vlny z roku 2004. Koeficienty filtrácie jednotlivých vrstiev zemín v podloží ochrannej hrádze boli zohľadňované v dvoch alternatívach, vo Variante A v súlade s hodnotami, uvedenými v správe (Petro, Ľ., 1982) a vo Variantoch B až F v súlade s výsledkami analýzy podľa GeoPerm. Voľba variantov riešenia zohľadňuje vyššie uvedenú možnú kombináciu geologických, hydrologických a morfológických podmienok takto:

ANALÝZA VPLYVU GEOLOGICKÝCH POMEROV PODLOŽIA OCHRANNÝCH HRÁDZÍ NA FILTRAČNÚ STABILITU

VARIANT A – Analýza rizika porušenia filtračnej stability za predpokladu geologickej skladby podložja vyplývajúcej z I-G prieskumu

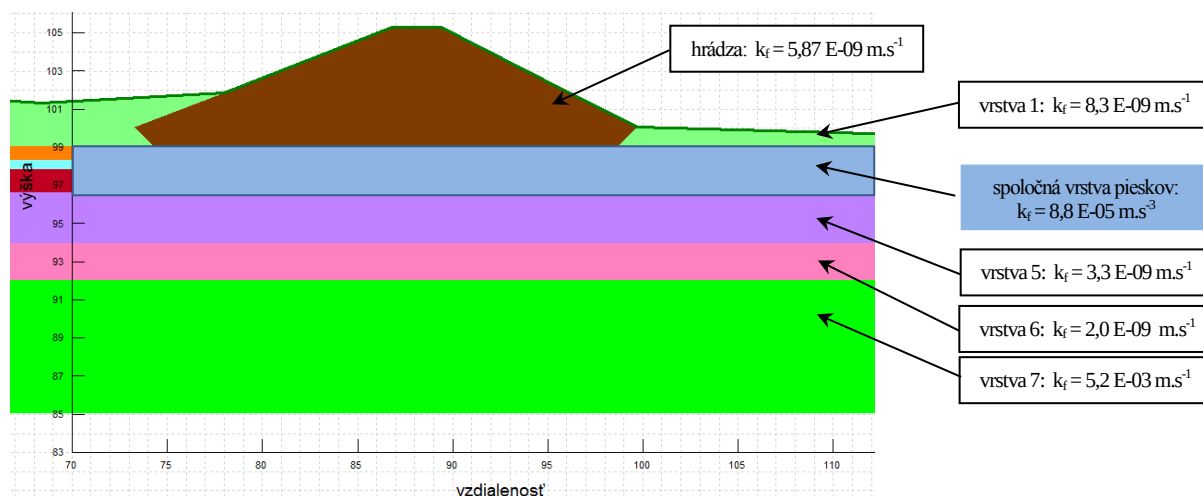
Vo Variante A bolo analyzované riziko porušenia filtračnej stability (prelomenie pokryvu vztlakom a vnútorná sufózia) na zvolenom profile POH Ondavy v hkm 8,600 (uvažovaný vo všetkých variantoch riešenia) s existujúcou geologickou skladbou podložja s fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami zemín, prezentovanými vrtom VJČ-3, (Obr. 6.1) (Petro, Ľ., 1982). Parametre povodňovej vlny, uvažované v numerickom riešení MKP, sú identické so skutočnou povodňovou vlnou z roku 2004 (Obr. 5.2). Čiastočná zmena oproti existujúcej skladbe podložja je hrúbka pokryvnej vrstvy, ktorá bola pre účely výpočtu pre jednoduchosť zmenšená z 1,10 m na 1,00 m. Hrúbka pokryvu je v tomto variante premennou v troch alternatívach: **1,00 m, 1,70 m a 2,20 m**, čo korešponduje s hrúbkami jednotlivých vrstiev v podloží. Tak postupným priradovaním koeficientu filtrácie, prislúchajúci povrchovej pokryvnej vrstve, druhej a následne aj tretej vrstve podložja, možno analyzovať vývoj vztakov na pokryv v závislosti na jeho hrúbke.



Obr 6.1 Schéma reprezentujúca I-G skladbu podložja – Variant A

VARIANT B – Analýza rizika porušenia filtračnej stability za predpokladu priradenia piesčitým vrstvám v podloží jednotný koeficient filtrácie (k_f) podľa výsledkov z programu GeoPerm

Podstata výpočtov vo Variante B spočíva v analýze rizika porušenia filtračnej stability (prelomenia pokryvu vztlakom a vnútornej sufózií) pri čiastočne zjednodušenej geologickej skladbe podložia. Vrstvám pieskov (vrstva 2, vrstva 3 a vrstva 4) v hĺbke od 1,00 m do 3,40 m bol priradený jednotný koeficient filtrácie ($k_f = 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), identický s piesčitými zeminami vo vrstve 3. Z hľadiska bezpečnosti boli všetkým zeminám v podloží OH priradené maximálne súčinitele filtrácie, prevzaté z programu GeoPerm v súlade s obr. 6.2. Hrúbka povrchovej pokryvnej vrstvy vo variante B ostala nezmenená, totožná s variantom A, t. j. **1,00 m, 1,70 m a 2,20 m**.



Obr 6.2 Schéma reprezentujúca I-G skladbu podložia – Variant B

VARIANT C – Analýza rizika porušenia filtračnej stability v podmienkach Variantu B pri rôznej dĺžke dosahu priepustných vrstiev v podloží OH od jej vzdušnej päty

Zámer Variantu C spočíval v skúmaní miery rizika porušenia filtračnej stability podložia ochrannej hrádze, vyvolanej existenciou starých ramien Ondavy, príp. meadrovania jej koryta v minulosti. Tento jav bol simulovaný zmenou dosahu priepustných vrstiev piesčitých zemín v jej podloží od vzdušnej päty hrádze v rozmedzí od 25,0 do 500,0 m. Analýza bola skúmaná pri hrúbke pokryvu 1,0 m. Ostatná geologická skladba podložia Variantu C je totožná s Variantom B. Hydrodynamické namáhanie bolo prezentované povodňovou vlnou z roku 2004.

ANALÝZA VPLYVU MORFOLOGICKÝCH PODMIENOK PREDPOLIA OCHRANNÝCH HRÁDZÍ NA FILTRAČNÚ STABILITU

VARIANT D – Analýza rizika porušenia filtračnej stability pri zmene morfológie terénu v inundácii

Cieľom výpočtov vo Variante D je objasniť vplyv zmeny morfológie terénu v inundácii odstránením vrstvy sedimentov na filtračnú stabilitu podložia hrádze, najmä prelomenie pokryvu vztlakom. Geologická skladba podložia hrádze v tomto variante je identická s Variantom B,

(Obr. 6.2). Analyzované boli tri alternatívy hrúbky pokryvu od 1,0 m, cez 1,7 m po 2,2 m. Hydrodynamické namáhanie bolo prezentované povodňovou vlnou z roku 2004.

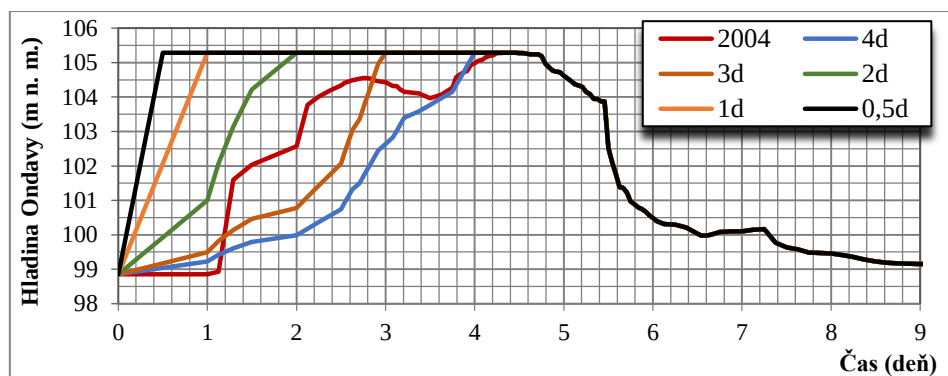
VARIANT E – Analýza rizika porušenia filtračnej stability pri zmene polohy toku od ochrannej hrádze

Cieľom výpočtov vo Variante E je objasniť vplyv zmeny polohy toku od ochrannej hrádze na filtračnú stabilitu, najmä prelomenie pokryvu vztlakom. Numerickým modelovaním bolo simulované skrátenie vzdialenosti toku Ondavy od návodnej päty ochrannej hrádze o 40,0 m. Geologická skladba podložia hrádze je v súlade s Variantom B (Obr. 6.2), zohľadňujúc zmeny hrúbky pokryvu od 1,0 m, cez 1,7 m po 2,2 m. Hydrodynamické namáhanie bolo prezentované povodňovou vlnou z roku 2004.

ANALÝZA VPLYVU HYDROLOGICKÝCH PODMIENOK – TVARU A DĹŽKY TRVANIA KULMINÁCIE POVODŇOVEJ VLNY NA FILTRAČNÚ STABILITU

VARIANT F – Analýza rizika porušenia filtračnej stability pri rôznych povodňových vlnách

Vo Variante F je formou parametrickej štúdie posudzovaný vplyv zmeny tvaru a dĺžky trvania povodňových prietokov na mieru rizika prelomenia pokryvu vztlakom. Podstata tejto analýzy spočíva v skúmaní rýchlosti nárastu povodňovej vlny v rozmedzí od 0,5 dňa do 4 dní (Obr. 6.3), pričom modelovaná dĺžka trvania povodňovej vlny ostáva totožná s povodňovou vlnou z roku 2004. Zmenou rýchlosti nástupu povodňovej vlny sa súčasne mení dĺžka jej kulminácie. Geologická skladba podložia a vlastnosti materiálov sú totožné s Variantom B. Analyzovaná bola alternatíva s predpokladanou hrúbkou pokryvu 1,00 m.



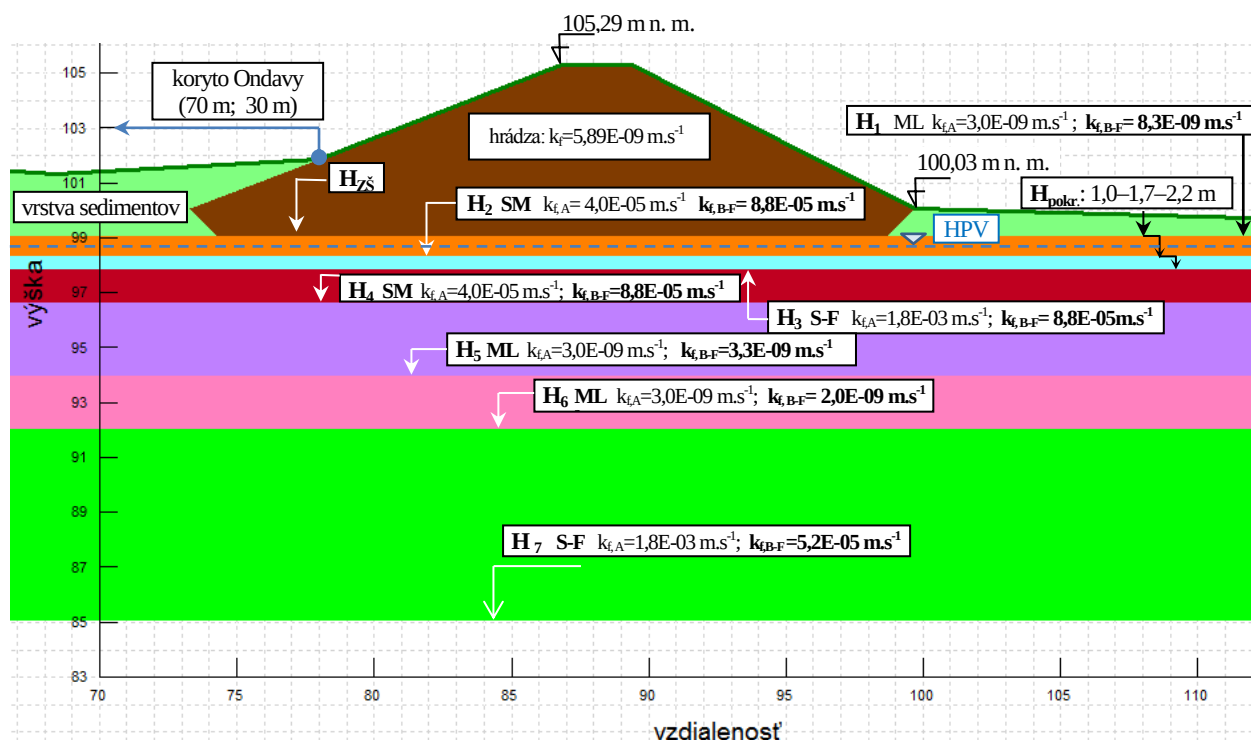
Obr. 6.3 Simulované povodňové vlny

Numerický model

Numerický model bol spracovaný v reálnych výškach v systéme Balt po vyrovnaní. Na ľavej strane je model ohraničený tokom Ondavy (cca 70,0 m), na pravej strane bol zostavený do vzdialenosti 600,0 m od koryta Ondavy. Vstupné údaje, t. j. koeficienty filtrácie zemín, nachádzajúcich sa v podloží ochrannej hrádze, boli uvažované v dvoch alternatívach v súlade s hodnotami, uvedenými v podkladoch I-G prieskumu (VJČ-3) a s hodnotami, vyplývajúcimi z analýzy programom GeoPerm (tab. 6.1, obr. 6.4).

Tabuľka 6.1 – Koeficienty filtrácie zemín v podloží ochrannej hrádze (m.s^{-1})

Vrstva	1	2	3	4	5	6	7
VJČ-3	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
GeoPerm	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$			$3,3 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$

**Obr. 6.4** Schéma reprezentujúca parametre podmienok vstupujúcich do výpočtového modelu

7. VÝSLEDKY RIEŠENIA

V predkladanej dizertačnej práci bola hlavná pozornosť zameraná na posúdenie bezpečnosti OH Ondavy z pohľadu filtračnej stability jej podložia pri nestacionárnom prúdení počas zaťaženia hrádze povodňovými prietokmi. K analýze miery rizika porušenia filtračnej stability (prelomenie pokryvu vztlakom a vnútorná sufózia) bola aplikovaná metóda parametrických štúdií, zohľadňujúcich: zmenu geologickej skladby podložia hrádží s meniacimi sa fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami zemín (Varianty A, B a C), zmenu morfológie okolia terénu OH a polohy toku od jej návodnej päty (Variant D a E), a zmenu hydrologických podmienok - cez tvaru a dĺžku trvania povodňovej vlny (Variant F). Vo všetkých variantoch riešenia bola pri výpočtoch nestacionárneho prúdenia podzemných a priesakových vôd telesom a podložíom OH pozornosť upriamená na:

- vývoj tlakov, pôsobiacich na pokryvnú vrstvu v oblasti vzdušnej päty POH Ondavy a v jej priľahlej zóne, ktoré sú rozhodujúce vzhľadom na riziko ich možného prelomenia vztlakom,
- vývoj hydraulických gradientov v oblasti priepustných piesčitých zemín v podloží OH,
- vývoj filtračných rýchlostí v oblasti priepustných piesčitých zemín v podloží OH Ondavy.

Výsledky parametrickej štúdie sú tabelárne spracované v tabuľke 7.1.

Tabuľka 7.1 Výsledky riešenia Variantov A až F

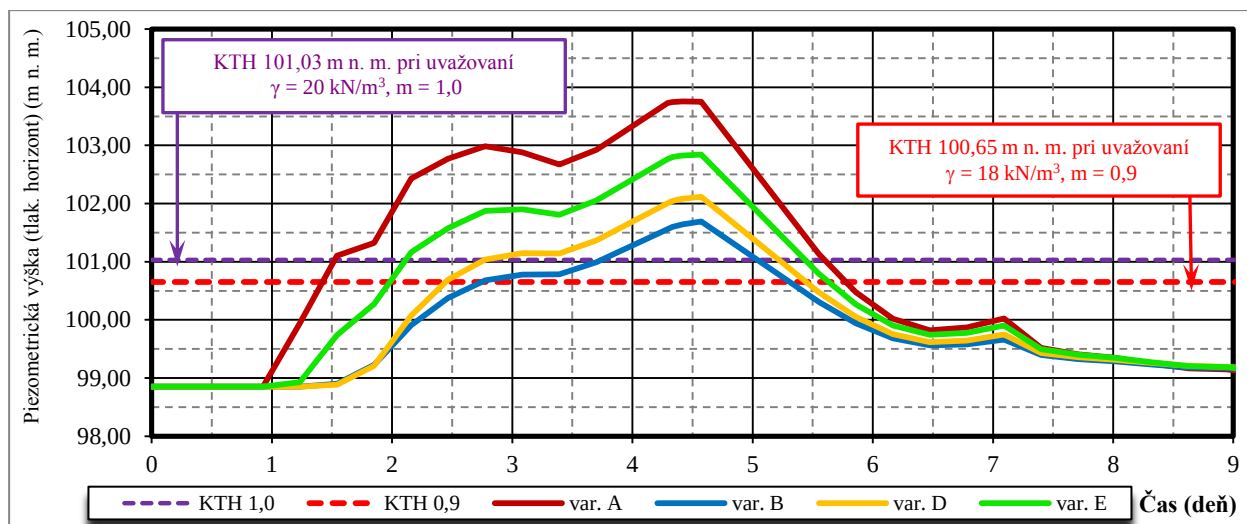
Variant	premenné parametre	prelomenie pokryvu			hydraulické kritérium				
		tlakový horizont	KTH		hydraulický gradient		filtračná rýchlosť (m.s ⁻¹)		
			$\gamma = 18$ kN/m ³ m = 0,9	$\gamma = 20$ kN/m ³ m = 1,0					
			(m n. m.)	(m n. m.)					I
Variant A	hrúbka pokryvu (m)	vrstva 1 – prachovitý piesok - k _f =4,0E-05 (m.s ⁻¹)							
		1,0	103,76	100,65	101,03	0,014	0,400	5,91E-07	6,5E-6 až 1,7E-3
		1,7	103,97	101,08	101,73	–		–	
		2,2	102,43	101,39	102,23	–		–	
		vrstva 2 – piesok - k _f =1,8E-03 (m.s ⁻¹)							
		1,0	103,76	100,65	101,03	0,014	0,400	2,67E-05	2,4E-5 až 3,3E-3
		1,7	103,97	101,08	101,73	0,013		2,35E-05	
		2,2	102,43	101,39	102,23	–		–	
		vrstva 3 – zahlinený piesok - k _f =4,0E-05 (m.s ⁻¹)							
		1,0	103,76	100,65	101,03	0,014	0,400	5,91E-07	6,5E-06 až 1,7E-03
		1,7	103,97	101,08	101,73	0,013		5,22E-07	
		2,2	102,43	101,39	102,23	0,020		9,06E-07	
		spoločná vrstva – piesok (GeoPerm) - k _f =8,8E-05 (m.s ⁻¹)							
Variant B	hrúbka pokryvu (m)	1,0	101,69	100,65	101,03	0,031	0,400	2,88E-06	2,4E-05 až 3,3E-03
		1,7	102,21	101,08	101,73	0,023		2,14E-06	
		2,2	102,20	101,39	102,23	0,022		2,14E-06	
Variant C	dosah priepust. vrstiev od päty OH (m)	25,0	103,54	100,65	101,03	0,022		2,31E-06	
		50,0	103,03			0,030		2,86E-06	
		100,0	102,45			0,031		2,88E-06	
		200,0	101,69			0,031		2,88E-06	
		300,0	101,69			0,031		2,88E-06	
		500,0	101,69			0,031		2,88E-06	
Variant D	hrúbka pokryvu (m)	1,0	102,12	100,65	101,03	0,035		3,31E-06	
		1,7	102,57	101,08	101,73	0,026		2,44E-06	
		2,2	102,57	101,39	102,23	0,025		2,41E-06	
Variant E	hrúbka pokryvu (m)	1,0	102,84	100,65	101,03	0,039		3,69E-06	
		1,7	103,17	101,08	101,73	0,029		2,79E-06	
		2,2	103,14	101,39	102,23	0,029		2,78E-06	
Variant F	doba nábehu povodň. vlny na max. hladinu (deň)	PV 2004	101,69	100,65	101,03	0,031		2,88E-06	
		4,0	101,27			0,032		3,04E-06	
		3,0	101,53			0,035		3,31E-06	
		2,0	101,85			0,036		3,36E-06	
		1,0	101,96			0,037		3,48E-06	
		0,5	101,98			0,037		3,74E-06	

Vypočítané hodnoty tlakových horizontov, hydraulických gradientov a filtračných rýchlostí **sú porovnané s kritickými (medznými) hodnotami**. K posúdeniu tlakového horizontu bol kritický tlakový horizont (ďalej aj KTH) stanovený pri akceptácii objemovej tiaže pokryvnej vrstvy $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ s parciálnym koeficientom spoľahlivosti $m = 0,9$ a tiež za predpokladu objemovej tiaže pokryvnej vrstvy $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ pri $m = 1,0$. Hranice kritických filtračných rýchlostí boli stanovené rozmedzím hodnôt, vypočítaných podľa rôznych autorov programom GeoPerm (Tabuľka 5.4). Pre posúdenie hydraulických gradientov bolo uplatnené kritérium odporúčané Istominou, pre nesúdržné zeminy s číslom nerovnozrnosti $C_u < 10$ je $I_{\text{príp}} = 0,4$. Pre lepšiu orientáciu sú v tabuľke 7.1 vypočítané hodnoty sledovaných veličín, prislúchajúce jednotlivým variantom riešenia, farebne rozlíšené. Zelenou farbou sú označené hodnoty vyhovujúce stanovenému kritériu a červenou farbou sú označené hodnoty nespĺňajúce dané kritérium.

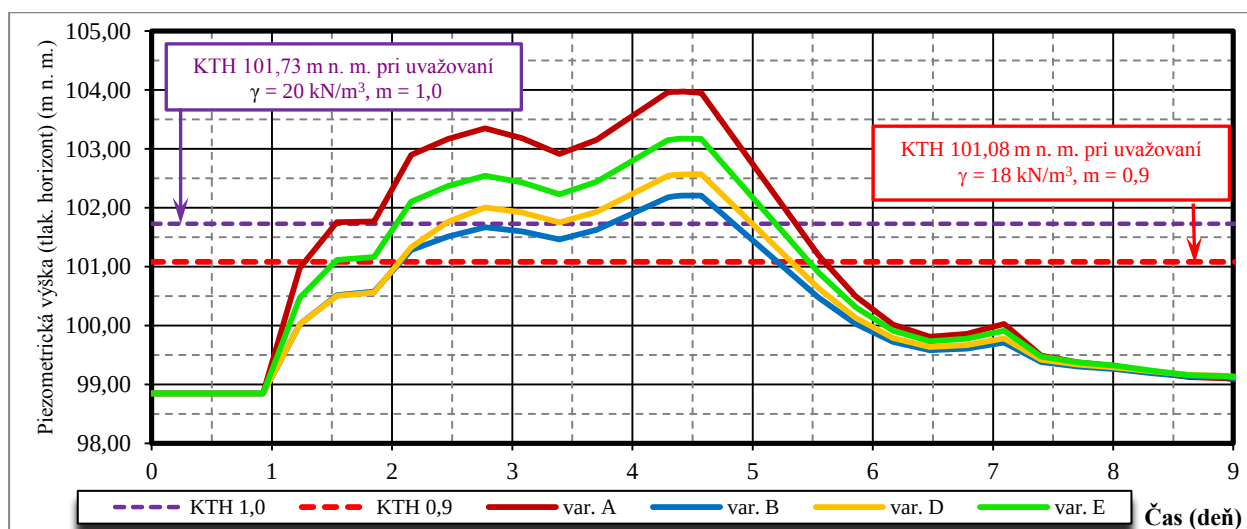
Vztlaky na pokryvnú vrstvu – prelomenie pokryvu

Súhrn výsledkov analýzy rizika prelomenia pokryvu vztlakom pre Varianty A až F sú uvedené v tabuľke 7.1 a na Obr. 7.1 až 7.10. Cieľom riešenia bolo preukázať existenciu a mieru rizika porušenia pokryvu vztlakom pri meniacich sa geologických, geotechnických, morfológických a hydrologických podmienkach. Výsledné tlakové horizonty boli porovnávané s KTH (Obr. 7.1 až Obr. 7.6), ktoré zohľadňujú rôznu objemovú tiaž zeminy tvoriacej pokryv, a hrúbku pokryvu a parciálny súčiniteľ spoľahlivosti „m“. Z priebehu vztlakov pri extrémnom hydrodynamickom namáhaní vyplýva, že KTH vypočítaný pri $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ a koeficiente $m = 0,9$ bol vo všetkých riešených variantoch prekročený. Obdobné konštatovanie platí aj pre KTH pri $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ a koeficiente $m = 1,0$. Jedine vo Variante B, pri hrúbke pokryvu 2,20 m, nebola táto úroveň prekročená (nepatrný rozdiel len 0,03 m). Z uvedeného vyplýva, že v prípade OH Ondavy, pri existencii subtlínych pokryvných vrstiev (menej ako 2,20 m), tvorených málo priepustnými zeminami na priepustnom podloží, je riziko prelomenia pokryvu vysoké, s dĺžkou trvania 1 až cca 4 dni (Obr. 7.1 až 7.3). Dosah rizika prelomenia pokryvu vztlakom od vzdušnej päty je značný, okolo 150 až 200 m (Obr. 7.4 až 7.6). Výsledky parametrickej štúdie vo variantoch C a F potvrdzujú, že vývoj vztlakov v podloží ochrannej hrádze je významnou mierou závislý tak od tvaru a trvania povodňovej vlny, ako aj od dosahu priepustných vrstiev za vzdušnou päťou OH (Obr. 7.7), čo je rizikovým javom najmä tam, kde možno očakávať výskyt starých ramien, príp. v minulosti meandrujúceho koryta toku Ondavy.

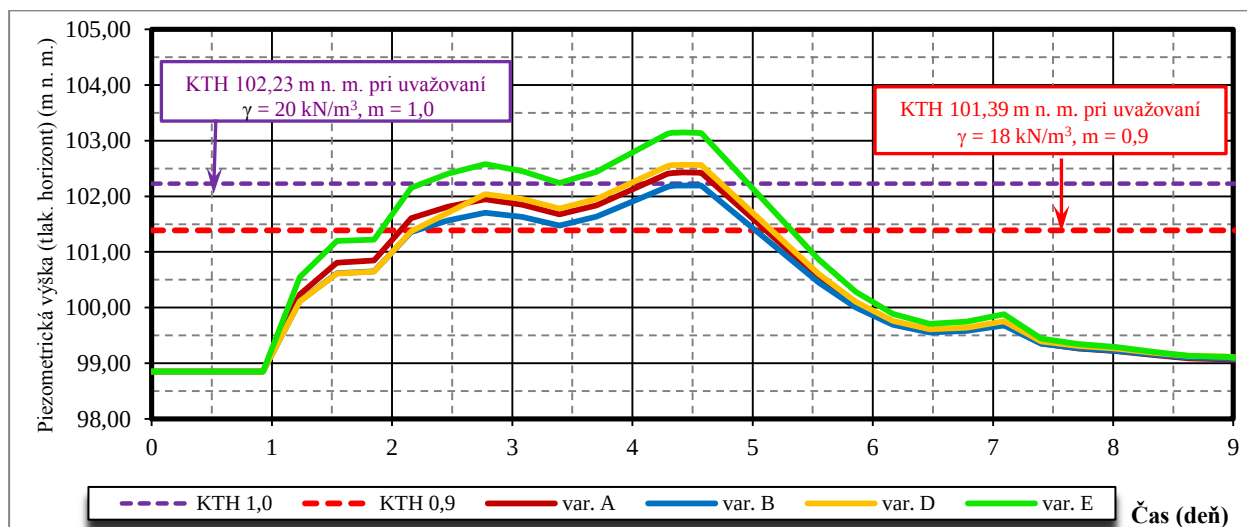
Vychádzajúc z I-G prieskumu v 13 km dlhej skúmanej oblasti možno usúdiť, že pravdepodobnosť výskytu uvedenej geologickej skladby s nestabilným pokryvom je minimálna. Ako sme už uviedli v stati 5, u prevažnej väčšiny prieskumných vrtoŧ boli zaznamenané pokryvné vrstvy podložia do hĺbky $\geq 3,00 \text{ m}$ tvorené nepriepustnými materiálmi (s priemernou objemovou tiažou $17,0$ až $21,0 \text{ kN.m}^{-3}$ a koeficientom filtrácie rádovo od $1 \cdot 10^{-11}$ až $3,7 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$). Percentuálne zastúpenie subtlínejších pokryvných vrstiev (menej ako $3,00 \text{ m}$) na priepustnom podloží bolo relatívne nízke (menej ako 5%). Pri celkovej dĺžke ochranných hrádzi Ondavy $63,3 \text{ km}$, kde nie je dostatočne známa geologická skladba podložia však nemožno riziko prelomenia pokryvu vztlakom vylúčiť. Na existenciu oslabených pokryvných vrstiev poukazuje aj výskyt lokálnych priesakov (zamokrení), ktoré možno evidovať v oblasti vzdušnej päty pravostrannej aj ľavostrannej ochrannej hrádze počas povodňových prietokov.



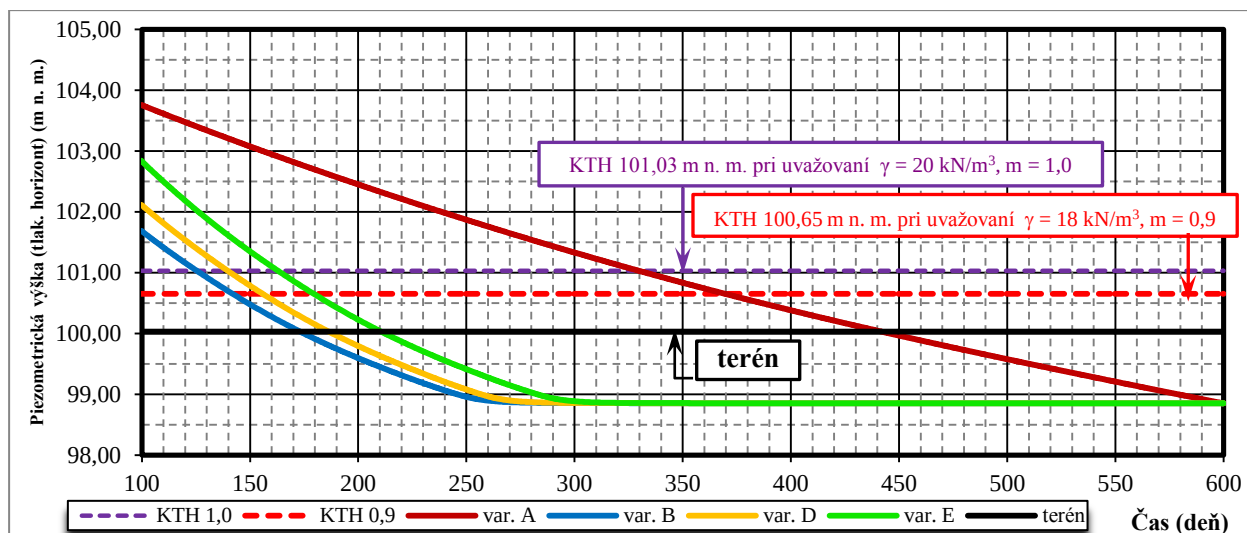
Obr. 7.1 Časový vývoj vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 1,00 m v oblasti vzdušnej päty OH



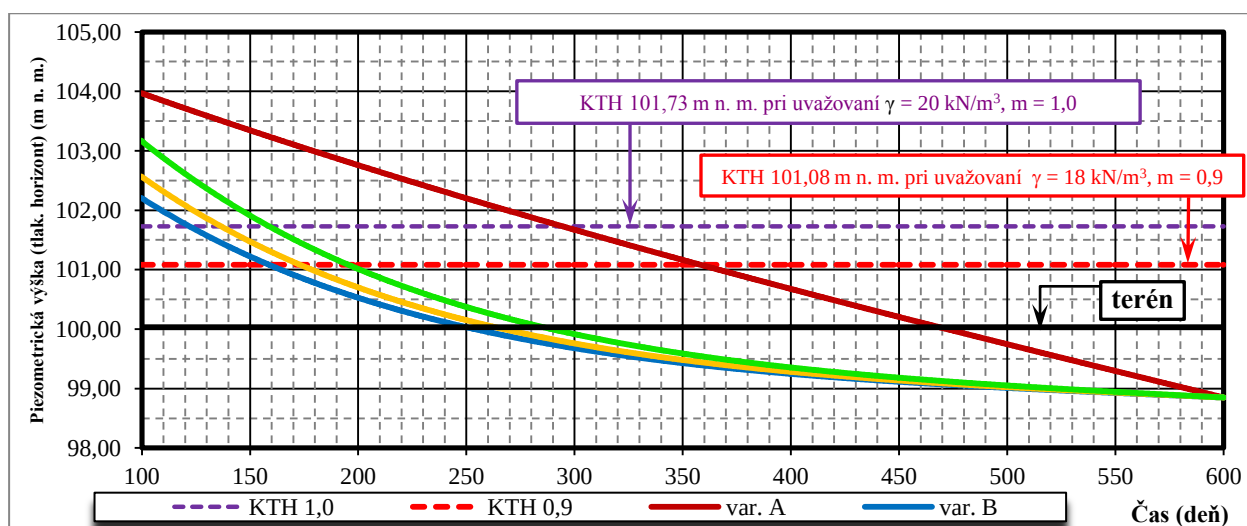
Obr. 7.2 Časový vývoj vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 1,70 m v oblasti vzdušnej päty OH



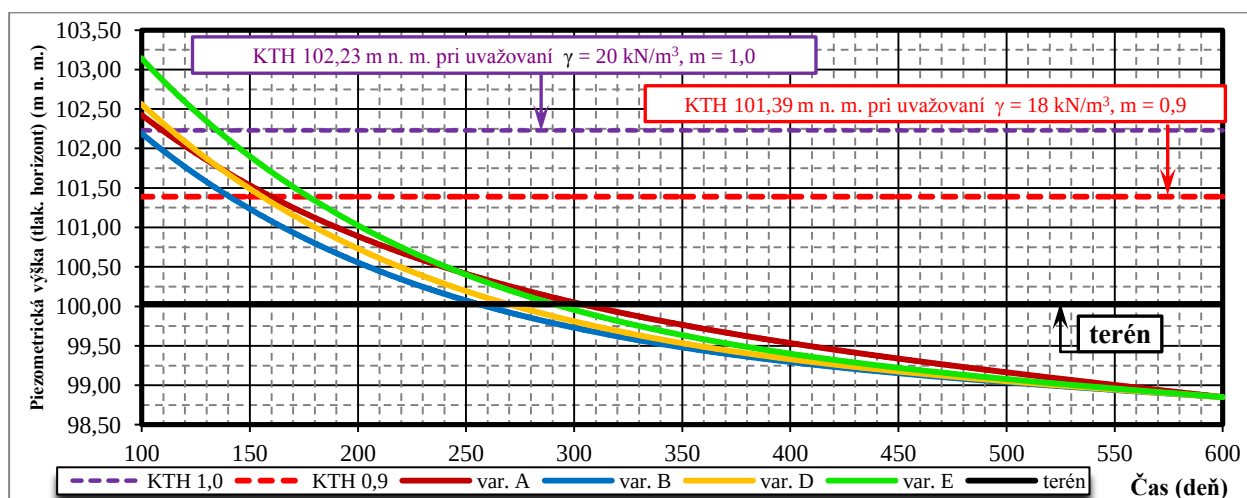
Obr. 7.3 Časový vývoj vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 2,20 m v oblasti vzdušnej päty OH



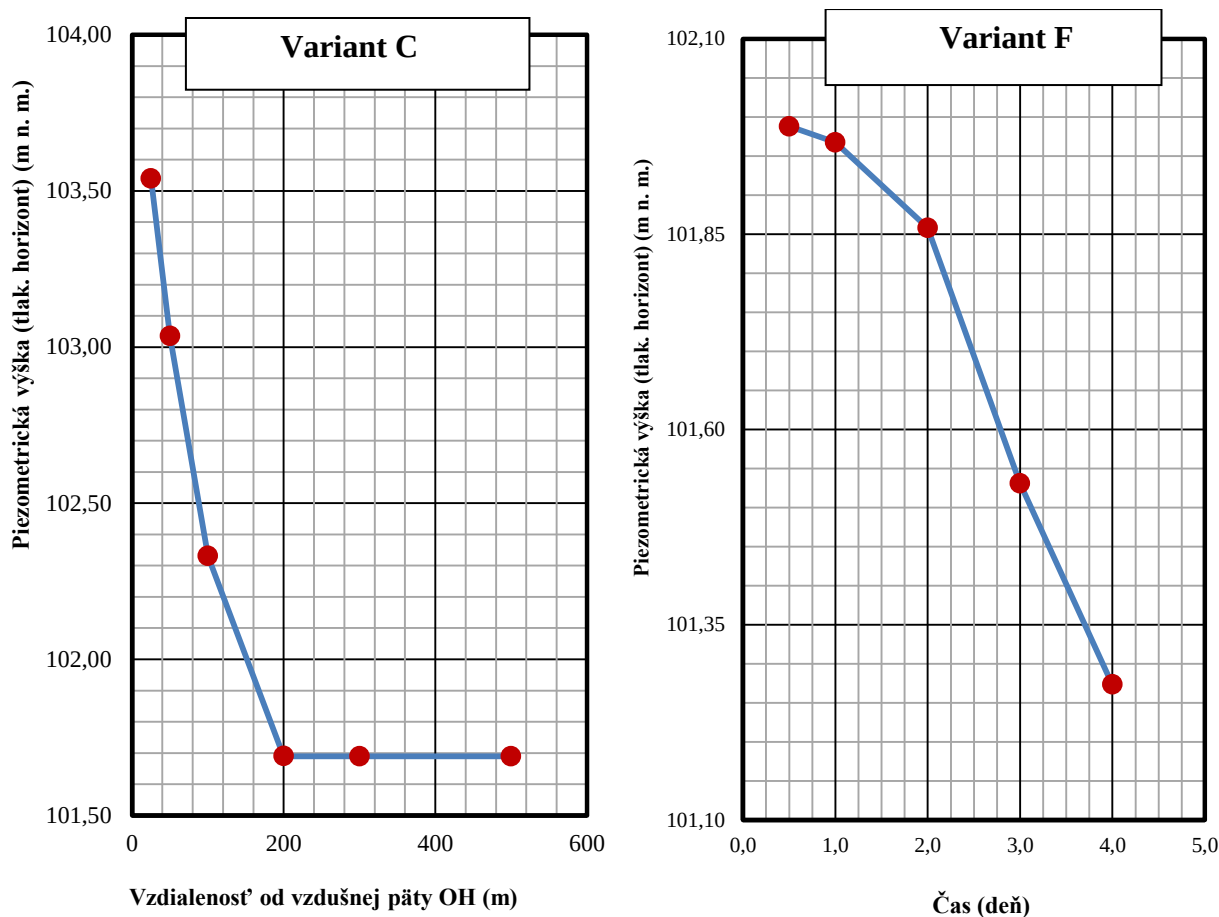
Obr. 7.4 – Vývoj vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 1,00 m v zázemí - za vzdušnou päťou OH



Obr. 7.5 Vývoj vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 1,70 m v zázemí - za vzdušnou päťou OH



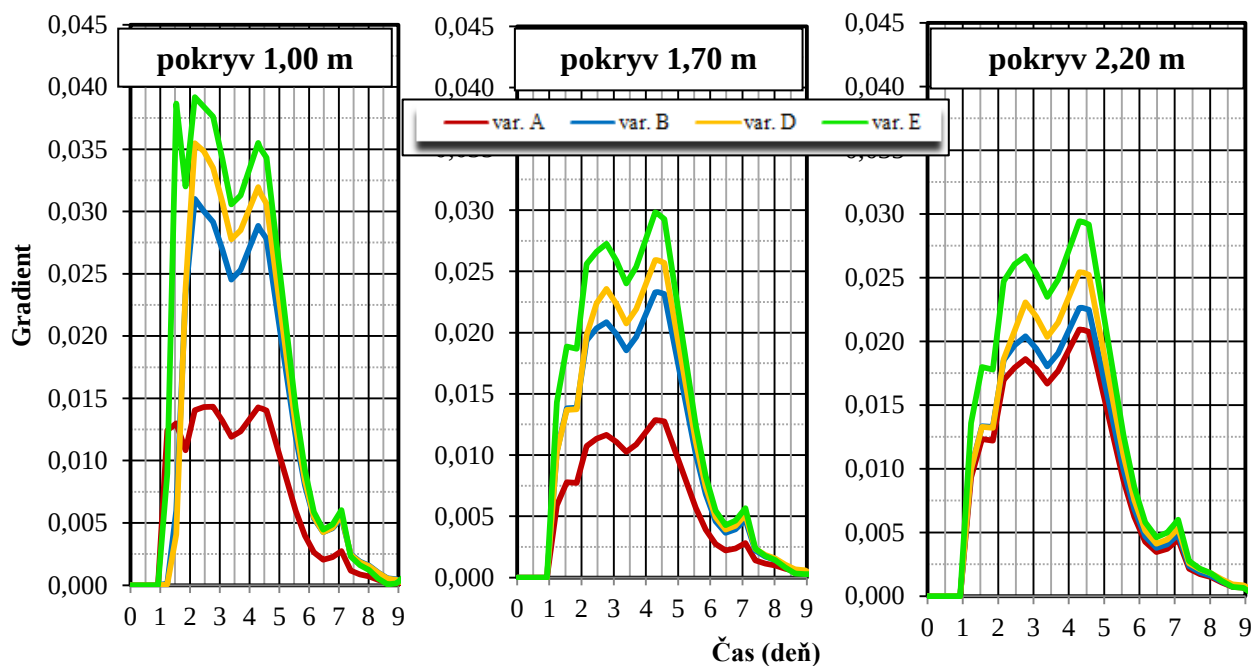
Obr. 7.1 Vývoj vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 2,20 m v zázemí - za vzdušnou päťou OH



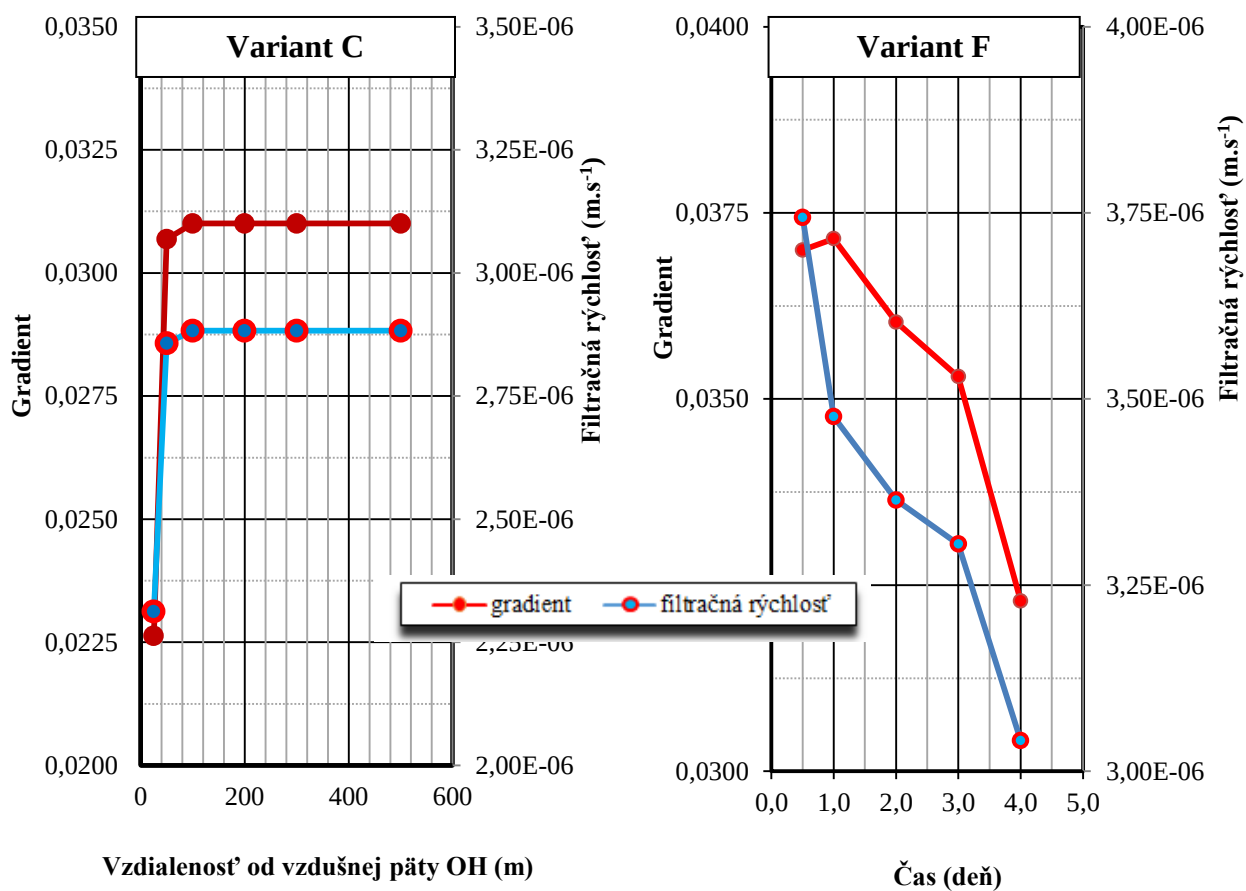
Obr. 7.7 – Závislosť vývoja vztlaku na pokryvné vrstvy hrúbky 1,0 m od dosahu priepustnej vrstvy za vzdušnou päťou OH (Variant C) a od času nábehu povodňovej vlny po kulminačnú hladinu – úroveň koruny hrádze (Variant F)

Hydraulické gradienty v podloží ochrannej hrádze

Z výsledkov numerického riešenia jednotlivých variantov vyplýva (**Chyba! Nenašiel sa iaden zdroj odkazov.**), že hodnoty hydraulických gradientov v priepustných podložných vrstvách piesčitých zemín (pri zohľadnení jednotlivých premenných ako hrúbka pokryvu, tvar a dĺžka povodňovej vlny, poloha toku od OH či dosah priepustných vrstiev za vzdušnou päťou OH) boli hlboko pod kritickou hodnotou $I_{\text{príp}} = 0,4$ (kritérium podľa Istominy) (Obr. 7.9). V závislosti od riešeného variantu sa hodnoty gradientov v priepustných vrstvách s koeficientom filtrácie od $8,8\text{E-}5 \text{ m.s}^{-1}$ do $1,8\text{E-}3 \text{ m.s}^{-1}$ pohybovali v rozmedzí od **0, 013 do 0,039**. Vplyv tvaru a priebehu povodňovej vlny a dosahu priepustnej vrstvy za vzdušnou päťou hrádze na vývoj hydraulických gradientov je graficky znázornený na Obr. 7.10 a Obr. 7.11.



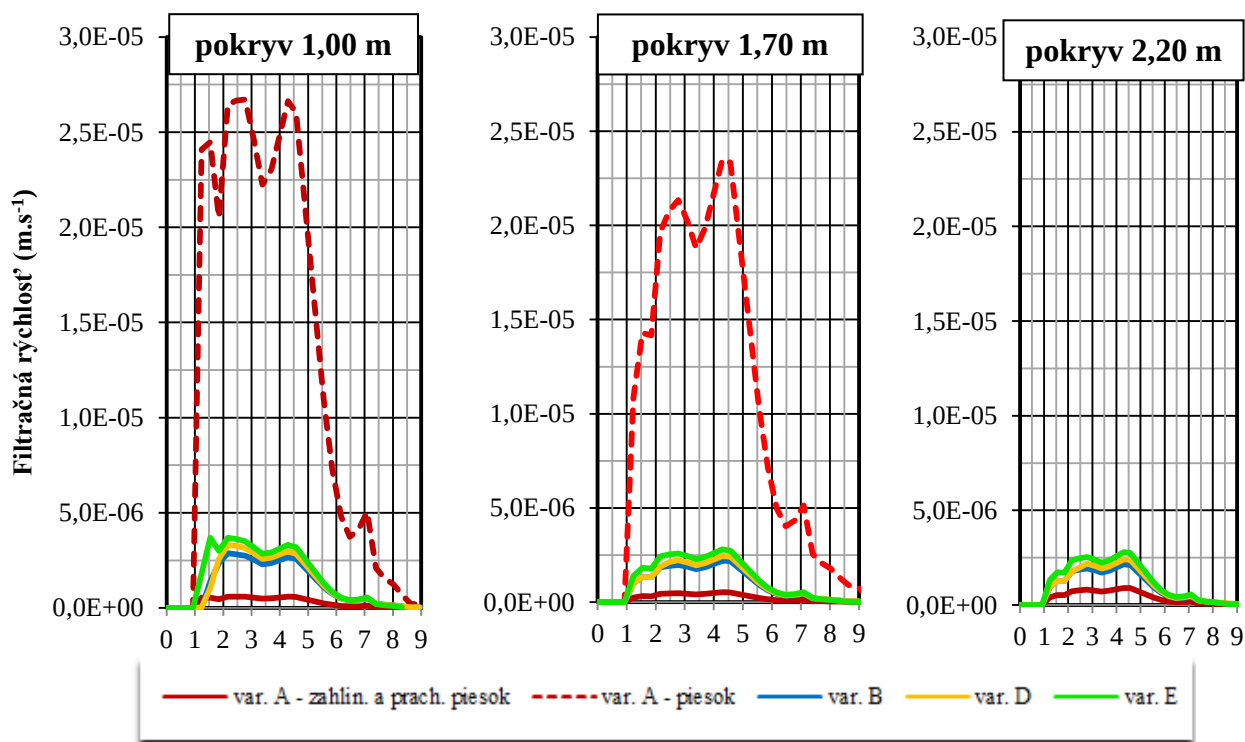
Obr. 7.9 – Časový vývoj hydraulických gradientov v priepustných piesčitých zeminách podložia OH pri hrúbkach pokryvu 1,00 m, 1,70 m a 2,20 m



Obr. 7.10 – Závislosť vývoja hydraulického gradientu a filtračnej rýchlosti od dosahu priepustnej vrstvy za vzdušnou pätou OH (Variant C) a od času nábehu povodňovej vlny po kulminačnú hladinu - úroveň koruny hrádze (Variant F)

Filtračné rýchlosti v podloží ochrannej hrádze

Z výsledkov filtračných rýchlostí uvedených v tabuľke 7.1 vyplýva, že s výnimkou jednej vrstvy v jednom z riešených variantov stanovené kritérium (podľa rôznych autorov Tabuľka 5.4) **nebolo prekročené** (obr. 7.11). Aj pri zohľadnení najprísnejšieho kritéria (Busch) z pomedzi všetkých použitých autorov sú vypočítané hodnoty takmer o jednu radu nižšie. Len vo Variante A, pri hrúbke pokryvu 1,00 m, bolo v priepustnej vrstve pieskov (v hĺbke 1,00 m až 2,20 m pod terénom) s koeficientom filtrácie $k_f = 1,8E-3 \text{ m.s}^{-1}$ nepatrne prekročené kritérium podľa Buscha, a to o $2,7E-6 \text{ m.s}^{-1}$. Jedná sa o variantu, v ktorej geológia podložia bola prezentovaná I-G prieskumom z vrtu VJČ-3. Pri riešení ostatných variantov s jednotnou vrstvou pieskov (k_f z programu GeoPerm), bolo hydraulické kritérium (filtračná rýchlosť) podkročené o cca 1 rad. Napriek tomu však nie je vylúčené, že k porušeniu hydraulického kritéria vplyvom vysokej filtračnej rýchlosti pri výskyte veľmi priepustných materiálov v podloží OH môže dôjsť. Najväčší vplyv na vývoj filtračných rýchlostí má najmä tvar a priebeh povodňovej vlny a dosah priepustnej vrstvy za vzdušnou pätou hrádze. Svedčia o tom grafické výstupy znázornené na Obr. 7.10, vyplývajúce z výsledkov riešenia Variantov C a F.



Obr. 7.11 – Časový vývoj filtračných rýchlostí pri hrúbke pokryvu 1,00 m, 1,70 m a 2,20 m

8. ZÁVERY A ODPORÚČANIA PRE PRAX

Parametrická štúdia dizertačnej práce poukazuje na skutočnosť, že náchylnosť priepustných vrstiev podložia ochranných hrádzi Ondavy na skúmanom úseku na sufóziu je minimálna, no zároveň toto riziko nemožno úplne vylúčiť. Podstatne vyššie riziko predstavuje prelomenie pokryvu vztlakom. Napriek tomu, že výsledky geologického prieskumu podložia a okolia OH v oblasti dlhej cca 13 km naznačujú, že sa tu vyskytujú pokryvné útvary mocnosti viac ako 3,00 m, riziku prelomenia pokryvu vztlakom treba venovať zvýšenú pozornosť. Pri celkovej dĺžke ochranných

hrádzí Ondavy cca 63,3 km, kde nie je dostatočne známa geologická skladba podložia, nemožno riziko prelomenia pokryvu vztlakom ignorovať. Výskyt lokálnych priesakov (zamokrení) počas povodňových prietokov v Ondave, upozorňuje na existenciu oslabených pokryvných vrstiev. V takom prípade je vhodné v danej oblasti vykonať inžiniersko-geologický prieskum do hĺbky okolo 3,00 m, keďže na základe výsledkov parametrických štúdií, analyzujúcich vývoj vztlakov na pokryvné vrstvy možno usúdiť, že v skúmaných podmienkach, pri hrúbke pokryvu viac ako cca 3,0 m je riziko porušenia filtračnej stability prelomením pokryvu vztlakom menej pravdepodobné.. Ak sa potvrdí výskyt priepustných piesčitých zemín v ich podloží, odporúčame vzdušnú pätu ochrannej hrádze stabilizovať prísypom do výšky cca 0,5 – 1,0 m, do vzdialenosti tzv. ochrannej zóny, prípadne v danej oblasti prerušiť preferované priesakové cesty vybudovaním podzemnej tesniacej steny (PTS). Najrizikovejšiu oblasť predstavujú meandre, príp. staré ramená pôvodného koryta, ktoré možno lokalizovať na základe historických vodohospodárskych máp, resp. pasportizáciou územia po prevode povodňových prietokov. Tie sa môžu prejaviť spomínanými priesakmi, príp. zamokrením v oblasti vzdušnej päty ochrannej hrádze.

Na základe doterajších skúseností z praxe však možno konštatovať, že v súčasnosti najväčšie riziko poškodenia OH Ondavy predstavuje ich prelievanie. Hlavným dôvodom je značné zanesenie inundačného územia sedimentmi s následným zmenšením prietočného profilu a celkovej kapacity medzihrádzového priestoru. Zvýšenie prietočnej kapacity koryta Ondavy možno získať navýšením súčasných ochranných hrádzí. To však môže byť z hľadiska vysporiadania majetkoprávných záležitostí zložitý problém, ale aj finančne náročný spôsob riešenia. Prijateľnejším opatrením je odstránenie sedimentov z inundácie a prinavrátenie jej pôvodnej prietočnej kapacity. K takémuto riešeniu je však potrebné pristupovať veľmi citlivo a opatrne. Z výsledkov parametrickej štúdie (Variant D) vyplýva, že porušenie pokryvnej vrstvy v inundácii má nepriaznivý vplyv na vývoj a veľkosť vztlaku na pokryv pod vzdušnou pätou ochrannej hrádze. Preto je potrebné pri procese odstraňovania sedimentov z predpolia ochranných hrádzí dbať na to, aby ochranná funkcia pokryvných vrstiev nebola narušená. Hĺbka odstránených sedimentov by nemala siahať pod úroveň pôvodného terénu. V opačnom prípade nemožno vylúčiť riziko, že porušením pokryvných vrstiev na návodnej strane ochranných hrádzí dôjde k skráteniu priesakovej dráhy podložím OH, čím sa, na úkor zväčšenia prietočnosti medzihrádzového priestoru, výrazne zvýši riziko prelomenia pokryvu vztlakom na vzdušnej strane ochrannej hrádze (Variant E).

Prínos dizertačnej práce pre inžiniersku prax

Prezentované výsledky sú aplikovateľné predovšetkým v podmienkach ochranných hrádzí Ondavy, resp. u ochranných hrádzí s podobnými parametrami, geologickou skladbou podložia a filtračnými charakteristikami zemín, morfológickou skladbou priľahlého územia, pri obdobných hydrologických parametroch povodňovej vlny. V akýchkoľvek iných prírodných podmienkach však možno ako návod pre posúdenie bezpečnosti ochranných hrádzí z hľadiska porušenia filtračnej stability vhodne aplikovať metodický postup, navrhnutý a uplatnený v rámci dizertačnej práce.

VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1.] BEDNÁROVÁ, E.: Vyjadrenie k návrhu technického riešenia porušenej ľavobrežnej hrádze Ondavy v km 13,550 – 13,850. Bratislava, 2004, 10 s.
- [2.] DANKO, J. a kol.: Pravá strana Ondavy OP III. stavba. Doplnok č. 1 Geologický prieskum, HYDROCONSULT BRATISLAVA, Bratislava, september 1985, 15 s., 5 príl.
- [3.] GOLDIN, A. L., RASSKAZOV, L. N.: Design of earth dams. Rotterdam: Balkema, 1992, 97 s.
- [4.] GRMAN, D. a kol.: Markovce – sanácia prietruže LH Ondavy v km 13,550 – 13,850. Podrobný inžinierskogeologický prieskum. Záverečná správa. GEO Slovakia, s.r.o., Košice, 2004
- [5.] HANUŠIN, J.: Vodné družstvo na Ondave. Storočnica vodohospodárskej činnosti. Bratislava, Povereníctvo pôdohospodárstva a pozemkovej reformy, 1949, 151 s.
- [6.] HULLA, J. - CÁBEL, J. Analýza kritérií pre filtračnú stabilitu. In Inžinierske stavby. 1997. Vol. 45, no. 4-5, s. 145–149
- [7.] INSTRUKCIJA: Po projektirovaniju obratnych filtrov gidrotechničeskich sooruzenij. Moskva: Energija. 1965. p. 98.
- [8.] ISTOMINA, I. S.: Filtracionnaja ustojčivost' gruntov. Moskva, 1957
- [9.] KUTNÝ, J.: Ondava – Prestavba toku km 7,400 – 23,000. Zámer – Vplyv na životné prostredie, HYDROPROJEKT, Košice, november 2004, 32 s.
- [10.] LUKÁČ, M. – BEDNÁROVÁ, E.: Navrhovanie a prevádzka vodných stavieb – sypané priehrady a hrádze. Jaga group, Bratislava 2006, 183 s.
- [11.] MOSENDZ, G. a kol.: Pravá strana Ondavy. II. stavba Vodohospodárske riešenie. Geologický prieskum, HYDROCONSULT BRATISLAVA, Bratislava, máj 1984, 16 s., 4 príl.
- [12.] MOSENDZ, G. a kol.: Pravá strana Ondavy. II. stavba Vodohospodárske riešenie. Doplnok č. 1 Inžiniersko-geologický prieskum, HYDROCONSULT BRATISLAVA, Bratislava, jún 1984, 6 s., 2 príl.
- [13.] PETRO, Ľ. a kol.: Odvodnenie pozemkov – pravá strana Ondavy, 1. stavba. Geologický prieskum, HYDROCONSULT BRATISLAVA, Bratislava, máj 1984, 29 s., 6 príl.
- [14.] PETRO, Ľ. a kol.: Pravá strana Ondavy, II. stavba. Dopĺňujúci inžiniersko-geologický prieskum pre úvodný projekt, HYDROCONSULT BRATISLAVA, Bratislava, jún 1987, 22 s., 4 príl.
- [15.] PETRO, Ľ. a kol.: Provizórna ČS Július. Geologický prieskum, HYDROCONSULT BRATISLAVA, Bratislava, september 1982, 19 s., 5 príl.
- [16.] ŠKVARKA, J.: Filtračné problémy nízkych vzdúvacích objektov na tokoch: dizertačná práca. Bratislava, 2019, 116 s. Stavebná fakulta STU v Bratislave
- [17.] THOMAS, S.D., YUAN, F.: Groundwater and the environment. The 2nd Annual Environmental Engineering Workshop. Groundwater modelling case studies. Oxford Geotechnika International. University of Durham, 1996
- [18.] WAN, C. F., FELL, R.: Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations. New South Wales, 2004.

PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA

- [1.] BEDNÁROVÁ, E., MINÁRIK, M., LIPTÁK, B., KASANA, A., MACKOVJAK, P.: Water reservoirs and expected climate changes. In.: ICOLD 2014. International Symposium on Dams in Global Environmental Challenges . P. 219-226
- [2.] BEDNÁROVÁ, E., ŠKVARKA, J., GRAMBLIČKOVÁ, D., MACKOVJAK, P.: Experience gained from designing remedial actions on levees in Slovakia. SGEM 2016. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Sofia: STEF 92 Technology, 2016, , 101-108. ISBN 978-619-7105-57-5. ISSN 1314-2704.
- [3.] MACKOVJAK, P., FABIAN, L., SINAI, J., MIŠČÍKOVÁ, A.: Sanácia trhlín na ochranných hrádzach toku Latorica. In.: XXXV. Přehradní dny 2016. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016,
- [4.] MACKOVJAK, P., FABIAN, L., KUBIŠOVÁ, L.: Poruchy ochranných hrází toku Latorica a spôsoby ich sanácie. In.: Manažment povodí a extrémne hydrologické javy. Vyhne, 2017, ISBN 978-80-89740-16-1
- [5.] BEDNÁROVÁ, E, GRAMBLIČKOVÁ, D., MACKOVJAK, P.: Posúdenie filtračnej stability pravostrannej ochrannej hrádze Malého Dunaja v úseku nad Kolárovom. Manažment povodí a extrémne hydrologické javy 2019. Bratislava: Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, 2019. ISBN 978-80-570-1236.