

INTERAKCE DOPRAVNÍCH NÁSYPŮ A PRVKŮ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY ZA POVODNÍ

P. Fošumpaur

ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Abstrakt

Předložený příspěvek popisuje řešení interakce těles prvků protipovodňové ochrany (PPO) a dopravních násypů za extrémních povodňových situací. Cílem je především kvantifikace průsaku tělesy PPO a jejich podloží a posouzení různých technických variant sanace. Problém je řešen jako ustálené proudění podzemní vody nasyceným zemním prostředím a pro simulaci průsakových poměrů je využito výpočetní prostředí FEMLAB/MATLAB.

1 Úvod

Rozsáhlé povodně koncem devadesátých let minulého století a zejména největší zaznamenaná povodeň ze srpna 2002 vyvolaly obecnou potřebu koncepčního řešení protipovodňové ochrany v ČR. Prvků protipovodňové ochrany existuje celá řada a výběr optimálního řešení zpravidla závisí na konkrétních podmínkách v zájmové lokalitě. Mezi možná opatření se řadí mobilní protipovodňové stěny a výstavba ochranných hrází, jejichž tělesa jsou většinou tvořena zemními sypanými konstrukcemi. V řadě případů je inundační území odděleno od hlavního toku dopravními násypy, jejichž využití jako prvků protipovodňové ochrany je však diskutabilní, neboť byly od počátku navrhovány s jiným cílem a jejich schopnosti bránit prosakující vodě, ať již jejich tělesem nebo podloží, jsou obvykle omezené.

V příspěvku je popsána simulace proudění prvky protipovodňové ochrany (PPO) a jejich podloží za předpokladu ustáleného proudění nasyceným zemním prostředím. Simulace je provedena ve výpočetním prostředí FEMLAB/MATLAB, kde je využit PDE Coefficient Form základního modulu, který spolupracuje s rutinou pro nalezení souřadnic volné hladiny v zemním tělese naprogramovanou v prostředí MATLAB.

2 Řídící rovnice proudění podzemní vody

Posouzení průsakových poměrů prostředky PPO je řešeno za předpokladu ustáleného proudění nasyceným prostředím, kdy je využit Darcyho zákon:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\nabla H \quad (1)$$

kde \mathbf{u} je vektor rychlosti proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 \mathbf{K} ... vektor hydraulické vodivosti, který může být obecně různý ve směru jednotlivých os (anizotropní prostředí) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 H ... hydraulická (piezometrická) výška [m].

Rovnice (1) zapsaná po složkách má tvar:

$$\begin{aligned}
u_x &= -K_x \frac{\partial H}{\partial x} \\
u_y &= -K_y \frac{\partial H}{\partial y} \\
u_z &= -K_z \frac{\partial H}{\partial z}
\end{aligned}
\tag{2}$$

Daný problém průsaku tělesem PPO nebo silničním násypem je řešen jako dvourozměrný (2D), a to ve svislém řezu hrází (násypu) kolmo na její osu (rovina x,y). Poslední rovnice ze soustavy (2) pak odpadne. Piezometrická výška v daném bodu oblasti proudění je dána součtem svislé souřadnice a tlakové výšky a udává tak polohu hladiny v tenké trubici (piezometru) v daném bodě:

$$H = y + \frac{p}{\rho g} \tag{3}$$

kde p je tlak [Pa], g je gravitační zrychlení [m.s^{-2}], ρ je hustota vody [kg.m^{-3}] a y je souřadnice ve svislém směru [m].

Základní rovnicí filtračního 2D proudění nestlačitelné kapaliny v nedeformujícím se prostředí je rovnice kontinuity:

$$\text{div } \mathbf{u} = \nabla \mathbf{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

Dosadíme-li rovnici (1) popř. (2) do rovnice (4) dostaneme základní rovnici stacionárního nasyceného proudění podzemní vody ve 2D:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \tag{5}$$

3 Okrajové podmínky

Protože parciální diferenciální rovnice (5) má nekonečně mnoho řešení je třeba zavést na hranici Γ oblasti proudění okrajové podmínky. Jejich správné volbě je třeba věnovat náležitou pozornost, protože mohou podstatně ovlivnit výsledné řešení.

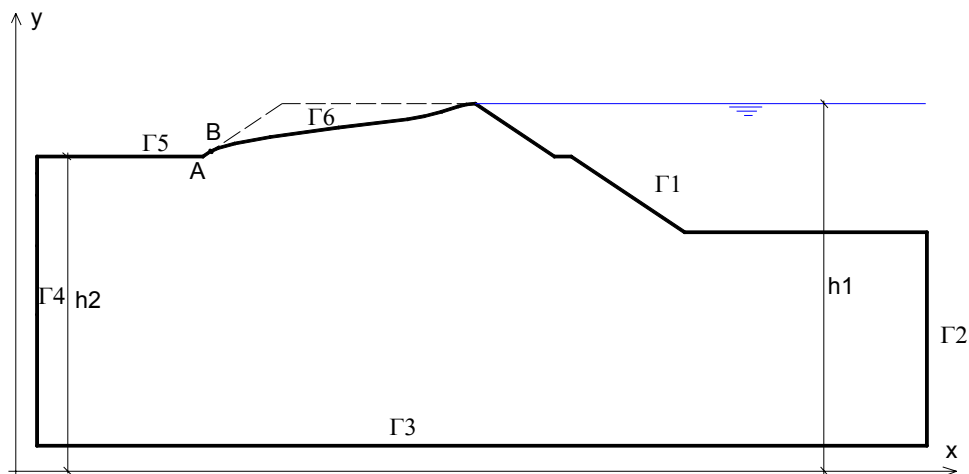
Při řešení proudění silničním násypem, popř. ochrannou hrází a podložím byly na hranici oblasti proudění použity okrajové podmínky podle tab.1 ve shodě se značením podle obr.1. Na hranici $\Gamma 1$ je použita Dirichletova okrajová podmínka daná výškou hladiny vody nad osou x . Hranice $\Gamma 1$ je dána návodním svahem hráže (násypu) a dnem toku. Dno toku je uvažováno po jeho osu, kdy je zaveden předpoklad nulového průtoku (Neumannova okrajová podmínka) hranicí oblasti v ose $\Gamma 2$. Tato okrajová podmínka je rovněž uvažována na nepropustném podloží $\Gamma 3$. Na hranici $\Gamma 4$ a $\Gamma 5$ je uvažována Dirichletova podmínka daná výškou hladiny podzemní vody nad osou x . Část hranice $\Gamma 5$ označená v obr.1 jako A-B přitom představuje tzv. výronovou plochu, kde prosakující podzemní voda volně vyvěrá na vzdušném líci hráže. Poloha bodu B není předem známá a je třeba ji hledat iteračním výpočtem. Podobně není známá poloha hranice $\Gamma 6$, která představuje volnou hladinu podzemní vody

v tělese hráze (depresní křivka). Řešení daného okrajového problému je nelineární úloha, která se dále linearizuje pomocí postupných iterací, které hledají takové řešení, aby na hranici Γ_6 byla splněna současně podmínka nulového tlaku a nulového průtoku ve směru normály k hranici. Za tímto účelem je výronová plocha A-B a hranice Γ_6 rozdělena na dílčí úseky, které jsou tvořeny úsečkami. Vodorovný průmět jednotlivých úseček je konstantní (dx). Poloha hladiny v uzlech je nastavena odhadem a následují iterace (viz. obr.2).

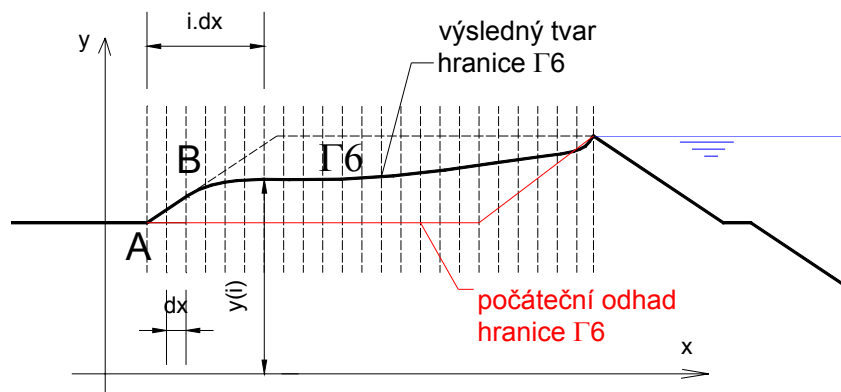
Označme počáteční polohu hranice Γ_6 jako $y_0 = y_0(x)$ a získané řešení $H_0(x,y)$. Potom pokud platí $H_0[x,y_0(x)] = y_0(x)$, je problém vyřešen. V opačném případě volíme další odhad volné hladiny na oblasti Γ_6 a polohu bodu B jako $y_1(x) = H_0[x,y_0(x)]$.

Tabulka 1: POPIS OKRAJOVÝCH PODMÍNEK PŘI ŘEŠENÍ PRŮSAKU OCHRANNOU HRÁZÍ (NÁSYPEM).

Okrajová podmínka	Hranice	Popis
$H = h_1$	Γ_1	Návodní svah hráze a dno toku po osu toku
$K_x \frac{\partial H}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial H}{\partial y} n_y = 0$	Γ_2	Nulový průtok hranicí v ose toku
$K_x \frac{\partial H}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial H}{\partial y} n_y = 0$	Γ_3	Nulový průtok kolmo do nepropustného podloží
$H = h_2$	Γ_4	Hydraulická výška daná hladinou podz. vody
$H = y$	Γ_5	Výtok podz. vody do volna dnem zájmového území a výronovou plochou A-B
$H = y$ a současně $K_x \frac{\partial H}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial H}{\partial y} n_y = 0$	Γ_6	Volná hladina v silničním náspu. Současně musí platit podmínka nulového tlaku a nulového průtoku kolmo na hranici.



Obr.1 Schéma okrajových podmínek.



Obr.2 Diskretizace volné okrajové podmínky Γ_6 , na které se hledá poloha volné hladiny v tělese hráze.

Funkce $y_1(x)$ je nová aproximace volné hladiny v tělese hráze a výronové plochy. Pokud v některém uzlu je $y_1(x)$ větší než obrys hráze, položíme $y_1(x)=Y(x)$, kde $Y(x)$ je obrys hráze. V tomto případě je třeba posunout bod B na výronové ploše výše. Výpočetně je iterativní úloha nalezení volné hladiny a výronové plochy řešena pomocí algoritmu v MATLAB, který v každém kroku nejprve vygeneruje aktuální tvar oblasti proudění, přiřadí jednotlivým vrstvám v podloží, popř. v tělese hráze, dané součinitele hydraulické vodivosti a poté spustí řešení problému. Jakmile je výpočet ukončen je zjištěno výsledné řešení $H_k[x, y_k(x)]$ na hranici Γ_6 pomocí příkazu **postinterp**. Výpočet končí podle hodnoty konvergenčního kritéria ε , které je dáno součtem kvadrátů odchylek mezi předpokládanou hodnotou $y(x)$ a vypočtenou $H(x, y)$ na hranici oblasti Γ_6 podle vztahu (pro k -tou iteraci):

$$\sum_{i=1}^n (H_k[x_i, y_k(x_i)] - y_k(x_i))^2 < \varepsilon \quad (6)$$

kde n je počet dílčích úseků na výronové ploše A-B a na hranici Γ_6 .

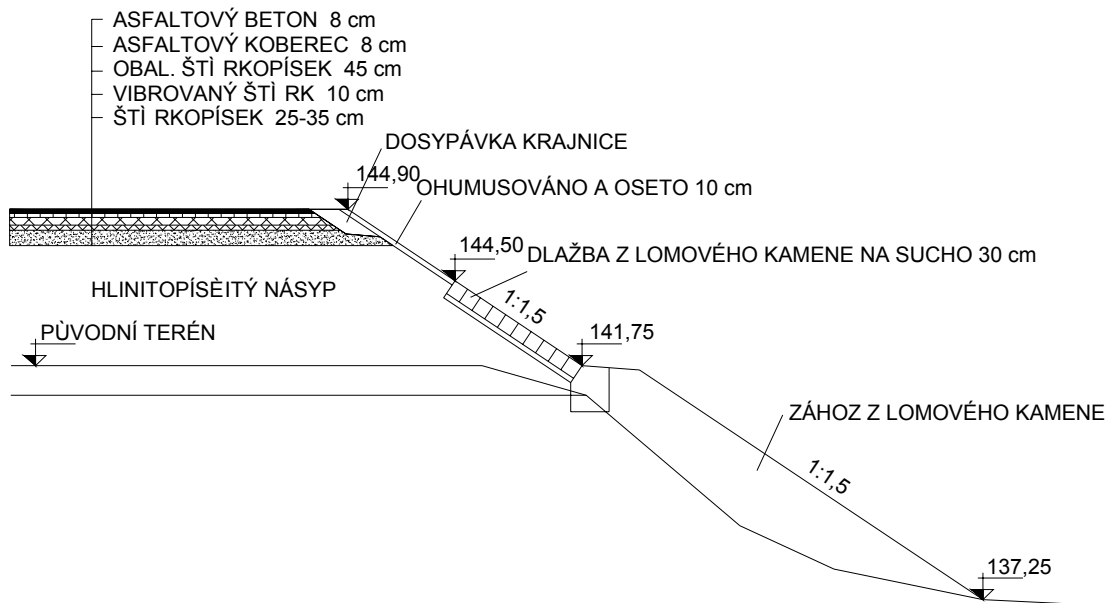
4 Případová studie

V této části je popsána aplikace proudění podzemní vody dopravním násypem a jeho podložím. Součástí řešení je posouzení různých technických řešení sanace velmi propustného podloží a tělesa hráze.

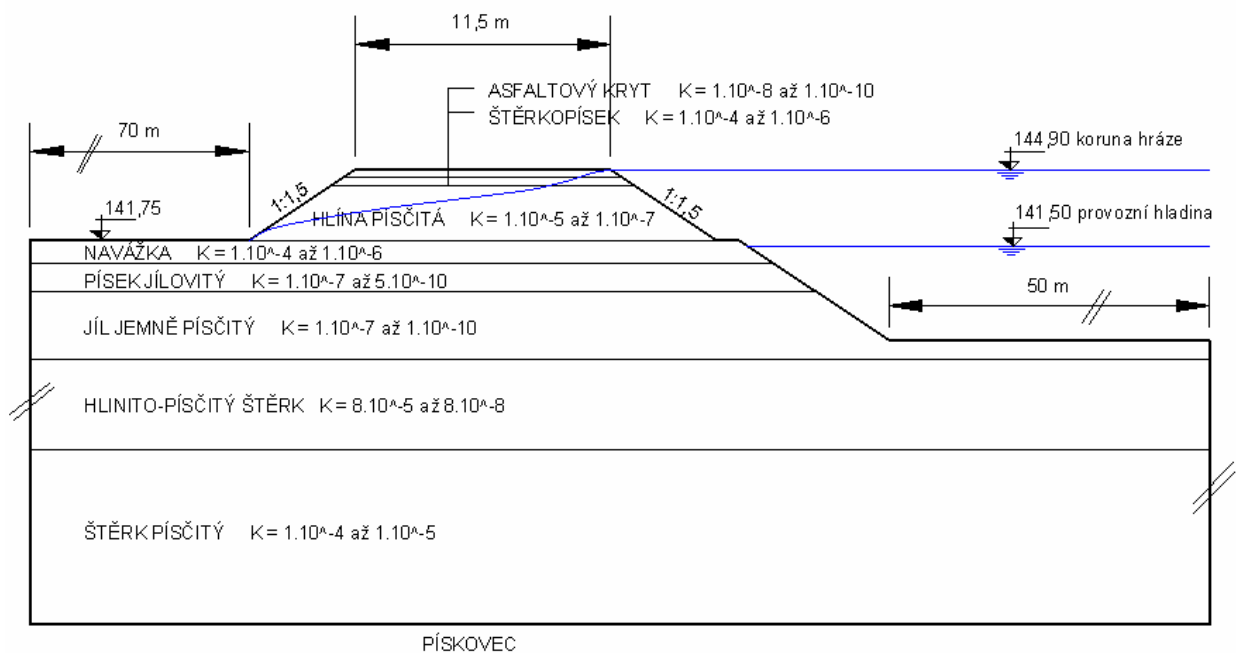
Na obr.3 je znázorněna situace se stávajícím dopravním násypem na relativně dobře propustné vrstvě navážky.

Oblast proudění pro tuto situaci je znázorněna včetně filtračních vlastností v obr.4. Směrem do řeky je vedena zhruba do osy toku a směrem do zájmového území za vzdušným svahem násypu sahá do vzdálenosti 70 m, což je z hlediska filtrace podložím naprosto dostačující, neboť téměř veškeré průsaky podložím se odehrají do vzdálenosti cca 10 m.

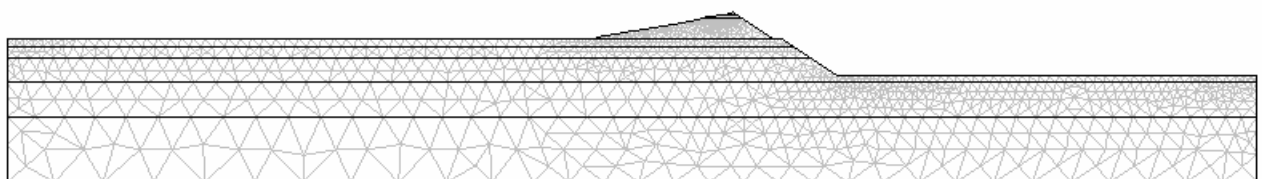
Proudění podzemní vody v oblasti podle obr.4 je řešeno numerickou aproximací rovnice (5) metodou konečných prvků. Počet konečných prvků v řešené oblasti byl v závislosti na variantě a výpočetní podrobnosti v rozmezí 2500 až 20000. Příklad sítě konečných prvků v oblasti proudění je uveden na obr.5. Výsledné proudové poměry jsou v obr.6.



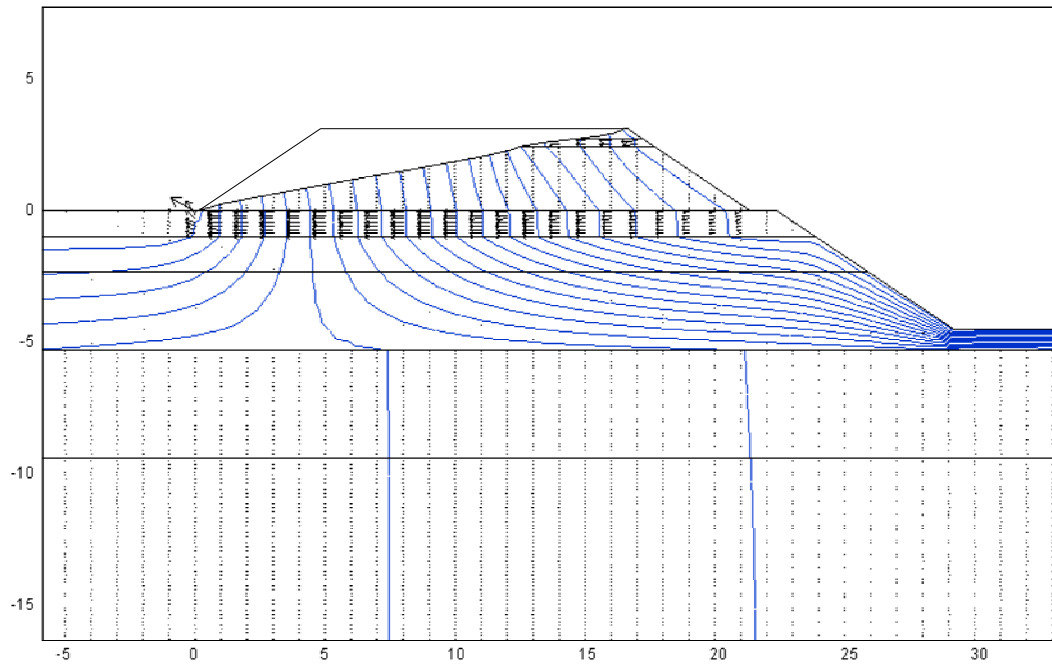
Obr.3 Schéma dopravního násypu.



Obr.4 Schéma oblasti proudění.

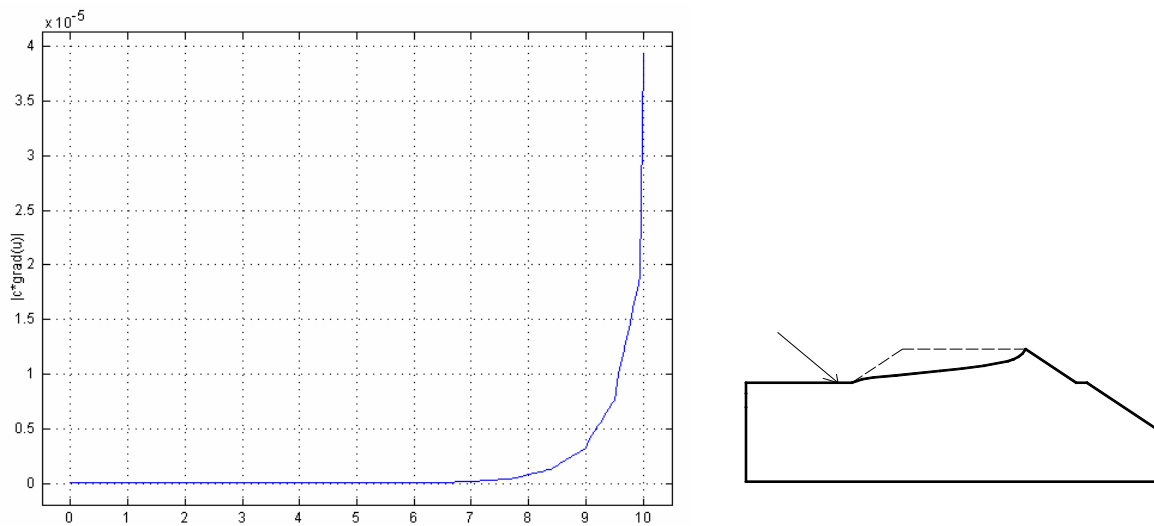


Obr.5 Příklad sítě konečných prvků v proudové oblasti.



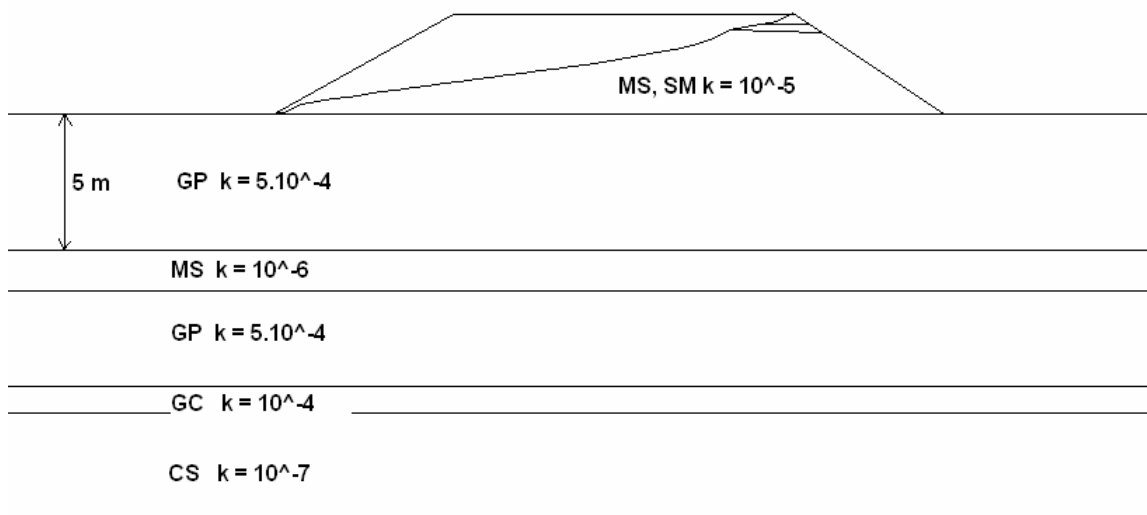
Obr.6 rozdělení vektorů rychlostí (černě) a ekvipotenciál hydraulických výšek (modře).

Na obr.7 je znázorněno rozdělení průsakových rychlostí do zájmového území podložím 10 m za vzdušní patou násypu. Z obr.7 vyplývá, že veškeré průsaky podložím lze očekávat pouze do vzdálenosti cca 3 m od paty násypu. Integrací rychlostního pole vstupujícího na terén zájmového území a rychlostního pole na výronové ploše lze získat celkový průsak tělesem násypu na 1 m jeho délky. Hodnota tohoto průsaku činí $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na 1 m násypu, tedy cca $60 \text{ l} \cdot \text{hod}^{-1}$ na 1 m násypu. Tato hodnota je na hranici přijatelnosti a patrně nevyžaduje žádné technické řešení průsaku.

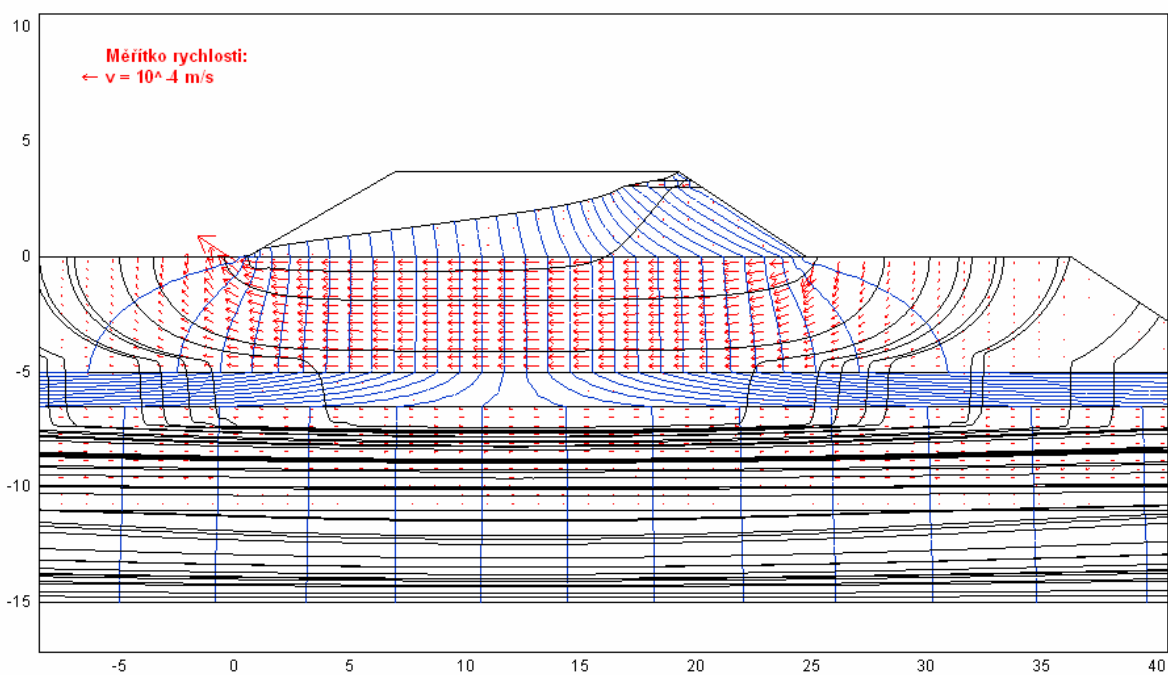


Obr.7 Rozdělení rychlostí ve vzdálenosti 10 m od paty násypu. Maximální rychlost je v patě násypu cca $4 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Na následujícím obr.8 je naopak znázorněna varianta, kdy mocnost relativně propustné vrstvy v podloží pod dopravním násypem je významná (5m). Celkový ustálený průsak podložím a výronovou plochou je při max. hladině v toku roven $3,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na 1m násypu, což je $1170 \text{ l} \cdot \text{hod}^{-1}$ na 1 m násypu. Za dobu povodně lze předpokládat prosáklý objem maximálně 40 m^3 na 1 m násypu. Na obr.9 je znázorněno rychlostní pole násypem a podložím, ekvipotenciály hydraulických výšek a proudnice.



Obr.8 Stávající dopravní násyp na dobře propustném podloží.



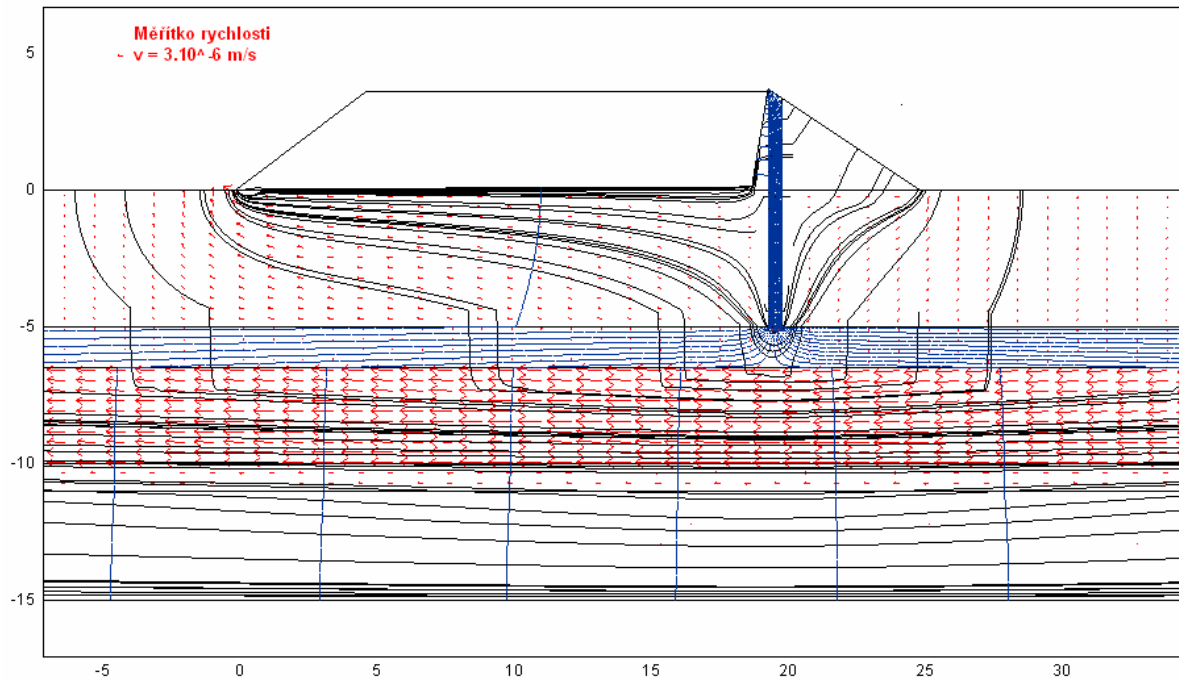
Obr.9 Varianta bez sanace podloží. Rozdělení vektorů rychlostí (červeně), ekvipotenciály hydraulických výšek (modře) a proudnice (černě).

Vzhledem k vysokým průsakům je nutné sanační opatření. Je navržena trysková injektáž z koruny násypu z návodní krajnice tělesem násypu a celým propustným podložím se zavázáním do relativně nepropustného podloží (cca 0,5 m).

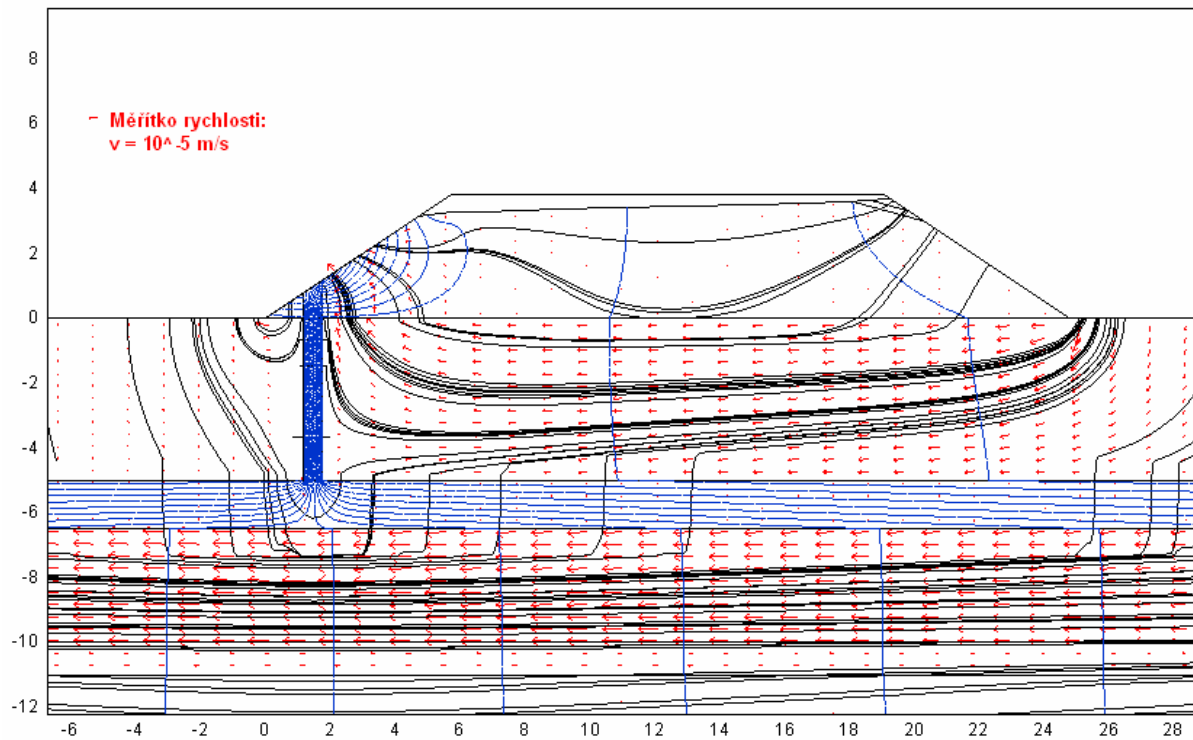
Injekční clonu je třeba provést pokud možno nepropustnou (dvě řady se sponem 0,5 m, prostřídane). Průsak takto sanovaným násypem a jeho podložím je při max. hladině v toku roven 144 l.hod^{-1} na 1 m násypu (viz. obr. 10). Za dobu povodně lze předpokládat prosáklý objem maximálně $4,8 \text{ m}^3$ na 1 m násypu.

Výpočty ukázaly, že vynechání druhé řady injekční clony nebo jakékoli zvětšení sponu injekčních vrtů výrazně sníží účinnost opatření (potvrzeno horizontálním modelem ve 2D). Při

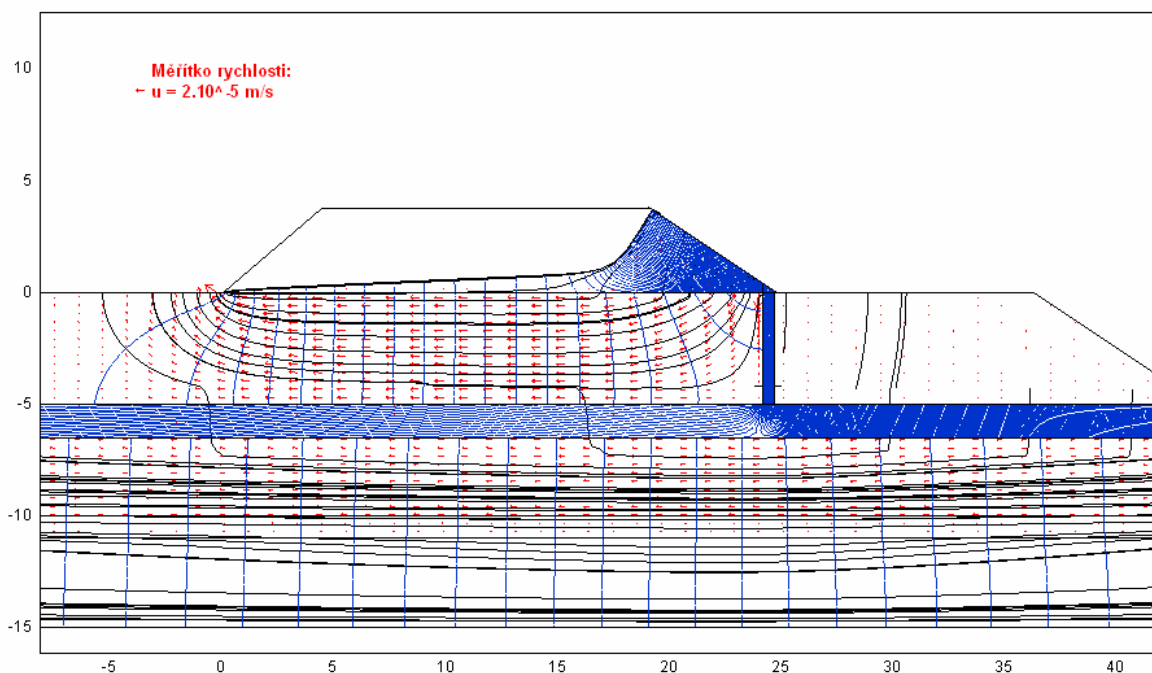
ukončení injektáže nad nepropustným podložím je účinek rovněž značně omezen a navíc dochází k vysokým hydraulickým gradientům pod injekční clonou, které by ji během povodňových průtoků začaly rozebírat. Injektáž vedená pouze z návodní nebo vzdušní paty je rovněž neúčinná (viz. obr.11 a obr.12). Hodnota průsaku u injektáže vedené ze vzdušní paty násypu je $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{m}$ násypu, tedy $216 \text{ l} \cdot \text{hod}^{-1}$ na 1 m násypu. Hodnota průsaku u injektáže vedené z návodní paty násypu je $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na 1m násypu, tedy $468 \text{ l} \cdot \text{hod}^{-1}$ na 1 m násypu.



Obr.10 Doporučená sanace podloží a násypu těsnící stěnou z koruny návodního svahu.



Obr.11 Neúčinná sanace podloží těsnící stěnou z paty vzdušního svahu.



Obr.12 Neúčinná sanace podloží těsnící stěnou z paty návodního svahu.

5 Závěr

Předložený příspěvek popisuje aplikaci matematického modelování proudění podzemní vody tělesy prvků protipovodňové ochrany a jejich podloží. Pro popis proudění a kvantifikaci průsaků je využita aproximace řídicí rovnice metodou konečných prvků v prostředí FEMLAB/MATLAB. Zvolený postup umožňuje nejenom kvantifikaci průsaků, ale také nalezení optimální varianty sanace hrází a jejich podloží. V dalším výzkumu bude vhodné zpřesnit řešení zohledněním nestacionárního charakteru proudění v průběhu povodně.

Literatura

- [1] ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže, ČNI 1997.
- [2] Broža, V., Satrapa, L.: Navrhování přehrad, vydavat. ČVUT, Praha 2000.
- [3] Broža, V., Kratochvíl, J., Peter, P., Votruba, L.: Přehrady, SNTL, Praha 1987.
- [4] Císlarová, M., Vogel, T.: Transportní procesy, vydavat. ČVUT, Praha 1998.
- [5] Kazda, I.: Podzemní hydraulika v ekologických a inženýrských aplikacích, Academia, Praha 1997.
- [6] Valentová, J.: Hydraulika podzemní vody, vydavat. ČVUT, Praha 2001.
- [7] Vaníček, I.: Mechanika zemin, vydavat. ČVUT, Praha 1992.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory výzkumného záměru Ministerstva vzdělání, mládeže a sportu ČR, reg.č.: MSM 6840770005 „Udržitelná výstavba“.

Dr. Ing. Pavel Fošumpaur
 ČVUT v Praze, Fakulta stavební
 Katedra hydrotechniky
 Thákurova 7, 166 29 Praha 6

fosump@fsv.cvut.cz