CITLIVOSTNÍ ANALÝZA SOFTWARE AREBA PRO SIMULACE PORUŠENÍ SYPANÝCH HRÁZÍ V DŮSLEDKU VNITŘNÍ EROZE

SENSITIVITY ANALYSIS OF THE SOFTWARE AREBA FOR SIMULATION DAM BREACHING DUE TO INTERNAL EROSION

Stanislav Kotaška^{*,1}

*kotaska.s@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodních staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Jednou z častých příčin poruchy vodního díla je vnitřní eroze v tělese hráze. Pro simulaci těchto jevů je k dispozici řada softwarů umožňující výpočet porušení sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze zemin. V rámci příspěvku byl zvolen software (SW) A Rapid Embankment Breach Analysis (AREBA), pro který byla provedena jednocestná citlivostní analýza. Příspěvek má za cíl pochopení klíčových geotechnických parametrů vstupujících do SW AREBA a jejich vliv na hydrogram odtoku, velikost průlomového otvoru a také na časové charakteristiky poruchy. Nejvíce citlivými parametry ovlivňující výstupy jsou drsnostní součinitel dle Manninga a koeficient erodibility. Tyto dva parametry by měly být variovány metodou Monte-Carlo v SW AREBA.

Klíčová slova

Citlivostní analýza, porušení, vnitřní eroze, AREBA

Abstract

One of the causes of earth fill dam failure are internal erosion. To simulate these phenomena, a number of software are available to calculate the failure of an earth fill dams due to overtopping or due to internal erosion. For this purpose, software (SW) A Rapid Embankment Breach Analysis (AREBA) was chosen, for which a one-way sensitivity analysis was performed. The paper aims to understand the key geotechnical parameters input to the SW AREBA and their influence on the dam breach hydrogram, the size of the breach and also on the time characteristics. The most sensitive parameters influencing the outputs are the Manning's roughness coefficient and the erodibility coefficient. These two parameters should be varied by the Monte-Carlo method in the AREBA.

Key words

Sensitivity analysis, dam-break, internal erosion, AREBA

1 ÚVOD

Součástí projektu IMPACT v roce 2012 bylo vytvoření SW AREBA – A Rapid Embankment Breach Analysis [8] pro rychlou predikci porušení homogenních sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze a přelítí s možností využití metody Monte-Carlo. SW AREBA byl vyvinut na základě předchozího softwaru HR BREACH, s kterým byl porovnáván a ověřen a validován na 4 historických porušeních hrází, 7 polních zkouškách a 18 laboratorních experimentech, ale pouze pro případ přelítí. Validace SW AREBA pro případ vnitřní eroze byla nepřesná kvůli špatnému vyhodnocení pokusu a parametrů zemin [8]. V roce 2014 byl zveřejněn dokument „Small Reservoirs Simplified Risk Assessment Methodology research report“ [3], kde bylo provedeno podrobnější testování SW AREBA z hlediska predikce porušení sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze. Navržený přístup zahrnoval analýzu poruchy za předpokladu nulového přítoku, malého objemu nádrže, vysoce erodovatelných materiálů a průsakové trubice s počátečním průměrem 0,5 m. S výše popsanými předpoklady se hráz vždy protrhla v krátkém čase. Bližší analýza interaktivních účinků výběru různých pevností materiálu nebo počátečního průměru potrubí nebyla v rámci práce provedena.

2 POPIS SOFTWARE AREBA

Uvedený SW AREBA je jednorozměrný matematický model vycházející z rovnice pro výtok otvorem nebo přepadu přes širokou korunu, kdy je úloha formulována jako 1D úloha v neznámé funkci $Q_b(t)$. Jedná se o zjednodušený model pro rychlý výpočet a predikci hydrogramu průlomové vlny. Vstupní parametry do výpočtu je možné zadat pomocí rovnoměrného nebo normálního rozdělení, kdy volba jednotlivých parametrů je řešena pomocí metody Monte-Carlo s využitím Latin Hypercube Sampling (LHS).

Výpočet průtoku

Transformace nádrže

Při sestavení matematického modelu se používá zákon zachování hmotnosti vody protékající nádrží neboli vodohospodářská bilance nádrže ve tvaru:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_b(H) - Q_f(H), \quad (1)$$

kde V je objem vody v nádrži [m^3]; Q_{in} přítok vody do nádrže [m^3/s]; Q_b průtok vody průlomovým otvorem [m^3/s]; Q_f ostatní odtok vody z nádrže (přes přeliv, spodními výpustmi, nouzový přeliv) [m^3/s]; t čas [s]; H poloha hladiny v nádrži [m n. m.]. Za předpokladu změny objemu:

$$dV = A dH, \quad (2)$$

kde A je plocha hladiny v nádrži [m^2].

Průtok průlomovým otvorem (průsakovou trubicí) v případě vnitřní eroze

Otvor průsakové trubice je předpokládán jako kruhový. Průtok Q_b průsakovou trubicí je typicky řešen jako výtok otvorem v tlakovém režimu za předpokladu zanedbání ztrát na vtoku a výtoku jako [1], [8]:

$$Q_b = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \lambda \frac{L}{D_p} + \Sigma \zeta}} A \sqrt{2g(H - H_{výtok})}, \quad (3)$$

kde α je Coriolisovo číslo; L délka průsakové trubice [m]; D_p průměr průsakové trubice [m]; A je průtočná plocha průsakové trubice [m^2]; H je kóta hladiny v nádrži [m n. m.]; $H_{výtok}$ je kóta osy výtoku z erozní trubice nebo polohy hladiny v inundaci [m n. m.], λ je součinitel ztrát tření po délce ($\lambda = f(d_{50})$) [-] a ζ jsou ztráty místní (na vtoku a výtoku), které jsou zanedbávány [-].

Průtok průlomovým otvorem v případě přelítí

Pro stanovení vztahu průtoku průlomovým otvorem v důsledku přelítí, je průlomový otvor hráze reprezentován obdélníkem. Výpočet přelítí je řešen pomocí přepadové rovnice přes širokou korunu, která byla modifikována pro případ porušení sypaných hrází v důsledku přelítí [6, 8] pro obdélníkový profil jako:

$$Q_b = c_w B h_2 \sqrt{2g(H - h_2)}, \quad (4)$$

kde B je šířka přepadového paprsku [m], H je rozdíl hladiny vody v nádrži a dna průlomového otvoru u kterého se předpokládá že je ve výšce koruny hráze [m], h_2 je hloubka v místě průlomového otvoru [m], kdy $h_2 \approx d \approx 2/3H$ a c_w je přepadový součinitel, který se je funkcí H atd.

Eroze soudržného materiálu

Počátek eroze při porušení sypané zemní hráze ze soudržného materiálu vznikne po překročení kritického tečného napětí τ_c . Pro posouzení vzniku eroze se provede výpočet tangenciálního či tečného napětí od proudící vody, který se posoudí s kritickým tečným napětím. Pokud je kritické tečné napětí překročeno nastává eroze zeminy. Při volbě kritického tečného napětí rozlišujeme zeminy soudržné a nesoudržné, povrch opevněný a neopevněný, a přihlížíme k vlastnostem zeminy.

Tečné napětí

Při proudění kapaliny v korytě či trubici se všechny částice (molekuly vody) nepohybují stejně. Částice, které jsou v blízkosti stěn se téměř nepohybují a částice vzdálenější od stěny se pohybují rychleji. Pro zjednodušení si tedy můžeme představit, že se kapalina skládá z tenkých souvislých vrstviček a všechny částice jedné vrstvy mají stejnou rychlost. Dvě sousední vrstvy se oproti sobě pohybují různou rychlostí. Uvnitř kapaliny a na rozhraní kapaliny a materiálu tedy vzniká tření. V tomto případě se vnitřní tření, a tedy působení viskozity zanedbává a řeší

se tangenciální neboli tečné napětí [1]. Tečné napětí můžeme řešit pro průsakovou trubici, pro dno a stěny průlomového otvoru a pro šikmý svah hráze.

a) Průsaková trubice

Pro tečné napětí byla odvozena celá řada vztahů od různých autorů, pro různé modifikace působení vody (vertikální a horizontální tečné napětí, pro vodorovný či šikmý povrch, pro opevněný či neopevněný povrch, tečné napětí od přepadajícího paprsku apod.) Nejjednodušší výpočet pro tečné napětí τ způsobené proudící vodou v průsakové trubici lze podle Darcy-Weisbacha vyjádřit podle [8] jako:

$$\tau = \rho g \frac{D_p}{4} I_E, \quad (5)$$

kde ρ je objemová hmotnost vody [kg/m^3], g je gravitační konstanta, D_p je průměr průsakové trubice [m] a I_E je sklon čáry energie v průsakové trubici [-], který se vypočítá podle [8] jako:

$$I_E = \lambda \frac{L}{D_p} \frac{v_{pip}^2}{2g}, \quad (6)$$

kde L je délka průsakové trubice [m]; D_p průměr průsakové trubice [m], λ je součinitel ztrát tření po délce ($\lambda = f(d_{50})$) [-] a v_{pip} je rychlost proudění v průsakové trubici [m/s].

b) Dno a stěny průlomového otvoru a šikmý svah hráze

Tečné napětí τ způsobené proudící vodou na šikmém svahu podle Darcy-Weisbacha se vyjádří podle [8] jako:

$$\tau = \rho g h_n \sin \alpha, \quad (7)$$

kde ρ je hustota vody [kg/m^3], g je gravitační zrychlení, $\sin \alpha$ je sklon dna pro strmé svahy a pro nízké sklony se může zaměnit za $\tan \alpha \sim i_w$, a tedy za sklon čáry energie [-] a h_n je normální hloubka na vzdušném svahu, která se vypočítá podle [8] jako:

$$h_n = \left(\frac{q^2 n^2}{\sin \alpha} \right), \quad (8)$$

kde q je jednotkový průtok [m^2/s], n je drsnostní součinitel dle Manninga [$\text{s/m}^{1/3}$] a $\sin \alpha$ je sklon vzdušného svahu [-]. Pokud dojde k úplnému oderodování vzdušní strany hráze, je dále průlomový otvor pouze rozšiřován do stran. Tečné napětí působící pouze do stran vychází ze vztahu přepadu přes širokou korunu následujícím vztahem [8]:

$$\tau = \frac{\rho g^2 n^2 (h_1 - h_2)}{h_2^{1/3}}, \quad (9)$$

kde h_1 je hloubka před průlomovým otvorem [m n. m.] a h_2 je hloubka pod nádrží rovné $2/3 \cdot h_1$ [m n. m.].

Rychlost eroze

Výpočet eroze zemního materiálu vykazuje nejvyšší vliv při predikci hydrogramu, velikosti průlomového otvoru a času porušení. Pro výpočet rychlosti eroze zemního materiálu odvodila celá řada autorů různé vztahy založené na různých předpokladech. Většina vztahů platí pro případ vnitřní eroze a zároveň i v případě přelití. Výpočet rychlosti eroze se může lišit v závislosti na stanovení tečného napětí. V současné době všechny novodobé SW využívají pro řešení eroze kohezivních zemin vztah [m/s] [4]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{cases} k_d (\tau - \tau_c) & \text{když } \tau > \tau_c, \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}, \quad (10)$$

kde k_d je koeficient erodibility [m^3/Ns], τ tečné napětí, které je počítáno z rychlosti proudu působícího na dno a svahy [N/m^2] a τ_c kritické tečné napětí odolnosti materiálu [N/m^2]. Rovnice předpokládá lineární závislost mezi erodibilitou a kritickým tečným napětím.

Kolaps nadloží průsakové trubice

Kolaps nadloží průsakové trubice je důležitý jev a jeho přesnost a druh výpočtu má zásadní vliv na výsledný hydrogram a výsledný průlomový otvor. Po kolapsu nadloží dochází většinou k nejstrmějšímu nárůstu průtoku při porušení sypané hráze v důsledku vnitřní eroze. Po kolapsu nadloží přechází výpočet průtoku průsakovou trubicí (z výtoku otvorem) na výpočet přelití (přepad přes širokou korunu a eroze vzdušní strany hráze) [7].

Stabilita nadloží průsakové trubice je řešena pomocí celé řady zjednodušujících předpokladů. V případě diskretizace průlomového otvoru kruhem, lze započítat klenbový účinek. Jedním ze základních výpočtů je stanovení hmotnosti nadloží a odporových sil, s následným posouzením stability na předem stanovených smykových plochách [8] podle vztahu:

$$FOS = \frac{cA_t}{W}, \quad (11)$$

kde c je koheze zeminy [Pa], A_t svislá plocha nad okrají otvoru od otvoru až po korunu hráze vztažená k ose průsakové trubice [m²] a W je hmotnost půdy nad horní hranou průsakové trubice [N/m²].

Obr. 1 Schéma ploch a sil působících při kolapsu nadloží průsakové trubice.

3 METODIKA CITLIVOSTNÍ ANALÝZY

Cílem citlivostní analýzy je zjistit vliv změny vstupních parametrů na změnu hledaných výstupních veličin, kde v případě porušení sypané hráze v důsledku vnitřní eroze (průsakovou trubicí) se jedná o určení časového průběhu průtoku $Q_b(t)$ průlomovým otvorem (hypotetickou průsakovou trubicí) ve vazbě na průběh polohy $H(t)$ hladiny vody v nádrži a průměru $D(t)$ průsakové trubice či šířce průlomového otvoru $B(t)$. Dále je pak možné softwarem definovat časové charakteristiky poruchy jako je čas iniciace poruchy a celkovou dobu trvání poruchy, čas, kdy dojde ke kolapsu stropu průsakové trubice a čas od iniciace po dosažení maximálního kulminačního průtoku.

Definice základních a zjednodušujících předpokladů

Proudění a vývoj průsakové cesty a průlomového otvoru jsou časově závislé proměnné. Vzhledem k obtížnosti modelování všech dějů uvnitř trubice je nutné zavést zjednodušující předpoklady. Základní zjednodušující předpoklady jsou:

- nestlačitelná kapalina (voda): hustota $\rho = \text{konst.}$,
- izotermní proudění: neprobíhá tepelná výměna,
- konstantní viskozita kapaliny (vody) $\mu = \text{konst.}$,
- nedochází k provzdušnění proudu kapaliny,
- konstantní, nulová přítoková rychlost povodňové vlny do nádrže: $v = 0$;
- jednotlivé vrstvy materiálu tělesa hráze jsou izotropní a homogenní,
- na začátku výpočtu se uvažuje zformovaná průsaková cesta v celé své délce porušení,
- předpoklad stacionarity koeficientu eroze zeminy k_d , kritického tečného napětí τ_c a drsnostního součinitele dle Manninga n

další předpoklady, které bývají často zanedbávány:

- vliv větrových vln na hladinu nádrže a vznik oscilačních vln,
- vliv inundačního území pod hráží na vývoj průlomového otvoru – často bývá zanedbán vlivu dolní vody na vývoj průlomového otvoru,
- nadloží průsakové trubice je po kolapsu kompletně oderodováno v jednom časovém kroku.

Jednocestná citlivostní analýza

Během této analýzy je vybrán jeden parametr, který je „jedenkrát“ variován ze své výchozí hodnoty a je sledován, jaký má tato změna dopad na celkové výsledky výpočtu softwaru. Sledujeme tedy postupně vliv vždy jednoho parametru na sledované výstupní hodnoty. Vždy musí být změněn pouze jeden parametr, zatímco všechny ostatní zůstanou na své základní, výchozí hodnotě. Znalost odezvy matematického modelu na změnu vstupních parametrů je důležitá pro vyhodnocení použitelnosti modelu a dále informace, které vstupní parametry mají dominantní vliv na výsledné výstupy a bylo by vhodné je tedy predikovat pomocí Monte-Carlo.

Pro citlivostní analýzu byl zvolen polní test provedený v rámci projektu IMPACT v Norsku v roce 2004, který byl realizován jako řízený experiment. Těleso hráze bylo postaveno z jílovité morénové půdy výšky 4.3 m. Rezervoár hráze měl objem 110 000 m³ při nejvyšší možné hladině 372.00 m n. m. (obr. 2). Ve spodní části tělesa hráze bylo položeno perforované potrubí DN 200, uložené v písčité zemině vrstvě 1x1 m, opatřené ventilem s uzávěrem [9].

Na začátku testu byl ventil otevřen a pískové lože bylo vypláchnuto, aby se zahájil test porušení v důsledku vnitřní eroze. Počáteční výtok z potrubí byl cca 200 l/s. Kolaps nadloží průsakové trubice je odhadován v době prudkého poklesu hladiny v nádrži tedy cca 500 s po začátku poruchy. Přímé měření času kolapsu nadloží a erozních charakteristik zeminy nebylo v rámci testu proveditelné [9]. Vstupní parametry z polního testu IMPACT v Norsku jsou uvedeny v Tab. 1.

Obr. 2 Schéma polního pokusu porušení sypané hráze v důsledku vnitřní eroze v rámci projektu IMPACT v Norsku v roce 2004 [9]. 1 - Těleso hráze z morénovitých jíílů, 2- zavázání hráze z rockfillu.

Tab. 1 Vstupní parametry polního pokusu porušení sypané hráze v důsledku vnitřní eroze v rámci projektu IMPACT v Norsku v roce 2004 [8], [9].

Vstupní parametry	Zkratka	Hodnota	Jednotky
Počáteční hladina v nádrži	H_0	427.28	[m n. m.]
Nadmořská výška koruny hráze	C_L	427.5	[m n. m.]
Výška hráze	H_H	4.3	[m]
Šířka koruny hráze	C_w	2.8	[m]
Délka hráze	L_H	24	[m]
Nadmořská výška skalního podloží	H_p	423	[m n. m.]
Sklon návodního svahu	1:X	01:01.4	[V:H]
Sklon vzdušního svahu	1:X	01:01.4	[V:H]
Počáteční výška výtok z průsak. trubice	H_{out}	364.81	[m n. m.]
Počáteční výška osy průsak. trubice	H_{osa}	364.81	[m n. m.]
Počáteční průměr průsakové trubice	D_0	0.2	[m]
Přepadový koeficient	m	0.33	[-]
Velikost zrna d_{50}	d_{50}	7-Jun	[mm]
Objemová hmotnost zeminy suché	ρ_d	2090	[kg/m ³]
Koheze	c'	20	[kN/m ²]
Procenta jílu	P	2	[%]
Index plasticity	PI	Netestováno	[-]
Úhel vnitřního tření	φ	45.6	[°]
Kritické tečné napětí	τ_c	Netestováno	[N/m ²]
Koeficient erodibility	k_d	Netestováno	[m ³ /Ns]
Pórovitost	p	0.245	[-]

Pro citlivostní analýzu se vybraly vstupní parametry vlastností zemín polního testu uvedené v Tab. 1, pro které byla sledována citlivost SW AREBA. Tyto parametry byly snižovány a zvyšovány v intervalu 20 % a 40 % uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry sledované v rámci citlivostní analýzy SW AREBA.

Vstupní parametry pro citlivostní analýzu	Jednotky	60 % vstupní hodnoty	80 % vstupní hodnoty	Vstupní hodnoty	120 % vstupní hodnoty	140 % vstupní hodnoty
Drsnost dle Manninga – n	$s/m^{1/3}$	0.022	0.029	0.036	0.043	0.05
Kritické tečné napětí – τ_c	N/m^2	3.41	4.544	5.68	6.82	7.95
Koeficient eroze – k_d	m^3/Ns	10.61	14.14	17.68	21.22	24.75
Pórovitost – p		0.147	0.196	0.245	0.294	0.343
Průměrné zrna – d_{50}	m	0.0039	0.0052	0.0065	0.0078	0.0091
Vnitřní úhel tření zeminy – ϕ	°	27.36	36.48	45.6	54.72	63.84

4 VÝSLEDKY

Pro vybraný SW AREBA popsáný v kapitole 2, byly provedeny simulace zvoleného experimentu v rozsahu všech hodnot popsáných v kapitole 4 pomocí jednocestné citlivostní analýzy. Z výsledků jednocestné analýzy je patrné, že změny parametrů pórovitosti p , průměrného zrna zeminy d_{50} , vnitřního úhlu tření zeminy ϕ a kritického tečného napětí τ_c mají minimální vliv na sledovaný maximální průlomový průtok, velikost průlomového otvoru ani na čas porušení (obr.3).

Obr. 3 Graf výsledků citlivostní analýzy parametrů nejvíce ovlivňujících sledované výsledné veličiny. Vliv na velikost průlomového otvoru (vpravo) a vliv na velikost průlomového průtoku (vlevo).

Z výsledků jednocestné citlivostní analýzy vyplývá, že SW AREBA je citlivý při volbě koeficientu erodibility k_d vstupující do výpočtu eroze zeminy a drsnostního součinitele dle Manninga n vstupujícího do výpočtu tečného napětí τ . Významné parametry ovlivňující sledované výsledné veličiny a jejich procentuální odchylky od vstupního výsledku jsou uvedeny v Tab. 3, Tab. 4 a na Obr. 4.

Tab. 3 Významný parametr ovlivňující sledované výsledné veličiny a jejich procentuální odchylky od vstupního výsledku – drsnostní součinitel dle Manninga n .

Parametr	Vstupní hodnoty	60 % vstupní hodnoty	80 % vstupní hodnoty	120 % vstupní hodnoty	140 % vstupní hodnoty
Q [m³/s]	168.64	143.36	155.02	173.22	167.23
Q_v/Q	100 %	85 %	92 %	102.75 %	99.16 %
T_p [s]	2007	2108	2044	1951	1920
T_{pv}/T_p	100 %	105.03 %	101.84 %	97.21 %	95.67 %
B [m]	6.91	4.11	5.36	8.74	10.66
B_v/B	100 %	59.48 %	77.57 %	126.47 %	154.27 %

Tab. 4 Významný parametr ovlivňující sledované výsledné veličiny a jejich procentuální odchylky od vstupního výsledku – koeficient erodibility k_d .

Parametr	Vstupní hodnoty	60 % vstupní hodnoty	80 % vstupní hodnoty	120 % vstupní hodnoty	140 % vstupní hodnoty
Q [m³/s]	168.64	152.00	158.87	170.21	172.14
Q_v/Q	100 %	90.13 %	94.21 %	100.93 %	101.95 %

T_p [s]	2007	2061	2049	1967	1956
T_{pv}/T_p	100 %	102.69 %	102.09 %	98.01 %	97.46 %
B [m]	6.91	4.96	5.82	7.52	8.37
B_v/B	100 %	71.78 %	84.23 %	108.83 %	121.13 %

Obr. 4 Graf výsledků citlivostní analýzy parametrů nejvíce ovlivňujících sledované výsledné veličiny. Vliv na velikost průlomového otvoru (vlevo) a vliv na velikost průlomového průtoku (vpravo).

V případě vlivu drsnostního součinitele dle Manninga n na vývoj šířky průlomového otvoru lze konstatovat, že vliv má konstantní pozitivní lineární gradient. Při nižších hodnotách drsnostního součinitele dochází k marginálnímu poklesu výsledné velikosti průlomového otvoru. V případě snížení drsnostního součinitele o 20 či 40 % dojde ke snížení velikosti průlomového úměrně, a to o cca 20 % a 40 %.

Vliv na velikost průlomového průtoku mají hlavně nižší hodnoty drsnostního součinitele v intervalu od cca 0.016 - 0.035. Při vyšších hodnotách drsnostního součinitele není vliv na průtok marginální a dochází dokonce ke snižování průlomového průtoku ± 3 %. Vliv součinitele drsnosti při vyšších hodnotách se projevuje pouze ve velikosti průlomového otvoru.

Koeficient erodibility má v případě vyhodnocení vlivu na velikost průlomového otvoru lineární pozitivní gradient, avšak s nižším sklonem než v případě drsnostního součinitele. Lze tedy konstatovat že vliv na velikost průlomového otvoru není tak marginální jako v případě drsnostního součinitele, a to o cca 10 %.

Vliv na velikost průlomového průtoku mají hlavně nižší hodnoty koeficientu erodibility, kde je nárůst průtoku lineárně strmější než v případě vyšších hodnot koeficientu erodibility. Při vyšších hodnotách koeficientu erodibility je změna průtoku ± 6 %.

5 DISKUZE A ZÁVĚR

Tento příspěvek měl za cíl popsat SW AREBA a provést jednocestnou citlivostní analýzu. Z analytické analýzy SW AREBA bylo zjištěno, že se s drsnostním součinitelem dle Manninga a s koeficientem erodibility uvažuje konstantním po celou délku simulace. Řešením by bylo v případě drsnostního součinitele dle Manninga n zapracování do SW výpočet drsnostního součinitele v čase v závislosti na hloubce či hydraulickém poloměru podle např. Mattase [5] apod. Pro případ výpočtu vnitřní eroze se doporučuje nižší koeficient erodibility a po kolapsu nadloží průsakové trubice pro případ přelití koeficient úměrně zvýšit, jelikož eroze je rychlejší než v případě vnitřní eroze. Tohoto předpokladu lze také dosáhnout úměrným zvýšením či snížením drsnostního součinitele, při konstantní hodnotě koeficientu erodibility.

Z citlivostní analýzy vyplývá, že v případě změny parametrů zeminy pórovitosti p , průměrného zrna zeminy d_{50} , vnitřního úhlu tření zeminy ϕ a kritického tečného napětí nemají prakticky vliv na sledované výstupní hodnoty (Obr. 3) a lze je tedy do programu zadat deterministicky, metodou podobnosti vlastností zemín např. z [2], kde je uvedena celosvětová databáze vzorků zemín a jejich naměřené vlastnosti. V mnoha případech je zde uvedena i míra eroze zeminy, pro kterou lze následně odvodit interval hodnot koeficientu erodibility. Parametr erodibility a koeficientu drsnostního součinitele dle Manninga se doporučuje do SW AREBA zadat v intervalu hodnot a provést mnohonásobné simulace pomocí metody Monte-Carlo.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu juniorského specifického výzkumu FAST-J-21-7486 – Citlivostní analýza parametrů vstupující do modelů porušení sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze a v rámci disertační práce.

Použité zdroje

- [1] BOOR, B.; KUNŠTÁTSKÝ, J.; PATOČKA, C. (1968): *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 520 s.
- [2] BRIAUD, J., L.; SHAFII, I.; CHEN, H., CH.; MEDINA-CETINA, Z. (2019): *Relationship Between Erodibility and Properties of Soils*. NCHRP Research report 915. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2019. Washington, DC: The National Academies Press, 339 str.
- [3] GOFF, C. (2014): *Small reservoirs simplified risk assessment methodology*. Research modelling report, project FD2658, MCR5053-RT002-R03-00, 35 s.
- [4] HANSON, G., J.; SIMON, A. (2001): *Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA*. Hydrological Processes, 2001, 15, s. 23–38.
- [5] MATTAS, D.; PETRŮJOVÁ, T.; MAREŠ, K. (1998): *Pohyb sedimentů v podélném profilu toku*. Závěrečná zpráva DÚ02 projektu VaV/510/2/96. VÚV T.G.M. Praha
- [6] MOHAMED, M., A., A. (2002): *Embankment breach formation and modelling methods*. Ph.D. Thesis, The Open University, England.
- [7] SINGH, V., P. (1996): *Dam Breach Modeling Technology*. Louisiana State University, Kluwer Academic Publishers, Baton Rouge, USA, Dodrecht, 242 s.
- [8] VAN DAMME, M.; MORRIS, M., W.; HASSAN, M., A., A., M. (2012): *A new approach to rapid assessment of breach driven embankment failures*. FRMRC Research Report, WP4.4, 2012.
- [9] VASKINN, K., A.; LOVOLL, A.; MORRIS, M.; HASSAN M., A., A., M. *Physical modelling of Breach formation: Large scale field test*. IMPACT project, (www.floodsite.net), 2004.