



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

HODNOCENÍ MOŽNOSTI VZNIKU VNĚJŠÍ  
SUFOZE/ZTEKUCENÍ A ŘEŠENÍ METODOU  
DÍLČÍCH SOUČINITELŮ

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF THE EXTRACTION OF THE EXTERNAL  
SUFFOSION / HEAVE AND SOLUTIONS BY THE LIMIT STATE CONDITIONS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE – ZKRÁCENÁ VERZE

DOCTORAL THESIS – SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Mario Hala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

BRNO 2020

## KLÍČOVÁ SLOVA

Filtrační deformace, ztekucení, metoda mezních stavů, kritický hydraulický gradient

## KEYWORDS

Filtration deformation, boiling, limit states method, critical hydraulic gradient

## MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU DISERTAČNÍ PRÁCE

Knihovnické informační centrum  
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Veveří 95  
602 00 Brno

Telefon: 541 147 171, 541 147 175

E-mail: [library@fce.vutbr.cz](mailto:library@fce.vutbr.cz)

© Mario Hala, 2020

ISBN: 80-214-

ISSN: 1213-4198

# OBSAH

<b>1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>5</b>
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....	5
1.2 CÍLE PRÁCE.....	6
<b>2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>6</b>
2.1 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY .....	6
2.2 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY BEZPEČNOSTI A SPOLEHLIVOSTI KONSTRUKCÍ .....	7
2.3 SHRNUTÍ.....	8
<b>3. METODA ŘEŠENÍ</b> .....	<b>9</b>
3.1 PODMÍNKY VZNIKU ZTEKUCENÍ .....	9
3.2 ROZBOR PŮSOBÍCÍCH SIL .....	9
3.3 SESTAVENÍ PODMÍNKY SPOLEHLIVOSTI .....	10
3.4 STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ZEMIN.....	10
3.5 POPIS ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ KRITICKÉHO HYDRAULICKÉHO GRADIENTU .....	11
3.6 LABORATORNÍ POKUSY .....	13
3.7 PRŮBĚH PORUŠENÍ A JEHO IDENTIFIKACE .....	13
3.8 STANOVENÍ RELATIVNÍ CHYBY MĚŘENÍ.....	14
3.9 ROZBOR A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	15
3.10 STANOVENÍ DÍLČÍCH SOUČINITELŮ $\gamma_{M,J}$ .....	15
3.11 STANOVENÍ DÍLČÍHO SOUČiniteLE A DOPORUČENÍ.....	20
<b>4. ZÁVĚR</b> .....	<b>23</b>
4.1 SHRNUTÍ.....	23
4.2 DOPORUČENÍ.....	24
<b>5. PODKLADY</b> .....	<b>24</b>
5.1 LITERATURA .....	24
5.2 PUBLIKACE AUTORA .....	25
5.3 TECHNICKÉ NORMY .....	26



# 1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE

## 1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

U zemních konstrukcí a/nebo podloží vodních staveb může vlivem účinků prosakování vody dojít ke vzniku filtrační deformace. Filtrační deformací se rozumí změna struktury a vlastností zeminy v prostoru a v čase způsobená prosakující vodou. Jde zejména o změny granulometrického složení zeminy, pórovitosti, propustnosti, objemové tíhy, případně celistvosti a neporušenosti. Tyto procesy a jejich iniciace jsou ovlivněny vlastnostmi zeminy, průsakovým režimem a napjatostí v zemině. Procesy vedoucí k vnitřní nestabilitě zemin, zahrnují rozsáhlou a rozmanitou oblast problémů, které mohou přejít z lokálního projevu až ke globálnímu, tedy k celkové nestabilitě vodního díla, která může mít za následek velké škody na majetku i na lidských životech. Filtrační deformace se rozděluje na lokální jevy (vnitřní sufoze, kontaktní sufoze, vnější sufoze/ztekucení) a globální jevy (zpětná eroze, vznik a vývoj privilegované průsakové cesty - piping).

Filtrační deformace byly příčinou 46% poruch přehradních hrází, 48 % poruch vzniklo při přelítí hráze a 6 % vlivem nestability svahů [Bulletin 164, 2016]. Z toho důvodu je důležité provést při návrhu vodního díla posouzení zemin hrází a jejich podloží na vznik vnitřní nestability, která může mít při nepříznivém vývoji za následek celkové porušení díla.

Jedním z možných jevů, které mohou nastat u vodních konstrukcí vlivem filtrační deformace je vnější sufoze / ztekucení. K vnější sufozi / ztekucení může dojít na vzdušné straně díla (u zemních sypaných hrází na svahu, v patě a v podhrázi, u ochranných hrází v zahrázi) v případě vzestupného vnějšího průsaku, kde částičky zeminy postupně podléhají vzestupným průsakovým silám. Tento jev začíná postupným ztekucením částí zeminy doprovázené ztrátou pevnosti ve smyku, následným nadzvednutím, vyplavením zeminy (zpětná eroze) a možným následným zhroucením celé konstrukce. Problematiku ztekucení řešila řada autorů, kteří publikovali své vztahy založené na výsledcích laboratorních experimentů a také na rovnováze sil.

Možnosti vzniku ztekucení, lze posoudit pomocí stupně bezpečnosti nebo metodou dílčích součinitelů. Metoda podle stupně bezpečnosti porovnává stabilizující a destabilizující síly, kde výsledkem je hodnota stupně bezpečnosti  $SF$ , která vyjadřuje rezervu vůči dosažení mezního stavu (stavu mezní rovnováhy). Jednotlivé stupně bezpečnosti jsou vázány na vybrané zatěžovací stavy. Nevýhodou této metody je nemožnost vyjádření nejistot jednotlivých vstupních parametrů. Metodou dílčích součinitelů se přiřazují jednotlivým faktorům tzv. dílčí součinitele spolehlivosti, které zohledňují nejistoty (pevnostní charakteristiky, zatížení apod.). Tímto postupem lze zohlednit i nedostatečné podklady.

Mezní stav pro vnější sufozi / ztekucení je posuzován jako mezní stav únosnosti se značením HYD. Toto označení je popsáno jako porušení vlivem nadzdvihování dna, vnitřní eroze a sufoze v základové půdě způsobená hydraulickými gradienty [ČSN EN 1997-1]. Pro vyjádření podmínky mezního stavu jsou zapotřebí dílčí součinitele významu, nejistoty při stanovení hydraulického gradientu, který působí v konstrukci a součinitel stanovující nejistotu při stanovení kritického hydraulického gradientu.

Hodnoty dílčího součinitele nejistoty při stanovení hydraulického gradientu a při stanovení kritického hydraulického gradientu nejsou v dostupné literatuře blíže specifikované. Tato disertační

práce se zaměřuje na hodnocení porušení ztekucením (heave) pro nesoudržné stejnozrné materiály s číslem nestejnozrnnosti  $C_U < 5$ .

## 1.2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je stanovení vybraných dílčích součinitelů pro porušení v důsledku ztekucení s předem stanovenou pravděpodobností výskytu. Tyto dílčí součinitele budou stanoveny na základě rozsáhlých laboratorních měření ve vertikálních propustoměrech na různých typech specifikovaných zemin. Původní cíle disertační práce se zaměřovaly i na porušení vlivem vnější sufoze. Toto zaměření disertační práce bylo velice rozsáhlé a bylo by zapotřebí provést neúměrně velké množství laboratorních pokusů. Z tohoto důvodu bylo téma konkretizováno na: Hodnocení možnosti vzniku ztekucení a řešení metodou dílčích součinitelů.

## 2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

### 2.1 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY

V souvislosti s návrhem hydrotechnických staveb se od začátku 20. století řada autorů začala zabývat problematikou filtračních deformací. Porušení vlivem filtračních deformací se u nás začalo více vnímat po katastrofě, která se stala 18. září 1916 na Bílé Desné, kde v důsledku protržení hráze zahynulo 67 lidí. V té době se jednalo o největší katastrofu spojenou s přehradním stavitelstvím v Evropě. Filtrační deformace lze rozdělit dle typu porušení (lokální, globální), typu zeminy (soudržné, nesoudržné, stejnozrné, nestejnozrné) ale také místem, kde k nim dochází (vnitřní, vnější, kontaktní).

Vnější sufoze / ztekucení může nastat na vzdušném svahu nebo v podhrází, kde dochází k volnému vyplavování zeminy. Tyto dva jevy se od sebe liší způsobem porušení. U vnější sufoze dochází k postupnému vyplavování jemnozrné frakce, u ztekucení se dostává celá zemina do vzhledu. Geometrickou podmínku nelze v tomto případě stanovit. První, kdo se zabýval touto problematikou, byl Pavlovskij (1922), který definoval hydraulickou podmínku (kap. 5.2). Následoval Knorre (1925), Zamarin (1931) a Terzaghi (1943), který odvodil hydraulickou podmínku na základě rovnováhy sil působících na homogenní izotropní stejnozrný materiál. Zamarin (1931) a Terzaghi (1943) zohlednili v podmínce i vliv pórovitosti. Následovali Gershevanov (1948) a Goldstein (1953). Istomina (1957) prováděla pokusy na více jak 20 přírodních materiálech a stanovila okrajovou podmínku v závislosti na čísle nestejnozrnnosti. Mezi dalšími autory, kteří se věnovali problematice vnější sufoze/ztekucení patří například Sellmeijer (2006) a Alhasan a kol. (2015).

Jacobson (2013) se snažil stanovit empirický vztah pro stanovení kritického hydraulického gradientu  $J_K$ , který je kvantifikován dle půdních charakteristik (objemová hmotnost zrna zeminy, úhel vnitřního tření, velikost částic, čísla nestejnozrnnosti a pórovitost. Pro stanovení empirického vztahu použil měření Fleshmana a Rice (2013), kteří pro pokusy použili stejnozrný materiál ( $C_U < 2$ ) s různými fyzikálními vlastnostmi. Ve svých měřeních (Fleshmana a Rice, 2013) definovali celkově 4 fáze porušení (první viditelný pohyb, postupné protahování vzorku, lokální ztekucení, globální ztekucení).

## 2.2 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY BEZPEČNOSTI A SPOLEHLIVOSTI KONSTRUKCÍ

### 2.2.1 SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ

Spolehlivost je schopnost objektu, konstrukce nebo nosného prvku plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek (Říha, Špano a kol., 2016). Kvantifikátorem spolehlivosti v těchto ukazatelích je pravděpodobnost bezporuchového stavu. Při návrhu díla se do výpočtů zahrnují nejistoty a možné odchylky od jednotlivých zatěžovacích stavů. Tyto nejistoty lze zohlednit pomocí norem, které uvádí dva způsoby vyhodnocení (stupeň bezpečnosti, metoda dílčích součinitelů).

Hodnocením bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí se zabývá řada norem (ČSN EN 1990, 1991, 1997). Užití konkrétních norem pro posouzení stability konstrukcí je dána typem vodního díla. Pro zemní konstrukce platí obecně ČSN EN 1997, při řešení stability sypaných přehradních hrází se používá přístupů podle ČSN 75 2310.

### 2.2.2 HODNOCENÍ BEZPEČNOST KONSTRUKCÍ

Bezpečnost je vlastnost systému (např. objektu) neohrožovat lidské zdraví nebo životní prostředí při plnění předepsané funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek (Říha, Špano a kol., 2016). Bezpečnost a spolehlivost vodních děl je posuzována metodou podle stupně bezpečnosti nebo metodou dílčích součinitelů).

#### Metoda stupně bezpečnosti (SF)

V metodě stupně bezpečnosti se uvažuje se souhrnnou kompenzací nejistot, které vstupují do výpočtů. Tato metoda nezohledňuje nejistoty v materiálových vlastnostech a není možná diferenciací nejistot jednotlivých vstupních parametrů na straně zatížení a odolnosti. Stupeň bezpečnosti je vyjádřen vztahem:

$$SF \leq \frac{R_k}{E_k} \quad (2.1)$$

kde  $R_k$  je charakteristická hodnota odolnosti a  $E_k$  je charakteristická hodnota účinku zatížení. Stupeň bezpečnosti vyjadřuje odolnost vůči stavu mezní rovnováhy. Pokud hodnota stupně bezpečnosti dosahuje hodnot  $SF > 1$ , lze uvažovat, že konstrukce je spolehlivá. Normy stanovují pro konstrukci o zatěžovacích stavech příslušnou hodnotu stupně bezpečnosti  $SF$  vyjadřující nejistoty ve vstupních veličinách včetně rezerv.

#### Metoda dílčích součinitelů

Metoda dílčích součinitelů byla implementována do Eurokódu [ČSN EN 1997-1] a zohledňuje nejistoty vstupních veličin s využitím tzv. dílčích součinitelů spolehlivosti (důležitost díla, pevnostní charakteristiky, zatížení, apod.), které charakteristické hodnoty převedou na hodnoty návrhové. Vstupy obsahují reprezentativní hodnoty zatížení a charakteristické hodnoty vlastností materiálů a geometrických údajů, které lze získat za pomoci norem, laboratorními zkouškami, měřením in-situ, apod. Pokud je návrhová odolnost konstrukce větší nebo rovna návrhovému zatížení, lze prohlásit, že pravděpodobnost ztráty stability konstrukce je společensky únosná.

Obecná podmínka spolehlivosti má tvar [Eurokód 0]:

$$E_d \leq R_d \quad (2.2)$$

kde  $E_d$  je návrhová hodnota účinků zatížení a  $R_d$  je návrhová hodnota účinků odolnosti. Podmínka po zavedení součinitelů vypadá následovně:

$$\gamma_1 \gamma_{dstb} E_k \leq \gamma_{stb} R_k \quad (2.3)$$

kde  $\gamma_1$  je součinitel významu díla dle tab. 2.1,  $\gamma_{dstb}$  je dílčí součinitel pro destabilizující síly a  $\gamma_{stb}$  je dílčí součinitel pro stabilizující síly. Dílčí součinitele jsou stanoveny pro konkrétní typy konstrukcí ve specializovaných národních a oborových normách (např. ČSN EN 1997-1).

**Tab. 2.1 Dílčí součinitele významu díla [ČSN EN 1997-1]**

Kategorie VD	I	II	III	IV
$\gamma_1$	1,25	1,20	1,10	1,00

Součinitel významu vodního díla vyjadřuje kritéria třídy následků a třídy spolehlivosti. Pro určená vodní díla se doporučuje užití kategorie vodního díla, které vyjadřuje třídy následků.

## 2.3 SHRnutí

Porušení konstrukce vlivem filtrační nestability je rozsáhlé téma, které se v posledním století aktivně řeší. Jednotlivé typy porušení jsou vyjádřeny různými kritérii (geometrickými, hydraulickými) a jsou určeny pro různé typy materiálů. V případě porušení vlivem ztekucení jsou kritéria stanovena různými vztahy (Terzaghi, Istomina, Knorre,...), kdy nejsou podrobněji uvedeny podmínky použitelnosti (homogenita, izotropie,...).

Současným trendem v posuzování vodních děl je hodnocení konstrukce pomocí metody dílčích součinitelů. Při posuzování nejsou v normách v řadě případů podrobněji stanovené hodnoty dílčích součinitelů, které lze použít. Dílčí součinitele pro ověření mezního stavu způsobeného hydraulickým zdvihem HYD jsou uvedeny v tab. 2.2.

**Tab. 2.2 Dílčí součinitele pro ověření mezního stavu způsobeného hydraulickým zdvihem HYD [ČSN EN 1997-1]**

Zatížení			
Stálé	destabilizující	$\gamma_{G,dst}$	1,35
	stabilizující	$\gamma_{G,stb}$	0,90
Proměnné	destabilizující	$\gamma_{Q,dst}$	1,50

V ČSN EN 1997-1 není řečeno, jak stanovit charakteristickou hodnotu  $J_{K,K}$  a součinitel  $\gamma_{G,stb}$  ve vazbě na zvolené pravděpodobnosti. Z tab. 2.2 je patrné, že dílčí součinitel pro stabilizující zatížení  $\gamma_{stb}$  je udáván jednou hodnotou a nereaguje na fyzikální vlastnosti materiálu.

**Tato práce se zaměřuje na stanovení hydraulického kritéria a dílčího součinitele pasivní složky pro porušení vlivem ztekucení. Hydraulické kritérium a odpovídající dílčí součinitel jsou stanoveny na základě laboratorních pokusů, které byly provedeny na vybraných stejnozrnných materiálech.**



### 3. METODA ŘEŠENÍ

V této kapitole je uvedena souhrnně metoda řešení, která se skládá z následujících kroků:

- podmínky vzniku ztekucení,
- rozbor působících sil,
- sestavení podmínky spolehlivosti (mezí rovnováhy) ve smyslu dílčích součinitelů,
- stanovení fyzikálních vlastností zemin,
- popis zařízení pro sledování kritického hydraulického gradientu,
- průběh porušení a jeho identifikace,
- stanovení relativní chyby měření,
- laboratorní pokusy,
- vyhodnocení výsledků,
- stanovení dílčího součinitele  $\gamma_{M,J}$ ,

Posouzení filtrační stability zemin je v normě ČSN EN 1997-1 zahrnuto v rámci mezního stavu HYD, kde je uvažováno porušení nadzdvihováním dna, vnitřní erozí a sufozí v základové půdě v důsledku proudění podzemní vody. Problematika filtrační stability zemin je nicméně v Eurokódu [ČSN EN 1997-1] uvedena okrajově bez podrobnějšího uvedení tvaru jednotlivých podmínek mezního stavu pro jednotlivé konkrétní projevy nestability zemin.

#### 3.1 PODMÍNKY VZNIKU ZTEKUCENÍ

Geometrické kritérium nelze v případě ztekucení využít, uplatní se pouze hydraulické kritérium. Hydraulické kritérium v průběhu 20. století stanovilo několik autorů na základě laboratorních pokusů nebo pomocí fyzikálního odvození:

- Pavlovskij,
- Knorre,
- Zamarin,
- Terzaghi (3.1),
- Goldstein,
- Gershevanov,
- Istomina.

U hydraulického kritéria se posuzuje, zda je kritický hydraulický gradient  $J_K$  menší jak hodnota hydraulického gradientu v zemině  $J_d$ . Nejčastěji uváděnou rovnicí hydraulického kritéria stanovil Terzaghi (1943).

$$J_K = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)(1 - n)}{\gamma_w} \quad (3.1)$$

#### 3.2 ROZBOR PŮSOBÍCÍCH SIL

V zemině v zahrázi působí stabilizační a destabilizační síly. Stabilizační silou je tíha materiálu, která je dána objemovou hmotností zrna  $\rho_s$  hmotností vody v pórech. Destabilizující účinek vyvozuje gradient tlaku v zemině, jíž prosakuje voda. Výsledkem rozboru působících sil je rovnice (3.1), kterou odvodil Terzaghi.

### 3.3 SESTAVENÍ PODMÍNKY SPOLEHLIVOSTI

Bezpečnost vůči porušení vlivem ztekucení lze vyjádřit stupněm bezpečnosti  $SF$ , nebo užívanější metodou dílčích součinitelů. Metodou dílčích součinitelů se porovnávají návrhové hodnoty sil, které se vyjádří prostřednictvím charakteristických hodnot a dílčích součinitelů.

$$F_{stb,k}\gamma_{M,G} \geq F_{dstb,k}\gamma_G\gamma_1, \quad (3.2)$$

kde  $F_{stb,k}$  je charakteristická hodnota celkové stabilizační síly hmotnosti zeminy,  $F_{dstb,k}$  je charakteristická hodnota (destabilizační) síly vyvolané gradientem tlaku vody,  $\gamma_{M,G}$  je koeficient spolehlivosti při stanovení  $F_{stb,k}$ ,  $\gamma_{M,W}$  je koeficient spolehlivosti při stanovení  $F_{dstb,k}$  a  $\gamma_1$  je součinitel významu. Charakteristické hodnoty sil se vyjádří dosazením do rovnic (3.3) a (3.4):

$$F_{stb,k} = A\rho_s g(1-n)l + A\rho_w gnl, \quad (3.3)$$

$$F_{dstb,k} = -A\rho_w gl - A\rho_w gJl, \quad (3.4)$$

Dosazením rovnic (7.4) a (7.5) do rovnice (7.3) je vyjádřena podmínka mezní rovnováhy:

$$\frac{(\rho_s - \rho_w)(1-n)}{\rho_w}\gamma_{M,J} \geq J\gamma_J\gamma_1 \quad (3.5)$$

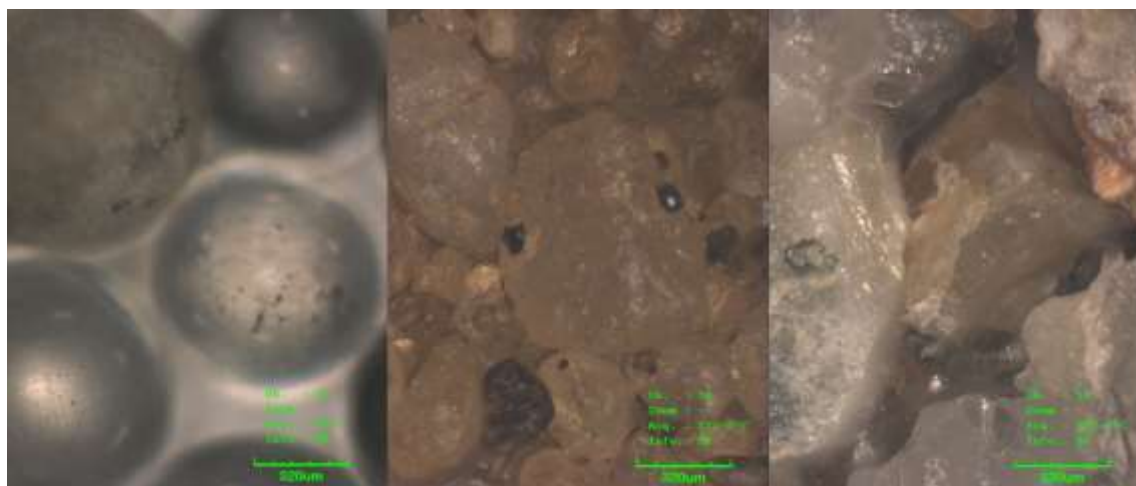
Pro některé případy nejsou v normách hodnoty dílčí součinitelů přesně stanoveny, viz ztekucení [ČSN EN 1997-1].

### 3.4 STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ZEMIN

Pro každý zkoumaný materiál, se v laboratoři stanovily tyto základní fyzikální vlastnosti:

- tvar zrna,
- měrná hmotnost zrna,
- křivka zrnitosti.

Tvar zrna (obr. 3.1) byl stanoven pomocí konfokálního mikroskopu ve spolupráci s Ústavem fyziky na Vysokém učení technickém na Stavební fakultě.



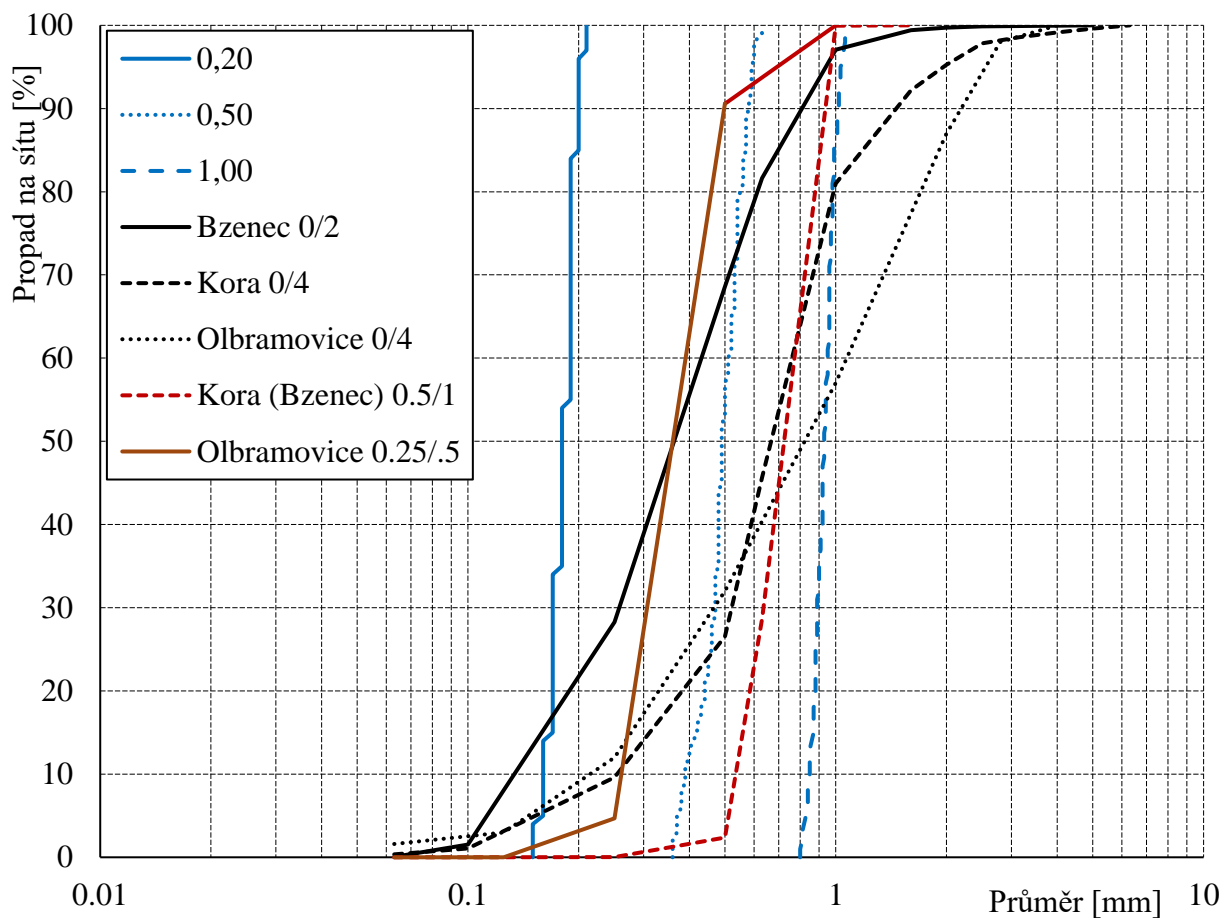
Obr. 3.1 Konfokální mikroskop: a) Kulová zrna; b) Zaoblená zrna; c) Ostrohranná zrna

Pro stanovení měrné hmotnosti zrna pomocí normy ČSN 72 1007 byla použita laboratoř s pyknometry ve spolupráci s Ústavem vodního hospodářství krajiny na FAST VUT. Průměrné měrné hmotnosti zrn jsou zapsány v tab. 3.1.

**Tab. 3.1 Průměrné měrné hmotnosti materiálů**

Materiál		0.80 - 1.00 mm	0.40 - 0.60 mm	0.16 - 0.20 mm	Bzenec	Kora	Olbramovice
Měrná hmotnost	[kg.m <sup>-3</sup> ]	2493	2480	2484	2638	2632	2641

Křivky zrnitosti přírodních materiálů byly stanoveny pomocí sady normovaných sít dle ČSN 72 1007. Pro stanovení křivky zrnitosti skleněných kuliček byla použita elektronická šuplera. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 3.2.



**Obr. 3.2 Křivky zrnitosti**

### **3.5 POPIS ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ KRITICKÉHO HYDRAULICKÉHO GRADIENTU**

Pro laboratorní pokusy byla použita laboratoř Ústavu vodních staveb FAST VUT (obr. 3.3), ve které se měřilo na stávajícím propustoměru (modifikovaný Darcyho přístroj), který se zapojil do soustavy.

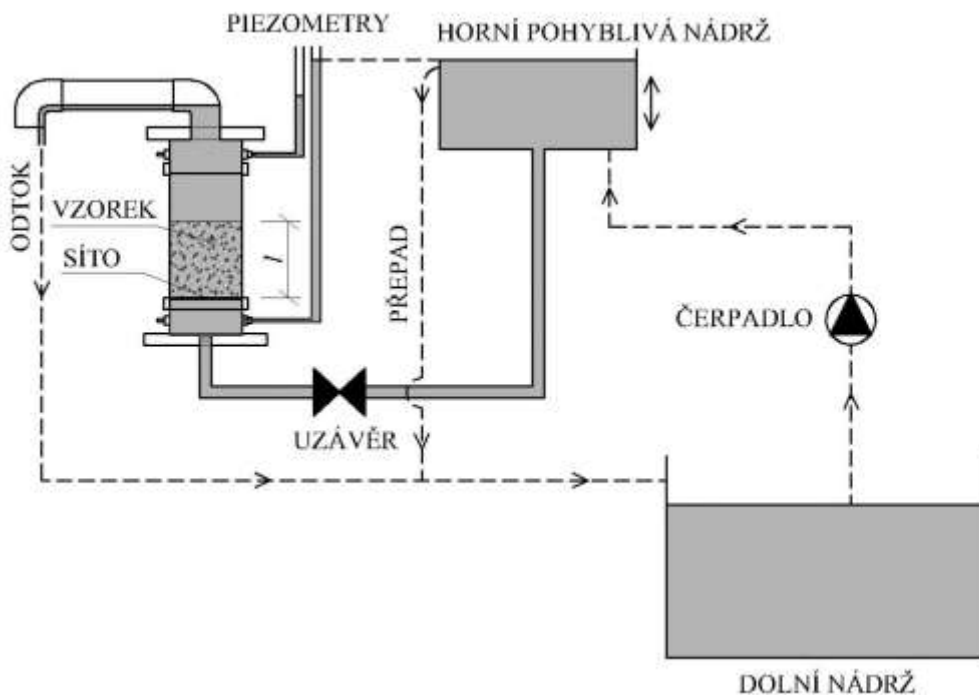


**Obr. 3.3 Laboratorní prostředí**

Před zahájením laboratorních pokusů byla stanovená:

- geometrie propustoměru,
- stanovení ztrát na geotextilii.

Laboratorní pokusy probíhaly na různých vertikálních propustoměrech a s různými sítý, z tohoto důvodu byly propustoměry přeměřeny pomocí elektronické šuplery. Síta a geotextílie byly otestovány v propustoměrech a byly stanoveny jejich hydraulické vodivosti, aby bylo zaručeno, že propustnost materiálu neovlivní výsledek laboratorního měření. Na obr. 3.4. je schéma měřícího zařízení



**Obr. 3.4 Schéma měřícího zařízení**

## 3.6 LABORATORNÍ POKUSY

Pro měření kritického hydraulického gradientu se laboratorní pokusy skládaly ze dvou částí, a to z přípravné části a ze samotného měření. V přípravné části probíhalo:

- měření teploty vody,
- sypaní a hutnění vzorku,
- zvážení připraveného vzorku
- sycení zesponu vzorku vodou a odvzdušnění piezometrů,
- stanovení pórovitosti vzorku.

Po postupném nasycení zeminy umístěné v propustoměru vodou a ustálení proudění skrz materiál, se začaly měřit tyto hodnoty:

- rozdíl tlakových výšek,
- délka vzorku,
- specifický průtok,
- vizuální kontrola vzorku.

V rámci stanovení kritického hydraulického gradientu se při měření stanovovala hodnota hydraulické vodivosti.

## 3.7 PRŮBĚH PORUŠENÍ A JEHO IDENTIFIKACE

V průběhu měření byly sledovány různé identifikátory, ty byly nakonec shrnuty a byly stanoveny fáze porušení (obr. 3.5).

### 3.7.1 VZOREK BEZ ZMĚNY

Vzorek má stálou hydraulickou vodivost  $k$ , nedochází k vyplavování jemnozrnnější frakce a vzorek se neprotahuje. Změna nastává v okamžik, kdy se zvýší hydraulická vodivost  $k$  o víc jak 10%.

### 3.7.1 PROTAHOVÁNÍ VZORKU

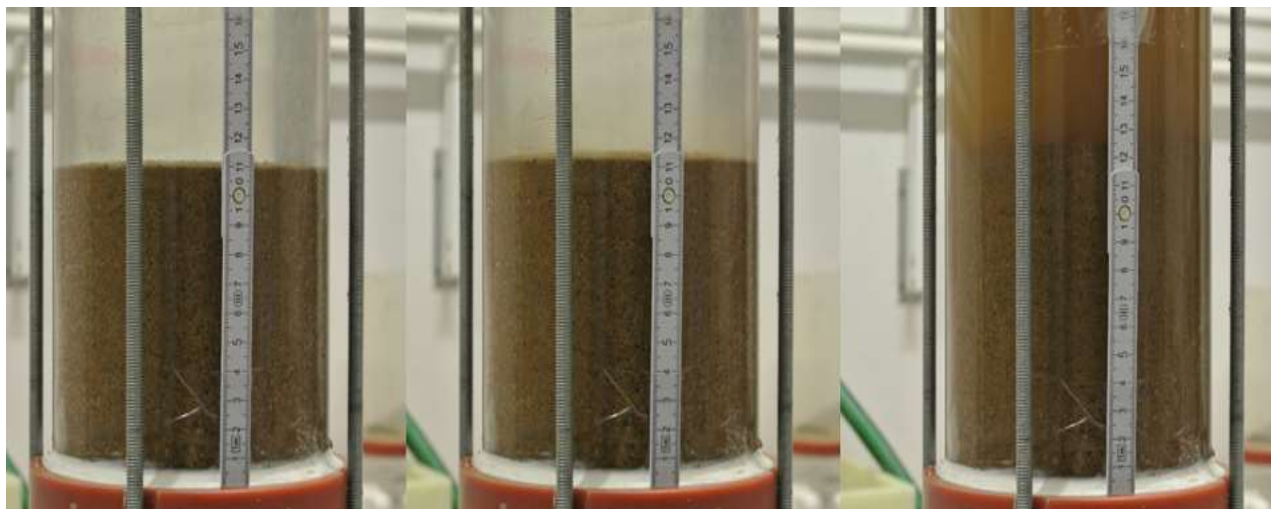
Při zvyšování hydraulického gradientu  $J$ , nad určitou mez dochází ke zvýšení průsaku na základě protažení materiálu a následného zvětšení pórů (pórovitosti), které se následně ustálí, pokud nedochází k dalšímu zvyšování hydraulického gradientu  $J$ .

### 3.7.1 LOKÁLNÍ PORUCHY

Jedná se o lokální projev nestability např. vibrace a posun zrn ve vzorku. Lokální poruchy se můžou časem stabilizovat, avšak je předpoklad, že v těchto místech při větším hydraulickém gradientu  $J$ , je větší pravděpodobnost vzniku porušení.

### 3.7.1 ZTEKUCENÍ

Dochází ke ztrátě smykové pevnosti a následně ke ztekucení zeminy, kdy při překročení kritické hodnoty gradientu tlaku, respektive kritického hydraulického gradientu  $J_K$  klesne efektivní napětí v zemině prakticky na nulu. Při ztekucení dojde k pohybu všech frakcí zeminy jako směsi s vodou a k segregaci jemnozrnnější frakce, která se vyplavuje na povrch.



Obr. 3.5 Průběh porušení (vlevo: bez porušení, uprostřed: lokální poruchy – kritický hydraulický gradient, vpravo: ztekucení)

### 3.8 STANOVENÍ RELATIVNÍ CHYBY MĚŘENÍ

Při pokusech v laboratoři bylo použito měřidel, která mají různou přesnost, ať se může jednat o výrobní přesnost (váha), nebo obecně dosažitelné přesnosti – např. vizuální odečet, stopky, které by mohly nastat v průběhu měření. Z tohoto důvodu byla stanoveny maximální relativní chyby měření pro stanovení:

- pórovitosti,
- kritického hydraulického gradientu.

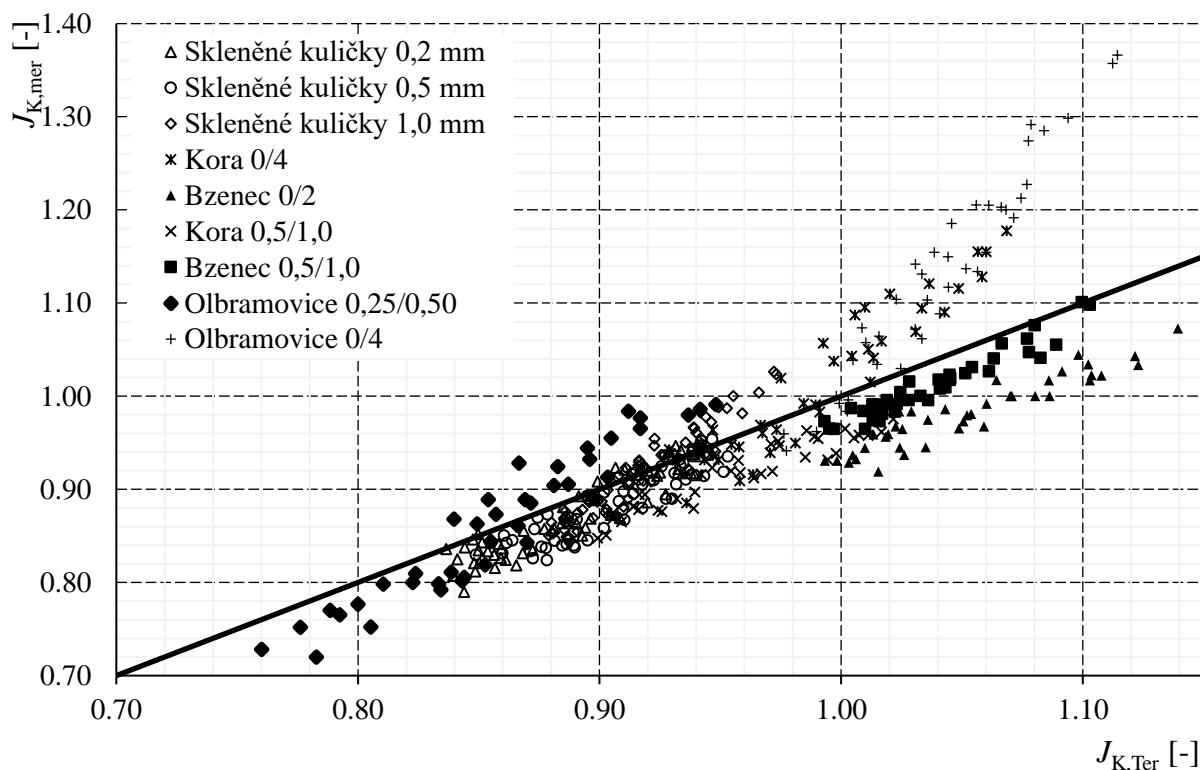
Tab. 3.2 Relativní chyby v měření

pórovitost	$n$	0.391	0.77%
pórovitost + max. odchylka	$n_{max}$	0.394	
kritický hydraulický gradient	$J_K$	0.727	0.55%
kritický hydraulický gradient + max. odchylka	$J_{K,max}$	0.731	

Relativní chyba pro stanovení pórovitosti  $n$  a kritického hydraulického gradientu  $J_K$  je menší jak 1%.

### 3.9 ROZBOR A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po dokončení všech laboratorních pokusů se porovnávaly hodnoty kritického hydraulického gradientu všech materiálů ve vztahu k hodnotám vypočteným dle rovnice Terzaghiho (3.1) a následně byl proveden rozbor vlivu fyzikálních vlastností materiálů.



**Obr. 3.6 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými dle Terzaghiho**

Materiály se zaoblenými zrny dosahují při stejném způsobu hutnění nižších pórovitostí, než materiály s ostrohranným tvarem zrn. Na zhutnitelnost materiálů má též vliv číslo nestejnozrnosti  $C_U$ . S vyšším číslem nestejnozrnosti  $C_U$  byly dosaženy nižších pórovitostí (Olbramovice 0/4 mm). Ostrohranné materiály a materiály se zrny  $d_{85} > 1$  mm nemají regresní křivky rovnoběžné s čarou shody.

### 3.10 STANOVENÍ DÍLČÍCH SOUČINITELŮ $\gamma_{M,J}$

Po ukončení laboratorních pokusů, byla pro stanovení dílčích součinitelů  $\gamma_{M,J}$  provedena statistická analýza naměřených hodnot. Průběh přípravy a samotné statistické analýzy včetně stanovení dílčích součinitelů byla rozdělena do následujících bodů:

- definice náhodné veličiny,
- definice výběrového souboru,
- statistické zpracování,
- výsledky a diskuze,

- stanovení dílčího součinitele a doporučení.

### 3.10.1 DEFINICE NÁHODNÉ VELIČINY

Náhodnou veličinou je dílčí součinitel spolehlivosti  $\gamma_{M,J}$  definovaný podílem kritického hydraulického gradientu měřeného  $J_{K,mer}$  hodnotou vypočítaného kritického hydraulického gradientu  $J_{K,Ter}$ :

$$\gamma_{M,J} = \frac{J_{K,mer}}{J_{K,Ter}} = x_i, \quad (3.6)$$

Z výsledků měření tak bylo získáno celkem 425 náhodných veličin, tedy hodnot dílčího součinitele  $\gamma_{M,J}$ . Počet náhodných veličin ve výběrových souborech se liší, dle fyzikálních vlastností materiálů. Každý výběrový soubor obsahuje minimálně 40 náhodných veličin.

### 3.10.2 DEFINICE VÝBĚROVÉHO SOUBORU

„Souhrnný“ výběrový soubor tvoří soubor 452 hodnot dílčího součinitele  $\gamma_{M,J}$  získaných z experimentů provedených na stejnozrnných materiálech s číslem nestejnozrnnosti  $C_U < 5$ , s minimálními zrny  $d_{min} > 0,063$  mm, s maximálními zrny  $d_{max} < 5$  mm a s pórovitostí  $n$  v rozmezí 0,3 až 0,53. Bylo definováno 20 „dílčích“ výběrových souborů. Prvních devět dílčích výběrových souborů tvoří jednotlivé materiály. Další 11 dílčích výběrových souborů bylo definováno na základě fyzikálních vlastností materiálů (velikost zrna, tvar zrna, zhutnění,...).

### 3.10.3 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ

Pro náhodné veličiny výběrových souborů byly stanoveny střední hodnoty  $\mu$ , rozptyly  $\sigma^2$ , počet hodnot  $N$  a empirické distribuční křivky  $P_i$  za předpokladu, že každá hodnota má stejnou pravděpodobnost výskytu. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tab. 3.3.

Pro stanovení rozdělení byl využit program Statistica, pomocí kterého byly po předběžném testování vybrány tyto tři typy rozdělení, které byly následně aplikovány na jednotlivé výběrové soubory:

- normální,
- logaritmicko-normální,
- gama.



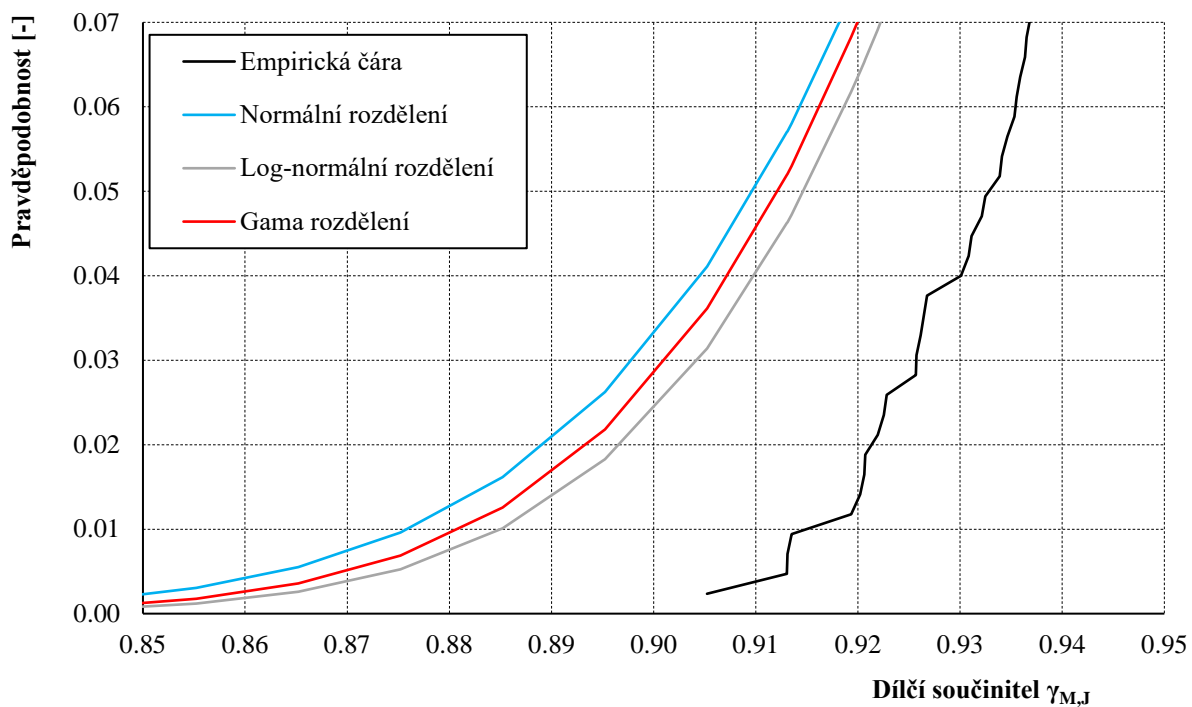
**Tab. 3.3 Základní charakteristiky výběrových souborů**

Výběrový soubor č.	Materiál	$\mu$	$\sigma^2$	Počet pokusů	Pravděpodobnost výskytu [%]
1	Skleněné kuličky 0,2 mm	0,981	0,020	56	1,79
2	Skleněné kuličky 0,5 mm	0,976	0,019	57	1,75
3	Skleněné kuličky 1,0 mm	0,999	0,025	72	1,39
4	Bzenec 0/2 mm	0,933	0,012	40	2,50
5	Kora 0/4 mm	1,022	0,044	40	2,50
6	Olbramovice 0/4 mm	0,958	0,012	40	2,50
7	Bzenec 0,1/1,0 mm	0,974	0,010	40	2,50
8	Kora 0,1/1,0 mm	1,083	0,070	40	2,50
9	Olbramovice 0,25/0,5 mm	1,003	0,042	40	2,50
10	Všechny materiály	0,992	0,002	425	0,24
11	Materiály bez písku Olbramovice 0/4 mm	0,982	0,001	385	0,26
12	Zhutněné materiály	1,006	0,003	248	0,40
13	Nezhutněné materiály	0,971	0,001	177	0,56
14	Materiály s číslem nestejnozrnnosti $C_U < 2$	0,983	0,001	305	0,33
15	Materiály s číslem nestejnozrnnosti $C_U > 2$	1,013	0,006	120	0,83
16	Materiály s $d_{50} < 0,6$ mm	0,974	0,001	193	0,52
17	Materiály s $d_{50} > 0,6$ mm	1,006	0,003	232	0,43
18	Kulová a zaoblená zrna	0,980	0,001	345	0,29
19	Materiály s regresními křivkami rovnoběžnými s čarou shody	0,966	0,001	233	0,43
20	Materiály s regresními křivkami různoběžnými s čarou shody	1,022	0,003	192	0,52

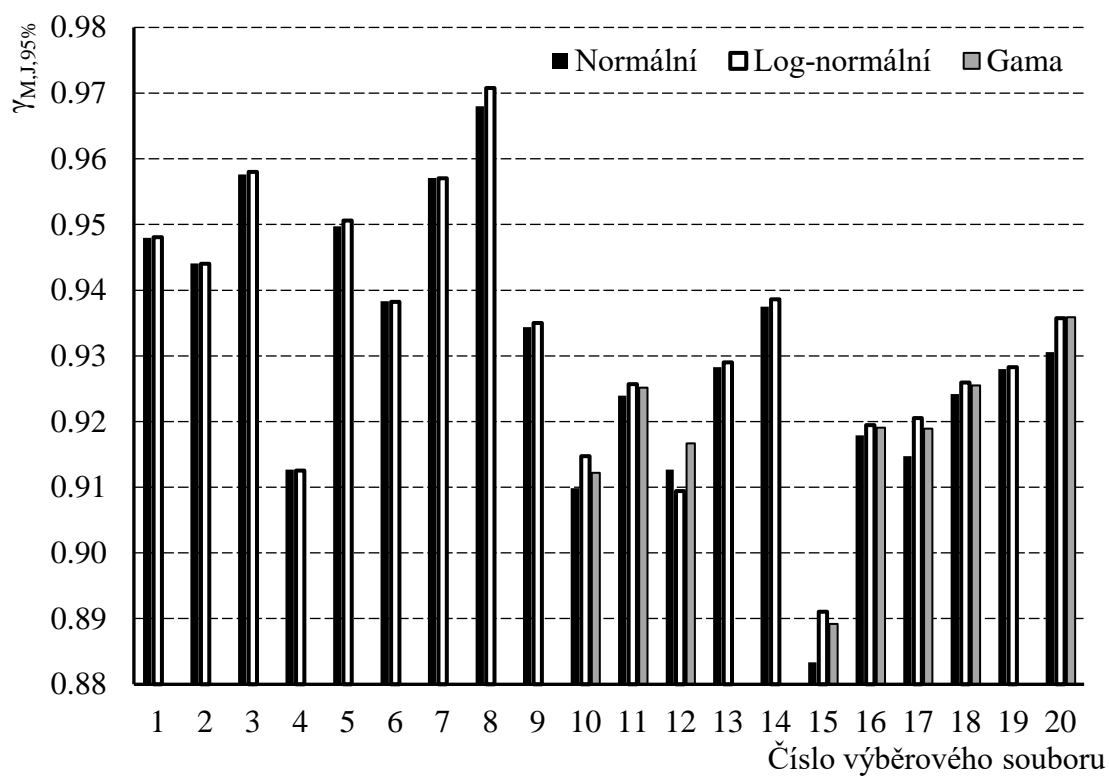
### 3.10.4 VÝSLEDKY A DISKUZE

V programu Statistica byly stanoveny rovnice distribučních funkcí pro každý výběrový soubor a pro jednotlivé typy rozdělení (normální, log-normální a gama). Tyto rovnice distribučních funkcí byly zobrazeny v grafech společně s empirickými čarami. Na obr. 3.7 je detail distribučních funkcí pro vybrané typy rozdělení včetně empirické čáry.

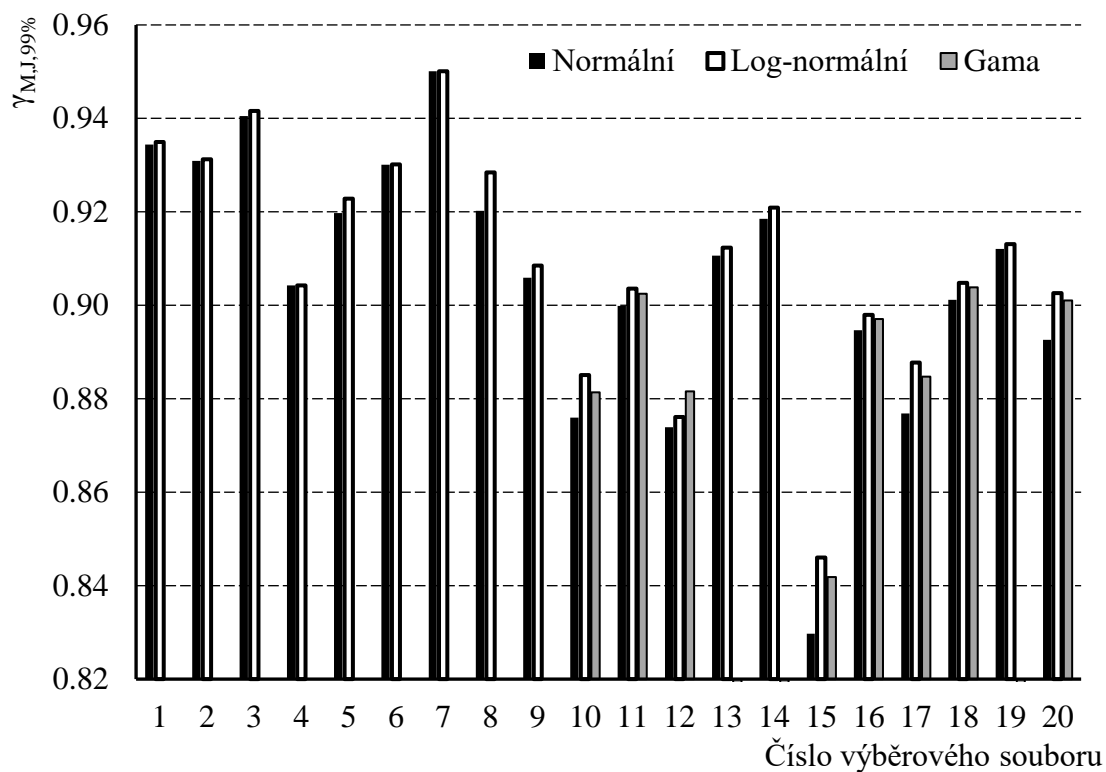
Pomocí rovnic z programu Statistica byly stanoveny dílčí součinitelé pravděpodobnosti překročení  $P = 95; 99; \text{ a } 99,9 \%$  a jsou zobrazeny v grafech na obr. 3.8 až 3.10 a souhrnně v tab. 3.4.



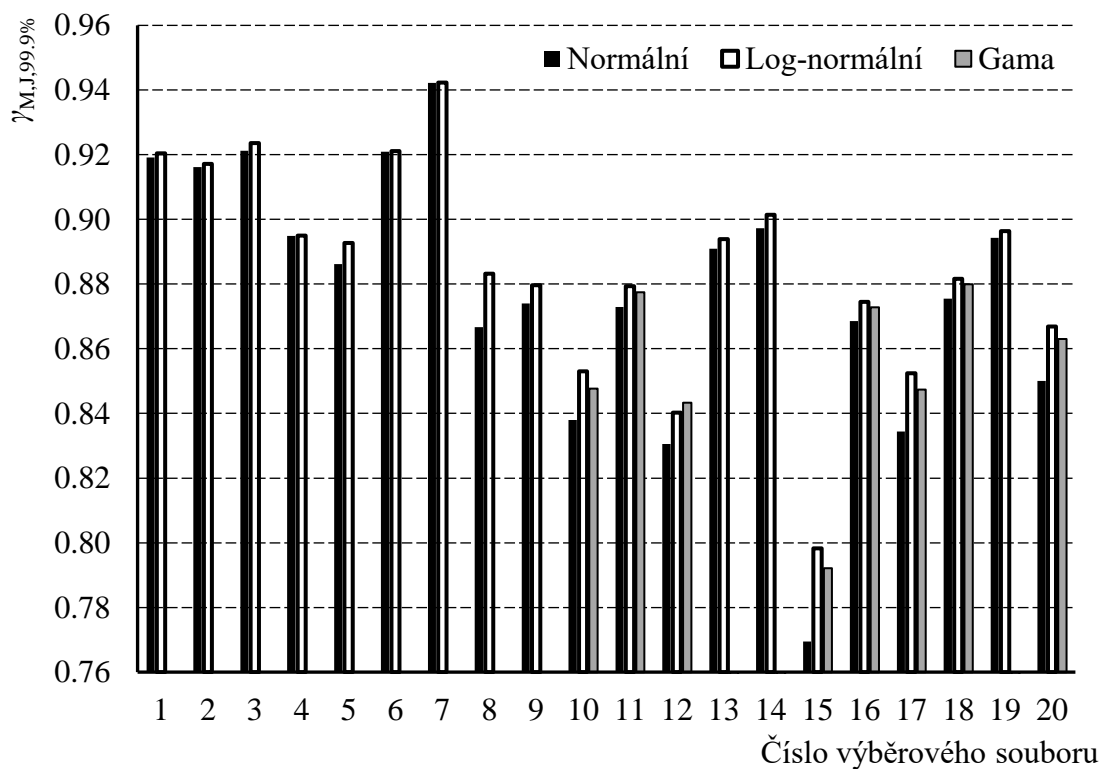
Obr. 3.7 Detail distribuční funkce



Obr. 3.8 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost překročení 95%



Obr. 3.9 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost překročení 99%



Obr. 3.10 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost překročení 99,9%

**Tab. 3.4 Hodnoty dílčích součinitelů pro jednotlivé výběrové soubory**

Číslo výb. souboru	95%			99%			99.9 %		
	Normální	Log- normální	Gama	Normální	Log- normální	Gama	Normální	Log- normální	Gama
1	0.95	0.95	-	0.93	0.93	-	0.92	0.92	-
2	0.94	0.94	-	0.93	0.93	-	0.92	0.92	-
3	0.96	0.96	-	0.94	0.94	-	0.92	0.92	-
4	0.91	0.91	-	0.90	0.90	-	0.89	0.90	-
5	0.95	0.95	-	0.92	0.92	-	0.89	0.89	-
6	0.94	0.94	-	0.93	0.93	-	0.92	0.92	-
7	0.96	0.96	-	0.95	0.95	-	0.94	0.94	-
8	0.97	0.97	-	0.92	0.93	-	0.87	0.88	-
9	0.93	0.93	-	0.91	0.91	-	0.87	0.88	-
10	0.91	0.91	0.91	0.88	0.89	0.88	0.84	0.85	0.85
11	0.92	0.93	0.93	0.90	0.90	0.90	0.87	0.88	0.88
12	0.91	0.91	0.92	0.87	0.88	0.88	0.83	0.84	0.84
13	0.93	0.93	-	0.91	0.91	-	0.89	0.89	-
14	0.94	0.94	-	0.92	0.92	-	0.90	0.90	-
15	0.88	0.89	0.89	0.83	0.85	0.84	0.77	0.80	0.79
16	0.92	0.92	0.92	0.89	0.90	0.90	0.87	0.87	0.87
17	0.91	0.92	0.92	0.88	0.89	0.88	0.83	0.85	0.85
18	0.92	0.93	0.93	0.90	0.90	0.90	0.88	0.88	0.88
19	0.93	0.93	-	0.91	0.91	-	0.89	0.90	-
20	0.93	0.94	0.94	0.89	0.90	0.90	0.85	0.87	0.86

V některých případech program Statistica nedokázal stanovit hodnoty pro Gama rozdělení. K největším rozdílům mezi jednotlivými rozděleními dochází u distribučních funkcí pro stanovení dílčího součinitele s pravděpodobností překročení 95%.

### 3.11 STANOVENÍ DÍLČÍHO SOUČINITELE A DOPORUČENÍ

V této kapitole byl vybrán výběrový soubor, dle kterého se stanovily dílčí součinitelé porušení. Pro každý výběrový soubor bylo pomocí metody nejmenších čtverců vybráno nejvhodnější rozdělení.

#### 3.11.1 METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ

Nejvhodnější rozdělení byla stanovena pomocí metody nejmenších čtverců  $A_x$ , které se vypočítají dle vztahu:

$$A_x = \sum_{i=1}^n (P_{emp,i} - P_{fce,i})^2 \quad (3.7)$$

kde  $P_{emp,i}$  je pravděpodobnost překročení stanovené dle empirické rovnice a  $P_{fce,i}$  je pravděpodobnost překročení stanovené pomocí rozdělení (normální, log-normální, gama). Výsledky jsou zobrazeny v tab. 3.5.

**Tab. 3.5 Metoda nejmenších čtverců pro výběrové soubory**

Výběrový soubor číslo	$A_x$		
	Normální	Log-normální	Gama
1	0,0730	0,0660	-
2	0,1750	0,1730	-
3	0,0650	0,0570	-
4	0,0280	0,0270	-
5	0,1090	0,0970	-
6	0,1020	0,0950	-
7	0,1160	0,1130	-
8	0,0390	0,0320	-
9	0,1440	0,1330	-
10	0,0057	0,0046	0,0043
11	0,0017	0,0013	0,0014
12	0,0038	0,0017	0,0032
13	0,0007	0,0006	-
14	0,0019	0,0017	-
15	0,0034	0,0030	0,0036
16	0,0005	0,0003	0,0004
17	0,0074	0,0064	0,0067
18	0,0014	0,0010	0,0012
19	0,0002	0,0002	-
20	0,0035	0,0028	0,0043

Pro většinu výběrových souborů se jeví jako nejvhodnější rozdělení log-normální. Výjimku tvoří výběrový soubor č. 10 a 19. Zde byly ale rozdíly v plochách minimální.

### 3.11.2 STANOVENÍ DÍLČÍCH SOUČINITELŮ

Hlavním cílem této disertační práce je stanovení dílčích součinitelů pro porušení v důsledku ztekucení s předem stanovenou pravděpodobností výskytu (95%, 99% a 99,9%). Výstup tvoří dvě skupiny materiálů, které jsou výsledkem laboratorních pokusů na vertikálním propustoměru a následném vyhodnocení.

První skupina je tvořena výběrovým souborem č. 18 (materiály s kulovými a zaoblenými zrny), u kterých bylo provedeno celkem 345 laboratorních pokusů. Tento výběrový soubor je popsán v tab. 3.6.

**Tab. 3.6 Fyzikální vlastnosti výběrového souboru**

Číslo křivosti	$C_C$	[-]	0,95 až 1,29
Číslo nestejnozrnnosti	$C_U$	[-]	1,14 až 2,99
Maximální velikost zrna	$d_{max}$	[mm]	5,0
Velikost 85 % zrna	$d_{85}$	[mm]	0,20 až 1,25
Maximální množství prachových částic	$d_{i<0.063}$	[%]	0,24
Pórovitost	$n$	[-]	0,306 až 0,450
Tvar zrna	$C$	[-]	kulový, zaoblený
Specifická objemová hmotnost zrna	$\rho_s$	[kgm <sup>-3</sup> ]	2483 až 2638

Pro stanovení pravděpodobnosti překročení  $P = 95,0; 99,0$  a  $99,9\%$  jsou hodnoty dílčích součinitelů stanoveny a sepsány v následující tabulce:

**Tab. 3.7 Doporučené dílčí součinitele  $\gamma_{m,J}$** 

$P$	95%	99%	99.9%
$\gamma$	0,93	0,90	0,88

Druhá skupina je tvořena výběrovým souborem č. 10 (všechny materiály), u kterých bylo provedeno celkem 425 laboratorních pokusů. Tento výběrový soubor je popsán v tab. 3.8.

**Tab. 3.8 Vlastnosti materiálů celkem**

Číslo křivosti	$C_C$	[-]	0,92 až 1,29
Číslo nestejnozrnnosti	$C_U$	[-]	1,14 až 5,03
Maximální velikost zrna	$d_{max}$	[mm]	5,0
Velikost 85 % zrna	$d_{85}$	[mm]	0,20 až 1,95
Maximální množství prachových částic	$d_{i<0.063}$	[%]	1,00
Pórovitost	$n$	[-]	0,306 až 0,538
Tvar zrna	$C$	[-]	kulový, zaoblený, ostrohranný
Specifická objemová hmotnost zrna	$\rho_s$	[kgm <sup>-3</sup> ]	2483 až 2641

Pro stanovení pravděpodobnosti překročení  $P = 95,0; 99,0$  a  $99,9\%$  jsou hodnoty dílčích součinitelů stanoveny sepsány v následující tabulce:

**Tab. 3.9 Doporučené dílčí součinitele  $\gamma_{m,J}$** 

$P$	95%	99%	99.9%
$\gamma$	0,91	0,88	0,85

### 3.11.3 DOPORUČENÍ

Doporučené dílčí součinitelé pro porušení v důsledku ztekucení s pravděpodobností výskytu (95%, 99% a 99,9%) v tab. 3.7 a 3.9 jsou pro materiály s vlastnostmi uvedených v tab. 3.6 a 3.8.

V případě, že posuzovaný materiál má fyzikální vlastnosti jako jiný z posuzovaných výběrových souborů, lze použít hodnoty dílčích součinitelů dle tab. 3.4 s log-normálním rozdělením.

## 4. ZÁVĚR

### 4.1 SHRNUTÍ

Ztekucení je proces, který nastává ve stejnozrnné nesoudržné zemině v místě vzestupného vysakování vody do volného prostoru, které obvykle nastává na vzdušné straně konstrukce. Ztekucení může být počátkem tvorby privilegované cesty vlivem zpětné eroze, kdy se zemina vyplavuje z podloží na povrch a následkem je celkové porušení konstrukce.

Mezní stav pro vnější sufozi / ztekucení je posuzován jako mezní stav únosnosti se značením HYD. Toto označení je popsáno jako porušení vlivem nadzdvihování dna, vnitřní eroze a sufoze v základové půdě způsobená hydraulickými gradienty [ČSN EN 1997-1]. Pro vyjádření podmínky mezního stavu jsou zapotřebí dílčí součinitelé významu, nejistoty při stanovení hydraulického gradientu, který působí v konstrukci a součinitel stanovující nejistotu při stanovení kritického hydraulického gradientu.

Při měření v laboratoři bylo použito měřidel, které mají různou přesnost, ať se může jednat o výrobní přesnost (váha) nebo obecně dosažitelné přesnosti (vizuální odečet, stopky). Pro představu přesnosti měření byly stanoveny relativní chyby měření pro pórovitost a kritický hydraulický gradient. Relativní chyba pro stanovení pórovitosti  $n$  a kritického hydraulického gradientu  $J_K$  je menší jak 1%.

Samotný experimentální výzkum se skládal z vytvoření metodiky pro měření na vertikálním propustoměru, vybrání 9 stejnozrnných materiálů včetně stanovení fyzikálních vlastností a následném měření ve vertikálním propustoměru, ve kterém bylo provedeno celkem 425 laboratorních měření. V průběhu měření byla snaha, aby se získaly měření s různou pórovitostí a tak byl materiál volně sypán, zhuťován vibracemi s proměnnou délkou trvání, včetně zatěžování.

Naměřené hodnoty kritických hydraulických gradientů  $J_{K,mer}$  byly porovnány s hodnotami kritického hydraulického gradientu vypočteným dle Terzaghiho  $J_{K,Ter}$ . Ve vztahu Terzaghiho není zohledněn tvar zrna, jeho velikost a vliv čísla nestejnozrnnosti. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že hodnoty kritického hydraulického gradientu dle Terzaghiho  $J_{K,Ter}$  pro kulové a zaoblené materiály s menšími zrny jsou nadhodnocovány oproti měřeným hodnotám kritických hydraulických gradientů  $J_{K,mer}$ . Největší odolnost byla zaznamenána u ostrohranného materiálu s většími zrny při nižších pórovitostech, kdy hodnota kritického hydraulického gradientu vypočteného dle Terzaghiho  $J_{K,Ter}$  byla téměř o 23% nižší než naměřená hodnota kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$ .

Pro statistické vyhodnocení se určilo 20 výběrových souborů, pro které byly stanoveny náhodné veličiny a pomocí programu Statistica se stanovily testované typy rozdělení (normální, log-normální a gama). Pro stanovení dílčích součinitelů bylo zapotřebí určit distribuční funkce jednotlivých rozdělení a pomocí metody nejmenších čtverců se určilo nejvhodnější rozdělení. Celkem byly

stanoveny dvě tabulky doporučených dílčích součinitelů  $\gamma_{m,J}$  pro porušení v důsledku ztekucení s pravděpodobností výskytu (95%, 99% a 99,9%). V první tabulce jsou pouze materiály s kulovými a zaoblenými zrny, ve druhé jsou všechny testované materiály.

**Při porovnání doporučených hodnot dílčích součinitelů (tab. 14.5 a 14.7) s hodnotou dílčího součinitele z ČSN EN 1997-1 (tab. 2.4) lze konstatovat, že hodnota nepostihuje různorodost materiálů i pravděpodobnost výskytu a bylo by proto vhodné doplnit normu o další hodnoty dílčích součinitelů.**

## 4.2 DOPORUČENÍ

Stanovené dílčí součinitelé lze použít pro stejnozrné materiály s číslem nestejnozrnnosti  $C_U \leq 5$  pro porušení v důsledku ztekucení s pravděpodobností výskytu (95%, 99% a 99,9%). V případě, že by posuzovaný materiál měl fyzikální vlastnosti jako jiný materiál, který byl použit v této práci, lze pro posouzení použít dílčí součinitelé z tab. 14.3 pro log-normální rozdělení a nebude tak docházet k poddimenzování nebo předimenzování konstrukcí.

V následujících výzkumech by bylo zajímavé doplnit měření o další stejnozrné materiály s číslem nestejnozrnnosti  $C_U \leq 10$  a i o jemnozrnější materiály. Taktéž by bylo vhodné potvrdit nebo vyvrátit tvrzení o vlivu velikosti a tvaru zrna na velikost kritického hydraulického gradientu a případně tím doplnit podmínku mezního stavu a tím zohlednit odolnost tohoto materiálu. Mezi důležité kroky by patřilo zahrnutí nestejnozrných materiálů, které by popisovaly porušení vlivem vnější sufoze.

## 5. PODKLADY

### 5.1 LITERATURA

ALHASAN, Z., HALA, M., JULÍNEK, T., ŘÍHA, J. 2015. Discussion on the critical hydraulic gradient for uniform homogenous glass beads. In *Eksploracja budowli piętrowych – diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom*. Warszawa, PL: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, s. 165-172.

BULLETIN 164. 2016. International erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundation Volume 2: Case histories investigations, testing, remediation and surveillance, ICOLD, 183 s.

FLESHMAN, M., RICE, J. 2013, *Laboratory Modeling of the Mechanisms of Piping Erosion Initiation*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, GTENG3418R1

GERSEVANOV, N. M., 1948. Polshin, S. K. Theoretical principles of soil mechanics and practical applications. Gostroiizdat.

GOLDSTEIN, M. N. 1953. Sudden fluidization of sands. "Geotechnical tasks", Proceedings No.1, Karanovich Institute of Transport in Dnepropetrovsk.

ISTOMINA, V. S. 1957. Filtracionnaja ustojčivost gruntov (Soil stability to seepage). VODGEO, Gosstrojizdat, Moskva 1957. 296 p. (rusky)



KNORRE, M. E. 1925. Function of sandy levees and evaluation of erosion processes. In "Methodology of hydraulic calculation applied in design of Zaporozska hydropower plant on the Dnieper River".

PAVLOVSKIJ, N. 1922. Teorija dviženija gruntovych vod pod gidrotěchničeskimi sooruzenijami i jee osnovnye prilozhenija.

ŘÍHA, J., ŠPANO, M., ADAM, K., VRUBEL, J., HALA, M. 2016. *Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou mezních stavů*. Vysoké učení technické v Brně, 2016, ISBN 978-80-214-5326-5, 154 s.

SELLMEIJER, J. B. 2006. *Numerical computation of seepage erosion below dams (piping)*, Proceedings of Third International Conference on Scour and Erosion, s. 596-601.

TERZAGHI, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York. ISBN 0-471- 85305-4.

ZAMARIN, E. A. 1931. *Groundwater flow under hydrotechnical structures*. VNICHI, Moscow

## 5.2 PUBLIKACE AUTORA

ALHASAN, Z., HALA, M., JULÍNEK, T., ŘÍHA, J. 2015. Discussion on the critical hydraulic gradient for uniform homogeneous glass beads. In *Eksploracja budowli piertzacych - diagnostyka i zapobieganie zagroženiom*. Warszawa, PL: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Panstwowy Instytut Badawczy, Waszawa, p. 165-172. ISBN: 978-83-64979-09- 5.

HALA, M., ŘÍHA, J. 2016. Nebezpečí filtračních deformací u staveb na vodních tocích. In *Vodní toky 2016*. Kostelec nad Černými Lesy: Lesnické práce s.r.o., p. 78-84. ISBN: 978-80-7458-091- 8.

HALA, M., ŘÍHA, J. 2016. Mezní stavy porušení zemin filtračními deformacemi. *Vodní hospodářství*, vol. 66, no. 11/ 2016, p. 9-14. ISSN: 1211-0760.

ŘÍHA, J., ŠPANO, M., ADAM, K., VRUBEL, J., HALA, M. 2016. *Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou mezních stavů*. Vysoké učení technické v Brně, ISBN 978-80-214-5326-5, 154 s.

ŘÍHA, J., HALA, M. 2017. Assessment of global stability of soils with respect to internal erosion. In *85 th ICOLD ANNUAL MEETING International Symposium "Knowledge based Dam Engineering"*. Praha, CZ: Český přehradní výbor, z.o., p. 1-11. ISBN: 978-80-906662-2- 1.

ŘÍHA, J., ŠPANO, M., DUCHAN, D., JULÍNEK, T., HODÁK, J., CHALMOVSKÝ, J., ADAM, K., HALA, M. 2017. *Využití metody dílčích součinitelů pro hodnocení bezpečnosti vodních děl a odvození mezních hodnot TBD*. Brno: LITERA Brno. 104 p. ISBN: 978-80-214-5524-5.

PETRULA, L., HALA, M., ŘÍHA, J. 2018. Uncertainty in Determining the Critical Hydraulic Gradient of Uniform Glass Beads. In *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG-IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham, Švýcarsko: Springer, Cham. p. 81-90. ISBN: 978-3-319-99423-9.

ŘÍHA, J., PETRULA, L., HALA, M., ALHASAN, Z. 2018. Assessment of empirical formulae for determining the hydraulic conductivity of glass beads. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, vol. 66, no. 3, p. 337-347. ISSN: 0042-790X.

- HALA, M., PETRULA, L., ALHASAN, Z. 2020. Comparison of Hydraulic Conductivity Values Obtained from Empirical Formulae and Laboratory Experiments. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 68(4).
- PETRULA, L.; HALA, M.; ŘÍHA, J. 2020. Statistical analysis of experimentally determined critical hydraulic gradients for heave, In *Géotechnique Letters* 10, p. 377–384,

### **5.3 TECHNICKÉ NORMY**

ČSN EN 1990 (73 0002) Eurokód 0: Zásady navrhování konstrukcí.

ČSN EN 1991 (73 0035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí

ČSN EN 1997–1 (731000) Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla.

ČSN 72 1007 : Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zeminy – Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic. 5/2016

ČSN 72 1007 : Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zeminy – Část 4: Stanovení zrnitosti. 11/2017

ČSN 75 2310: Sypané hráze.

# ŽIVOTOPIS

## OSOBNÍ ÚDAJE:

Jméno: Ing. Mario Hala  
Datum narození: 16. 6. 1989  
e-mail: hala.marioml@gmail.com

---

## DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ:

- 2015 - 2020** Vysoké učení technické v Brně - doktorské studium - vodní hospodářství a vodní stavby.  
**2012 - 2015** Vysoké učení technické v Brně - magisterské studium - vodní hospodářství a vodní stavby.  
**2008 - 2012** Vysoké učení technické v Brně - bakalářské studium - vodní hospodářství a vodní stavby.  
**2004 - 2008** Střední průmyslová škola stavební v Brně - vodohospodářské stavby
- 

## PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI:

- 2006 - 2007 HaskoningDHV Czech Republic, spol. s r.o.**
- pasporty komunikací
- 2013 - 2014 Vysoké učení technické v Brně, fakulta Stavební, ústav vodních staveb,**
- Posouzení bezpečnosti MVN Bartošovice III,
  - Spoluřešitel při posouzení příčin degradace AB pláště horní nádrže PVE Dlouhé stráně.
- 2014 - 2019 HV-projekt s.r.o.**
- projektování pozemních komunikací,
  - hydrotechnické výpočty mostů.
- od 2014 Vodní díla TBD a.s.**
- zpracování a analýza měřených dat při technickobezpečnostním dohledu (TBD),
  - projekční činnost (rekonstrukce VD),
  - manipulační řády,
  - zvláštní povodňové vlny.
- 2015 - 2019 Vysoké učení technické v Brně, fakulta Stavební, ústav vodních staveb,**
- Realizace projektů pod vedením prof. Ing. Jaromíra Říhy, CSc.
- 2017 Zahraniční pracovní stáž Universidad de Granada, Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Španělské království**
- Matematický model kontaktní sufoze (Locke 2000, Inmaculada 2006)
- 

## OSTATNÍ DOVEDNOSTI A ZNALOSTI:

### Programové znalosti

- AutoCad, CIVIL 3D, QGis, HEC-Ras (1D, 2D), MS Office, OS Windows

### Jazykové znalosti

- angličtina – aktivně, němčina pasivně, španělština pasivně

### Řidičské oprávnění

- skupina B

## ABSTRACT

In the case of soil structures and/or subsoil of the water structures, filtration deformation can occur due to the effects of water seepage. One of the possible phenomena that can occur in water structures due to filtration deformation is external suffusion / heave, which occurs on the air side of the structure in the case of ascending external seepage, where soil particles are gradually subject to ascending seepage forces.

The possibility of heave can be assessed using the method of partial factors, for which individual partial factors are needed, which are not specified in more detail in the literature. The aim of this work is to determine the partial reliability factor for failure due to heave based on the evaluation of laboratory experiments on uniform grain materials with non-uniformity number  $C_U < 5$ .