



# 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 ORIGIN OF THE EXTERNAL  
SUFFOSION / HEAVE AND SOLUTION USING THE LIMIT STATE METHOD

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Mario Hala

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

BRNO 2020

## ABSTRAKT

U zemních konstrukcí a/nebo podloží vodních staveb může vlivem účinků prosakování vody dojít ke vzniku filtrační deformace. Jedním z možných jevů, které mohou nastat u vodních konstrukcí vlivem filtrační deformace je vnější sufoze / ztekucení, ke které dochází na vzdušné straně díla v případě vzestupného vnějšího průsaku, kde částičky zeminy postupně podléhají vzestupným průsakovým silám. Možnost vzniku ztekucení, lze posoudit pomocí metody dílčích součinitelů, pro kterou jsou zapotřebí jednotlivé dílčí součinitele, které nejsou v literatuře blíže specifikované. Cílem této práce je stanovit dílčí součinitel spolehlivosti pro porušení vlivem ztekucením na základě vyhodnocení laboratorních pokusů na stejnozrnných materiálech s číslem nestejzornosti  $C_U < 5$ .

## KLÍČOVÁ SLOVA

Vnější sufoze, ztekucení, metoda mezních stavů, kritický hydraulický gradient, stejnozrnná zemina

## 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  $C_U < 5$ .

## KEYWORDS

External suffusion, boiling, limit states method, critical hydraulic gradient, uniform soil



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Mario Hala *HODNOCENÍ MOŽNOSTI VZNIKU VNĚJŠÍ SUFOZE/ZTEKUCENÍ A ŘEŠENÍ METODOU DÍLČÍCH*. Brno, 2020. 123 s., 40 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem HODNOCENÍ MOŽNOSTI VZNIKU VNĚJŠÍ SUFOZE/ZTEKUCENÍ A ŘEŠENÍ METODOU DÍLČÍCH SOUČINITELŮ zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 8. 2020

Ing. Mario Hala  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád moc poděkoval své rodině (zejména své mamince Irence) a dále přítelkyni Ivetě, kteří mě podporovali v mém studiu, Ing. Lukáši Smelíkovi Ph.D., který vytvořil v mé hlavě prvotní myšlenku jít na doktorské studium a nechal mi svoji židli na ústavu vodních staveb, svému psovi Bernardovi Blackovi za čas, který se mnou strávil v laboratoři. Dále bych rád poděkoval Ing. Michalu Pavlíčkovi a Ing. Miloši Burešovi, kteří vytvářeli tvář a směr mého studia „Když prší, tak jedeme na Gardu“ (Pavlíček a kol., 2016). Všem ve firmě Vodní Díla TBD, a.s. se kterými jsem spolupracoval v průběhu svého doktorského studia a se kterými spolupracuji i teď. Muchas gracias para mis amigos desde Universidad de Granada (Antonio, Alberto y Fernando Delgado Ramos) y mis compañeros de botellón desde Granada (Danielito, Sába, Danča, Agnieszka, Clara, Aladin...). Aleši Sirnému DiS za pravidelné seance a probírání stavu mé disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat lidem z FAST VUT především školiteli prof. Ing. Jaromíru Říhovi CSc. zejména za odborné vedení, děkuji Ing. Davidu Duchanovi, Ph.D. za věnovaný čas, kterého nebylo málo a neměl to se mnou občas jednoduché. Ing. Zakarayovi Alhasanovi Ph.D. a Ing. Luboši Petruovi, za pomoc s výzkumem a vytváření pozitivní atmosféry na pracovišti, Ing. Hance Uhmánové CSc., která vytvářela rodinnou atmosféru ústavu, všem ostatním z ústavu vodních staveb a Ing. Ivaně Kameníčkové PhD z ústavu vodního hospodářství krajiny.

Byla to pěkná party, díky že jste mě pozvali.

# OBSAH

<b>1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	10
1.2 CÍLE A PŘEDMĚT PRÁCE .....	11
<b>2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ .....</b>	<b>13</b>
2.1 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY FILTRAČNÍCH DEFORMACÍ NESOUDRŽNÝCH ZEMIN .....	13
2.2 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY BEZPEČNOSTI A SPOLEHLIVOSTI KONSTRUKCÍ .....	15
2.2.1 Spolehlivost konstrukcí .....	15
2.2.2 Hodnocení bezpečnost konstrukcí .....	15
2.3 SHRNUÍ .....	18
<b>3. OBECNĚ K FILTRAČNÍM DEFORMACÍM .....</b>	<b>19</b>
3.1 FAKTORY PŘÍSPÍVAJÍCÍ K PORUŠENÍ .....	19
3.1.1 Napjatost .....	20
3.1.2 Náchylnost materiálů .....	21
3.1.3 Hydraulické působení .....	21
3.2 ROZDĚLENÍ FILTRAČNÍCH DEFORMACÍ .....	22
3.2.1 Lokální filtrační deformace .....	22
3.2.2 Globální filtrační deformace .....	24
3.3 JEDNOTLIVÉ TYPY LOKÁLNÍCH FILTRAČNÍCH DEFORMACÍ .....	25
3.3.1 Vnitřní sufoze .....	25
3.3.2 Vnitřní eroze .....	26
3.3.3 Kontaktní sufoze .....	27
3.3.4 Kontaktní eroze .....	28
3.3.5 Vnější sufoze .....	29
3.3.6 Ztekucení .....	29
3.4 KRITÉRIA PRO POSOUZENÍ VZNIKU FILTRAČNÍCH DEFORMACÍ .....	34
3.4.1 Geometrické kritérium .....	34
3.4.2 Hydraulické kritérium .....	34
<b>4. METODA ŘEŠENÍ .....</b>	<b>35</b>
4.1 PODMÍNKY VZNIKU ZTEKUCENÍ .....	35
4.2 ROZBOR PŮSOBÍCÍCH SIL .....	36
4.3 SEŠTAVENÍ PODMÍNKY SPOLEHLIVOSTI .....	36
4.4 STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ZEMIN .....	36
4.5 POPIS ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ KRITICKÉHO HYDRAULICKÉHO GRADIENTU .....	36
4.6 LABORATORNÍ POKUSY .....	37
4.7 PRŮBĚH PORUŠENÍ A JEHO IDENTIFIKACE .....	37

4.8	STANOVENÍ RELATIVNÍ CHYBY MĚŘENÍ .....	37
4.9	ROZBOR A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	38
4.10	STANOVENÍ DÍLČÍCH SOUČINITELŮ $\Gamma_{M,J}$ .....	38
4.10.1	<i>Stanovení náhodných veličin a variant</i> .....	38
4.10.2	<i>Návrh typů rozdělení</i> .....	38
4.10.3	<i>Statistická analýza a výsledky</i> .....	38
<b>5.</b>	<b>PODMÍNKY VZNIKU ZTEKUCENÍ .....</b>	<b>39</b>
5.1	HYDRAULICKÉ KRITÉRIUM PRO ZTEKUCENÍ .....	39
5.2	KRITICKÝ HYDRAULICKÝ GRADIENT DLE RŮZNÝCH AUTORŮ .....	39
<b>6.</b>	<b>ROZBOR PŮSOBÍCÍCH SIL A ODVOZENÍ PODMÍNKY MEZNÍ ROVNOVÁHY .....</b>	<b>47</b>
6.1	VYSUŠENÁ ZEMINA .....	48
6.2	PLNĚ NASYCENÝ VZOREK BEZ PROUDĚNÍ .....	48
6.3	PLNĚ NASYCENÝ VZOREK PŘI STÁLÉM ZATÍŽENÍ BEZ PROUDĚNÍ .....	49
6.4	PLNĚ NASYCENÝ VZOREK PŘI PROUDĚNÍ VODY .....	49
<b>7.</b>	<b>SESTAVENÍ PODMÍNKY SPOLEHLIVOSTI A BEZPEČNOSTI .....</b>	<b>51</b>
7.1	METODA PODLE STUPNĚ BEZPEČNOSTI SF .....	51
7.2	METODA DÍLČÍCH SOUČINITELŮ .....	51
<b>8.</b>	<b>STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ZEMIN .....</b>	<b>53</b>
8.1	VÝBĚR MATERIÁLŮ .....	53
8.1.1	<i>Skleněné kuličky</i> .....	53
8.1.2	<i>Přírodní písky</i> .....	53
8.1.3	<i>Upravené písky</i> .....	54
8.2	ZRNITOST .....	55
8.2.1	<i>Materiální zabezpečení</i> .....	55
8.2.2	<i>Postup měření a vyhodnocení</i> .....	55
8.2.3	<i>Výsledky</i> .....	58
8.3	MĚRNÁ HMOTNOST ZRN .....	61
8.3.1	<i>Materiální zabezpečení</i> .....	62
8.3.2	<i>Postup měření</i> .....	62
8.3.3	<i>Výsledky</i> .....	63
8.4	TVAR ZRNA .....	66
8.4.1	<i>Materiální zabezpečení</i> .....	66
8.4.2	<i>Postup měření</i> .....	66
8.4.3	<i>Výsledky</i> .....	67
<b>9.</b>	<b>POPIS ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ KRITICKÉHO HYDRAULICKÉHO GRADIENTU .....</b>	<b>68</b>
9.1	GEOMETRIE VERTIKÁLNÍCH PROPUSTOMĚŘŮ .....	69
9.2	STANOVENÍ PROPUSTNOSTI NA SÍTECH A GEOTEXILIÍ .....	70

<b>10.</b>	<b>PŘÍPRAVA LABORATORNÍHO VZORKU A LABORATORNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>72</b>
10.1	PŘÍPRAVA LABORATORNÍHO VZORKU.....	72
10.1.1	<i>Materiální zabezpečení .....</i>	72
10.1.2	<i>Postup .....</i>	73
10.2	LABORATORNÍ MĚŘENÍ A JEHO PRŮBĚŽNÉ VYHODNOCENÍ .....	75
10.2.1	<i>Materiální zabezpečení .....</i>	76
10.2.2	<i>Postup měření .....</i>	76
10.2.3	<i>Průběžné vyhodnocování .....</i>	77
<b>11.</b>	<b>PRŮBĚH PORUŠENÍ A JEHO IDENTIFIKACE.....</b>	<b>80</b>
11.1	FÁZE PRŮBĚHU PORUŠENÍ .....	80
11.1.1	<i>Vzorek bez změny.....</i>	80
11.1.2	<i>Protahování vzorku .....</i>	80
11.1.3	<i>Lokální poruchy .....</i>	81
11.1.4	<i>Ztekucení.....</i>	81
11.2	STANOVENÍ POČÁTKU PORUŠENÍ .....	82
11.2.1	<i>Shrnutí.....</i>	89
<b>12.</b>	<b>STANOVENÍ RELATIVNÍ CHYBY MĚŘENÍ.....</b>	<b>90</b>
12.1.1	<i>Postup .....</i>	90
12.1.2	<i>Výsledky .....</i>	91
<b>13.</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>	<b>92</b>
13.1.1	<i>Skleněné kuličky .....</i>	94
13.1.2	<i>Přírodní písky.....</i>	95
13.1.3	<i>Upravené písky.....</i>	96
13.1.4	<i>Shrnutí.....</i>	96
13.2	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S EMPIRICKÝMI VZTAHY .....	97
13.2.1	<i>Zamarin (1931).....</i>	97
13.2.2	<i>Istomina (1957).....</i>	98
13.2.3	<i>Shrnutí.....</i>	99
<b>14.</b>	<b>STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A STANOVENÍ DÍLČÍHO SOUČiniteLE SPOLEHLIVOSTI</b>	
	<b>100</b>	
14.1	DEFINICE NÁHODNÉ VELIČINY .....	100
14.1	DEFINICE CELKOVÉHO VÝBĚROVÉHO SOUBORU A VÝBĚROVÝCH SOUBORŮ .....	100
14.2	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ .....	100
14.2.1	<i>Základní charakteristiky .....</i>	101
14.2.2	<i>Empirické čáry překročení .....</i>	102
14.2.3	<i>Analýza teoretického rozdělení .....</i>	102
14.2.4	<i>Gama rozdělení.....</i>	103

14.3	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	103
14.4	STANOVENÍ DÍLČÍHO SOUČiniteLE A DOPORUČENÍ.....	106
14.4.1	<i>Metoda nejmenších čtverců</i> .....	106
14.4.2	<i>Stanovení dílčích součinitelů</i> .....	107
14.4.3	<i>Doporučení</i> .....	109
<b>15.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>110</b>
15.1	SHRNUTÍ.....	110
15.2	DOPORUČENÍ.....	111
<b>16.</b>	<b>PODKLADY</b> .....	<b>112</b>
16.1	LITERATURA.....	112
16.2	TECHNICKÉ NORMY.....	115
16.3	POUŽITÉ ZKRATKY.....	115
<b>17.</b>	<b>VELIČINY A JEDNOTKY</b> .....	<b>116</b>
<b>18.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>120</b>
<b>19.</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>123</b>

# 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 rozdělují 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 hráží 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 vzdušní 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 součinitelé 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 a předmět práce**

Cílem práce je stanovení vybraných dílčích součinitelů pro porušení v důsledku ztekucení s předem stanovenou pravděpodobností výskytu. Tyto dílčí součinitelé budou stanoveny na základě rozsáhlých laboratorních měření ve vertikálních propustoměrech na různých typech specifikovaných zemín. 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.**

Předmětem práce je shrnutí stávajícího stavu poznání v problematice filtračních deformací, bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí. Jednotlivé typy poruch, které se liší způsobem, místem porušení a typem zeminy jsou popsány a znázorněny v kap 3.3. Z těchto všech typů bylo vybráno porušení vlivem ztekucení, byla stanovena kritéria porušení (geometrická a hydraulická) a na základě fyzikálního odvození byly identifikovány síly, které působí v zemině při vzestupném proudění podzemní vody.

Následně byla navržena metoda řešení (kap. 4). Stanovily se geometrické a hydraulické podmínky vzniku ztekucení. Byl proveden rozbor působících sil a ve smyslu metody dílčích součinitelů se sestavila podmínka spolehlivosti (bezpečnosti).

V rámci této práce se stanovila metodika pro přípravu laboratorního pokusu a metodika pro postup vlastních měření a jejich vyhodnocení. Na základě typu porušení byly vybrány vhodné stejnozrné zeminy, u kterých byly stanoveny jejich fyzikální vlastnosti (zrnatost, tvar zrna, měrná tíha zrna) a stanoven návrh plánu měření. V přípravné části byla v laboratoři provedena měření geometrie propustoměru a fyzikálních vlastností sít chránících zeminu (hydraulická vodivost, hydraulické ztráty, tloušťka).

Laboratorní část se skládala z měření ve vertikálním propustoměru, a to z minimálně 40 laboratorních pokusů u jednoho typu materiálu, aby mohl být materiál plnohodnotně statisticky vyhodnocen. Aby bylo možné zohlednit vliv pórovitosti a velikost hydraulického gradientu, byl materiál hutněn různými způsoby. Při vyhodnocení posuzoval vliv jednotlivých fyzikálních vlastností zemin (pórovitost, tvar zrna, číslo nestejnozrnnosti). Pro první sérii pokusů byly vybrány stejnozrné skleněné kuličky o různých průměrech, následovaly přírodní písky různých zrnitostí, tvarů zrn a čísel nestejnozrnnosti. Při vyhodnocení byly stanoveny jednotlivé dílčí součinitele odpovídající „odolnosti“.

## 2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

### 2.1 Stávající stav problematiky filtračních deformací nesoudržných zemín

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), viz kap. 3.3.

K vnitřní sufozi dochází v tělese hráze, kde vlivem proudění dochází k přeskupování zrn zeminy. Vnitřní sufoze je relativně krátkodobý jev. Geometrické podmínky vzniku vnitřní sufoze [Pavčič 2009] vychází z kritérií vzniku kontaktní sufoze, kde se posuzuje velikost póru. Hydraulické podmínky vnitřní sufoze stanovil Patrashev [Pavčič 2009] a vychází taktéž z kritérií vzniku kontaktní sufoze. Čištín (1967) řešil u vnitřní sufoze vyplavování částic, vlivem vzestupného proudění. Mezi další autory, kteří se touto problematikou zabývali, patří například Istomina (1957) a Luboček (1962).

Kontaktní sufoze může nastat na rozmezí dvou materiálů, kdy dochází k proudění vody z jemnozrnějšího materiálu (nestejnozrný materiál) do hrubozrnějšího. Kontaktní sufoze je jedním z možných pokračování vnitřní sufoze. Mezi nejznámější autory patří Terzaghi (1943), který jako první odvodil geometrické podmínky průtočnosti a filtrační stability pro filtry v hrázích. Následovala řada autorů, kteří vycházejí z podmínek Terzaghiho a různými způsoby tyto podmínky modifikují o další podmínky pro vybrané typy materiálu, např.: Bertam (1940), Istomina (1957), Čištín (1967), USACE (1971), Sherard a Dunnigan (1984), Delgado (2000) a další. Terzaghiho vztah je v rozšířené podobě stále užíván a je obsažen v normě ČSN 75 2310 a ČSN 75 2410.

Kontaktní eroze může nastat na rozmezí dvou materiálů, kdy dochází k proudění vody z jemnozrnějšího materiálu (stejnozrný materiál) do hrubozrnějšího. Kontaktní eroze je nebezpečnější než kontaktní sufoze z důvodu vymílání celého objemu materiálu. Na tuto problematiku se zaměřil Busch a Luckner (1973), kteří stanovili geometrické i hydraulické podmínky. Čištín s Ziemsem (1973) navrhli na základě vlastních experimentů kritéria vzniku kontaktní sufoze a eroze pro stejnozrné i nestejnozrné materiály.

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

vznosu. 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).

Mezi globální poruchy pak patří zpětná eroze a následný vznik privilegované cesty, kterou se zabýval Bligh (1910) a následně Lane (1935) tuto podmínku rozšířil o vertikální směr proudění. Čugajev (1965) odvodil tabulky pro stanovení kritických hodnot, později upravených a použitých ve směrnici VNIIG (1976). V Nizozemí tuto problematiku řešil Sellmeijer (1988), který vyvinul první teoretický matematický model, který následně upravoval. Další autorka je např. Beek (2011).

Istomina (1957) zavedla terminologii pro filtrační deformace, kterou následně převzala většina autorů východní Evropy (J. Čištín, Vuković, Pusić). Ve východní Evropě vznikly dvě knihy, které shrnují a popisují jednotlivé typy filtračních deformací (Busch, Luckner, 1973), (Vuković, Pusić, 1992).

V dnešní době se problematice filtračních deformací zabývá pracemi skupina v The European Working Group on Internal Erosion (EWG-IE), která vznikla v roce 1993 se zaměřením na problematiku vnitřní eroze u hrází a International commission on large dams (ICOLD), která je nevládní mezinárodní organizací, která představuje fórum pro výměnu znalostí v oblasti problematiky přehrad.

## **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 souhrnou 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:

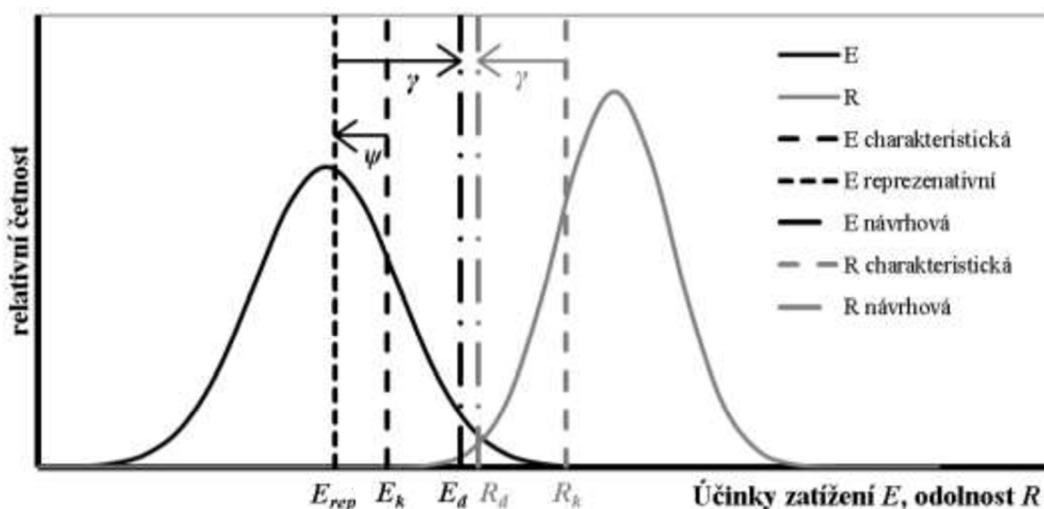
$$\gamma_1 \gamma_{dstb} E_k \leq \gamma_{stb} R_k \quad (2.3)$$

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). Princip metody dílčích součinitelů je znázorněn na obr. 2.1.

**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.



**Obr. 2.1 Princip metody dílčích součinitelů [Říha, Špano a kol, 2016]**

ČSN EN 1990 rozlišuje dvě hlavní skupiny mezních stavů, které jsou znázorněny v tab. 2.2:

- mezní stavy únosnosti (mají vazbu na únosnost konstrukce),
- mezní stavy použitelnosti (mají vazbu především na funkci konstrukce za běžného užívání).

**Tab. 2.2 Vymezení mezních stavů [ČSN EN 1990]**

Mezní stav	Značka	Popis
Únosnosti ULS	EQU	Ztráta statické rovnováhy konstrukce nebo její části, uvažované jako tuhé těleso tam, kde je významné i menší kolísání hodnoty nebo prostorového uspořádání stálých zatížení stejného původu a pevnost konstrukčních materiálů nebo základové půdy není obvykle rozhodující.
	STR	Vnitřní porucha nebo nadměrná deformace konstrukce nebo nosných prvků včetně základových patek, pilot, podzemních stěn atd., kde rozhoduje pevnost konstrukčních materiálů.
	GEO	Porucha nebo nadměrná deformace základové půdy, kde pevnosti zeminy nebo skalního podloží jsou významné pro únosnost (princip STR aplikovaný na specifika geotechnických konstrukcí a základových půd).
	FAT	Únavová porucha konstrukce nebo nosných prvků (princip STR aplikovaný na specifický způsob zatížení).
	UPL	Ztráta rovnováhy konstrukce či základové půdy v důsledku vzestupně orientovaného tlaku vody nebo jiných svislých zatížení (EQU aplikovaný na geotechnické konstrukce a základové půdy, v individuálních případech může vést na STR).
	HYD	Nadzdvihování dna, vnitřní eroze a sufoze v základové půdě způsobená hydraulickými gradienty (princip STR aplikovaný na specifika geotechnických konstrukcí a základových půd).
Použitelnosti SLS	Vratný.	
	Nevratný.	

**Tab. 2.3 Obecné tvary podmínky pro posouzení konstrukce metodou dílčích součinitelů**  
[ČSN EN 1990]

Únosnost	EQU, UPL	$E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$
	STR, GEO, HYD	$E_d \leq R_d$
Použitelnost	-	$E_d \leq C_d$

kde  $E_{d,dst}$  je návrhová hodnota účinku destabilizujících zatížení,  $E_{d,stab}$  je návrhová hodnota účinku stabilizujících zatížení a  $C_d$  je kritérium použitelnosti.

### 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. 2.4.

**Tab. 2.4 Dílčí součinitele pro ověření mezního stavu způsobeného hydraulickým zdvihem**  
HYD [ČSN EN 1997-1]

Zatížení			
Stálé	destabilizující	$\gamma_{G,dst}$	1,35
	stabilizující	$\gamma_{G,stab}$	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  $\gamma_{G,stab}$  ve vazbě na zvolené pravděpodobnosti. Z tab. 2.4 je patrné, že dílčí součinitel pro stabilizující zatížení  $\gamma_{stab}$  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.**

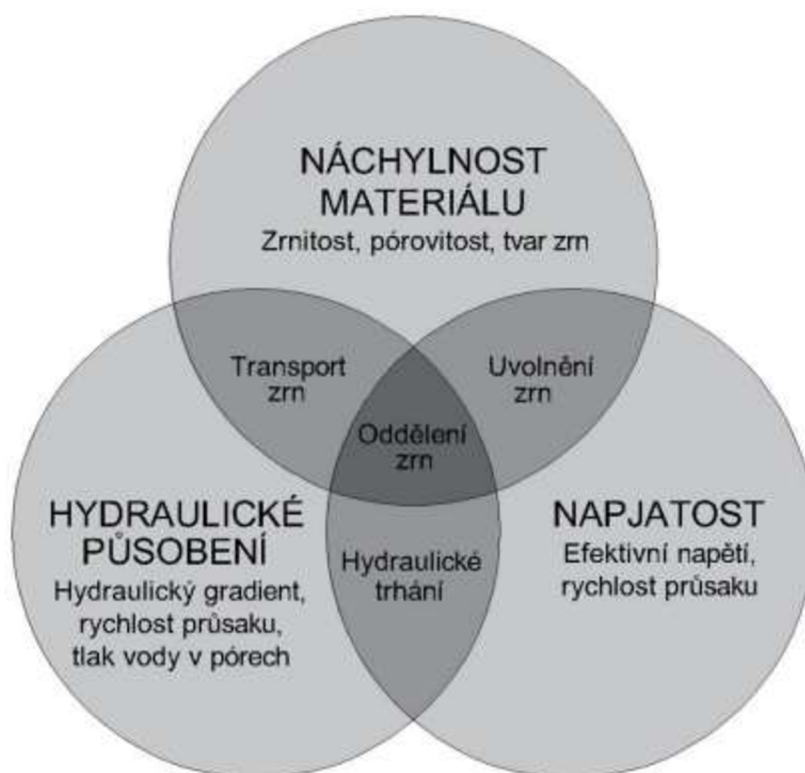


### 3. OBECNĚ K FILTRAČNÍM DEFORMACÍM

Filtrační deformace je děj, při kterém dochází ke změně struktury a vlastností zeminy v prostoru a v čase způsobené prosakující vodou. Při filtrační deformaci dochází ke změnám granulometrického složení zeminy, pórovitosti, propustnosti, objemové tíhy, případně k porušení celistvosti zeminy. „Počátek“, jakožto první část poruchy filtrační deformací (obr. 3.5), je velice těžké stanovit a zároveň se jedná o nejdůležitější část. Garner a Fannin [2011] vyvinuli Vennův diagram (obr. 3.1), který znázorňuje velkým písmem různé typy faktorů (napjatost, vlastnosti zeminy a průsakový režim). Při nepříznivé shodě jednotlivých faktorů dochází k různým typům porušení (transport zrn, hydraulické trhání, uvolnění zrn).

#### 3.1 Faktory přispívající k porušení

Celkově lze uvažovat tři faktory, které významně ovlivňují vznik filtračních deformací a na základě jejich kombinací dochází k různým typům poruch. Jak ukazuje Vennův diagram (obr. 3.1) dle Garnera a Fanina (2011), k poruchám může dojít již při kombinaci dvou faktorů.



Obr. 3.1 Vennův diagram s faktory vzniku filtračních deformací (Garner and Fanin 2016)

### 3.1.1 Napjatost

Při poklesu efektivního napětí dochází ke snížení smykové pevnosti zeminy. K tomuto jevu může dojít například v málo propustných materiálech při relativně rychlém sypání hráze, resp. jejího těsnicího hlinitého jádra. Rozlišují se dva typy trhlin (Vaniček, 1988):

- Za suchých podmínek se trhliny vytvářejí nad hladinou vody v nádrži a jejich náplň tvoří vzduch.
- Za mokrých podmínek se trhliny v nádrži vytvářejí pod úrovní hladiny vody v nádrži a výplň trhlin vyplňuje voda.

První typ může nastat v případě, kdy dochází k nedostatečnému hutnění těsnicího jádra, které si postupem času sedá. V tomto případě dochází k napětí na rozmezí dvou materiálů a může vyústit k tzv. zavěšování (arching) stlačitelnějšího materiálu jádra na sousední méně stlačitelné stabilizační části (obr. 3.2), popř. filtry.

Druhým jevem snížených efektivních napětí v zemině je hydraulické trhání dle obr. 3.3 (Sherard, 1976), ke kterému může dojít vlivem špatného sypání těsnicího jádra a hydraulickým působením vody, tzv. mokré podmínky (Vaniček, 1988).



Obr. 3.2 Zavěšování (Fell and Fry 2005)



Obr. 3.3 Hydraulické trhání (Fell and Fry 2005)

### 3.1.2 Náchylnost materiálů

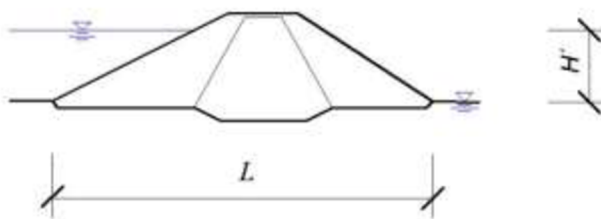
Náchylnost zeminy ke vzniku filtrační deformace je dána zejména jejím zrnitostním složením a dalšími fyzikálními faktory (tvar zrn, jejich uložení), které mají za následek změnu fyzikálních a mechanických vlastností zeminy a umožňují transport zrn zeminy. S větší velikostí částic je třeba vyšší průsaková rychlost, aby se jednotlivé částice daly do pohybu. Důležitým faktorem náchylnosti nesterjnozrných materiálů je číslo nesterjnozrnnosti  $C_U$ . U zeminy s širokým rozsahem velikosti částic, nebo zemin, které neobsahují středně velké částice, může dojít k vnitřní nestabilitě, která je základem pro vznik filtračních deformací. Pro soudržné zeminy jsou určujícími ukazateli index plasticity  $I_p$  a soudržnost  $c$ .

### 3.1.3 Hydraulické působení

K filtračním deformacím dochází pouze v případě kombinace hydraulického působení a náchylnosti materiálu nebo napjatosti, či kombinaci všech tří. Základním hydraulickým faktorem pro vznik filtrační deformace je objemové zatížení zeminy vyvolané gradientem tlaku. Gradient tlaku se často při praktických úlohách do výpočtu zavádí hodnotou středního hydraulického gradientu  $J$  za předpokladu efektivní objemové hmotnosti zeminy dle vztahu (3.1).

$$J = \frac{H'}{L} \quad (3.1)$$

kde  $J$  je střední hydraulický gradient,  $H'$  je rozdíl hladin v nádrži a podhrázi a  $L$  je délka průsakové dráhy. V některých případech je hydraulickým kritériem střední skutečná rychlost filtrace kvantifikovaná specifickým průsakem  $q$ .

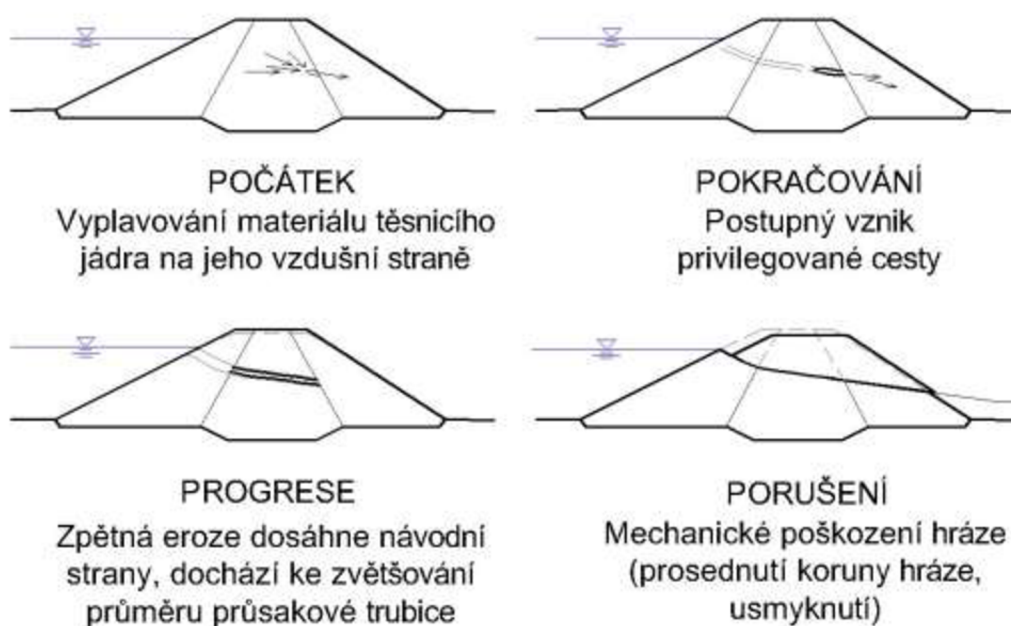


Obr. 3.4 Schéma stanovení hydraulického gradientu

Působení hydraulického gradientu lze dělit dle směru proudění podzemní vody na vertikální a horizontální. Vertikální (vzestupné) proudění vede k rozrušení zeminy v podhrázi (ztekucení, prolomení) a bývá iniciátorem poruchy vnější sufoze nebo ztekucení. Horizontální proudění (vnitřní) v tělese hráze nebo v podloží bývá často „počátkem“ filtračních deformací, ale hlavně vlivem tohoto proudění dochází k jeho progresi.

### 3.2 Rozdělení filtračních deformací

Na problematiku filtrační deformace lze pohlížet ze dvou hledisek, kdy se rozlišuje stabilita lokální a globální [Energija, 1973], [Vukovič, Pušič, 1992]. Dochází-li k lokálním filtračním deformacím, např. vnitřní sufozi, tak se stává zemina lokálně nestabilní, kde v místě lokální nestability může nastat progresa filtrační deformace nebo naopak stabilizace poruchy (selfhealing). Progresa lokální nestability nebo spojení více lokálních nestabilit a následná progresa vede ke globálnímu porušení (privilegovaná průsaková cesta), které má za následek celkové porušení hráze (prosednutí, usmyknutí, atd.). Schéma průběhu porušení je znázorněno na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Schéma průběhu porušení (Fell and Fry, 2005)

Proces porušování konstrukce vlivem filtrační deformace od lokálního defektu až k úplnému porušení lze rozdělit na následující fáze viz obr. 3.5:

- Počátek – vznik lokálního porušení vlivem filtrační deformace dle tab. 3.1.
- Pokračování – časoprostorový vývoj lokálního porušení a zahájení zpětné eroze.
- Progresa – vytvoření souvislé privilegované cesty vlivem zpětné eroze (globální porucha).
- Porušení – mechanické porušení hráze.

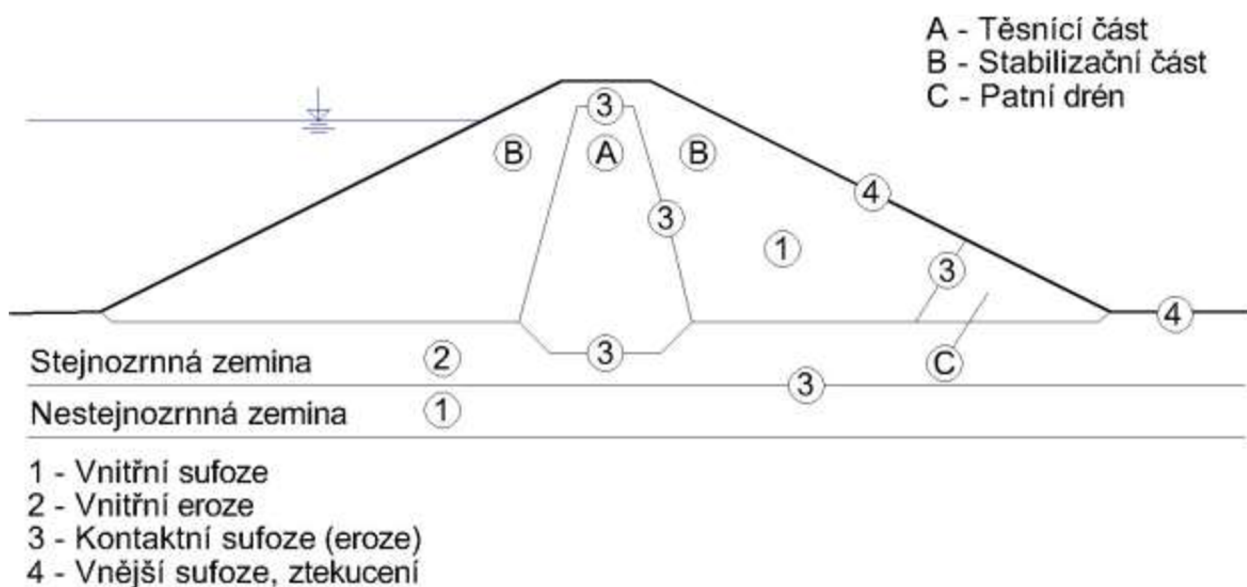
#### 3.2.1 Lokální filtrační deformace

Lokální filtrační deformace je proces, kdy dojde v určité omezené oblasti zemní konstrukce či podloží vlivem překročení mezních podmínek (geometrických, hydraulických a napjatostních) ke vzniku lokálního porušení. To může mít v případě vývoje poruchy (obr. 3.5) za následek celkovou

poruchu konstrukce. Při objasňování lokální filtrační nestability porézního prostředí hrají významnou roli experimenty prováděné v laboratorních podmínkách na vzorcích zeminy a také zkušenosti ze skutečných havárií vodních děl. Výčet typů lokální filtrační deformace je uveden v tab. 3.1 a místa, kde může v tělese sypané hráze dojít k lokálnímu porušení filtrační deformací, jsou znázorněny na obr. 3.6.

**Tab. 3.1 Způsoby lokálního porušení vlivem filtrační deformace [Hala, Říha 2016]**

Členění dle místa vzniku	Nesoudržné zeminy		Soudržné zeminy
	Stejnozrné	Nestějnozrné	
Vnitřní	Vnitřní eroze	Vnitřní sufoze	Hydraulické trhání, zavěšování
Kontaktní	Kontaktní eroze	Kontaktní sufoze	Exfoliace
Vnější	Ztekucení	Vnější sufoze	Prolomení



**Obr. 3.6 Místa vzniku jednotlivých typů lokálních filtračních deformací [Hala, Říha 2016]**

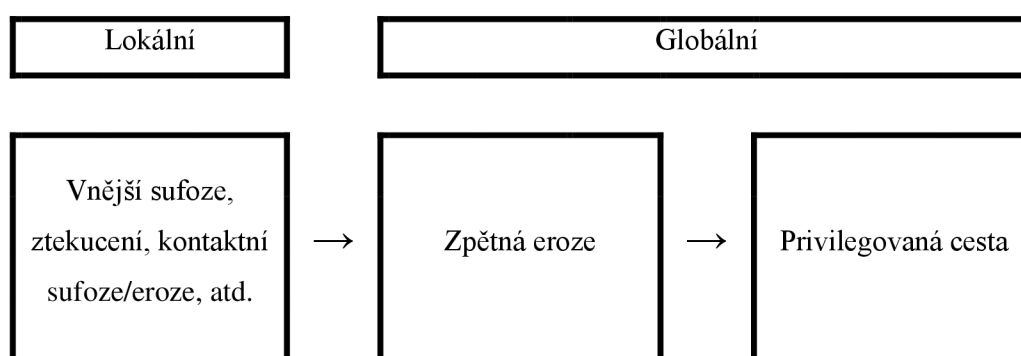
Rozdíl mezi sufozí a erozí nemá pevně stanovenou hranici. Istomina [1957] stanovila u vnější sufoze/ztekucení podmínky na základě čísla nestějnozrnnosti  $C_U$ :

- <1 až 20> - ztekucení,
- <10 až 20> - ztekucení/vnější sufoze,
- <20 a více> - vnější sufoze.

Obecně se dá říct, že při sufozi dochází k postupnému vyplavování jemnozrné frakce a mění se postupně fyzikální a hydraulické vlastnosti zeminy (křivka zrnitosti, pórovitost, hydraulická vodivost).

### 3.2.2 Globální filtrační deformace

Globální filtrační deformace je proces, kdy dojde postupným vývojem (obvykle zpětnou erozí viz obr. 3.7 a 3.8) k vytváření tzv. privilegované průsakové cesty vytvořené v zóně průsaků. Dalšími příčinami vzniku privilegované průsakové cesty může být předcházející sufoze nebo kontaktní eroze a trhliny nebo další defekty v konstrukci (např. nedostatečně zhutněný materiál v okolí funkčních objektů hráze, trhliny vzniklé nerovnoměrným sedáním, nebo dutiny vytvořené zvěří nebo vegetací).

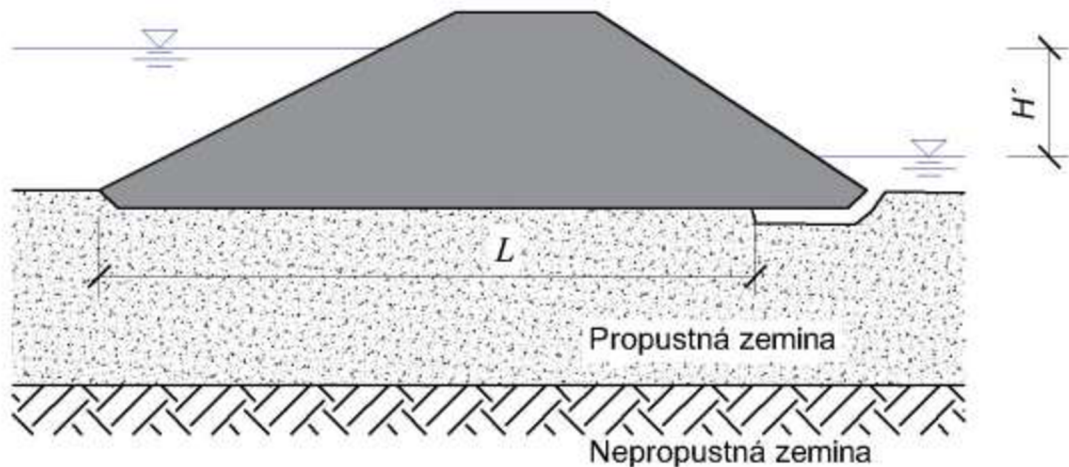


**Obr. 3.7 Postup vzniku privilegované cesty**

K metodám hodnocení celkové stability patří studium a rozbor příčin poruch, které v minulosti vznikly na provozovaných vodních dílech. Z těchto poruch byly odvozeny mezní podmínky rovnováhy a ztráty stability. Pro identifikaci vývoje těchto poruch slouží monitoring průsakového režimu v kombinaci se sledováním přetvoření v rámci TBD.

Problematikou tvorby vodorovné průsakové dráhy se jako první zabýval Bligh (1910), na jeho práci navázal Lane (1935), který zohlednil vliv svislého směru při tvorbě průsakové dráhy. V Sovětském svazu byly stanoveny tabulky dle Čugajev (1965) a následně v podobě směrnic VNIIG (1976), které stanovují hodnotu kritických hydraulických gradientů pro vývoj privilegované průsakové dráhy.





**Obr. 3.8 Schéma vznikající privilegované cesty vlivem zpětné eroze [Hala, Říha 2016]**

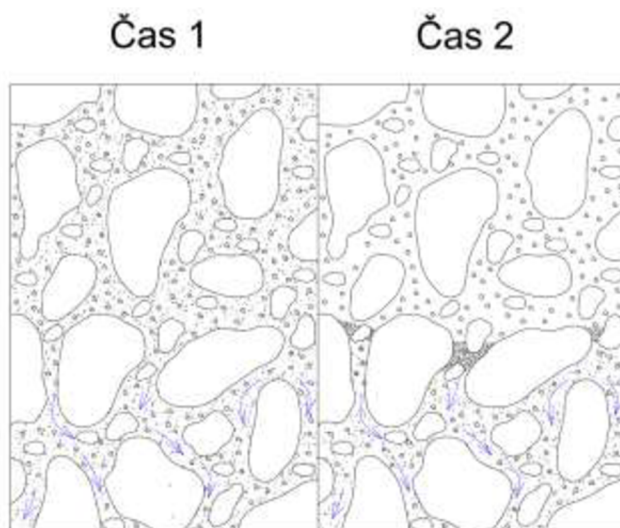
Problematikou zpětné eroze a pipingu se hlavně zabývají v Nizozemí (Sellmeijer, Van Beek). Sellmeijer (1988) odvodil matematický model zpětné eroze v základové spáře zemní hráze, kde použil podmínku rovnováhy zrn jako kritérium pro vývoj privilegované průsakové dráhy. Původní verze matematického modelu tvořila čtyř - silová rovnice (Deltares, 2012). Tento vztah však platil pouze v okamžiku, kdy průsaková dráha byla 10 krát větší jak rozdíl hladin  $H'$ . Následně byla v roce 2006 čtyř – silová rovnice přetvořena na dvou – silovou rovnici (Sellmeijer, 2006).

### **3.3 Jednotlivé typy lokálních filtračních deformací**

V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé typy lokálních filtračních deformací, které jsou rozlišeny dle stejnozrnnosti zeminy (sufoze, eroze) a dle místa výskytu.

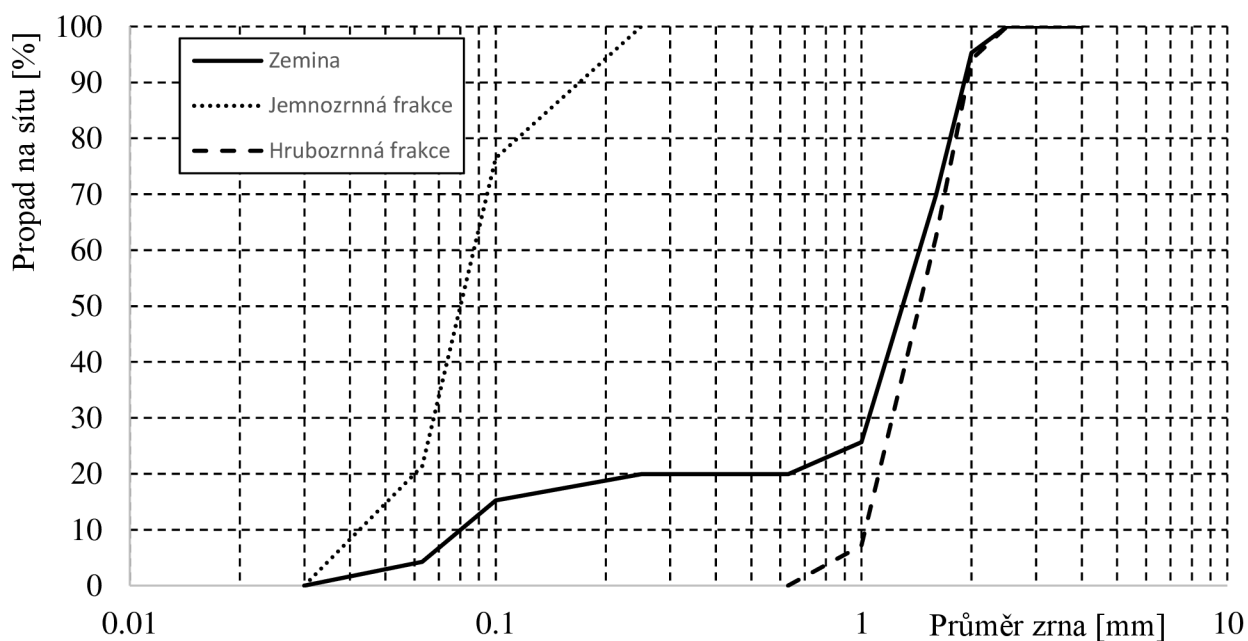
#### **3.3.1 Vnitřní sufoze**

Ke vnitřní sufozi může dojít v porézním nestejnozrnném prostředí, kde dochází k pohybu jemných částic v pórech. Samotná vnitřní sufoze trvá při trvalém zatížení jen krátkou dobu, přičemž se postupně ucpávají póry v trase transportovaných částic. Pokud nemají uvolněné částice možnost dalšího transportu prostřednictvím kontaktní nebo vnější sufoze, dojde k úplnému ucpání tras a vnitřní sufoze dál nepokračuje (obr. 3.9). Vnitřní sufozi je možné předejít řádným zhutněním zeminy, regulací hydraulického gradientu, nebo v případě nově sypané zeminy dodržением geometrického kritéria.



**Obr. 3.9 Schéma vnitřní sufoze při sestupném proudění (Čas 1 : Počátek, Čas 2 : Ustálení pohybu jemnozrné frakce ucpáním transportních pórů)**

V případě nesterjnozrných materiálů, kde v materiálu nejsou zastoupeny některé frakce (obr. 3.10), lze křivku zrnitosti rozdělit na dvě odlišné křivky zrnitosti viz obr. 3.10 (Kézdi, 1979) a ty následně posuzovat proti sobě jako v případě kontaktní sufoze (kap. 3.3.3).



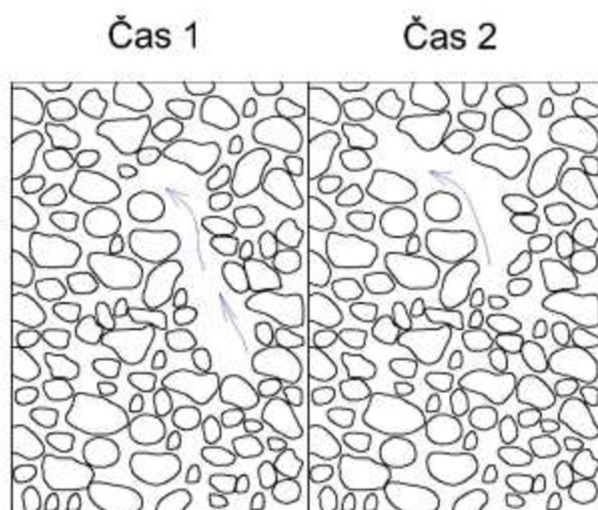
**Obr. 3.10 Posouzení nesterjnozrného materiálu dle Kézdiho**

Pro posouzení se následně používají geometrická kritéria kontaktní sufoze.

### **3.3.2 Vnitřní eroze**

Vnitřní eroze (obr. 3.11) nastává ve stejnozrné zemině podél oslabených zón s vyšší pórovitostí (propustností). Dochází k uvolňování a přeskupování zrn v zemině. Tato oslabená zóna se v materiálu posouvá ve směru proudění vody.

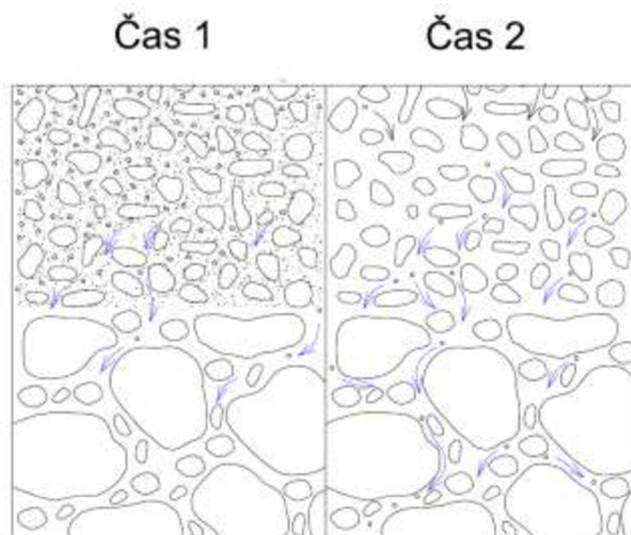




**Obr. 3.11 Schéma vnitřní eroze při vzestupném proudění**

### **3.3.3 Kontaktní sufoze**

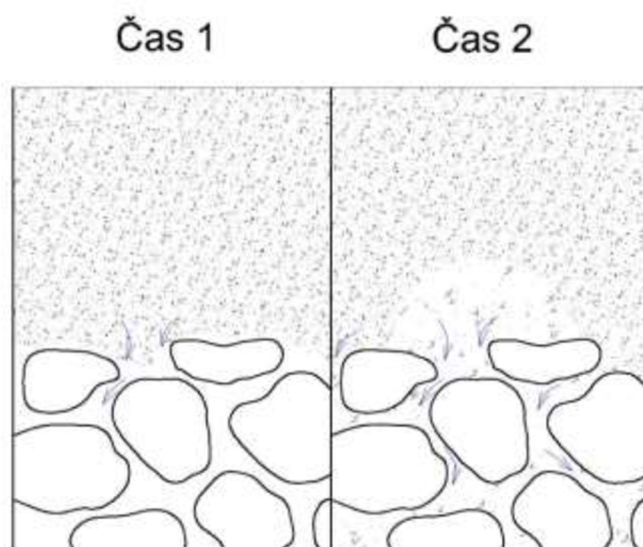
Ke kontaktní sufozi dochází na rozhraní zemin, kde v jemnozrnném materiálu dojde ke ztekucení jemnozrnnější frakce, která je postupně vyplavována do sousedního hrubozrnného materiálu (obr. 3.12). K tomu dochází pouze při proudění vody z jemnozrnného do hrubozrnného materiálu, popř. podél rozhraní obou materiálů. Kontaktní sufoze závisí na zrnitosti, tvaru zrn, pórovitosti a rozměrech pórů sousedících zemin, dále na režimu a směru proudění vody a velikosti specifického průtoku. Zvláštním případem je sufoze na styku drenů a jejich obsypu. V těchto místech se obvykle vyskytují největší hydraulické gradienty.



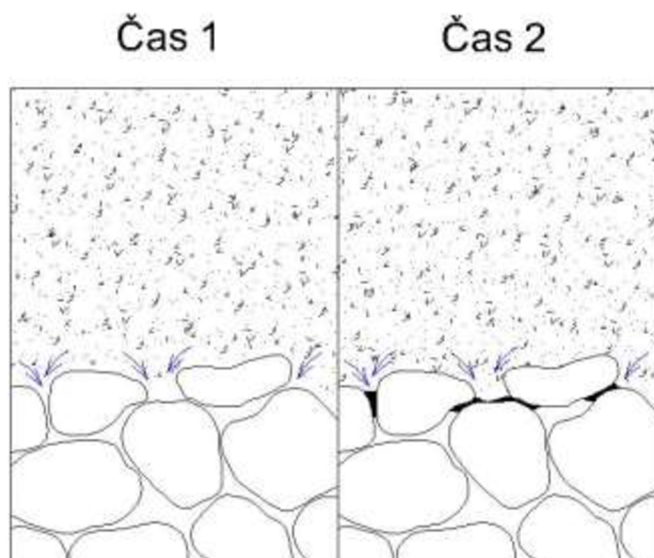
**Obr. 3.12 Schéma kontaktní sufoze při sestupném proudění (Čas 1: Počátek, Čas 2: Vyplavení jemnozrnných částic skrz filtr)**

### 3.3.4 Kontaktní eroze

Kontaktní eroze vzniká na rozhraní dvou zemín, kde voda proudí ze stejnozrné jemnozrné zeminy do hrubozrného materiálu. Při vyšším hydraulickém gradientu může dojít k vyplavování zrn. V případě špatného návrhu filtru, nebo při jeho nedostatečném zhutnění prochází jemnozrná frakce skrz filtr a dochází k tvorbě kaveren (obr. 3.13). Při správném návrhu a zhutnění se jemnozrný materiál zachytí v pórech hrubozrného a eroze se zastaví (obr. 3.14).



**Obr. 3.13 Schéma kontaktní eroze u špatně navrženého filtru (Čas 1: Počátek, Čas 2: Vyplavení jemnozrných částic)**

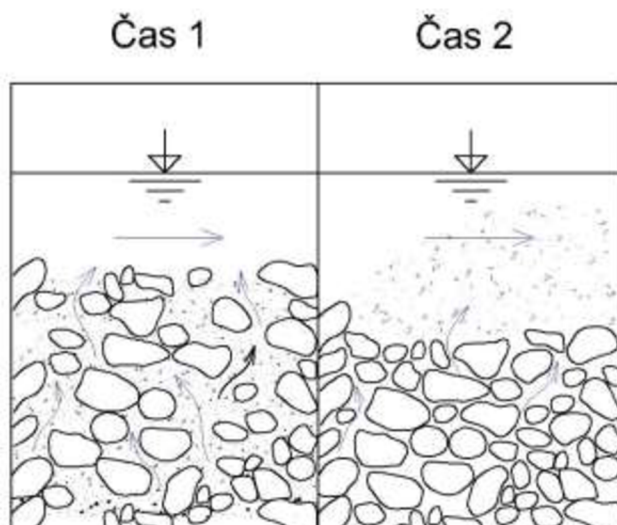


**Obr. 3.14 Schéma kontaktní eroze u správně navrženého filtru (Čas 1: Počátek, Čas 2: Ucpání transportních pórů)**

Kontaktní eroze je více nebezpečná než kontaktní sufoze, protože při erozi dochází k vyplavování celého objemu materiálu, které může vést k tvorbě kaveren (obr. 3.14). U kontaktní sufoze i eroze hraje hlavní roli kombinace správného návrhu filtru a jeho dostatečné zhutnění.

### **3.3.5 Vnější sufoze**

Vnější sufoze vzniká na rozhraní nesterjnozrnne zeminy s vnějším prostředím, při kterém voda vysakuje zemní konstrukcí nebo podloží a vyvolává objemové zatížení vyvolané gradientem tlaku. Přitom dochází k vyplavování jemnějších částic (obr. 3.15).

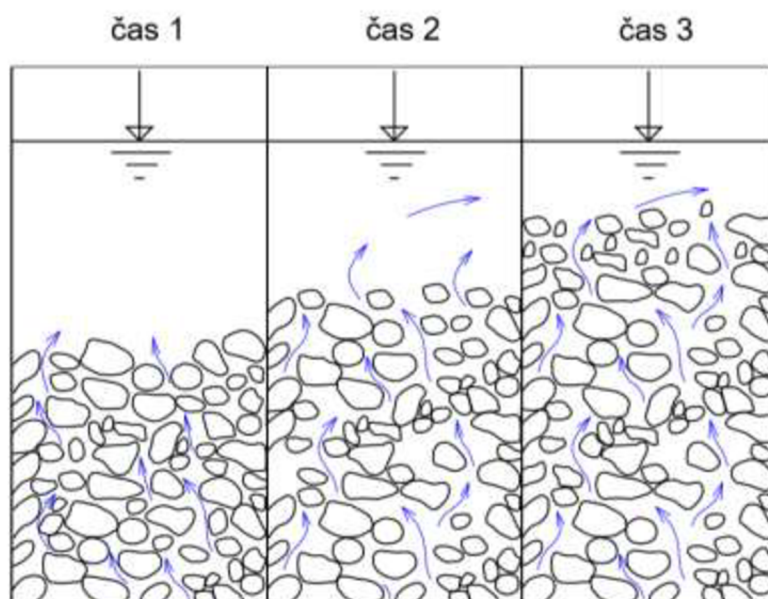


**Obr. 3.15 Vnější sufoze (Čas 1 : Počátek, Čas 2 : Vyplavení jemnozrných částic)**

Vyplavením jemnozrného materiálu dochází ke změně pórovitosti a hydraulické vodivosti materiálu. Může následně dojít k vyplavování větších frakcí zeminy a vzniku lokální nestability podloží nebo samotné konstrukce zejména v místech vysakování na její vzdušní straně.

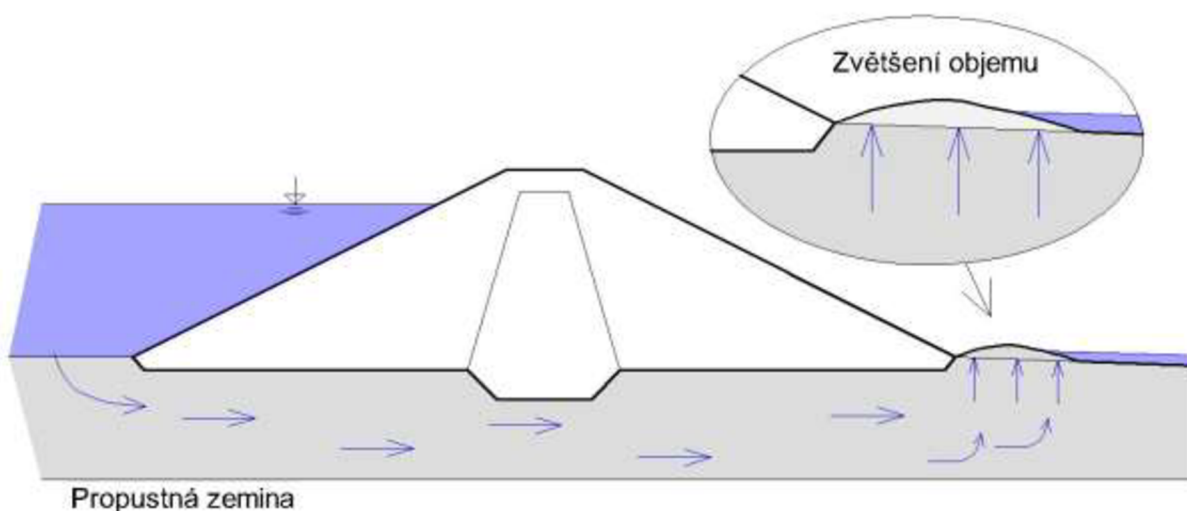
### **3.3.6 Ztekucení**

Ztekucení (obr. 3.16) je proces, který nastává ve stejnozrnne nesoudržné zemině v místě vzestupného vysakování vody do volného prostoru, které obvykle nastává na vzdušní 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.



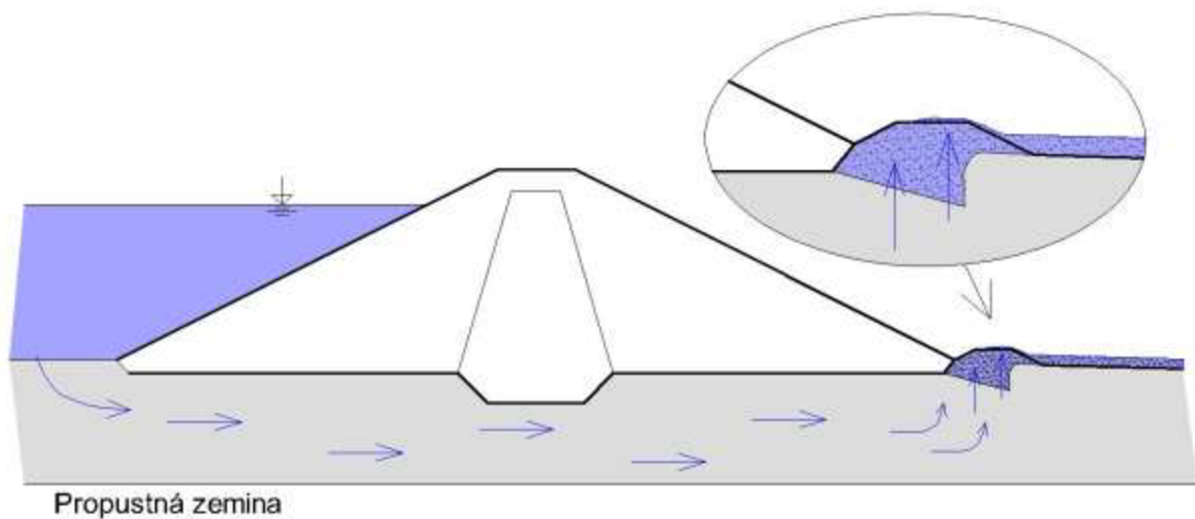
**Obr. 3.16 Ztekucení (Čas 1: Vnitřní stabilita, Čas 2: Zvětšení objemu, Čas 3: Ztekucení a odplavování zeminy)**

V první fázi (čas 1) dochází k vertikálnímu proudění vody, při kterém je zemina stabilní (nedochází k žádným změnám v objemu, hydraulické vodivosti ani k vyplavování částic). Ve druhé fázi (čas 2) je dosažen hydraulický gradient, při kterém dochází ke zvětšení objemu (obr. 3.17) a tudíž i ke zvýšení hydraulické vodivosti  $k$ . Nedomáhá se však k vyplavování zeminy.



**Obr. 3.17 Schéma počátku ztekucení**

V poslední fázi (čas 3) je dosažen kritický hydraulický gradient a klesne efektivní napětí v zemině prakticky na nulu. V tento okamžik dochází k pohybu všech frakcí zeminy jako směsi s vodou, která je vyplavována na povrch a vytváří typický kužel (obr. 3.18 a 3.19).



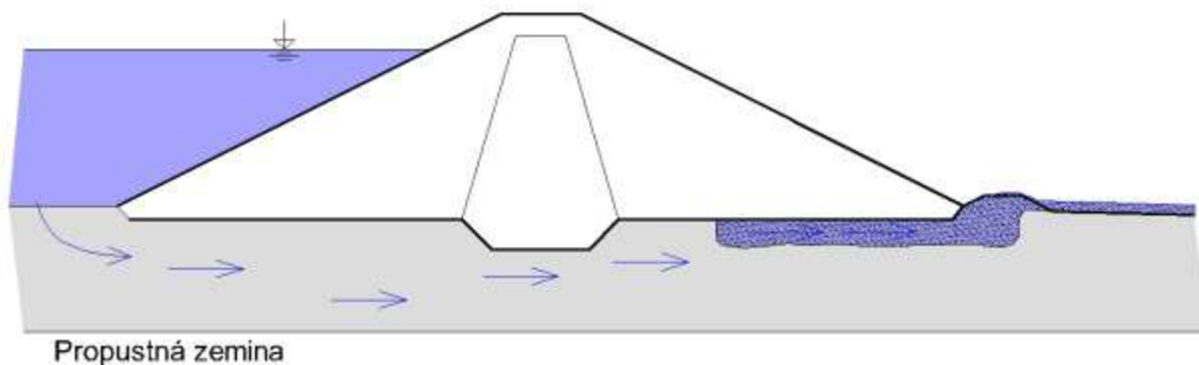
**Obr. 3.18 Schéma progresse ztekucení**



**Obr. 3.19 Vyplavování zeminy (Foto - Žatecký)**

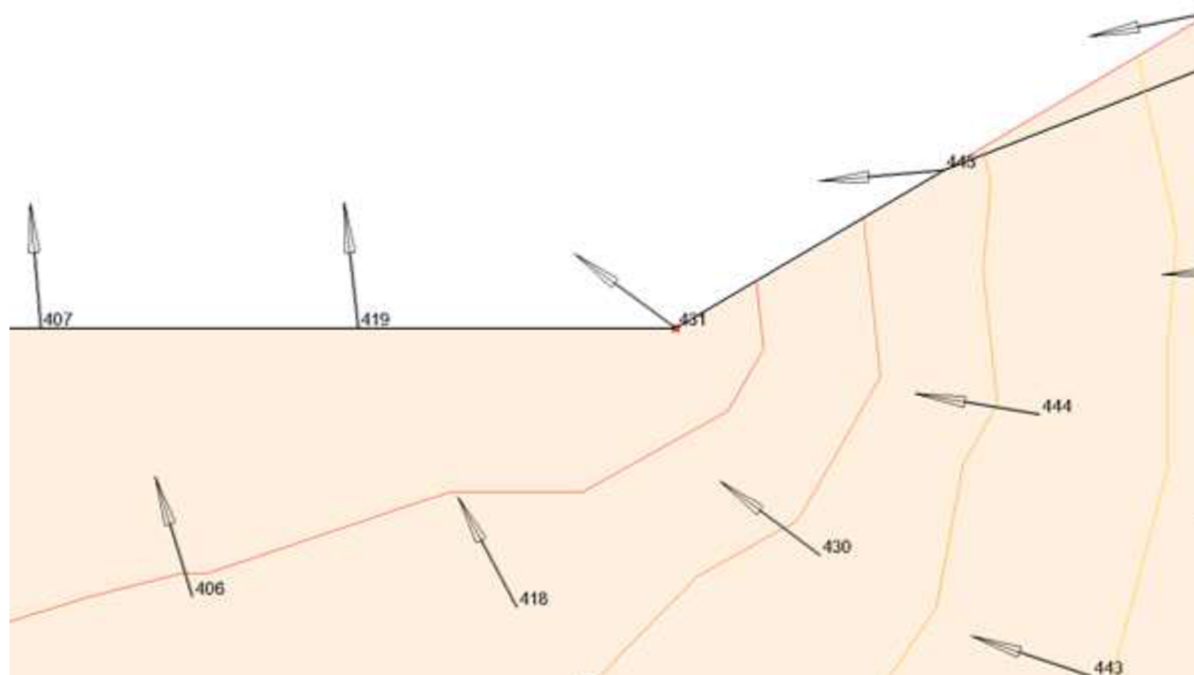
Pokud nedojde k poklesu hydraulického gradientu, může dojít k postupnému vyplavování zeminy (obr. 3.20) vlivem zpětné eroze a k tvorbě privilegované cesty (piping), což může mít za následek úplné porušení konstrukce.





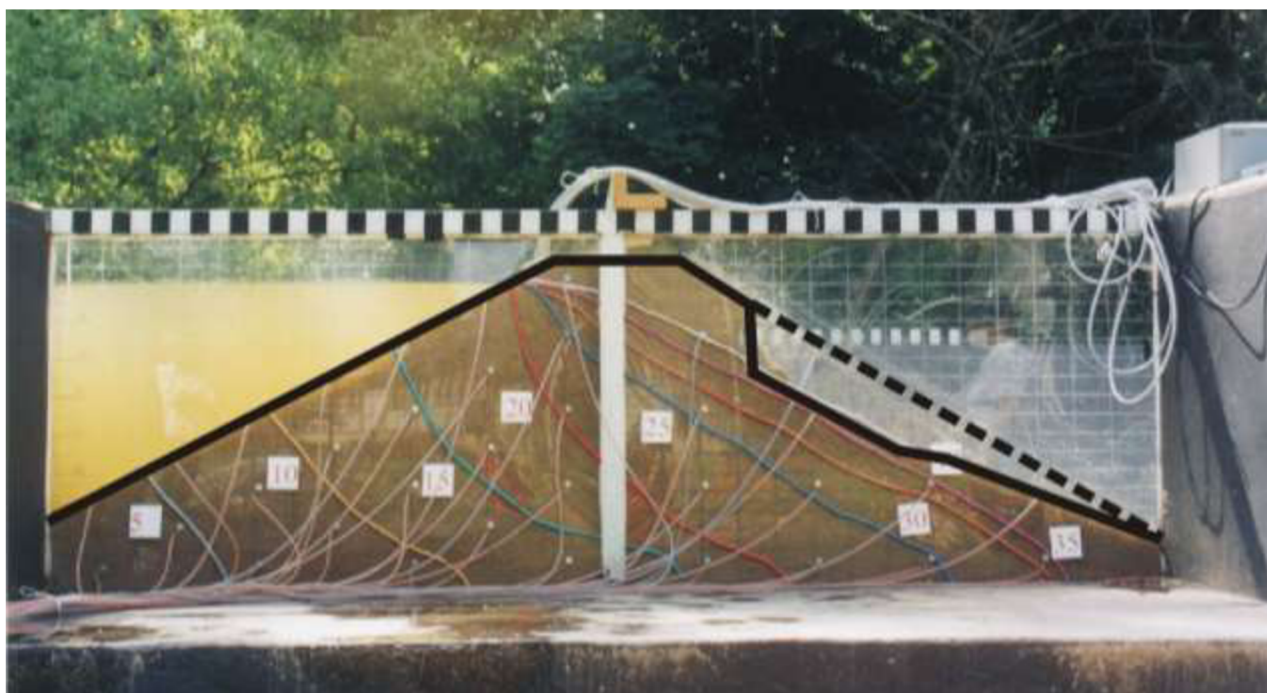
**Obr. 3.20 Průběh zpětné eroze a tvorba privilegované cesty**

Možnost vzniku ztekucení lze posuzovat pomocí vyjádření podmínky mezní rovnováhy. Ztekucení lze posuzovat na základě vyjádření stabilizující složky (vlastní tíhy) a složky destabilizující (vztlak a vliv gradientu tlaku). Na obr. 3.21. jsou na svahu znázorněny směry proudění vody, tedy směr vektoru hydraulického gradientu  $J$  v podhráží.



**Obr. 3.21 Schéma směru působení hydraulického gradientu (Julínek, 2016)**

V případě velkých hydraulických gradientů  $J$  na svahu a v patě hráze může dojít k postupnému vyplavování materiálu z návodního svahu, které je zobrazeno na obr. 3.22 a 3.23, kde je model homogenní písčité sypané hráze zatížené průsakem.



**Obr. 3.22 Příčný řez modelem homogenní sypané hráze (Foto - Pařílková)**



**Obr. 3.23 Pohled na vzdušnou stranu porušeného modelu homogenní sypané hráze (Foto - Pařílková)**

### 3.4 Kritéria pro posouzení vzniku filtračních deformací

Podmínky mezního stavu vzniku filtrační deformace zemin jsou založeny na hodnocení geometrických a hydraulických kritérií. Geometrické kritérium je založeno na fyzikálních vlastnostech zeminy (zrnitost a pórovitost). Například při kontaktní sufozi se porovnává velikosti zrn chráněné zeminy s velikostmi zrn filtru (následující hrubozrnnější frakce), případně i jeho mírou zhutnění. V případě, že u zeminy nevyhovuje geometrické kritérium, nebo ho nelze stanovit, je nutné posoudit situaci zeminy na hydraulické kritérium. U hydraulického kritéria se posuzuje odolnost materiálu vůči gradientu pórového tlaku.

#### 3.4.1 Geometrické kritérium

Pro geometrické kritérium je určující zrnitost a pórovitost zeminy, nebo v případě kontaktní sufoze (eroze) i na materiálu na jejich vzájemném styku obou materiálů. Z hlediska posuzování mají geometrická kritéria povahu mezního stavu použitelnosti. Geometrické kritérium nelze použít při posuzování vnější sufoze/ztekucení.

Pro posun jednotlivých zrn v materiálu a následné vyhodnocení geometrických kritérií je důležité stanovit maximální velikost pórů  $d_0^{max}$  [Rekomendacii, 1991]:

$$d_0^{max} = \chi 0,455 \sqrt[6]{C_U} \frac{n}{1-n} d_{17}, \quad (3.2)$$

kde  $\chi$  je faktor nestejnozrnnosti,  $n$  je pórovitost,  $d_{17}$  je průměr zrna odpovídající na čáře zrnitosti 17 % propadu a  $C_U$  je číslo nestejnozrnnosti:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (3.3)$$

#### 3.4.2 Hydraulické kritérium

Hydraulické kritérium se posuzuje při nesplnění geometrického kritéria u zemin náchylných filtračním deformacím, popř. pokud geometrického kritéria nelze použít (nejsou podrobnější údaje o zeminách, vnější sufoze, ztekucení).

Hydraulické kritérium posuzuje odolnost zeminy vůči zatížení vyvolané prouděním podzemní vody. Pro vyjádření charakteristické hodnoty zatížení se používá hydraulický gradient. Obecný tvar hydraulického kritéria je:

$$J_{K,d} \geq J_d \quad (3.4)$$

kde  $J_{K,d}$  je návrhová hodnota kritického gradientu a  $J_d$  je návrhový hydraulický gradient v zemní konstrukci.



## 4. 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 (mezní 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.

### 4.1 Podmínky vzniku ztekucení

Geometrické kritérium v případě ztekucení neexistuje a je pouze definováno kritérium hydraulické. Hydraulické kritérium v průběhu 20. století stanovilo několik autorů na základě laboratorních pokusů nebo pomocí fyzikálního odvození:

- Pavlovskij,
- Knorre,
- Zamarin,
- Terzaghi,
- Goldstein,
- Gershevanov,
- Istomina.

U hydraulického kritéria se posuzuje, zda je kritický hydraulický gradient  $J_K$  menší jak hodnota hydraulického gradientu v zemině  $J_d$ .

## **4.2 Rozbor působících sil**

V zemině v zahrází 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.

## **4.3 Sestavení podmínky spolehlivosti**

Bezpečnost vůči porušení vlivem ztekucení se dá vyjádřit dvěma způsoby. Prvním je vyjádření stupně bezpečnosti  $SF$  (Stupeň bezpečnosti), který porovnává charakteristické síly stabilizační a destabilizační. Druhou a v dnešní době užívanější metodou je metoda dílčích součinitelů. Porovnávají se návrhové hodnoty sil, které se vyjádří prostřednictvím charakteristických hodnot a dílčích součinitelů. Pro některé případy nejsou v normách hodnoty dílčí součinitelů přesně stanoveny, viz ztekucení [ČSN EN 1997-1].

## **4.4 Stanovení fyzikálních vlastností zemin**

Pro každý zkoumaný materiál, se v laboratoři stanovily tyto základní fyzikální vlastnosti (kap. 8):

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

Tvar zrna byl stanoven pomocí konfokálního mikroskopu ve spolupráci s Ústavem fyziky na Vysokém učení technickém na Stavební fakultě, pro stanovení měrné hmotnosti zrna pomocí normy ČSN 72 1007 se použily pyknometry ve spolupráci s Ústavem vodního hospodářství krajiny na FAST VUT a křivka zrnitosti byla stanovena pomocí sady normovaných sít.

## **4.5 Popis zařízení pro sledování kritického hydraulického gradientu**

Před zahájením laboratorních pokusů bylo provedeno:

- popis zařízení,
- geometrie propustoměru,
- stanovení ztrát na geotextilii.

Bylo popsáno zařízení a zapojení propustoměru do soustavy, použité propustoměry byly přeměřeny pomocí digitální šuplery a pro stanovení ztráty na geotextilii a dalších použitých sítích poslouží laboratorní pokusy.

#### **4.6 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,
- syčení 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.

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

#### **4.7 Průběh porušení a jeho identifikace**

V průběhu měření byly sledovány různé identifikátory, ty byly nakonec shrnuty a byly stanoveny fáze porušení:

- vzorek bez změny,
- protahování vzorku,
- lokální pohyb zrn,
- ztekucení (úplné porušení).

#### **4.8 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.

#### **4.9 Rozbor a vyhodnocení výsledků**

Po dokončení všech laboratorních pokusů se porovnávaly hodnoty kritického hydraulického gradientu mezi sebou a provede se rozbor vlivu fyzikálních vlastností materiálů. Následně byly výsledky porovnány s empirickými vztahy.

#### **4.10 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:

- třídění dat,
- návrh typů rozdělení,
- statistická analýza a výsledky.

##### **4.10.1 Stanovení náhodných veličin a variant**

Podíl hodnot kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$  stanovených měření v laboratoři a vypočítané hodnoty kritického hydraulického gradientu  $J_{K,Ter}$  dle rovnice (5.5), tvoří náhodné veličiny, dle kterých se stanovují dílčí součinitele  $\gamma_{M,J}$ . Náhodné veličiny budou tvořit samostatné materiály a několik navržených variant dle fyzikálních vlastností materiálu (tvar zrna, číslo nestejnozrnnosti, velikost zrn).

##### **4.10.2 Návrh typů rozdělení**

Pro návrh typu rozdělení byl použit program Statistica, v programu se vykreslily histogramy s předem navrženým počtem intervalů  $PI$ . Poté se navrhly základní typy rozdělení, které mohou být následně doplněné o další.

##### **4.10.3 Statistická analýza a výsledky**

V případě vybrání více rozdělení byly jednotlivé výsledné dílčí součinitele pro vybrané varianty posuzovány vůči sobě a byla posuzována vhodnost vybraného rozdělení. Po posouzení rozdělení se stanovily jednotlivé dílčí součinitele. Pomocí programu Statistica byly vyhodnoceny jednotlivé funkce hustot vybraného rozdělení, ze kterých se následně dopočítala hodnota dílčího součinitele  $\gamma_{M,J}$  pro pravděpodobnost překročení  $P = 95,0; 99,0; 99,9 \%$ .

## 5. PODMÍNKY VZNIKU ZTEKUCENÍ

Geometrické kritérium nelze v případě ztekucení využít, uplatní se pouze hydraulické kritérium.

### 5.1 Hydraulické kritérium pro ztekucení

Při posuzování hydraulického kritéria se porovnávají stabilizační a destabilizační složky sil. Stabilizační složka je určena kritickým hydraulickým gradientem  $J_K$ , který vyjadřuje maximální přípustné zatížení hydraulickým tlakem. Hodnotu kritického hydraulického gradientu lze stanovit pomocí norem, laboratorními zkouškami apod. Destabilizační složku určuje hodnota hydraulického gradientu v zemní konstrukci  $J$ .

V případě proudění vody ke studnám se často používá jako kritérium hodnota specifického průsaku  $q$ . Při posouzení lokální stability se používá místních hodnot uvedených veličin, při posouzení globální stability pak obvykle hodnoty středního hydraulického gradientu.

### 5.2 Kritický hydraulický gradient dle různých autorů

První empirický vztah definoval **Pavlovskij (1922)**, který uvádí přípustnou filtrační rychlost  $v_p$  a přípustný hydraulický gradient  $J_p$  pro zeminy o velikosti zrna  $d=0,25$  až  $1,0$  mm:

$$v_p \approx 1000kd \quad (5.1)$$

$$J_p \approx 1000d \quad (5.2)$$

kde  $k$  je hydraulická vodivost a  $d$  velikost zrna. **Knorre (1925)** stanovil vztah na základě rovnováhy sil působících na homogenním izotropním stejnozrnném materiálu. Doporučuje posuzovat stabilitu při vertikálním vzestupném vysakování pomocí kritického hydraulického gradientu  $J_K$  dle vztahu:

$$J_K = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (5.3)$$

kde  $\gamma_s$  je měrná tíha částičky a  $\gamma_w$  je měrná tíha vody. Ve vztahu není uveden vliv pórovitosti a tím vztah hodnoty kritického hydraulického gradientu nadhodnocuje.

Později tento vztah upravili autoři Zamarin (1931) a Terzaghi (1996). **Zamarin (1931)** na základě teoretické a experimentální analýzy navrhl vztah pro určení kritického hydraulického gradientu  $J_K$ , kde zohledňuje i pórovitost posuzované zeminy.

$$J_K = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)(1 - n)}{\gamma_w} + 0,5n \quad (5.4)$$

kde  $n$  je pórovitost. **Terzaghi (1943)** na základě studia filtrační stability pro vertikální proudění u stejnozrnného homogenního materiálu odvodil vztah:

$$J_K = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)(1 - n)}{\gamma_w} \quad (5.5)$$

**Goldstein (1953)** za pomoci experimentální analýzy uvedl vztah, který užíval číslo pórovitosti místo pórovitosti  $n$ :

$$J_K = \frac{\gamma_s - 1}{1 + e} \quad (5.6)$$

kde  $e$  je číslo pórovitosti dle:

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (5.7)$$

Vztah Goldsteina (5.6) je po úpravě stejný jako vztah Terzaghiho (5.5).

**Gersevanov (1948)** definoval kritický hydraulický gradient  $J_K$  na základě podmínky, kdy dochází k přechodu z laminárního proudění na proudění turbulentní. Tento přechod definoval hodnotou Reynoldsova kritéria  $Re = 0,1$ . Těto hodnotě pak odpovídá tento vztah:

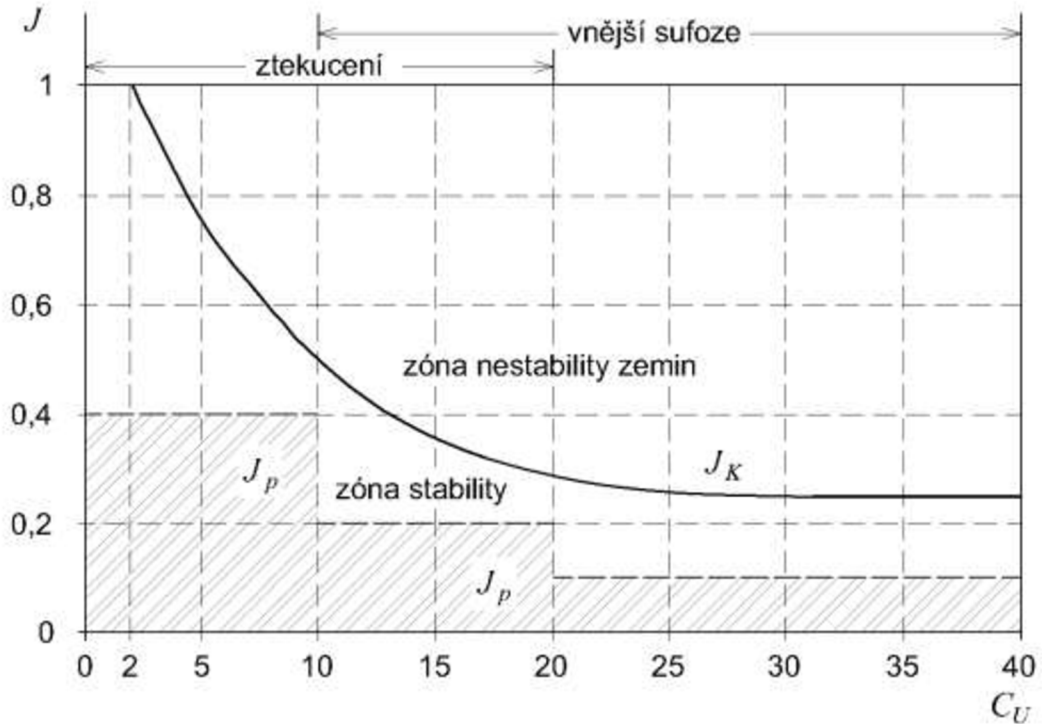
$$J_K = \frac{10^{-7}}{kd_0} \quad (5.8)$$

kde  $d_0$  je průměrná velikost póru.

**Istomina (1957)** provedla pokusy na více jak 20 přírodních materiálech. Na základě pokusů zjistila závislost mezi kritický hydraulickým gradientem  $J_K$  a číslem nestejnozrnnosti  $C_U$  a podle těchto hodnot stanovila hodnoty přípustného hydraulického gradientu  $J_p$  (tab. 5.1) v závislosti na čísle nestejnozrnnosti  $C_U$  (obr. 5.1)

Materiály, které byly použity pro odvození hodnot přípustného hydraulického gradientu  $J_p$  mají následující charakteristiky:

- číslo nestejnozrnnosti  $C_U \in \langle 2,3; 39,3 \rangle$ ,
- průměr zrna  $d_{50} \in \langle 0,1; 8 \rangle$  mm,
- průměr zrna  $d_{10} \in \langle 0,057; 0,28 \rangle$  mm.



**Obr. 5.1** Návrhové hodnoty přípustného hydraulického gradientu dle Istominy (1957)

**Tab. 5.1** Návrhové hodnoty kritického hydraulického gradientu při vzestupném proudění [Istomina, 1957]

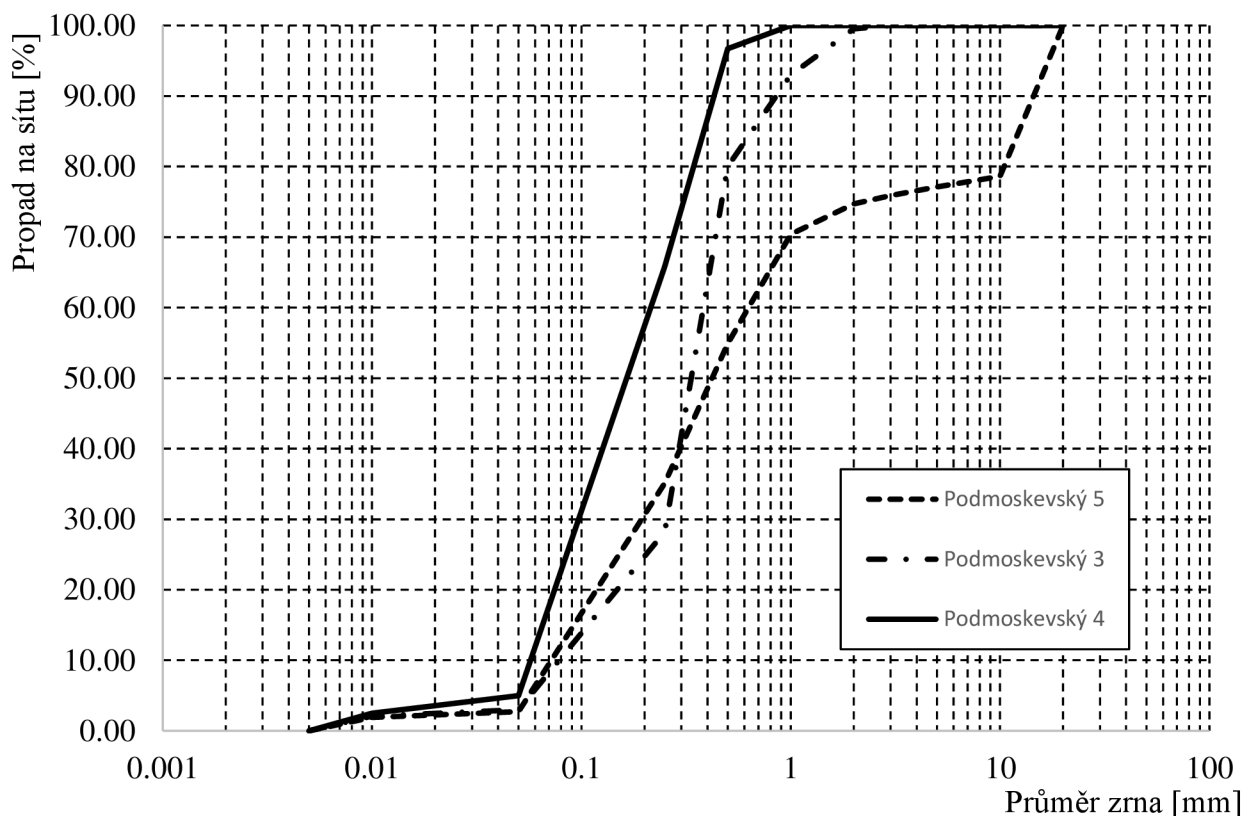
Číslo nestejnzornosti $C_U$	Návrhové hodnoty přípustného hydraulického gradientu $J_p$	Převládající typ porušení
$C_U < 10$	0,4	Ztekucení
$10 \leq C_U \leq 20$	0,2	Ztekucení i vnější sufoze
$C_U > 20$	0,1	Vnější sufoze

Istominina metoda na rozdíl od předchozích vztahů, nezahrnuje objemové hmotnosti zrna ani pórovitost  $n$ , ale pouze číslo nestejnzornosti  $C_U$ . Podle výzkumu Istominy [1957] je pórovitost závislá na čísle nestejnzornosti  $C_U$  [Vuković, Soro, 1992]:

$$n = 0,255(1 + 0,83^{C_U}) \quad (5.9)$$

Tento vztah reaguje na nestejnzornost materiálu, ale není zde uvažována míra zhutnění. Hodnoty jsou uváděny pro volně sypaný materiál.

Z literatury [Istomina, 1948, 1957] bylo možné určit 9 laboratorních pokusů na 3 různých materiálech, které jsou popsány v tab. 5.2. Všechny Podmoskevské písky mají číslo nestejnzornosti  $C_U < 10$ .



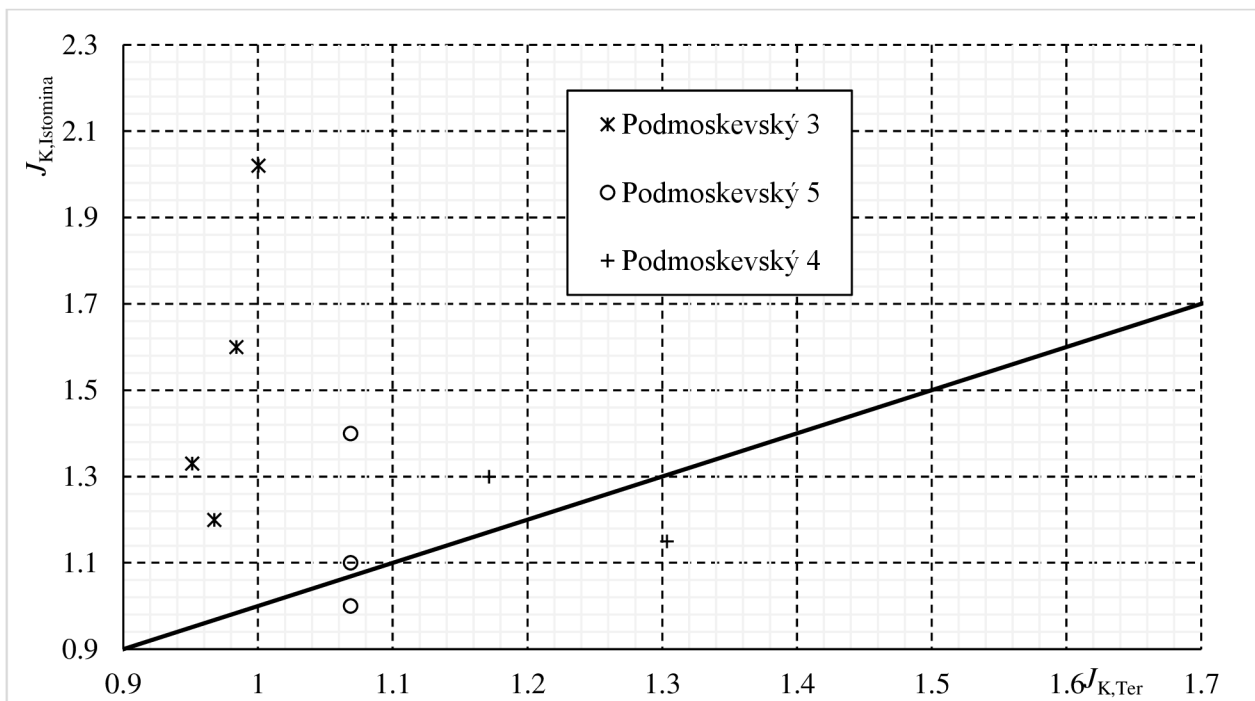
**Obr. 5.2 Křivky zrnitosti použitých materiálů [Istomina, 1957]**

**Tab. 5.2 Fyzikální vlastnosti použitých materiálů [Istomina, 1957]**

Název materiálu	č. p.	$\rho_s$	$n$	$\rho_{ef}$	$\rho_w$	$J_{K, Ter}$	$J_{K, Istomina}$
	[-]	[kgm <sup>-3</sup> ]	[-]	[kgm <sup>-3</sup> ]	[kgm <sup>-3</sup> ]	[-]	[-]
Podmoskevský 3	11	2640	0,39	1610	1000	1,00	2,02
	30M	2640	0,40	1584	1000	0,98	1,60
	33M	2640	0,41	1558	1000	0,97	1,20
	34M	2640	0,42	1531	1000	0,95	1,33
Podmoskevský 5	37M	2670	0,36	1709	1000	1,07	1,40
	38	2670	0,36	1709	1000	1,07	1,00
	41	2670	0,36	1709	1000	1,07	1,10
Podmoskevský 4	5	2650	0,21	2094	1000	1,30	1,15
	44	2650	0,29	1882	1000	1,17	1,30

Výsledky Istominy (1957) jsou na obr. 5.3 porovnány s hodnotami vypočítanými dle Terzaghiho (5.5). Z 9 výsledků laboratorních pokusů má 7 pokusů hodnotu kritického hydraulického gradientu  $J_{K, Istomina}$  vyšší než je hodnota vypočítaná dle Terzaghiho  $J_{K, Ter}$ .





**Obr. 5.3** Závislost naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu [Istomina, 1948, 1957] s hodnotami vypočtenými [Terzaghi, 1943]

Jacobson [2013] stanovil empirické vztahy pro výpočet kritického hydraulického gradientu  $J_K$ , pro jednotlivé fáze porušení. Pro stanovení empirických vztahů použil měření Fleshmana a Rice [2013], kteří pro pokusy použili stejnozrný materiál ( $C_U < 2$ ) s různými fyzikálními vlastnostmi.

**Tab. 5.3** Použité materiály pro vyhodnocování [Jacobson, 2013]

Typ zeminy	Efektivní objemová hmotnost zeminy	Úhel vnitřního tření	$d_{50}$	Číslo nestejnozrnnosti	Pórovitost
-	kg.m <sup>-3</sup>	°	mm	-	-
Ostrohranný materiál zrněný	1600	38	0,37	1,84	0,394
Ostrohranný materiál 20 - 30	1560	39	0,70	1,18	0,408
Granátový písek	1990	39	0,35	2,00	0,485
Ottawa zrněná	1780	35	0,37	1,84	0,324
Ottawa 20 - 30	1790	35	0,70	1,18	0,320
Skleněné kuličky 0,4 – 0,6 mm	1590	22	0,50	1,20	0,471
Zirkoniové kuličky 0,3 – 0,4 mm	2470	24	0,35	1,20	0,248
Zirkoniové kuličky 0,6 – 0,8 mm	2445	23	0,70	1,18	0,259
Zirkoniové kuličky	2565	24	0,37	1,84	0,219

Ve svých měřeních Fleschman a Rice [2013] definovali celkově 4 fáze porušení:

- první viditelný pohyb,
- postupné protahování (5.10),
- lokální ztekucení (5.11),
- globální ztekucení (5.12).

K těmto fázím porušení následně stanovili regresní rovnice. Tyto rovnice jsou kvantifikovány dle půdních charakteristik (objemová hmotnost zrna zeminy, úhel vnitřního tření, velikost částic, čísla nestejnozrnnosti a pórovitosti):

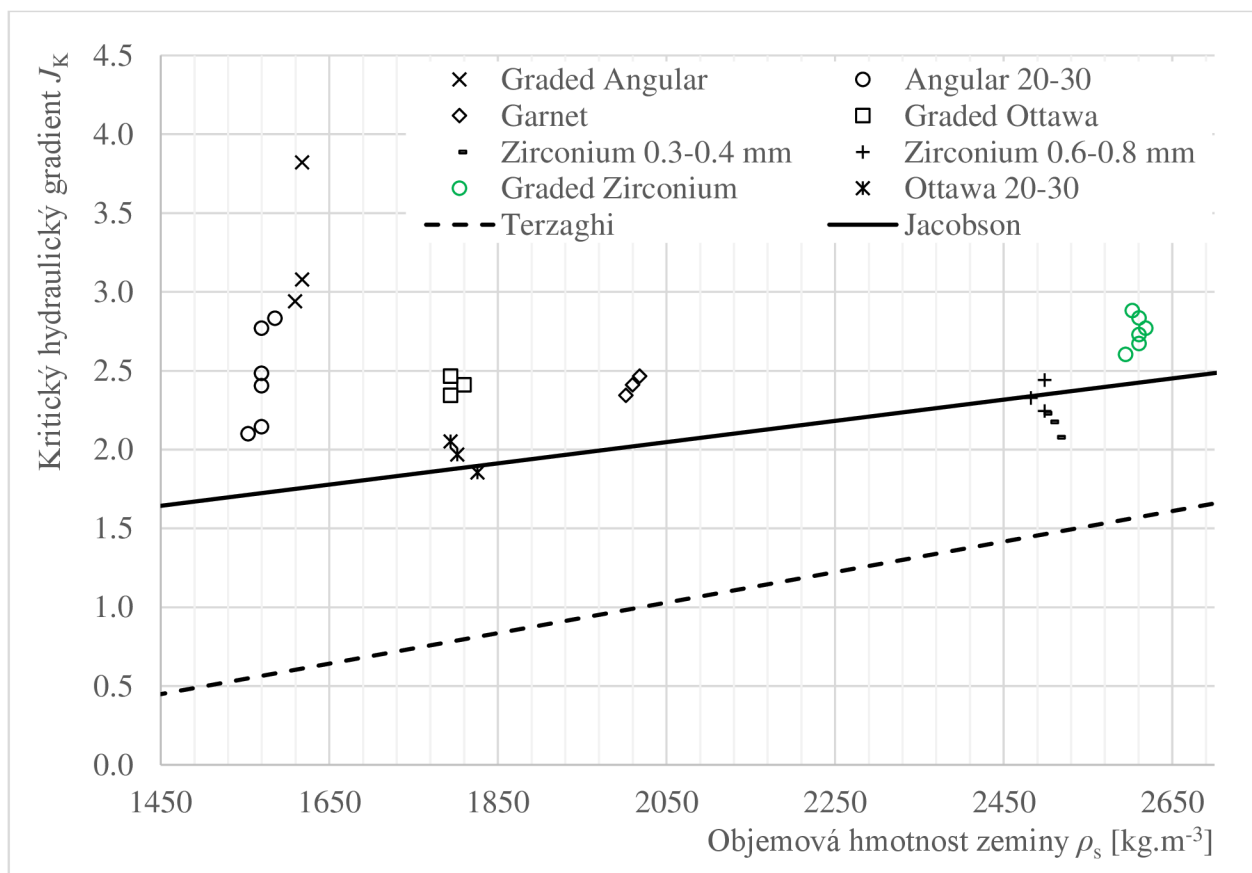
$$J = 0,014\gamma_s + 0,68tg(\varphi) - 0,059D_{50} + 0,2C_U - 0,52e - 0,52 \quad (5.10)$$

$$J = 0,00041\gamma_s - 1,82tg(\varphi) + 0,53D_{50} + 0,27C_U + 0,85e + 2,09 \quad (5.11)$$

$$J = 0,014\gamma_s + 0,68tg(\varphi) - 0,059D_{50} + 0,2C_U - 0,52e - 0,52 \quad (5.12)$$

kde  $\gamma_s$  je měrná tíha zrn zeminy,  $\varphi$  je úhel vnitřního tření,  $d_{50}$  je průměr zrna zeminy odpovídající na křivce zrnitosti 50% propadu,  $C_U$  je číslo nestejnozrnnosti a  $e$  číslo pórovitosti (5.7).

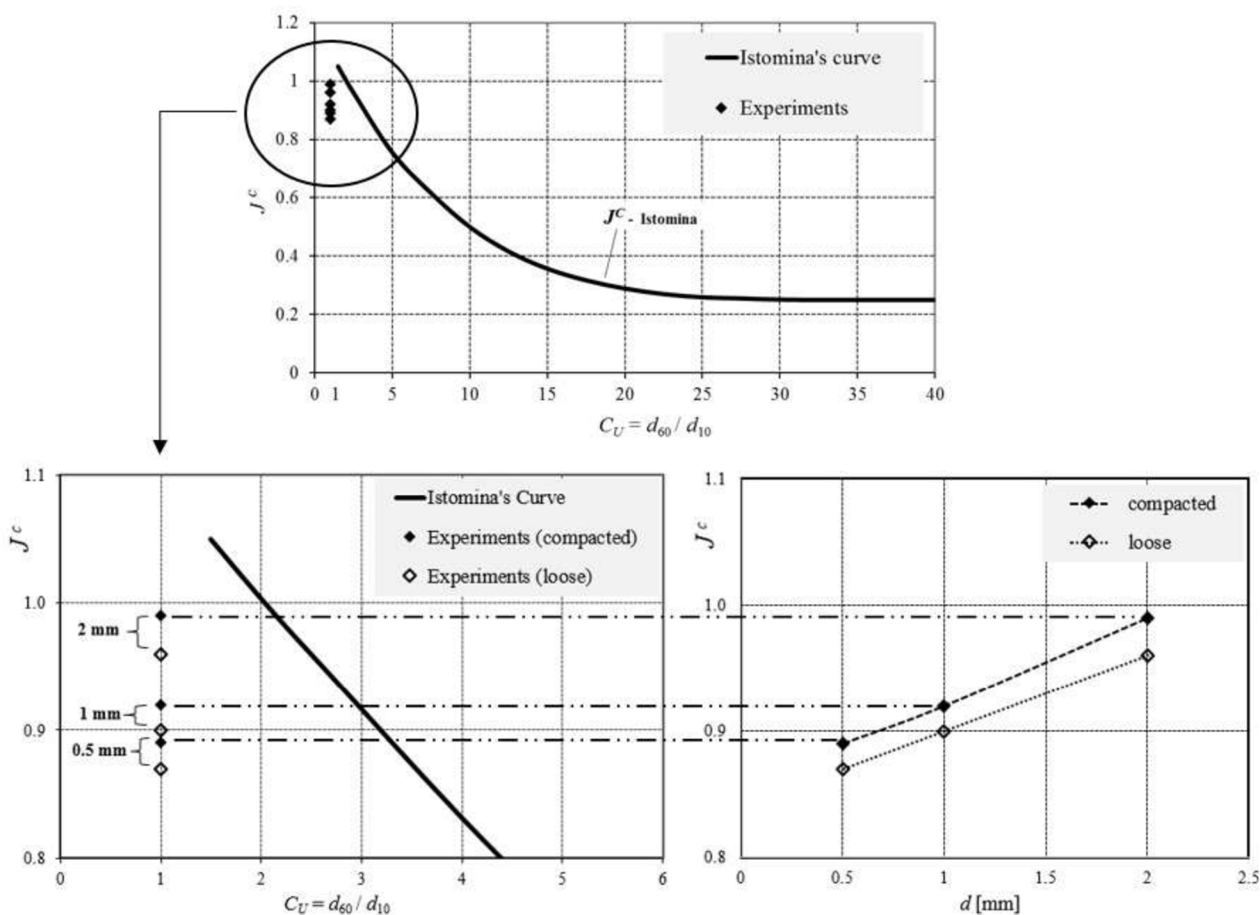
Pro stanovení kritického hydraulického gradientu  $J_k$ , tedy nejvyššího gradientu, při kterém dojde k porušení (globální ztekucení), je nejvhodnější užití odečtu z dolní okrajové podmínky na obr. 5.4, kde se vychází objemové hmotnosti zeminy.



Obr. 5.4 Stanovení dolní okrajové podmínky (Jacobson, 2013)

**Alhasan a kol. (2015)** prováděl pokusy v laboratoři na vertikálním propustoměru. Byly použity skleněné kuličky o různých průměrech (0,5; 1,0 a 2,0 mm), s předpokládaným číslem nestejnozrnnosti  $C_U = 1$ . V rámci výzkumu byl měřen kritický hydraulický gradient  $J_K$ . Výsledkem bylo zjištění, že velikost kritického hydraulického gradientu  $J_K$  ovlivňuje mimo jiné velikost zrna a míra zhutnění obr. 5.5. U pokusů Alhasan a kol. (2015) se používala jiná metodika pro stanovení pórovitosti  $n$ . U této metodiky bylo později zjištěno, že vypočítané hodnoty pórovitosti  $n$  mají velkou odchylku.

Většina vztahů pro stanovení kritického hydraulického gradientu  $J_K$  zohledňuje pórovitost materiálu. Ve vztazích nejsou zohledněny další fyzikální vlastnosti (tvar zrna, velikost zrna nebo číslo nestejnozrnnosti) které ovlivňují způsob porušení a také velikost kritického hydraulického gradientu.



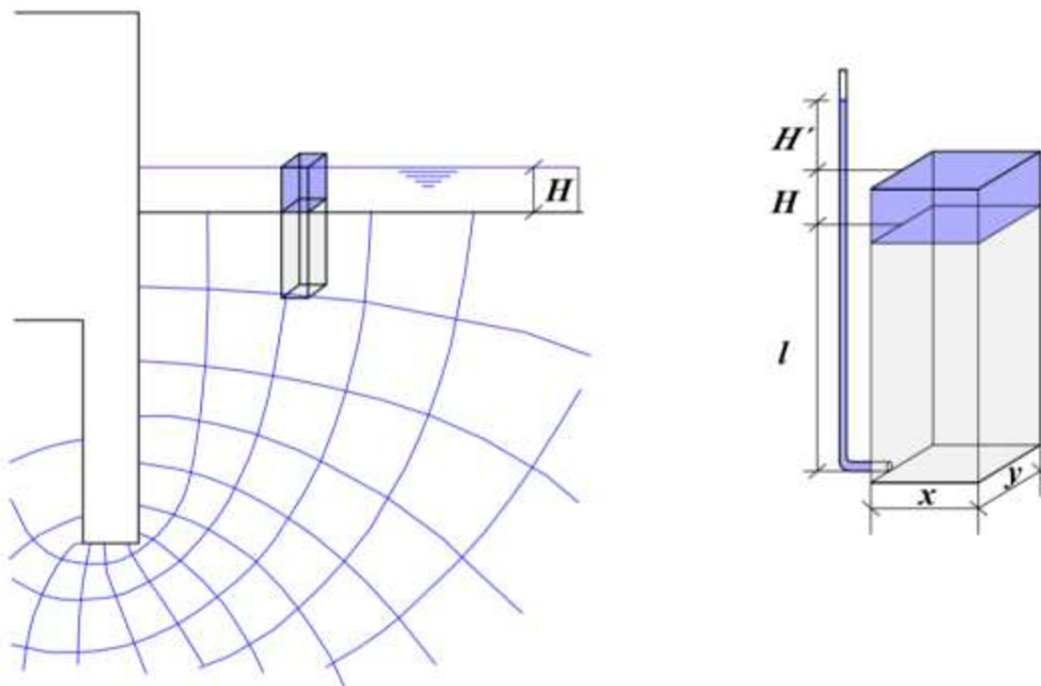
**Obr. 5.5** Vliv velikosti zrna dle Alhasana a kol. (2015)



**Obr. 5.6 Vertikální propustoměr zapojený do soustavy se skleněnými kuličkami (Alhasan a kol., 2015)**

## 6. ROZBOR PŮSOBÍCÍCH SIL A ODVOZENÍ PODMÍNKY MEZNÍ ROVNOVÁHY

Tato disertační práce hodnotí porušení nesoudržných zemin vlivem ztekucení, které je popsáno v Eurokódu [ČSN EN 1997-1] jako porušení nadzdvížením dna. Při posuzování mezního stavu porušení nadzdvížením dna v důsledku proudění vody (HYD) v základové půdě, se musí ověřit pro každý relevantní sloupec zeminy (obr. 6.1), že hodnota destabilizující síly u paty sloupce je menší nebo rovna stabilizující síle [ČSN EN 1997-1].



**Obr. 6.1 Rovnováha sil při vzestupném proudění [Vuković, Pušič 1992]**

$l$  je mocnost vrstvy zeminy,  $H$  výšku hladiny nad vrstvou zeminy,  $H'$  je rozdíl piezometrické výšky,  $x$  a  $y$  jsou plošné rozměry sloupce zeminy.

### Identifikace působících sil

V této části budou identifikovány jednotlivé složky sil, které působí v zemní konstrukci či jejím podloží pro vybraný sloupec o ploše  $A$ . Výsledná síla  $F$  se vypočítá dle vztahu 6.1. Působí zde dva typy sil:

- stabilizující  $F_{stb}$  (6.2),
- destabilizující  $F_{dstb}$  (6.3).

$$F = F_{stb} + F_{dstb} \quad (6.1)$$

$$F_{stb} = \sum_1^n F_{stb,1} + F_{stb,2} + \dots + F_{stb,i} + \dots + F_{stb,n} \quad (6.2)$$

$$F_{dstb} = \sum_1^m F_{dstb,1} + F_{dstb,2} + \dots F_{dstb,i} + \dots F_{dstb,m} \quad (6.3)$$

### 6.1 Vysušená zemina

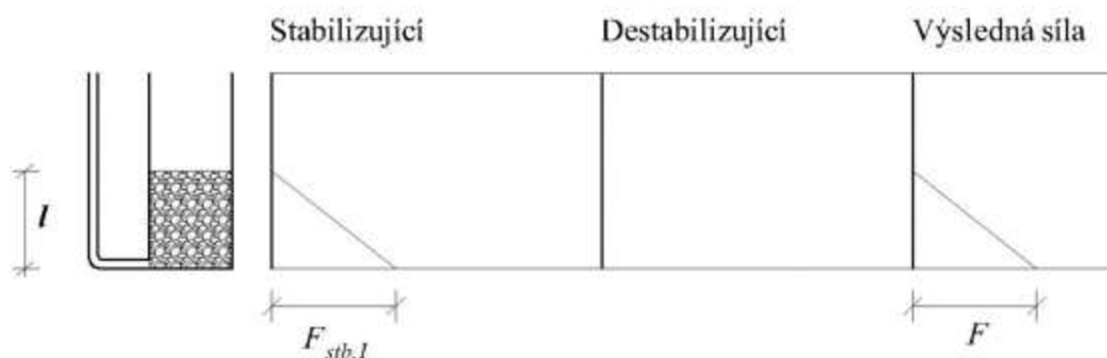
V případě, kdy je zemina vysušena (obr. 6.2), lze výslednou sílu určit následovně:

$$F = F_{stb} = F_{stb,1} \quad (6.4)$$

$F_{stb,1}$  je stabilizační síla od tíhy vzorku:

$$F_{stb,1} = A\rho_s g(1 - n)l \quad (6.5)$$

kde  $A$  je plocha propustoměru,  $\rho_s$  je specifická objemová hmotnost zrn,  $g$  je tíhové zrychlení,  $n$  je pórovitost a  $l$  je délka vzorku. Nepůsobí zde žádná destabilizující síla  $F_{dstb}$ .



Obr. 6.2 Působení sil ve vysušené zemině

### 6.2 Plně nasycený vzorek bez proudění

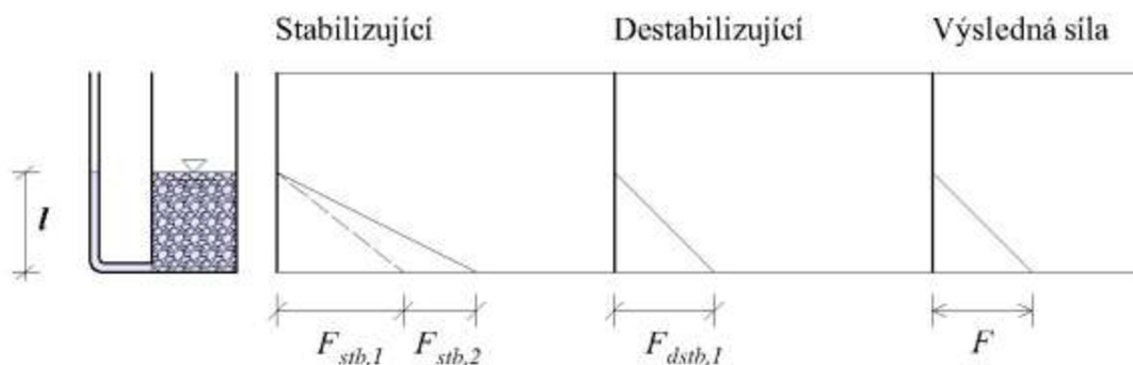
V případě, že je nasycený vzorek pod vodou (obr. 6.3), lze výslednou sílu vypočítat dle:

$$F = F_{stb,1} + F_{stb,2} + F_{dstb,1} \quad (6.6)$$

kde  $F_{stb,2}$  je stabilizující síla od tíhy vody v pórech a  $F_{dstb,1}$  je destabilizující síla tvořena vzlakem vody:

$$F_{stb,2} = A\rho_w gnl \quad (6.7)$$

$$F_{dstb,1} = -A\rho_w gl \quad (6.8)$$



Obr. 6.3 Působení sil v plně nasycené zemině bez proudění

### 6.3 Plně nasycený vzorek při stálém zatížení bez proudění

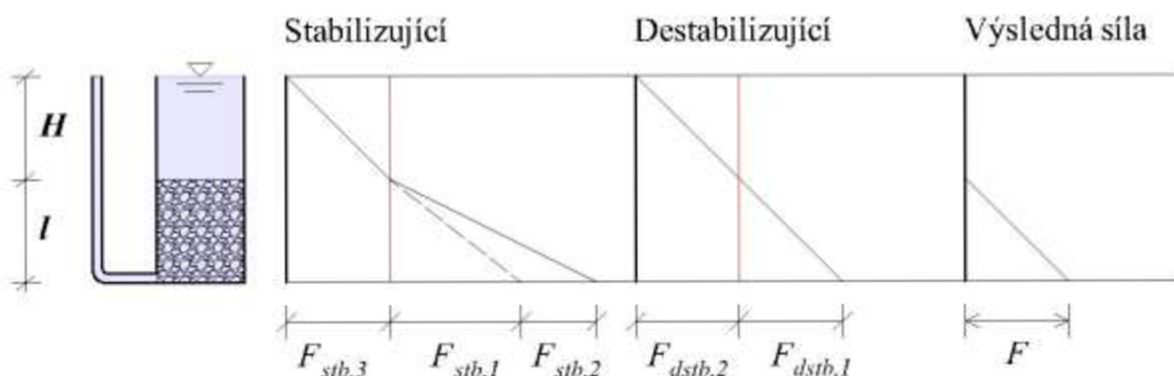
U vzorku o volné hladině (obr. 6.4) působí výsledná síla  $F$  stejná jako u plně nasycené zeminy:

$$F = F_{stb,1} + F_{stb,2} + F_{stb,3} + F_{dstb,1} + F_{dstb,2} \quad (6.9)$$

kde  $F_{stb,3}$  je stabilizační síla od tíhy vody a  $F_{dstb,2}$  je destabilizační síla od vztlaku vody. Velikost těchto sil je stejná.

$$F_{stb,3} = A\rho_w gH \quad (6.10)$$

$$F_{dstb,2} = -A\rho_w gH \quad (6.11)$$



Obr. 6.4 Působení sil v plně nasycené zemině o volné hladině, bez proudění

### 6.4 Plně nasycený vzorek při proudění vody

Při proudění vody skrz porézní materiál o volném odtoku (obr. 6.5), se výsledná síla  $F$  vypočítá dle:

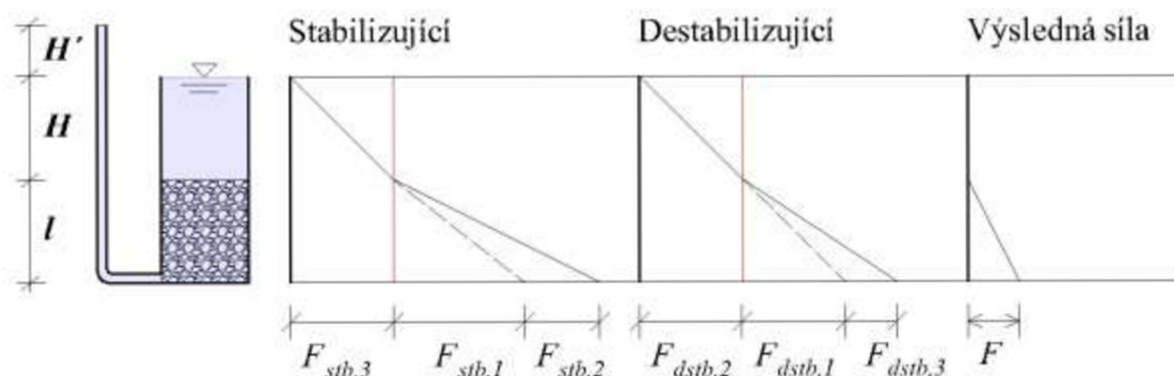
$$F = F_{stb,1} + F_{stb,2} + F_{stb,3} + F_{dstb,1} + F_{dstb,2} + F_{dstb,3} \quad (6.12)$$

kde  $F_{dstb,3}$  je destabilizující síla:

$$F_{dstb,3} = -A\rho_w gJl \quad (6.13)$$

kde je  $J$  střední hydraulický gradient dle:

$$J = \frac{H'}{l} \quad (6.14)$$



Obr. 6.5 Působení sil v plně nasycené zemině při proudění

V okamžiku, kdy jsou si síly stabilizační a destabilizační rovny:

$$F = F_{stb} + F_{dstb} = 0 \quad (6.15)$$

dochází k tzv. stavu mezní rovnováhy, který je základem pro posuzování metodou dílčích součinitelů. Při rozepsání rovnice 6.15 na jednotlivé složky sil, je obdržena následující rovnice:

$$A\rho_s g(1-n)l + A\rho_w gnl + A\rho_w gH - A\rho_w gl - A\rho_w gH - A\rho_w gl = 0 \quad (6.16)$$

kteřá po úpravách vypadá následovně:

$$\rho_s(1-n) + \rho_w n - \rho_w - \rho_w J = 0 \quad (6.17)$$

Z této rovnice se vyjádří hydraulický gradient, při kterém dle fyzikálního odvození dochází k porušení. Tento hydraulický gradient se v následujících kapitolách nazývá kritickým hydraulickým gradientem  $J_K$  a tento vztah se shoduje se vztahem Terzaghiho (5.5).

$$J = \frac{(\rho_s - \rho_w)(1-n)}{\rho_w} = J_{K, Ter} \quad (6.18)$$



## 7. SESTAVENÍ PODMÍNKY SPOLEHLIVOSTI A BEZPEČNOSTI

Pro sestavení podmínky lze použít metodu využívající stupně bezpečnosti nebo metodu dílčích součinitelů viz kap. 2.2.2.

### 7.1 Metoda podle stupně bezpečnosti SF

S ohledem na síly působící na vzorek půdy, může být stupeň bezpečnosti  $SF$  vyjádřen po dosazení do vztahu (2.1) následovně:

$$SF = \frac{F_{stb,k}}{F_{dstb,k}} \quad (7.1)$$

kde  $F_{stb,k}$  je charakteristická hodnota celkové stabilizační síly hmotnosti zeminy a  $F_{dstb,k}$  je charakteristická hodnota (destabilizační) síly vyvolané gradientem tlaku vody.

Pro posouzení metodou podle stupně bezpečnosti  $SF$  nejsou v normách stanoveny konkrétní hodnoty stupně bezpečnosti.

### 7.2 Metoda dílčích součinitelů

Podmínka mezního stavu pro ztekucení může být po dosazení do vztahu (2.2) vyjádřena následovně:

$$F_{stb,d} \geq F_{dstb,d}, \quad (7.2)$$

kde  $F_{stb,d}$  je stabilizační složka síly tvořená hmotností zeminy a  $F_{dstb,d}$  je destabilizační složka síly tvořená gradientem tlaku vody. Pro stanovení těchto hodnot je třeba specifikovat charakteristické hodnoty spolu s příslušnými dílčími součiniteli spolehlivosti.

$$F_{stb,k} \gamma_{M,G} \geq F_{dstb,k} \gamma_G \gamma_1, \quad (7.3)$$

$\gamma_{M,G}$  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 (tab. 2.1). Charakteristické hodnoty sil se vyjádří dosazením do rovnic (7.4) a (7.5):

$$F_{stb,k} = A \rho_s g (1 - n) l + A \rho_w g n l, \quad (7.4)$$

$$F_{dstb,k} = -A \rho_w g l - A \rho_w g J l, \quad (7.5)$$

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

$$\frac{(\rho_s - \rho_w)(1 - n)}{\rho_w} \gamma_{M,J} \geq J \gamma_J \gamma_1 \quad (7.6)$$

kde  $\gamma_{M,J}$  je součinitel vyjadřující nejistotu při stanovení kritického hydraulického gradientu  $J_{K,k}$  a  $\gamma_J$  dílčí součinitel vyjadřující nejistoty při stanovení hydraulického gradientu. Porovnává se odolnost zeminy vyjádřená jako kritický hydraulický gradient  $J_K$  (7.7) a hodnota hydraulického gradientu  $J$ ,

kteřá se stanoví hydraulickým výpočtem, např. numerickým modelovým řešením okrajové a počáteční úlohy proudění podzemní vody [Bear, 1988].

$$J_{K,k} = \frac{(\rho_s - \rho_w)(1 - n)}{\rho_w} \quad (7.7)$$

Vztah (7.7) jako první odvodil Terzaghi (1943).

**Hlavním cílem** této práce je vyčíslit hodnoty koeficientů dílčí spolehlivosti  $\gamma_{M,J}$  pro různé materiály a pravděpodobnosti překročení na základě experimentálně měřených hodnot kritických hydraulických gradientů  $J_K$  prováděných ve vertikálním propustoměru. Stanovení ostatních koeficientů ( $\gamma_I$  a  $\gamma_J$ ) nejsou předmětem této práce.

## 8. STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ZEMIN

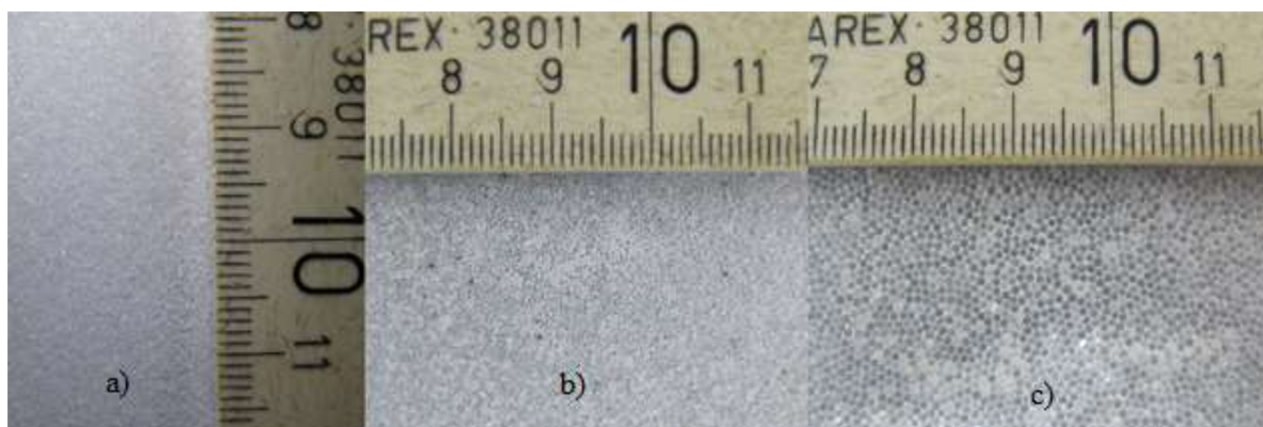
### 8.1 Výběr materiálů

První materiál, na kterém probíhaly laboratorní pokusy, byly skleněné kuličky o různých průměrech. Další materiály byly vybírány v průběhu laboratorních měření, aby byly zjištěny vlivy jednotlivých fyzikálních vlastností zeminy (tvar zrna, zrnitost a pórovitost).

#### 8.1.1 Skleněné kuličky

Skleněné kuličky byly pořízeny od firmy Ginzler s.r.o. Skleněné kuličky byly vybrány pro své fyzikální vlastnosti ( $C_U \approx 1$ , kulový tvar zrna) viz obr. 8.1. Pro měření byly použity tyto průměry (v závorkách jsou uvedeny rozptyly hodnot, které garantuje firma Ginzler s.r.o):

- Skleněné kuličky  $d = 0,2$  mm (0,15 až 0,21 mm),
- Skleněné kuličky  $d = 0,5$  mm (0,36 až 0,63 mm),
- Skleněné kuličky  $d = 1,0$  mm (0,80 až 1,06 mm).

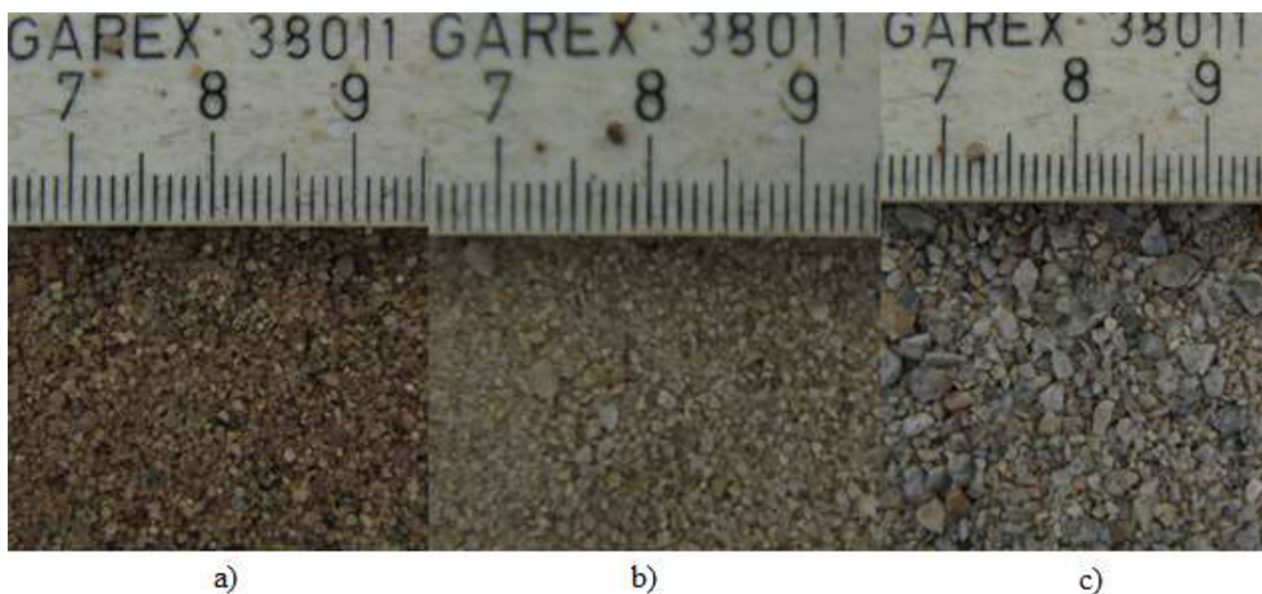


Obr. 8.1 Skleněné kuličky: a)  $d = 0,2$  mm; b)  $d = 0,5$  mm; c)  $d = 1,0$  mm

#### 8.1.2 Přírodní písky

V další fázi laboratorního výzkumu byly použity těžené písky (T) a drcené písky (D), viz obr. 8.2. U nich se uvažovalo jako o možném materiálu v podloží nebo uměle přisypaném na vodním díle v místě vysakování, u kterého nedošlo k žádné úpravě.

- Bzenec 0/2 (T),
- Kora 0/4 (T),
- Olbramovice 0/4 (D).

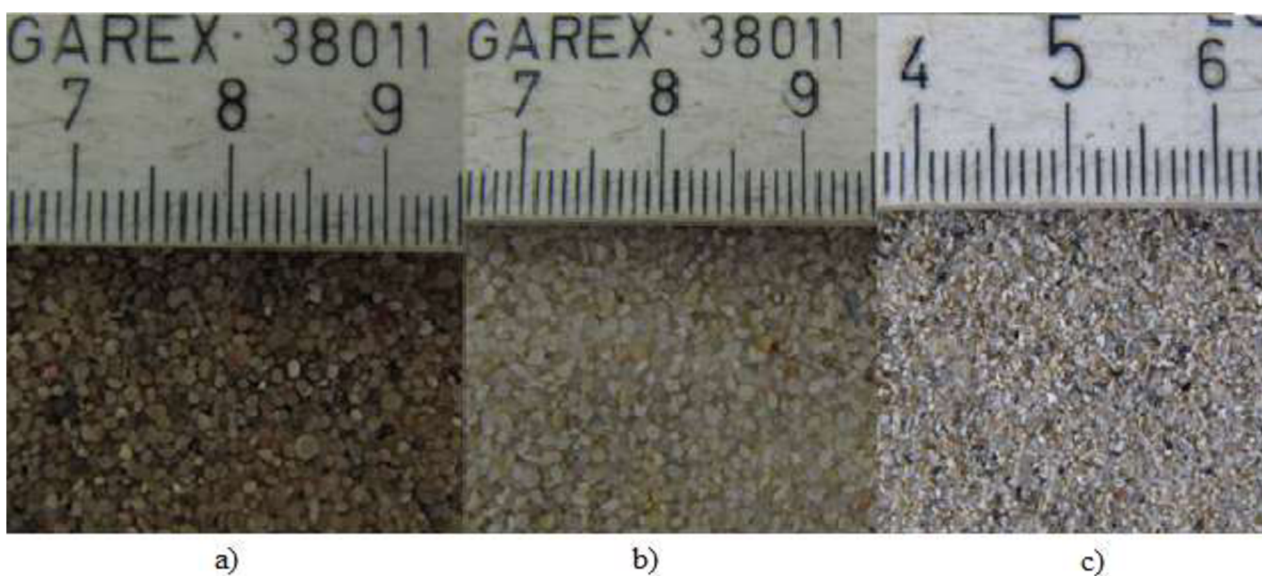


**Obr. 8.2 Přírodní písky: a) Bzenec 0/2 (T); b) Kora 0/4 (T); c) Olbramovice 0/4 (D)**

### ***8.1.3 Upravené písky***

V poslední fázi byly pro laboratorní pokusy vybrány předchozí přírodní písky, které byly následně vytříděny pomocí třepačky se sadou normových sít tak, aby bylo možné na těchto materiálech sledovat vliv tvaru a velikosti zrna na kritický hydraulický gradient  $J_K$  (obr. 8.3).

- Bzenec 0,5/1,0 (T),
- Kora 0,5/1,0 (T),
- Olbramovice 0,25/0,5 (D).



**Obr. 8.3 Upravené písky a) Bzenec 0,5/1,0 (T); b) Kora 0,5/1,0 (T); c) Olbramovice 0,25/0,5 (D)**

## 8.2 Zrnitost

Křivka zrnitosti je jedním ze základních charakteristik, které se určí pomocí síťového rozboru dle ČSN 72 1007.

### 8.2.1 Materiální zabezpečení

Pro stanovení křivek zrnitosti jednotlivých materiálů posloužila laboratoř Ústavu vodní staveb, pro měření bylo zapotřebí vybavení sušárny:

- sušička,
- vysoušecí nádoby,
- třepačka,
- normovaná síta vyhovující ISO 3310-1 a ISO 3310-2
- váha s přesností  $\pm 0,1$  g,
- zemina,
- elektronická šuplera.

Všechny vzorky splnily podmínku, že materiál neobsahuje víc jak 10% zrn menších 0,063 mm, z tohoto důvodu není nutné provádět sedimentační zkoušku.

### 8.2.2 Postup měření a vyhodnocení

U skleněných kuliček nelze použít síťový rozbor, protože jednotlivá síta mají příliš hrubou stupnici pro specifikování velikostí částic. Z tohoto důvodu nebyla vyhotovena zrnitostní křivka na základě síťového rozboru, ale byly měřeny průměry částic elektronickou šuplerou s přesností 0,01 mm (obr. 8.4). Pro stanovení křivky zrnitosti bylo použito 100 kuliček daného průměru (tab. 8.1 až 8.3)



Obr. 8.4 Měření digitální šuplerou

**Tab. 8.1 Průměry skleněných kuliček 0,2 mm**

Skleněné kuličky 0,2 mm									
měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]
1	0,15	21	0,17	41	0,18	61	0,19	81	0,19
2	0,15	22	0,17	42	0,18	62	0,19	82	0,19
3	0,15	23	0,17	43	0,18	63	0,19	83	0,19
4	0,15	24	0,17	44	0,18	64	0,19	84	0,19
5	0,16	25	0,17	45	0,18	65	0,19	85	0,2
6	0,16	26	0,17	46	0,18	66	0,19	86	0,2
7	0,16	27	0,17	47	0,18	67	0,19	87	0,2
8	0,16	28	0,17	48	0,18	68	0,19	88	0,2
9	0,16	29	0,17	49	0,18	69	0,19	89	0,2
10	0,16	30	0,17	50	0,18	70	0,19	90	0,2
11	0,16	31	0,17	51	0,18	71	0,19	91	0,2
12	0,16	32	0,17	52	0,18	72	0,19	92	0,2
13	0,16	33	0,17	53	0,18	73	0,19	93	0,2
14	0,16	34	0,17	54	0,18	74	0,19	94	0,2
15	0,17	35	0,18	55	0,19	75	0,19	95	0,2
16	0,17	36	0,18	56	0,19	76	0,19	96	0,2
17	0,17	37	0,18	57	0,19	77	0,19	97	0,21
18	0,17	38	0,18	58	0,19	78	0,19	98	0,21
19	0,17	39	0,18	59	0,19	79	0,19	99	0,21
20	0,17	40	0,18	60	0,19	80	0,19	100	0,21

**Tab. 8.2 Průměry skleněných kuliček 0,5 mm**

Skleněné kuličky 0,5 mm									
měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]	měření	<i>d</i> [mm]
1	0,36	21	0,44	41	0,48	61	0,52	81	0,56
2	0,36	22	0,45	42	0,48	62	0,52	82	0,56
3	0,37	23	0,45	43	0,48	63	0,52	83	0,56
4	0,37	24	0,45	44	0,48	64	0,52	84	0,56
5	0,37	25	0,46	45	0,49	65	0,52	85	0,57
6	0,38	26	0,46	46	0,49	66	0,53	86	0,57
7	0,38	27	0,46	47	0,49	67	0,53	87	0,57
8	0,38	28	0,46	48	0,49	68	0,53	88	0,57
9	0,39	29	0,47	49	0,49	69	0,53	89	0,57
10	0,39	30	0,47	50	0,49	70	0,53	90	0,58
11	0,39	31	0,47	51	0,49	71	0,53	91	0,58
12	0,4	32	0,47	52	0,49	72	0,54	92	0,59
13	0,4	33	0,47	53	0,5	73	0,54	93	0,59
14	0,41	34	0,47	54	0,5	74	0,54	94	0,59
15	0,42	35	0,48	55	0,5	75	0,54	95	0,59
16	0,42	36	0,48	56	0,5	76	0,54	96	0,6
17	0,43	37	0,48	57	0,5	77	0,54	97	0,6
18	0,43	38	0,48	58	0,51	78	0,54	98	0,6
19	0,44	39	0,48	59	0,51	79	0,54	99	0,63
20	0,44	40	0,48	60	0,51	80	0,55	100	0,63



**Tab. 8.3 Průměry skleněných kuliček 1,0 mm**

Skleněné kuličky 1,0 mm									
měření	$d$ [mm]	měření	$d$ [mm]	měření	$d$ [mm]	měření	$d$ [mm]	měření	$d$ [mm]
1	0,8	21	0,88	41	0,92	61	0,95	81	0,98
2	0,81	22	0,88	42	0,92	62	0,96	82	0,99
3	0,81	23	0,88	43	0,92	63	0,96	83	0,99
4	0,82	24	0,88	44	0,92	64	0,96	84	0,99
5	0,83	25	0,88	45	0,92	65	0,96	85	0,99
6	0,84	26	0,89	46	0,92	66	0,96	86	0,99
7	0,84	27	0,89	47	0,92	67	0,96	87	1,01
8	0,84	28	0,89	48	0,93	68	0,96	88	1,01
9	0,84	29	0,89	49	0,93	69	0,96	89	1,01
10	0,85	30	0,89	50	0,93	70	0,96	90	1,02
11	0,85	31	0,89	51	0,93	71	0,96	91	1,02
12	0,85	32	0,9	52	0,94	72	0,97	92	1,02
13	0,85	33	0,9	53	0,94	73	0,97	93	1,03
14	0,86	34	0,9	54	0,94	74	0,97	94	1,03
15	0,87	35	0,9	55	0,94	75	0,97	95	1,03
16	0,87	36	0,9	56	0,94	76	0,98	96	1,05
17	0,87	37	0,91	57	0,94	77	0,98	97	1,05
18	0,87	38	0,91	58	0,95	78	0,98	98	1,06
19	0,88	39	0,91	59	0,95	79	0,98	99	1,06
20	0,88	40	0,92	60	0,95	80	0,98	100	1,06

Pro stanovení křivek zrnitosti pro přírodní materiály byly použity sady normových sít. Materiál byl před síťovým rozborem vysušen v sušárně (obr. 8.5) při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin.

**Obr. 8.5 Sušárna**

Po vysušení a ochlazení materiálu byl proveden síťový rozbor na sítích o průměru ok 3,15; 2,5; 2; 1,6; 1; 0,63; 0,5; 0,25; 0,1; 0,063 mm. Pro vibraci byla použita třepačka na Ústavu vodních staveb (obr. 8.6). Vibrace probíhala po dobu 20 minut a hmotnost zeminy, která zůstala na daném sítu, byla zvážena a zapsána do protokolu.



**Obr. 8.6 Třepačka se sadou normovaných sít**

U každého materiálu byly po prosetí a stanovení křivky zrnitosti, stanoveny vybrané velikosti zrna ( $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ) z kterých se následně stanovilo číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  (3.3) a číslo křivosti  $C_C$ . Číslo křivosti  $C_C$  ukazuje rovnoměrnost zastoupení velikostí zrn v křivce:

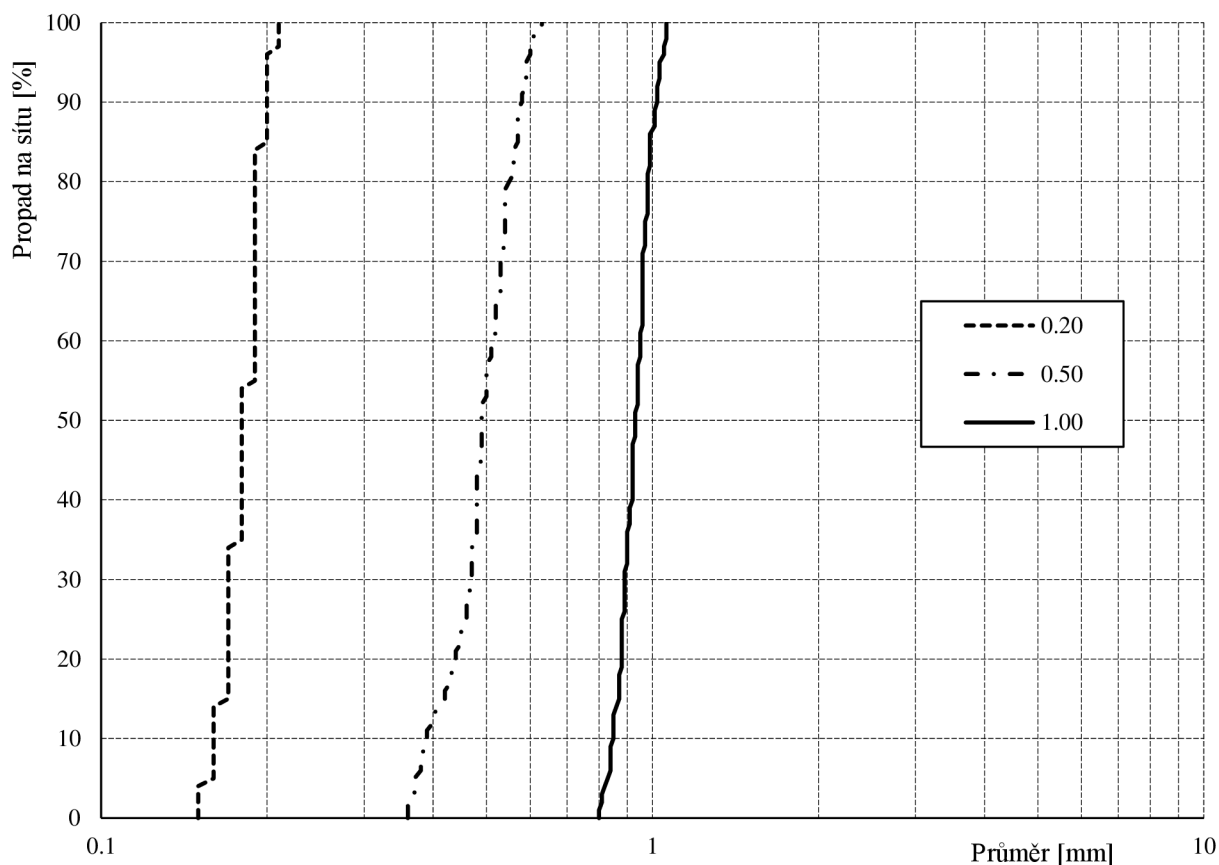
$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (8.1)$$

V případě je-li  $C_C < 1$ , tak chybí frakce v oblasti zrn  $< d_{30}$ . Chybějící frakce v oblasti zrn  $> d_{30}$  jsou v případě, že  $C_C > 3$ .

### **8.2.3 Výsledky**

U **skleněných kuliček** bylo celkově provedeno 100 měření každého průměru (0,2, 0,5 a 1,0 mm) viz tab. 8.1 až 8.3 a tyto hodnoty byly vyneseny do grafu křivky zrnitosti obr. 8.7.





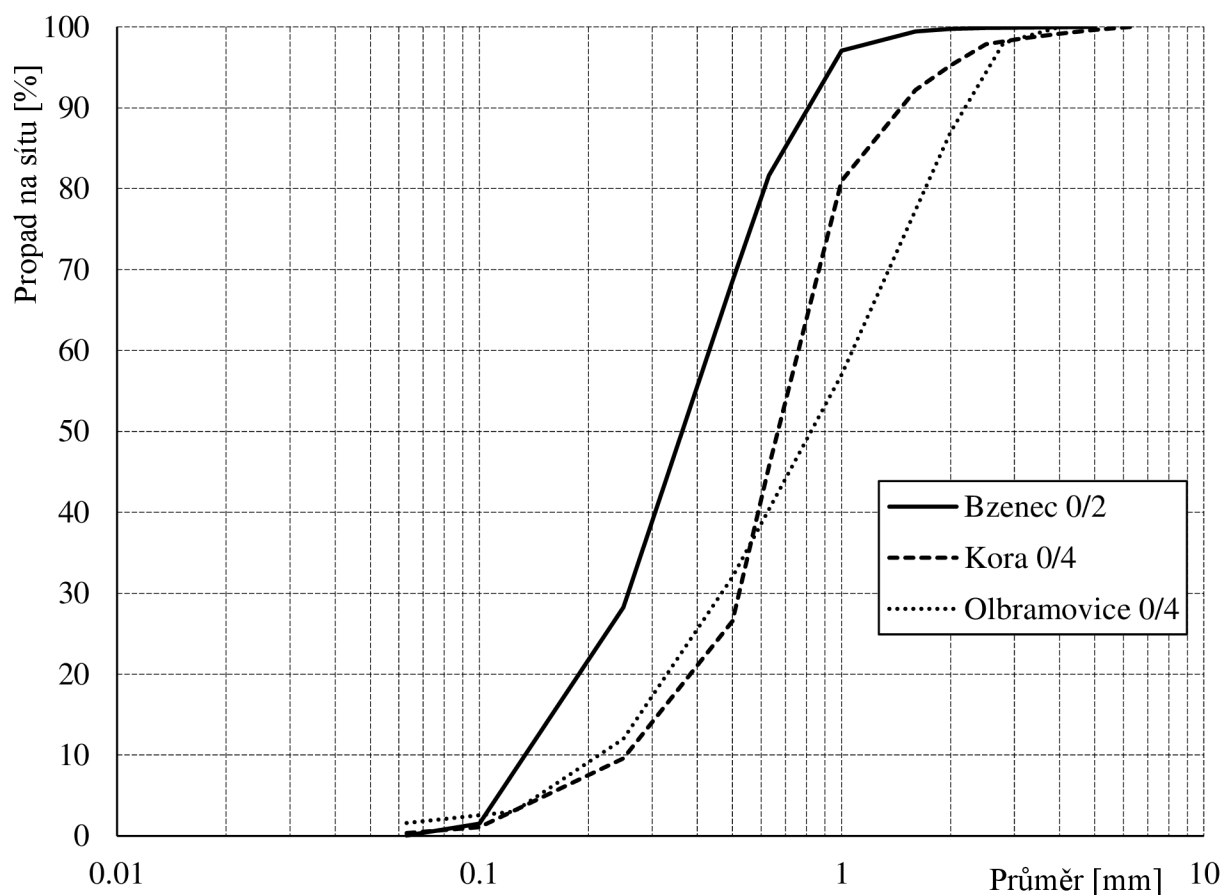
**Obr. 8.7 Křivky zrnitosti skleněných kuliček**

V tab. 8.4 jsou uvedeny průměry  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ , minimální velikost zrna  $d_{min}$ , maximální velikost zrna  $d_{max}$ , číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  (3.3) a číslo křivosti  $C_C$  (8.1).

**Tab. 8.4 Velikosti zrn skleněných kuliček**

Materiál	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$d_{min}$	$d_{max}$	$C_U$	$C_C$
	mm	mm	mm	mm	mm	-	-
Skleněné kuličky 0,2 mm	0,16	0,17	0,19	0,15	0,21	1,19	0,95
Skleněné kuličky 0,5 mm	0,39	0,47	0,52	0,36	0,63	1,33	1,11
Skleněné kuličky 1,0 mm	0,85	0,89	0,97	0,80	1,06	1,14	0,98

Pro každý **přírodní materiál** bylo provedeno celkem 5 pokusů pro stanovení křivky zrnitosti. Průměrné hodnoty byly vyneseny do grafu. Pro každý pokus se použilo v rozmezí 2-2,5 kg zeminy. Křivky zrnitosti přírodních písků (Bzenec 0/2, Kora 0/4 a Olbramovice 0/4) jsou znázorněny na obr. 8.8.



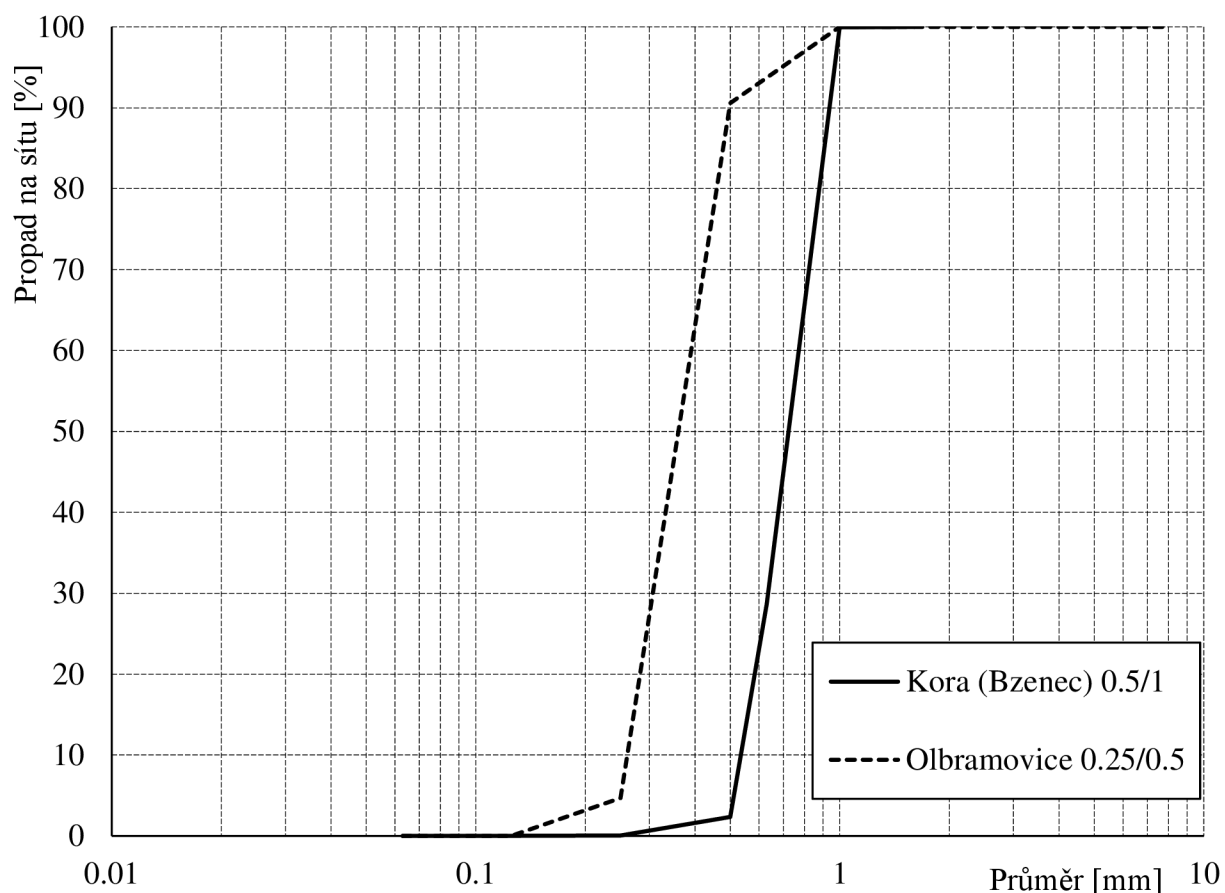
**Obr. 8.8 Křivky zrnitostí přírodních materiálů**

V tab. 8.5 jsou zapsány průměry charakteristik zrnitosti přírodních písků (Bzenec 0/2, Kora 0/4 a Olbramovice 0/4)  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ , dále byla stanovena hodnota  $d_i < 0,063$ , která znázorňuje procentuální zastoupení zeminy s velikostí zrna menší, než 0,063 mm (prachové částičky), maximální velikost zrna  $d_{max}$ , číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  (3.3) a číslo křivosti  $C_C$  (8.1).

**Tab. 8.5 Velikosti zrn přírodních materiálů**

Zemina	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$d_i < 0,063$	$d_{max}$	$C_U$	$C_C$
	mm	mm	mm	%	mm	-	-
Bzenec 0/2	0,15	0,26	0,45	0,05	2,50	2,99	1,12
Kora 0/4	0,27	0,52	0,79	0,24	5,00	2,95	1,29
Olbramovice 0/4	0,20	0,48	1,03	1,00	3,20	5,03	0,92

Křivky zrnitosti vyříděných písků (Kora 0.5/1.0, Bzenec 0.5/1.0 a Olbramovice 0.25/0.5) jsou znázorněny na obr. 8.9.



**Obr. 8.9** Křivky zrnitostí vytríděných materiálů

V Tab. 8.6 jsou zapsány průměry charakteristik zrnitostí vytríděných písků (Kora 0.5/1.0, Bzenec 0.5/1.0 a Olbramovice 0.25/0.5)  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ , dále byla stanovena hodnota  $d_i < 0,063$ , maximální velikost zrna  $d_{max}$ , číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  (3.3) a číslo křivosti  $C_C$  (8.1).

**Tab. 8.6** Velikosti zrn vytríděných materiálů

Zemina	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$d_i < 0,063$	$d_{max}$	$C_U$	$C_C$
	mm	mm	mm	%	mm	-	-
Bzenec 0.5/1	0,55	0,64	0,81	0	1,00	1,47	0,95
Kora 0.5/1	0,55	0,64	0,81	0	1,00	1,47	0,95
Olbramovice 0.25/0.5	0,26	0,31	0,39	0	0,63	1,40	0,95

### 8.3 Měrná hmotnost zrn

Měrná hmotnost zrna patří k základním fyzikálním vlastnostem zeminy, která byla stanovena v laboratoři Ústavu vodního hospodářství krajiny pomocí pyknometrů dle normy ČSN 72 1007 část 3. Hodnota měrné hmotnosti zrn je důležitá pro stanovení pórovitosti zeminy.

### 8.3.1 Materiální zabezpečení

Pro stanovení měrné hmotnosti zrn byly zapotřebí:

- očíslované pyknometry s objemem  $10\text{ cm}^3$  při teplotě vody  $T = 20^\circ\text{C}$ ,
- destilovaná voda o teplotě  $T = 20^\circ\text{C}$ ,
- nálevka,
- váha s přesností na  $0,01\text{g}$ ,
- zemina,
- termostat pro udržování teploty vody na  $20^\circ\text{C}$

### 8.3.2 Postup měření

Měření probíhalo v souladu s ČSN 72 1007 č. 3 a skládalo se z následujících kroků:

1. Osušený a označený pyknometr plný destilované vody o teplotě  $T = 20^\circ\text{C}$  byl zvážen včetně zátky ( $m_2$ ).
2. Do prázdného pyknometru bylo nasypáno 25 až 40 g zeminy a opět zváženo ( $m_1$ ).
3. Do pyknometru se nalila pomocí nálevky destilovaná voda o teplotě  $T = 20^\circ\text{C}$ .
4. Zemina v pyknometru byla důkladně promíchána, aby neobsahovala v pórech vzduch.
5. Jednotlivé pyknometry byly vloženy do termostatu a ochlazovaly se cca 5 hodin na  $T = 20^\circ\text{C}$ .
6. Pyknometry byly doplněny destilovanou vodou o teplotě  $T = 20^\circ\text{C}$  po okraj pyknometru, zazátkovány, osušeny a zváženy ( $m_3$ ).



**Obr. 8.10 Pyknometry se skleněnými kuličkami a destilovanou vodou**



**Obr. 8.11 Ochlazení: a) Termostat; b) Termostat s pyknometry**

Objem vody vytlačené se rovná objemu zeminy nasypané, tudíž se dá měrnou tíhu zeminy stanovit dle vztahu:

$$\rho_s = \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3} \rho_{w,20} \quad (8.2)$$

kde  $\rho_{w,20}$  je hustota vody při teplotě  $T = 20^\circ\text{C}$ .

### **8.3.3 Výsledky**

Pro každý zkoumaný vzorek zeminy bylo provedeno celkem 8 pokusů pro stanovení měrné hmotnosti zrna  $\rho_s$  (tab. 8.7 a 8.8) podle metodiky v předchozích kapitolách. Největší odchylka byla zaznamenána u materiálu Olbramovice, kdy maximální hodnota byla  $2662 \text{ kg/m}^3$  a minimální hodnota byla  $2647 \text{ kg/m}^3$ . Pro použití v laboratoři a další výpočty se používala průměrná hodnota měrné hmotnosti zrna  $\rho_s$  dle tab. 8.7 a 8.8.

**Tab. 8.7 Měrné hmotnosti skleněných kuliček**

(-)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			
					měrná hmotnost			
materiál	hmotnost sušiny	hmotnost pyknometru s vodou	hmotnost pyknometru s vodou a zeminou	hmotnost vytlačené vody	průměr	min	max	
	g	g	g	g	gcm <sup>-3</sup>	kgm <sup>-3</sup>	kgm <sup>-3</sup>	kgm <sup>-3</sup>
0.80 - 1.00 mm	25.0	135.0	149.9	10.0	2.493	2493	2489	2496
	25.0	136.0	151.0	10.0				
	30.0	137.1	155.1	12.0				
	30.3	136.4	154.5	12.1				
	25.1	136.8	151.8	10.1				
	25.2	134.7	149.8	10.1				
30.4	135.7	153.9	12.2	2.480	2480	2475	2483	
34.1	137.8	158.2	13.7					
36.5	146.0	167.8	14.7					
27.8	136.4	153.0	11.2					
36.4	136.6	158.3	14.7					
38.3	134.9	157.7	15.5					
0.40 - 0.60 mm	36.2	136.8	158.5	14.6	2.484	2484	2479	2489
	40.1	136.8	160.8	16.2				
	38.1	134.8	157.5	15.3				
	38.1	135.2	158.0	15.4				
	27.9	135.7	152.4	11.2				
	29.6	145.4	163.1	11.9				
0.16 - 0.20 mm	33.3	135.4	155.3	13.4	2.484	2484	2479	2489
	32.2	145.6	164.8	13.0				
	31.2	137.1	155.7	12.6				
	28.7	137.4	154.5	11.5				
	33.3	148.9	168.8	13.4				
	34.4	137.4	158.0	13.9				

**Tab. 8.8 Měrné hmotnosti přírodních materiálů**

(-)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			
materiál	hmotnost sušiny	hmotnost pyknometru s vodou	hmotnost pyknometru s vodou a zeminou	hmotnost vytlačené vody	měrná hmotnost			
					průměr		min	max
	g	g	g	g	gcm <sup>-3</sup>	kgm <sup>-3</sup>	kgm <sup>-3</sup>	kgm <sup>-3</sup>
Bzenec	45.8	135.2	163.7	17.3	2.638	2638	2635	2643
	41.4	137.1	162.8	15.7				
	39.1	136.0	160.3	14.8				
	41.7	135.0	160.8	15.8				
	40.3	134.7	159.7	15.3				
	43.0	136.4	163.1	16.3				
	39.6	136.8	161.4	15.0				
	42.1	135.7	161.8	15.9				
Kora	42.9	137.8	164.3	16.3	2.632	2632	2627	2635
	36.2	146.0	168.4	13.8				
	40.7	136.4	161.6	15.5				
	46.8	134.9	163.9	17.8				
	38.7	136.6	160.6	14.7				
	33.1	134.8	155.3	12.6				
	42.3	136.8	163.0	16.1				
	46.1	136.8	165.4	17.5				
Olbramovice	37.9	136.4	159.9	14.4	2.641	2641	2634	2651
	39.5	134.7	159.2	14.9				
	42.2	137.1	163.3	16.0				
	37.6	135.7	159.1	14.3				
	48.1	145.4	175.3	18.1				
	38.5	136.8	160.7	14.6				
	48.7	145.6	175.9	18.4				
	39.8	137.1	161.8	15.1				

## 8.4 Tvar zrna

Při stanovování fyzikálních vlastností zeminy, které ovlivňují velikost kritického hydraulického gradientu  $J_K$  se kromě velikosti zrna a měrné tíhy zrna uvažovalo i s vlivem tvaru zrna. Tento předpoklad byl převzat z empirických rovnic pro stanovení hydraulické vodivosti  $k$ .

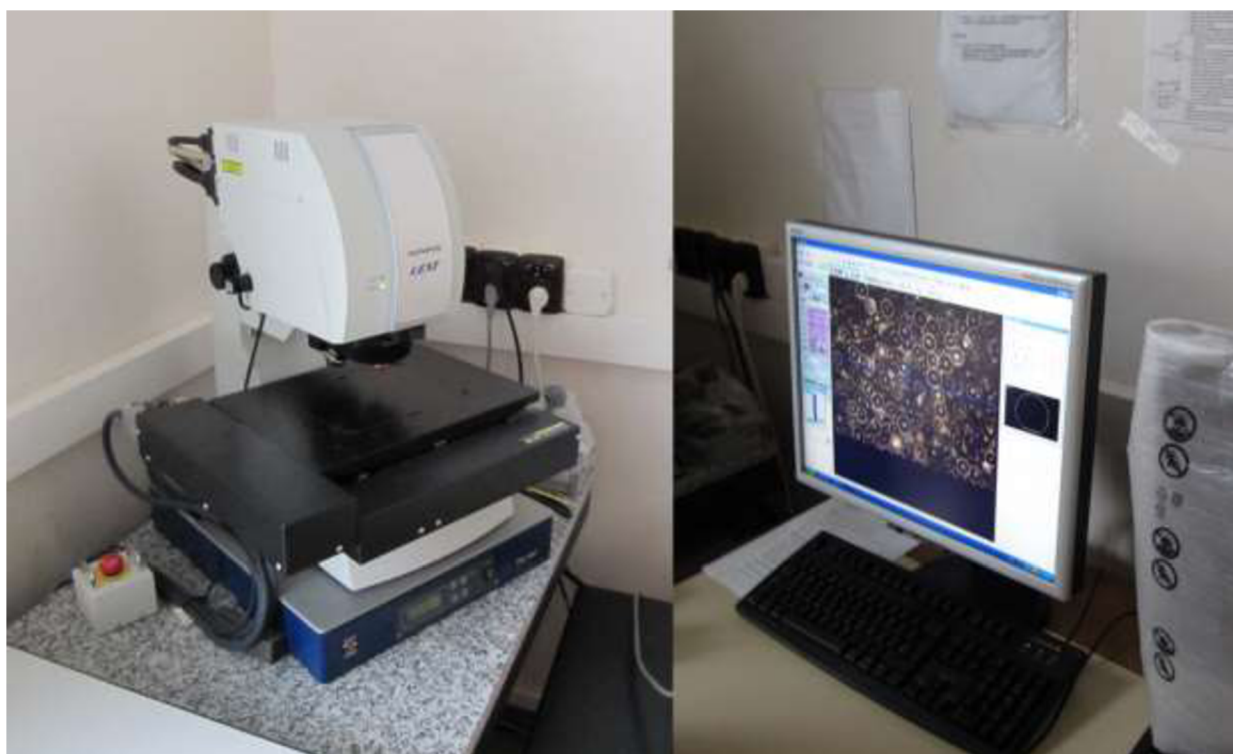
### 8.4.1 Materiální zabezpečení

Pro stanovení tvaru zrna bylo zapotřebí:

- konfokální mikroskop,
- fotoaparát,
- materiál,
- metr.

### 8.4.2 Postup měření

Pro zobrazení tvaru zrna byly použity dvě metody. První metoda byla pomocí konfokálního mikroskopu (obr. 8.12) ve spolupráci s Ústavem fyziky na FAST VUT v Brně. Pomocí konfokálního mikroskopu byly zaznamenány snímky zeminy a jejich tvar i pomocí 3D skenování. Konfokální mikroskop bylo možné použít pouze na zeminy s menšími zrny. Pro zeminy s většími zrny se použila varianta s fotoaparátem a metrem.



Obr. 8.12 Konfokální mikroskop



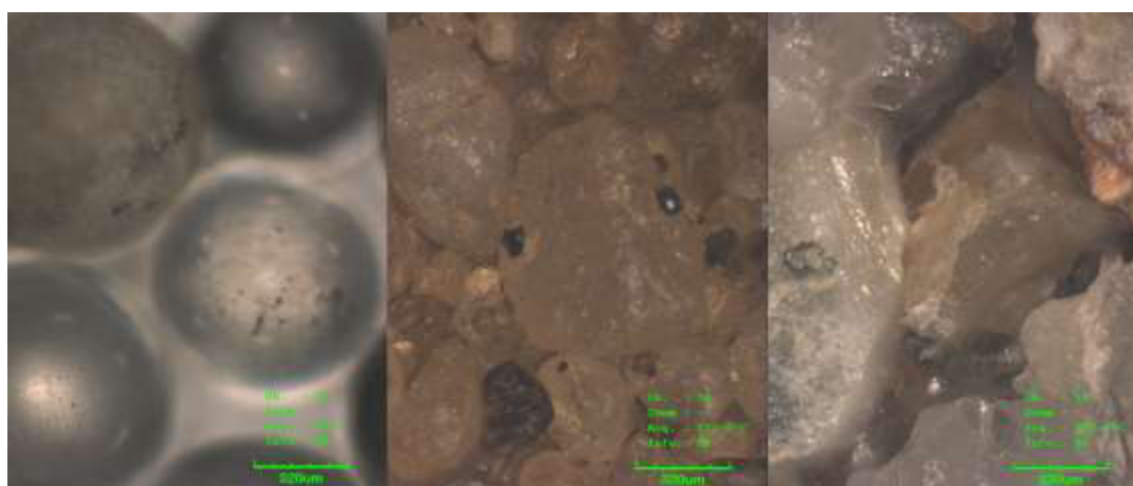
### 8.4.3 Výsledky

Zeminy byly nafoceny prvně s metrem pomocí fotoaparátu (obr. 8.13) a následně pomocí konfokálního mikroskopu (obr. 8.14). Zeminy byly rozděleny do 3 kategorií:

- Kulová zrna (skleněné kuličky)
- Zaoblená zrna (Bzenec, Kora) – těžené písky
- Ostrohranná zrna (Olbramovice) – drcené písky



Obr. 8.13 Fotoaparát: a) Kulová zrna; b) Zaoblená zrna; c) Ostrohranná zrna



Obr. 8.14 Konfokální mikroskop: a) Kulová zrna; b) Zaoblená zrna; c) Ostrohranná zrna

Zeminy byly následně rozděleny do kategorií, dle tab. 8.9.

Tab. 8.9 Tvar zrn materiálů

Tvar zrna	Kulová	Zaoblená	Ostrohranná
Materiál	Skleněné kuličky	Bzenec	Kora Olbramovice

## 9. POPIS ZAŘÍZENÍ PRO SLEDOVÁNÍ KRITICKÉHO HYDRAULICKÉHO GRADIENTU

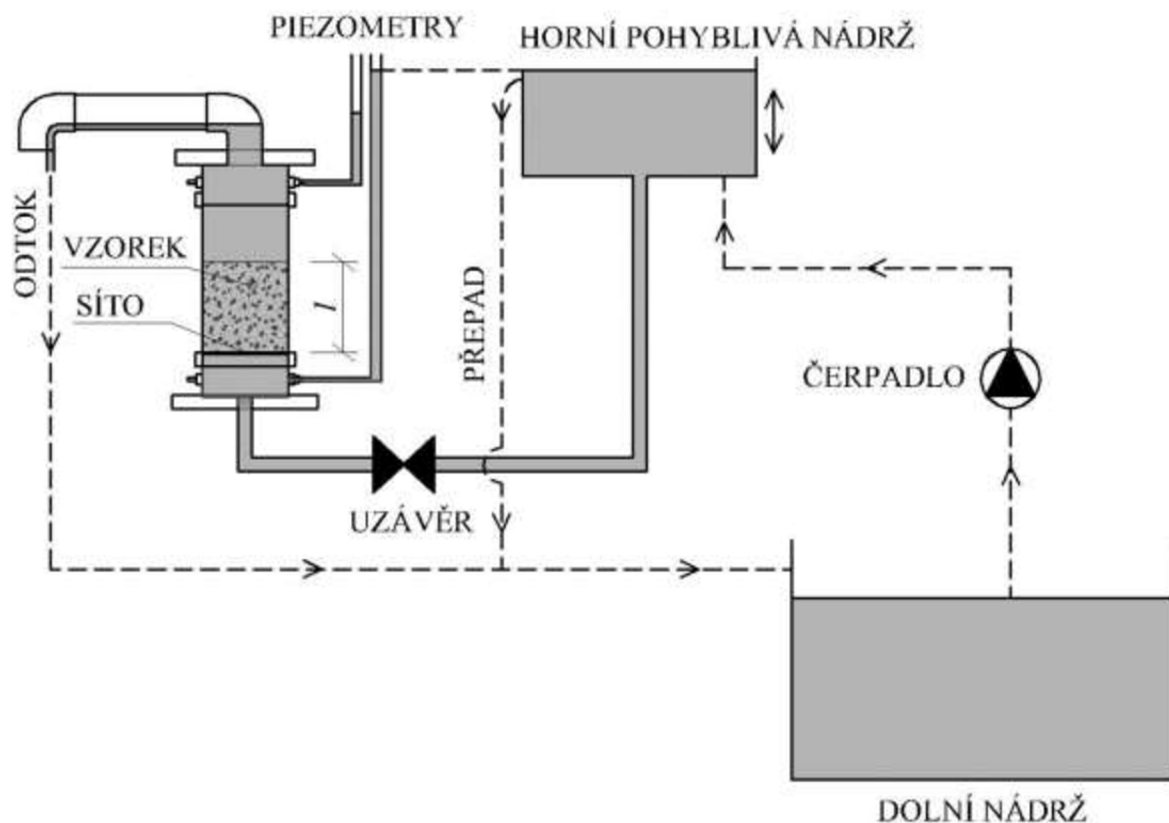
Pro laboratorní pokusy byla použita laboratoř Ústavu vodních staveb FAST VUT (obr. 9.1), ve které se měřilo na stávajícím propustoměru (modifikovaný Darcyho přístroj), který se zapojil do soustavy.



**Obr. 9.1 Laboratorní prostředí**

Pohyb vody v soustavě je znázorněn ve schématu na obr. 9.2. Pomocí čerpadla byla voda čerpána do horní vertikálně pohyblivé nádrže, kde se udržovala pomocí přepadu hladina na stálé úrovni. Voda, která přepadala přes hranu přelivu, se vracela zpět do dolní nádrže. Horní nádrž se posouvala pomocí kladky, která byla vespod uchycena na ozubené kolo a pomocí otáčení kliky se nádrž zvedala. Jedno otočení odpovídalo cca 5 mm.

Do zapojeného propustoměru přitéká voda zesponu a dochází tak ke vzestupnému proudění. Propustoměr je opatřen dvěma hadičkami, které při laboratorním měření ukazují piezometrickou výšku vody před a za vzorkem. Voda, která projde vzorkem je následně odváděna do dolní nádrže.



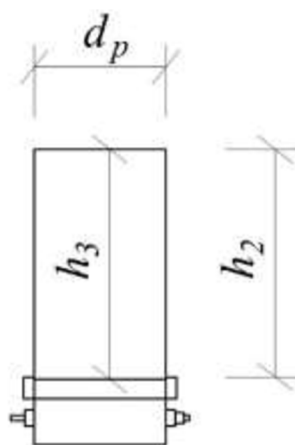
Obr. 9.2 Schéma měřícího zařízení

### 9.1 Geometrie vertikálních propustoměrů

Pro měření ve vertikálním propustoměru je důležité znát jeho rozměry (délka, průměr, plocha a hmotnost) obr. 9.3. Tyto hodnoty byly změřeny digitální šuplerou s přesností na 2 desetinná místa, zvaženy na digitální váze a zapsány do tab. 9.1.

Tab. 9.1 Geometrie a hmotnost vertikálního propustoměru

Číslo propustoměru	Hmotnost propustoměru	Průměr	Plocha	Vnější výška $h_2$	Vnitřní výška $h_3$
[-]	[g]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]
1	836,3	122,94	11870,7	213,0	214,0
2	861,1	123,16	11913,2	214,0	216,0
3	886,8	123,30	11940,3	213,0	214,5



**Obr. 9.3 Geometrie vertikálního propustoměru**

### **9.2 Stanovení propustnosti na sítích a geotextiliích**

Propustoměry jsou opatřeny hrubými plastovými sítí, skrz které proudí voda do vzorku. Aby nedocházelo k propadnutí vzorku, je na hrubé plastové síto umístěno jemnější síto nebo geotextilie (obr. 9.4) a to podle velikosti nejmenších zrn materiálu. Odpor vyvolaný sítím popř. geotextilií bylo třeba zohlednit při stanovení hydraulické vodivosti zkoumaného vzorku a také hydraulického gradientu v zemině nad sítím/ geotextilií.



**Obr. 9.4 Používaná síta a geotextilie**

Tloušťka sít byla měřena pomocí digitální šuplery a zapsána do tab. 9.2. Pro stanovení hydraulické vodivosti a následné ztráty se vybrané síto nebo geotextilie umístila do propustoměru, po obvodu se utěsnila a zatížila kameny (řádově propustnějším materiálem). Takto připravený propustoměr se zapojil do soustavy a nasýtil se vodou. Pro stanovení hydraulické vodivosti bylo zapotřebí stanovit hydraulický gradient  $J$  dle vztahu (10.8), průsak  $Q$  pomocí odměrného válce a stopek a z tab. 9.1 plochu propustoměru. Hydraulická vodivost se pak dopočítala dle vztahu:

$$k = \frac{Q h_g}{A H'} \quad (9.1)$$

kde  $h_g$  je tloušťka geotextilie a  $H'$  je rozdíl piezometrické výšky před a za sítím. Výsledky byly zapsány do Tab. 9.2.

**Tab. 9.2 Popis používaných sítí a geotextilie**

Typ síta	Tloušťka	Hydraulická vodivost	Hmotnost (za sucha)
[-]	[m]	[m/s]	[g]
Geotextilie	0,0028	0,00016	3,7
Síto 0.1 mm	0,0002	0,005	8,9
Síto 0.5 mm	0,0008	0,01	16,8

## 10. PŘÍPRAVA LABORATORNÍHO VZORKU A LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Laboratorní měření se skládá z přípravné části, kdy se plní propustoměr zeminou a hutní materiál v propustoměru, měří se teplota vody  $T$ , stanovuje pórovitost vzorku  $n$  a sytí se vzorek vodou včetně odvzdušnění piezometrů. Druhou částí je samotné měření a následuje jeho vyhodnocení, při kterém se měří jednotlivé veličiny (průtok  $Q$ , hydraulická vodivost  $k$  a hydraulický gradient  $J$ ) až do úplného porušení vzorku.

### 10.1 Příprava laboratorního vzorku

Po stanovení fyzikálních vlastností zemin (křivka zrnitosti, měrná hmotnost zrn, atd.) a stanovení geometrie používaných propustoměrů, lze začít připravovat vzorky na měření ve vertikálním propustoměru. Postup pro přípravu vzorku je následující:

- zvážení prázdného propustoměru včetně použitých sít,
- sypaní a případné hutnění zeminy,
- zvážení plného propustoměru,
- zapojení do soustavy a pomalé sycení vzorku vodou odspodu včetně měření teploty vody,
- odvzdušnění piezometrů,
- stanovení pórovitosti vzorků.

#### 10.1.1 Materiální zabezpečení

Vzorky byly připravovány v laboratoři ústavu vodních staveb. Pro jejich přípravu bylo zapotřebí toto vybavení/zařízení:

- vertikální propustoměr,
- zemina,
- vibrátor (obr. 10.1),
- geotextilie a síta,
- vyrovnávací deska,
- váha s přesností 0,1 g,
- digitální teploměr s přesností 0,1 °C,
- metr.



**Obr. 10.1 Vibrátor**

### **10.1.2 Postup**

Pro přípravu vzorku byly použity vybavení/zařízení z kap. 10.1.1 a postupovalo se v následujících krocích:

- 1) Připraví se prázdný suchý vertikální propustoměr a s ohledem na zrnitost použitého materiálu se vybere síto nebo geotextilie tak, aby nedocházelo k propadu zrn, a vloží se na dno propustoměru (Geotextilie byla přilepena k propustoměru pomocí tmelu). Hmotnost prázdného propustoměru se sítem ( $m_{p,p}$ ) se zváží váhou s přesností na 0,1 g (obr. 10.2). Rozměry pro použitý propustoměr je převzata z Tab. 9.1.
- 2) Po zvážení prázdného propustoměru byla do něj uložena zemina různým způsobem (volné sypání, různá míra zhutnění), aby byla dosažena různá pórovitost  $n$ . V případě nejméně hutněného vzorku byla zemina pouze volně nasypána. U pokusů, kde byla požadována nižší pórovitost, byla použita třepačka s dobou třepání (5 až 60 s). Nakonec byla zemina v propustoměru zarovnána pomocí vyrovnávací desky. Délka vzorku  $l$  se pohybovala v rozmezí 0,11 až 0,13 m.
- 3) Po zhutnění a zarovnání vzorku byl propustoměru včetně vzorku zvážen ( $m_{p,k}$ ), změřena jeho vnější výška ( $h_1$ ) a zapsána do tabulky. Po odečtení tloušťky síta (geotextilie)  $h_g$  a rozdílu ve výškách ( $h_2-h_3$ ) byla vypočítána samotná výška vzorku  $l$ .

$$l = h_1 - h_g + h_2 - h_3 \quad (10.1)$$

Pro stanovení hmotností vzorku (obr. 10.2) byla odečtena hmotnost propustoměru před měřením  $m_{p,p}$  od hmotnosti propustoměru včetně vzorku  $m_{p,k}$ :

$$m_k = m_{p,k} - m_{p,p} \quad (10.2)$$





**Obr. 10.2 Vážení vzorku**

- 4) Propustoměr byl poté zapojen do soustavy (obr. 10.3), připojí se hadičky pro piezometry a pomalu je vzorek zesponu napouštěn vodou přivedenou z pohyblivé horní nádrže. Důležité je zvolit si správnou rychlost napouštění vzorku pomocí uzávěrů, aby nedošlo k porušení vzorku nebo k vyplavení jemnozrné frakce. Při napouštění se změní teplota vody  $T$  v dolní nádrži a provede se přepočer hustoty vody  $\rho_w$  (10.3) a její kinematické viskozity  $\nu$  (10.4) [Jandora, Šulc, 2006]:

$$\rho_w = 1000 \left[ 1 - \frac{T + 288,9414}{508929,2(T + 6812963)} (T - 3,9863)^2 \right] \quad (10.3)$$

$$\nu = \frac{1,79e^{-6}}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} \quad (10.4)$$

- 5) Až je vzorek plně nasycen a voda odtéká z propustoměru pomocí odpadního potrubí, tak se postupně povolují uzávěry. Následně se odpojí hadičky pro měření piezometrů od odečítací tabule, aby se odvzdušnily. Pro odvzdušnění je zapotřebí nechat odtéct minimálně 200 ml vody a poté zpět zapojit.





**Obr. 10.3 Propustoměr zapojený do soustavy**

- 6) Po ustálení proudění byla kontrolně změřena a dopočítána výška vzorku  $l$  a porovnána s předchozím měřením. Objem vzorku zeminy včetně pórů se stanoví dle:

$$V_1 = Al \quad (10.5)$$

kde  $A$  je průřezová plocha propustoměru a  $l$  výška vzorku. Podle objemové hmotnosti zkoušené zeminy se stanovil objem zkoušené zeminy bez pórů  $V_k$  a následně se vypočítala pórovitost dle vztahu

$$V_k = \frac{m_k}{\rho_s} \quad (10.6)$$

kde  $m_k$  je hmotnost vzorku zeminy a  $\rho_s$  je specifická objemová hmotnost zrna z tab. 8.7 a 8.8.

- 7) Stanovila se pórovitost vzorku  $n$ .

$$n = \frac{V_1 - V_k}{V_1} \quad (10.7)$$

## **10.2 Laboratorní měření a jeho průběžné vyhodnocení**

Po přípravě laboratorního vzorku, lze začít s opakovaným měřením pro různé rozdíly piezometrických výšek  $H'$ . V rámci těchto pokusů se měřily velikosti hydraulického gradientu  $J$

(následně kritického hydraulického gradientu  $J_K$  v okamžiku porušení) a hydraulické vodivosti  $k$ . Pro vypočítání těchto veličin se musely stanovit tyto veličiny:

- průsak jako  $V/t$ ,
- rozdíl piezometrických výšek ( $H'$ ),
- měření výšky vzorku ( $l$ ),
- vizuální kontrola vzorku.

Tento postup se opakoval až do porušení vzorku.

### **10.2.1 Materiální zabezpečení**

Pro měření byl zapotřebí tento materiál a zařízení:

- stopky,
- metr,
- odměrné válce,
- váha s přesností na 0,1 g,
- notebook.

### **10.2.2 Postup měření**

Po posunutí horní pohyblivé nádrže, ustálení proudění ve vertikálním propustoměru a ustálení piezometrických výšek se provedla následující měření:

- rozdíl piezometrických výšek  $\Delta h$ ,
- výška vzorku  $l$ ,
- průsak  $Q$  měřený jako  $V/t$  (objemová metoda).

Po naměření a zapsání naměřených hodnot do tabulky se vyhodnotí velikost hydraulické vodivosti  $k$  a hydraulický gradient  $J$ , následně se zvedne nádrž cca o 0,5cm a měření se opakuje. Tento postup se opakuje, než dojde k porušení. Pomocí výše měřených veličin se stanovil hydraulický gradient  $J$ :

$$J = \frac{H'}{l} \quad (10.8)$$

a hydraulická vodivost  $k_{mer}$  z Darcyho vztahu:

$$k_{mer} = \frac{V}{tAJ} \quad (10.9)$$

kde  $A$  je průřezová plocha propustoměru. Takto naměřená a vypočítaná hydraulická vodivost  $k_{mer}$  je ovlivněna ztrátou na síť (geotextilii) kap. 9.2. Proto se provede následující přepoččet:

$$\frac{k_{mer}}{l + h_g} = \frac{k_z}{l} + \frac{k_g}{h_g} \quad (10.10)$$

kde  $h_g$  je tloušťka sítka,  $k_g$  je hydraulická vodivost sítka a  $k_z$  jeho hydraulická vodivost zeminy

$$k_z = \frac{l}{\frac{l + h_g}{k_{mer}} - \frac{h_g}{k_g}} \quad (10.11)$$

Jelikož teplota vody není při každém měření stejná, tak se hodnota hydraulického gradientu přepočítává na teplotu  $T = 20^\circ\text{C}$ :

$$k = \frac{\nu_{mer}}{\nu_{20}} k_z \quad (10.11)$$

kde  $\nu_{mer}$  je kinematická viskozita měřeného vzorku stanovená dle (10.4) a  $\nu_{20}$  je kinematická viskozita vody při  $T = 20^\circ\text{C}$ .

### 10.2.3 Průběžné vyhodnocování

Pro stanovení hydraulické vodivosti materiálu  $k$ , pro původní vypočítanou pórovitost  $n$  dle (10.7), se použijí 3 až 4 měření, kdy se hydraulický gradient  $J$  pohyboval v rozmezí 0,3 až 0,5. V okamžiku, kdy, hydraulická vodivost  $k$  vzroste víc jak o 10%, tak se u hydraulického gradientu zaznamená, že dochází k protahování (viz kap. 11). Hydraulický gradient  $J$  se průběžně zaznamenává a poslední naměřená hodnota (před porušením), je považována za hodnotu kritického hydraulického gradientu  $J_K$ .

Při vyhodnocování se vyhodnocuje i Reynoldsovo kritérium  $Re$ , které indikuje, zda se jedná o proudění laminární ( $Re < 1$ ):

$$Re = \frac{Qd_e}{Av} \quad (10.13)$$

kde  $d_e$  je efektivní velikost zrna. Reynoldsovo kritérium je důležité zejména u hrubozrnějších vzorků s vyšší hydraulickou vodivostí  $k$ .

**Tab. 10.1 Ukázka tabulky pro stanovení pórovitosti  $n$**

Číslo pokusu	Zhutnění (Ano/Ne)	Typ zeminy	Průměr propustoměru	Průřezová plocha propustoměru	Hmotnost prázdného propustoměru před měřením	Hmotnost propustoměru včetně zeminy	Hmotnost zeminy	Délka vzorku (od bodu měření)	Rozdíly ve výškách	Výška vzorku	Teplota vody	Hustota vody	Objemová hmotnost zeminy	Pórovitost
ČP	-	-	$d_p$	$A$	$m_{p,p}$	$m_{p,k}$	$m_k$	$h_1$	$h_2-h_3$	$l$	$T$	$\rho_w$	$\rho_s$	$n$
-	-	-	m	m <sup>2</sup>	kg	kg	kg	m	m	m	°	kg.m <sup>-3</sup>	kg.m <sup>-3</sup>	-
1	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,912	3,246	2,334	0,118	0,0020	0,1195	18,0	998,65	2638	0,376
2	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,910	3,049	2,139	0,106	0,0020	0,1075	18,0	998,65	2638	0,365
3	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,912	3,218	2,307	0,116	0,0020	0,1175	18,0	998,65	2638	0,373
4	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,913	3,215	2,302	0,120	0,0020	0,1215	18,0	998,65	2638	0,395
5	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,919	3,273	2,354	0,122	0,0015	0,1230	18,0	998,65	2638	0,389
6	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,914	3,278	2,364	0,120	0,0020	0,1210	18,0	998,65	2638	0,376
7	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,919	3,299	2,380	0,124	0,0015	0,1250	18,0	998,65	2638	0,392
8	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,914	3,184	2,271	0,112	0,0020	0,1135	18,0	998,65	2638	0,361
9	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,918	3,389	2,470	0,120	0,0015	0,1210	17,0	998,83	2638	0,348
10	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,918	3,094	2,177	0,111	0,0015	0,1120	16,5	998,91	2638	0,379
11	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,912	3,025	2,113	0,106	0,0020	0,1070	17,0	998,83	2638	0,369
12	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,918	3,267	2,348	0,116	0,0015	0,1170	17,6	998,72	2638	0,359
13	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,913	3,376	2,463	0,121	0,0020	0,1225	17,8	998,69	2638	0,358
14	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,919	3,219	2,301	0,118	0,0015	0,1190	17,9	998,67	2638	0,383
15	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,913	3,189	2,276	0,116	0,0020	0,1175	17,9	998,67	2638	0,381
16	Ne	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,919	3,276	2,358	0,122	0,0015	0,1230	17,9	998,67	2638	0,388
17	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,903	3,209	2,306	0,112	0,0020	0,1135	15,5	999,07	2638	0,351
18	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,917	3,328	2,411	0,117	0,0015	0,1180	15,9	999,01	2638	0,347
19	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,904	3,143	2,239	0,106	0,0020	0,1075	15,9	999,01	2638	0,335
20	Ano	Bzenec	1,23E-01	1,19E-02	0,919	3,254	2,335	0,110	0,0015	0,1110	16,1	998,98	2638	0,328

**Tab. 10.2 Ukázka tabulky pro stanovení hydraulické vodivosti a kritického hydraulického gradientu**

Číslo pokusu	Typ zeminy	Efektivní zrno	Měření číslo	Průřezová plocha propustoměru	Teplota vody	Hustota vody	Kinematická viskozita	Piezometrická výška	Délka vzorku	Objem	Čas	Průtok	Hydraulický gradient	Reynoldsovo kritérium	Hydraulická vodivost	Průměrná hydraulická vodivost
ČP	-	$d_e$	-	$A$	$T$	$\rho_w$	$\nu$	$H'$	$l$	$V$	$T$	$Q$	$J$	$Re$	$k$	$k_{prum}$
-	-	m	-	m <sup>2</sup>	°C	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /s	m	m	m <sup>3</sup>	s	m <sup>3</sup> /s	-	-	m/s	m/s
1	Bzenec	1,5E-04	1	1,19E-02	18	998,65	1,1E-06	0,043	0,120	3,8E-05	34,88	1,09E-06	0,360	0,01	2,53E-04	2,54E-04
			2					0,052	0,120	5,4E-05	40,84	1,31E-06	0,435	0,02	2,53E-04	
			3					0,062	0,120	5,7E-05	36,44	1,57E-06	0,519	0,02	2,54E-04	
			4					0,069	0,120	6,4E-05	36,4	1,75E-06	0,577	0,02	2,54E-04	
			5					0,078	0,120	6,6E-05	33,18	1,99E-06	0,653	0,02	2,56E-04	
			6					0,087	0,120	6,8E-05	30,59	2,22E-06	0,728	0,03	2,56E-04	
			7					0,096	0,120	6,7E-05	27,16	2,46E-06	0,803	0,03	2,57E-04	
			8					0,105	0,120	9,9E-05	36,21	2,73E-06	0,879	0,03	2,60E-04	
			9					0,116	0,120	1,0E-04	33,16	3,12E-06	0,971	0,04	2,70E-04	
			10					0,120	0,121	1,2E-04	36,16	3,37E-06	0,996	0,04	2,84E-04	
			11					0,120	0,122	1,2E-04	33,13	3,63E-06	0,984	0,04	3,09E-04	

## 11. PRŮBĚH PORUŠENÍ A JEHO IDENTIFIKACE

Během měření ve vertikálním propustoměru byly zaznamenány některé změny fyzikálních vlastností ve vzorku a změny jeho rozměru (hydraulická vodivost, délka vzorku, pohyby zrněk). Tyto změny byly popsány ve čtyřech základních fázích porušení.

### 11.1 *Fáze průběhu porušení*

V průběhu laboratorního měření ve vertikálním propustoměru bylo zaznamenáno několik fází, které byly vyhodnoceny následovně:

- vzorek bez změny,
- protahování vzorku,
- lokální pohyb zrn,
- ztekucení (úplné porušení).

#### 11.1.1 *Vzorek bez změny*

Vzorek bez změny se uvažuje stav, kdy v zemině nedochází vlivem proudění vody k pohybu jednotlivých zrn. Vzorek má stálou hydraulickou vodivost  $k$ , nedochází k vyplavování jemnozrnější frakce a vzorek se neprotahuje. Doba, po kterou tento stav trvá, je ovlivněna fyzikálními vlastnostmi zeminy pórovitostí  $n$  a zejména působícím hydraulickým gradientem  $J$ . Změna nastává v okamžik, kdy se zvýší hydraulická vodivost  $k$  o víc jak 10%.

#### 11.1.2 *Protahování vzorku*

Protahování vzorku je stav, který nastává u stejnozrných materiálů vlivem proudění vody. 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  $J$  obr.11.1.



**Obr. 11.1 Nadzvednutí ve vertikálním propustoměru (vlevo: bez porušení, vpravo: protažení)**

### **11.1.3 Lokální poruchy**

Lokální porucha je typ porušení, který je viditelný na povrchu nebo po obvodu, kde dochází k pohybu jednotlivých částic vzorku. Tento jev může nastat i uvnitř vzorku, ale není viditelný. Může se jednat například o vibraci či posun jednoho nebo více zrn, přeskupování zrn, nebo může dojít k tzv. lokálnímu vření částic. Tyto lokální poruchy se v některých případech mohou ustálit, protože dojde k přeskupení jednotlivých zrn. Avšak je předpoklad, že v místech, kde dochází k lokální poruše, je větší pravděpodobnost, že dojde při zvýšení hydraulického gradientu  $J$  k úplnému porušení (ztekucení).

### **11.1.4 Ztekucení**

Ztekucení je proces rozrušení a vyplavení celého objemu stejnozrné zeminy vlivem proudění vody. Nastává v zemině v místě vzestupného vysakování vody do volného prostoru. 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 jemnozrnější frakce, která se vyplavuje na povrch (obr. 11.2).





**Obr. 11.2 Ztekucení ve vertikálním propustoměru (vlevo: lokální poruchy – kritický hydraulický gradient, vpravo: ztekucení)**

Na levé části obr. 11.2 dochází k mírnému protažení vzorku ve středu, zemina je dosud stabilní a voda nad vzorkem je lehce zakalená (dochází k mírnému vyplavování jemnozrné (prachovité) frakce). Na pravém obrázku již došlo ke ztekucení, kde voda je značně zakalena (vyplavení jemnozrné (prachovité) frakce), vzorek se protáhl o 20 mm a dochází k segregaci jemnozrnější frakce ve směru proudění.

### **11.2 Stanovení počátku porušení**

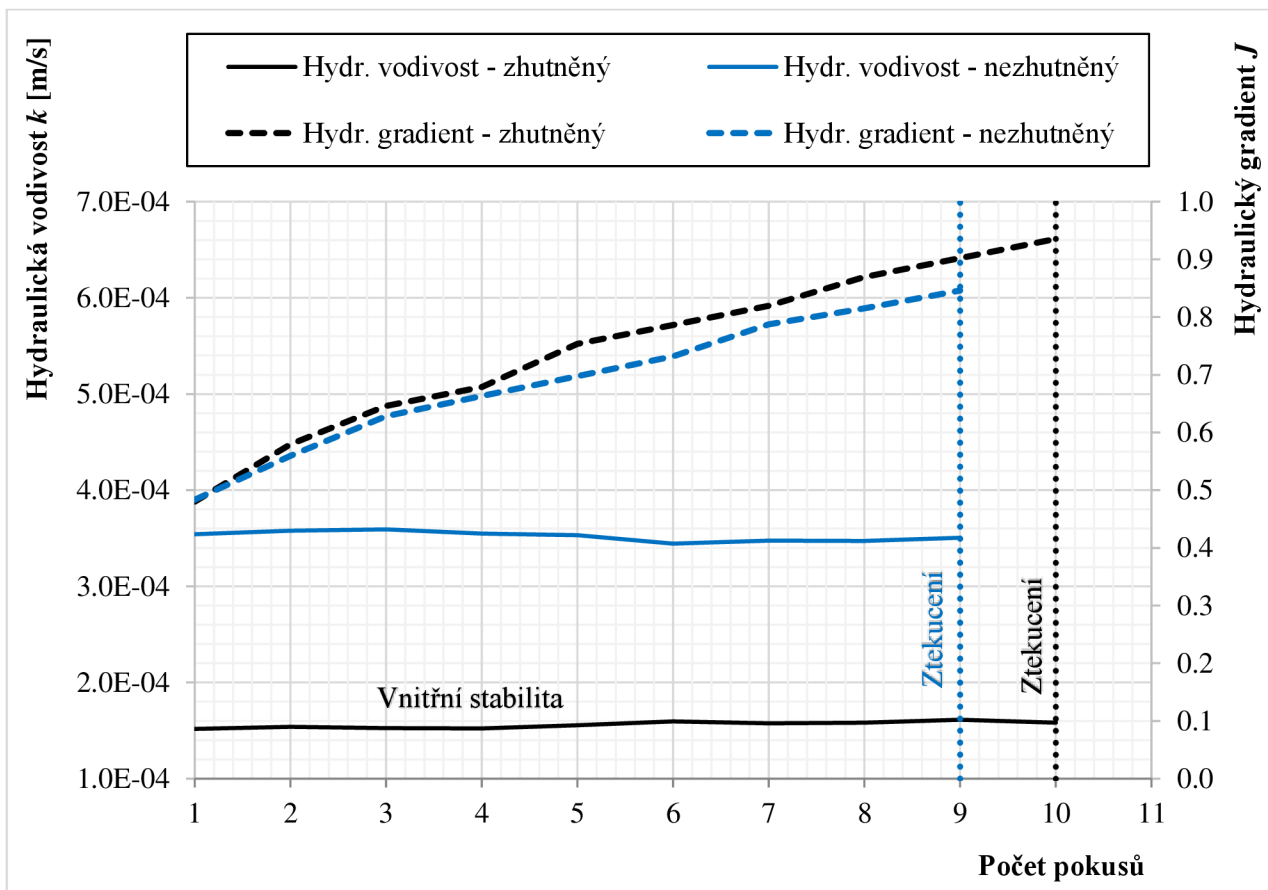
Ze začátku dochází k oku neviditelnému protahování, které lze zaznamenat postupným zvyšováním hydraulické vodivosti  $k$ , při zvyšování hydraulického gradientu  $J$ . V tento okamžik dochází ke zvýšení pórovitosti a hydraulické vodivosti (řádově až v desítkách procent). Pokračuje protahování, které je doprovázeno lokálními poruchami. Při dosažení kritického hydraulického gradientu  $J_K$  je efektivní napětí v zemině prakticky na nule a následně dochází ke ztekucení zeminy a její vyplavování.

Na obr. 11.3, až 11.11 jsou zobrazeny ukázky grafů všech materiálů pro jeden zhuťný a nezhuťný vybraný vzorek, kde je vyznačen průběh hydraulické vodivosti  $k$  a hydraulického gradientu  $J$ . V tab. 11.1 jsou vypsány pórovitosti  $n$  materiálů a hydraulické gradienty  $J$ , při kterých dochází ke změnám.

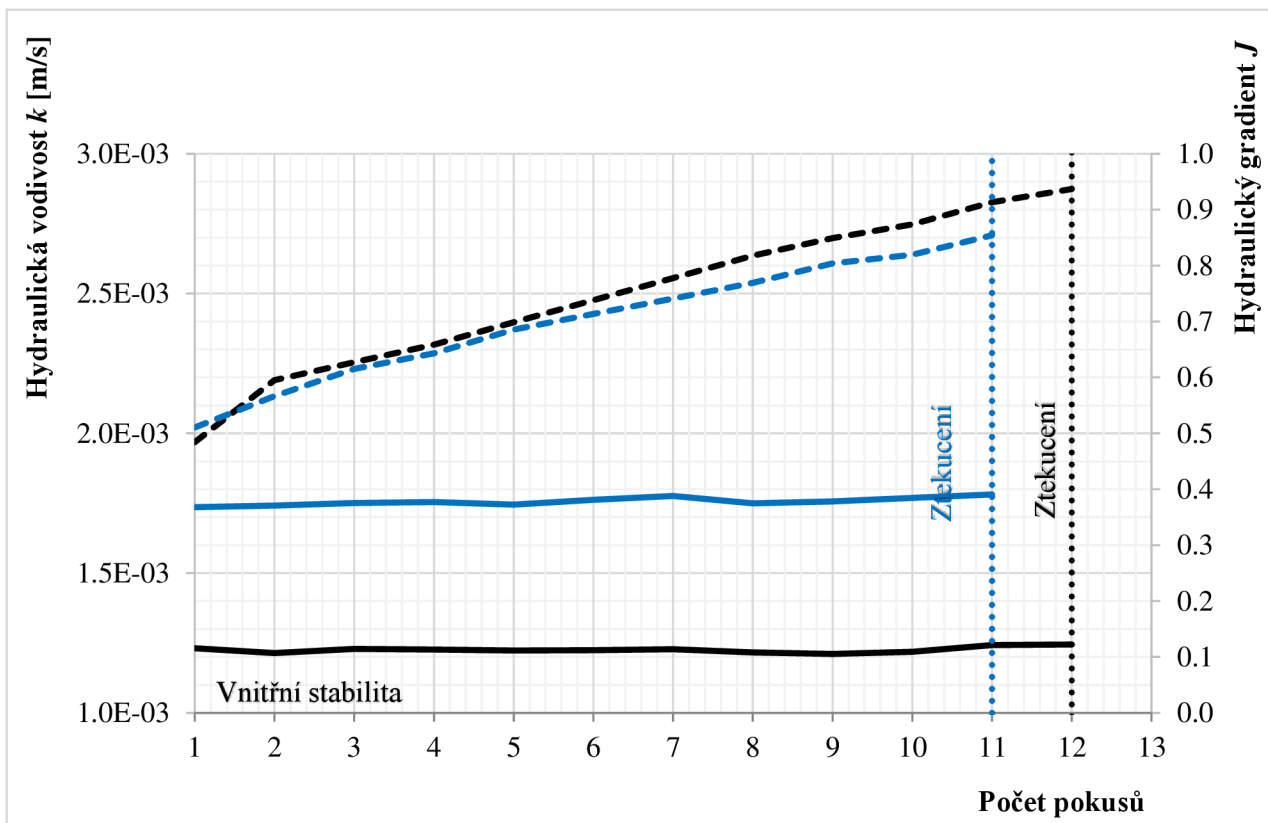


**Tab. 11.1 Vybrané příklady průběhu porušení**

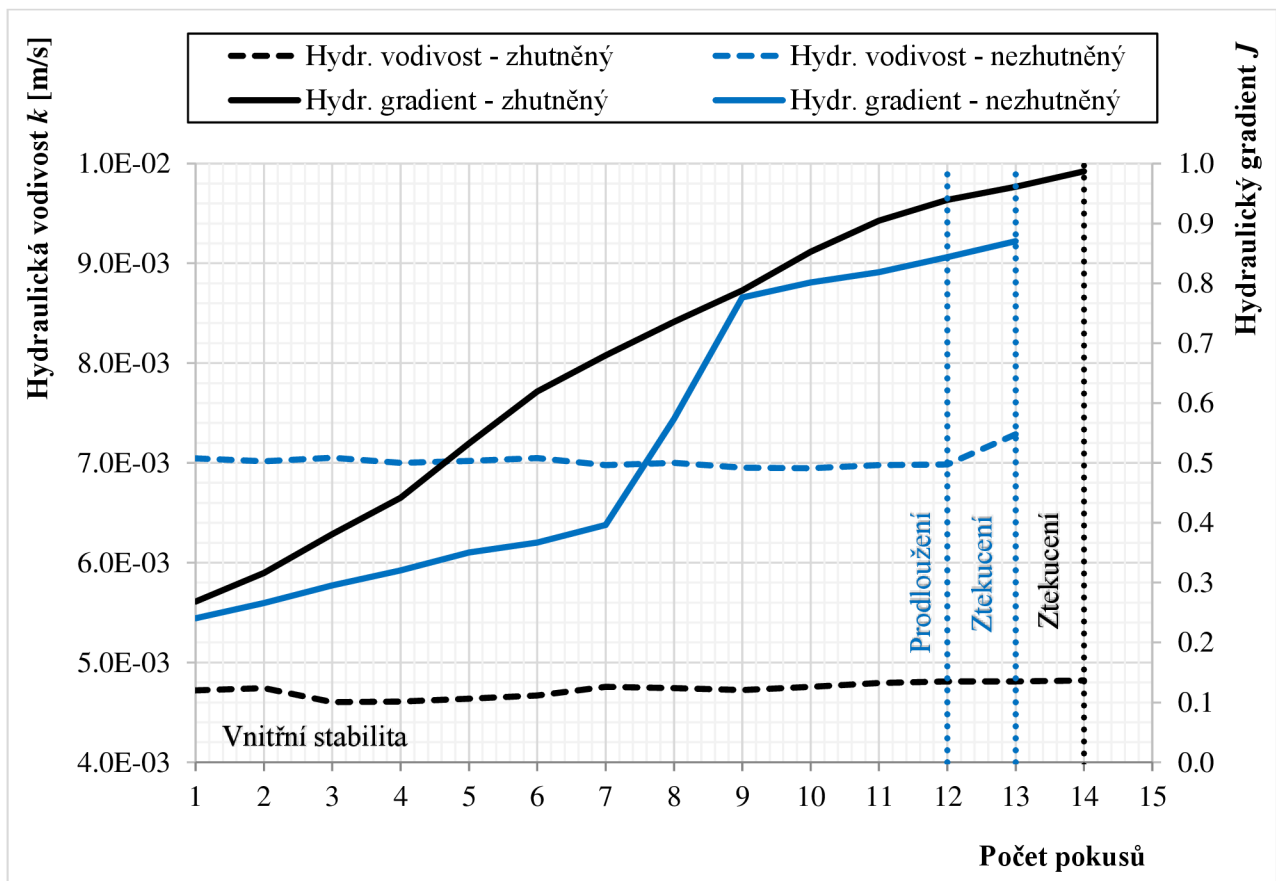
Materiál	Zhutnění	Číslo pokusu	Počáteční pórovitost $n$	Hydraulický gradient při počátku prodlužování	Kritický hydraulický gradient $J_K$
Kuličky 0,2 mm	nezhutněné	27	0.431	-	0.846
	zhutněné	28	0.368	-	0.935
Kuličky 0,5 mm	nezhutněné	28	0.401	-	0.854
	zhutněné	29	0.363	-	0.937
Kuličky 1,0 mm	nezhutněné	1	0.394	0.844	0.870
	zhutněné	9	0.363	-	0.987
Bzenec 0/2 mm	nezhutněné	14	0.383	0.896	0.959
	zhutněné	35	0.306	0.909	1.073
Kora 0/4 mm	nezhutněné	39	0.398	0.901	0.992
	zhutněné	26	0.376	0.949	1.110
Olbramovice 0/4 mm	nezhutněné	13	0.390	0.589	1.039
	zhutněné	21	0.371	1.072	1.103
Bzenec 0/2 mm	nezhutněné	30	0.385	0.710	0.965
	zhutněné	27	0.358	0.775	1.031
Kora 0/4 mm	nezhutněné	21	0.446	0.667	0.875
	zhutněné	15	0.415	0.767	0.931
Olbramovice 0/4 mm	nezhutněné	22	0.525	0.557	0.720
	zhutněné	2	0.488	0.768	0.890



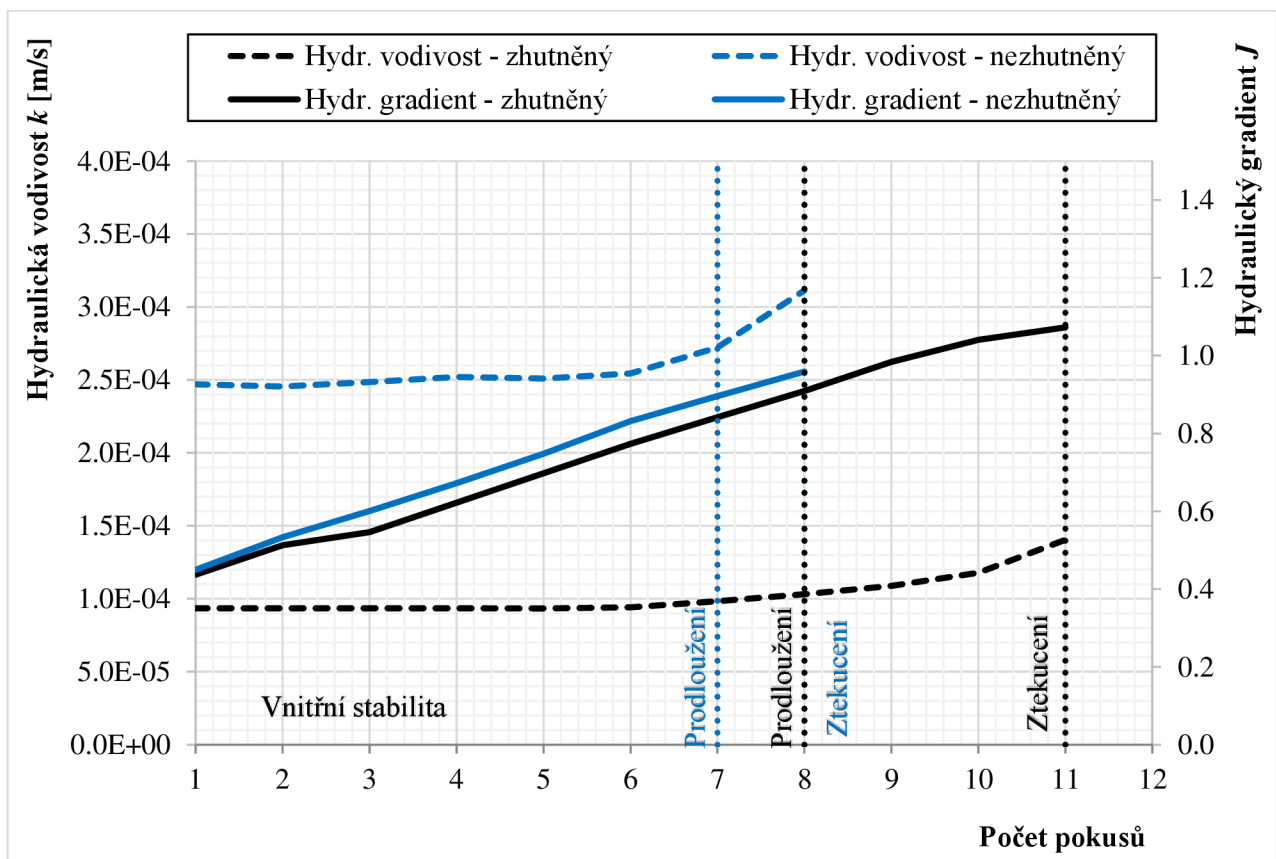
Obr. 11.3 Skleněné kuličky 0,2 mm – průběh měření vybraného pokusu



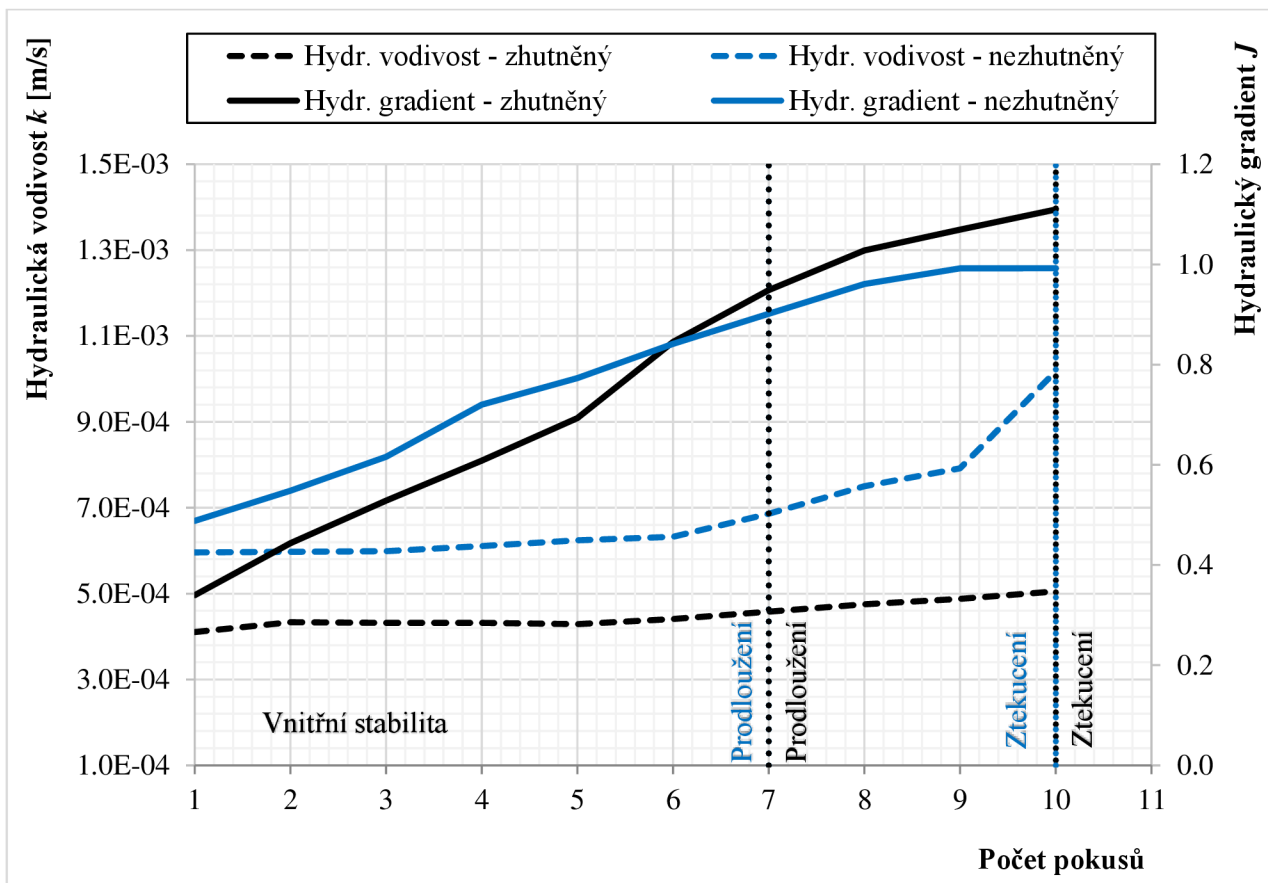
Obr. 11.4 Skleněné kuličky 0,5 mm – průběh měření vybraného pokusu



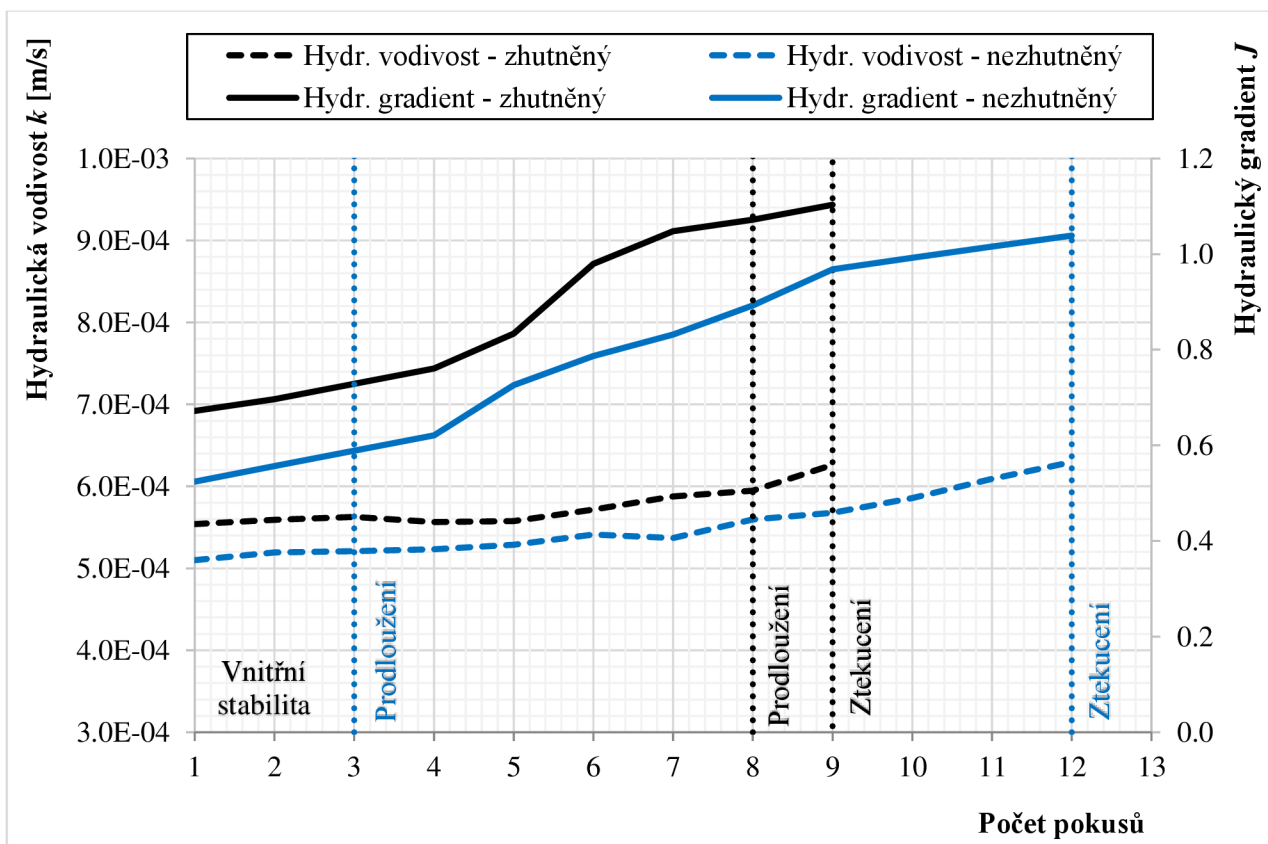
Obr. 11.5 Skleněné kuličky 1,0 mm – průběh měření vybraného pokusu



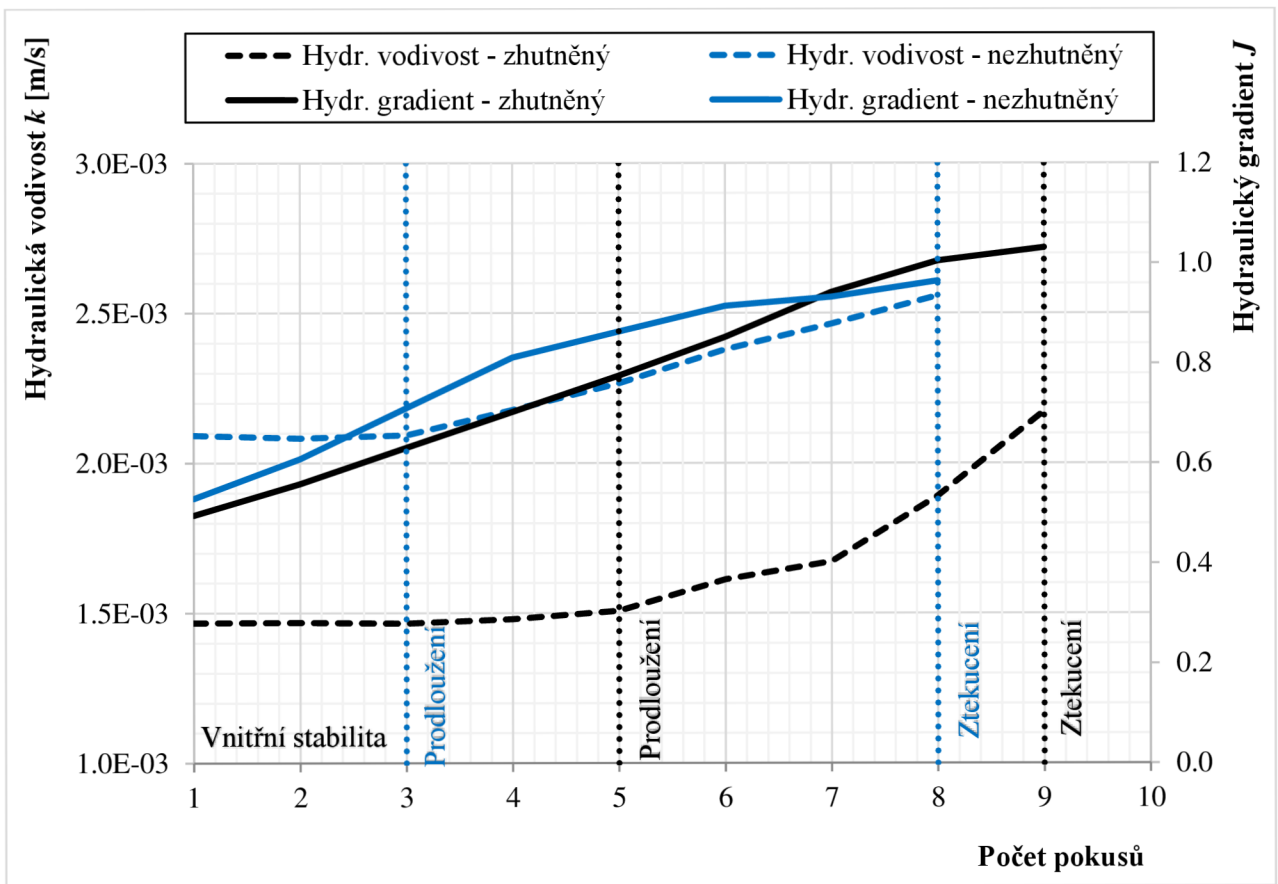
Obr. 11.6 Bzenec 0/2 mm – průběh měření vybraného pokusu



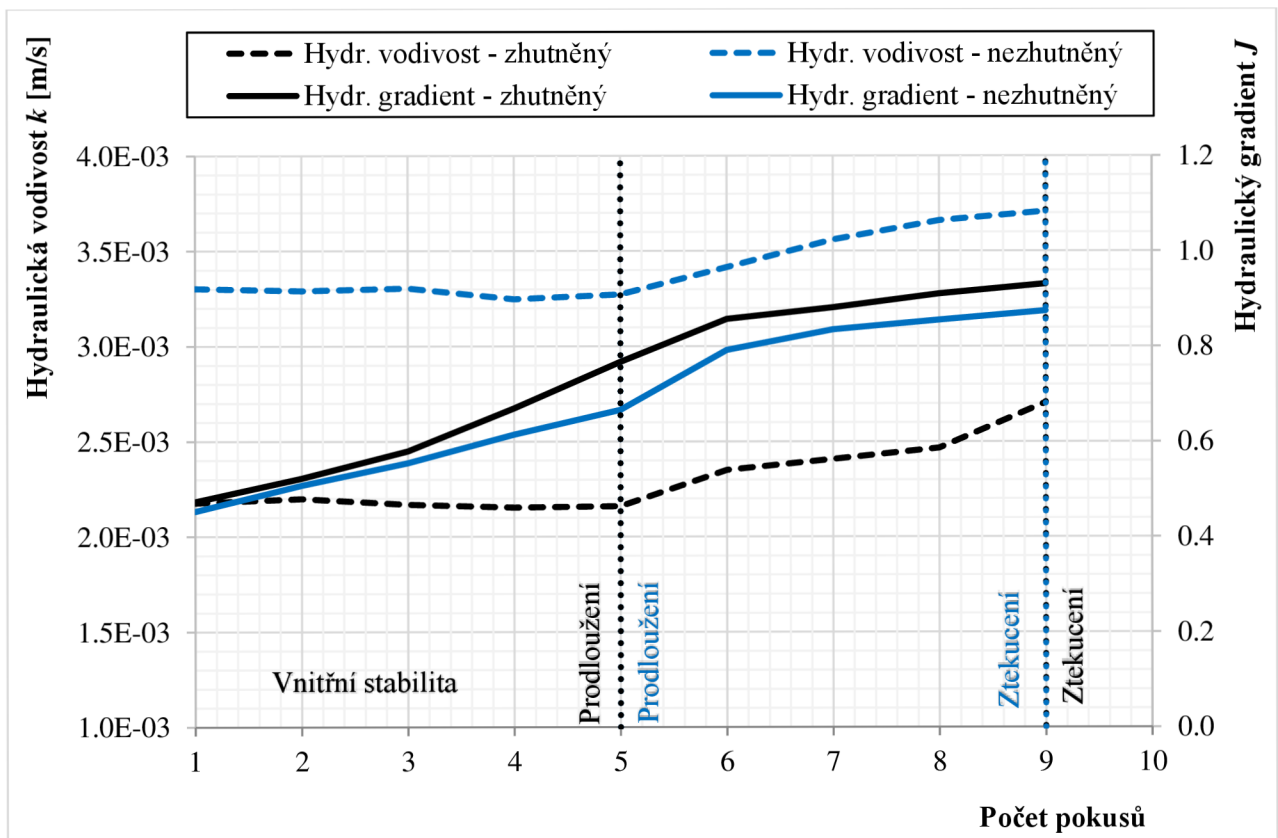
Obr. 11.7 Kora 0/4 mm – průběh měření vybraného pokusu



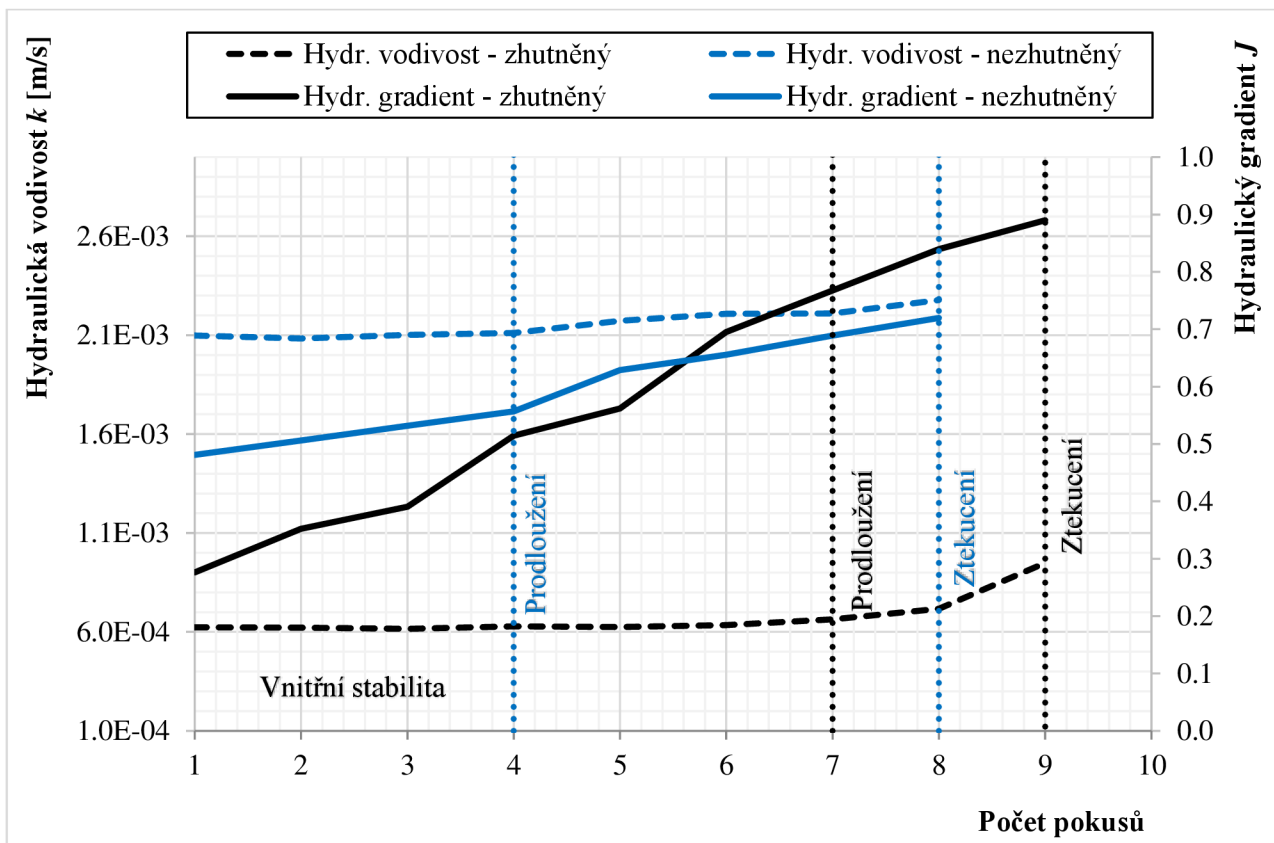
Obr. 11.8 Olbramovice 0/4 mm – průběh měření vybraného pokusu



Obr. 11.9 Bzenec 0/2 mm – průběh měření vybraného pokusu



Obr. 11.10 Kora 0/2 mm – průběh měření vybraného pokusu



**Obr. 11.11 Olbramovice 0/4 mm – průběh měření vybraného pokusu**

V průběhu měření nebylo zaznamenáno u skleněných kuliček (zhutněné i nezhutněné), že by došlo k protažení vzorku, které by bylo větší jak 1,5 mm (tab. 11.2). Zrna se místy přeskupovala a vibrovala, ale nedocházelo k výraznějšímu protahování vzorku.

U ostatních zemin docházelo k protažení vzorku dříve u méně zhutněných zemin (vyšší pórovitost), i když výsledné prodloužení při kritickém gradientu  $J_K$  bylo větší u zemin více zhutněných. Po ztekucení se vzorek protáhl o 20 až 35 mm.

**Tab. 11.2 Shrnutí přírůstku délky při protažení před ztekucením**

Číslo materiálu	Název vzorku zeminy	Počet pokusů	Protažení před ztekucením		
			Min.	Max.	Průměr
		[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1	Skleněné kuličky 0,2 mm	52	0,00	1,00	0,14
2	Skleněné kuličky 0,5 mm	53	0,00	1,00	0,40
3	Skleněné kuličky 1,0 mm	72	0,00	1,50	0,21
4	Bzenec 0/2	40	1,00	8,00	3,78
5	Kora 0/4	40	1,50	8,00	4,51
6	Kora 0,1/1	40	0,50	7,00	2,26
7	Bzenec 0,1/1	40	0,50	5,00	2,23
8	Olbramovice 0/4	40	1,00	7,50	3,75
9	Olbramovice 0,25/0,5	40	0,50	5,50	2,00

**11.2.1 Shrnutí**

Ztekucení je nevratný děj, který rozruší celou zeminu. Při překročení kritického hydraulického gradientu dochází k velkému protažení vzorku, ztrátě stability a tím k velkému zvyšování pórovitosti  $n$  (hydraulické vodivosti  $k$ ), která je i po snížení gradientu vyšší. **Pro další vyhodnocování se bude pouze posuzovat okamžik, kdy dochází ke ztekucení.**

## 12. STANOVENÍ RELATIVNÍ CHYBY MĚŘENÍ

Při měření v laboratoři bylo použito měřidel, která mají různou přesnost, ať se může jednat o výrobní přesnost (váha), nebo obecně dosažitelné přesnosti (vizuální odečet, stopky atd).

### 12.1.1 Postup

Pro vyjádření odchylky ve stanovení pórovitosti  $n$  a kritického hydraulického gradientu  $J_K$  je nutné shrnout vstupní odchylky jednotlivých veličin (tab. 12.1). **Relativní chyba ve stanovení pórovitosti  $\delta_n$**  vychází ze vztahů pro stanovení pórovitosti (12.2 až 12.4), je uvedena v procentech a vypočítá se [Vybíral, 2002]:

$$\delta_n = 100 \left( \frac{n_{max}}{n} - 1 \right) \quad (12.1)$$

kde  $n_{max}$  je maximální pórovitost, která byla vypočítána:

$$n_{max} = \frac{V_{1,max} - V_{k,min}}{V_{1,max}} \quad (12.2)$$

kde  $V_{1,max}$  je maximální objem zeminy v propustoměru včetně pórů (12.3),  $V_{k,min}$  je minimální objem zkoušené zeminy v propustoměru bez pórů (12.4).

$$V_{1,max} = \frac{\pi(d_p + \Delta d_p)^2}{4} (l + \Delta l) \quad (12.3)$$

$$V_{k,min} = \frac{(m_{p,k} - \Delta m) - (m_{p,p} + \Delta m)}{\rho + \Delta \rho} \quad (12.4)$$

kde  $d_p$  je průměr propustoměru,  $\Delta d_p$  je odchylka průměru propustoměru,  $l$  je délka vzorku v propustoměru,  $\Delta l$  je odchylka délky vzorku v propustoměru,  $m_{p,k}$  je hmotnost plného propustoměru,  $m_{p,p}$  je hmotnost prázdného propustoměru se sítím,  $\Delta m$  je odchylka v měření hmotnosti,  $\rho_s$  je specifická objemová hmotnost zrn,  $\Delta \rho_s$  je odchylka ve specifické objemové hmotnosti zrn.

**Relativní chyba ve stanovení hydraulického gradientu  $\delta_J$**  vychází ze vztahu (12.5), je uvedena v procentech a vypočítá se dle:

$$\delta_J = 100 \left( \frac{J_{max}}{J} - 1 \right) \quad (12.5)$$

kde  $J_{K,max}$  je maximální kritický hydraulický gradient, vypočítaný dle:

$$J_{K,max} = \frac{H' + \Delta H'}{l - \Delta l} \quad (12.6)$$

kde  $H'$  je rozdíl piezometrických výšek na piezometru a  $\Delta H'$  je odchylka piezometrických výšek na piezometru.



**Tab. 12.1** Nejistoty při měření

Odchytky	Označení	$\Delta$	
Průměr propustoměru	$\Delta d_p$	$\pm 0,10$	mm
Délka vzorku (vizuálně)	$\Delta l$	$\pm 0,25$	mm
Rozdíl piezometrických výšek (vizuálně)	$\Delta H'$	$\pm 0,25$	mm
Hmotnost	$\Delta m$	$\pm 0,10$	g
Objemová hmotnost zrn	$\Delta \rho_s$	$\pm 5,00$	kg/m <sup>3</sup>

**12.1.2 Výsledky**

Jako vstupní data posloužily hodnoty z tab. 12.2, které byly stanoveny z vybraného měření a výsledky jsou tudíž pouze orientační.

**Tab. 12.2** Vstupní data

	Označení		
průměr propustoměru	$d_p$	122,9	mm
minimální délka vzorku	$l$	110,0	mm
rozdíl piezometrických výšek	$H'$	80,0	mm
hmotnost prázdného propustoměru včetně sít	$m$	903,0	g
hmotnost propustoměru včetně zeminy	$m$	3000,0	g
měrná tíha zeminy	$\rho_s$	2638,0	kg/m <sup>3</sup>

Pro stanovení relativních chyby měření pro pórovitost  $n$  a kritický hydraulický gradient  $J_K$  byly použity vztahy (12.1) až (12.6) se vstupními daty z tabulek 12.1 a 12.2. Relativní chyby jsou znázorněny v tab. 12.3:

**Tab. 12.3** Relativní chyby v měření

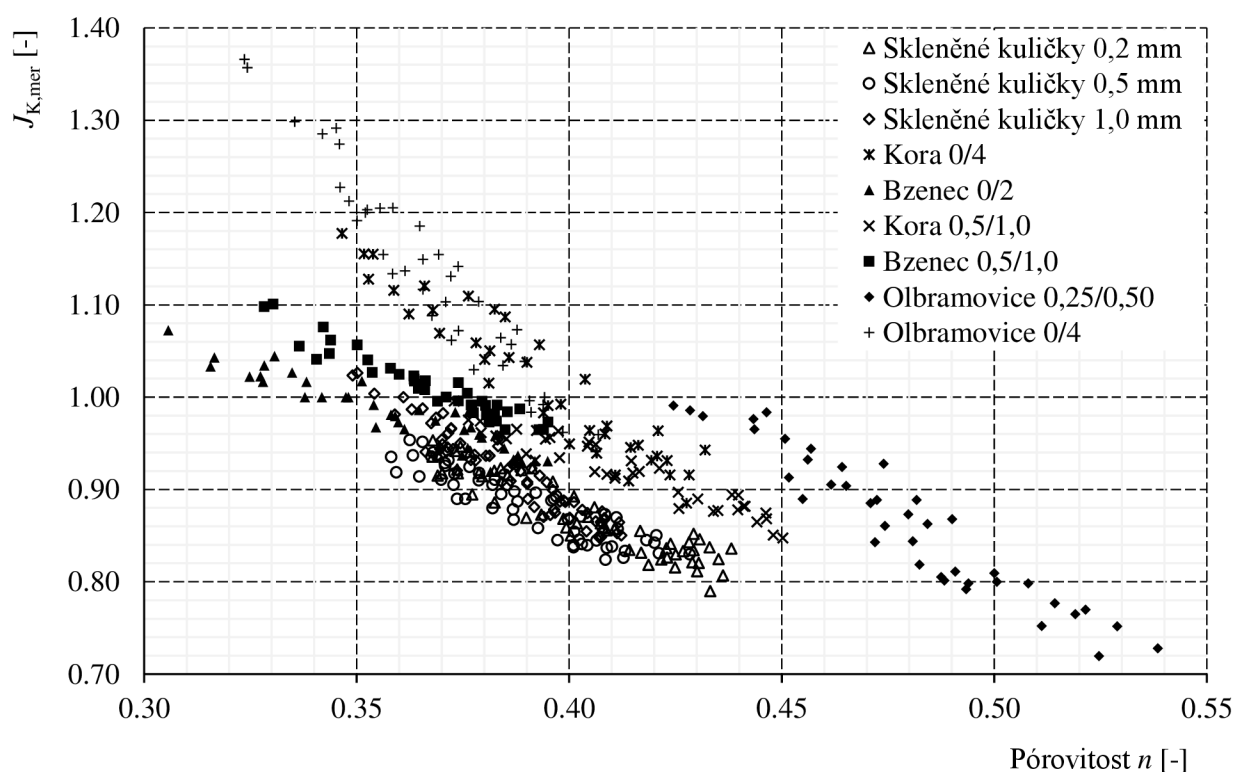
pórovitost	$n$	0.391	0.77%
pórovitost + max. odchylka	$n_{max}$	0.394	
kritický hydraulický gradient	$J_K$	0.727	0.55%
kritický hydraulický gradient + max. odchylka	$J_{K,max}$	0.731	

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

### 13. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Celkem bylo provedeno 425 experimentů na vybraných nesoudržných materiálech. V průběhu měření byla snaha, aby materiály při experimentech měly širokou škálu pórovitostí  $n$ . Z tohoto důvodu byl materiál ukládán do propustoměru různými způsoby. Pro získání vysoké pórovitosti  $n$  byl materiál pouze volně nasypán a zarovnán. Pro menší pórovitosti  $n$  byl materiál zhutňován vibracemi s proměnnou dobou trvání, včetně zatěžování. Počty experimentů, hodnoty minimální a maximální pórovitosti  $n$  a hodnoty minimálního a maximálního kritického hydraulického gradientu  $J_K$  pro daný materiál jsou shrnuty v tab. 13.1

Původním záměrem bylo porovnání naměřených kritických hydraulických gradientů  $J_{K,mer}$  v závislosti na pórovitosti  $n$ . Při tomto porovnání není zohledněna měrná tíha materiálu a výsledky jsou tím zkreslené (obr. 13.1).

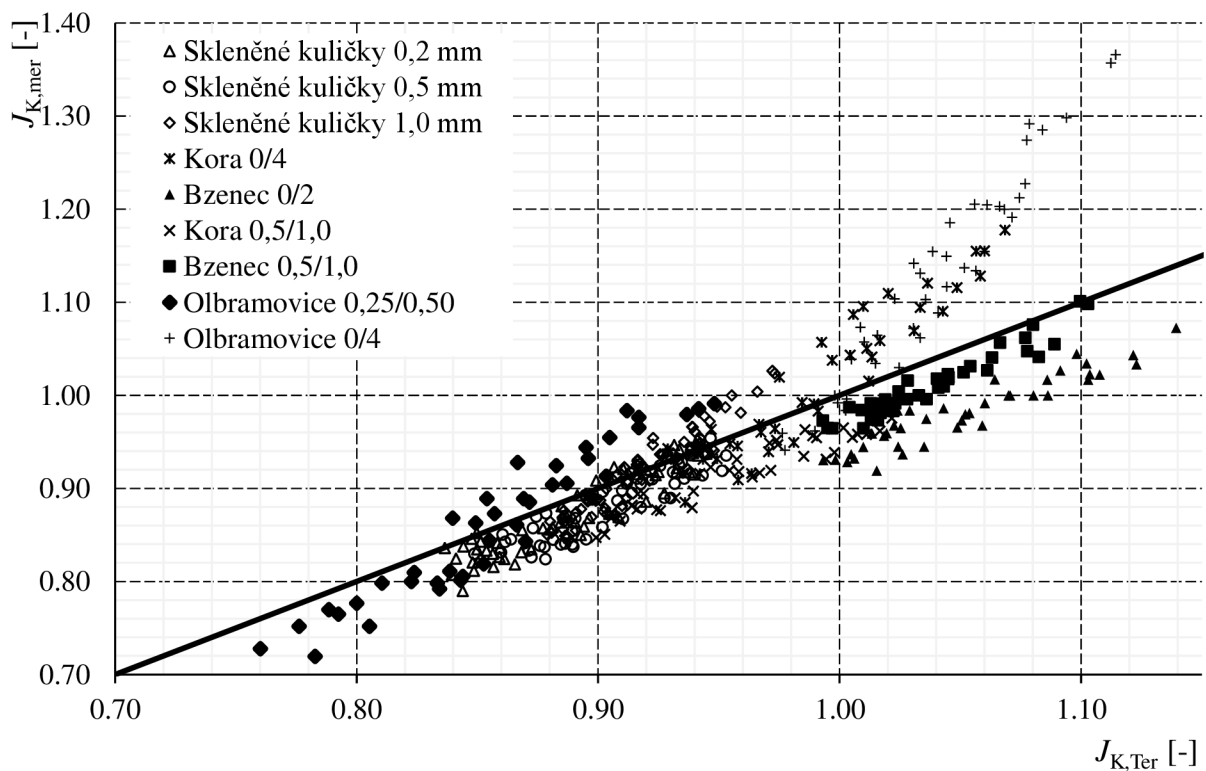


**Obr. 13.1 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu a pórovitosti**

Z tohoto důvodu se hledala jiná varianta porovnání a nejlepší shoda byla objevena u grafu shody s naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$  s hodnotami kritického hydraulického gradientu vypočtenými dle Terzaghiho  $J_{K,Ter}$ . (5.5) resp. (6.18), který byl fyzikálně odvozen Terzaghim viz obr. 13.2, kde je i zobrazena čára shody, tedy předpoklad že  $J_{K,Ter} = J_{K,mer}$ .

**Tab. 13.1 Shrnutí výsledků měření**

Číslo materiálu	Popis zeminy	Počet experimentů	Pórovitost $n$		Kritický hydraulický gradient $J_K$	
			Min	Max	Min	Max
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	Skleněné kuličky 0,2 mm	56	0,377	0,446	0,790	0,953
2	Skleněné kuličky 0,5 mm	57	0,368	0,437	0,824	0,954
3	Skleněné kuličky 1,0 mm	72	0,353	0,416	0,848	1,026
4	Bzenec 0/2	40	0,306	0,395	0,929	1,073
5	Kora 0/4	40	0,347	0,432	0,885	1,177
6	Kora 0,5/1	40	0,373	0,450	0,847	0,996
7	Bzenec 0,5/1	40	0,328	0,395	0,965	1,101
8	Olbramovice 0/4	40	0,324	0,407	0,941	1,366
9	Olbramovice 0,25/0,5	40	0,424	0,538	0,720	0,991

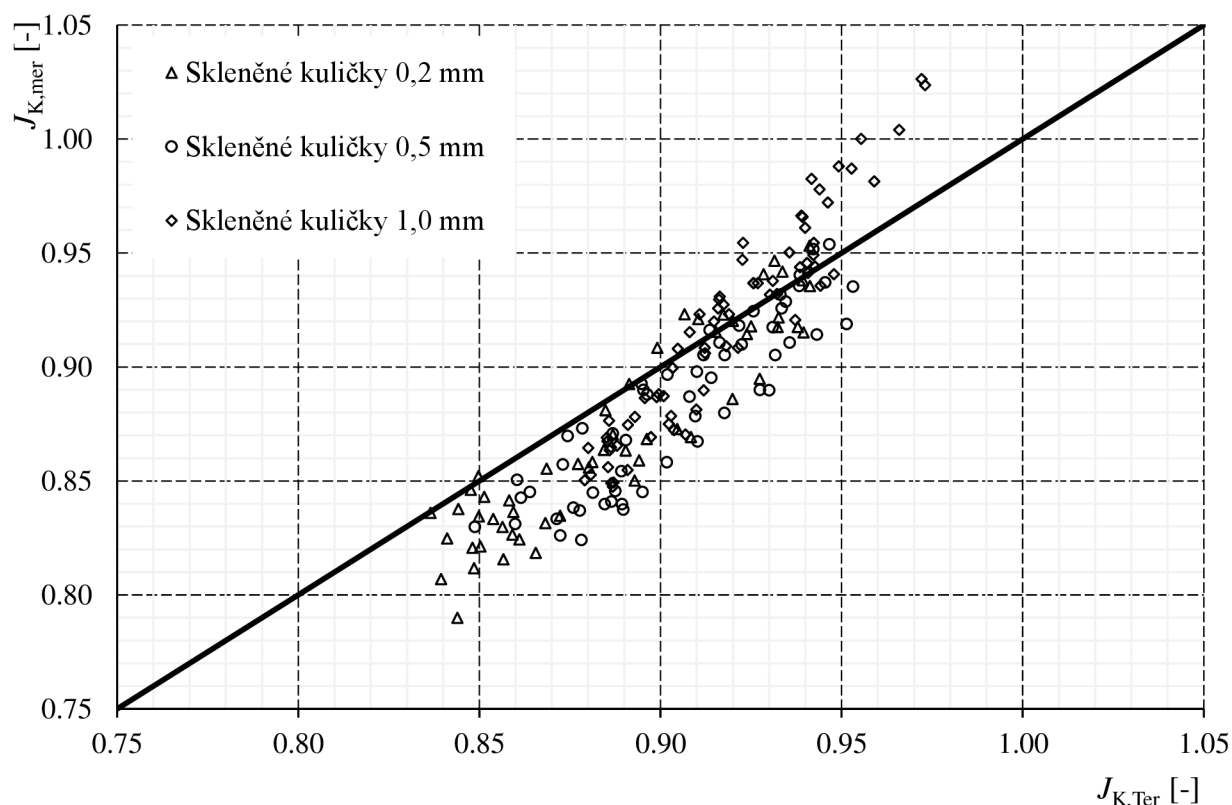


**Obr. 13.2 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými**

Na obr. 13.2 je patrná dobrá shoda naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$  s hodnotami kritického hydraulického gradientu vypočtenými dle Terzaghiho  $J_{K,Ter}$ . U některých materiálů není směr regresní křivky rovnoběžný s čarou shody, což může být způsobeno různými fyzikálními vlastnostmi.

### 13.1.1 Skleněné kuličky

Celkem bylo provedeno 185 laboratorních pokusů na skleněných kuličkách, které mají kulovitý tvar zrna a jejich číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  se pohybuje v rozmezí 1,14 až 1,33 (obr. 13.3).

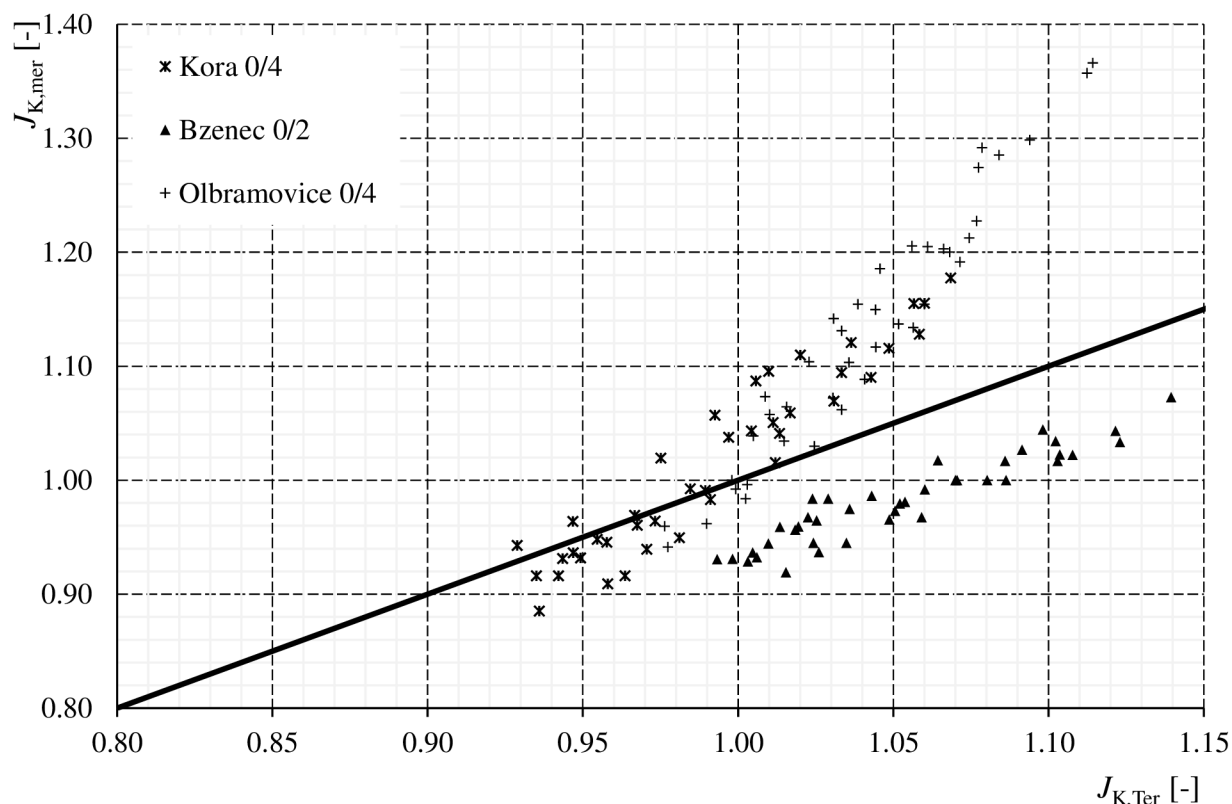


**Obr. 13.3 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými pro skleněné kuličky**

Na Obr. 13.3 je vidět, že vliv velikosti zrna je znatelný u kuliček, které jsou více zhuštěné (nižší pórovitost). Vypočtený kritický hydraulický gradient  $J_{K,Ter}$  je oproti měřeným hodnotám pro nezhuštěné zeminy nadhodnocený, kuličky s průměrem  $d = 0,2$  mm vykazují v případě nezhuštěných vzorků poměr  $J_{K,mer} / J_{K,Ter}$  až 0,94, tedy o 6%. S nižší pórovitostí se začínají hodnoty vypočtené rovnat hodnotám naměřeným, kuličky s průměrem  $d = 1$  mm vykazují v případě zhuštěných vzorků poměr  $J_{K,mer} / J_{K,Ter}$  až 1,05, tedy o 5%.

### 13.1.2 Přírodní písky

Celkem bylo provedeno 120 laboratorních pokusů na různých typech písku, které mají zaoblený a ostrohranný tvar zrna s číslem nestejnozrnnosti  $C_U$  v rozmezí 2,99 až 5,03 (obr 13.4).



**Obr. 13.4 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými pro přírodní písky**

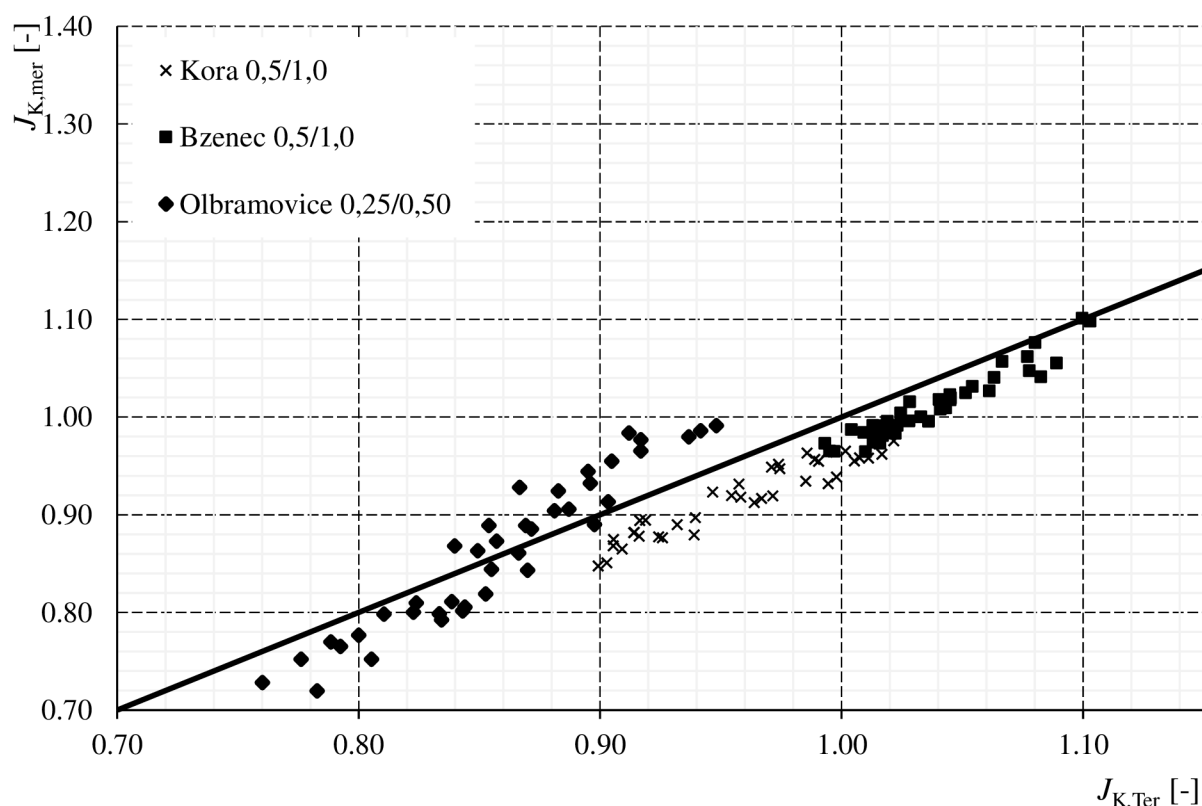
Bzenec 0/2 mm i Kora 0/4 mm jsou těžené materiály s obdobným číslem nestejnozrnnosti  $C_U$  ( $C_{U,Kora} = 2,95$  a  $C_{U,Bzenec} = 2,99$ ). Rozdílem těchto dvou materiálů je křivka zrnitosti (obr. 8.8) a tvar zrna. Bzenec je jemnozrnnější materiál a tvar zrna je oproti Koře více zaoblený.

Při srovnání zemin Kora 0/4 mm a Olbramovice 0/4 mm je patrné rozdílné číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  ( $C_{U,Kora} = 2,95$  a  $C_{U,Olbramovice} = 5,03$ ). Tvar zrna u Olbramovic je ostrohranný, křivky zrnitosti jsou obdobné zejména u jemnozrnnějších frakcí  $d < d_{50}$ .

U Kory nebylo dosaženo nižší pórovitosti pro její tvar zrna, který je na rozmezí zaobleného a ostrohranného materiálu. Olbramovice mají lepší zhutnitelnost danou vyšším číslem nestejnozrnnosti  $C_U$ .

### 13.1.3 Upravené písky

Celkem bylo provedeno 120 laboratorních pokusů na upravených píscích, které mají zaoblený a ostrohranný tvar zrna s číslem nestejnozrnnosti  $C_U$  v rozmezí 1,40 až 1,47.



**Obr. 13.5 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými pro vytríděné písky**

Kora 0,5/1,0 a Bzenec 0,5/1,0 jsou uměle vytríděné materiály se stejnými křivkami zrnitosti, číslem nestejnozrnnosti  $C_U$  a s podobným tvarem zrn (Bzenec má tvar zrna oproti Koře více zaoblený (obr. 8.3)). Materiál Olbramovice 0,25/0,5 má stejné číslo nestejnozrnnosti  $C_U$  jako Kora 0,5/1,0 a Bzenec 0,5/1,0, ale jedná se o materiál jemnozrnější a tvar zrna je ostrohranný.

#### 13.1.4 Shrnutí

Materiály se zaoblenými zrny dosahují při stejném způsobu hutnění nižších pórovitostí, než materiály s ostrohranným tvarem zrn. Na zhutnitelnost materiálů má též vliv číslo nestejnozrnnosti  $C_U$ . S vyšším číslem nestejnozrnnosti  $C_U$  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.

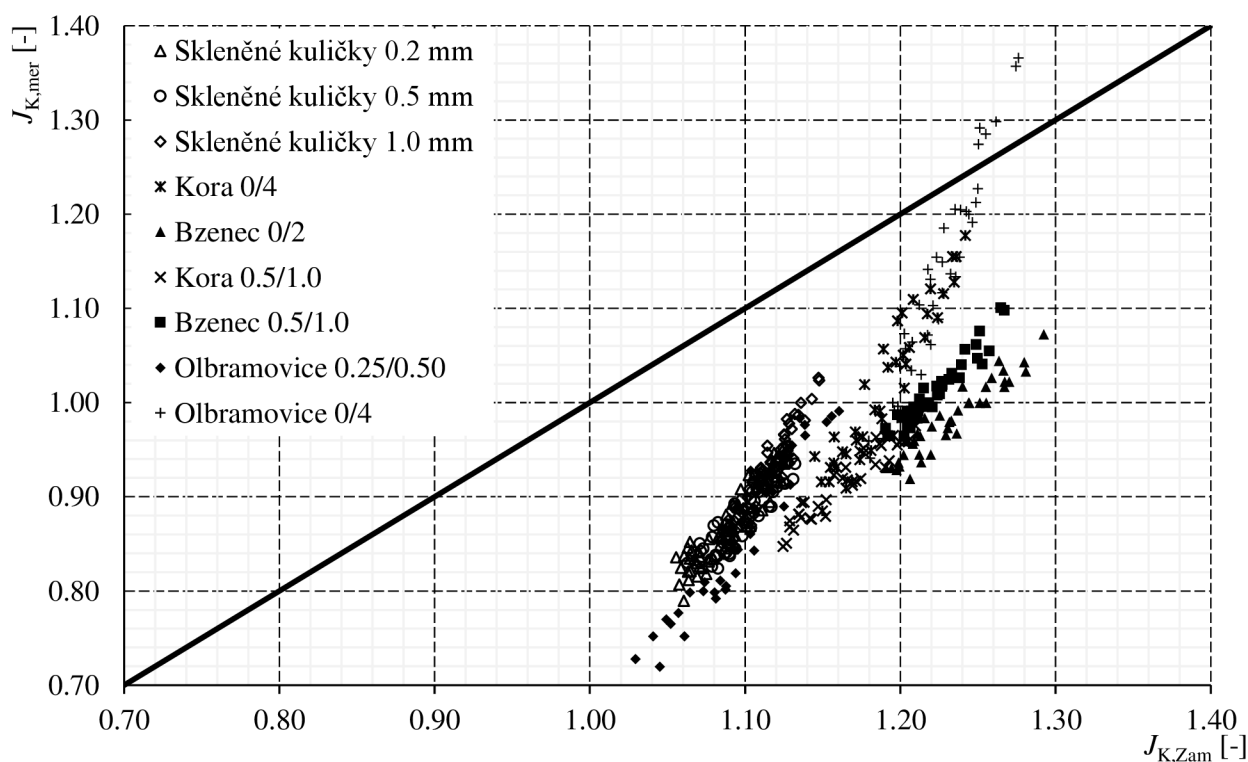
## 13.2 Porovnání naměřených výsledků s empirickými vztahy

V rámci vyhodnocení výsledků laboratorních pokusů se provedlo porovnání vztahů pro stanovení kritického hydraulického gradientu  $J_K$  jednotlivých autorů s hodnotami naměřených kritických hydraulických gradientů  $J_{K,mer}$ . Porovnání bylo provedeno s výsledky následujících autorů:

- Zamarin (1931),
- Istomina (1957).

### 13.2.1 Zamarin (1931)

Zamarin ve svém vztahu uvažuje větší vliv pórovitosti, kritický hydraulický gradient  $J_K$  narůstá s vyšší pórovitostí  $n$ . Na obr. 13.6 jsou znázorněny naměřené hodnoty kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$  a hodnoty kritického hydraulického gradientu  $J_{K,Zam}$  vypočtené dle Zamarina.

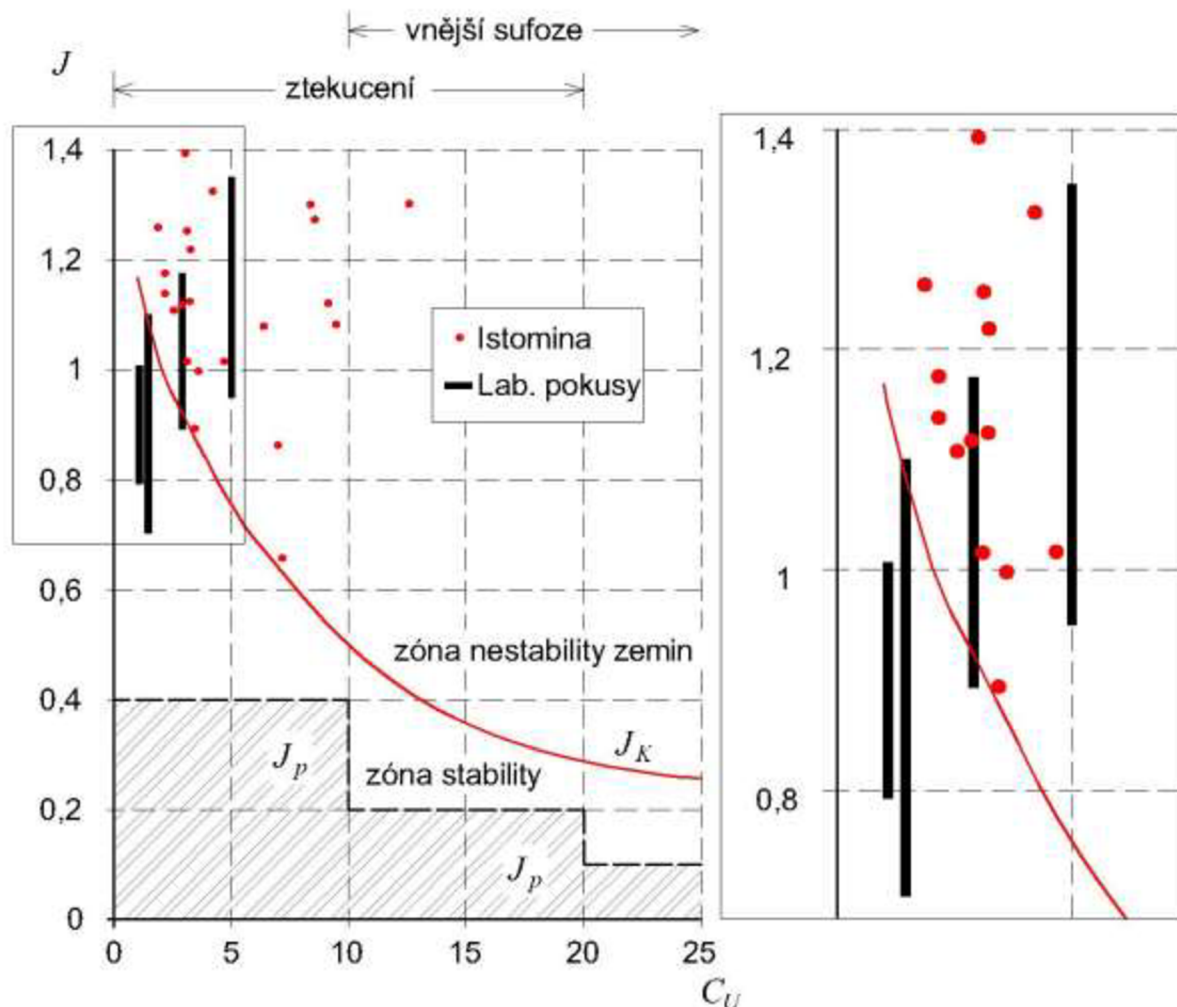


**Obr. 13.6 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými dle Zamarina (1931)**

Vypočtené hodnoty kritického hydraulického gradientu dle Zamarina  $J_{K,Zam}$  jsou nadhodnocené, místy až 1,5 násobně.

### 13.2.2 Istomina (1957)

Istomina uvádí závislost kritického hydraulického gradientu  $J_K$  na čísle nestejnozrnnosti  $C_U$ . Černý „pásek“ na obr. 13.7 znázorňuje interval naměřených hodnot kritických hydraulických gradientů  $J_{K,mer}$  dle čísla nestejnozrnnosti  $C_U$ .



**Obr. 13.7 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami navrženými dle Istominy (1957)**

Lze říci, že pro písky naměřené hodnoty kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$  dobře odpovídají rozpětí hodnot naměřených Istominou. Pro materiály s číslem nestejnozrnnosti  $C_U < 3$  jsou hodnoty měřených kritických hydraulických gradientů  $J_{K,mer}$  nižší. Avšak přípustné hydraulické gradienty Istominy jsou řádově 1,5 krát podhodnocené oproti naměřeným hodnotám kritického hydraulického gradientu  $J_{K,mer}$ .



### 13.2.3 Shrnutí

Z použitých vztahů je patrná nejlepší shoda naměřených hodnot se vztahy Terzaghiho a Goldsteina (obr. 13.2). Ve vztahu Terzaghiho a Goldsteina (5.5) není zohledněn vliv tvaru zrna, jeho velikost a vliv čísla nestejnozrnnosti  $C_U$ .

Empirický vztah Zamarina (1931) je vztah Terzaghiho a Goldsteina s přidaným vlivem pórovitosti  $n$ . Ta však oproti základní rovnici Terzaghiho při nižší pórovitosti  $n$  zvyšuje kritický hydraulický gradient  $J_K$ .

Istomina (1957) stanovuje kritický hydraulický gradient pouze dle čísla nestejnozrnnosti  $C_U$ , ve kterém je i částečně skryta pórovitost  $n$ . Lze říci, že při dosažení přípustného hydraulického gradientu  $J_p$  dle Istominy je jistota, že nedojde k porušení vlivem ztekucení.

## 14. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A STANOVENÍ DÍLČÍHO SOUČINITELE SPOLEHLIVOSTI

Výsledky měření byly následně vyhodnoceny podle následující metody:

- definice náhodné veličiny,
- definice výběrového souboru,
- statistické zpracování,
- výsledky a diskuze,
- stanovení dílčího součinitele a doporučení.

### 14.1 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  $J_{K,Ter}$ :

$$\gamma_{M,J} = \frac{J_{K,mer}}{J_{K,Ter}} = x_i, \quad (14.1)$$

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.

### 14.1 Definice celkového výběrového souboru a výběrových souborů

„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, ...).

### 14.2 Statistické zpracování

Pro statistické zpracování se stanoví základní charakteristiky výběrových souborů a empirické čáry překročení, které budou znázorněny v přílohách. Pomocí programu Statistica se následně určí vhodné rozdělení.

### 14.2.1 Základní charakteristiky

Pro náhodné veličiny výběrových souborů byly stanoveny střední hodnoty  $\mu$  (14.2), rozptyly  $\sigma^2$  (14.3), počet hodnot  $N$  a empirické distribuční křivky  $P_i$  (14.4) za předpokladu, že každá hodnota má stejnou pravděpodobnost výskytu. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tab. 14.1.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14.2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (14.3)$$

kde  $N$  je počet naměřených hodnot dílčího součinitele a  $x_i$  je naměřená hodnota dílčího součinitele.

**Tab. 14.1 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

Grafy hodnot náhodných veličin výběrových souborů jsou znázorněny v Příloze č. 1 až 20.

### 14.2.2 Empirické čáry překročení

Pro vytvoření empirických čar překročení se předpokládalo, že každá náhodná veličina z určeného výběrového souboru má stejnou pravděpodobnost výskytu  $P$ , která se vypočítala dle vztahu:

$$P = \frac{1}{N} \quad (14.4)$$

a byla zapsána do tab. 14.1. Hodnoty jednotlivých výběrových souborů byly seřazeny vzestupně a na základě těchto hodnot byly zpracovány empirické čáry, které jsou zobrazeny spolu s distribučními funkcemi v Přílohách č. 21 až 40.

### 14.2.3 Analýza teoretického rozdělení

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.

**Normální rozdělení (Gaussovo rozdělení)** náhodné veličiny  $X$  je symetrické definované na neomezeném intervalu  $(-\infty, \infty)$  a je závislé na dvou parametrech a to střední hodnotou  $\mu$  a směrodatnou odchylkou  $\sigma$ . Hustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  s normálním rozdělením  $N(\mu, \sigma)$  lze vyjádřit funkcí [Holický, 1998]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (14.5)$$

pro  $x \in (-\infty, \infty)$ . Pro distribuční funkci normálního rozdělení s parametry  $\mu, \delta$  platí:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dx \quad (14.6)$$

pro  $x \in (-\infty, \infty)$ .

**Logaritmicko-normální rozdělení** se používá při popisu náhodných veličin s jednostranně omezeným nesymetrickým definičním oborem  $(-\infty < x < x_0)$  nebo  $(x_0 < x < \infty)$ . Logaritmicko-normální rozdělení je charakterizováno střední hodnotou  $\mu$ , směrodatnou odchylkou  $\delta$  a mezi definičního oboru  $x_0$ .

Má-li náhodná veličina  $X$  logaritmicke normální rozdělení se střední hodnotou  $\mu$ , směrodatnou odchylkou  $\sigma$ , pak transformovaná náhodná veličina  $Y = \ln |X - x_0|$  má normální rozdělení se střední hodnotou  $\mu_Y$ , směrodatnou odchylkou  $\sigma_Y$ , které lze stanovit dle [Holický, 1998]:

$$\mu_Y = \ln \mu_X - \frac{\sigma_X^2}{2} \quad (14.10)$$

$$\sigma_Y^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} \right) \quad (14.11)$$

Odvozená střední hodnota  $\mu_Y$  a směrodatná odchylka  $\sigma_Y^2$  spolu s mezí  $x_0$  představují tři parametry rozdělení. Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce jsou [Holický, 1998]:

$$f(x) = \frac{1}{|x - x_0| \sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln|x - x_0| - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] \quad (14.12)$$

$$F(x) = \frac{1}{|x - x_0| \sigma_Y \sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^x \exp \left[ -\frac{(\ln|x - x_0| - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] \quad (14.13)$$

#### 14.2.4 Gama rozdělení

Gama rozdělení je dvouparametrické pravostranně zešikmžené rozdělení definované na intervalu  $x \in (0, \infty)$ . Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce mají tvar:

$$f(x) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} \exp(-\lambda x) \quad (14.14)$$

$$F(x) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} \int_0^x x^{k-1} \exp(-\lambda x) dx \quad (14.15)$$

kde  $\Gamma(k)$  je gama funkce [Holický, 1998]. Vztah momentových parametrů  $\mu$  a  $\sigma$  gama rozdělení k parametrům  $\lambda$  a  $k$  (parametr tvaru) v rovnicích (14.14 a 14.15):

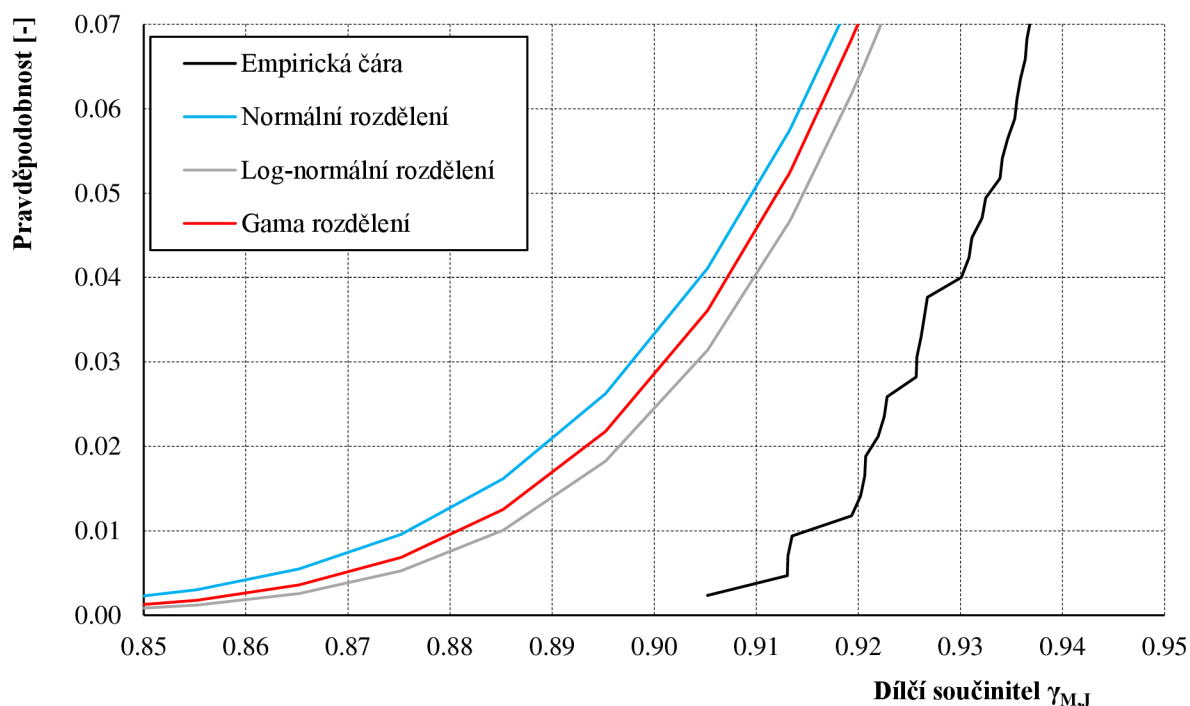
$$k = \left( \frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \quad (14.16)$$

$$\lambda = \left( \frac{\mu}{\sigma^2} \right) \quad (14.17)$$

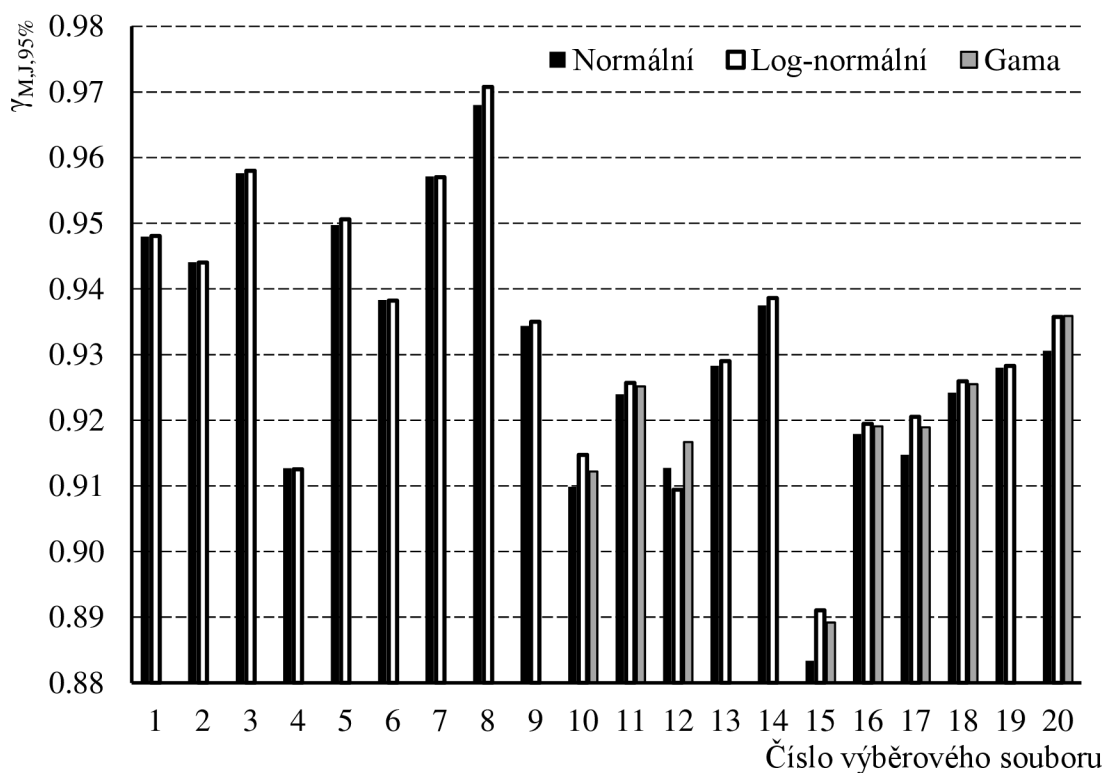
### 14.3 Výsledky a diskuze

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 (Přílohy č. 21 až 40). Na obr. 14.1 je detail distribučních funkcí pro vybrané typy rozdělení včetně empirické čáry.

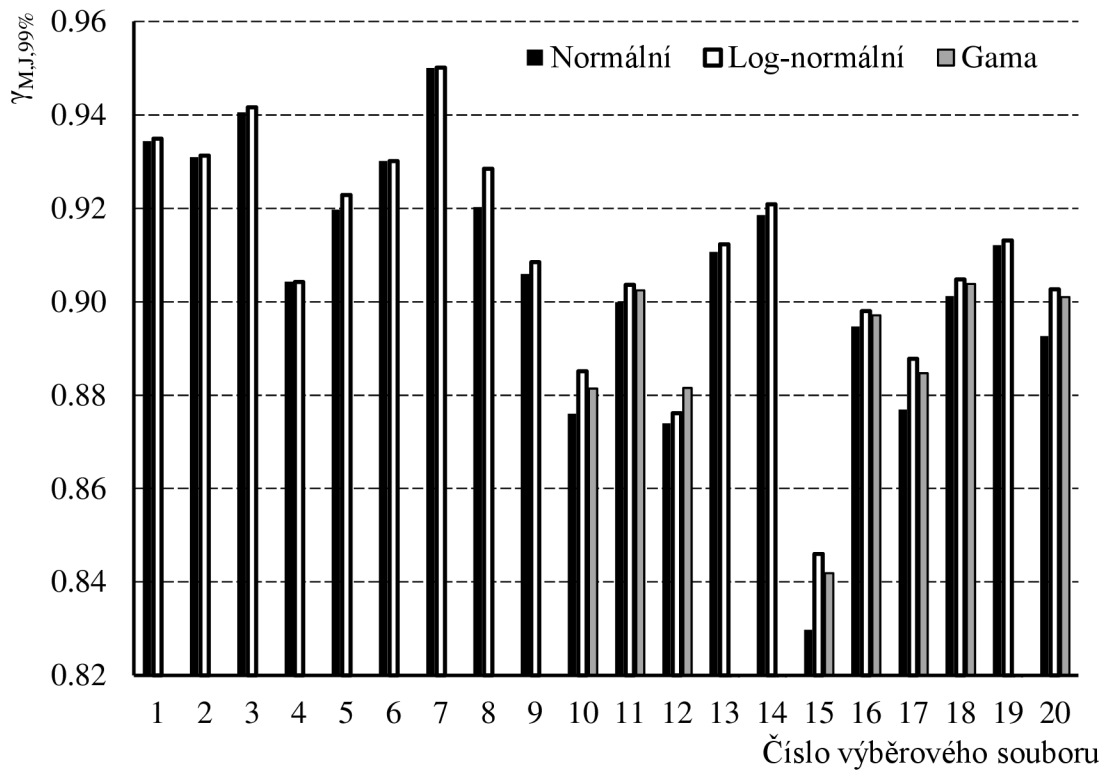
Pomocí rovnic z programu Statistica byly stanoveny dílčí součinitelé pravděpodobnosti překročení  $P = 95; 99; a 99,9 \%$  a jsou zobrazeny v grafech na obr. 14.2 až 14.4 a souhrně v tab. 14.3.



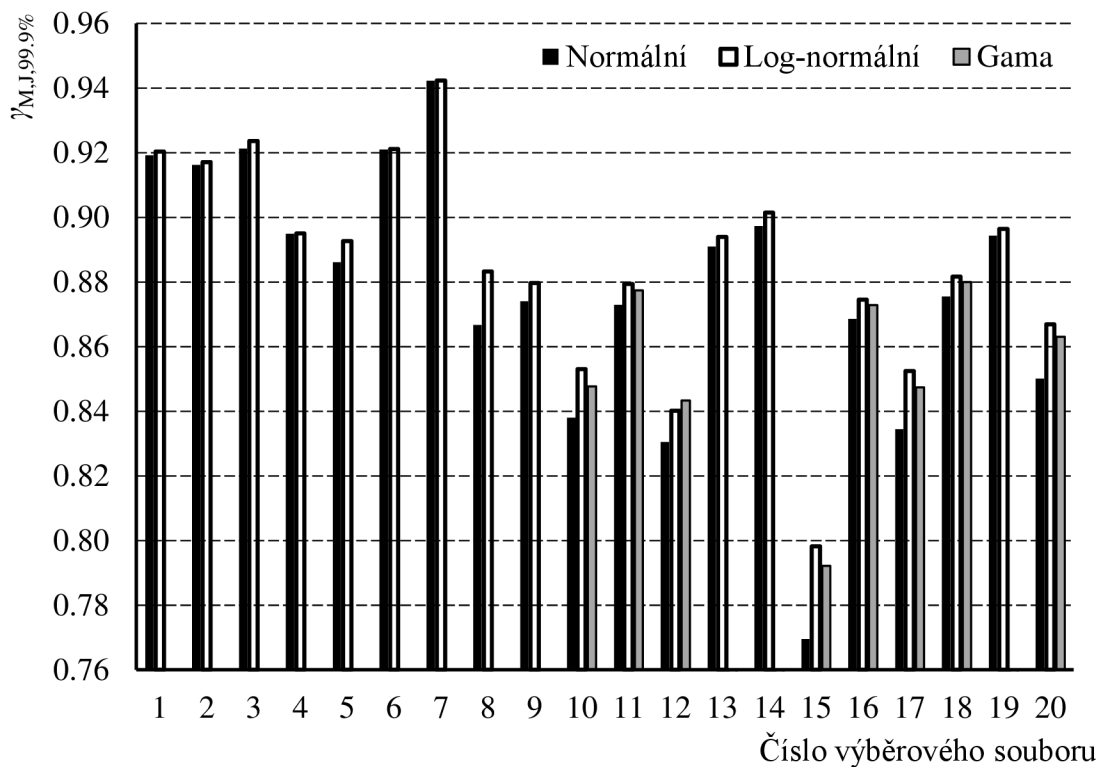
Obr. 14.1 Detail distribuční funkce



Obr. 14.2 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost překročení 95%



**Obr. 14.3** Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost překročení 99%



**Obr. 14.4** Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost překročení 99,9%

**Tab. 14.2 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%.

#### **14.4 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.

##### **14.4.1 Metoda nejmenších čtverců**

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



$$A_x = \sum_{i=1}^n (P_{emp,i} - P_{fce,i})^2 \quad (15.1)$$

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. 14.3.

**Tab. 14.3 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.

#### 14.4.2 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. 14.4.

**Tab. 14.4 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. 14.5 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. 14.6.

**Tab. 14.6 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. 14.7 Doporučené dílčí součinitele  $\gamma_{m,J}$**

$P$	95%	99%	99,9%
$\gamma$	0,91	0,88	0,85

#### **14.4.3 Doporučení**

Doporučené dílčí součinitele pro porušení v důsledku ztekucení s pravděpodobností výskytu (95%, 99% a 99,9%) v tab. 14.5 a 14.7 jsou pro materiály s vlastnostmi uvedených v tab. 14.4 a 14.6.

V případě, že posuzovaný materiál má fyzikální vlastnosti jako jiný z posuzovaných výběrových souborů, lze použít hodnoty dílčích součinitelů dle tab. 14.3 s log-normálním rozdělením.

## 15. ZÁVĚR

### 15.1 Shrnutí

Ztekucení je proces, který nastává ve stejnozrné 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 stejnozrných 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 sypan, zhutňován 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.**

## **15.2 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.

## 16. PODKLADY

### 16.1 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.
- BEAR, J. 1988. *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications. 784 s.
- BEEK, V. V., KNOEFF, H., SCHWECKENDIEK, T. 2011. *Piping: Over 100 Years of Experience, From Empiricism Towards Reliability-Based Design A Feeling for Soil and Water – A Tribute to Prof. Frans Barends*.
- BERTRAM, G. 1940. *An Experimental Investigation of Protective Filters*, Publication Graduate School of Engineering, Harvard Publication No. 267, Vol. 6.
- BLIGH, W. G. 1910. Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*. Vol. 64, pp 708-710.
- 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.
- BUSCH, K. F., LUCKNER, L. 1973. *Geohydraulik*. VEB Deutscher für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- ČIŠTÍN, J. 1967. Vnitřní sufoze nesoudržné zeminy při svislém vzestupném proudění. In *Sborník Vysokého učení technického v Brně*, roč. 1967, č. 1-2, pp. 181-185.
- ČIŠTÍN, J. 1973. Filtrační vrstvy pod opevněním návodních svahů zemních hrází, *Vodní hospodářství* 1973/2. s. 31-36.
- ČUGAJEV, P. P. 1965 *On the Design of Dam Foundation Stability to Seepage* (In Russian: *O rasčotach filtracionnoj pročnosti osnovanija plotin*), *Gidrotěchničeskoe strojitelstvo*, No. 2.
- DELGADO, RAMOS, F. 2000. “*Variables que influyen en la eficacia de un filtro granular frente a la erosión interna de bases cohesivas*”, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España.
- DELTARES, 2012. *Zandmeevoerende Wellen*. Research report. Delft: Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- ENERGIJA, 1973. *Směrnice pro výpočet filtrační stability hrází z místního materiálu*. (Directive for appraisal of filtration stability of dams built from local materials). Leningrad: Energijs. 1973. (český překlad z ruštiny)

- FELL, R., FRY, J. J. ed. 2005 *Internal erosion of dams and their foundations*, Taylor & Francis, London, pp 245.
- FLESHMAN, M., RICE, J. 2013, *Laboratory Modeling of the Mechanisms of Piping Erosion Initiation*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, GTENG3418R1
- GARNER, S. J., FANNIN, R. J., 2010 *Understanding internal erosion: decade of research following a sinkhole event*. Int. J. Hydropower Dams, 17(3), s. 93-98.
- 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.
- HALA, M., ŘÍHA, J. 2016. Mezní stavy porušení zemin filtračními deformacemi, Vodní hospodářství, ISSN 1211-0760, Vodní hospodářství spol. s r.o., Čkyně, CZ.
- HOLICKÝ, M. 1998. Zásady ověřování spolehlivosti a životnosti staveb, ČVUT.
- ISTOMINA, V. S. 1948. Destructive filtration rates. *Hydraulic Engineering*, No. 10, pp. 16-20. (in russian).
- ISTOMINA, V. S. 1957. Filtracionnaja ustojčivost gruntov (Soil stability to seepage). VODGEO, Gosstrojizdat, Moskva 1957. 296 p. (rusky)
- JACOBSON, T. 2013. *An Analysis on Soil Properties on Predicting Critical Hydraulic Gradients for Piping Progression in Sandy Soils*, All Graduate Plan B and other Reports. s. 336.
- JANDORA, J., ŠULC, J. 2006. Hydraulika. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institut of Water Structures: FAST VUT v Brně, p.s. 178.
- KÉZDI, Á. 1979. *Soil physics: Selected topics*, Elsevier, Amsterdam, Netherland.
- 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".
- LANE, A. W. 1935. *Security from Under-Seepage Masonry Dams on Earth Foundations*, Transactions American Society of Civil Engineers, vol. 100 paper no. 1919.
- LUBOCHKOV, E. A. 1962. Nonsuffosive noncohesive soils. *New in VNIIG*, No. 71. (in Russian).
- PAVČIČ, M. 2009. Transition filters, European workshop group on internal erosion, St Petersburg, Russia, s. 1-8.
- PAVLOVSKIJ, N. 1922. Teorija dviženija gruntovych vod pod gidrotěchničeskimi sooruzenijami i jee osnovnye prilozhenija.
- REKOMENDACII. 1991. Rekomendacii po projektirovaniju obratnych filtrov gidrotechničeskich cooruzenij. P 56-90, VNIIG. Leningrad, 108 s.

- ŘÍHA, J., ŠPANO, M. a kol. 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. 1988. *On the mechanism of piping under impervious structures*, Ph.D. Thesis, Delft The Netherland, pp. 111.
- SELLMEIJER, J. B. 2006. *Numerical computation of seepage erosion below dams (piping)*, Proceedings of Third International Conference on Scour and Erosion, s. 596-601.
- SELLMEIJER, J. B. LOPEZ, De La CRUZ J, van BEEK, V. M, and KNOEFF, J. G. 2011. *Fine tuning of the backward erosion piping model through small scale, medium scale and IJKdijk experiments*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15(8), pp 1139-1154.
- SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L.P., DECKER, R. S. 1976. Pinhole test for identifying dispersive soils, In *Journal of Geotechnic Engineering 102*. pp. 69-85.
- SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P., TALBOT J., 1984. Basic Properties of Sand and Gravel Filters, Jour. Geotech. Engineering Div. ASCE, Vol 110, No. GT6, June 1984, pp 684-700.
- TERZAGHI, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York. ISBN 0-471-85305-4.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, 1996. G. *Soil mechanics in engineering practice*, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York ; Chichester. 549 s.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1971. *Dewatering and Groundwater Control for Deep Excavations*”, Technical Memorandum No. 5-818-5 (April), Office of Chief of Engineers, US Army, Washington D.C.
- VANIČEK, I. 1988. *Vznik a chování trhlin v zemním těsnění sypaných přehrad*. SNTL, knižnice technických aktualit, Praha, s. 168.
- VNIIG, 1976. *Rukovodstvo po rasčotam filtracionnoj pročnosti plotin iz gruntovyh materialov*, pp. 78.
- VUKOVIČ, M. - PUŠIČ, M. 1992. *Soil Stability and Deformation due to Seepage*. Water research publication, Colorado. ISBN 0-918334-78-0.
- VUKOVIČ, M. - SORO, A. 1992. *Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado 1992. 83 p. ISBN # 0-918334-77-2.
- VYBÍRAL, B. 2002. *Zpracování dat fyzikálních měření*. Knihovnička fyzikální olympiády č.52, 72 s. Hradec Králové: MAFY.
- ZAMARIN, E. A. 1931. *Groundwater flow under hydrotechnical structures*. VNICH, Moscow



ZIEMS, J. 1967. Erosionsbeständigkeit nichtbindiger Lockergesteine. Abschlussbericht der Forschungsarbeit. TU Dresden, s. 132.

## **16.2      *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.

ČSN 75 2410: Malé vodní nádrže.

## **16.3      *Použité zkratky***

ČSN            Česká státní norma.

EQU            Mezní stav, který vyjadřuje ztrátu statistické rovnováhy konstrukce.

EWG-IE        Evropská pracovní skupina pro vnitřní erozi.

FAT            Mezní stav, který vyjadřuje poruchu konstrukce nebo nosných prvků způsobenou únavou materiálů.

GEO            Mezní stav vzniku poruchy či nadměrné deformace geotechnické konstrukce a základové půdy.

HYD            Mezní stav vzniku poruchy nadzvednutím (heave, ztekucení) vnitřní erozí a sufozí.

ICOLD         Mezinárodní přehradní komise.

MS            Mezní stav.

PI            Počet intervalů.

SF            Stupeň bezpečnosti.

SLS            Mezní stav použitelnosti (obecně).

STR            Mezní stav vzniku vnitřní poruchy a nadměrné deformace.

ULS            Mezní stav únosnosti.

UPL            Mezní stav ztráty rovnováhy konstrukce nebo základové půdy v důsledku vztlaku.

USACE        U. S. Army Corps of Engineers

USBR         U. S. Bureau of Reclamation

## 17. VELIČINY A JEDNOTKY

$A$	průtočná plocha propustoměru	[m <sup>2</sup> ]
$A_x$	plocha dle metody nejmenších čtverců	[m <sup>2</sup> ]
$A_{x,y}$	plocha vybraného sloupce o rozměrech $x$ a $y$	[m <sup>2</sup> ]
$C_C$	číslo křivosti	[-]
$C_d$	kritérium použitelnosti	[-]
$C_U$	číslo nestejzornosti	[-]
$d$	velikost zrna (obecně)	[mm]
$d_e$	efektivní velikost zrna	[mm]
$d_i$	průměr zrna zeminy odpovídající na křivce zrnitosti $i$ % propadu	[mm]
$d_{i<0,063}$	průměr zrna zeminy menší jak 0,063mm	[%]
$d_{min}$	minimální velikost zrna na křivce zrnitosti	[mm]
$d_{max}$	maximální velikost zrna na křivce zrnitosti	[mm]
$d_0$	střední velikost póru	[mm]
$d_0^{max}$	maximální průměr průliny	[mm]
$d_p$	průměr propustoměru	[mm]
$e$	číslo pórovitosti	[-]
$E_k$	charakteristická hodnota účinků zatížení	[-]
$E_d$	návrhová hodnota účinků zatížení	[-]
$E_{d,dst}$	návrhová hodnota účinků destabilizujících zatížení	[-]
$E_{d,stb}$	návrhová hodnota účinků stabilizujících zatížení	[-]
$F$	výsledná síla	[N]
$F_{dstb}$	destabilizační síla	[N]
$F_{dstb,1}$	destabilizační síla od vztlaku vody	[N]
$F_{dstb,2}$	destabilizační síla od vztlaku vody nad vzorkem	[N]
$F_{dstb,3}$	destabilizační složka síly od hydraulického gradientu	[N]
$F_{stb}$	stabilizační složka síly	[N]
$F_{stb,1}$	stabilizační síla od tíhy vzorku	[N]
$F_{stb,2}$	stabilizační síla od tíhy vody v pórech	[N]
$F_{stb,3}$	stabilizační síla od tíhy vody nad vzorkem	[N]
$g$	tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	výška hladiny nad zemínou	[mm]
$H'$	rozdíl hladin v nádrži a v podhrázi	[mm]

$h_g$	tloušťka síta (geotextilie)	[mm]
$h_1$	vnější výška zeminy v propustoměru	[mm]
$h_2$	vnější výška propustoměru	[mm]
$h_3$	vnitřní výška propustoměru	[mm]
$J$	hydraulický gradient	[-]
$J_d$	návrhový hydraulický gradient	[-]
$J_K$	kritický hydraulický gradient	[-]
$J_{K,d}$	návrhový kritický hydraulický gradient	[-]
$J_{K,mer}$	naměřený kritický hydraulický gradient	[-]
$J_{K,max}$	maximální hodnota kritického hydraulického gradientu	[-]
$J_{K,Istomina}$	kritický hydraulický gradient dle Istominy	[-]
$J_p$	přípustný hydraulický gradient	[-]
$J_{K,Ter}$	vypočítaný kritický hydraulický gradient dle Terzaghiho	[-]
$J_{K,Zam}$	vypočítaný kritický hydraulický gradient dle Zamarina	[-]
$k$	hydraulická vodivost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$k_g$	hydraulická vodivost sítky	[m.s <sup>-1</sup> ]
$k_{mer}$	hydraulická vodivost z Darcyho vztahu	[m.s <sup>-1</sup> ]
$k_z$	hydraulická vodivost zeminy při teplotě $T$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$l$	délka vzorku	[mm]
$L$	délka průsakové dráhy	[mm]
$m_1$	hmotnost pyknometru a sušiny v pyknometru (25 až 40 g zeminy)	[g]
$m_2$	hmotnost pyknometru plného destilované vody o $T=20$ °C	[g]
$m_3$	hmotnost pyknometru s 25 až 40 g zeminy plné destilované vody $T=20$ °C	[g]
$m_k$	hmotnost zeminy v propustoměru	[g]
$m_{pp}$	hmotnost prázdného propustoměru se sítí	[g]
$m_{pk}$	hmotnost propustoměru se sítí a zeminou	[g]
$n$	pórovitost	[-]
$N$	počet měření	[-]
$n_{max}$	maximální pórovitost, stanovena pomocí odchylek jednotlivých proměnných	[-]
$P$	pravděpodobnost	[%]
$P_{emp,i}$	pravděpodobnost překročení stanovené dle empirické rovnice	[%]
$P_{fce,i}$	pravděpodobnost překročení stanovené pomocí rozdělení	[%]
$PI$	počet intervalů	[-]
$Q$	průtok	[m.s <sup>-3</sup> ]

$R_d$	návrhová hodnota účinků odolnosti	[-]
$Re$	Reynoldsovo kritérium	[-]
$R_k$	charakteristická hodnota odolnosti	[-]
$SF$	stupeň bezpečnosti	[-]
$t$	čas	[s]
$T$	teplota vody	[°C]
$V$	objem průsaku	[m <sup>3</sup> ]
$V_l$	objem vzorku zeminy včetně pórů	[m <sup>3</sup> ]
$V_{l,max}$	maximální objem vzorku zeminy v propustoměru včetně pórů	[m <sup>3</sup> ]
$V_k$	objem zkoušené zeminy bez pórů	[m <sup>3</sup> ]
$V_{k,min}$	minimální objem zkoušené zeminy v propustoměru bez pórů	[m <sup>3</sup> ]
$v_p$	připustná filtrační rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$x$	x-ový rozměr sloupce zeminy	[m]
$x_i$	náhodná veličina	[-]
$y$	y-ový rozměr sloupce zeminy	[m]
$\gamma_l$	součinitel významu	[-]
$\gamma_{dstb}$	dílčí součinitel pro destabilizující síly	[-]
$\gamma_{G,dst}$	dílčí součinitel stálého zatížení pro destabilizující síly	[-]
$\gamma_{G,stb}$	dílčí součinitel stálého zatížení pro stabilizující síly	[-]
$\gamma_J$	dílčí součinitel vyjadřující nejistoty při stanovení hydraulického gradientu	[-]
$\gamma_{MJ}$	souč. vyjadřující nejistotu při stanovení kritického hydraulického gradientu $J_{K,k}$	[-]
$\gamma_{Q,dst}$	dílčí součinitel nahodilého zatížení pro destabilizující síly	[-]
$\gamma_s$	měrná tíha částice	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\gamma_{stb}$	dílčí součinitel pro stabilizující síly	[-]
$\gamma_w$	měrná tíha vody	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\delta$	směrodatná odchylka	[-]
$\delta_n$	relativní chyba ve stanovení pórovitosti	[-]
$\delta_J$	relativní chyba ve stanovení hydraulického gradientu	[-]
$\mu$	střední hodnota	[-]
$\varphi$	úhel vnitřního tření	[°]
$\nu$	kinematická viskozita vody	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\nu_{20}$	kinematická viskozita při teplotě $T = 20$ °C	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\rho_{ef}$	efektivní objemová hmotnost zeminy	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	specifická objemová hmotnost zrn	[kg.m <sup>-3</sup> ]

$\rho_w$	hustota vody	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{w,20}$	hustota vody při teplotě $T = 20^\circ\text{C}$	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\chi$	faktor nestejnozrnnosti	[-]
$\Delta d_p$	odchylka v průměru propustoměru	[mm]
$\Delta H'$	odchylka v rozdílu piezometrických výšek	[mm]
$\Delta l$	odchylka v délce vzorku	[mm]
$\Delta m$	odchylka v hmotnosti zeminy	[g]
$\Delta \rho_s$	odchylka v objemové hmotnosti zrn	[kg.m <sup>-3</sup> ]

## 18. SEZNAM OBRÁZKŮ

- 2.1 Princip metody dílčích součinitelů [Říha, Špano a kol, 2016]
- 3.1 Vennův diagram s faktory vzniku filtračních deformací (Garner and Fanin 2016)
- 3.2 Zavěšování (Fell and Fry 2005)
- 3.3 Hydraulické trhání (Fell and Fry 2005)
- 3.4 Schéma stanovení hydraulického gradientu
- 3.5 Schéma průběhu porušení (Fell and Fry, 2005)
- 3.6 Místa vzniku jednotlivých typů lokálních filtračních deformací [Hala, Říha 2016]
- 3.7 Postup vzniku privilegované cesty
- 3.8 Schéma vznikající privilegované cesty vlivem zpětné eroze [Hala, Říha 2016]
- 3.9 Schéma vnitřní sufoze při sestupném proudění (Čas 1 : Počátek, Čas 2 : Ustálení pohybu jemnozrné frakce ucpáním transportních pórů)
- 3.10 Posouzení nestejnnozrného materiálu dle Kézdiho
- 3.11 Schéma vnitřní eroze při vzestupném proudění
- 3.12 Schéma kontaktní sufoze při sestupném proudění (Čas 1: Počátek, Čas 2: Vyplavení jemnozrných částic skrz filtr)
- 3.13 Schéma kontaktní eroze u špatně navrženého filtru (Čas 1: Počátek, Čas 2: Vyplavení jemnozrných částic)
- 3.14 Schéma kontaktní eroze u správně navrženého filtru (Čas 1: Počátek, Čas 2: Ucpání transportních pórů)
- 3.15 Vnější sufoze (Čas 1 : Počátek, Čas 2 :Vyplavení jemnozrných částic)
- 3.16 Ztekucení (Čas 1 : Vnitřní stabilita, Čas 2 : Zvětšení objemu, Čas 3 : Ztekucení a odplavování zeminy)
- 3.17 Schéma počátku ztekucení
- 3.18 Schéma progresu ztekucení
- 3.19 Vyplavování zeminy (Foto – Žatecký)
- 3.20 Průběh zpětné eroze a tvorba privilegované cesty
- 3.21 Schéma směru působení hydraulického gradientu (Julínek)
- 3.22 Příčný řez modelem homogenní sypané hráze (Foto - Pařílková)
- 3.23 Pohled na vzdušnou stranu porušeného modelu homogenní sypané hráze (Foto -Pařílková)
- 5.1 Návrhové hodnoty přípustného hydraulického gradientu dle Istominy (1957)
- 5.2 Křivky zrnitosti použitých materiálů [Istomina, 1957]
- 5.3 Závislost naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu [Istomina, 1948, 1957] s hodnotami vypočtenými [Terzaghi, 1943]
- 5.4 Stanovení dolní okrajové podmínky (Jacobson, 2013)
- 5.5 Vliv velikosti zrna dle Alhasana a kol. (2015)
- 5.6 Vertikální propustoměr zapojený do soustavy se skleněnými kuličkami (Alhasan a kol., 2015)
- 6.1 Rovnováha sil při vzestupném proudění [Vuković, Pušič 1992]
- 6.2 Působení sil ve vysušené zemině
- 6.3 Působení sil v plně nasycené zemině bez proudění
- 6.4 Působení sil v plně nasycené zemině o volné hladině, bez proudění
- 6.5 Působení sil v plně nasycené zemině při proudění
- 8.1 Skleněné kuličky: a)  $d = 0,2 \text{ mm}$ ; b)  $d = 0,5 \text{ mm}$ ; c)  $d = 1,0 \text{ mm}$

- 8.2 Přírodní písky: a) Bzenec 0/2 (T); b) Kora 0/4 (T); c) Olbramovice 0/4 (D)
- 8.3 Upravené písky a) Bzenec 0,5/1,0 (T); b) Kora 0,5/1,0 (T); c) Olbramovice 0,25/0,5 (D)
- 8.4 Měření digitální šuplerou
- 8.5 Sušárna
- 8.6 Třepačka se sadou normovaných sít
- 8.7 Křivky zrnitosti skleněných kuliček
- 8.8 Křivky zrnitostí přírodních materiálů
- 8.9 Křivky zrnitostí vyříděných materiálů
- 8.10 Pyknometry se skleněnými kuličkama a destilovanou vodou
- 8.11 Ochlazení: a) Termostat; b) Termostat s pyknometry
- 8.12 Konfokální mikroskop
- 8.13 Fotoaparát: a) Kulová zrna; b) Zaoblená zrna; c) Ostrohranná zrna
- 8.14 Konfokální mikroskop: a) Kulová zrna; b) Zaoblená zrna; c) Ostrohranná zrna
- 9.1 Laboratorní prostředí
- 9.2 Schéma měřicího zařízení
- 9.3 Geometrie vertikálního propustoměru
- 9.4 Používaná síta a geotextilie
- 10.1 Vibrátor
- 10.2 Vážení vzorku
- 10.3 Propustoměr zapojený do soustavy
- 11.1 Nadzvednutí ve vertikálním propustoměru (Obr. 1 Vnitřní stabilita, Obr. 2 Nadzvednutí)
- 11.2 Ztekucení ve vertikálním propustoměru (vlevo: lokální poruchy – kritický hydraulický gradient, vpravo: ztekucení)
- 11.3 Skleněné kuličky 0,2 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.4 Skleněné kuličky 0,5 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.5 Skleněné kuličky 1,0 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.6 Bzenec 0/2 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.7 Kora 0/4 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.8 Olbramovice 0/4 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.9 Bzenec 0/2 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.10 Kora 0/2 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 11.11 Olbramovice 0/4 mm – průběh měření vybraného pokusu
- 13.1 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu pórovitosti
- 13.2 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými
- 13.3 Graf shody naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými pro skleněné kuličky
- 13.4 Závislost naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými pro přírodní písky
- 13.5 Závislost naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými pro vyříděné písky
- 13.6 Závislost naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami vypočtenými dle Zamarina (1931)
- 13.7 Závislost naměřených hodnot kritického hydraulického gradientu s hodnotami navrženými dle Istominy (1957)

14.1 Detail distribuční funkce

14.2 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost 95%

14.3 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost 99%

14.4 Graf dílčích součinitelů pro pravděpodobnost 99,9%



## 19. SEZNAM TABULEK

- 2.1 Dílčí součinitele významu díla [ČSN EN 1997-1]
- 2.2 Vymezení mezních stavů [ČSN EN 1990]
- 2.3 Obecné tvary podmínky pro posouzení konstrukce metodou dílčích součinitelů [ČSN EN 1990]
- 2.4 Dílčí součinitele pro ověření mezního stavu způsobeného hydraulickým zdvihem HYD [ČSN EN 1997-1]
- 3.1 Způsoby lokálního porušení vlivem filtrační deformace [Hala, Říha 2016]
- 5.1 Návrhové hodnoty kritického hydraulického gradientu při vzestupném proudění [Istomina, 1957]
- 5.2 Fyzikální vlastnosti použitých materiálů [Istomina, 1957]
- 5.3 Použité materiály pro vyhodnocování [Jacobson, 2013]
- 8.1 Průměry skleněných kuliček 0,2 mm
- 8.2 Průměry skleněných kuliček 0,5 mm
- 8.3 Průměry skleněných kuliček 1,0 mm
- 8.4 Velikosti zrn skleněných kuliček
- 8.5 Velikost zrn přírodních materiálů
- 8.6 Velikost zrn vytríděných materiálů
- 8.7 Měrné hmotnosti skleněných kuliček
- 8.8 Měrné hmotnosti přírodních materiálů
- 8.9 Tvar zrna materiálů
- 9.1 Geometrie a hmotnost vertikálního propustoměru
- 9.2 Popis používaných sít a geotextilie
- 10.1 Ukázka tabulky pro stanovení pórovitosti  $n$
- 10.2 Ukázka tabulky pro stanovení hydraulické vodivosti a kritického hydraulického gradientu
- 11.1 Vybrané příklady průběhu porušení
- 11.2 Shrnutí přírůstku délky při protažení před ztekucením
- 12.1 Nejistoty při měření
- 12.2 Vstupní data
- 12.3 Relativní chyby v měření
- 13.1 Shrnutí výsledků měření
- 14.1 Základní charakteristiky výběrových souborů
- 14.2 Hodnoty dílčích součinitelů pro jednotlivé výběrové soubory
- 14.3 Metoda nejmenších čtverců pro výběrové soubory
- 14.4 Fyzikální vlastnosti výběrového souboru pro kulová a zaoblená zrna
- 14.5 Doporučené dílčí součinitele pro kulová a zaoblená zrna
- 14.6 Fyzikální vlastnosti výběrového souboru pro všechny materiály
- 14.7 Doporučené dílčí součinitele pro všechny materiály