



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

MODELOVÁNÍ PRIVILEGOVANÉ PRŮSAKOVÉ CESTY

SEEPAGE PATH MODELLING

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lubomír Petrula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

BRNO 2022

ABSTRAKT

Jedním z nejnebezpečnějších jevů na vodních dílech z hlediska možnosti jejich porušení jsou filtrační deformace. Při filtračních deformacích dochází k přeskupování zrn uvnitř materiálu a v některých případech i k jejich postupnému odplavování. Nebezpečnost tohoto jevu je primárně dána obtížností jeho detekce.

Jedním ze speciálních případů filtrační deformace je zpětná eroze vznikající v podzákladí vodního díla (hráz nebo obdobná příčná stavba na vodním toku, příp. protipovodňová hráz). Při tomto jevu dochází k postupnému vyplavování materiálu z podzákladí vlivem proudových sil a ke vzniku privilegované průsakové cesty. Výsledkem procesu vyplavování může být propojení prostorů nad a pod předmětnou konstrukcí. Spolu s tímto dějem dochází i ke zvětšování průsakové cesty do stran a do hloubky.

Přesné podmínky vzniku privilegované průsakové cesty jsou vyšetřovány již od počátku 20. stol. Data z experimentů či z pozorování na reálných vodních dílech se však převážně soustředí na celkové měřítko a nesledují lokální hydraulické podmínky v průsakové cestě ani na jejím čele. Stejně tak zatím nebyl zcela prozkoumán jev zpětné eroze (resp. jeho rychlost) v písčítých materiálech. Rozšiřování průsakové cesty zatím bylo zkoumáno pouze na jílovitých materiálech, a to převážně z důvodu jednoduchosti práce s nimi.

Cílem této práce bylo popsat mechanismus vývoje privilegované průsakové cesty v podzákladí vodního díla. Za tímto účelem bylo navrženo a otestováno nové měřicí zařízení, pomocí kterého byly následně prováděny experimenty na vybraných stejnozrnných píscích. Po vyhodnocení výsledků experimentů byl navržen vztah pro stanovení rychlosti zpětné eroze. Na základě znalostí o hydraulických podmínkách byl vytvořen i ideový návrh numerického modelu vývoje privilegované průsakové cesty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Eroze privilegované průsakové cesty, kritický hydraulický gradient, nestejnozrnnost materiálu, hydraulická vodivost, pórovitost, experimentální výzkum, numerický model.

ABSTRACT

One of the most dangerous processes that can occur on water retaining structures is deformation due to seepage. During these processes, a rearrangement of individual grains within the material happens and, in some cases, grains may be carried out of the material entirely. The dangerousness of such processes is given due to difficulty of their detection.

A special case of deformations due to seepage is a backward erosion piping that occurs in the foundation of the structure (dams, weirs and such). During the process, a material is flushed out of the foundation due to forces induced by groundwater flow which leads to formation of the seepage pipe. The result of pipe progress may be a complete connection of spaces upstream and downstream the structure. Along with the pipe's backward progression, its widening and increase in depth may be observed.

Conditions of initialisation of backward erosion piping have been a topic for research since the beginning of 20th century. However, the data from experiments or even from direct observations on water retaining structures were focused mainly on general conditions and it did not pay enough attention to local conditions within the pipe nor on its tip where erosion occurs. Also, the speed of the whole process and the rate of backward erosion were not researched either. The pipe cross-sectional changes were researched only for materials with high contains of clay. The reason for using only clayey materials was given by ease of sample preparation.

The goal of this work was to describe a process of the backward erosion piping that occurs in structure foundation. For this goal, a new device was designed, tested, and used for experimenting on picked uniform sands. After evaluation of obtained results, a new formula for calculation of backward erosion rate was derived. Based on the knowledge on hydraulic conditions in the sample and the pipe, a numeric model of the pipe progression was proposed.

KEYWORDS

Backward erosion piping, critical hydraulic gradient, material uniformity, hydraulic conductivity, porosity, experimental research, numerical model.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Lubomír Petrula. *Modelování privilegované průsakové cesty*. Brno, 2022. 220 s., 254 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 Modelování privilegované průsakové cesty zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 10. 2022

Ing. Lubomír Petrula
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé disertační práce, panu prof. Ing. Jaromíru Říhovi, CSc. za vedení mé práce, za užitečné rady a za množství času, který se mnou strávil konzultacemi.

Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům ústavu vodních staveb, zejména pak panu doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, PhD za pomoc s návrhem zařízení, panu Luboši Pařílkovi, který fyzicky sestavil celé měřicí zařízení, panu Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D., který mi pomohl s výběrem tlakových senzorů a provedl jejich propojení s počítačovým programem, a Ing. Davidu Duchanovi, PhD, který mi poskytl mnoho rad v oblasti sestavování algoritmů pro vyhodnocování výsledů i v oblasti numerického modelování.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří to vše se mnou vydrželi, a mým spolupracovníkům v HBH Projekt spol. s r.o., kteří mé úsilí podporovali.

OBSAH

1.	ÚVOD.....	1
1.1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....	1
1.2	OBECNÉ DĚLENÍ FILTRAČNÍCH DEFORMACÍ.....	1
1.2.1	Sufoze.....	2
1.2.2	Eroze	3
1.2.3	Deformace povrchových vrstev.....	4
1.2.4	Kolmatace	5
1.3	ZPĚTNÁ EROZE PRIVILEGOVANÉ PRŮSAKOVÉ CESTY V ZÁKLADOVÉ SPÁŘE	5
1.3.1	Literatura k vývoji privilegované průsakové cesty.....	6
2.	ZHODNOCENÍ LITERATURY K EROZI PRIVILEGOVANÉ PRŮSAKOVÉ CESTY.....	9
2.1	KRITICKÝ HYDRAULICKÝ GRADIENT DLE LITERATURY	9
2.2	EROZNÍ PARAMETRY MATERIÁLŮ	13
2.3	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ LITERATURY.....	14
3.	PŘEDMĚT A CÍLE PRÁCE.....	15
4.	POUŽITÉ POSTUPY	16
4.1	OBECNÉ PODMÍNKY VZNIKU PRŮSAKOVÉ CESTY	16
4.2	PODMÍNKY INICIALIZACE ZPĚTNÉ EROZE PRŮSAKOVÉ CESTY	17
4.3	PODMÍNKY ZVĚTŠOVÁNÍ PRŮSAKOVÉ CESTY	17
4.4	ROZBOR PŮSOBÍCÍCH SIL.....	18
4.5	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ZEMIN.....	18
4.6	LABORATORNÍ VYBAVENÍ.....	18
4.7	LABORATORNÍ EXPERIMENTY	18
4.7.1	Plán experimentů.....	19
4.8	IDEOVÝ NÁVRH NUMERICKÉHO MODELU	19
5.	TEORETICKÝ ROZBOR JEVU	20
5.1	TEORIE PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY V NASYCENÉ ZÓNĚ	20
5.2	NAPJATOST A STABILITA ELEMENTU MATERIÁLU	21
5.3	KONCEPT KRITICKÉHO HYDRAULICKÉHO GRADIENTU	23
5.3.1	Kritický hydraulický gradient pro inicializaci zpětné eroze.....	23
5.4	KONCEPT ERODIBILITY MATERIÁLU.....	25
5.5	VÝČET SLEDOVANÝCH VELIČIN	28
6.	EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM.....	29
6.1	PLÁN EXPERIMENTŮ	29
6.2	STANOVENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ.....	29
6.2.1	Použité materiály.....	29
6.2.2	Zrnitost použitých materiálů	31

6.2.3	Měrná hmotnost zrn	36
6.3	VÝVOJ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	37
6.3.1	Volba měřítka experimentu	37
6.3.2	Ideový návrh měřicího zařízení	38
6.3.3	Popis měřicího zařízení	38
6.4	METODIKA EXPERIMENTU	44
6.4.1	Příprava zařízení a vzorku	44
6.4.2	Provedení experimentu	52
6.4.3	Ukončení experimentu	59
6.4.4	Poznámky k použité metodice	59
6.5	VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	62
6.5.1	Postup vyhodnocení dat z experimentů	63
6.5.2	Odhad odchylek měření	82
6.5.3	Vlastní výsledky, porovnání a diskuse	87
6.5.4	Vztahy pro kritický střední hydraulický gradient a rychlost zpětné eroze	107
7.	NUMERICKÝ MODEL	123
7.1	POUŽITÝ PROGRAM	123
7.2	KONCEPČNÍ MODEL	123
7.2.1	Použití analogie	124
7.2.2	Předpoklady	124
7.2.3	Stavové veličiny	127
7.2.4	Strategie při simulaci eroze	127
7.3	FORMULACE ÚLOHY	128
7.3.1	Ustálené proudění podzemní vody	129
7.3.2	Neustálené proudění podzemní vody	130
7.3.3	Kvazi-ustálená úloha napjatosti	131
7.3.4	Způsob vyhodnocování	133
7.4	ALGORITMIZACE A PROGRAMOVÁNÍ	133
7.4.1	Stanovení zatížení pro analýzu napjatosti	135
7.4.2	Postup řešení vývoje průsakové cesty	142
7.5	ŘEŠENÍ	147
7.5.1	Sestavení modelu	147
7.5.2	Validace	159
7.5.3	Kalibrace	159
7.5.4	Verifikace	159
7.5.5	Simulace na testovacím scénáři	159
7.6	DISKUSE K NAVRŽENÉMU NUMERICKÉMU MODELU	170
8.	ZÁVĚR	172
9.	SUMMARY	176

10.	PODKLADY	178
10.1	LITERATURA	178
10.2	PUBLIKACE AUTORA	184
10.3	TECHNICKÉ NORMY	186
10.4	POUŽITÉ ZKRATKY	186
11.	VELIČINY A JEDNOTKY	188
12.	SEZNAM OBRÁZKŮ	203
13.	SEZNAM TABULEK	207
14.	SEZNAM PŘÍLOH	208

TERMINOLOGIE

Absolutní odchylka měření – vyjádření odchýlení měřené hodnoty od hodnoty skutečné.

Čelo privilegované průsakové cesty – okrajová část privilegované průsakové cesty, zpravidla místo nejvzdálenější od odtoku ze systému.

Číslo nestejnozrnnosti – poměr velikosti zrn vyjadřující míru nestejnozrnnosti materiálu. Se zvyšujícím se číslem nestejnozrnnosti je materiál více nestejnozrnný a tím náchylnější k některým druhům filtračních deformací.

Element průsakové cesty – část průsakové cesty vytknutá dvěma příčnými profily.

Empirická data – data získaná na základě zkušeností s daným systémem. Zde se jedná o data z experimentů, příp. data z pozorování na vodních dílech.

Erozní parametry materiálu – soubor veličin popisujících charakter případné eroze (její intenzitu, odnesené množství, odolnost materiálu).

Filtrační deformace – změna struktury zeminy vlivem proudění podzemní vody. Tyto změny mohou být přímou příčinou vzniku průsakové cesty. Dělení filtračních deformací se většinou odvozuje od místa jejich působení a dle typu materiálu, který je transportován (viz kapitola 1.2).

Hydraulická vodivost – vlastnost materiálu vyjadřující, jak snadno jím voda proudí. Hodnota je dána poměrem mezi specifickým průtokem a hydraulickým gradientem.

Hydraulický gradient – sklon čáry energie proudící vody (J_s). Při řešení proudění podzemní vody lze uvažovat se zanedbatelnou rychlostí proudění a jedná se o sklon čáry piezometrických výšek.

Inicializace zpětné eroze – okamžik, kdy za daných podmínek nastane zpětná eroze privilegované průsakové cesty. Podmínky inicializace jsou předmětem této disertační práce. Zjednodušenou podmínkou je např. překročení kritického hydraulického gradientu.

Koeficient eroze – vlastnost materiálu popisující intenzitu eroze. Stanovuje se zpravidla na základě experimentálního výzkumu.

Kritické tečné napětí na stěnách trubice – kritická hodnota tečného napětí po jejímž překročení dochází k transportu materiálu a k erozi stěn trubice.

Kritický hydraulický gradient – kritická hodnota hydraulického gradientu mající za následek inicializaci určitého děje, např. zpětné eroze. Kritický hydraulický gradient lze rozdělit na dva základní druhy dle způsobu jeho stanovení:

- střední – stanoven např. na okrajích měřicího zařízení (např. na nátoku a výtoku), jedná se o „průměrovanou“ hodnotu, která je odlišná oproti hodnotám lokálního gradientu,
- lokální – stanoven ve větším detailu dané úlohy.

Měřítka experimentu – měřítka vyjadřující poměrnou velikost experimentálního zařízení ku skutečnému ději na vodním díle. Volba měřítka závisí na možnostech dané laboratoře, dostupnosti testovacích materiálů a též na přínosech výsledků.

Napjatost konstrukce – soubor veličin popisujících průběhy napětí v dané konstrukci (viz kapitola 5.2).

Obvod elementu průsakové cesty – obvod části průsakové cesty vymezené dvěma příčnými řezy.

Okrajová podmínka – doplňující podmínka na okrajích náhradní oblasti numerického modelu potřebná k získání hledaného řešení.

Piezometr – nástroj k měření piezometrické výšky při proudění podzemní vody.

Piezometrická výška – výška hladiny podzemní vody od předem stanovené srovnávací roviny.

Počáteční podmínka – podmínka popisující stav numerického modelu na počátku simulace.

Pórovitost materiálu – poměr objemu pórů k objemu zeminy (zrn s póry). Stanoví se z měrné hmotnosti zeminy a objemové hmotnosti vzorku vysušeného při teplotě 100 °C až 110 °C. (Duchan et al., 2014)

Privilegovaná průsaková cesta – vada materiálu vznikající zpravidla filtrační deformací. Průsakovou cestu lze identifikovat zvýšeným průsakem. Při nekontrolovaném průsaku může na vodním díle dojít až k jeho porušení.

Průsaková délka – vzdálenost, na jaké se udává průsak, resp. proudění podzemní vody.

Průtok vzorkem – hmotnost nebo objem vody proteklý za určitý čas vzorkem materiálu.

Relativní odchylka měření – poměr absolutní odchylky ke skutečné hodnotě. Vyjadřuje procentuální odchýlení měřené hodnoty od skutečné hodnoty.

Rychlost eroze – veličina popisující rychlost, s jakou je daný materiál unášen proudící vodou. Stanovení veličiny je založeno na hmotnosti erodovaného materiálu v čase vztahované k ploše stěn privilegované průsakové cesty.

Tečné napětí na stěnách trubice – tečné (smykové) napětí vyvolané proudící vodou na stěnách trubice. Veličina je definovaná hydraulickým poloměrem dané trubice, gravitačním zrychlením, hustotou dané kapaliny a hydraulickým gradientem.

Tlakový senzor – senzor určený k měření tlaku kapaliny.

Ztekucení – porušení, které nastává, když vertikální průsakové síly působící proti tíze nesoudržné zeminy sníží vertikální efektivní napětí na nulu. Částice zeminy jsou pak nadzvedávány proudící vodou (vření částic) a dochází k porušení (EN B.1997.1, 2004).

1. ÚVOD

1.1 Úvod do problematiky

Jedním z možných způsobů porušení vodních děl jsou filtrační deformace zemin. Jedná se o soubor procesů, kdy dochází k přeskupení a transportu zrn materiálu v důsledku proudění podzemní vody. Jedním z typů filtračních deformací je vytvoření privilegované průsakové cesty.

Privilegovaná průsaková cesta může vzniknout u prakticky jakéhokoli vodního díla navrženého k zadržování vody, které je založeno na materiálu náchylnému k vnitřní erozi nebo je z něj přímo vybudováno. Jedná se především o hráze vodních nádrží a ochranné hráze, ale také o jezy a podobné příčné stavby na tocích. Z hlediska možných následků lze za nejzranitelnější konstrukce považovat obecně zemní hráze.

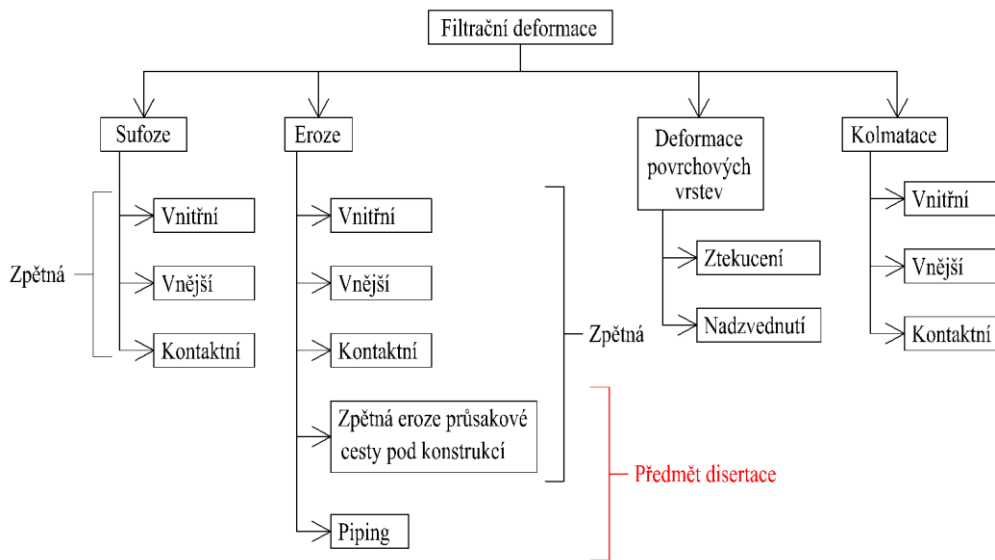
Ke vzniku privilegované průsakové cesty v zemní hrázi může dojít jak v jejím tělese, tak v jejím podloží. Její vznik je podmíněn vlastnostmi předmětného materiálu, napjatostí v zemině a hydraulickými podmínkami (např. velikostí hydraulického gradientu). Při vytváření průsakové cesty dochází ke zpětné erozi materiálu z jejího čela (od bodu výronu na vzdušné straně směrem proti proudu). Zpětné erozi předchází buď jeden z ostatních typů lokálních filtračních deformací jako je ztekucení materiálu na vzdušné patě hráze, sufoze, kontaktní eroze, nebo vytvoření trhlin v materiálu a obdobné defekty (např. nedostatečné zhutnění zeminy v okolí funkčních objektů, trhliny vzniklé nerovnoměrným sedáním, dutiny vytvořené zvěří nebo vegetací).

Pokud zpětná eroze není včas přerušena (např. sanací nebo snížením hydraulického gradientu), dojde časem k propojení vzdušného a návodního líce konstrukce privilegovanou průsakovou cestou (též trubice). Dále následuje fáze, kdy proudící voda způsobuje erozi materiálu stěn trubice, čímž dochází k jejímu zvětšování a ke zvýšení její průtočné kapacity. Zvýšení kapacity trubice má pak za následek i zvýšení průtoku, a tudíž urychlení eroze. Výsledkem procesu může být kolaps nadloží trubice a vytvoření průlomového otvoru a následně zvláštní povodně.

1.2 Obecné dělení filtračních deformací

Filtrační deformaci lze definovat jako vnitřní narušení zeminy v důsledku činnosti vody, tj. sufoze, kontaktní rozmývání, prolomení apod. (ČSN 75 0120). V závislosti na materiálu nebo sousedících materiálech a na způsobu jakým filtrační deformace probíhá bylo definováno rozdělení filtračních deformací různými autory v mnoha vědeckých

publikacích. Na základě porovnání východní a západní literatury bylo zjištěno rozdílné používání pojmů pro vnitřní a vnější erozi, pojem filtrační deformace v západní literatuře není definován atp. Pro účely disertační práce následuje rozdělení filtračních deformací tak jak je uvedeno v Říha et al. (2018) (viz obr. 1.1).



Obr. 1.1 Rozdělení filtračních deformací (Říha et al., 2018)

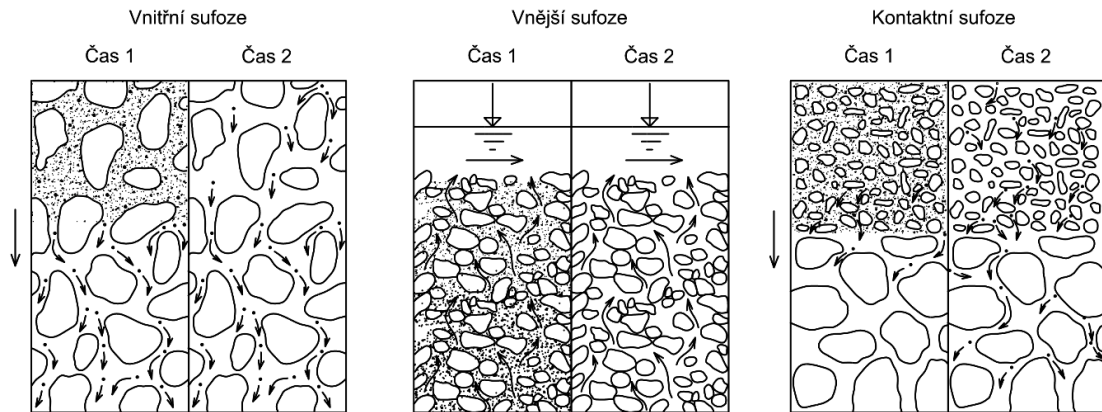
1.2.1 Sufoze

Termín sufoze lze definovat jako proces, při kterém dochází k odnosu jemné frakce zeminy v důsledku proudění podzemní vody. K sufozi typicky dochází v nestejnzrnných materiálech, pokud dojde k překročení kritického hydraulického gradientu. Výsledkem procesu je změna pórovitosti materiálu a hydraulické vodivosti materiálu. Proces bývá doprovázen kolmatací (Říha et al., 2018).

Sufozi lze dále rozdělit na:

- **vnitřní sufozi:** proces redistribuce jemných částic uvnitř vrstvy materiálu, kdy dochází pouze k lokálním změnám pórovitosti materiálu a hydraulické vodivosti (Kovács, 1981);
- **vnější sufozi:** proces nastávající podél rozhraní pórového prostředí a vody, kdy dochází k „vyvření“ a odnosu jemných částic zeminy (Vuković a Pušić, 1992);
- **kontaktní sufozi:** proces, kdy dochází na kontaktu dvou různě zrnitých vrstev k transportu jemných částic z jednoho materiálu do druhého (Bush a Luckner, 1973).

Schématy typů sufoze ukazuje obr. 1.2.



Obr. 1.2 Typy sufoze (Bush a Luckner, 1973)

1.2.2 Eroze

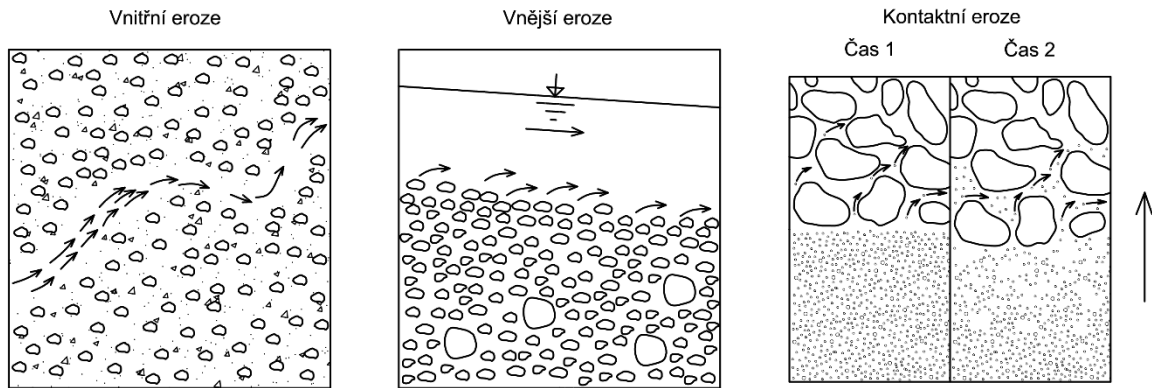
Erozi lze definovat jako přeskupení a transport všech částic zeminy (obvykle stejnozrné) v důsledku proudění podzemní vody (Říha et al., 2018).

Erozi lze dále rozdělit na:

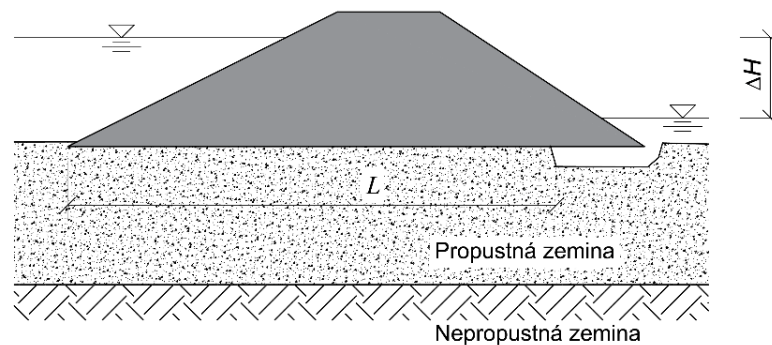
- **vnitřní erozi:** proces, který nastává v trhlinách materiálu často vznikajících v důsledku činnosti zvířete, rostlin nebo zpětnou erozí (Bush a Luckner, 1993);
- **vnější erozi:** proces vyplavování zrn z povrchové vrstvy materiálu (Bush a Luckner, 1973);
- **kontaktní erozi:** forma eroze, která nastává na rozhraní dvou vrstev materiálů, konkrétně jedné jemnozrné a druhé hrubozrné, která je vzhledem k první vrstvě sufózní. Na kontaktu dochází ke zvýšení pórovitosti jemnozrné zeminy, zatímco u hrubozrné dochází k poklesu pórovitosti, tj. dochází v ní k částečné nebo úplné kolmataci. (Říha et al., 2018);
- **zpětnou erozi:** proces, při kterém dochází k erozi materiálu od bodu výronu vody. Postupná zpětná eroze vyústí ve vytvoření trubice uvnitř konstrukce nebo pod ní. Průsak vody způsobuje odnos zrn směrem k bodu výronu, kde dochází k jejich ukládání nebo dalšímu odplavení ven z oblasti. Podmínkou procesu je přítomnost tzv. „stropu“ trubice, který zabrání její zasypaní. (Bonelli, 2012);
- **vývoj průsakové cesty (piping):** proces, při kterém dochází k rozšiřování trubice propojující horní a dolní hladinu u vodního díla. K procesu může dojít v případě vytvoření průběžných trhlin, v důsledku zpětné eroze nebo činností zvířete či rostlin. Vývoj průsakové cesty je provázen koncentrovaným průsakem (Říha et al. 2018).

Právě zpětná eroze s navazujícím vývojem průsakové cesty (piping) je předmětem disertační práce. V zahraniční literatuře se jevy souhrnně nazývají **Backward Erosion Piping (BEP)**.

Schémata zachycující vnitřní, vnější a kontaktní erozi ukazuje obr. 1.3, schéma zpětné eroze a vývoje průsakové cesty ukazuje obr. 1.4.



Obr. 1.3 Schéma vnitřní, vnější a kontaktní eroze (Bush a Luckner, 1973)



Obr. 1.4 Schéma zpětné eroze a vývoje průsakové cesty (Sellmeijer, 2006)

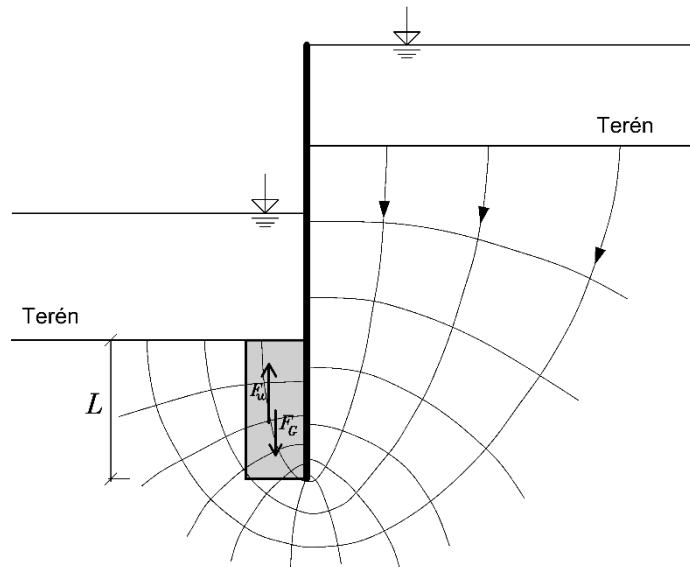
1.2.3 Deformace povrchových vrstev

Deformace povrchových vrstev jsou zvláštní případy, kdy dochází k vertikálnímu proudění podzemní vody. Zde hraje významnou roli, zda je povrchová vrstva tvořena soudržnou nepropustnou či nesoudržnou propustnou zeminou. Rozeznáváme pak:

- **ztekucení:** porušení, které nastává, když vertikální průsakové síly působící proti tíze nesoudržné zeminy snižují vertikální efektivní napětí na nulu. Částice zeminy jsou pak nadzvedávány proudící vodou (vření částic) a dochází k porušení (EN B.1997.1, 2004). Výzkumem v této oblasti se zabýval např. Hala (2020);

- **nadzvednutí:** k nadzvednutí dochází v případě, kdy pórový tlak pod konstrukcí nebo pod nepropustnou zeminou překročí tlak vyvolaný hmotností konstrukce nebo daného elementu zeminy (EN B.1997.1, 2004).

Příklad ztekucení či nadzvednutí povrchové vrstvy ukazuje obr. 1.5.



Obr. 1.5 Příklad ztekucení/nadzvednutí povrchové vrstvy (Říha et al., 2020)

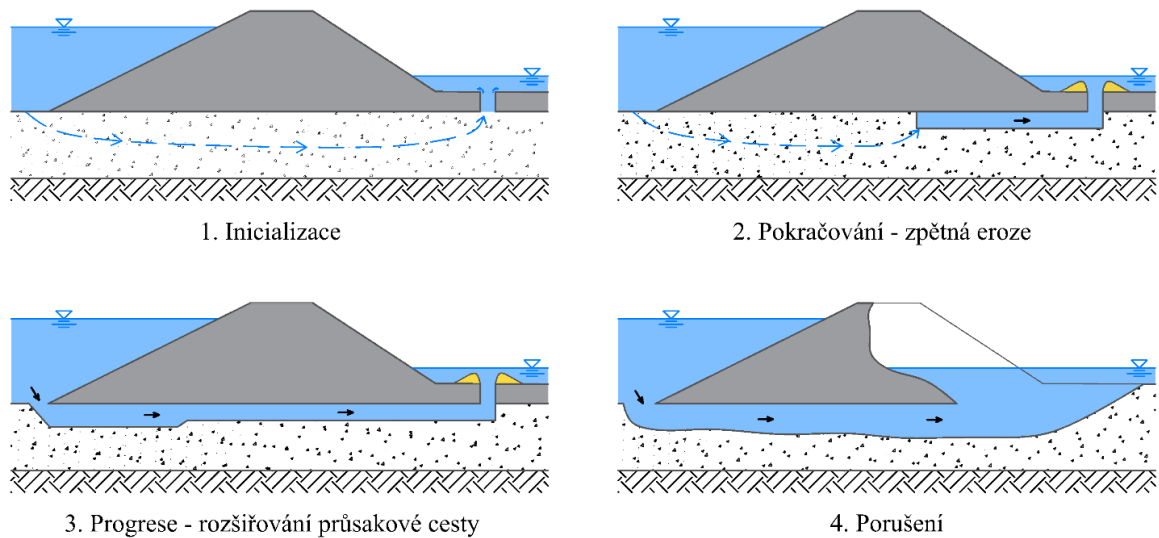
1.2.4 Kolmatace

Kolmatace je filtrační deformace zeminy, kterou lze popsat jako zaplňování pórů zeminy jemnými částicemi. Tento proces vede ke zvýšení objemové hmotnosti zeminy, zmenšení velikosti pórů a snížení průsaku (Vuković a Pušić, 1992). Důsledkem zaplnění pórů je snížení hydraulické vodivosti což je následováno zvýšením hydraulického gradientu, který může způsobit hydraulické trhání. Kolmataci lze obdobně jako sufozi rozdělit na vnitřní, vnější a kontaktní, a prakticky se jedná o opačný děj.

1.3 Zpětná eroze privilegované průsakové cesty v základové spáře

Zpětná eroze zeminy nastává v okamžiku, kdy průsakové síly (vyvolané gradientem tlaku) působící na její zrna překonají síly zamezující pohybu těchto zrn (inicializace). Základním předpokladem pro počátek zpětné eroze je přítomnost prostoru, do kterého je možné uvolněná zrna transportovat. V případě vzniku průsakové cesty v základové spáře vodního díla založeného na písčitém podloží dochází (po překročení určitého kritického hydraulického gradientu) ke ztekucení materiálu pod vzdušní patou hráze. Dalším způsobem inicializace může být počátek procesu vnitřní, vnější nebo i kontaktní eroze. Po inicializaci je materiál odplavován a dochází ke zpětné erozi (fáze pokračování). Po propojení hladin před a za konstrukcí nastává fáze rozšiřování vzniklé trubice, které může přejít až do fáze

porušení (obr. 1.6). Podmínkou pro pokračování a následné rozšiřování trubice je přítomnost „stropu“ který je ve zde uvažovaném případě tvořen samotným vodním dílem. Pokud pevné nadloží chybí, dochází k průběžnému zasypávání průsakové cesty materiálem nadloží, což se obvykle projeví vertikálními posuny (prosednutím) koruny hráze.



Obr. 1.6 Fáze vývoje privilegované průsakové cesty (van Beek, 2015)

1.3.1 Literatura k vývoji privilegované průsakové cesty

Vztah mezi rozdílem hladin a délkou průsakové cesty byl odvozen Clibbornem a Beresfordem již v roce 1902 (van Beek et al., 2011). Jedním z prvních autorů, který vztah rozšířil, byl Bligh (1910). Autor na základě získaných dat z různých vodních děl odvodil jednoduchý vztah pro výpočet mezní průsakové délky, resp. potřebné minimální délky základové spáry konstrukce, tj. takové, aby nedošlo ke ztekucení materiálu u její paty a k následné zpětné erozi. Blighova data jsou však omezena pouze na několik typů zemin a výpočet je možné provádět pouze pro vodorovné základové spáry. Nedostatky v Blighově práci později doplnil Lane (1934), který publikoval metodu pro výpočet průsakových délek i pro svislé a šikmé části konstrukce. VNIIG (1976) uvádí charakteristické kritické střední gradienty v podloží sypaných a betonových hrází.

1.3.1.1 Experimentální modely průsakové cesty

Prvotní základy matematických modelů byly položeny již po sestavení klasických Navier-Stokesových rovnic. Řešení celé úlohy proudění mezi zrny a jejich transport však nebylo z technologických důvodů možné. Výzkum se proto právě z tohoto důvodu omezoval na provádění experimentů nebo na přímá pozorování na vodních dílech.

Jeden z prvních modelů zpětné eroze v písčítých zeminách byl publikován Sellmeijerem (1988). Model zohledňuje vlastnosti zemin pro odhad kritického hydraulického gradientu pro počátek eroze. Publikovaný model byl později použit pro další výzkumné práce v Nizozemsku Verou van Beek. V současnosti se van Beek a její pracovní skupina soustředí na experimentální výzkum metod prevence a limitace zpětné eroze. Převážně se jedná o nové způsoby přerušeni zpětné eroze vloženi odolnějšího materiálu, jako např. šterku nebo geotextilie. Dílčí výsledky publikovali Vandenoer et al. (2017), Bezuijen (2017), Akrami et al. (2018), Rosenbrand et al. (2018), Rosenbrand et al. (2019), Akrami et al. (2019) a Koelewijn a Bridle (2017). Dalším způsobem, jak zpětné erozi zabránit, je použití speciálních látek, které upraví erozní vlastnosti zeminy. Jedná se například o aplikaci vápenných příměsí (De Baecque et al., 2017) nebo o použití biochemických procesů jako je přeměna močoviny bakteriemi předem naočkovanými do zeminy (Beguín, et al., 2018).

Robbins et al. (2018) publikoval zařízení pro sledování průběhu zpětné eroze. Navržené zařízení bylo kruhového průřezu, což umožnilo vytvoření průsakové cesty přesně ve vrcholu potrubí. Nicméně není zcela jasné, jak mohl kruhový profil zařízení ovlivnit experiment. Pomocí zařízení bylo možné sledovat změny piezometrických výšek podél průsakové cesty.

Výzkum v oblasti hydraulických ztrát v bodech výronu publikoval Robbins et al. (2019). Znalost těchto ztrát je důležitá hlavně jako vstup pro modely hodnotící inicializaci zpětné eroze.

1.3.1.2 Matematické modely průsakové cesty

S nástupem výpočetní techniky bylo možné postupně začít sestavovat matematické modely pro složitější úlohy a poté i omezené numerické modely. Teoretické vysvětlení některých pozorovaných výsledků ze Sellmeijerova modelu (1988) bylo provedeno v disertační práci van Beek (2015). Na základě této teorie pak byl sestaven a validován predikční model. Zvláštní pozornost byla věnována erozi ve stejnozrnných homogenních písčích. Van Beek et al. (2012) také provedli validaci Sellmeijerova modelu pro případ hráze založené na několika písčítých vrstvách.

Rotunno et al. (2018) publikovali numerický postup pro modelování zpětné eroze za použití klasických Navier-Stokesových rovnic. Svůj model aplikovali a provedli 2D simulace, které průběžně publikují na konferencích EWG-IE. Nicméně výpočet každé

ze simulací trval asi 1 měsíc (s využitím výkonného serveru), což snižuje celkovou použitelnost modelu.

Na základě získaných experimentálních dat, které publikovali Robbins et al. (2018), navrhli Robbins a Griffiths (2018) způsob sestavení numerického modelu, který později publikovali na konferenci EWG-IE ve Vancouveru (van Beek et al., 2019). Zde byl též prezentován způsob stochastického modelování zpětné eroze (Robbins et al., 2019).

1.3.1.3 Erozní parametry zemin ovlivňující rozšiřování průsakové cesty

Pro účely stanovení parametrů ovlivňujících rozšiřování průsakové cesty (tzv. erozní parametry) bylo provedeno množství experimentů (Moore a Masch, 1962; Arulanandan et al., 1973; Chapuis a Gatien, 1986; Reddi et al., 2000; Wan a Fell, 2002, 2004a a 2004b; Hanson a Cook, 2004). Teoretický model rozšiřování průsakové cesty popsali také Bonelli a Benahmed (Bonelli et al., 2006; Benahmed a Bonelli, 2012).

2. ZHODNOCENÍ LITERATURY K EROZI PRIVILEGOVANÉ PRŮSAKOVÉ CESTY

V rámci zhodnocení literatury byla provedena analýza výzkumů jednotlivých autorů a získaných výsledků. Prakticky lze identifikovat 2 hlavní procesy, které byly zkoumány:

1. proces inicializace průsakové cesty (kritický hydraulický gradient),
2. rozšiřování průsakové cesty (erozní parametry materiálů).

2.1 Kritický hydraulický gradient dle literatury

V jedné z prvních publikací Bligh (1910) stanovuje mezní délku průsakové cesty L v závislosti na empiricky stanovených koeficientech:

$$L = c_B H_h \text{ [m]}, \quad (2.1)$$

kde c_B ... koeficient délky průsakové cesty dle Bligha [-],

H_h ... rozdíl hladin nad a pod objektem [m],

L ... mezní délka průsakové cesty [m].

Po provedení úpravy lze definovat střední kritický hydraulický gradient J_c potřebný pro vytvoření průsakové cesty (mezní):

$$J_c = \frac{1}{c_B} \text{ [-]}. \quad (2.2)$$

Hodnoty koeficientu c_B byly získány na základě podmínek na existujících vodních dílech.

Podobné koeficienty odvodili Griffith (1913) a Lane (1934), a to i pro jiné materiály. Koeficienty délky průsakové cesty definují střední kritický hydraulický gradient. Zpětně dopočtené hodnoty koeficientů c_B a středních kritických gradientů jsou shrnuty v tab. 2.1. Další hodnoty hydraulického gradientu publikovali Chugaev (1962), VNIIG (1976), Müller-Kirchenbauer et al. (1993), Weijers a Sellmeijer (1993). Publikovaná data shrnují tab. 2.2 a 2.3. Vzhledem k tomu, že VNIIG (1976) je normou, jsou hodnoty záměrně předdimenzovány za účelem zajištění bezpečnosti konstrukce.

Schmertmann (2000) definuje kritický hydraulický gradient v závislosti na čísle nestejnoprnosti C_U (pro $C_U < 3,2$):

$$J_c = 0,05 + 0,183(C_U - 1) \text{ [-]}, \quad (2.3)$$

kde C_U ... číslo nestejnoprnosti [-],

J_c ... kritický hydraulický gradient [-].

Sellmeijer (2011) na základě svých výzkumů publikoval modifikovaný vztah Blighe, kde zavedl další faktory ovlivňující výsledný kritický hydraulický gradient:

$$\frac{\Delta H}{L_{cesta}} = f_R f_S f_G \quad [-], \quad (2.4)$$

$$f_R = \eta \frac{\gamma_p'}{\gamma_w} \tan \vartheta \quad [-], \quad (2.5)$$

$$f_S = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L_{cesta}}} \quad [-], \quad (2.6)$$

$$f_G = 0,91 \left(\frac{D_{bed}}{L_{cesta}} \right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D_{bed}}{L_{cesta}} \right)^{2,8} - 1} + 0,04} \quad [-], \quad (2.7)$$

- kde d_{70} ... velikost zrna při 70% propadu [m],
 D_{bed} ... mocnost vrstvy písku v podzákladí [m],
 f_G ... faktor geometrie [-],
 f_R ... faktor odolnosti [-],
 f_S ... faktor měřítka [-],
 k ... hydraulická vodivost vzorku [m/s],
 L_{cesta} ... délka průsakové cesty [m],
 γ_p' ... měrná tíha zrn [N/m³],
 γ_w ... měrná tíha vody [N/m³],
 ΔH ... rozdíl hladin nad a pod konstrukcí [m],
 η ... Whitesova konstanta [-] – dle Sellmeijera (1988): $\eta = 0,25$,
 ϑ ... sklon uložení vrstvy písku [°],
 κ ... propustnost materiálu ($\kappa = k\mu/\gamma_w$) [m²],
 μ ... dynamická viskozita vody [Pa.s].

Rovnice (2.4) je založena na modifikaci výpočtu nejkratší průsakové dráhy při které dojde k erozi. Úpravou byl získán vztah pro výpočet kritického hydraulického gradientu.

Ve své práci van Beek (2015) provedla několik desítek experimentů s různými materiály v horizontálně uložených boxech o různých průsakových délkách L' . Odvozený kritický hydraulický gradient pak shrnuje v obr. 2.1.

Tab. 2.1 Střední kritické hydraulické gradienty dle koeficientu délky průsakové cesty

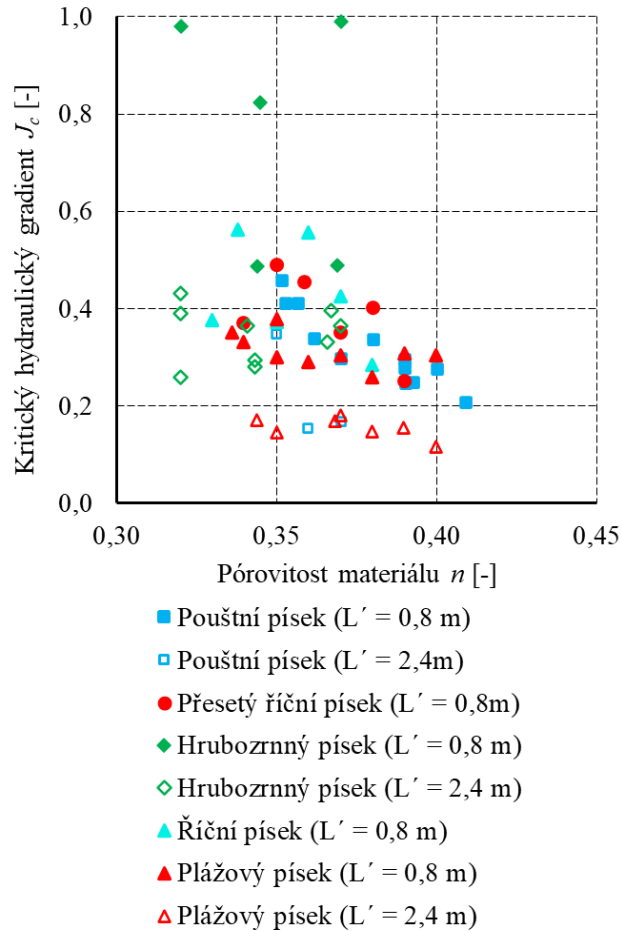
Materiál podloží	Bligh (1910)		Griffith (1913)		Lane (1934)	
	c_B	$J_{c,stř}$	c_B	$J_{c,stř}$	c_B	$J_{c,stř}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Jemná hlína a písek	18,0	0,056	-	-	8,5	0,118
Jemnozrný slídový písek	15,0	0,067	14,5-16,0	0,069-0,063	7,0	0,143
Jemný křemenný písek	-	-	12,5-14,0	0,080-0,071	-	-
Středně zrněný písek	-	-	-	-	6,0	0,167
Hrubozrný písek	12,0	0,083	-	-	5,0	0,200
Hrubozrný křemenný písek	-	-	10,0-12,0	0,100-0,083	-	-
Jemný štěrk	-	-	-	-	4,0	0,250
Středně zrněný štěrk	-	-	-	-	3,5	0,286
Plážové oblázky	-	-	8,0	0,125	-	-
Štěrk a písek	9,0	0,111	-	-	-	-
Hrubý štěrk včetně kamenů	-	-	-	-	3,0	0,333
Balvany s kameny a štěrkiem	-	-	-	-	2,5	0,400
Balvany, štěrk a písek	4,0-6,0	0,167-0,250	-	-	-	-
Balvany	-	-	4,0	0,250	-	-
Měkký jíl	-	-	-	-	3,0	0,333
Středně měkký jíl	-	-	-	-	2,0	0,500
Tvrký jíl	-	-	-	-	1,8	0,556
Velmi tvrdý jíl	-	-	-	-	1,6	0,625

Tab. 2.2 Střední kritické hydraulické gradienty dle ostatních autorů (Perzmaier et al., 2007)

Materiál podloží	$J_{c,stř}$ [-]			
	Chugaev (1962)	Müller-Kirchenbauer et al. (1993)	Wejers a Sellmeijer (1993)	
			$C_U = 1,5$	$C_U = 3$
Jemný písek	0,12	0,06-0,08	0,09	0,14
Středně zrněný písek	0,15	0,08-0,10	0,16	0,24
Hrubozrný písek	0,25	0,12-0,17	0,18	0,28
Štěrk	0,25	-	0,28	0,34

Tab. 2.3 Střední kritické hydraulické gradienty dle VNIIG (1976)

Materiál podloží	$J_{c,stř}$ [-]	
	Podloží sypaných hrází	Podloží betonových hrází
Ulehlá hlína	1,20	0,68
Písčitá hlína	0,60	0,43
Hrubozrný písek, štěrk	0,48	0,34
Středně zrněný písek	0,40	0,26
Jemnozrný písek	0,30	0,21



Obr. 2.1 Závislost kritického hydraulického gradientu dle van Beek (2015)

Střední hodnoty kritických hydraulických gradientů měřených ve válcovém měřicím zařízení, které publikoval Robbins et al. (2018) ukazují značný rozsah hodnot v závislosti na průměru použitého zařízení. Testovány byly celkem 2 písky pro 3 průměry zařízení. Výsledky experimentů ukazuje tab. 2.4.

Hodnoty dle Bligha (1910) a Griffitha (1913) vykazují velice nízké hodnoty kritických hydraulických gradientů. To je způsobeno zanesením určité bezpečnosti do stanovených koeficientů c_B . V případě Lanea (1934) byly publikované hodnoty koeficientů mnohem nižší a lépe odpovídají experimentům provedených van Beek (2015). Data dle Chugaeva (1962), Müller-Kirchenbauera et al. (1993) a Weijerse a Sellmeijera (1993) se též vzájemně mírně rozcházejí což je možné připsat rozdílům v testovaných materiálech. Oproti van Beek (2015) jsou data ostatních autorů podhodnocena $2\times$ až $3\times$ což je opět způsobeno zavedením bezpečností rezervy. Lepší shodu dat je možné pozorovat v publikaci VNIIG (1976), ale i zde jsou znatelné rozdíly v měřených datech o cca 25 %.

2.2 Erozní parametry materiálů

Erozní parametry materiálů byly v naprosté většině případů zjišťovány pro soudržné materiály. Příkladem mohou být publikace Wana a Fella (2002, a 2004a) nebo dalších autorů uvedených v kapitole 1.3.1.1. Erozní parametry zde byly v zásadě dva: odolnost materiálu proti inicializaci eroze (tzv. kritické tečné napětí) a erodibilita materiálu popisující jak snadno nebo jak obtížně lze materiál erodovat. Pro soudržné materiály je kritické tečné napětí v řádu jednotek až stovek Pa. V publikaci Wan a Fell (2002) je erodibilita vyjádřena koeficientem erodibility C_e (stanovení popisuje kapitola 5.4). Dostupná literatura řeší pouze soudržné zeminy, jsou tudíž v této kapitole uváděny pouze pro ilustraci (tab. 2.5).

Tab. 2.4 Střední kritický hydraulický gradient dle Robbinse et al. (2018)

Materiál	Měřítka testu	Pórovitost materiálu n [-]	Střední kritický hydraulický gradient $J_{c, střed}$ [-]	
Písek 40/70 – jemný (zrna: 0,21-0,42 mm)	Malé (průměr zařízení: 25,4 mm)	0,367	0,86	
		0,390	0,25	
		0,359	0,55	
		0,346	0,96	
	Střední (průměr zařízení: 76,2 mm)	0,412	0,32	
		0,390	0,39	
		0,408	0,25	
		0,390	0,36	
		0,390	0,36	
		0,379	0,37	
		0,379	0,41	
		0,379	0,41	
	Písek 20/40 – hrubý (zrna: 0,42-0,84 mm)	Střední (průměr zařízení: 76,2 mm)	0,351	0,57
			0,379	0,41
0,367			0,47	
0,387			0,33	
Velké (průměr zařízení: 152,4 mm)		0,419	0,17	
		0,401	0,24	
		0,379	0,33	
		0,394	0,22	

Tab. 2.5 Hodnoty koeficientů eroze a kritického tečného napětí (Wan a Fell, 2002)

Materiál	Kategorie zeminy	Index plasticity I_p [%]	Max. objemová hmotnost ρ_v [kg/m ³]	Optimální vlhkost w_{opt} [%]	Koeficient eroze C_e [s/m]	Kritické tečné napětí τ_c [Pa]
Bradys	CH	31	1318	35,2	$1,89 \times 10^{-4}$	248,04
Buffalo	CL	20	1719	19,4	$3,45 \times 10^{-6}$	132,74
Lyell	SM	-	1963	10,1	$4,38 \times 10^{-2}$	5,45
Matahina	CL-ML	12	1805	16,7	$2,02 \times 10^{-4}$	1049,04

2.3 Závěrečné zhodnocení literatury

Většina starší literatury jako Bligh (1910) a Lane (1934) **spoléhá pouze na empirická data** a výsledné vztahy nejsou fyzikálně podloženy. Model publikovaný Sellmeijem (1988) používá podobnou podmínku pro inicializaci zpětné eroze. Nicméně do podmínky byl doplněn vliv vlastností zeminy (objemová hmotnost, hustota zrn, apod.). Stále je zde však používán pouze **střední hydraulický gradient** stejně jako v publikaci (Bligh, 1910). Van Beek (2015) ve svém experimentálním výzkumu taktéž uvažuje pouze se **středním hydraulickým gradientem**. Dále zde nastává problém s celkovou **nahodilostí vytváření privilegované průsakové cesty**. Problém s nahodilostí průsakové cesty řeší Robbins et al. (2018), který využívá válcové měřicí zařízení. Nicméně nelze popsat, jaký **vliv má kruhový tvar zařízení na výslednou zpětnou erozi**. Dále pak **nelze pozorovat rozšiřování** průsakové cesty ani odnesené množství materiálu.

Z hlediska preciznosti, s jakou je možné provést modelování podle Rotunna et al. (2018) by se tento postup mohl jevit jako nejvhodnější, nicméně proti tomuto faktu hovoří **velká časová náročnost výpočtů v navrhovaném numerickém modelu**.

Co se týče erozních parametrů zemin, všichni autoři pro své experimenty používali jílovité zeminy, příp. umělé směsi písků s jíly, tzn. **pouze soudržné zeminy**. Písky a písčité zeminy nebyly v oblasti vnitřní eroze zkoumány. Navíc byl v literatuře vždy uveden předpoklad, že již došlo k vytvoření průsakové cesty (např. kořeny rostlin či zvěří, trhliny) a zpětná eroze nebyla zkoumána.

Právě po zhodnocení literatury výše bylo blíže specifikováno téma disertační práce: **vyšetření lokálních podmínek vzniku zpětné eroze průsakové cesty a jejího dalšího vývoje ve stejnozrnných píscích**.

3. PŘEDMĚT A CÍLE PRÁCE

Vzhledem k zatím nedostatečnému pokrytí oblasti výzkumu průběhu zpětné eroze byl zvolen právě tento jev jako předmět výzkumu. Hlavním cílem práce bylo popsat mechanismus vývoje privilegované průsakové cesty v základové spáře vodního díla založeného na píscích, a to ve fázi „pokračování“ a „progrese“ (obr. 1.6). Dílčím cílem byl návrh zařízení pro výzkum zpětné eroze (a jeho ochrana podáním užitého vzoru na Úřad průmyslového vlastnictví), zjištění vlivu materiálových charakteristik na sledovaný děj a ideový návrh numerického modelu pro simulaci zpětné eroze.

Předmětem byly následující body, které jsou v práci dále rozvedeny:

- návrh experimentálního zařízení, jeho otestování a sestavení metodiky měření,
- zjištění vybraných fyzikálních vlastností testovaných materiálů,
- vlastní experimenty na vybraných materiálech,
- vyhodnocení výsledků,
- ideový návrh numerického modelu vývoje privilegované průsakové cesty.

Jelikož proces vývoje privilegované průsakové cesty je specifický, bylo nutné nejdříve provést ideový návrh měřicího zařízení. Následně bylo zařízení vyrobeno a testováno. V průběhu testování byly prováděny dodatečné úpravy. Finální verze zařízení je popsána v této práci. Zároveň byla průběžně sestavována a upravována i metodika přípravy vzorků a vlastního měření. Pro experimenty byl vypracován plán s počtem experimentů pro zvolené materiály. Vyhodnocení experimentů bylo provedeno pomocí různých softwarových prostředků (MATLAB, MS EXCEL atp.). Pro sestavení numerického modelu byl zvolen program ANSYS a přidružený programovací jazyk APDL.

4. POUŽITÉ POSTUPY

Řešení obsahovalo následující kroky:

1. obecný popis podmínek vzniku průsakové cesty,
2. popis podmínek inicializace zpětné eroze – počátek fáze „pokračování“,
3. popis podmínek rozšiřování průsakové cesty – fáze „progrese“,
4. rozbor působících sil,
5. popis fyzikálních vlastností zemin,
6. výčet sledovaných veličin,
7. popis laboratorního vybavení a měřicího zařízení,
8. provedení a vyhodnocení laboratorních experimentů,
9. ideový návrh numerického modelu.

4.1 *Obecné podmínky vzniku průsakové cesty*

Privilegovaná průsaková cesta v zemině obecně vzniká po překročení určité kritické hodnoty tlakového gradientu. Zpětné erozi materiálu předchází jeho ztekucení na vzdušní patě konstrukce (kritický hydraulický gradient pro ztekucení). Za předpokladu, že tento jev trvá dostatečně dlouho a ztekucený materiál může být odplavován, začne se vytvářet privilegovaná průsaková cesta. Pokud po určitém čase hydraulický gradient klesne a nedojde k plnému propojení prostorů před a za konstrukcí, zpětná eroze ustává a pod konstrukcí (za předpokladu, že konstrukce samotná tvoří „strop“ průsakové cesty) zůstává předdefinovaná průsaková cesta, která může být opět inicializována. Odhalení takovéto průsakové cesty může být dosti náročné jak z hlediska času, tak i po finanční stránce (vyžaduje detailní sledování konstrukce – technika, obchůzky). K inicializaci předdefinované průsakové cesty může docházet i opakovaně, kdy se průsaková dráha pod konstrukcí bude zkracovat, až nakonec dojde k plnému propojení prostorů nad a pod konstrukcí. Tento případ může nastat např. u ochranných hrází, které jsou zatěžovány pouze krátkodobě (např. ochranné hráze podél řeky Pád nebo Mississippi).

Na základě dříve provedených experimentů byly různými autory odvozeny vztahy pro stanovení středního kritického hydraulického gradientu pro inicializaci zpětné eroze. Lokální hodnoty gradientů v již vytvořené průsakové cestě začaly být zkoumány až teprve nedávno (např. Robbins, et al., 2018) a celý jev zpětné eroze zatím nebyl zcela přesně fyzikálně popsán. Inicializace zpětné eroze průsakové cesty zatím byla zkoumána pouze v rámci vyšetřování lokálních filtračních deformací jako je např. ztekucení (např. Hala, 2020).

4.2 Podmínky inicializace zpětné eroze průsakové cesty

Za předpokladu, že je již část privilegované průsakové cesty vytvořená (vlivem předcházející zpětné eroze), může dojít k opětovné inicializaci zpětné eroze (fáze „pokračování“). K několikanásobné inicializaci a postupnému vývoji průsakové cesty může nastat např. u cyklicky zatěžovaných konstrukcí, zejména u hrází vodních nádrží a u ochranných hrází. Inicializace a následná zpětná eroze je podmíněna překročením kritického tlakového gradientu, resp. situací kdy průsakové síly působící na jednotlivá zrna překonají síly zrna stabilizující (tíha zrn, tření mezi zrny, jejich vzájemné zaklínění atp.). Princip kritického hydraulického gradientu byl publikován již v roce 1910 (Bligh, 1910). Pro inicializaci zpětné eroze musí být přítomen „strop“, který zabraňuje průběžnému zasypávání vznikající průsakové cesty. V opačném případě je pak postupně vznikající průsaková cesta zasypávána, což následně vede k vertikálním poklesům konstrukce.

Právě podmínky opětovné inicializace zpětné eroze nejsou dosavadním výzkumem podchyceny, a proto byly zahrnuty do cílů disertační práce.

4.3 Podmínky zvětšování průsakové cesty

V případě, kdy již došlo k propojení horní a dolní hladiny vodního díla privilegovanou průsakovou cestou, dochází ke zvětšování vzniklé trubice (fáze „progrese“). Na základě experimentů provedených v Laboratoři vodohospodářského výzkumu VUT FAST (LVV VUT FAST) i v zahraničí (Sellmeijer, 1988; van Beek, 2015) lze konstatovat, že změna rozměrů trubice se děje spíše do stran než do hloubky. Výsledný průřez trubice lze aproximovat polovinou elipsy s velkou délkou hlavní poloosy a malou délkou vedlejší poloosy nebo lichoběžníkem o malé výšce, tj. v obou případech je průsaková cesta spíše mělká a široká. I při zvětšování průsakové cesty musí být přítomen „strop“ bránící v zasypání průsakové cesty.

Zvětšování trubice je dáno účinkem proudění vody, která na její stěny vyvozuje tečné napětí. Jelikož disertační práce uvažuje s písky, lze předpokládat jen velmi malou odolnost materiálu proti takovému účinku vody. Koncept rychlosti rozšiřování trubice uvedli Wan a Fell (2002). Stejný koncept byl použit v této disertační práci. Uvažuje se zde stanovením tzv. erodibility materiálu, kterou lze u použitých písků předpokládat jako velmi vysokou, tj. že zvětšování probíhá velice rychle dokud není proudění vody zastaveno nebo alespoň zpomaleno pod jistou kritickou mez nebo dokud nedojde ke kolapsu konstrukce.

4.4 Rozbor působících sil

Pohyb zrna při zpětné erozi je obecně způsoben překonáním sil stabilizujících polohu zrna (tíha zrna, tření mezi ostatními zrny, klenbový účinek na čele průsakové cesty). Destabilizující silou je zejména síla vztlaková a proudová. Dále je možné pozorovat jevy, jako jsou klenbové účinky nebo nedostatečná šířka erodované trubice, kterou nelze transportovat větší zrna. Za účelem popisu možností, které mohou v řešené úloze nastat, byl proveden rozbor působících sil (viz kapitola 5).

4.5 Fyzikální vlastnosti zemín

Z rozboru sil a na základě znalostí o proudění podzemní vody bylo nutné určit některé fyzikální vlastnosti testovaných zemín (viz kapitola 6.2). Primárně se jednalo o zrnitost materiálu (pro stanovení použitelnosti materiálu pro experiment a čísla nestejnzrnnosti C_U) a měrnou hmotnost zrn ρ_{zrn} (pro stanovení pórovitosti materiálu a tíhy zrn). Zmíněné vlastnosti byly stanovovány podle normy ČSN 72 1007. Zrnitost materiálů byla zjištěna prosévací zkouškou na normovaných sítích. Pro zjištění měrné hmotnosti zrn jednotlivých materiálů bylo použito vybavení Ústavu vodního hospodářství krajiny na Vysokém učení technickém v Brně.

4.6 Laboratorní vybavení

Za účelem prošetření závislostí mezi sledovanými veličinami, zejména pak pro sledování kritického hydraulického gradientu bylo v LVV VUT FAST sestaveno měřicí zařízení. Pomocí tohoto zařízení bylo možné do připraveného vzorku zeminy předdefinovat privilegovanou průsakovou cestu a následně sledovat inicializaci zpětné eroze a podmínky, kdy k jevu došlo. Po úplném propojení horní a dolní hladiny bylo možné sledovat i rozšiřování trubice. Veškeré součásti měřicího zařízení jsou popsány v kapitole 6.3 a v přílohách 1 až 5.

4.7 Laboratorní experimenty

Laboratorní experiment se skládal ze dvou hlavních částí, a sice z přípravy vzorku a z vlastního experimentu. Při přípravě vzorku byla stanovena jeho pórovitost, do jeho koncové části byla předdefinována privilegovaná průsaková cesta a byly zjištěny její rozměry na počátku měření. Spolu s postupným zvyšováním zatížení vzorku byly stanovovány průběhy piezometrických výšek, průtok vzorkem, hydraulický gradient na čele průsakové cesty a objem erodovaného materiálu. Data z experimentů byla následně zpracována do tabulek a grafů a byly odvozeny závěry o podmínkách vzniku a vývoje privilegované průsakové cesty.

4.7.1 Plán experimentů

Po ověření funkčnosti výše zmíněného měřicího zařízení byl sestaven plán experimentů. Plán zohledňoval potřebu testovat co nejvíce materiálů s rozdílnými vlastnostmi (zrnitost, číslo nestejnozrnnosti, měrnou hmotnost zrn), a též i dostupnosti takových materiálů.

V rámci práce bylo provedeno celkem 26 experimentů na materiálu Bzenec 0-2 mm, 8 experimentů na materiálu Bzenec 0,25-2 mm a 8 experimentů na materiálu Bzenec 0,25-1 mm. Testované materiály byly stejnozrné s číslem nestejnozrnnosti $C_U = 2,98$, $2,08$ a $1,84$. Též byly k testování použity skleněné kuličky velikosti 0,2 a 0,5 mm, ale výsledky experimentů nebyly z důvodu problematické přípravy vyhovující (viz diskuse v kapitole 6.5.3.1).

4.8 Ideový návrh numerického modelu

Na základě dat z experimentů byl navržen numerický model v programovém prostředí ANSYS. Výhodou modelu je možnost nastavení jak geometrie vzorku a předdefinované průsakové cesty, tak i průběhu okrajových podmínek v čase.

Koncepčně je model rozdělen na dvě oblasti: pórové prostředí a průsakovou cestu. Ke každé oblasti byly přiřazeny materiálové vlastnosti:

- pórové prostředí je v modelu uvažováno jako kontinuální homogenní s danou hydraulickou vodivostí – materiál č. 1,
- průsaková cesta byla simulována homogenním materiálem s mnohonásobně vyšší hydraulickou vodivostí – materiál č. 2.

Simulace eroze byla prakticky provedena tak, že v každém kroku výpočtu byla stanovena stabilita vybraných elementů oblasti pórového prostředí a na základě splnění naprogramovaných podmínek byly elementy formálně převáděny z oblasti pórového prostředí do oblasti průsakové cesty.

5. TEORETICKÝ ROZBOR JEVU

Disertační práce se zaměřuje na dva klíčové děje při erozi privilegované průsakové cesty v základové spáře:

1. inicializace průsakové cesty a její postup až do propojení horní a dolní vody.
2. zvětšování rozměrů vzniklé průsakové cesty – erodibilita zeminy.

Před samotnou inicializací eroze dochází k průtoku vody vzorkem. K inicializaci a postupu zpětné eroze bylo možné přistupovat dvěma způsoby, a to buď čistě z hlediska napjatosti, či z hlediska aplikačního, tj. za použití hodnot kritického hydraulického gradientu, kritického tečného napětí a erodibility zeminy. Oba přístupy jsou popsány v následujících kapitolách.

5.1 Teorie proudění podzemní vody v nasycené zóně

Proudění podzemní vody po překročení určité meze inicializuje zpětnou erozi. Proudění je dáno rozdílem energií před a za protékajícím materiálem. Základní rovnice proudění podzemní vody vychází ze zákona zachování hmotnosti:

$$\frac{\partial(\rho_w q_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} = \rho_w Q'_D \quad [\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}], \quad (5.1)$$

kde n ... pórovitost materiálu [-],
 q_i ... specifický průtok v daném směru souřadné osy [m/s],
 Q'_D ... objemový zdroj/propad [s^{-1}],
 t ... čas [s],
 x_i ... souřadná osa, $i = 1, 2, 3$,
 ρ_w ... hustota vody [kg/m^3].

Druhý člen na levé straně rovnice (5.1) vyjadřuje akumulaci vody v horninovém prostředí. Pro práci byl použit předpoklad relativní nestlačitelnosti kapaliny ($\rho_w = \text{konst.}$), tedy:

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial n}{\partial t} = Q'_D \quad [\text{s}^{-1}]. \quad (5.2)$$

Po zavedení Darcyho vztahu (Bear a Verruijt, 1987), po aplikaci předpokladu izotropie prostředí a zavedení zásobnosti materiálu byl získán vztah:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + S_o \frac{\partial H}{\partial t} = Q'_D \quad [\text{s}^{-1}], \quad (5.3)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 k_i ... hydraulická vodivost v souřadné ose x_i [m/s],
 S_o ... specifická zásobnost [m^{-1}].

Uvedené rovnice jsou doplněny okrajovými podmínkami a počáteční podmínkou. Okrajové podmínky úlohy definují stav (piezometrickou výšku) na hranicích oblasti. Z praktického hlediska se jedná buď přímo o hodnoty stavové veličiny H (Dirichletova okrajová podmínka 1. druhu), nebo derivace (Neumannova okrajová podmínka 2. druhu). Počáteční podmínku je třeba definovat pro neustálené úlohy. Jedná se o počáteční stav modelu definovaný stavovými veličinami (zde piezometrické výšky H) na celé oblasti. Podrobnou teorii týkající se proudění podzemní vody publikoval např. Bear a Verruijt, (1987).

V případě prováděných experimentů byly okrajové podmínky dány hladinami na nátoku a výtoku z měřicího zařízení (Dirichletova okrajová podmínka 1. druhu), a nepropustným pláštěm (Neumannova okrajová podmínka 2. druhu), jako počáteční podmínku lze uvažovat stav ustáleného proudění vody vzorkem na začátku experimentu.

5.2 Napjatost a stabilita elementu materiálu

Vyhodnocení celkové napjatosti a následně i stability zrn materiálu je jedním z možných přístupů k řešení vývoje průsakové cesty. Prakticky je zde řešena stabilita zrn materiálu, na která působí vnější síly. K inicializaci eroze dojde v případě, stane-li se zrno nestabilním a je-li možné zrno ze systému odstranit (tj. je zde přítomna jasná privilegovaná cesta, kterou lze materiál transportovat).

Materiál vodního díla a jeho podzákladí jsou vystaveny zatížení od tíhy konstrukce, vlastní tíhy, tíhy vody, vztlakové síle a síle od proudění vody. Dílčími výsledky řešení jsou následující veličiny:

- vektor posunů $\mathbf{u} = [u_x, u_y, u_z]^T$,
- vektor poměrných přetvoření $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$,
- tenzor napětí $\boldsymbol{\sigma}$,
- vektor hlavních napětí $\boldsymbol{\sigma}_h = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]^T$.

Vektor posunů se v dané úloze získá výpočtem (např. numerickým modelem za použití metody konečných prvků). Při znalosti původní polohy uzlů v úloze se zároveň stanoví poměrná přetvoření, z nichž se pak při znalosti modulů pružnosti E odvodí tzv. tenzor napětí $\boldsymbol{\sigma}$:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

kde $\boldsymbol{\sigma}$... tenzor napětí [Pa],
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$... normálová napětí v osách $x, y, a z$ [Pa],
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$... smyková napětí [Pa].

Pro smyková napětí platí:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad (5.5)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad (5.6)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (5.7)$$

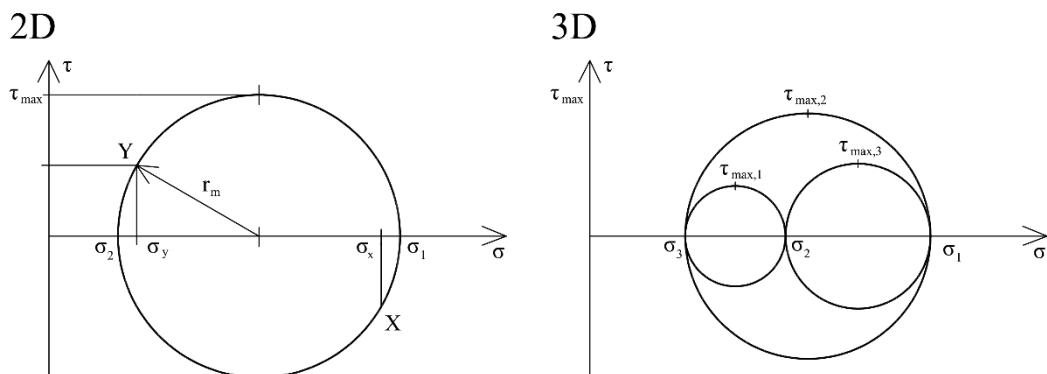
Pro element materiálu lze výpočtem stanovit normálová napětí ve třech směrech (σ_x , σ_y a σ_z) a smyková napětí τ_{xy} , τ_{xz} a τ_{yz} . Na základě těchto známých hodnot lze stanovit pomocí Mohrovy kružnice (obr. 5.1) (Beer a Russell Johnson, 1992) hlavní napětí σ_1 , σ_2 a σ_3 :

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad [\text{Pa}], \quad (5.8)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad [\text{Pa}], \quad (5.9)$$

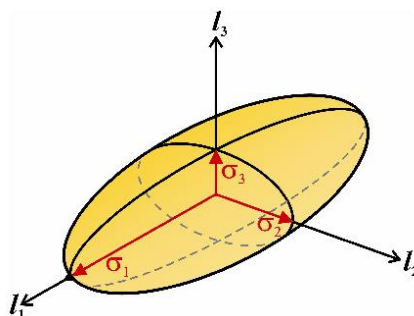
$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad [\text{Pa}], \quad (5.10)$$

kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$... hlavní napětí [Pa],
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$... smyková napětí [Pa].



Obr. 5.1 Mohrova kružnice a stanovení hlavních napětí (Beer a Russell Johnson, 1992)

Hlavní napětí lze graficky znázornit i elipsoidem napjatosti (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Elipsoid napjatosti (Kernstocková, 2007)

Cílem řešení napjatosti bylo získání průběhů napětí ve vzorku a utvoření celkového obrazu o dějích při experimentech. Dílčím cílem bylo stanovení průběhu maximálních normálových napětí a maximálních smykových napětí dle vztahů:

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ [Pa]}, \quad (5.11)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{ [Pa]}, \quad (5.12)$$

kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$... hlavní napětí [Pa],
 σ_N ... maximální normálové napětí [Pa],
 τ_{max} ... maximální smykové napětí [Pa].

Detailní teorii napjatosti uvádí např. Beer a Russell Johnson (1992) nebo Gere a Timoshenko (1990).

5.3 Koncept kritického hydraulického gradientu

Pro snadnější pochopení, kdy dochází k inicializaci zpětné eroze a k jejímu pokračování byl obecně přijat koncept kritického hydraulického gradientu. Veličina jednoduše popisuje kritickou mez, kdy již dojde k inicializaci daného jevu a je možné ji porovnat s hodnotami hydraulických gradientů na vodních dílech např. dle Bligha (1910), Lanea (1934) nebo Chugaeva (1962).

5.3.1 Kritický hydraulický gradient pro inicializaci zpětné eroze

Maximální hydraulický gradient lze očekávat na čele privilegované průsakové cesty. Po překročení určité kritické hodnoty pak dochází ke zpětné erozi materiálu a ke zkrácení průsakové délky. Následkem zkrácení průsakové délky dochází ke zvýšení hydraulického gradientu a k urychlení procesu eroze. Síly působící na čele průsakové cesty (obr. 5.3) jsou následující: objemová tíhová síla, objemová vztlaková síla a objemová síla vyvolaná proudící vodou. Síly v systému souřadnic jsou vyjádřeny následujícími vztahy:

$$F_G = -\rho_{zrn}(1 - n)gV \text{ [N]}, \quad (5.13)$$

$$F_{vz} = \rho_w(1 - n)gV \text{ [N]}, \quad (5.14)$$

$$\vec{F}_J = -V\rho_w g \mathbf{J} \text{ [N]}, \quad (5.15)$$

kde F_G ... objemová tíhová síla zeminy [N],
 F_{vz} ... objemová vztlaková síla [N],
 \vec{F}_J ... vektor objemové síly vyvolané proudící vodou [N],
 g ... gravitační zrychlení [m/s^2],
 \mathbf{J} ... vektor hydraulického gradientu [-],

- n ... pórovitost materiálu [-],
 V ... objem elementu zeminy [m^3],
 ρ_w ... hustota vody [kg/m^3],
 ρ_{zrn} ... měrná hmotnost zrn materiálu [kg/m^3].

Záporné znaménko v rovnici (5.15) je zavedeno pro korekci výpočtu založeného na hydraulickém gradientu. Pro ten platí, že ve směru proudění vody (z místa s vyšší energií do místa s nižší energií) je gradient záporný, proudová síla ale má směr kladný.

Po vydělení sil objemem elementu V a po odečtení síly vztlakové od síly tíhové byly získány následující vztahy:

$$F_G' = \rho'(1 - n)g \quad [\text{N}/\text{m}^3], \quad (5.16)$$

$$\vec{F}_J' = \rho_w g \mathbf{J} \quad [\text{N}/\text{m}^3], \quad (5.17)$$

- kde F_G' ... jednotková objemová efektivní tíhová síla zeminy [N/m^3],
 \vec{F}_J' ... vektor jednotkové objemové síly vyvolané proudící vodou [N/m^3],
 ρ' ... objemová hmotnost zeminy nadlehčené vodou [kg/m^3].

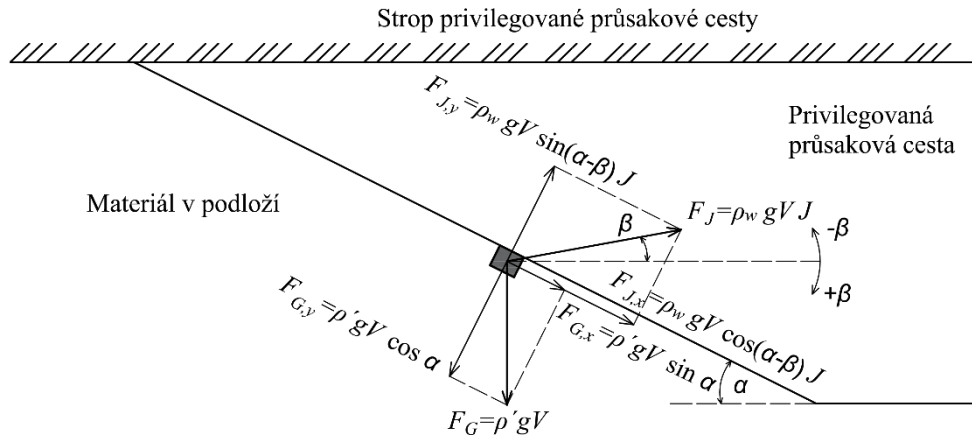
Rozbor sil a jejich jednotlivých složek je možné vykreslit pro kritické místo v průsakové cestě, tj. na jejím čele. Obr. 5.3 uvádí rovinnou schematizaci takového rozboru. Z obr. 5.3 vyplývá, že silou destabilizující čelo průsakové cesty je jednak složka x efektivní tíhové síly, tak i síla vyvolaná proudící vodou. Z rozboru též vyplývá, že podstatný vliv na stabilitu čela má síla vyvolaná proudící vodou, resp. velikost a směr hydraulického gradientu působícího na element zeminy v čele průsakové cesty. V prostorové úloze navíc může hrát roli klenbový účinek a zaklínění zrn. Tyto faktory jsou ale obecně těžko uchopitelné a není s nimi v rámci rozboru uvažováno.

Při praktických aplikacích mnohdy nelze přesně stanovit přesnou objemovou hmotnost materiálu v podloží, sklon čela průsakové cesty ani úhel mezi výslednicí proudové síly a vodorovnou rovinou. Na základě toho se experimentální výzkum soustředí pouze na stanovení veličiny, která má na vznik eroze zásadní vliv, tj. kritický hydraulický gradient.

Výsledný stupeň bezpečnosti svahu lze zapsat pomocí vztahu (Říha et al., 2016):

$$SF = \frac{F_G' \cos \alpha \tan \varphi'}{F_G' \sin \alpha + F_J' \cos(\alpha - \beta) + F_J' \sin(\alpha - \beta) \tan \varphi'} \quad [-], \quad (5.18)$$

- kde SF ... stupeň stability svahu [-],
 α ... úhel sklonu svahu [$^\circ$],
 β ... úhel, který svírá hydraulický gradient s vodorovnou rovinou [$^\circ$],
 φ' ... efektivní úhel vnitřního tření [$^\circ$].



Obr. 5.3 Síly působící na čele privilegované průsakové cesty – rovinná schematizace

Pro teoretické vyjádření kritického hydraulického gradientu je možné uvažovat $SF = 1$. Po úpravě pak vztah pro stanovení kritického hydraulického gradientu zní:

$$J_c = \frac{\rho' \cos \alpha \tan \varphi' - \rho' \sin \alpha}{[\cos(\alpha - \beta) + \sin(\alpha - \beta) \tan \varphi'] \rho_w} [-], \quad (5.19)$$

kde J_c ... kritický hydraulický gradient [-].

Výpočet stupně bezpečnosti SF dle rovnice (5.18) byl použit jako základní vztah pro numerický model (viz kapitola 7.4.2)

5.4 Koncept erodibility materiálu

V průběhu fáze „progrese“ (tj. rozšiřování a prohlubování průsakové cesty) eroze je možné použít koncept erodibility, který popisuje rychlost, jakou eroze probíhá. Samotný koncept erodibility byl odvozen pro jílovité materiály (Wan a Fell, 2002). Stanovit rychlost eroze $\dot{\epsilon}$ lze na základě známého odneseného množství v čase. Stanovení rychlosti eroze je detailněji popsáno v kapitole 6.5.1.10.

V případě rozšiřování průsakové cesty do stran je možné na základě rychlosti eroze stanovit i koeficient eroze C_e , který obecně definuje, jak snadno je materiál erodovatelný. V podstatě se jedná o inverzní úlohu, kdy se zpětně po provedení experimentu zjišťují parametry připraveného vzorku, které se pak mohou aplikovat při posuzování reálných vodních děl. Analýzu chování koeficientu pro různé typy soudržných materiálů obsahuje např. Wan a Fell (2002).

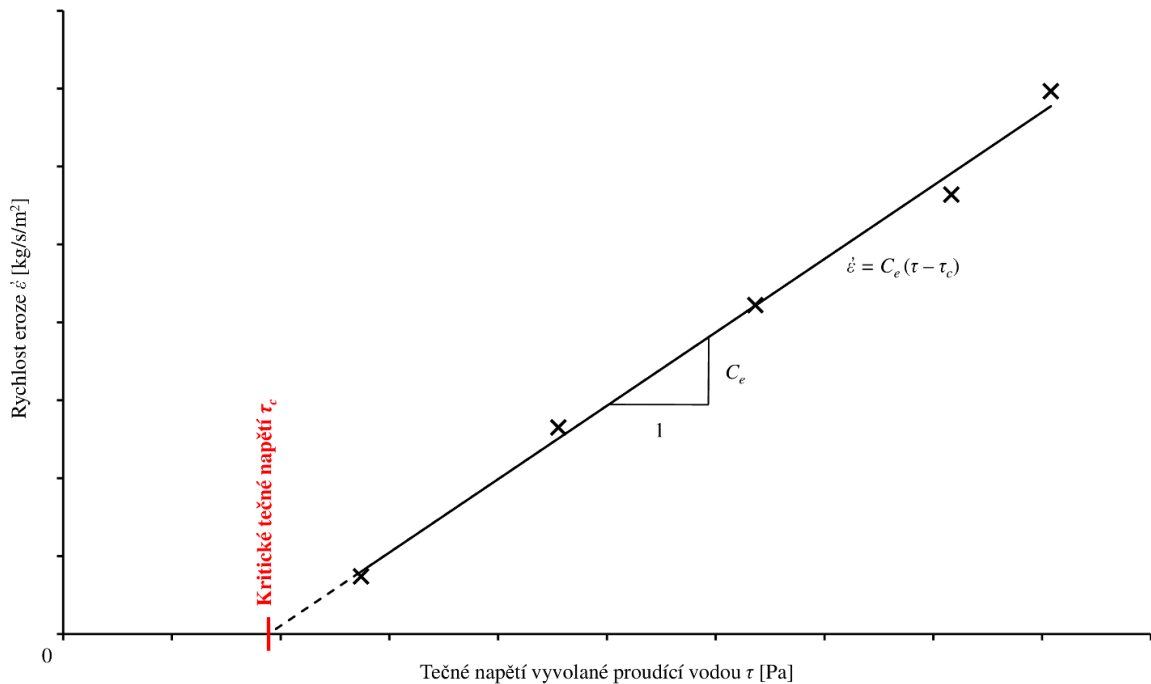
Wan a Fell (2002) uvádí experimenty při kterých byl do válcového vzorku vyvrtán otvor o předem daném průměru. Vzorek byl umístěn do měřicího zařízení a pod tlakem jím protékala voda (pouze definovaným otvorem). Proudící voda vyvozovala smykové napětí na stěny otvoru a po překročení kritického smykového napětí docházelo k odtrhávání a

odnosu částic z pláště trubice. Z výsledného rozměru trubice a dalších měřených veličin (tlak před a za vzorkem, zákal atd.) bylo stanoveno právě kritické tečné napětí a koeficient eroze.

Koeficient je definován následovně (viz též obr. 5.4):

$$C_e = \frac{\dot{\epsilon}_{boč}}{\tau - \tau_c} \text{ [s/m]}, \quad (5.20)$$

- kde C_e ... koeficient eroze [s/m],
 $\dot{\epsilon}_{boč}$... rychlost boční eroze [kg/s/m²],
 τ ... tečné napětí vyvolané proudící vodou [Pa],
 τ_c ... kritické tečné napětí [Pa].



Obr. 5.4 Ilustrativní graf stanovení koeficientu eroze a kritického tečného napětí (Wan a Fell, 2002)

Tečné napětí τ vyvolané proudící vodou lze stanovit z podmínky rovnováhy sil na elementu průsakové cesty. Za předpokladu vodorovné průsakové cesty (viz obr. 5.5) platí následující rovnice:

$$p_1 A_{R1} - p_2 A_{R2} = T \text{ [N]}, \quad (5.21)$$

- kde A_{R1}, A_{R2} ... průřezové plochy na okrajích elementu [m²],
 p_1, p_2 ... tlaky vody působící na element [Pa],
 T ... tečná síla [N].

Tlaky vody působící na element lze vyjádřit pomocí standardního výpočtu hydrostatického tlaku, tečná síla podél pláště průsakové cesty se vyjádří pomocí tečného napětí:

$$S_1 \rho_w g A_{R1} - S_2 \rho_w g A_{R2} = \tau O \Delta L \quad [\text{N}], \quad (5.22)$$

kde A_{R1}, A_{R2} ... průřezové plochy na okrajích elementu [m^2],
 g ... tíhové zrychlení [m/s^2],
 H_1 ... piezometrická výška před elementem [m],
 H_2 ... piezometrická výška za elementem [m],
 O ... omočený obvod [m],
 S_1, S_2 ... plocha zatěžovacího obrazce [m^2],
 ΔL ... délka elementu [m],
 ρ_w ... hustota vody [kg/m^3],
 τ ... tečné napětí vyvolané proudící vodou [Pa].

Po úpravě rovnice (5.22) a po zavedení předpokladu, že průřezová plocha $A_{R1} = A_{R2} = A$ a za předpokladu, že průměr průsakové cesty je tak malý, že hydrostatické tlaky lze uvažovat konstantní po celé její výšce, získáme vztah:

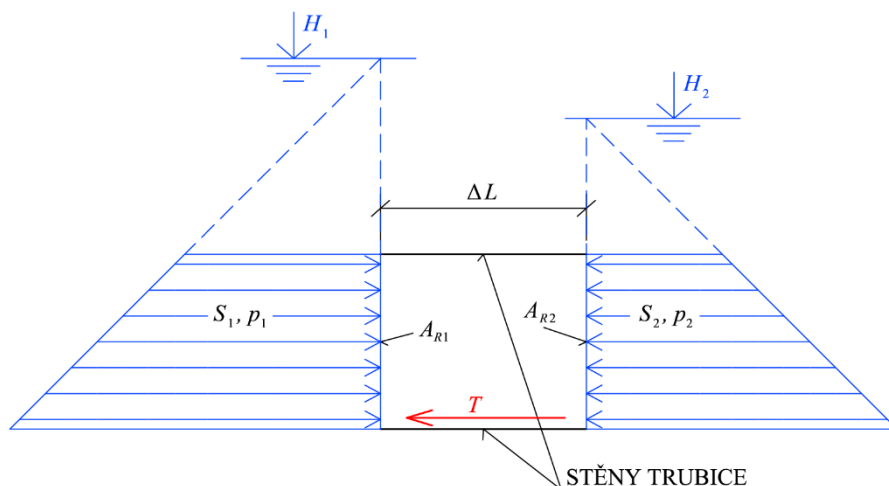
$$\frac{H_1 - H_2}{\Delta L} \frac{A}{O} \rho_w g = \tau \quad [\text{Pa}], \quad (5.23)$$

kde A ... průtočná plocha průsakové cesty [m^2],
 g ... tíhové zrychlení [m/s^2],
 H_1 ... piezometrická výška před elementem [m],
 H_2 ... piezometrická výška za elementem [m],
 O ... omočený obvod [m],
 ΔL ... délka elementu [m],
 ρ_w ... hustota vody [kg/m^3],
 τ ... tečné napětí vyvolané proudící vodou [Pa].

Po konečném zjednodušení platí:

$$\tau = \rho_w g R J \quad [\text{Pa}], \quad (5.24)$$

kde g ... tíhové zrychlení [m/s^2],
 J ... hydraulický gradient [-],
 R ... hydraulický poloměr [m],
 ρ_w ... hustota vody [kg/m^3],
 τ ... tečné napětí vyvolané proudící vodou [Pa].



Obr. 5.5 Odvození tečného napětí působícího na stěny průsakové cesty

Následně je třeba stanovit kritické tečné napětí materiálu v průsakové cestě τ_c . Dle Robbinse a van Beek (2017) je možné pro stanovení použít diagram Shieldse (1936). V závěru se pak stanoví koeficient eroze. V práci byl použit postup ukázaný v obr. 5.4.

5.5 Výčet sledovaných veličin

Z provedených rozborů byl sestaven všeobecný seznam sledovaných veličin pro tuto práci. Tyto veličiny byly měřeny, příp. odvozovány ať už během experimentu, či ve fázi vyhodnocování a byly později diskutovány a porovnávány:

1. piezometrické výšky H [m],
2. gradient piezometrické výšky $\text{grad } H = J$ [-],
3. kritický hydraulický gradient J_c (střední a na čele průsakové cesty),
4. pórovitost materiálu n ,
5. hydraulická vodivost vzorku k ,
6. kritické tečné napětí τ_c ,
7. tečné napětí vyvolané proudící vodou τ ,
8. délka průsakové cesty L_{cesta} [m],
9. koeficient eroze C_e ,
10. erodovaný objem V_{er} [m³],
11. erodovaná hmotnost m_{er} [kg],
12. rychlost zpětné a boční eroze ($\dot{\epsilon}_z$ a $\dot{\epsilon}_{boč}$).

Většina sledovaných veličin je závislá na typu testovaného materiálu (zrnitost, tvar a hustota zrn atd.) nebo na hydraulických podmínkách na čele průsakové cesty, příp. přímo v ní.

6. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

V rámci práce byl proveden experimentální výzkum v oblasti vývoje průsakové cesty v malém měřítku. Před započítáním vlastních experimentů byl nejdříve sestaven jejich plán, ve kterém byly specifikovány testované materiály a počty experimentů. Současně bylo vyvinuto nové měřicí zařízení, byla sestavena metodika měření a byly stanoveny fyzikální charakteristiky materiálů vybraných pro experimenty. Po provedení experimentů následovala fáze vyhodnocení získaných dat a diskuse výsledků.

6.1 Plán experimentů

V plánu byly specifikovány materiály a celkové počty experimentů. Důraz byl kladen zvláště na různé hutnění připravených vzorků za účelem vyšetření vlivu pórovitosti na výsledky. Jako materiál pro experimenty byl zvolen písek z Bzenecké pískovny a skleněné kuličky. Písek byl zvolen vzhledem k jeho dostupnosti a ke známým fyzikálním vlastnostem. Později byly z písku vyloučeny frakce $< 0,25$ mm a posléze i frakce > 1 mm pro vyšetření vlivu stejnozrnnosti na výsledky experimentu. Skleněné kuličky byly použity pro testování zcela stejnozrnného materiálu s kulovými zrny. Materiálové charakteristiky písku i skleněných kuliček obsahuje kapitola 6.2. Celkové počty experimentů obsahuje tab. 6.1. Každý materiál byl označen identifikátorem pro snadnější orientaci v datech.

Tab. 6.1 Plán experimentů

Identifikátor materiálu	Materiál	Pórovitost materiálu n [-]		Počet experimentů
		Min.	Max.	
B_0-2	Bzenec 0-2 mm	0,286	0,381	26
B_0,25-2	Bzenec 0,25-2 mm	0,319	0,341	8
B_0,25-1	Bzenec 0,25-1 mm	0,331	0,346	8
SK_0,2	Skleněné kuličky $d = 0,2$ mm	0,360		1
SK_0,5	Skleněné kuličky $d = 0,5$ mm	0,364	0,370	3

6.2 Stanovení fyzikálních vlastností materiálů

V rámci stanovení fyzikálních vlastností testovaných materiálů byla primárně sledována jejich zrnitost, číslo nestejnozrnnosti a měrná hmotnost zrn. Dále bylo možné odhadem stanovit tvar zrn, kdy skleněné kuličky měly přesně kulový tvar, bzenecký písek měl zrna méně kulovitá, zaoblená.

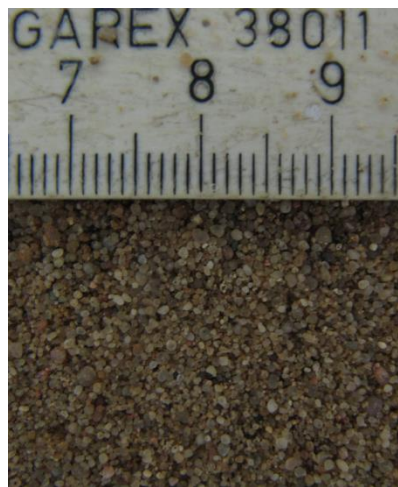
6.2.1 Použité materiály

Pro testování použitelnosti navrženého měřicího zařízení a pro stanovení metodiky přípravy vzorku byl použit materiál Bzenec 0-2 mm. Po ověření funkčnosti a po dopracování metodiky byl materiál Bzenec 0-2 mm využit i pro experimenty uvedené v tab. 6.1. Dále

bylo provedeno několik testů na skleněných kuličkách o různých průměrech, aby bylo možné data porovnávat i vzhledem k velikosti a tvaru zrn. V pozdějších částech práce byly pro experimenty zvoleny i upravené materiály Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm. U každého z uvedených materiálů byly zjištěny jeho fyzikální vlastnosti (velikosti zrn, číslo nestejnozrnnosti a hustota zrn), které by mohly mít vliv na sledované veličiny charakterizující průběh eroze.

Bzenec 0-2 mm

Jedná se o těžný písek s velikostí zrn 0-2 mm (obr. 6.1) z bzenecké pískovny. Materiál byl zvolen jako výchozí, neboť se jednalo o přirozený materiál, který se v podloží může reálně vyskytovat.



Obr. 6.1 Materiál Bzenec 0-2 mm (Hala, 2020)

Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm

Jedná se o upravený písek Bzenec 0-2 mm, ze kterého byla vyloučena frakce $<0,25$ mm, případně i frakce >1 mm. Materiály byly zvoleny pro stanovení vlivu velikosti zrn a stejnozrnnosti na pórovitost, výsledné kritické hydraulické gradienty a na erozní parametry materiálů.

Skleněné kuličky

Skleněné kuličky byly použity pro testování zcela uniformního materiálu ($C_U \approx 1$), který se používá velmi často pro srovnávání výsledků. Konkrétně byly zkoumány skleněné kuličky o průměru 0,2 a 0,5 mm (obr. 6.2). Materiál se vyznačuje zcela kulatými hladkými zrny a podstatně menším úhlem vnitřního tření. Materiály byly dodány společností Ginzl, s. r. o., která pro materiály uvádí následující rozsahy velikostí zrn:

- skleněné kuličky 0,2 mm: 0,16-0,20 mm,
- skleněné kuličky 0,5 mm: 0,40-0,60 mm.



Obr. 6.2 Skleněné kuličky: vlevo – 0,2 mm, vpravo – 0,5 mm (Hala, 2020)

Vzhledem k daným rozsahům velikostí zrn bylo provedeno ruční měření velikostí zrn na daném počtu kuliček (viz kapitola 6.2.2.3).

6.2.2 Zrnitost použitých materiálů

Distribuce velikosti zrn je jedním ze základních fyzikálních parametrů zemin a je standardně vyjadřována pomocí křivky zrnitosti. Pro její sestavení byl použit postup uvedený v ČSN 72 1007. V případě skleněných kuliček postup nebylo možné provést z důvodu absence dostatečně přesných prosévacích sít. Proto bylo přistoupeno k ručnímu měření velikostí zrn na vybraných vzorcích.

Vzhledem k nedostatku materiálu bylo nutné materiál Bzenec 0-2 mm recyklovat a používat opakovaně. S tím se vázalo riziko, že v prvním nebo i druhém kole recyklace došlo během experimentů k vyplavování jemné frakce. Z toho důvodu byly u materiálu, který byl recyklován (tj. po 1. použití i po 2. použití) sestaveny kontrolní křivky zrnitosti, aby se ověřilo, zda k jevu dochází.

6.2.2.1 Použité vybavení

Pro stanovení křivek zrnitosti jednotlivých materiálů bylo použito následující vybavení Ústavu vodních staveb VUT FAST: sušička, tácy pro sušení, třepačka, normová síta dle ČSN ISO 3310-1 a ČSN ISO 3310-2, váha s citlivostí 0,1 g, digitální posuvné měřidlo (pouze pro měření skleněných kuliček).

Po prvních síťových rozbořech bylo zjištěno, že žádný materiál neobsahoval více než 10 % zrn menších než 0,063 mm, tudíž nebylo třeba provádět sedimentační zkoušku.

6.2.2.2 Postup měření u přírodních písků

V případě přírodních písků se postupovalo následovně:

1. Materiál byl vysušen v sušičce při teplotě 105 °C po dobu 24 h (obr. 6.3).
2. Po vysušení byl vzorek materiálu o hmotnosti cca 3 kg umístěn do sady sít (průměry ok 3,15; 2,5; 2; 1,6; 1; 0,63; 0,5; 0,25; 0,1 a 0,063 mm), která byla následně umístěna na třepačku (obr. 6.4).
3. Vzorek materiálu byl sadou sít proséván po dobu 20 min.
4. Hmotnosti zachycené na jednotlivých sítích byly zaznamenány do protokolu a byly vypočteny kumulativní propady materiálu.
5. Byla vynesena křivka zrnitosti.



Obr. 6.3 Sušička



Obr. 6.4 Třepačka

6.2.2.3 Postup měření u skleněných kuliček

V případě skleněných kuliček nebylo možné použít klasický síťový rozbor z důvodu zacpávání ok použitých sít a z důvodu příliš velkého rozsahu velikostí ok mezi dvěma sousedními sítí, kvůli kterému nebylo možné přesně stanovit zrnitost. Proto byl z každého materiálu odebrán vzorek zrn, jejichž rozměry se ručně změřily digitálním posuvným měřidlem:

1. Z materiálu bylo odebráno 100 zrn.
2. Každé zrno bylo změřeno posuvným měřidlem (obr. 6.5).
3. Měřené velikosti zrn byly seřazeny podle velikosti a byly vyneseny jako křivka zrnitosti.



Obr. 6.5 Digitální posuvné měřidlo

6.2.2.4 Výsledky

Následující kapitola popisuje výsledné zrnitostní křivky a přidružené parametry materiálů.

Křivky zrnitosti písků Bzenec

Pro materiál Bzenec 0-2 mm bylo provedeno celkem 5 prosévacích zkoušek. Pro recyklovaný materiál Bzenec 0-2 mm byly po 1. použití provedeny zkoušky 2. Po 2. použití již byla provedena pouze jedna zkouška. Pro materiál Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm bylo provedeno po dvou prosévacích zkouškách.

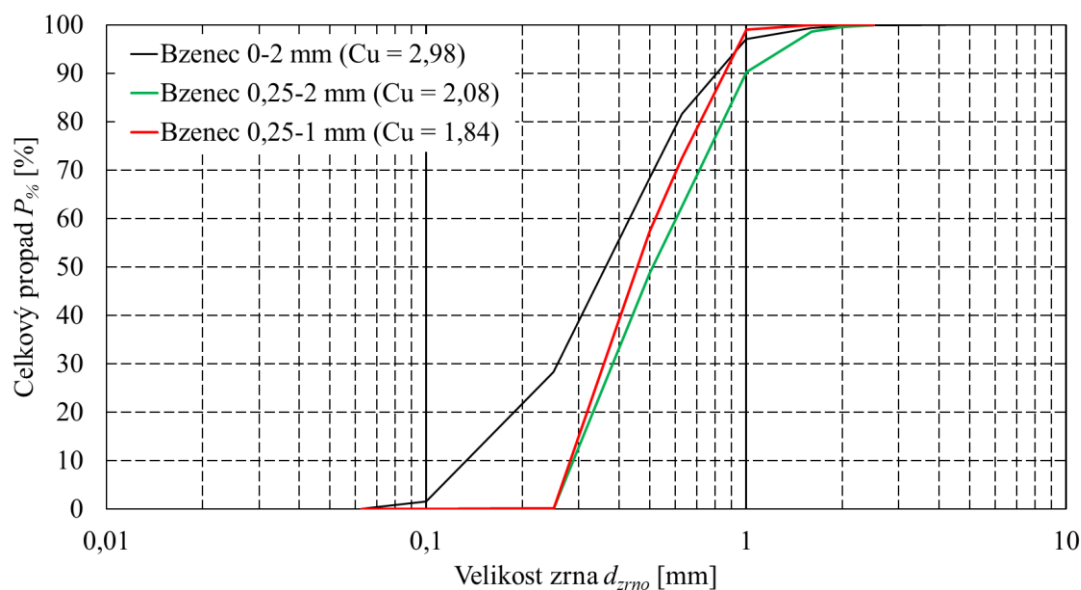
Porovnáním všech křivek zrnitosti materiálu Bzenec 0-2 mm bylo zjištěno, že k vyplavování jemné frakce buď prakticky nedochází nebo není zkouškou detekovatelné (procento jemné frakce f_n bylo přibližně 0,5 %). Dále bylo pozorováno, že sady sestavených křivek zrnitosti jsou si pro jednotlivé materiály tak blízké, že by se při vykreslení jako v obr. 6.6 v podstatě shodovaly. Proto byla z každé sady křivek vybrána právě jedna reprezentativní a ze stanovených hodnot velikostí zrn d_{10} , d_{17} , d_{50} , d_{60} , d_{max} ,

procentuálního zastoupení prachových částic f_n (pro $d < 0,063$) a čísla nestejnozrnnosti C_U dle:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} [-], \quad (6.1)$$

kde C_U ... číslo nestejnozrnnosti [-],
 d_{60} ... velikost zrna při 60% propadu [mm],
 d_{10} ... velikost zrna při 10% propadu [mm],

byly vypočteny průměrné hodnoty (tab. 6.2 a 6.3).



Obr. 6.6 Křivky zrnitosti písku Bzenec

Tab. 6.2 Charakteristiky testovaných přírodních materiálů – všechna měření

Materiál	Číslo měření	d_{10}	d_{17}	d_{50}	d_{60}	f_n	C_U
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[-]
Bzenec 0-2 mm	1	0,130	0,150	0,350	0,420	0,050	3,23
	2	0,130	0,150	0,350	0,420	0,070	3,23
	3	0,135	0,190	0,350	0,420	0,100	3,11
	4	0,150	0,160	0,350	0,420	0,040	2,80
	5	0,150	0,180	0,370	0,440	0,330	2,93
Bzenec 0-2 mm – kontrola po 1. použití	6	0,180	0,195	0,350	0,430	0,060	2,39
	7	0,140	0,150	0,340	0,410	0,460	2,93
Bzenec 0-2 mm – kontrola po 2. použití	8	0,125	0,150	0,330	0,400	0,470	3,20
Bzenec 0,25-2 mm	9	0,295	0,310	0,510	0,610	0,010	2,07
	10	0,295	0,310	0,510	0,615	0,000	2,08
Bzenec 0,25-1 mm	11	0,280	0,300	0,440	0,510	0,000	1,82
	12	0,280	0,300	0,440	0,520	0,020	1,86

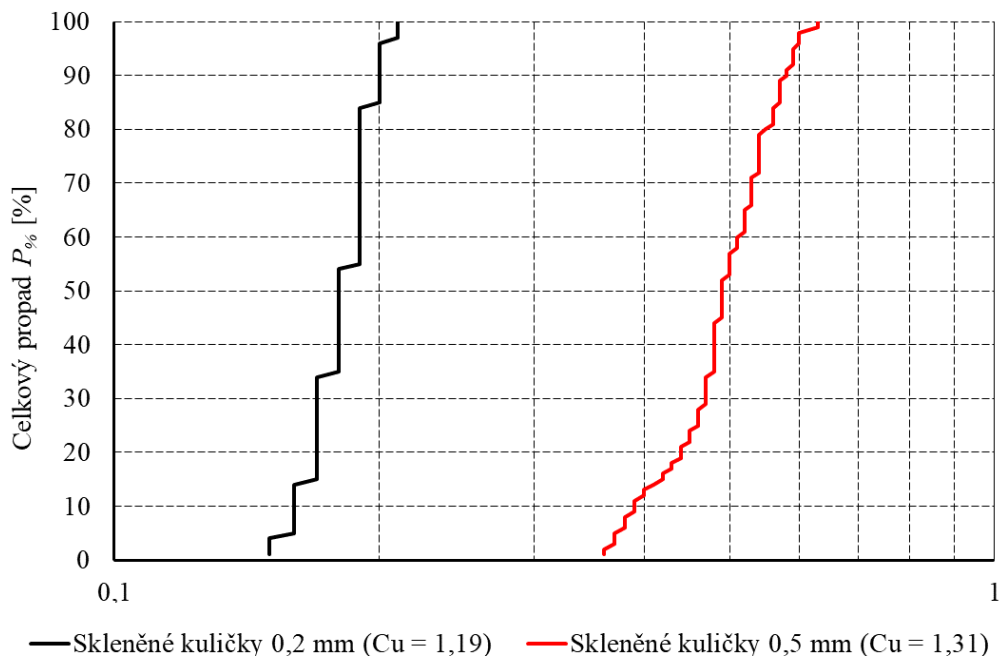
Tab. 6.3 Průměrné charakteristiky testovaných přírodních materiálů

Materiál	d_{10}	d_{17}	d_{50}	d_{60}	f_n	C_U
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[-]
Bzenec 0-2 mm	0,143	0,166	0,349	0,420	0,198	2,98
Bzenec 0.25-2 mm	0,295	0,310	0,510	0,613	0,005	2,08
Bzenec 0.25-1 mm	0,280	0,300	0,440	0,515	0,010	1,84

Z vypočtených čísel nestejnozrnnosti lze dojít k závěru, že všechny testované materiály byly stejnozrnné ($C_U < 5$).

Křivky zrnitosti skleněných kuliček

Křivky zrnitosti jsou uvedeny v obr. 6.7. Na jejich základě byly pro dané procentuální propady stanoveny velikosti zrn d_{10} , d_{17} , d_{50} , d_{60} a číslo nestejnozrnnosti C_U dle rovnice (6.1). Veškeré stanovené hodnoty shrnuje tab. 6.4.



Obr. 6.7 Křivky zrnitosti skleněných kuliček

Tab. 6.4 Průměrné charakteristiky testovaných skleněných kuliček

Materiál	d_{10}	d_{17}	d_{50}	d_{60}	f_n	C_U
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[-]
Skleněné kuličky 0,2 mm	0,16	0,17	0,18	0,19	0	1,19
Skleněné kuličky 0,5 mm	0,39	0,43	0,49	0,51	0	1,31

Ze stanovených čísel nestejnozrnnosti je patrné, že se jedná o stejnozrnné materiály ($C_U < 5$).

6.2.3 Měrná hmotnost zrn

Měrná hmotnost zrn je jednou ze základních fyzikálních vlastností zemin. Veličina byla stanovována pro umožnění výpočtu pórovitosti materiálů a pro stanovení vlivu hustoty zrn materiálu na sledované veličiny. Měřená data a zjednodušený postup byl převzat dle Haly (2020).

Stanovení proběhlo podle normy ČSN EN 1097-7 v laboratořích Ústavu vodního hospodářství krajiny VUT FAST.

6.2.3.1 Použité vybavení

Pro stanovení měrné hmotnosti zrn bylo potřeba následující vybavení: pyknometry (obr. 6.8), destilovaná voda o teplotě 20 °C, nálevka, váha s citlivostí 0,01 g, termostat pro udržování teploty 20 °C.

6.2.3.2 Postup měření

Postup stanovování měrné hmotnosti zrn proběhl podle následujících kroků:

1. Prázdný pyknometr byl naplněn destilovanou vodou o teplotě 20 °C a zvážen včetně zátky (m_{P2}). Následně byla voda odstraněna a pyknometr byl osušen.
2. Stejný prázdný pyknometr byl naplněn zeminou (cca 25 až 40 g) a zvážen (m_{P1}).
3. Pyknometr se zeminou byl doplněn destilovanou vodou o teplotě 20 °C a zemina byla důkladně promíchána pro vyloučení vzduchu.
4. Pyknometr byl umístěn do termostatu nastaveného na 20 °C na dobu 5 h.
5. Hladina v pyknometru byla doplněna destilovanou vodou, pyknometr byl zazátkován, osušen a zvážen (m_{P3}).
6. Byla stanovena měrná hmotnost zrn dle vztahu:

$$\rho_{zrn} = \frac{m_{P1}}{m_{P1} + m_{P2} - m_{P3}} [\text{kg}/\text{m}^3], \quad (6.2)$$

kde m_{P1} ... hmotnost pyknometru naplněného zeminou [kg],

m_{P2} ... hmotnost pyknometru naplněného destilovanou vodou [kg],

m_{P3} ... hmotnost pyknometru se zeminou a destilovanou vodou [kg].

6.2.3.3 Výsledky

Pro každý materiál bylo provedeno celkem 8 stanovení měrné hmotnosti zrn, která byla následně průměrována. Veškerá měřená data obsahuje tab. 6.5.



Obr. 6.8 Stanovování měrné hmotnosti zrn (Hala, 2020)

Tab. 6.5 Měřené měrné hmotnosti zrn a jejich průměrné hodnoty

Číslo měření	Měrná hmotnost zrn ρ_{zrn}		
	[kg/m ³]		
[-]	Skleněné kuličky 0,2 mm	Skleněné kuličky 0,5 mm	Bzenec
1	2489	2480	2643
2	2483	2478	2642
3	2479	2479	2638
4	2485	2475	2635
5	2483	2481	2637
6	2483	2482	2637
7	2485	2481	2637
8	2484	2483	2639
Průměr	2484	2480	2638

6.3 Vývoj měřicího zařízení

Následující kapitola obsahuje popis měřicího zařízení navrženého a sestaveného za účelem výzkumu v disertační práci. V roce 2019 byla dokumentace zařízení podána na Úřad průmyslového vlastnictví ČR pro zapsání průmyslového vzoru (zapsán ke dni 30. 12. 2019 – viz příložené CD). Popis je doplněn o fotodokumentaci jednotlivých částí zařízení, výkresová dokumentace je obsažena v přílohách 1 až 5.

6.3.1 Volba měřítka experimentu

Obecně jsou výsledky každého experimentu ovlivněny měřítkem, které lze vyjádřit např. jako poměr rozměrů zařízení k maximální velikosti zrn testovaného materiálu. Volba

měřítka také ovlivňuje získané výsledky experimentu. Obecně lze volit mezi následujícími měřítky:

- mikroskopické – řeší zatížení jednotlivých zrn a jejich pohyb,
- malé měřítko – řeší problém transportu malých elementů materiálu, nikoliv však pouze jednotlivá zrna, v malém měřicím zařízení,
- střední měřítko – řeší transport středně velkých množství materiálů ve větším zařízení (podle získaných informací ze společnosti Deltares v Nizozemsku se může jednat o zařízení až 10× větší oproti zařízení malého měřítka),
- velké měřítko/skutečnost – řešení problému na skutečném vodním díle nebo na modelu blízkém skutečnosti (prototypu).

Pro možnost uplatnění modelu je pak nutné provést stejné experimenty na více modelových měřítkách, aby bylo možné data porovnat, zjistit vliv měřítka a data dále extrapolovat na skutečnou velikost, resp. aplikovat model na vodní dílo.

Vzhledem k rozsahu této disertační práce a vzhledem k prostorovým i technickým možnostem na LVV VUT FAST bylo zvoleno **malé modelové měřítko**.

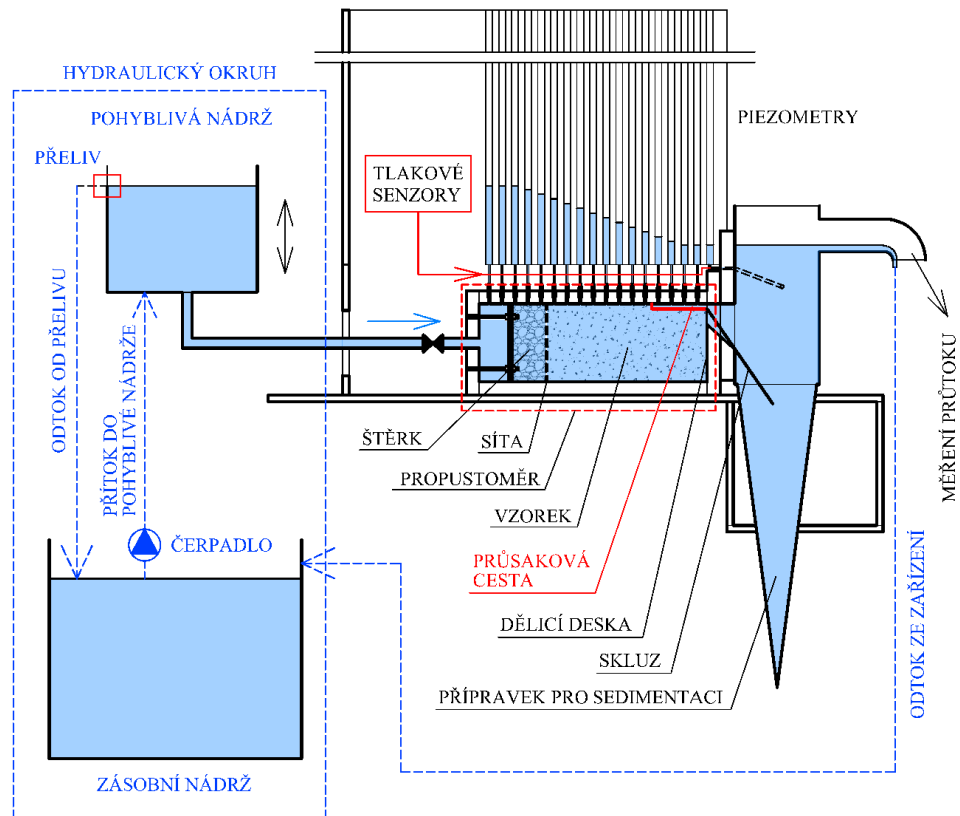
6.3.2 Ideový návrh měřicího zařízení

V první fázi vývoje bylo sestaveno celkové schéma zařízení (obr. 6.9 a příloha 1) obsahující obecné popisy jeho částí. Dále byly na základě požadavků na použité materiály odvozeny rozměry jednotlivých částí (i s ohledem na jednoduchou manipulaci). Zařízení bylo vyrobeno včetně tabule pro měření piezometrických výšek při provádění experimentu. Později bylo zařízení doplněno o tlakové snímače pro čtení piezometrických výšek a automatické měření průtoku vody, které experiment usnadňovaly zejména v jeho závěrečné fázi (viz kapitoly 6.5.1.6 a 6.5.1.7).

6.3.3 Popis měřicího zařízení

Měřicí zařízení pro výzkum vzniku a vývoje privilegované průsakové cesty sestává ze tří hlavních částí:

1. propustoměr,
2. přípravek pro sedimentaci erodovaného materiálu,
3. hydraulický okruh.

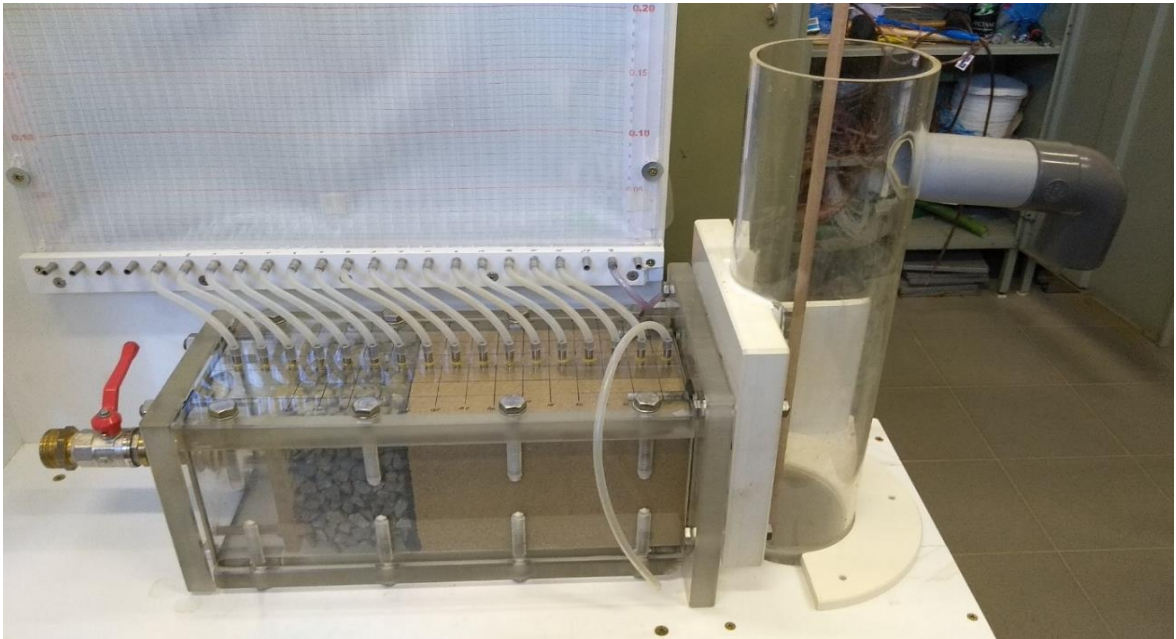


Obr. 6.9 Celkové schéma měřicího zařízení

V propustoměru je umístěn testovaný vzorek materiálu společně se štěrkem zajišťujícím rovnoměrné rozdělení proudu, a sadou sít s textiliemi pro oddělení těchto dvou materiálů (pro zabránění sufoze). Na straně odtoku ze zařízení je ve vzorku předdefinována průsaková cesta, jejíž inicializace a vývoj byly předmětem experimentu. V horní stěně zařízení je v jeho ose zřízeno 17 piezometrů pro sledování piezometrických výšek (a po přepočtu též hydraulických gradientů) v předpokládané trase vývoje průsakové cesty. Propustoměr je ze strany odtoku přes dělicí desku napojen na přípravek pro sedimentaci se skluzem, pomocí kterého je možné sledovat erodované množství materiálu v čase. Přípravek také slouží pro definování dolní okrajové podmínky proudění vody ve vzorku zeminy. Skutečné provedení zařízení ukazuje obr. 6.10.

6.3.3.1 Propustoměr

Propustoměr se skládá z těla, z čelní desky na nátoku a z čelní desky na výtoku. Každá čelní deska je s tělem spojena pomocí čtyř šroubů. Těsnost spojení je zajištěna pryžovým těsněním tl. 2 mm.

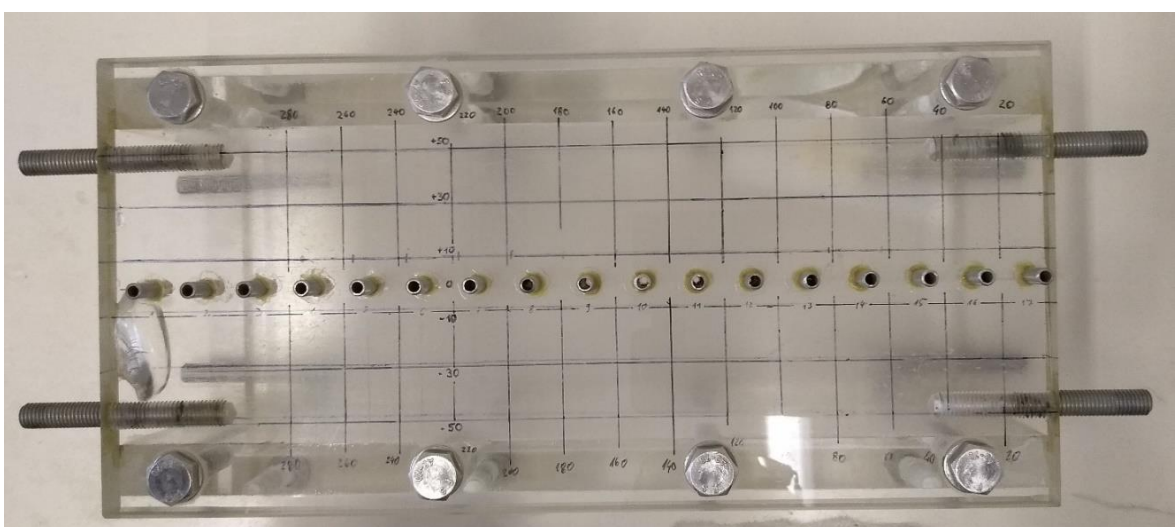


Obr. 6.10 Skutečné provedení měřicího zařízení (bez napojení na hydraulický okruh)

Tělo propustoměru

Tělo propustoměru je vyrobeno z transparentního polykarbonátu tl. 20 mm. Vnitřní rozměry těla jsou $120 \times 120 \times 350$ mm. Stěny zařízení jsou spojeny lepidlem a nerezovými šrouby. V horní stěně těla je po 20 mm zřízeno celkem 17 vývodů pro piezometry. Výkres těla propustoměru obsahuje příloha 2.

Pro zaznamenávání vývoje průsakové cesty je na horní desku těla propustoměru doplněna mřížka o rozměrech 20×20 mm. Podélná osa mřížky je vedená osou piezometrů, nula na podélné ose odpovídá pravému okraji těla propustoměru (obr. 6.11).



Obr. 6.11 Tělo propustoměru a mřížka na jeho horní desce

Čelní deska na nátok do zařízení

Čelní deska na nátok byla vyrobena z polykarbonátu tl. 20 mm o rozměrech 170 × 170 mm. Do středu desky je připojeno potrubí s uzávěrem DN 3/4“ zakončené závitem pro napojení zařízení na hydraulický okruh. Na druhé straně čelní desky je připojena děrovaná deska zajišťující rovnoměrnost proudu (rozměry 117 × 117 mm, tl. 10 mm, otvory o průměru 5 mm). Desky jsou od sebe odsazeny o 50 mm pomocí závitové tyče s matkami. Výkres čelní desky na nátok do zařízení ukazuje příloha 3, detailní fotografii ukazuje obr. 6.12.



Obr. 6.12 Čelní deska na nátok do zařízení

Čelní deska na výtoku ze zařízení

Čelní deska na výtoku byla vyrobena z polykarbonátu tl. 20 mm o rozměrech 223 × 196 mm. V desce byl vyříznut otvor pro odtok vody (rozměry 64 × 54 mm). Otvor je překryt plastovou destičkou (rozměry 120 × 120 mm, tl. 2 mm, spojení pomocí silikonu) s přesně vyřezaným půlkruhovým otvorem (průměr 12 mm). Pomocí tohoto menšího otvoru je v testovaném vzorku vytvářena předdefinovaná průsaková cesta. Též tudy dochází k odnosu materiálu do přípravku pro sedimentaci (spojení obou částí čtyřmi nerezovými šrouby). Výkres čelní desky na odtoku ze zařízení ukazuje příloha 4, detailní fotografii ukazuje obr. 6.13.



Obr. 6.13 Čelní deska na výtoku ze zařízení

6.3.3.2 Přípravek pro sedimentaci

Přípravek pro sedimentaci byl vytvořen z plastového Imhoffova kužele, plastového válce (DN 110 mm, výška válce 400 mm) a PVC dělicí desky (rozměry 242 × 223 mm, tl. 30 mm). V horní části plastového válce je zřízen odtok ze zařízení pomocí přepadu a krátkého potrubí DN 50 mm. Na stěně přípravku je zřízen vývod pro piezometr. Hladina vody v přípravku určuje dolní okrajovou podmínku pro proudění vody vzorkem. Výkres přípravku pro sedimentaci ukazuje příloha 5, detailní fotografii ukazuje obr. 6.14.



Obr. 6.14 Přípravek pro sedimentaci

6.3.3.3 Hydraulický okruh

Přítok vody do zařízení je zajištěn pomocí potrubí připojeného k malé vertikálně pohyblivé nádrži (pohyb pomocí kladky). V nádrži je udržována stálá hladina a přebytečná voda přepadá bezpečnostním přelivem zpět do zásobní nádrže. Z pohyblivé nádrže je vedena hadice, která je připojena k samotnému měřicímu zařízení. Postupným zvyšováním polohy nádrže lze v průběhu experimentu zvyšovat piezometrickou výšku na návodní straně zařízení, resp. hydraulický gradient. Voda je do nádrže dodávána ze zásobní nádrže pomocí čerpadla. Hydraulický okruh ukazují obr. 6.9, 6.15 a 6.16.



Obr. 6.15 Hydraulický okruh v LVV VUT FAST)



Obr. 6.16 Zásobní nádrž v LVV VUT FAST

6.4 Metodika experimentu

Experiment byl rozdělen na část přípravy zařízení a vzorku, a na část provedení experimentu. Následující kapitoly podrobně popisují veškeré kroky provedené v jednotlivých částech včetně rovnic potřebných pro vyhodnocení vlastností vzorku a průběhu experimentu.

6.4.1 Příprava zařízení a vzorku

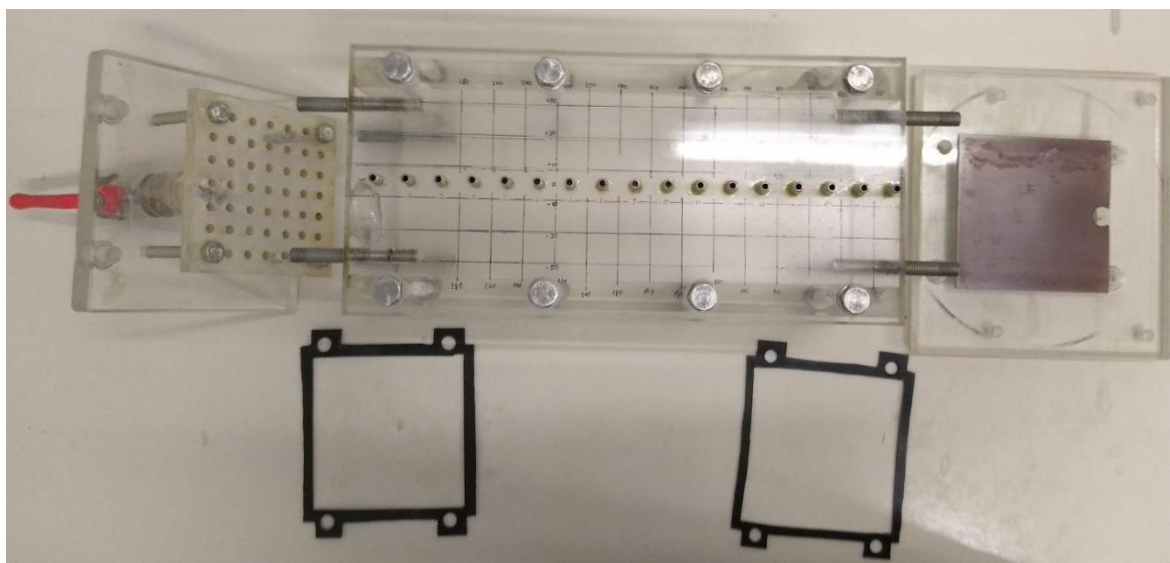
Nejprve bylo připraveno měřicí zařízení, do kterého byl umístěn vzorek. Následně byla stanovena pórovitost materiálu a zařízení bylo připojeno ke zdroji vody. Použité vybavení a dílčí kroky popisují následující kapitoly.

6.4.1.1 Použité vybavení

Pro část přípravy zařízení a laboratorního vzorku bylo použito následující vybavení: měřicí zařízení (propustoměr, přípravek pro sedimentaci, těsnění dílů), nástroje pro montáž zařízení a přípravu vzorku (klíče, lopatka, stopky atp.), ucpávky piezometrů, podložka pod propustoměr, digitální váha, třepačka, kovová síta a textilie, šterk, kovová trubička pro vytvoření průsakové cesty, silikonové hadičky pro připojení piezometrů ke čtecí tabuli a záznamník experimentu.

Měřicí zařízení (propustoměr, přípravek pro sedimentaci a těsnění dílů)

Díly měřicího zařízení (obr. 6.17) byly popsány v předchozí kapitole. Pro těsnění dílů zařízení bylo použito gumové těsnění tloušťky 2 mm. Tvar těsnění ukazuje příloha 3.



Obr. 6.17 Rozložené měřicí zařízení

Ucpávky piezometrů

Pro zabránění vysypání materiálu přes vývody piezometrů při plnění a hutnění byly použity dřevěné ucpávky piezometrů, které se do piezometrů zasunuly a zevnitř zastříhly.

Podložka pod propustoměr

Podložka pod propustoměr sloužila pro zabránění vysypání materiálu ze zařízení a jako výplň otvoru v čelní desce na výtoku ze zařízení. Podložka byla tvořena voděodolnou lepenou překližkou tloušťky 20 mm se záslepkou pro otvor v čelní desce (obr. 6.18).



Obr. 6.18 Podložka pod propustoměr

Digitální váha

Pro vážení materiálu byla použita digitální váha s citlivostí měření 0,1 g (obr. 6.19).

Přípravky pro zarovnání povrchu materiálu

Pro zarovnání povrchu materiálu do roviny během a po hutnění byly použity dva přípravky. První tvořila plastová deska tloušťky 20 mm o rozměrech 120 × 120 mm s připojenou závitovou tyčí s madlem. Přípravek též sloužil pro dodání dalšího tlaku shora při vibrování materiálu a k zabránění ztrát materiálu při vibrování. Druhý přípravek byl tvořen plastovou deskou o rozměru 120 × 250 × 10 mm s otvorem pro uchopení a sloužil k finálnímu zarovnání materiálu.



Obr. 6.19 Váha použitá při práci v laboratoři

Kovová síta a textilie

Pro zabránění a promísení testovaného materiálu se štěrskem byla použita sada kovových sít a textilií. Konkrétně se jednalo o tři hrubá síta s velikostí ok 2 mm, jedno jemné síto s velikostí ok 0,2 mm a hrubou textilií pro zabránění prosypání jemného materiálu podél stěn propustoměru (obr. 6.20).



Obr. 6.20 Rozložená sada sít a textilie

Štěrsk

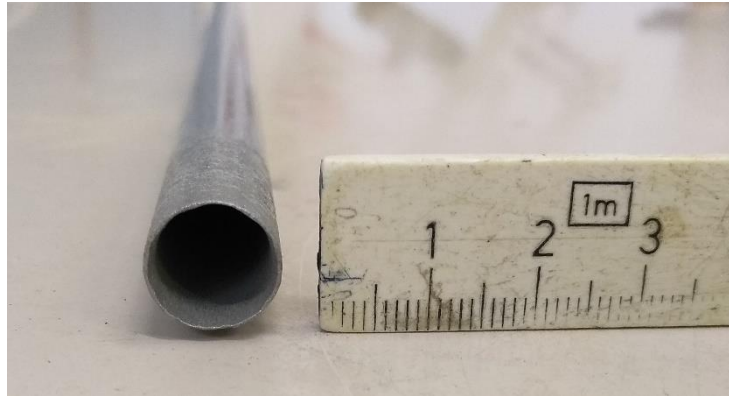
Pro zajištění rovnoměrného rozdělení proudu vody na nátok do vzorku byl použit štěrsk o velikosti 0,5 až 1,5 cm ve vrstvě 5 až 7 cm (obr. 6.21). Vzhledem ke značným rozdílům v zrnitosti štěrsku a testovaného materiálu bylo třeba použít výše popsaná oddělovací síta s textilií po obvodu.



Obr. 6.21 Štěrsk použitý pro zajištění rovnoměrného rozdělení proudu

Kovová trubička

Pro předdefinování privilegované průsakové cesty byla použita kovová trubička o vnějším průměru 12 mm a délky 1 m. Aby nedocházelo k nežádoucímu vtlačování materiálu do stěn průsakové cesty, byl konec trubičky zabroušen (obr. 6.22). Tím se snadněji materiál ze vzorku „vyřízl“.



Obr. 6.22 Kovová trubička použitá k vytvoření privilegované průsakové cesty

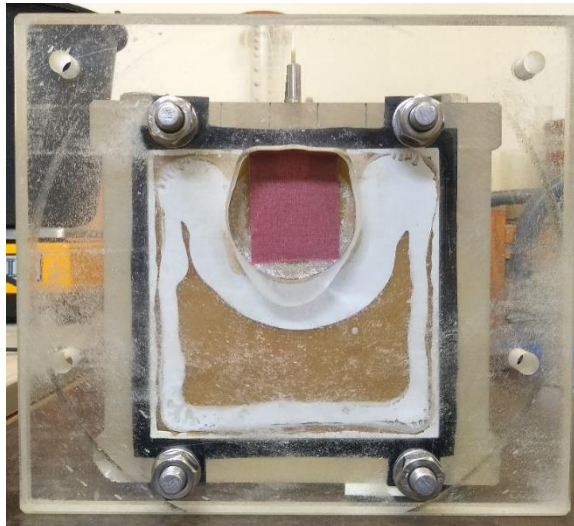
Zápisník experimentu

Veškerá data v průběhu experimentu byla zaznamenávána do předem připraveného zápisníku. Zápisník sestával z tabulek a poznámkových částí, do kterých se zaznamenávala data o použitém materiálu, pórovitosti materiálu, odečtených piezometrických výškách, vlastnostech tlakových senzorů, odečtených erodovaných množstvích, teplotách apod. Zápisník experimentu je přiložen na CD nosiči.

6.4.1.2 Postup

Příprava zařízení byla provedena v následujících krocích:

1. Na odtokovou stranu propustoměru byla připevněna čelní deska.
2. Pomocí ucpávek byly utěsněny piezometry a ucpávky byly zastříženy.
3. Otvor v desce na odtoku byl přelepen lepicí páskou (obr. 6.23).
4. Sestava byla otočena do vertikální polohy a umístěna na podložku.



Obr. 6.23 Příprava propustoměru – část 1

Příprava vzorku probíhala podle následujícího postupu:

1. Větší, než potřebné množství vysušeného testovaného materiálu se nasypalo do kbelíku, který se poté zvážil.
2. Materiál se pomocí lopatky vsypal do připraveného propustoměru a nádoba se zbývajícím materiálem se opět zvážila.
3. Stanovila se hmotnost vzorku v propustoměru:

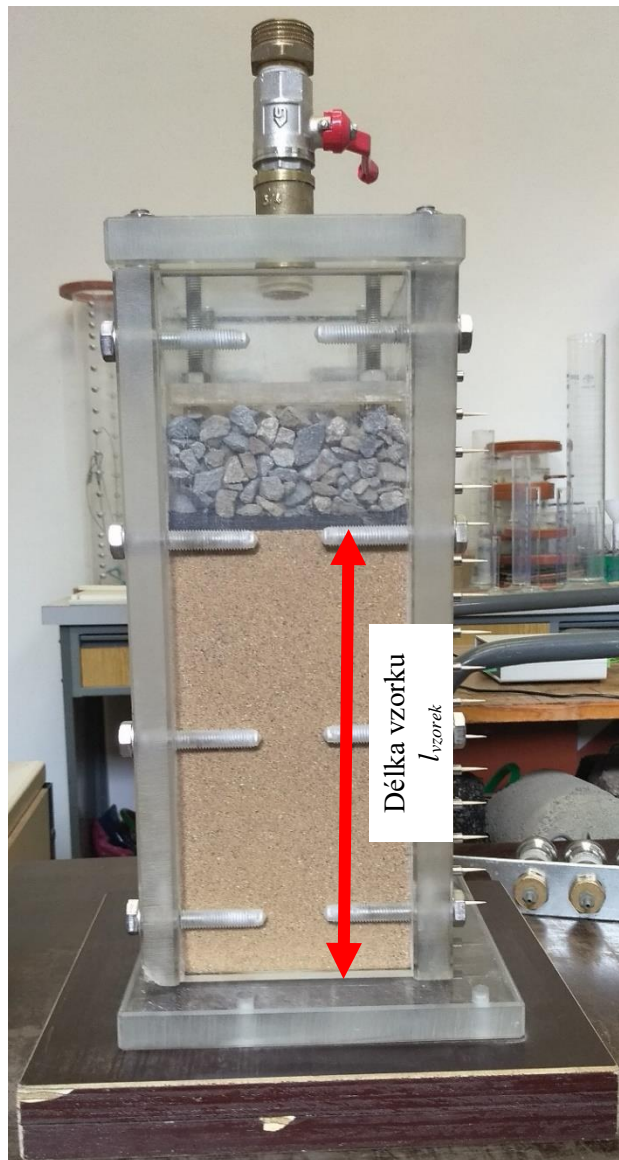
$$m_{vzorek} = m_{poč.} - m_{konc.} \text{ [kg]}, \quad (6.3)$$

kde $m_{konc.}$... hmotnost kbelíku se zbývajícím materiálem [kg],

$m_{poč.}$... hmotnost kbelíku s testovaným materiálem [kg],

m_{vzorek} ... hmotnost vzorku v propustoměru [kg].

4. Jelikož bylo snahou vyjádřit erodibilitu a další sledované parametry ve vazbě na pórovitost, byl zde požadavek na různé míry zhutnění vzorku. V závislosti na požadované pórovitosti se provedlo hutnění na vibračním stole po předem stanovenou dobu dle požadované pórovitosti (20 až 60 s).
5. Vzorek byl zarovnan do roviny pomocí speciálních přípravků.
6. Byla sestavena sada sít s textilií, která byla následně umístěna na horní povrch vzorku.
7. Na sadu sít byla umístěna vrstva šterku v tloušťce 5 až 7 cm.
8. K propustoměru byla připevněna druhá čelní deska a celý přístroj byl tak uzavřen (obr. 6.24).



Obr. 6.24 Příprava vzorku – sestavený propustoměr

9. Byla změřena délka vzorku l_{vzorek} .
10. Na základě známých rozměrů propustoměru byla stanovena průřezová plocha propustoměru:

$$S_{prop} = a_{prop} * b_{prop} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.4)$$

kde a_{prop} , b_{prop} ... rozměry propustoměru [m],

$$a_{prop} = 0,12007 \text{ m}; b_{prop} = 0,12013 \text{ m},$$

S_{prop} ... průřezová plocha propustoměru [m²].

Pozn.: Rozměry a_{prop} a b_{prop} byly zjištěny posuvným měřidlem (10× každý rozměr) a zprůměrovány. Pro všechny provedené experimenty byly hodnoty a_{prop} a b_{prop} konstantní.

11. Byl stanoven objem vzorku dle:

$$V_{vzorek} = a_{prop} * b_{prop} * l_{vzorek} \text{ [m}^3\text{]}, \quad (6.5)$$

kde l_{vzorek} ... délka vzorku [m],
 V_{vzorek} ... objem vzorku [m³].

12. Na základě objemu vzorku a měrné hmotnosti zrn materiálu byl stanoven objem zrn a následně pórovitost materiálu:

$$V_{zrn} = \frac{m_{vzorek}}{\rho_{zrn}} \text{ [m}^3\text{]}, \quad (6.6)$$

$$n = \frac{V_{vzorek} - V_{zrn}}{V_{vzorek}} \text{ [-]}. \quad (6.7)$$

kde m_{vzorek} ... hmotnost materiálu v propustoměru [kg],
 n ... pórovitost materiálu [-],
 V_{vzorek} ... objem vzorku [m³],
 V_{zrn} ... objem zrn ve vzorku [m³],
 ρ_{zrn} ... měrná hmotnost zrn materiálu [kg/m³].

13. Propustoměr byl pomalu a opatrně otočen do vodorovné polohy (vč. podložky).

14. Podložka byla odstraněna.

15. Připravený kelímek na zachycení materiálu z průsakové cesty byl zvážen.

16. Kelímek byl přiložen k čelní desce na výtok a připraven pro zachycení materiálu, který se z otvoru začne sypat po odstranění lepicí pásky.

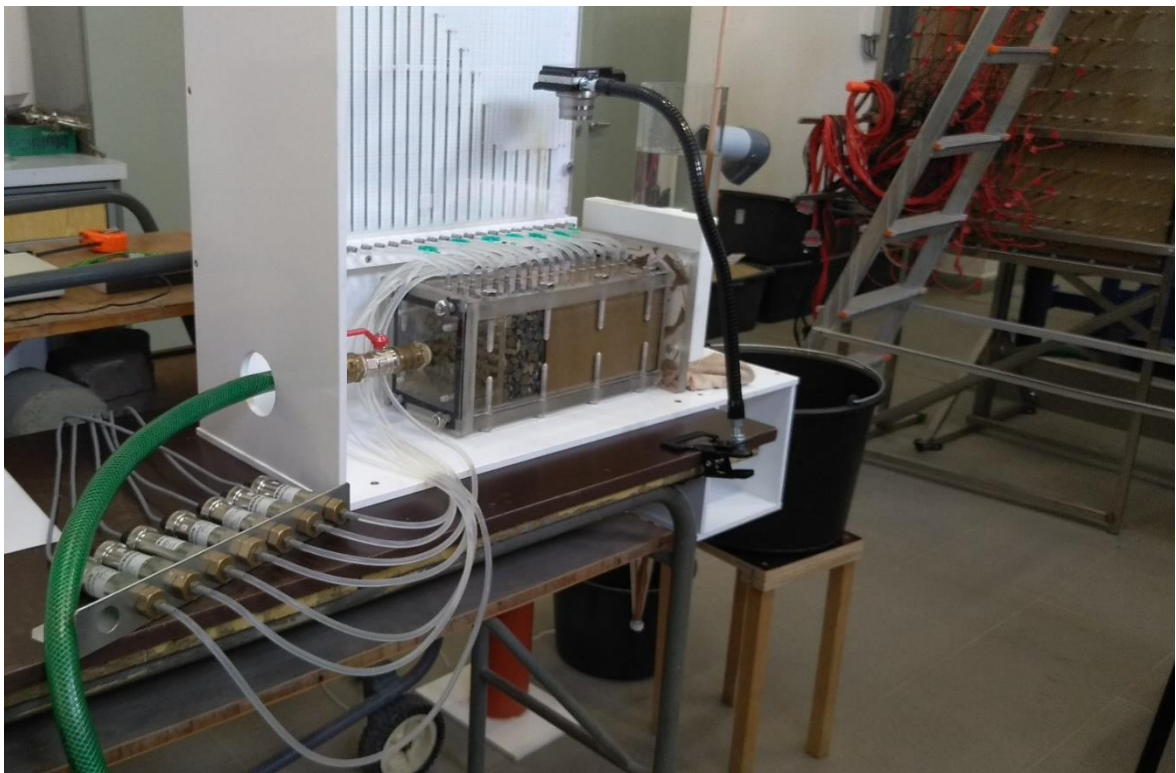
17. Pomocí kovové trubičky byla předdefinována privilegovaná průsaková cesta. Délka průsakové cesty byla zvolena v rozmezí 60 až 100 mm v závislosti na délce vzorku (cca 3/8 l_{vzorek}). Její délka byla stanovena pokusně v návaznosti na časovou náročnost celého experimentu (dostatečně krátká, aby byl shromážděn dostatek dat, ale ne tak krátká, aby celková doba do porušení vzorku byla delší než 10 hodin). Materiál takto odstraněný z propustoměru byl zachycen v plastovém kelímku, který byl poté opět zvážen.

18. Byla stanovena hmotnost odebraného materiálu dle:

$$m_{cesta} = m_{kel+cesta} - m_{kel} \text{ [kg]}, \quad (6.8)$$

kde m_{cesta} ... hmotnost odebraného materiálu [kg],
 $m_{kel + cesta}$... hmotnost kelímku včetně odebraného materiálu [kg],
 m_{kel} ... hmotnost kelímku [kg].

19. Byly zaznamenány rozměry předdefinované průsakové cesty. Její skutečná délka se v závislosti na délce vzorku lišila. Zároveň došlo k částečnému sesypání svahů průsakové cesty, a tudíž se lišila i její šířka (šířka měřena v příčných řezech po vzdálenostech 20 mm).
20. Propustoměr byl opatrně přemístěn na pracovní stůl uzpůsobený pro umístění přípravku pro sedimentaci.
21. Propustoměr byl připojen k přípravku pro sedimentaci.
22. Pomocí silikonových hadiček byly propojeny vývody piezometrů s tabulí pro čtení piezometrických výšek, příp. s tlakovými senzory (pomocí „T“ odboček). Hadičky vedoucí k tlakovým sensorům byly naplněny vodou.
23. K sedmi tlakovým sensorům byl připojen zdroj napětí a A/D převodník propojený s počítačem.
24. Válec určený pro měření větších průtoků byl připojen k poslednímu 8. senzoru a byl zčásti naplněn vodou (cca 10 cm nad vývod tak, aby byl zaplaven a senzor zaznamenával kladné hodnoty tlaku). Tímto posledním krokem bylo zařízení se vzorkem připraveno k provedení vlastního experimentu a měření (obr. 6.25).



Obr. 6.25 Připravené zařízení se vzorkem

6.4.2 Provedení experimentu

Měření sestávalo ze sycení vzorku, vlastního experimentu a průběžného monitorování průběhu zpětné a boční eroze pomocí kamer a senzorů. Potřebné vybavení a postup jednotlivých úkonů v průběhu měření jsou popsány v následujících podkapitolách.

6.4.2.1 Použité vybavení

Pro experiment bylo použito následující vybavení: měřicí zařízení, zdroj vody (hydraulický okruh), digitální fotoaparát s přípravkem pro uchycení (obr. 6.25), sada odměrných válců, dřevěný hranol pro zarovnávání povrchu odneseného materiálu, digitální váha, stopky pro zaznamenávání časů experimentu, sada tlakových senzorů, A/D převodník a záznamové zařízení (v PC), válec pro měření větších průtoků, zápisník experimentu.

Digitální fotoaparát s přípravkem pro uchycení

Vývoj eroze byl zaznamenáván na digitální fotoaparát. Pro uchycení záznamového zařízení byl použit flexibilní držák umožňující jeho přesné umístění (obr. 6.25).

Sada odměrných válců

Pro měření průtoku vody vzorkem byly použity skleněné odměrné válce Simax o objemech 25, 50, 100, 200, 500, 1000 a 2000 ml. Znalost průtoku byla později ve fázi vyhodnocení dat využita ke stanovování hydraulické vodivosti vzorku.

Dřevěný hranol pro zarovnávání povrchu odneseného materiálu

Při erozi materiálu docházelo k jeho ukládání v přípravku pro sedimentaci. Vzhledem k pomalému kupení materiálu spíše uprostřed přípravku nebylo možné provádět dostatečně přesné čtení odneseného množství. Proto byl pro jemné zarovnání materiálu uvnitř kužele použit tenký dřevěný hranol (průměr cca 10 mm, délka cca 0,5 m). Hranol byl po celou dobu provádění experimentu umístěn v naplněném přípravku pro sedimentaci, což zajistilo jeho nasáknutí vodou, čímž bylo eliminováno ovlivnění hladiny v přípravku ponořováním a vynořováním hranolu.

Sada tlakových senzorů

Vzhledem k intenzitě eroze v závěru měření nebylo možné provádět všechna čtení manuálně. Pro měření tlaků podél předpokládané průsakové cesty byly kromě čtení úrovní hladin v piezometrech použity též tlakové senzory. Jednalo se celkem o 7 senzorů o rozsahu tlaků 0 až 4 m v. s. Pro zaznamenání průtoků v závěrečné fázi byl použit senzor s rozsahem tlaků 0 až 1 m v. s. napojený na odměrný válec. Celkem tedy bylo využito

8 senzorů (obr. 6.26), pro které byly vyrobeny přechody umožňující připojení hadiček vedoucích od piezometrů. Přechod byl tvořen záslepkou potrubí průměru 3/4" s otvorem a vloženým plastovým kusem pro připojení hadičky. Sensory byly provedeny jako napěťové s výstupním rozsahem 0 až 10 V (analogový signál). Každý senzor pak požadoval připojení ke zdroji napětí 24 V/ 1 A (obr. 6.27). Výrobce senzorů je společnost BD Sensors. Vzhledem k finanční náročnosti na nákup senzorů a také s ohledem k omezeným možnostem A/D převodníku (obr. 6.28) nebylo možné použít více senzorů.

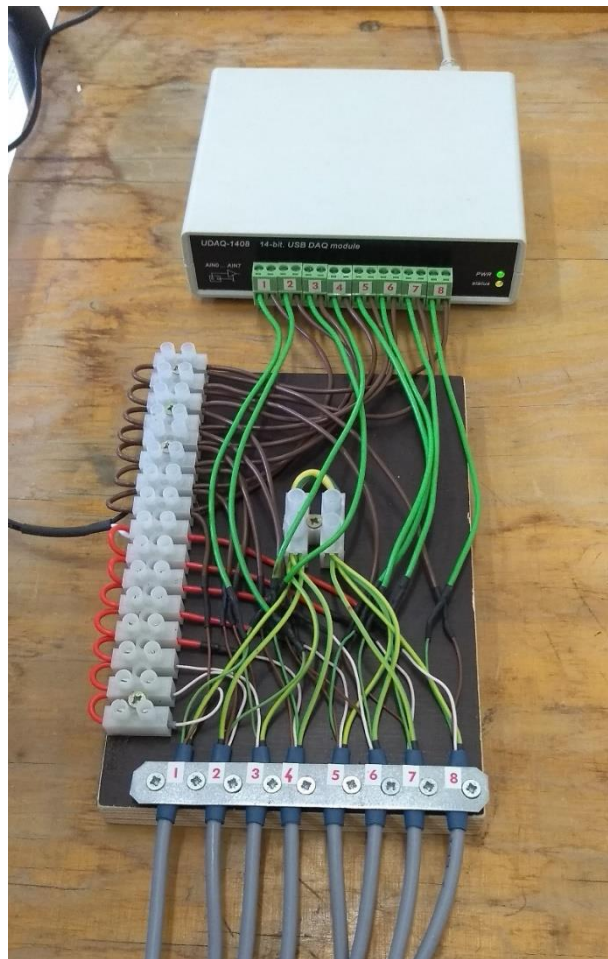


Obr. 6.26 Sensory pro měření tlaků podél průsakové cesty a větších průtoků

A/D převodník a záznamové zařízení

Použité tlakové senzory vysílají analogový signál 0 až 10 V, který bylo pro zaznamenání počítačem třeba převést na digitální. K tomu byl použit A/D převodník UDAQ-1408 od společnosti Tedia (obr. 6.28). Propojení A/D převodníku a počítače je u daného modelu řešeno pomocí USB kabelu.

Zpracování digitálního signálu z A/D převodníku bylo prováděno v počítači pomocí softwaru Recorder (dostupné přímo u společnosti Tedia). Software zaznamenával data podle předem nastavené frekvence a po ukončení nastaveného počtu měření exportoval data do zvoleného formátu. Pro univerzálnost použití však program zaznamenával pouze výstupní napětí ze senzorů, tedy interval 0 až 10 V, které bylo nutné přepočítat na tlak vody v jednotkách m v. s.



Obr. 6.27 Připojení tlakových senzorů ke zdroji napětí a k A/D převodníku



Obr. 6.28 A/D převodník (nahore – přední strana, dole – zadní strana)

Válec pro měření větších průtoků

Pro měření velkých průtoků a změn průtoku v závěru měření byl použit speciálně vyrobený válec (obr. 6.29) z plastového potrubí o průměru 103,7 mm a délky 1,05 m. Dno válce bylo tvořeno plastovou deskou o rozměrech 25 × 16 × 1 cm. Ve výšce 10 cm nade dnem byl umístěn vývod pro měření výšky vodního sloupce (8. tlakový senzor).



Obr. 6.29 Válec pro měření větších průtoků

6.4.2.2 *Postup měření*

Nejprve bylo zařízení připojeno k hydraulickému okruhu a vzorek byl nasycen vodou. Následovala fáze měření, během které byly sledované veličiny zaznamenávány, a to včetně vývoje průsakové cesty.

Postup připojení zařízení a sycení vzorku byl následující:

1. Zařízení bylo pomocí hadice připojeno k hydraulickému okruhu (obr. 6.9).
2. Čerpadlo v okruhu bylo zapnuto a horní pohyblivá nádrž byla naplněna vodou (stálá hladina v nádrži byla udržována pomocí přelivu). Pohyblivá nádrž byla ve fázi sycení zvednuta mírně nad úroveň výtoku ze zařízení (z důvodu hydraulických ztrát ve vzorku).
3. Uzávěr na nátok do zařízení byl mírně otevřen, čímž započala fáze sycení vzorku.
4. Než došlo k plnému nasycení vzorku, přípravek pro sedimentaci byl naplněn vodou až po spodní okraj otvoru na výtok z propustoměru.

5. Ve fázi plnění, kdy hladina vody ve vzorku dosahovala dna průsakové cesty, byla voda doplněna i ze strany výtoku přes přípravek pro sedimentaci. Důvodem bylo zabránění uvolňování zrn z předdefinované průsakové cesty snížením hydraulického gradientu.
6. Po úplném naplnění přípravku pro sedimentaci byl velmi pomalu otevírán uzávěr na nátok do zařízení. Tímto krokem bylo zařízení připraveno k fázi vlastního měření.

Fázi vlastního měření lze rozdělit na část před dosažením kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty, a na část po jeho dosažení nebo překročení, kdy docházelo k erozi průsakové cesty. Jednotlivé části jsou popsány v následujících podkapitolách.

Vlastní měření před dosažením kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty

Před dosažením kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty, resp. před počátkem eroze, probíhalo měření dle následujících kroků:

1. Spustilo se zaznamenávání hodnot odečítaných tlakovými senzory (přes A/D převodník do počítače s příslušným softwarem).
2. Spustil se záznam obrazu průsakové cesty na fotoaparátu.
3. Po nastavení výšky horní pohyblivé nádržky (polohy horní okrajové podmínky) se vyčkalo na ustálení proudění vzorkem (cca 10 až 15 min – dle pórovitosti vzorku).
4. Po ustálení proudění byly odečteny piezometrické výšky h_i .
5. Pomocí odměrného válce a stopek byl změřen objem vody protékající vzorkem v čase, z čehož byl stanoven průtok vzorkem dle:

$$Q = \frac{V_Q}{t_Q} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (6.9)$$

kde Q ... průtok vzorkem [m³/s],
 t_Q ... časový úsek pro měření průtoku vody [s],
 V_Q ... objem vody proteklé vzorkem za čas t_Q [m³].

Zároveň byla změřena teplota vody pro stanovení její hustoty a kinematické viskozity:

$$\rho_w = 0,00004T_w^3 - 0,0079T_w^2 + 0,0609T_w + 999,88 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (6.10)$$

$$\nu_w = \frac{1,79 \cdot 10^6}{1 + 0,0337T_w + 0,000221T_w^2} \text{ [m}^2\text{/s]}, \quad (6.11)$$

kde T_w ... teplota vody [$^{\circ}\text{C}$],

ν_w ... kinematická viskozita vody [$\text{m}^2\text{/s}$],

ρ_w ... hustota vody [kg/m^3].

Objem vody proteklé vzorkem V_Q byl stanoven na základě její váhy a známé hustoty vody ρ_w . Jednalo se tedy o stanovení průtoku hmotnostní metodou, která byla pro takovéto experimenty vyhodnocena jako přesnější a rychlejší.

6. Bylo průběžně kontrolováno, zda nedochází k erozi materiálu.
7. Horní hladina byla zvýšena a opět se čekalo na ustálení proudění a postup popsany v bodech 4. až 6. se opakoval.

Identifikace kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty

Jako kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty byla identifikována poslední zaznamenaná hodnota na čele průsakové cesty, při které ještě nedošlo k erozi (orientačně v závislosti na pórovitosti $J_c = 2$ až 4). Následně přešel experiment do následující části.

Vlastní měření po překročení kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty

Po překročení kritického hydraulického gradientu fáze měření probíhala dle následujícího postupu:

1. Průběžně byly zaznamenávány časy experimentu, kdy byla pozorována eroze.
2. Byl zaznamenán erodovaný objem v sedimentačním kuželi (zarovnání povrchu pomocí dřevěného hranolu). V závislosti na znalosti konečné hmotnosti erodovaného materiálu (po vysušení) a celkového erodovaného objemu na konci experimentu bylo možné stanovit střední objemovou hmotnost materiálu zachyceného v přípravku pro sedimentaci a zpětným přepočtem i kumulativní hmotnost erodovaného materiálu ve všech zaznamenaných časech:

$$\rho_{eroze} = \frac{m_{eroze,konc}}{V_{eroze,konc}} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (6.12)$$

$$m_{eroze} = \rho_{eroze} * V_{eroze} \text{ [kg]}, \quad (6.13)$$

- kde m_{eroze} ... kumulativní hmotnost erodovaného materiálu [kg],
 $m_{eroze,konc}$... hmotnost erodovaného materiálu na konci experimentu [kg],
 V_{eroze} ... kumulativní erodovaný objem v sedimentačním kuželi [m³],
 $V_{eroze,konc}$... erodovaný objem v přípravku pro sedimentaci na konci experimentu [m³],
 ρ_{eroze} ... střední objemová hmotnost materiálu v přípravku pro sedimentaci [kg/m³].

3. V této fázi experimentu mohou nastat dvě situace:

- a. eroze **neustane** a pokračuje až do úplného porušení vzorku, kdy se experiment po několika dalších vteřinách ukončí (zároveň docházelo k výraznému zvýšení průtoku, který byl měřen pomocí velkého odměrného válce s tlakovým senzorem);
- b. eroze **ustane** v důsledku blokace průsakové cesty (např. přeskupením zrn a vznikem klenbového účinku, zaklesnutím zrn) nebo v důsledku ustálení erozních podmínek. V tomto případě je odečítán objem erodovaného materiálu v čase, a to až do ustání eroze.

4. Po ustálení proudění byly odečteny piezometrické výšky h_i .

5. Hmotnostní metodou byl stanoven průtok vzorkem dle rovnic (6.9) a (6.10).

Zároveň byla změřena teplota vody pro stanovení její hustoty a kinematické viskozity dle rovnic (6.10) a (6.11).

6. Průběžně bylo kontrolováno, zda opět nedochází k erozi materiálu.

7. Horní hladina byla zvýšena a opět se čekalo na ustálení proudění a postup popsaný v bodech 4. až 6. se opakoval.

Průběžné monitorování během experimentu bylo prováděno pomocí fotoaparátu, který snímal horní stěnu propustoměru, tedy zaznamenával postup zpětné eroze v čase. Další úrovní sledování bylo provádění záznamu z tlakových senzorů příp. tlaku vody ve válci při měření větších průtoků. Průběžné časy experimentu, kdy byla prováděna jakákoliv činnost (při zvýšení polohy horní hladiny, měření průtoku, odečet piezometrů, odečet erodovaného množství atp.), byly zaznamenávány do stopek s dlouhým záznamem a zápisem do CSV.

6.4.3 Ukončení experimentu

Po celkovém porušení vzorku bylo vyčkáno několik dalších sekund pro zaznamenání zvětšování průsakové cesty. Následně byl průtok vody zastaven. Objem materiálu, který se postupně ukládal v přípravku pro sedimentaci, byl po uzavření přívodu vody odečten a tento materiál byl z přípravku vyjmut. Následně byl materiál zachycený v přípravku pro sedimentaci vysušen a zvážen ($m_{eroze,konc}$) pro stanovení jeho objemové hmotnosti při daném uložení během experimentu. Zbytek zařízení byl rozebrán a vyčištěn. Testovaný materiál byl vysušen.

6.4.4 Poznámky k použité metodice

V průběhu vývoje zařízení a metodiky měření byly pozorovány některé jevy, které mohly nepříznivě ovlivňovat výsledky experimentů. Postupnými úpravami metodiky byly jevy eliminovány nebo byl jejich vliv snížen na minimum, popř. byl efekt kvantifikován. Hlavní obtíže v průběhu sestavování metodiky experimentu jsou popsány níže.

Hutnění vzorku

Vzorek bylo možné hutnit jak po vrstvách, tak v celé jeho výšce, a to buď ručně, nebo pomocí vibračního stolu. Při ručním hutnění bylo možné použít čtvercové dusadlo, ale bylo nutné správně odhadnout tloušťku hutněné vrstvy (max. 40 mm). Dále bylo třeba kontrolovat pórovitost každé dílčí vrstvy dle rovnic (6.6) a (6.7) a pak celkovou pórovitost materiálu, zda nedochází k přílišným odchylkám pórovitostí vrstev od celkového průměru. Míra zhutnění závisela na požadavku na testovanou pórovitost. Prakticky byla pórovitost stanovovaná až z délky vzorku po hutnění (tj. pórovitost byla náhodná), a tudíž potřebnou dobu hutnění lze pouze odhadovat na základě předchozích zkušeností.

Nehutněné vzorky

Při přípravě nehutněných vzorků byl identifikován problém vytvoření mezery mezi horní stěnou zařízení a vzorkem. Tím by došlo ke znehodnocení výsledků v důsledku privilegovaného proudění právě touto mezerou. Problém nastal při otáčení zařízení s podložkou do vodorovné polohy. Proto byl vzorek vždy alespoň mírně zhutněn, aby se tento jev eliminoval. Dalším problémem nehutněného vzorku byla jeho malá odolnost vůči otřesům a problémy s vývojem průsakové cesty. Ta měla během zpětné eroze značně nahodilou dráhu mimo osu zařízení nebo i s několika rozvětvenými, tudíž nebylo možné dostatečně přesně stanovit piezometrické výšky. U hutněných vzorků k tomuto efektu nedocházelo.

Vložení sady sít a textilie mezi vzorek a štěrku

Původně byla použita pouze sada sít, která měla oddělovat vzorek od přisypané vrstvy štěrku a stabilizovat tak čelo vzorku. Po několika testech zařízení bylo zjištěno, že toto opatření je neúčinné a že dochází k prosypání vzorku podél stěn zařízení do štěrkové vrstvy, zejména v rozích. Tím docházelo k destabilizaci čela vzorku a ke změnám v pórovitosti právě v této oblasti. Také se vlivem odsypání zkrátil vzorek a tím se i zkrátila průsaková délka. Navíc mohlo dojít i k pohybu ostatních zrn a k vytvoření štěrbin pod horní stěnou zařízení, což by znehodnotilo výsledky experimentu. Proto byla k sadě sít přiložena i textilie, která zabránila prosypávání materiálu podél stěn i rohů zařízení. Upevnění sestavy na místě bylo provedeno pouze ručním dotlačením textilie do rohů zařízení.

Hydraulické ztráty na sítěch a textiliích

Hydraulické ztráty na sadě sít s textilií bylo možné částečně sledovat pomocí piezometrů. Z provedených pozorování bylo zjištěno, že hydraulické ztráty při provádění experimentu jsou v řádu milimetrů. Proto byl při stanovování hydraulické vodivosti brán v úvahu až piezometr, který se nacházel mimo vliv sít, tj. v pískové vrstvě.

Otočení zařízení do vodorovné polohy

Při otáčení zařízení do vodorovné polohy bylo třeba postupovat velmi pomalu a opatrně, aby otáčením nedošlo k dodatečnému „dohutnění“ vzorku a k vytvoření mezery mezi horní stěnou zařízení a vzorkem. Zvláště bylo třeba vyvarovat se otřesům zařízení, a to i během experimentování.

Odstranění speciální podložky a lepicí pásky

Při odstranění podložky a lepicí pásky bylo třeba postupovat opatrně z důvodu ztrát materiálu. Propustoměr je do této fáze zcela naplněn materiálem a po odstranění pásky se malá část materiálu (právě z místa kde bude v dalším kroku předdefinována průsaková cesta) vysype. Proto již předem musel být připraven kelímek na zachycený materiál. Při odstranění pásky bylo třeba uvažovat i s materiálem, který zůstal na ní zachycen.

Průměr a délka předdefinované průsakové cesty

Průměr předdefinované průsakové cesty byl dán vnějším průměrem použité trubice. Délka průsakové cesty byla vytvořena v závislosti na délce vzorku, tj. přibližně 3/8 délky vzorku. Tato vzdálenost byla odvozena experimentálně ve vazbě na dobu trvání experimentu. Při příliš krátké průsakové cestě by její budoucí trasa nebyla dostatečně pevně

definována a též by byl experiment příliš dlouhý. Zvolená délka předdefinované průsakové cesty zajišťuje experiment kratší než 10 hodin. Zároveň mělo být čelo průsakové cesty v místě pod piezometrem pro možnost měření piezometrické výšky přímo na čele průsakové cesty (tj. pro umožnění snadného odečtu největšího rozdílu piezometrických výšek). V každém experimentu byla délka předdefinované průsakové cesty jiná. Rozdílnost délek se však projevila pouze v době průběhu experimentu před porušením a nijak výsledky neovlivňovala.

Při předdefinování průsakové cesty byl odebraný materiál zachycen v kelímku a zvážen.

Dotvarování předdefinované průsakové cesty

Při vytváření předdefinované průsakové cesty docházelo vlivem místního sesuvu k deformaci stěn průsakové cesty. Skutečný tvar cesty byl zaznamenán do zápisníku experimentu. Sklony stěn průsakové cesty se po porovnání měřených šířek a hloubek cesty ustálily na úhlu shodném s úhlem vnitřního tření.

Umístění zařízení na pracovní stůl

Při umisťování zařízení na pracovní stůl bylo třeba dbát na to, aby nedošlo k otřesům zařízení, což by mohlo destabilizovat čelo vzorku na nátoku nebo narušit tvar připravené průsakové cesty. Průsaková cesta nebyla předdefinována přímo na pracovním stole z důvodu omezeného přístupu k výtokové části ze zařízení (viz obr. 6.9).

Plnění zařízení ze strany odtoku

Postup plnění zařízení ze strany odtoku výrazně urychlil celou fázi plnění. Tento postup byl možný až po plném nasycení vzorku. Při plnění bylo třeba postupovat velice pomalu a po malých dávkách vody. Při rychlém plnění mohlo dojít k rychlému nárůstu vertikálního hydraulického gradientu, který by způsobil vření částic v místě piezometrů což by ovlivnilo výsledky experimentu. V podstatě by ve vzorku pod piezometry vznikly kaverny. Vždy bylo třeba hladinu v přípravku pro sedimentaci udržovat **pod** úrovní vody u nátoku (byla prováděna kontrola pomocí piezometrů), aby nedošlo ke zpětnému proudění vzorkem.

Eroze materiálu na začátku experimentu

Při sycení vzorku došlo k mírnému vyplavování zrn uvolněných při vytváření průsakové cesty, a to v okamžiku dosažení plného nasycení a vývinu proudění průsakovou cestou. Jednalo se o materiál, který byl na povrchu průsakové cesty uvolněn při jejím vytváření. Erozi bylo zabráněno zvýšením hladiny v přípravku pro sedimentaci, čímž se snížil hydraulický gradient.

Časové omezení sledování experimentu

Sledování experimentu bylo časově omezeno pouze na relevantní hydraulické gradienty. Toto omezení vzniklo z důvodu velkého objemu dat, která v porovnání se závěrečnými fázemi pokusu nebyla příliš přínosná. Proto byla předem na základě dosažené pórovitosti materiálu odhadnuta hodnota kritického hydraulického gradientu, která byla snížena přibližně o 0,5 až 1,0. Při dosažení takto stanovené orientační hodnoty bylo započato s měřeními a jejich záznamem.

Stanovení hydraulické vodivosti

Z důvodu ovlivnění proudění průsakovou cestou nebylo možné stanovovat hydraulickou vodivost materiálu přímo na základě průtoku. Jev ovlivnění lze pozorovat na průběhu piezometrických výšek podél vzorku v příloze 7. Řešením bylo použití numerického modelu a jeho kalibrace s pomocí průběhů piezometrických výšek a průtoků.

6.5 Výsledky experimentů

Po provedení experimentů byla naměřená data zpracována a vyhodnocena. Na základě vyhodnocení sledovaných veličin byly hledány jejich vzájemné závislosti. Veličiny, které byly vyhodnocovány a jejichž vzájemné funkční závislosti byly hledány, byly následující:

- **průběhy piezometrických výšek** – z jejich hodnot byly mimo jiné určovány hodnoty hydraulických gradientů J ;
- **hydraulické gradienty** – z vypočtených hodnot byl ve vazbě na počátek zpětné eroze stanoven střední kritický gradient $J_{c,stř}$ a kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty J_c ;
- **střední kritický hydraulický gradient $J_{c,stř}$** – jeho hodnota sloužila k porovnání dat s ostatními autory a k vyšetření závislosti hodnot na dosažených pórovitostech;
- **kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty J_c** – jedná se o jednu z primárních veličin; pro veličinu byla vyšetřována funkční závislost na pórovitosti materiálu n , zrnitosti materiálu (na d_{10} , d_{17} , d_{50} , d_{60} a C_U) a na měrné hmotnosti zrn ρ_{zm} ;
- **hydraulická vodivost vzorku k** – zpětně byla dopočtena numerickým modelem;
- **hmotnost erodovaného materiálu (m_{er}) v čase;**

- **rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty $v_{čelo}$** – na základě vypočtených dat by bylo možné stanovit rychlosti zpětného postupu na reálných vodních dílech;
- **změny tvaru průsakové cesty** – vyhodnocená data sloužila jako podklad ke stanovení rychlosti eroze $\dot{\epsilon}$;
- **rychlost eroze $\dot{\epsilon}$** – průběhy rychlosti zpětné a boční eroze podél vzorku (i v čase) posloužily k identifikaci koeficientu eroze C_e , kritického tečného napětí τ_c a pro odvození vztahu pro výpočet rychlosti zpětné eroze na základě materiálových charakteristik a hydraulických podmínek;
- **koeficient eroze C_e** – posloužil jako ukazatel pro další výzkumné práce, jeho hodnoty však nebylo možné z důvodu nedostatku relevantní literatury porovnat;
- **kritické tečné napětí τ_c** – sloužilo jako ukazatel odolnosti materiálu proti inicializaci boční eroze.

6.5.1 Postup vyhodnocení dat z experimentů

Následující kapitoly podrobně popisují postup zpracování veškerých dat získaných z experimentů. Postupy zahrnují zpracování časů prováděných činností při experimentu, stanovení průběhů piezometrických výšek a hydraulických gradientů, stanovení kritického hydraulického gradientu a vliv charakteristik testovaného materiálu na kritický hydraulický gradient, stanovení hmotnosti erodovaného materiálu a jeho přírůstky v čase, stanovení piezometrických výšek pomocí tlakových senzorů, výpočet průtoku měřeného pomocí velkého odměrného válce s tlakovým senzorem, postup zpracování obrazových záznamů průsakové cesty, stanovení rychlosti zpětné a boční eroze, tečného napětí vyvolaného proudící vodou, kritického tečného napětí a koeficientu eroze.

6.5.1.1 Časy a délky činností prováděných při experimentu

Průběh experimentu a jednotlivé činnosti, jako např. měření průtoku, odečítání piezometrických výšek atd., byly zaznamenávány do záznamníku experimentu (viz příložené CD). Časy experimentu, ve kterých byly dané činnosti prováděny byly zaznamenány stopkami s možností zápisu času do CSV souboru. Data byla poté přenesena do souboru XLSX, kde byl zaznamenaný čas experimentu převeden na sekundy pro usnadnění odečtu časových úseků (průtok, doba mezi zvýšením horní hladiny a odečtu piezometrů atp.) a pro stanovení odečtu erodovaného množství (tab. 6.6).

Tab. 6.6 Příklad zpracování časů a délek činností při experimentu

Výstup stopek - CSV					Referenční čas měření t_{ref}	Událost	Délka události
Pořadí	Čas měření			[s]				[s]
[-]	[h]	[min]	[s]	[s]			
0	0	0	0,00	0,00	Sycení vzorku	-	
1	2	33	28,63	9208,63	Počátek snímání senzory - 1	-	
2	2	34	14,38	9254,38	Měření odneseného množství - 0	-	
3	2	45	6,59	9906,59	Počátek čtení piezometrů	-	
4	2	47	32,53	10052,53	Konec čtení piezometrů	145,94	
5	2	47	50,09	10070,09	Počátek měření průtoku	-	
6	2	50	8,37	10208,37	Konec měření průtoku	138,29	
7	2	51	6,02	10266,02	Měření odneseného množství - 1	-	
8	2	51	27,26	10287,26	Počátek obrazového záznamu - 1	-	
9	2	51	37,46	10297,46	Zvýšení horní okrajové podmínky - 1-2	10297,46	
10	2	54	12,29	10452,29	Zvýšení horní okrajové podmínky - 2-3	154,83	
11	3	9	18,08	11358,08	Počátek čtení piezometrů	-	
12	3	11	1,90	11461,90	Konec čtení piezometrů	103,82	
13	3	11	19,04	11479,04	Počátek měření průtoku	-	
14	3	12	56,46	11576,46	Konec měření průtoku	97,42	
15	3	13	50,11	11630,11	Měření odneseného množství - 2	-	
16	3	13	53,72	11633,72	Konec obrazového záznamu - 1	1346,46	
17	3	13	57,85	11637,85	Počátek obrazového záznamu - 2	-	
18	3	14	8,54	11648,54	Zvýšení horní okrajové podmínky - 3-4	1196,25	
19	3	16	51,19	11811,19	Zvýšení horní okrajové podmínky - 4-5	162,66	
20	3	29	13,64	12553,64	Počátek čtení piezometrů	-	
21	3	31	4,74	12664,74	Konec čtení piezometrů	111,10	
22	3	31	22,77	12682,77	Počátek měření průtoku	-	
23	3	32	32,02	12752,02	Konec měření průtoku	69,25	
24	3	32	40,98	12760,98	Konec obrazového záznamu - 2	1123,13	

6.5.1.2 Průběh piezometrických výšek a hydraulických gradientů

Pro každou požadovanou polohu horní hladiny byly zaznamenány piezometrické výšky (pomocí tabule umožňující dostatečně přesné čtení a také pomocí tlakových senzorů). Piezometrické výšky byly následně zapsány do XLSX souboru a přepočteny na relativní hodnoty vzhledem k délce vzorku $h_{i,rel}$:

$$h_{i,rel} = \frac{h_i}{l_{vzorek}} \quad [-], \quad (6.14)$$

kde h_i ... i -tá piezometrická výška [m],

$h_{i,rel}$... relativní piezometrická výška vzhledem k délce vzorku [-],

l_{vzorek} ... délka vzorku [m].

Pro vykreslení průběhů byly stanoveny relativní polohy piezometrů vzhledem k poloze posledního piezometru dle:

$$l_{i,rel} = \frac{l_i}{l_{i,max}} \quad [-], \quad (6.15)$$

kde l_i ... poloha piezometru měřená ze strany nátoky [m],

„0“ je dána 1. piezometrem,

$l_{i,max}$... poloha posledního piezometru měřená ze strany nátoky [m],

$l_{i,rel}$... relativní vzdálenost měření vztahovaná k poloze posledního piezometru [-].

Hydraulické gradienty mezi jednotlivými piezometry byly vypočteny dle:

$$\Delta h = h_m - h_n \text{ [m]}, \quad (6.16)$$

$$J = \frac{\Delta h}{\Delta l} \text{ [-]}, \quad (6.17)$$

kde h_m, h_n ... piezometrické výšky pro stanovení hydraulického gradientu [m],
 J ... hydraulický gradient [-],
 Δh ... rozdíl piezometrických výšek [m],
 Δl ... vzdálenost mezi piezometry [m].

Pro účely vykreslení byla hodnota hydraulického gradientu vztažena vždy ke středu intervalu, na kterém byla vypočtena a následně byl tento střed intervalu převeden na relativní hodnotu vzhledem k poloze posledního piezometru, tedy:

$$l_{gr,prům} = \frac{l_{i+1} + l_i}{2} \text{ [-]}, \quad (6.18)$$

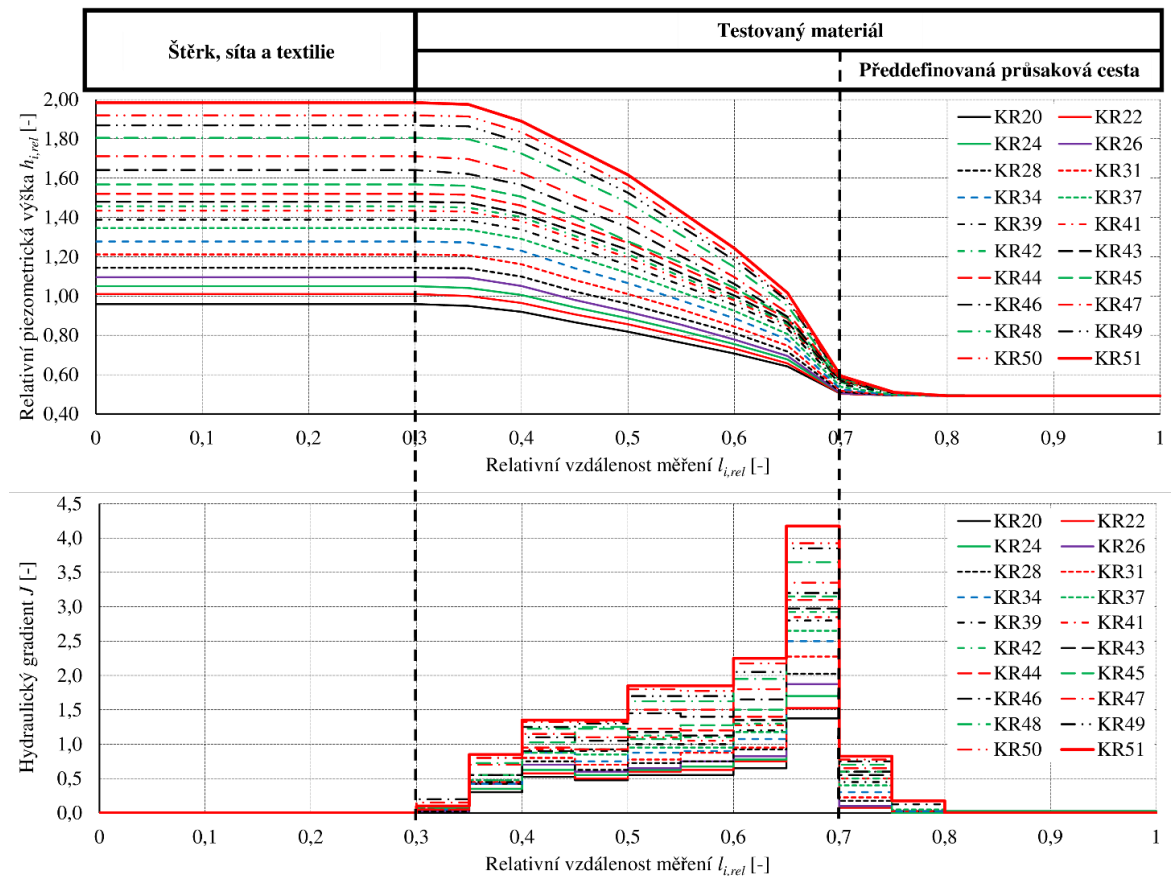
$$l_{gr,rel} = \frac{l_{gr,prům}}{l_{i,max}} \text{ [-]}, \quad (6.19)$$

kde $l_{gr,prům}$... průměrná poloha měření hydraulického gradientu [m],
 $l_{gr,rel}$... relativní poloha měření hydraulického gradientu vztažená k poloze posledního piezometru [-],
 $l_{i,max}$... poloha posledního piezometru měřená ze strany nátoky [m],
 l_{i+1} ... poloha piezometru měřená ze strany nátoky [m],
„0“ je dána 1. piezometrem.

Příklad průběhu piezometrických výšek a hydraulických gradientů ukazuje obr. 6.30. Veškeré průběhy obsahuje příloha 7.

6.5.1.3 Stanovení kritického hydraulického gradientu

Při každém zvýšení horní hladiny bylo kontrolováno, zda dochází k erozi. Po jejím zaznamenání byl na základě dat o piezometrických výškách identifikován kritický hydraulický gradient jako poslední hodnota na čele průsakové cesty, při které ještě nedošlo k erozi (vzdálenost piezometrů byla 20 mm). Pro urychlení experimentů byla před vlastním měřením hodnota kritického hydraulického gradientu odhadnuta dle pórovitosti materiálu ve vazbě na dříve získaná data o kritických hydraulických gradientech. Nižší hodnoty piezometrických výšek (a tedy i gradientů) nebylo nutné měřit (viz kapitola 6.4.4).



Obr. 6.30 Příklad průběhu piezometrických výšek a hydraulických gradientů podél vzorku – B_0-2_4

6.5.1.4 Stanovení hydraulické vodivosti vzorku

Pro užití v numerickém modelu prezentovaném v této práci byly pro vzorky stanoveny hydraulické vodivosti. Závislost hydraulické vodivosti na pórovitosti též udávala orientační představu o průtocích pro nově připravované vzorky.

Z důvodu ovlivnění proudění (a tedy i piezometrických výšek) nebylo možné přímo vypočítat hydraulickou vodivost dle standardní rovnice pro Darcyho propustoměr:

$$k = \frac{Q/S_{prop}}{J} \quad [\text{m/s}], \quad (6.20)$$

kde k ... hydraulická vodivost vzorku [m/s],

Q ... průtok vzorkem [m³/s],

S_{prop} ... průřezová plocha propustoměru [m²].

Řešením problému bylo použití části numerického modelu popsaného v kapitole 7, konkrétně v části sestavení a kalibrace hydraulické vodivosti (viz příloha 15). Dle popsaného postupu byla použita analogie vedení tepla materiálem. Na okrajích náhradní oblasti byly zadány okrajové podmínky piezometrickými výškami, které byly simulovány teplotami. Tepelná vodivost je zde analogická hydraulické vodivosti a tepelný tok je analogický

specifickému průtoku vody. Dle známého průběhu piezometrických výšek a tvarů průsakové cesty byly stanoveny rozměry průsakové cesty pro model. Jedná se zde o zjednodušení komplexního tvaru průsakové cesty na polovinu válce s čtvrtinou koule tvořící čelo cesty. Hydraulická vodivost byla kalibrována pomocí měřeného a vypočteného průtoku (Q a Q_{vyp}). Vypočtený průtok byl stanoven na základě plochy, na kterou byla zadána dolní okrajová podmínka, a vypočteného tepelného toku, resp. specifického průtoku:

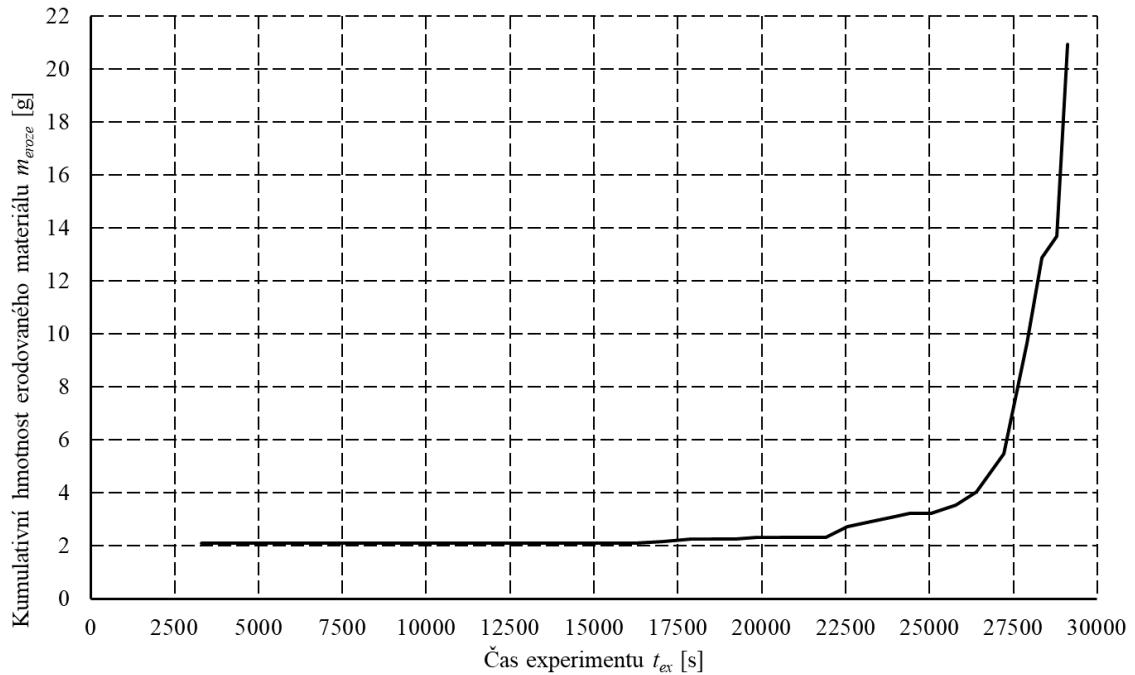
$$Q_{vyp} = q_{vyp} * S_{DOP} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (6.21)$$

kde q_{vyp} ... vypočtený specifický průtok [m/s],
 Q_{vyp} ... vypočtený průtok [m³/s],
 S_{DOP} ... plocha dolní okrajové podmínky [m²].

Prakticky se v kalibraci postupovalo tak, že pro první výpočet byla hydraulická vodivost odhadnuta dle vypočtené pórovitosti materiálu a byla stanovena veličina Q_{vyp} . Poměr Q/Q_{vyp} udává i poměr mezi skutečnou hydraulickou vodivostí a odhadnutou hodnotou. Poměrem byla odhadnutá hodnota vynásobena, model byl opět vyřešen a průtoky byly porovnány. Takto se většinou dospělo k dobré, nikoliv však úplné shodě, a to z důvodu zaokrouhlovacích chyb při použití poměru Q/Q_{vyp} . Většinou bylo nutné provést mírné manuální úpravy hydraulické vodivosti a úlohu několikrát vyřešit pro dosažení shody průtoků. Výsledné hydraulické vodivosti jsou shrnuty v kapitole 6.5.3.4 v tab. 6.19 a závislost hodnot na pórovitosti materiálu ukazuje obr. 6.50.

6.5.1.5 Hmotnost erodovaného materiálu a jeho přírůstky v čase

Zaznamenané časy a objemy erodovaného materiálu byly ze zápisníku experimentu (přiložen na CD) přeneseny do XLSX souboru. Za základě znalosti výsledného objemu erodovaného materiálu a jeho hmotnosti byla vypočtena jeho střední objemová hmotnost ρ_{eroze} dle rovnice (6.12). Následně byly stanoveny hmotnosti erodovaného materiálu v měřených časech dle rovnice (6.13), které byly vyneseny do grafu (příloha 8). Příklad průběhu kumulativní hmotnosti erodovaného materiálu v čase ukazuje obr. 6.31.



Obr. 6.31 Příklad průběhu hmotností erodovaného materiálu v čase – B_0-2_16

6.5.1.6 Piezometrické výšky měřené pomocí tlakových senzorů

Záznamy ze softwaru pro pořizování zázpisu z tlakových senzorů ve formátu ASCII byly přeneseny do XLSX souboru. Ke každé sadě hodnot byl přiřazen čas, ve kterém měření proběhlo (dle zapsaného času spuštění záznamu a dle frekvence měření). Sensory nebyly umístěny přesně na „nule“ čtení tabule, na kterou byly napojeny standardní piezometry. Byly umístěny na stůl pod úrovní tabule (obr. 6.25). Pro porovnání hodnot musely být o tuto vzdálenost hodnoty ze senzorů opraveny. Pro opravu byla změřena vzdálenost mezi „nulou“ na tabuli a osou senzoru (h_{tabule}). Následně bylo možné pomocí známého rozsahu tlaků každého senzoru (0 až 4 m v. s.) a měřených hodnot napětí $U_{j,senz}$ [V] provést přepočítání na výšku vodního sloupce:

$$h_{j,senz} = \frac{U_{j,senz}}{U_{senz,max}} * h_{senz,max} - h_{tabule} \text{ [m]}, \quad (6.22)$$

- kde
- $h_{j,senz}$... piezometrická výška měřená j -tým tlakovým senzorem [m],
 - $h_{senz,max}$... maximální piezometrická výška měřená tlakovým senzorem [m],
 - h_{tabule} ... vzdálenost mezi čtením „nuly“ na tabuli a osou tlakového senzoru [m],
 - $U_{j,senz}$... výstupní napětí měřené j -tým tlakovým senzorem [V],
 - $U_{senz,max}$... maximální výstupní napětí měřené tlakovým senzorem [V].

Relevantní data byla měřena s frekvencí 10 Hz a v dalších krocích zpracování byla průměrována po 1 s (příloha 10) čímž se částečně eliminovaly vlivy tlakových pulzací. Data měřená senzory byla použita pro stanovení hydraulických gradientů během intenzivní eroze, kdy nebylo možné provádět vizuální odečet piezometrických výšek.

6.5.1.7 Průtok měřený pomocí odměrného válce s tlakovým senzorem

Vyšší průtoky bylo možné stanovovat pomocí válce s tlakovým senzorem. Válec byl pod odtok ze zařízení umístěn těsně před začátkem rychlého porušení vzorku. Z dat příslušného senzoru byla vybrána pouze relevantní část. Postup přepočtu dat byl obdobný jako v rovnici (6.22) s tím rozdílem, že odpadla nutnost opravy dat hodnotou h_{tabule} , tj. $h_{tabule} = 0$ m. Pro měření průtoku byly sledovány změny hladin v delších časových intervalech, tj. hodnoty měřené s frekvencí 10 Hz byly průměrovány po 5 s. Kratší časové intervaly pro průměrování nebyly opodstatněné z důvodu tlakových pulzací a vlnění hladiny ve válci.

Data ukazovala nárůst hladiny (resp. hydrostatického tlaku) ve válci v čase. Při známém průměru odměrného válce, a tedy i jeho průřezové ploše, bylo možné stanovit průtok vody zařízením (ze změn hladiny ve válci) v relevantních časových intervalech:

$$S_{válec} = \frac{\pi D_{válec}^2}{4} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.23)$$

$$Q_{válec} = \frac{\Delta h_{válec} * S_{válec}}{\Delta t_Q} \text{ [-]}, \quad (6.24)$$

kte $D_{válec}$... vnitřní průměr odměrného válce [m],

$Q_{válec}$... průtok měřený pomocí odměrného válce [m³/s],

$S_{válec}$... průřezová plocha odměrného válce [m²],

t_Q ... časový úsek pro měření průtoku vody [s],

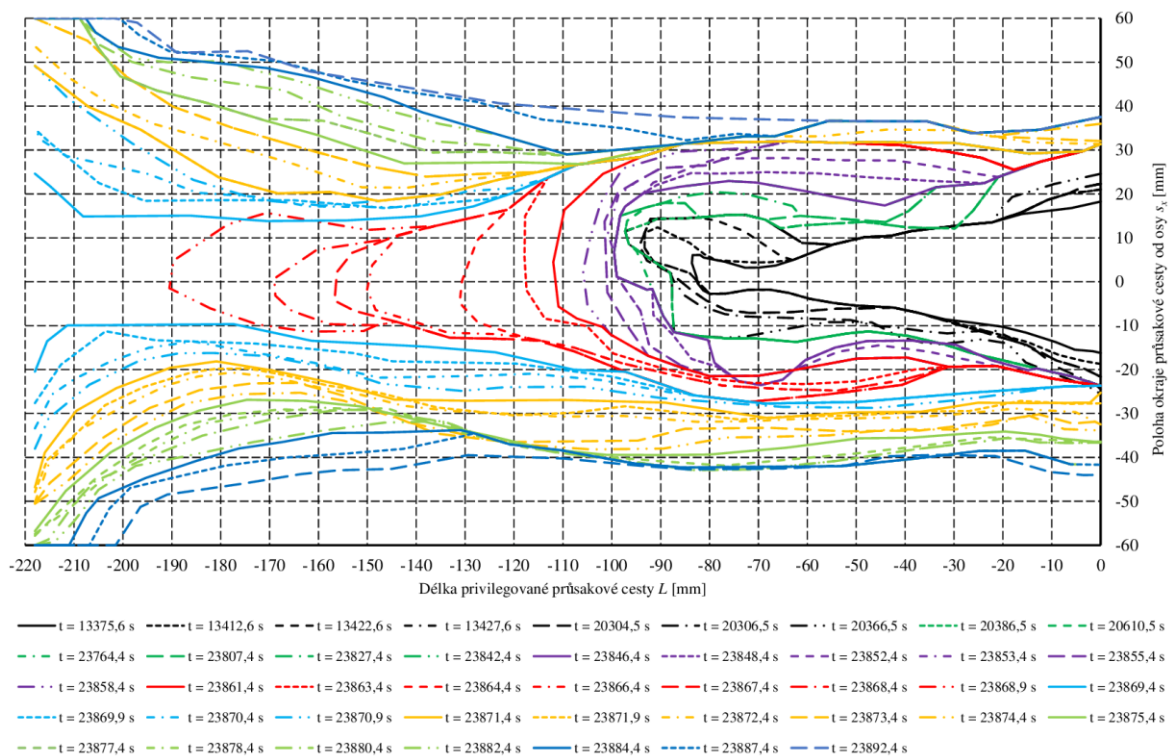
$\Delta h_{válec}$... změna polohy hladiny v odměrném válci [m].

Souhrn dat ukazuje příloha 9. Jemné špičky identifikovatelné v datech lze připsat tlakovým pulzacím. Výrazné špičky pak vznikly vyprazdňováním válce v průběhu měření pro zajištění co nejnižší hladiny ve válci v čase porušení vzorku (aby bylo možné průtok měřit delší časový interval). Nutnost vyprázdnit válec většinou nastávala v situacích, kdy byl okamžik blízkého porušení vzorku špatně odhadnut. Voda odtékající ze zařízení po čas vyprazdňování válce byla vrácena zpět do zásobní nádrže.

6.5.1.8 Zpracování obrazových záznamů průsakové cesty

Ze zachycených videí byly vybrány části, ve kterých byly pozorovatelné změny tvaru průsakové cesty. Z těchto částí se vytvořily snímky v postupně se zkracujících časových intervalech podle toho, jak rychle eroze postupovala. Z nich byly extrahovány tvary průsakové cesty v daných časech (obr. 6.32 a příloha 11). Extrakce tvarů byla částečně provedena manuálně v programu AutoCAD a částečně v programu MATLAB (funkce GRABIT). V obou programech se postupovalo prakticky identicky:

1. Do prostředí byl vložen řešený snímek s průsakovou cestou.
2. Tvar průsakové cesty se opsal lomenou křivkou s dostatkem bodů, aby byl tvar dostatečně přesně vystihnout.
3. Výsledné body křivky se exportovaly do CSV souboru.



Obr. 6.32 Příklad tvarů privilegované průsakové cesty v čase – B_0-2_24

6.5.1.9 Stanovení rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty

Základním jevem pozorovatelným během experimentu je posun čela průsakové cesty proti směru proudění. Rychlost postupu čela byla vypočtena za pomoci obrazových záznamů tvaru průsakové cesty v daných časových bodech TP podle vztahů:

$$\Delta L_{\check{c}elo} = |L_{\check{c}elo,TP} - L_{\check{c}elo,TP-1}| \text{ [mm]}, \quad (6.25)$$

$$\Delta t_{\check{c}elo} = t_{TP} - t_{TP-1} \text{ [s]}, \quad (6.26)$$

$$v_{\check{c}elo} = \frac{\Delta L_{\check{c}elo}}{\Delta t_{\check{c}elo}} \text{ [mm/s]}, \quad (6.27)$$

kde $L_{\check{c}elo, TP}$... poloha čela průsakové cesty v časovém bodě TP [mm],
 $L_{\check{c}elo, TP-1}$... poloha čela průsakové cesty v časovém bodě $TP-1$ [mm],
 t_{TP} ... čas zaznamenaného bodu TP [s],
 t_{TP-1} ... čas zaznamenaného bodu $TP-1$ [s],
 $v_{\check{c}elo}$... rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty [mm/s],
 $\Delta L_{\check{c}elo}$... změna polohy čela průsakové cesty [mm],
 $\Delta t_{\check{c}elo}$... doba zpětného postupu čela průsakové cesty [s].

Díky množství zaznamenaných tvarů průsakové cesty v každém experimentu bylo možné sestavit průběhy rychlostí zpětného postupu čela průsakové cesty (příklad ukazuje obr. 6.33). Zde je okamžitá rychlost zpětného postupu čela vztažena ke středu intervalu, na kterém byla vypočtena:

$$L_{\check{c}elo,v} = \frac{L_{\check{c}elo,TP} + L_{\check{c}elo,TP-1}}{2} \text{ [mm]}, \quad (6.28)$$

kde $L_{\check{c}elo, TP}$... poloha čela průsakové cesty v časovém bodě TP [mm],
 $L_{\check{c}elo, TP-1}$... poloha čela průsakové cesty v časovém bodě $TP-1$ [mm],
 $L_{\check{c}elo,v}$... střed intervalu, na kterém byla vypočtena rychlost $v_{\check{c}elo}$ [mm].

Pro účely porovnání byly středy intervalů vztaženy k celkové délce vzorku a rychlost zpětného postupu byla normována pórovitostí:

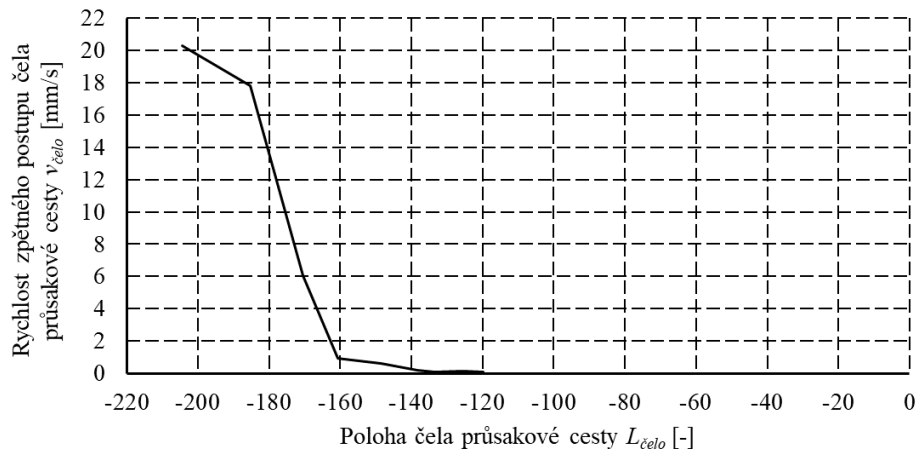
$$L_{\check{c}elo,rel} = \frac{L_{\check{c}elo,v}}{l_{vzorek}} \text{ [-]}, \quad (6.29)$$

$$v_{\check{c}elo,norm} = \frac{v_{\check{c}elo}}{n} \text{ [mm/s]}, \quad (6.30)$$

kde $L_{\check{c}elo,rel}$... relativní střed intervalu (ku délce vzorku) [-],
 $L_{\check{c}elo,v}$... střed intervalu, na kterém byla vypočtena rychlost $v_{\check{c}elo}$ [mm],
 l_{vzorek} ... délka vzorku [mm],
 $v_{\check{c}elo,norm}$... normovaná rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty [mm/s].

Průběhy rychlostí zpětného postupu čela průsakové cesty pro všechny experimenty ukazují přílohy 12 a 13.

Dle Bulletinu 164 (2015) dochází při překročení kritického hydraulického gradientu k relativně rovnoměrnému zpětnému postupu čela průsakové cesty cca do 40 % průsakové délky. Po dosažení této vzdálenosti dochází ke zrychlování postupu až do úplného propojení horní a dolní vody. Tento jev byl pozorován i u experimentů provedených v této práci.



Obr. 6.33 Příklad průběhu rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty – B_0-2_6

6.5.1.10 Stanovení rychlosti eroze

Každý tvar privilegované průsakové cesty byl rozdělen příčnými řezy vzdálenými 5 až 10 mm (ve vazbě na tvar průsakové cesty a potřebnou přesnost výpočtu). V těchto řezech byla stanovena šířka průsakové cesty, její hloubka (měřená na konci experimentu), obvod dna a průtočná plocha. Tvar příčného řezu cesty byl aproximován dolní polovinou elipsy. Mezi dvěma sousedícími řezy XS a $XS-1$ (vyhrazující element E průsakové cesty) byl stanoven dílčí objem průsakové cesty a na základě známé objemové hmotnosti materiálu byla stanovena i dílčí hmotnost chybějícího materiálu mezi řezy:

$$l_E = |l_{\text{řez},XS} - l_{\text{řez},XS-1}| \quad [\text{m}], \quad (6.31)$$

$$V_E = \frac{A_{XS} + A_{XS-1}}{2} l_E \quad [\text{m}^3], \quad (6.32)$$

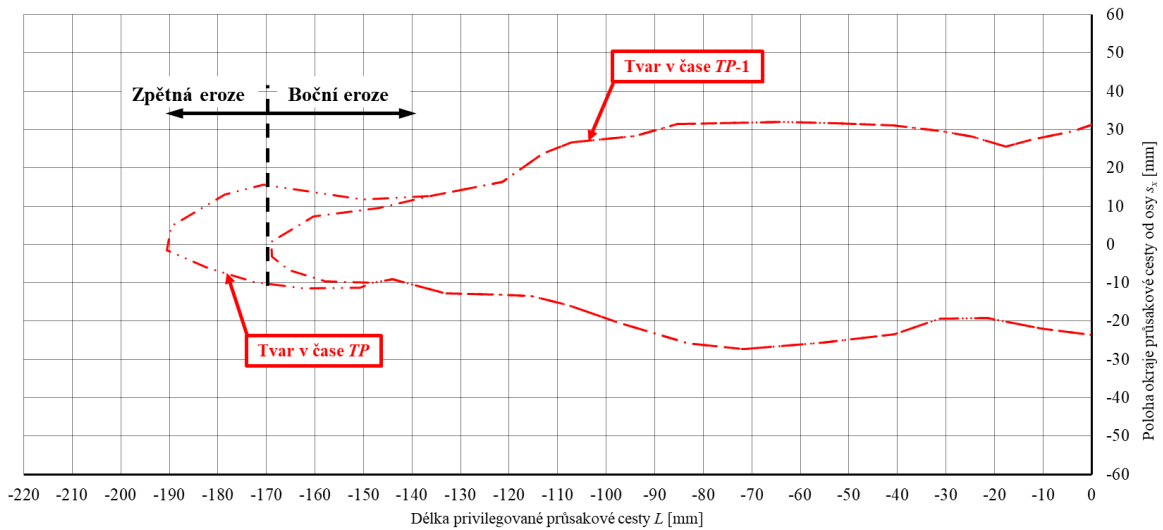
$$m_E = V_E * \rho_V \quad [\text{kg}], \quad (6.33)$$

- kde A_{XS} ... průřezová plocha řezu XS průsakovou cestou [m^2],
 A_{XS-1} ... průřezová plocha řezu $XS-1$ průsakovou cestou [m^2],
 l_E ... délka elementu E průsakové cesty [m],
 $l_{\text{řez},XS}$... poloha příčného řezu XS na průsakové cestě [m],
 $l_{\text{řez},XS-1}$... poloha příčného řezu $XS-1$ na průsakové cestě [m],
 m_E ... dílčí hmotnost odneseného materiálu mezi řezy XS a $XS-1$ [kg],
 V_E ... dílčí objem elementu E mezi řezy XS a $XS-1$ průsakové cesty [m^3].

Celý výše popsaný postup byl aplikován pro všechny získané tvary průsakové cesty, tj. pro všechny časové body TP .

Výsledná data byla rozdělena podle povahy probíhajícího děje na zpětnou a boční erozi na základě znalosti vývoje tvaru průsakové cesty (průběhy vývoje – viz příloha 11). Při rozdělování bylo postupováno následovně (viz obr. 6.34):

1. Byly zvoleny dva po sobě jdoucí tvary průsakové cesty s danými časy (v obr. 6.34 označeny jako tvary v časových bodech $TP-1$ a TP).
2. V případě že v časovém bodě TP došlo k posunu čela oproti $TP-1$, došlo ke zpětné erozi a tvar i další výpočty byly rozděleny. Veškerý materiál v rozsahu od čela v čase $TP-1$ po čelo v čase TP byl přiřazen k jevu zpětné eroze, zbývající změny tvaru průsakové cesty byly přisouzeny boční erozi a data byla odtud vyhodnocována nezávisle.



Obr. 6.34 Příklad rozdělení na zpětnou a boční erozi (B_0-2_24)

Mezi dvěma časovými body TP a $TP-1$ byla stanovena změna hmotnosti materiálu v čase, resp. rychlost s jakou byl materiál odebírán, a to pro všechny elementy E . Následně byla pro každý element E a každou dvojici sousedících časových bodů TP a $TP-1$ stanovena rychlost eroze za použití následujících vztahů:

$$t_{TP:TP-1} = t_{TP} - t_{TP-1} \text{ [s]}, \quad (6.34)$$

$$m_{E,TP:TP-1} = m_{E,TP} - m_{E,TP-1} \text{ [kg]}, \quad (6.35)$$

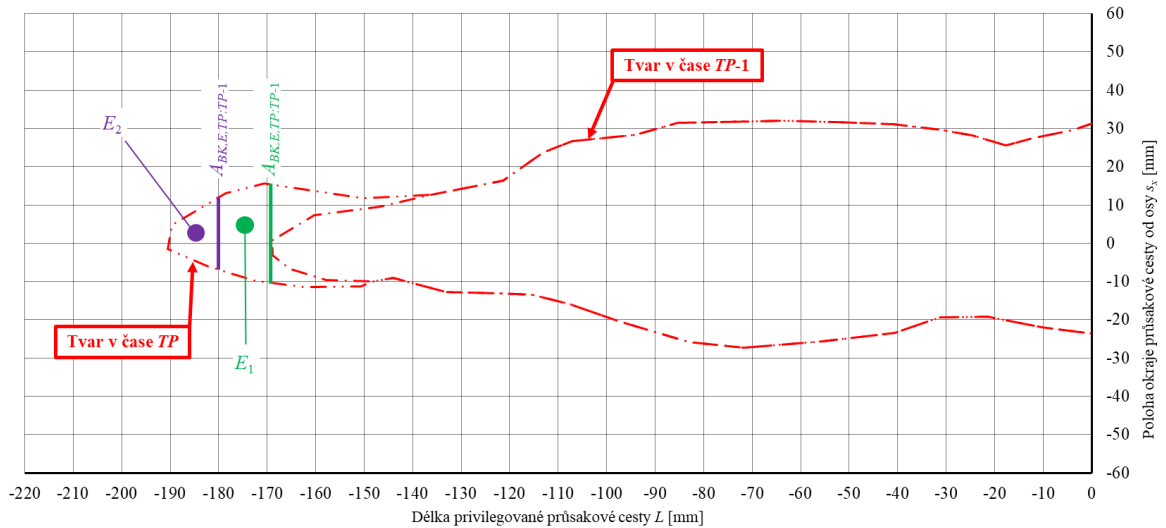
$$A_{dno,E,TP} = \frac{O_{d,XS,TP} + O_{d,XS-1,TP}}{2} l_{E,TP} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.36)$$

$$A_{dno,pr,E,TP:TP-1} = \frac{A_{dno,E,TP} + A_{dno,E,TP-1}}{2} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.37)$$

$$\dot{e}_{E,TP:TP-1} = \frac{m_{E,TP:TP-1}}{t_{TP:TP-1}} * \frac{1}{A_{dno,pr,E,TP:TP-1}} \text{ [kg/s/m}^2\text{]}, \quad (6.38)$$

kde	$A_{dno,E,TP}$	... plocha dna elementu E v časovém bodě TP [m^2],
	$A_{dno,E,TP-1}$	... plocha dna elementu E v časovém bodě $TP-1$ [m^2],
	$A_{dno,pr,E,TP:TP-1}$	... průměrná plocha dna elementu E mezi časovými body TP a $TP-1$ [m^2],
	$l_{E,TP}$	... délka elementu E průsakové cesty v časovém bodě TP [m],
	$m_{E,TP}$	... dílčí hmotnost chybějícího materiálu v elementu E v časovém bodě TP [kg],
	$m_{E,TP-1}$	... dílčí hmotnost chybějícího materiálu v elementu E v časovém bodě $TP-1$ [kg],
	$m_{E,TP:TP-1}$	... hmotnost erodovaného materiálu mezi časovými body TP a $TP-1$ [kg],
	$O_{d,XS,TP}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu XS v časovém bodě TP [m],
	$O_{d,XS-1,TP}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu $XS-1$ v časovém bodě TP [m],
	t_{TP}	... čas zaznamenaného bodu TP [s],
	t_{TP-1}	... čas zaznamenaného bodu $TP-1$ [s],
	$t_{TP:TP-1}$	... délka časového kroku (doba mezi časovými body TP a $TP-1$) [s],
	$\dot{\epsilon}_{E,TP:TP-1}$	... rychlost eroze na elementu E mezi časovými body TP a $TP-1$ [$kg/s/m^2$].

V případě zpětné eroze bylo nutné provést modifikace rovnic (6.35) až (6.38): Hodnota $m_{E,TP-1}$ byla vždy rovna 0, resp. hodnota $m_{E,TP}$ při zpětné erozi reprezentuje celý erodovaný objem průsakové cesty, tzn. $m_{E,TP:TP-1} = m_{E,TP}$. Rychlost eroze se obecně vztahuje k ploše kolmé na směr postupu eroze. V případě boční eroze je takovou plochou dno elementu průsakové cesty. U zpětné eroze však docházelo k postupu kolmému k dříve vytvořeným příčným řezům. Plochou, ke které byla rychlost eroze vztahována, byla v tomto případě průřezová plocha průsakové cesty $A_{BK,E,TP:TP-1}$ získaná z řezu vedeného tvarem průsakové cesty v čase TP v místě původního čela v čase $TP-1$. V případě rozdělení řešené části na více elementů E byla hodnota $A_{BK,E,TP:TP-1}$ převzata vždy z předchozího příčného řezu ($XS-1$). Grafický popis uvedených veličin ukazuje obr. 6.35.



Obr. 6.35 Vztažné plochy pro výpočet rychlosti zpětné eroze (B_0-2_24)

Po zavedení veličiny $A_{BK,E,TP:TP-1}$ byl pro výpočty rychlosti zpětné eroze použit následující vztah:

$$\dot{\epsilon}_{E,TP:TP-1} = \frac{m_{E,TP:TP-1}}{t_{TP:TP-1}} * \frac{1}{A_{BK,E,TP:TP-1}} \quad [\text{kg/s/m}^2], \quad (6.39)$$

kde $A_{BK,E,TP:TP-1}$... průřezová plocha průsakové cesty pro element E při zpětné erozi [m^2],

$m_{E,TP:TP-1}$... hmotnost erodovaného materiálu mezi časovými body TP a $TP-1$ [kg],

$t_{TP:TP-1}$... délka časového kroku (doba mezi časovými body TP a $TP-1$) [s],

$\dot{\epsilon}_{E,TP:TP-1}$... rychlost eroze na elementu E mezi časovými body TP a $TP-1$ [kg/s/m^2].

Při provádění výpočtů byla zpracovávána veškerá data získaná v průběhu experimentu. Z pohledu hydraulických podmínek je nejdůležitější částí experimentu okamžik před porušením vzorku, od kterého už nebyla horní okrajová podmínka zvyšována. Tento okamžik bylo možné přesně identifikovat v zápisníku experimentu a vztáhnout k dosud vypočteným datům. Veškeré zobrazované průběhy rychlostí eroze a stanovení dalších parametrů jsou zobrazovány právě pro tuto závěrečnou fázi experimentu.

Při laboratorních měřeních bylo pozorováno, že na výtoku ze vzorku dochází k ovlivnění proudění, které je dáno otvorem v čelní desce na výtoku ze zařízení. Ovlivněná část byla přibližně 35 mm. Tento ovlivněný úsek nebyl v dalších fázích práce zohledňován. Problémové místo by bylo možné odstranit jen velice obtížně za použití jiné konfigurace čelní desky. Také bylo pozorováno, že při plném porušení vzorku dojde v místě nátoku

do vzorku k velice rychlé erozi jejímž výsledkem je vytvoření proudnicové plochy nátoku (o délce přibližně 40 mm). Tento jev však není vlastním sledovaným jevem a do dalších analýz nebyla data v tomto úseku zahrnována.

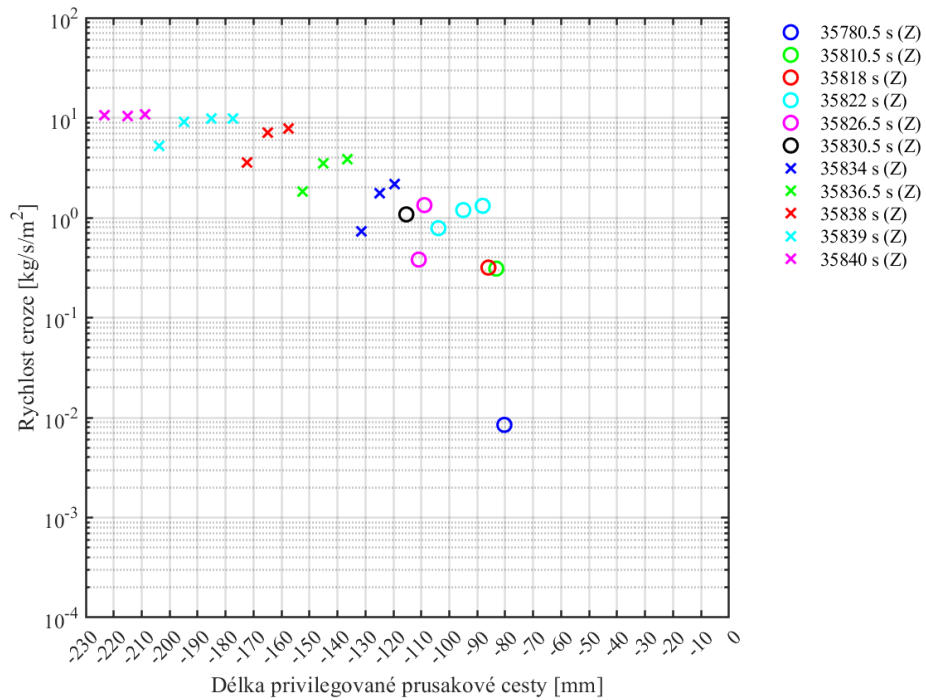
Hodnoty rychlosti eroze (zpětné a boční) pro dané časové intervaly (kde jedna linie odpovídá jednomu časovému intervalu) byly následně vykresleny podél vzorku (obr. 6.36 a příloha 14), přičemž platí, že vypočtené hodnoty byly vztaženy ke středům intervalů, na kterých byly vypočteny, a to jak z hlediska délky průsakové cesty, tak i času:

$$l_{E,pr} = \frac{l_{řez,XS} + l_{řez,XS-1}}{2} \quad [\text{m}], \quad (6.40)$$

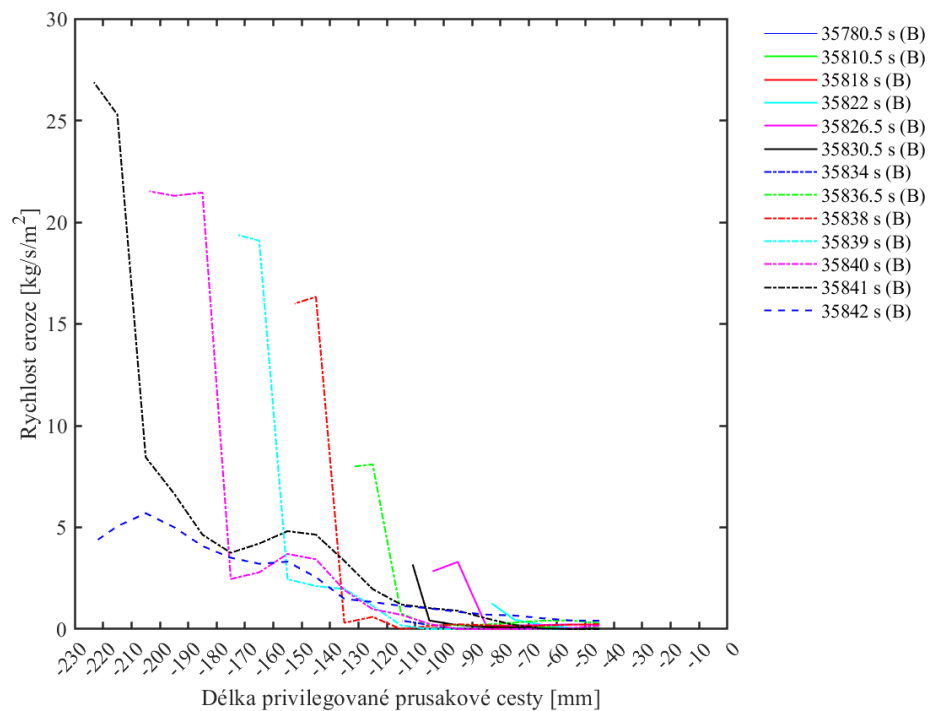
$$t_{TP:TP-1,pr} = \frac{t_{TP} + t_{TP-1}}{2} \quad [\text{s}], \quad (6.41)$$

kde $l_{E,pr}$... poloha středu elementu E průsakové cesty [m],
 $l_{řez,XS}$... poloha příčného řezu XS na průsakové cestě [m],
 $l_{řez,XS-1}$... poloha příčného řezu $XS-1$ na průsakové cestě [m],
 $t_{TP:TP-1,pr}$... střed časového intervalu $TP:TP-1$ [s].

Vzhledem k tomu, že data byla již předem rozdělena na erozi zpětnou a boční, bylo možné je podél vzorku zobrazit odděleně ve formě samostatných bodů (zpětná eroze – viz obr. 6.36) a čar (boční eroze – viz obr. 6.37). Legendy obrázků pro přehlednost obsahují i rozlišení, zda se jedná o zpětnou erozi – popis (Z) za časovým údajem, nebo o erozi boční – popis (B) za časovým údajem.



Obr. 6.36 Příklad vypočtené rychlosti zpětné eroze podél průsakové cesty – B_0-2_23



Obr. 6.37 Příklad rychlosti boční eroze podél průsakové cesty – B_0-2_23

6.5.1.11 Stanovení jednotné rychlosti eroze pro celou průsakovou cestu

Rychlosti eroze počítané po elementech dávají dobrý pohled na děj v průsakové cestě a na sestavených grafech lze dobře pozorovat postup čela průsakové cesty. Vzhledem k aplikovatelnosti v praxi bylo ale použito zjednodušení a to takové, že veličiny potřebné

pro stanovení rychlosti eroze, byly sečteny přes celkový počet elementů E , na kterých byly stanoveny. Zde stále platilo, že vyhodnocení zpětné a boční eroze probíhalo odděleně. Konkrétní vztahy pro součty byly následující:

$$m_{TP} = \sum_{E=1}^e m_{E,TP} \text{ [kg]}; m_{TP-1} = \sum_{E=1}^e m_{E,TP-1} \text{ [kg]}, \quad (6.42)$$

Pro boční erozi:

$$A_{dno,TP} = \sum_{E=1}^e A_{dno,E,TP} \text{ [m}^2\text{]}; A_{dno,TP-1} = \sum_{E=1}^e A_{dno,E,TP-1} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.43)$$

kde $A_{dno,TP}$... celková plocha dna v časovém bodě TP [m²],
 $A_{dno,TP-1}$... celková plocha dna v časovém bodě $TP-1$ [m²],
 e ... počet elementů průsakové cesty [-],
 m_{TP} ... celková hmotnost chybějícího materiálu v časovém bodě TP [kg],
 m_{TP-1} ... celková hmotnost chybějícího materiálu v časovém bodě $TP-1$ [kg].

Pro zpětnou erozi nebyly sumace $A_{dno,TP}$ a $A_{dno,TP-1}$ provedeny z důvodu odlišného postupu výpočtu (viz výše) a byla ustanovena veličina $A_{BK,TP:TP-1}$ získaná z řezu tvaru průsakové cesty v časovém bodu TP vedeného v místě původního čela (z časového bodu $TP-1$) (dle obr. 6.35). Rovnice (6.35) a (6.37) až (6.39) byly modifikovány:

$$m_{TP:TP-1} = m_{TP} - m_{TP-1} \text{ [kg]}, \quad (6.44)$$

Pro boční erozi:

$$A_{dno,pr,TP:TP-1} = \frac{A_{dno,TP} + A_{dno,TP-1}}{2} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.45)$$

$$\dot{\epsilon}_{TP:TP-1} = \frac{m_{TP:TP-1}}{t_{TP:TP-1}} * \frac{1}{A_{dno,pr,TP:TP-1}} \text{ [kg/s/m}^2\text{]}, \quad (6.46)$$

Pro zpětnou erozi:

$$\dot{\epsilon}_{TP:TP-1} = \frac{m_{TP:TP-1}}{t_{TP:TP-1}} * \frac{1}{A_{BK,TP:TP-1}} \text{ [kg/s/m}^2\text{]}, \quad (6.47)$$

kde $A_{BK,TP:TP-1}$... průřezová plocha průsakové cesty při zpětné erozi [m²],
 $A_{dno,pr,TP:TP-1}$... průměrná plocha dna mezi časovými body TP a $TP-1$ [m²],
 $A_{dno,TP}$... celková plocha dna v časovém bodě TP [m²],
 $A_{dno,TP-1}$... celková plocha dna v časovém bodě $TP-1$ [m²],
 m_{TP} ... celková hmotnost chybějícího materiálu v časovém bodě TP [kg],

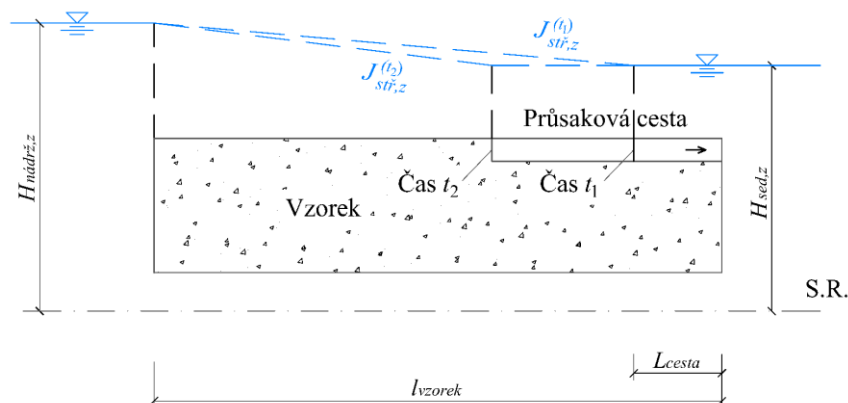
- $m_{TP:TP-1}$... celková hmotnost erodovaného materiálu mezi časovými body TP a $TP-1$ [kg],
- m_{TP-1} ... celková hmotnost chybějícího materiálu v časovém bodě $TP-1$ [kg],
- $t_{TP:TP-1}$... délka časového kroku (doba mezi časovými body TP a $TP-1$) [s],
- $\dot{E}_{TP:TP-1}$... rychlost eroze mezi časovými body TP a $TP-1$ [kg/s/m²].

Vypočtené rychlosti eroze (zpětná i boční) byly použity pro stanovení vztahu pro výpočet rychlosti eroze na základě známých dat, příp. pro stanovení koeficientu eroze C_e a kritického tečného napětí. Podkladová data obsahuje příložené CD.

6.5.1.12 Stanovení hydraulických gradientů v průběhu intenzivní eroze

Jako hlavní veličinu ovlivňující průběh eroze lze zjednodušeně uvažovat hydraulický gradient. Se zvyšujícím se hydraulickým gradientem lze předpokládat i zvyšující se rychlost eroze materiálu. V případě zpětné eroze byl hydraulický gradient přímo vázán s hodnotami eroze a byl vyhodnocován jeho vliv. Pro analýzu boční eroze bylo pomocí hydraulického gradientu stanoveno tečné napětí vyvolané proudící vodou dle rovnice (5.24).

Jak již bylo popsáno dříve, pro další analýzy dat byly použity výsledky ze závěrečných fází experimentů. Během experimentů bylo pozorováno, že po započetí intenzivní zpětné eroze následované porušením vzorku již nelze přesně stanovit průběhy piezometrických výšek, a tudíž ani hydraulických gradientů. Důvodem bylo zvýšení rychlosti proudění vody, které mělo za následek narušení téměř hydrostatických podmínek v piezometrech. Prakticky došlo k výraznému zvýšení rychlostní výšky (která nebyla při experimentu měřena) a naopak ke snížení tlakové výšky (tj. i měřené piezometrické výšky). Tento jev bylo možné částečně pozorovat na datech z tlakových senzorů (příloha 10). Pro stanovení hydraulických gradientů v průběhu závěrečné fáze měření byla použita data o poslední poloze horní nádrže, poloze hladiny v přípravku pro sedimentaci a příp. znalost délky průsakové cesty.



Obr. 6.38 Znárodnění zvyšování hydraulického gradientu při prodlužování průsakové cesty

Střední hydraulický gradient při zpětné erozi

Důsledkem prodlužování průsakové cesty zpětnou erozí bylo i postupné zvyšování středního hydraulického gradientu (viz obr. 6.38). Právě jeho hodnoty byly použity pro definování empirického vztahu pro výpočet rychlosti eroze. Střední hydraulický gradient byl stanoven dle:

$$J_{stř,z} = \frac{H_{nádrž,z} - H_{sed,z}}{l_{vzorek} - L_{cesta}} \quad [-], \quad (6.48)$$

- kde $H_{nádrž,z}$... výška hladiny v nádrži při zpětné erozi [m],
 $H_{sed,z}$... výška hladiny v přípravku pro sedimentaci při zpětné erozi [m],
 $J_{stř,z}$... střední hydraulický gradient při zpětné erozi [-],
 l_{vzorek} ... délka vzorku [m],
 L_{cesta} ... délka průsakové cesty [m].

Střední hydraulický gradient při boční erozi

Střední hydraulický gradient byl ve vyhodnocování výsledků použit pro stanovení tečného napětí dle rovnice (5.24). Jeho hodnoty závisely na poloze hladiny v horní nádrži a v přípravku pro sedimentaci:

$$J_{stř,b} = \frac{H_{nádrž,b} - H_{sed,b}}{l_{vzorek}} \quad [-], \quad (6.49)$$

- kde $H_{nádrž,b}$... výška hladiny v nádrži při boční erozi [m],
 $H_{sed,b}$... výška hladiny v přípravku pro sedimentaci při boční erozi [m],
 $J_{stř,b}$... střední hydraulický gradient při boční erozi [-],
 l_{vzorek} ... délka vzorku [m].

6.5.1.13 Stanovení tečného napětí při boční erozi

Dle rovnice (5.24) je pro stanovení tečného napětí třeba znalosti hustoty vody, hydraulického gradientu a hydraulického poloměru. Hustota vody byla zjištěna výpočtem na základě její teploty měřené v průběhu experimentu. Hydraulický poloměr podél celé průsakové cesty byl stanoven váženým průměrem následovně:

1. Pro jednotlivé příčné řezy (XS) se stanovil hydraulický gradient dle:

$$R_{řez,XS} = \frac{A_{XS}}{O_{d,XS}} \quad [-], \quad (6.50)$$

- kde A_{XS} ... průřezová plocha řezu XS průsakovou cestou [m²],
 $O_{d,XS}$... obvod dna průsakové cesty v řezu XS [m],
 $R_{řez,XS}$... hydraulický poloměr příčného řezu XS na průsakové cestě [m].

2. Na řešeném elementu E byl stanoven průměrný hydraulický poloměr dle:

$$R_{E,pr} = \frac{R_{řez,XS} + R_{řez,XS-1}}{2} \quad [\text{m}], \quad (6.51)$$

- kde $R_{E,pr}$... průměrný hydraulický poloměr elementu E průsakové cesty [m],
 $R_{řez,XS}$... hydraulický poloměr příčného řezu XS na průsakové cestě [m],
 $R_{řez,XS-1}$... hydraulický poloměr příčného řezu $XS-1$ na průsakové cestě [m].

3. Byl stanoven vážený hydraulický poloměr přes všechny elementy E průsakové cesty, kde váha je dána délkou každého elementu E :

$$R_{váž,b} = \frac{\sum_{E=1}^e R_{E,pr} (l_{řez,XS} - l_{řez,XS-1})}{\sum_{E=1}^e (l_{řez,XS} - l_{řez,XS-1})} \quad [\text{m}], \quad (6.52)$$

- kde e ... počet elementů průsakové cesty [-],
 $l_{řez,XS}$... poloha příčného řezu XS na průsakové cestě [m],
 $l_{řez,XS-1}$... poloha příčného řezu $XS-1$ na průsakové cestě [m],
 $R_{váž,b}$... vážený hydraulický poloměr pro boční erozi [m].

Po stanovení všech výše zmíněných veličin byla ve všech časových bodech TP stanovena tečná napětí v průsakové cestě dle rovnice (5.24) a následně bylo možné použít techniku pro stanovení kritického tečného napětí a koeficientu eroze dle Wana a Fella (2002).

6.5.1.14 Stanovení koeficientu eroze a kritického tečného napětí

Za použití vypočtených rychlostí boční eroze bylo možné pro experimenty stanovit koeficient eroze C_e a kritické tečné napětí τ_c . Stanovení proběhlo dle metody Wana a Fella (2002 a 2004a):

1. Vypočtené hodnoty tečného napětí a rychlosti boční eroze byly vykresleny do grafu (např. obr. 5.4).
2. Metodou nejmenších čtverců byla data proložena přímkou a byla stanovena její rovnice (obecně: $\dot{\epsilon}_{boč} = a_p \tau + b_p$).
3. Z rovnice přímky byl získán koeficient eroze C_e (rovno a_p v rovnici přímky) a bylo dopočteno kritické smykové napětí pro $\dot{\epsilon}_{boč} = 0$:

$$\tau_c = \frac{-b_p}{C_e} \quad [\text{Pa}], \quad (6.53)$$

- kde b_p ... 2. parametr rovnice přímky [kg/s/m^2],
 C_e ... koeficient eroze [s/m],
 τ_c ... kritické tečné napětí [Pa].

Takto získaná data byla posléze shrnuta tabelárně a byla vykreslena do grafů.

6.5.2 Odhad odchylek měření

V rámci vyhodnocení laboratorních experimentů bylo identifikováno 6 hlavních vyhodnocovaných veličin: pórovitost materiálu, hydraulická vodivost vzorku, kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty, rychlost eroze, střední hydraulický gradient při zpětné erozi a střední hydraulický gradient při boční erozi. Pro stanovení přesnosti měření byla pro každou z těchto veličin provedena analýza absolutních a relativních odchylek.

Postup stanovení

Vzhledem k množství veličin, které byly ve výpočtech použity, nastávala propagace odchylek veličin stanovovaných měřením, jako např. rozměry propustoměru, až do několik kroků vzdáleného výpočtu pórovitosti materiálu. Při složitějších postupech, jako např. při stanovování hydraulické vodivosti vzorku se situace ještě více komplikovala. Proto byl zvolen přístup, kdy se pro každou počítanou veličinu sestavily všechny kombinace zatížení odchylkami (např. pro plochu propustoměru S_{prop} : (a_{prop} zvětšené o příslušnou odchylku) \times (b_{prop} zmenšené o příslušnou odchylku)). Následně se z kombinací vždy vybrala extrémní hodnota odchylky, která se prohlásila absolutní odchylkou dané veličiny. Pro zjednodušení je v následujících podkapitolách postup nazván „metoda kombinací“.

Výpočet relativní odchylky byl vztažen k typické hodnotě. Typickou hodnotou se zde rozumí hodnota stanovená bez zatížení chybou. Relativní odchylka se stanovila dle obecné rovnice:

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X} * 100 [\%], \quad (6.54)$$

kde X ... hodnota řešené veličiny ve výpočtu relativní odchylky,
 δX ... relativní odchylka hodnoty řešené veličiny,
 ΔX ... absolutní odchylka hodnoty řešené veličiny.

6.5.2.1 Odchylky ze stanovení pórovitosti materiálu

Stanovení pórovitosti materiálu bylo provedeno na základě výpočtu objemu vzorku dle rovnice (6.5) a stanovení objemu zrn ve vzorku z jeho hmotnosti a měrné hmotnosti zrn dle rovnice (6.6). Pro výpočet objemu vzorku byla použita plocha propustoměru, která byla vypočtena z příčných rozměrů zařízení, a délka vzorku. Příčné rozměry propustoměru byly stanoveny digitálním posuvným měřidlem, délka vzorku pak byla stanovena pomocí svinovacího metru. Tab. 6.7 ukazuje absolutní odchylky měřených hodnot stejně jako relativní hodnoty odchylek pro typické hodnoty těchto veličin.

V případě postupu pro stanovení odchylky pórovitosti byly metodou kombinací zjištěny maximální odchylky pro plochu propustoměru S_{prop} , objem vzorku V_{vzorek} , objem zrn V_{zrn} a nakonec i pro pórovitost n . Odchylky výše uvedených vypočtených veličin uvádí tab. 6.8. Veškeré kombinace odchylek a postup výpočtu je uveden na příloženém CD.

Tab. 6.7 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin pro stanovení pórovitosti materiálu

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Rozměr propustoměru	a_{prop}	120,07 mm	0,01 mm	0,008
	b_{prop}	120,13 mm	0,01 mm	0,008
Délka vzorku	l_{vzorek}	200 mm	1 mm	0,500
Hmotnost vzorku	m_{vzorek}	5100 g	0,1 g	0,004
Měrná hmotnost zrn	ρ_{zrn}	2638 (písek Bzenec)	10 kg/m ³	0,380

Tab. 6.8 Absolutní a relativní odchylky vypočtených veličin pro stanovení pórovitosti materiálu

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Plocha propustoměru	S_{prop}	0,0144239 m ²	0,000002402 m ²	0,017
Objem vzorku	V_{vzorek}	0,002885 m ³	0,000015 m ³	0,517
Objem zrn	V_{zrn}	0,001933 m ³	0,000007 m ³	0,379
Pórovitost materiálu	n	0,330	0,0065	1,850

6.5.2.2 Odchylky ze stanovení hydraulické vodivosti vzorku

Hydraulická vodivost připraveného vzorku byla stanovena na základě měřeného průtoku (resp. měření hmotnosti vody zachycené do odměrného válce za čas), hydraulického gradientu na vytknuté části vzorku a plochy zařízení, která sloužila pro stanovení specifického průtoku. Jednalo se však pouze o hodnotu orientační a později byla skutečná hydraulická vodivost zjišťována zpětně numerickým modelováním.

Výsledná odchylka hydraulické vodivosti je ovlivněna přesností měření teploty vody pro stanovení její hustoty, přesností stanovení hmotnosti proteklé vody, přesností stanovení časového intervalu při měření průtoku, odchylkou ze vzdálenosti piezometrů a přesností čtení piezometrických výšek. Odchylky měřených veličin ukazuje tab. 6.9. Metodou kombinací byly stanoveny nejvyšší hodnoty absolutních a relativních odchylek vypočtených veličin, které shrnuje tab. 6.10. Podrobné postupy pro sestavení kombinací uvádí příložené CD.

Tab. 6.9 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin pro stanovení hydraulické vodivosti vzorku

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Teplota vody	T_w	18,0 °C	0,25 °C	1,39 %
Vzdálenost mezi piezometry	Δl	20 mm	0,5 mm	2,50 %
Rozdíl piezometrických výšek	Δh	16 mm	0,5 mm	3,13 %
Hmotnost vody proteklé vzorkem	m_Q	60,0 g	0,1 g	0,17 %
Časový úsek pro měření průtoku vody	t_Q	40 s	0,5 s	1,25 %

Tab. 6.10 Absolutní a relativní odchylky vypočtených veličin pro stanovení hydraulické vodivosti vzorku

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Hustota vody	ρ_w	998,65 kg/m ³	0,047 kg/m ³	1,39
Hydraulický gradient	J	0,800	0,046	5,75
Objem vody proteklé vzorkem	V_Q	6,008×10 ⁻⁵ m ³	1,03×10 ⁻⁷ m ³	0,17
Průtok	Q	1,5×10 ⁻⁶ m ³ /s	2,16×10 ⁻⁸ m ³ /s	1,44
Specifický průtok	q	1,04×10 ⁻⁴ m/s	1,52×10 ⁻⁶ m/s	1,46
Hydraulická vodivost vzorku	k	1,302×10⁻⁴ m/s	9,6×10⁻⁶ m/s	7,50

6.5.2.3 Odchylky kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty

Přesnost stanoveného kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty byla dána vzdáleností, na které byla veličina stanovována. Vzdálenost v případě použitého zařízení byla 20 mm, což odpovídá vzdálenosti piezometrů, mezi nimiž se vyskytuje řečené čelo průsakové cesty. Průběh piezometrických výšek mezi těmito dvěma body je aproximován úsečkou. Ve skutečnosti se však jedná o křivku blízkou parabole s tím, že v bodě, kde křivka přechází ze vzorku do průsakové cesty se hodnota hydraulického gradientu blíží nekonečnu (viz obr. 7.22).

Dále byla veličina ovlivněna odchylkami ze vzdálenosti piezometrů a přesností čtení piezometrických výšek, které ukazuje tab. 6.11. Pro stanovení odchylky kritického hydraulického gradientu byly vypočteny všechny kombinace se zahrnutím zmíněných odchylek měřených veličin (viz CD) z nichž byla získána ta nejnepříznivější (viz tab. 6.11).

Tab. 6.11 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin a kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Vzdálenost mezi piezometry	Δl	20 mm	0,5 mm	2,5
Rozdíl piezometrických výšek	Δh	20 mm	0,5 mm	2,5
Kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty	J_c	1,00	0,05	5,0

6.5.2.4 Odchytky ze stanovení rychlosti eroze

Odchytky ze stanovení rychlosti eroze byly především dány přesností stanovení šířky a hloubky průsakové cesty, které bylo třeba znát ke stanovení objemu a povrchu pláště elementu průsakové cesty (element průsakové cesty byl vymezen dvěma příčnými řezy vzdálenými standardně 10 mm). Vzhledem k tomu, že rychlost eroze je definována hmotností erodovaného materiálu, byl výpočet prováděn pro jednotlivé elementy průsakové cesty. Odchytky ze stanovení šířky a hloubky průsakové cesty platily pro oba příčné řezy vymežující element průsakové cesty. Tyto základní odchytky se pak projeví i v odchylkách průřezových ploch průsakové cesty, v průměrné průřezové ploše, v objemu elementu průsakové cesty, v průměrném obvodu dna průsakové cesty (jedná se o omočený obvod nezahrnující horní stěnu, kterou tvoří propustoměr) a v průměrné ploše pláště elementu (plocha dna elementu). Dále byla do experimentů vnesena odchylka ze stanovení objemové hmotnosti materiálu, která ovlivnila výslednou hmotnost erodovaného materiálu. Odchytky měřených veličin ukazuje tab. 6.12. Provedením kombinací byly postupně zjištěny absolutní i relativní odchylky výše vypsáných veličin a následně i hledané odchylky rychlosti eroze (tab. 6.13). Postup stanovení odchylek obsahuje příložené CD.

Tab. 6.12 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin pro stanovení rychlosti eroze

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Šířka průsakové cesty	c_s	15,0 mm	0,5 mm	3,30
Hloubka průsakové cesty	c_{hl}	5,0 mm	0,5 mm	10,00
Objemová hmotnost materiálu	ρ_v	1822 kg/m ³	10 kg/m ³	0,55

Tab. 6.13 Absolutní a relativní odchylky vypočtených veličin pro stanovení rychlosti eroze

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Průměrná průřezová plocha elementu	A_{prum}	58,91 mm ²	6,97 mm ²	11,8
Objem elementu	V_E	5,89×10 ⁻⁷ m ³	6,97×10 ⁻⁸ m ³	11,8
Hmotnost materiálu mezi řezy	m_E	1,07×10 ⁻³ kg	1,34×10 ⁻⁴ kg	12,45
Průměrný obvod dna průsakové cesty	$O_{d, prum}$	19,83 mm	1,13 mm	5,71
Průměrná průřezová plocha elementu	A_{prum}	1,98×10 ⁻⁴ m ²	1,13×10 ⁻⁵ m ²	5,71
Rychlost eroze	$\dot{\epsilon}$	0,130 kg/s/m²	0,016 kg/s/m²	12,50

6.5.2.5 Odchytky při výpočtu středního hydraulického gradientu při zpětné erozi

Střední hydraulický gradient při zpětné erozi je v analýze využíván k vazbě na rychlost eroze. Jeho odchytky jsou dány přesností stanovení výšky hladiny v horní nádrži a v přípravku pro sedimentaci, délkou vzorku a délkou průsakové cesty. Vyčíslení absolutních a relativních odchylek obsahuje příložené CD, konečné hodnoty pak shrnuje tab. 6.14.

Tab. 6.14 Absolutní a relativní odchytky veličin pro stanovení středního hydraulického gradientu při zpětné erozi

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Výška hladiny v nádrži při zpětné erozi	$H_{nádrž,z}$	400 mm	1 mm	0,25
Výška hladiny v přípravku pro sedimentaci při intenzivní erozi	$H_{sed,z}$	99 mm	0,5 mm	0,5
Délka vzorku	l_{vzorek}	200 mm	1 mm	0,5
Délka průsakové cesty	L_{cesta}	120 mm	2 mm	1,7
Střední hydraulický gradient při zpětné erozi	$J_{stř,z}$	3,76	0,17	4,4

6.5.2.6 Odchytky při výpočtu středního hydraulického gradientu při boční erozi

Střední hydraulický gradient při boční erozi je v analýze využíván k výpočtu tečného napětí vyvolaného prouděním vody průsakovou cestou. Jeho odchytky jsou dány přesností stanovení výšky hladiny v horní nádrži a v přípravku pro sedimentaci, a délkou vzorku. Vyčíslení všech absolutních a relativních odchylek obsahuje příložené CD, konečné hodnoty shrnuje tab. 6.15.

Tab. 6.15 Absolutní a relativní odchytky veličin pro stanovení středního hydraulického gradientu při boční erozi

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Výška hladiny v nádrži při boční erozi	$H_{nádrž,b}$	400 mm	1 mm	0,25
Výška hladiny v přípravku pro sedimentaci při intenzivní erozi	$H_{sed,b}$	99 mm	0,5 mm	0,5
Délka vzorku	l_{vzorek}	200 mm	1 mm	0,5
Střední hydraulický gradient při boční erozi	$J_{stř,b}$	1,51	0,015	1,0

6.5.2.7 Odchytky ze stanovení tečného napětí při boční erozi

Tečné napětí bylo využito pro pozdější stanovení koeficientu eroze a kritického tečného napětí. Výpočet tečného napětí je dán hustotou vody, hydraulickým poloměrem, tíhovým zrychlením a hydraulickým gradientem stanoveným při boční erozi. Odchytky hustoty vody a hydraulického gradientu byly vyčísleny v předchozích kapitolách.

Převážný vliv na odchylku má vyčíslení hydraulického poloměru, který je dán průřezovou plochou a obvodem průsakové cesty. Odchytky těchto veličin i výsledného tečného napětí jsou shrnuty v tab. 6.16.

Tab. 6.16 Absolutní a relativní odchylky pomocných veličin a tečného napětí

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Průřezová plocha elementu	A_{XS}	58,9 mm ²	6,97 mm ²	11,8
Obvod dna průsakové cesty	O_{XS}	19,83 mm	1,12 mm	5,7
Tečné napětí	τ	43,8 Pa	8,6 Pa	19,7

6.5.2.8 Diskuse k nejistotám

Souhrn stanovených absolutních a relativních odchylek uvádí tab. 6.17. Odchylka v rychlosti eroze přesahuje 12 %. Ačkoliv se odchylka může zdát vysoká, vzhledem k nejistotám v konfiguraci zrn materiálu ve vzorku, vlivu klenbového účinku mezi zrny a vlivu měřítka experimentu, je možné ji prohlásit za tolerovatelnou. Odchytky v rychlosti eroze a ve středních hydraulických gradientech při intenzivní erozi mají další vliv na sestavení vztahu pro výpočet rychlosti zpětné eroze, příp. i na stanovení koeficientů eroze při analýze boční eroze průsakové cesty.

Tab. 6.17 Souhrn absolutních a relativních odchylek vyhodnocovaných veličin

Veličina	Značka veličiny	Typická hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka [%]
Pórovitost materiálu	n	0,330	0,0065	1,85
Hydraulická vodivost vzorku	k	$1,302 \times 10^{-4}$ m/s	$9,6 \times 10^{-6}$ m/s	7,50
Kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty	J_c	1,00	0,05	5,00
Rychlost eroze	$\dot{\epsilon}$	0,130 kg/s/m ²	0,016 kg/s/m ²	12,50
Střední hydraulický gradient při zpětné erozi	$J_{stř,z}$	3,76	0,17	4,4
Střední hydraulický gradient při boční erozi	$J_{stř,b}$	1,51	0,015	1,0

6.5.3 Vlastní výsledky, porovnání a diskuse

Následující kapitola shrnuje dosažené výsledky. Pro přehlednost je zde pro každou vyhodnocovanou veličinu přímo uvedeno porovnání s dostupnou literaturou a diskuse.

6.5.3.1 Použitelnost vybraných materiálů pro experimenty

Během výzkumu byl pro vybrané materiály pozorován vliv jejich vlastností (pórovitost, zrnitost, číslo nestejnozrnnosti, měrná hmotnost zrn, úhel vnitřního tření, tvar a drsnost zrn) na celkový průběh experimentu a jeho výsledky (např. závislost kritického hydraulického gradientu na pórovitosti materiálu nebo na čísle nestejnozrnnosti). Obecně je možné říct, že

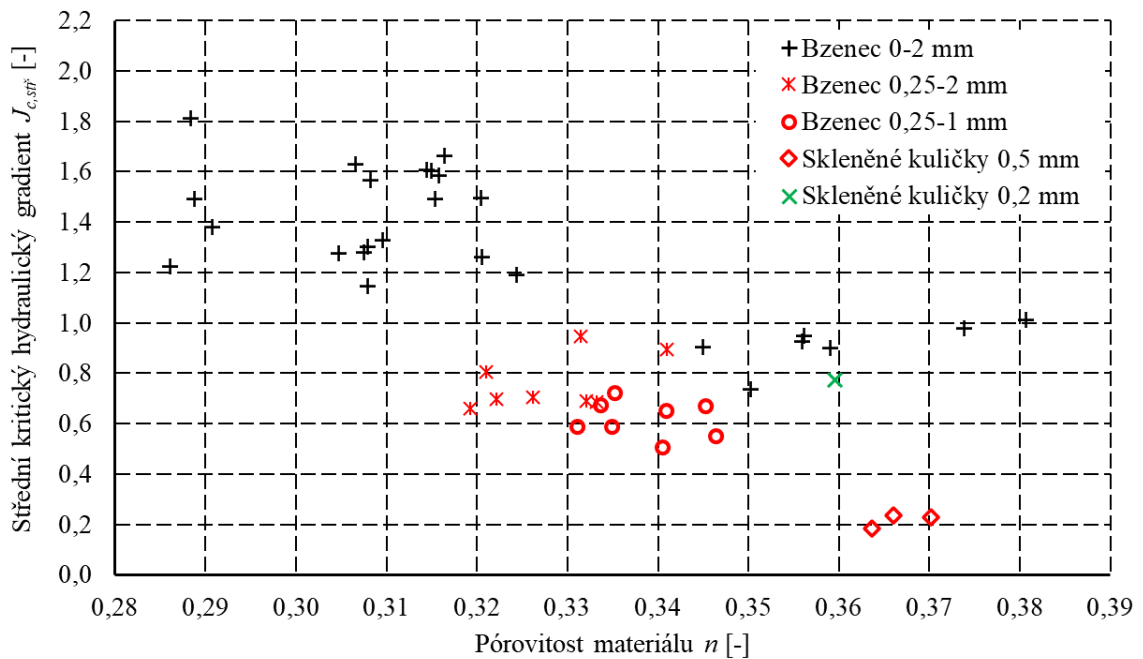
materiál Bzenec byl pro experimenty použitelný ať se jednalo o jakoukoliv jeho frakci. Písky bylo možné hutnit a dosahovat různých pórovitostí, při přípravě vzorku nedocházelo ke vzniku privilegované štěrbině mezi vzorkem a horní stěnou propustoměru, a byly sledovány závislosti, které jsou popsány v kapitolách 6.5.3.2 až 6.5.3.8.

Skleněné kuličky se naopak ukázaly být velice problematické ať už z hlediska přípravy, tak i během experimentu. Vzhledem k tomu, že se jednalo o stejnoznámý materiál, nebylo možné dosáhnout takové míry zhutnění jako v případě bzeneckých písků. Bylo testováno hutnění celého vzorku po dobu 1 až 2 minuty i hutnění po vrstvách tl. 3 cm s hutněním 30 s. Ve všech případech nebyla dosažena pórovitost nižší než 0,36 (viz obr. 6.39). S tímto závěrem bylo usouzeno, že nižší pórovitosti dosáhnout pravděpodobně nelze. Dalším problémem byla i hladkost a kulatost zrn, kvůli které po přípravě vzorku a uzavření propustoměru došlo při jeho otáčení do horizontální polohy k přeskupení zrn a k vytvoření mezery mezi horní deskou propustoměru a povrchem vzorku. Tato mezera nebyla okem zřetelná, tudíž ji nebylo možné zdokumentovat. Její efekt se projevil během experimentu tím, že nedocházelo ke zpětné erozi předdefinované průsakové cesty nýbrž k erozi prakticky celého povrchu vzorku. Kritický hydraulický gradient byl navíc obtížně zjistitelný vzhledem k obtížnosti sledování počátku eroze (horší kontrast mezi materiálem a průsakovou cestou). Výše popsané problémy nebylo možné eliminovat. Kritický hydraulický gradient jevu byl zaznamenán a je pro ilustraci uváděn v následujících kapitolách. Navíc pro 3 provedené experimenty na skleněných kuličkách nebylo dosaženo takového rozsahu hodnot, aby bylo možné identifikovat jakoukoliv závislost kritického hydraulického gradientu na pórovitosti (viz obr. 6.39 a 6.42), což opět svědčí o nevhodnosti materiálu pro tento typ experimentu. V případě experimentu na skleněných kuličkách průměru 0,2 mm nebyl hledaný kritický hydraulický gradient zaznamenán vůbec, bylo možné odvodit pouze jeho střední hodnotu (viz obr. 6.39). Je možné konstatovat, že skleněné kuličky jsou pro svůj charakter materiálem nevyhovujícím k testování vzhledem k nemožnosti dosáhnout vyššího rozsahu pórovitostí a zároveň správně připravit vzorek. Proto nebudou výsledky experimentů do dalších analýz zahrnovány a budou uváděny pouze ilustrativně.

6.5.3.2 *Střední kritický hydraulický gradient*

Pro porovnání kritických hydraulických gradientů s ostatními autory bylo provedeno odvození jejich středních hodnot na základě polohy horní a dolní hladiny vody v zařízení při počátku eroze čela průsakové cesty. Grafické zobrazení závislosti hodnot středního

kritického hydraulického gradientu $J_{c, stř}$ na pórovitosti materiálu n pro jednotlivé materiály ukazuje obr. 6.39. Zde je možné pozorovat klesající tendenci středního kritického hydraulického gradientu se stoupající pórovitostí, což byl očekávaný jev. Taktéž je možné vidět, že pro materiály Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm nebylo dosaženo tak velkého rozsahu pórovitostí jako v případě materiálu Bzenec 0-2 mm. To je připisováno absenci jemných částic, které by vyplnily větší póry.



Obr. 6.39 Střední kritické hydraulické gradienty v závislosti na pórovitosti materiálu

Porovnání s ostatními autory

Dle tab. 2.1 až 2.3 lze pro testované materiály identifikovat přibližnou hodnotu středního kritického hydraulického gradientu. Vzhledem k omezenému množství dat o publikovaných materiálech v tab. 2.1 až 2.3 byl do následujícího přehledu volen vždy materiál nejbližší testovanému:

- dle Bligha (1910) – hrubozrný písek: $J_c = 0,083$;
- dle Griffitha (1913) – jemný křemenný písek: $J_c = 0,080$ až $0,071$;
- dle Lanea (1934) – středně zrněný písek: $J_c = 0,167$;
- dle Chugaeva (1962) – středně zrněný písek: $J_c = 0,15$;
- dle VNIIG (1976) – středně zrněný písek (podloží betonových hrází): $J_c = 0,26$;
- dle Müller-Kirchenbauera et al. (1993) – středně zrněný písek: $J_c = 0,08$ až $0,10$;
- dle Weijerse a Sellmeijera (1993) – středně zrněný písek ($C_U = 1,5$): $J_c = 0,16$ až $0,24$;
- dle van Beek (2015) – přesetý říční písek dle obr. 2.1: $J_c = 0,35$ až $0,5$.

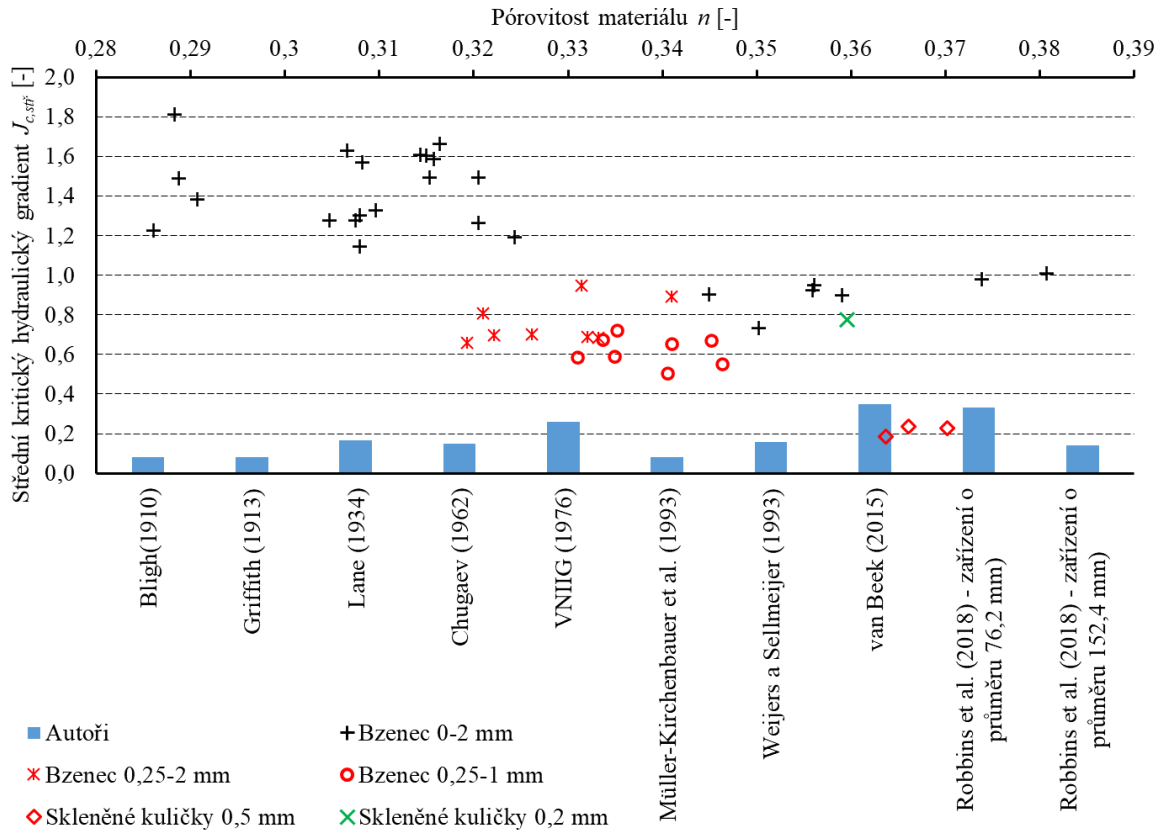
Všichni z výše uvedených autorů uvádějí hodnotu do 0,3. Výsledky experimentů uváděnou hodnotu převyšují 9krát. Důvodem takto rozdílných hodnot může být:

1. rozdílnost analyzovaných materiálů (např. Bligh (1910) uvádí hodnoty pouze pro hrubozrnný písek),
2. metodika experimentu,
3. způsob stanovení středního kritického hydraulického gradientu $J_{c, stř.}$,
4. bezpečnostní rezerva vnesená do dat: Bligh (1910), Lane (1934) a Chugaev (1962) uvádí hodnoty založené na sledování vodních děl. Ze sledování pak odvodili bezpečné hydraulické gradienty. Jejich vztahy však nezohledňují vlivy pórovitosti ani jiných charakteristik materiálu a spoléhají pouze na obecný popis materiálu. VNIIG (1976) uvádí přípustné hodnoty hydraulických gradientů. Do těchto dat již byla vložena bezpečnostní rezerva. Weijers a Sellmeijer (1993), Müller-Kirchenbauer et al. (1993) a van Beek (2015) pak uvádí přímo výsledky experimentů.
5. porovnávání charakteristické a návrhové hodnoty: v některých případech je v literatuře přímo uváděna pouze návrhová hodnota středního kritického hydraulického gradientu, která bývá až 5krát podhodnocená. Návrhové hodnoty se však používají pro přímá posouzení vodních děl, ale pro porovnávání dat z experimentů jsou naprosto nevhodné.

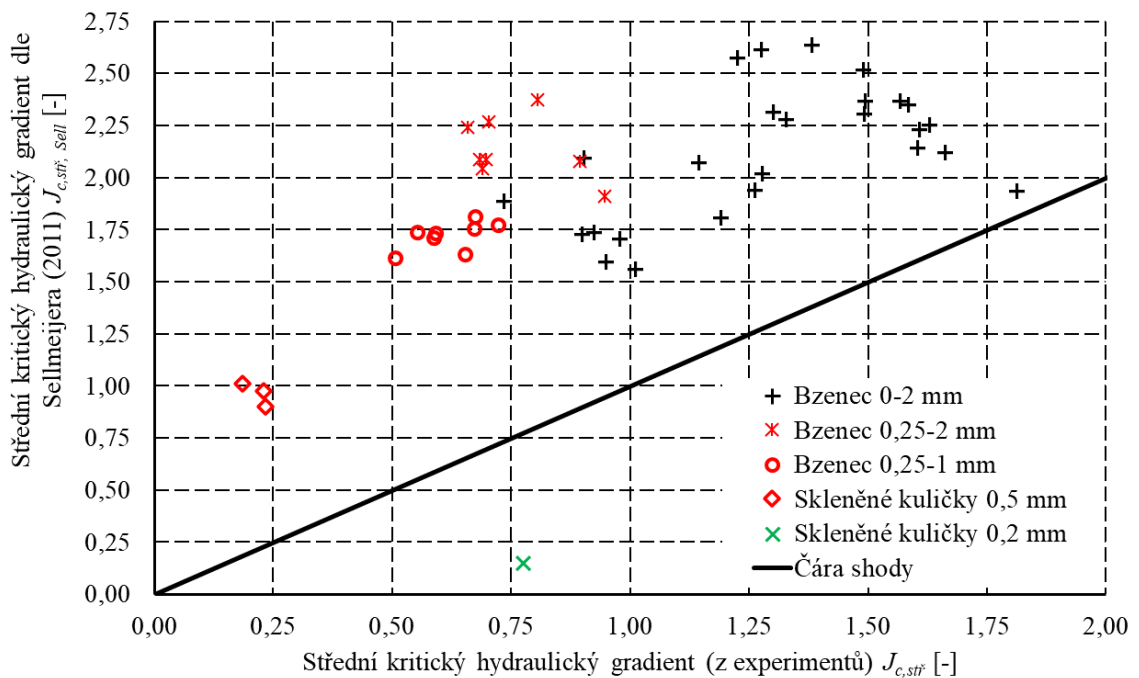
Střední hydraulický gradient byl porovnán i se vztahem dle Schmertmanna (2000), který jej definuje v závislosti na čísle nestejnozrnnosti rovnice (2.3). Porovnání a míru shody ukazuje obr. 6.40. Vztah dle Schmertmanna (2000) zcela nezohledňuje vliv pórovitosti materiálu i velikost a tvar zrn a uvažuje pouze s faktorem nestejnozrnnosti materiálu. Z toho důvodu jsou vypočtené hodnoty oproti výsledkům z experimentů nižší 2 až 5krát.

Porovnáním obr. 2.1 a 6.39 je patrné, že hodnoty středního kritického hydraulického gradientu jsou až 1,8krát vyšší než hodnoty, které publikovala van Beek (2015). Zde je však třeba poukázat na rozdíly mezi použitým materiálem a dosahovanou pórovitostí materiálu. Při experimentech bylo dosaženo pórovitostí 0,29 až 0,38 zatímco van Beek (2015) popisuje interval pórovitosti 0,32 až 0,41. Obecně lze konstatovat, že lepší shodu s daty van Beek (2015) vykazují materiály Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm, pro které je kritický hydraulický gradient nejčastěji v rozsahu 0,6 až 0,8 a odpovídají lépe i dosahované pórovitostí materiálu.

výpočet v rámci disertační práce. Pro provedené experimenty byla hodnota f_G blízká 1, což pravděpodobně vztah nemůže zohlednit, protože je odvozen pro skutečné hráze, kde tloušťka vrstvy písku je podstatně menší než průsaková délka.



Obr. 6.41 Porovnání vypočteného středního hydraulického gradientu s ostatními autory



Obr. 6.42 Porovnání středního kritického hydraulického gradientu s výpočty dle Sellmeijera (2011)

Tab. 6.18 Shrnutí stanovených kritických hydraulických gradientů

Materiál	Číslo exp.	Označení exp.	Pórovitost materiálu n	Sřední kritický hydraulický gradient $J_{c,stř}$	Kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty J_c
	[-]		[-]	[-]	[-]
Bzenec 0-2 mm	4	B_0-2_4	0,288	1,81	4,18
	5	B_0-2_5	0,381	1,01	2,00
	6	B_0-2_6	0,307	1,28	2,83
	7	B_0-2_7	0,307	1,63	3,85
	9	B_0-2_9	0,316	1,58	3,80
	10	B_0-2_10	0,310	1,33	3,43
	11	B_0-2_11	0,308	1,57	3,80
	12	B_0-2_12	0,315	1,60	3,60
	13	B_0-2_13	0,314	1,61	4,20
	14	B_0-2_14	0,374	0,98	1,68
	15	B_0-2_15	0,359	0,90	1,80
	18	B_0-2_18	0,315	1,49	3,63
	19	B_0-2_19	0,356	0,95	2,63
	20	B_0-2_20	0,350	0,73	1,48
	21	B_0-2_21	0,320	1,49	3,48
	22	B_0-2_22	0,321	1,26	3,20
	23	B_0-2_23	0,324	1,19	3,48
	24	B_0-2_24	0,308	1,14	3,23
	25	B_0-2_25	0,316	1,66	3,60
	27	B_0-2_27	0,291	1,38	3,70
	28	B_0-2_28	0,286	1,23	3,28
	29	B_0-2_29	0,289	1,49	3,90
	30	B_0-2_30	0,305	1,28	2,85
	32	B_0-2_32	0,308	1,30	3,93
33	B_0-2_33	0,356	0,93	2,05	
34	B_0-2_34	0,345	0,90	2,88	
Bzenec 0,25-2 mm	1	B_0,25-2_1	0,319	0,66	1,48
	2	B_0,25-2_2	0,326	0,70	2,20
	3	B_0,25-2_3	0,333	0,68	1,80
	4	B_0,25-2_4	0,322	0,70	1,55
	5	B_0,25-2_5	0,321	0,81	1,48
	6	B_0,25-2_6	0,332	0,69	1,70
	7	B_0,25-2_7	0,331	0,95	2,13
	8	B_0,25-2_8	0,341	0,89	1,65
Bzenec 0,25-1 mm	1	B_0,25-1_1	0,334	0,68	1,55
	2	B_0,25-1_2	0,341	0,65	1,40
	3	B_0,25-1_3	0,345	0,67	1,35
	4	B_0,25-1_4	0,335	0,72	1,68
	5	B_0,25-1_5	0,340	0,51	1,38
	6	B_0,25-1_6	0,331	0,59	1,48
	7	B_0,25-1_7	0,335	0,59	1,43
	8	B_0,25-1_8	0,346	0,55	1,13
Skleněné kuličky 0,5 mm	1	SK_0,51	0,370	0,23	0,48
	2	SK_0,52	0,366	0,23	0,48
	3	SK_0,53	0,364	0,19	0,45
Skleněné kuličky 0,2 mm	1	SK_0,21	0,360	0,78	-

6.5.3.3 Kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty

Jednou z hlavních sledovaných veličin v této práci je kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty. Pro jednotlivé experimenty bylo provedeno zobrazení jeho závislosti na pórovitosti materiálu (obr. 6.43), velikosti zrna d_{10} , d_{17} , d_{50} , d_{60} (obr. 6.44 až 6.47), na čísle nestejnozrnnosti (obr. 6.48) a měrné hmotnosti zrn (obr. 6.49). Následující kapitoly popisují pozorovatelné vlivy výše vyjmenovaných veličin.

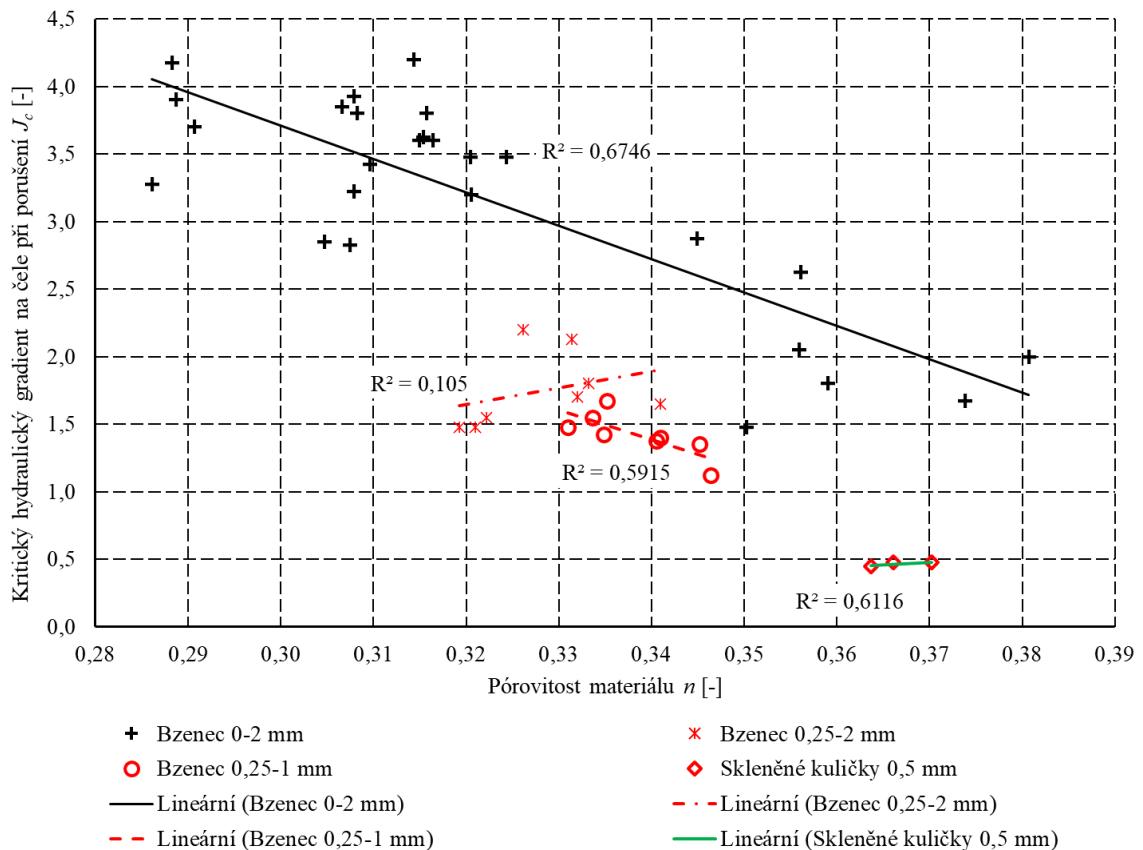
6.5.3.3.1 Vliv pórovitosti

Jak bylo popsáno dříve, vzorky byly připravovány s různým stupněm zhutnění. Postup byl zvolen ze dvou důvodů. Prvním důvodem byla nahodilost pórovitosti po zhutnění, což je dáno metodou přípravy a typem použitého materiálu. Nebylo tedy možné dosahovat shodné pórovitosti u jednotlivých vzorků. Druhým důvodem byla snaha vyšetřit právě vliv pórovitosti na kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty.

Pro materiál Bzenec 0-2 mm je možné na obr. 6.43 pozorovat, že se stoupající pórovitostí materiálu kritický hydraulický gradient klesá. Tento výsledek byl očekávaný, neboť s vyšší pórovitostí klesá objemová hmotnost materiálu a tím i celková odolnost materiálu vůči počátku eroze (viz rozbor sil v kapitole 5.3.1). Odolnost proti počátku eroze zároveň souvisí se zrnitostí materiálu (viz kapitola 6.5.3.3.2) a s měrnou hmotností zrn (kapitola 6.5.3.3.4). Obdobný efekt pórovitosti lze pozorovat i u materiálu Bzenec 0,25-1 mm. Materiál Bzenec 0,25-2 mm vykazuje nárůst kritického hydraulického gradientu s pórovitostí oproti Bzenci 0-2 mm, a to hlavně kvůli shluku tří bodů měření kolem hodnoty hydraulického gradientu 1,5 v obr. 6.43, což může indikovat potřebu více experimentů na daném materiálu. Výsledky experimentů na skleněných kuličkách jsou v obrázku uvedeny pouze pro ilustraci, kdy není možné pozorovat závislost kritického hydraulického gradientu na pórovitosti, a to hlavně kvůli nedostatečnému rozsahu pórovitosti a kvůli problémům s dosažením pórovitosti pod hodnotu 0,36 (viz kapitola 6.5.3.1).

Dále je možné na obr. 6.43 pozorovat vliv zrnitosti materiálu a případně i čísla nestejnozrnnosti a na dosaženou pórovitost a kritický hydraulický gradient. Je-li materiál Bzenec 0-2 mm uvažován jako referenční, pak čím více frakcí je z něj odstraněno (nejdříve byla odstraněna zrna $< 0,25$ mm a následně i > 1 mm), tím je číslo nestejnozrnnosti vyšší a tím vyšší jsou i dosažené pórovitosti materiálu, což je přímo spojeno s nižšími měřenými hodnotami kritických hydraulických gradientů na čele průsakové cesty. Zároveň je možné si

všimnout mnohem menších intervalů dosahovaných pórovitostí oproti základnímu materiálu, což je připisováno právě změněnému zrnitostnímu složení materiálu. Během přípravy vzorků bylo zjištěno, že upravené materiály jsou mnohem snáze zhutnitelné. Vzhledem k tomu, že k malé míře zhutnění dochází již při ukládání materiálu do propustoměru, nebylo možné připravovat vzorky s vyšší pórovitostí než s toku, která je prezentována v této práci.

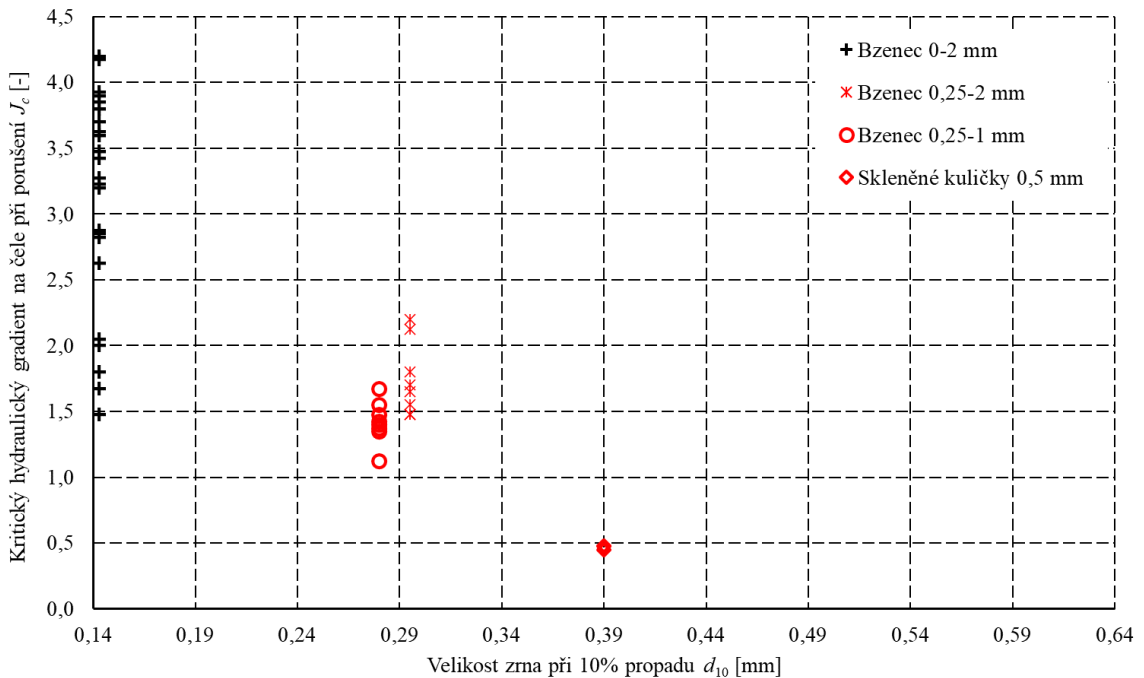


Obr. 6.43 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na pórovitosti

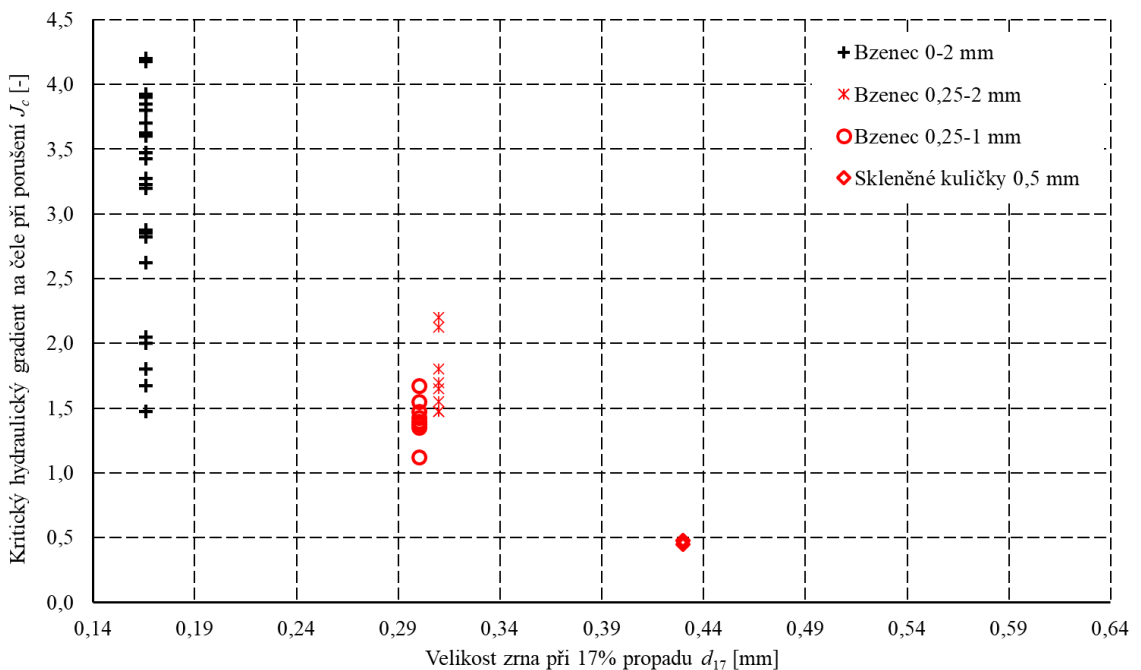
6.5.3.3.2 Vliv velikosti zrn

Zrnitost materiálu významně ovlivňuje dosažené hodnoty pórovitosti materiálu, a tedy i kritického hydraulického gradientu. Vlivy velikosti zrn d_{10} , d_{17} , d_{50} a d_{60} jsou ukázány v obr. 6.44 až 6.47. Na nich je možné pozorovat, že materiál Bzenec 0-2 mm vykazuje větší rozsah hodnot kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty než materiály Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm. Dále je možné pozorovat, že materiál Bzenec 0,25-1 mm dosahuje nižších kritických hydraulických gradientů než Bzenec 0,25-2 mm, které zároveň vykazují i menší rozsah hodnot. To je způsobeno procentuálním rozdělením velikostí zrn v materiálu. V případě materiálu Bzenec 0,25-2 mm je třeba vyššího hydraulického gradientu pro zahájení eroze, neboť zrna o větším průměru

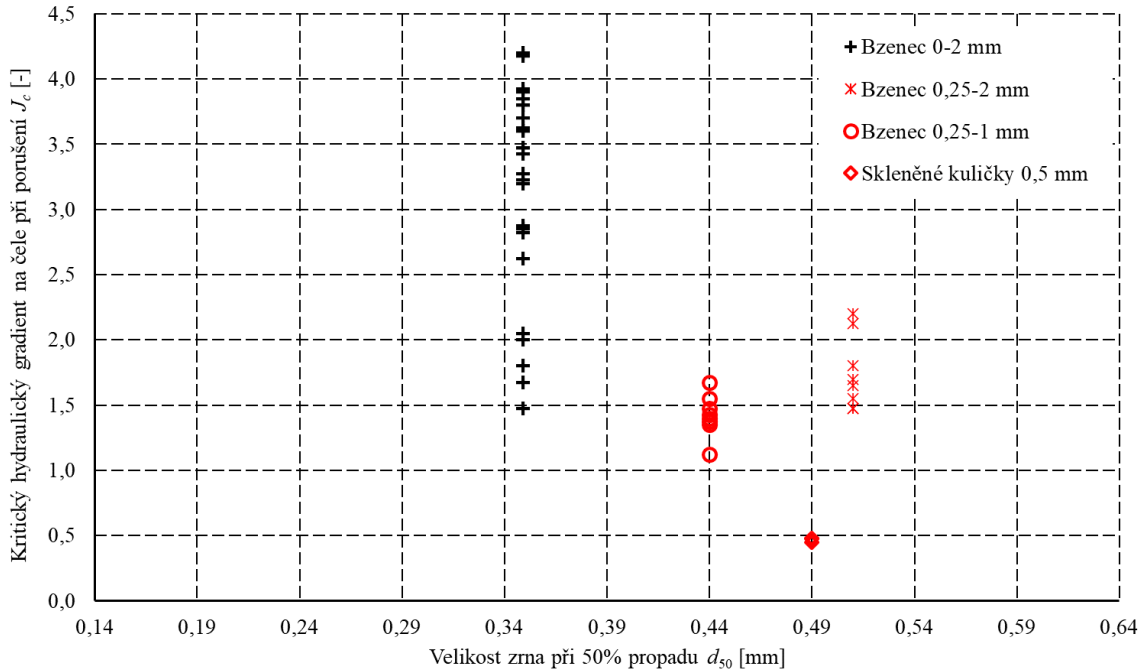
mají vyšší hmotnost a tím je třeba vyvinout větší sílu pro uvedení částic do pohybu. Rozdíl v zrnitosti materiálu je možné pozorovat i v obr. 6.43, kdy pro zvolenou pórovitost materiálu je možné pozorovat různé hodnoty kritického hydraulického gradientu pro Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm.



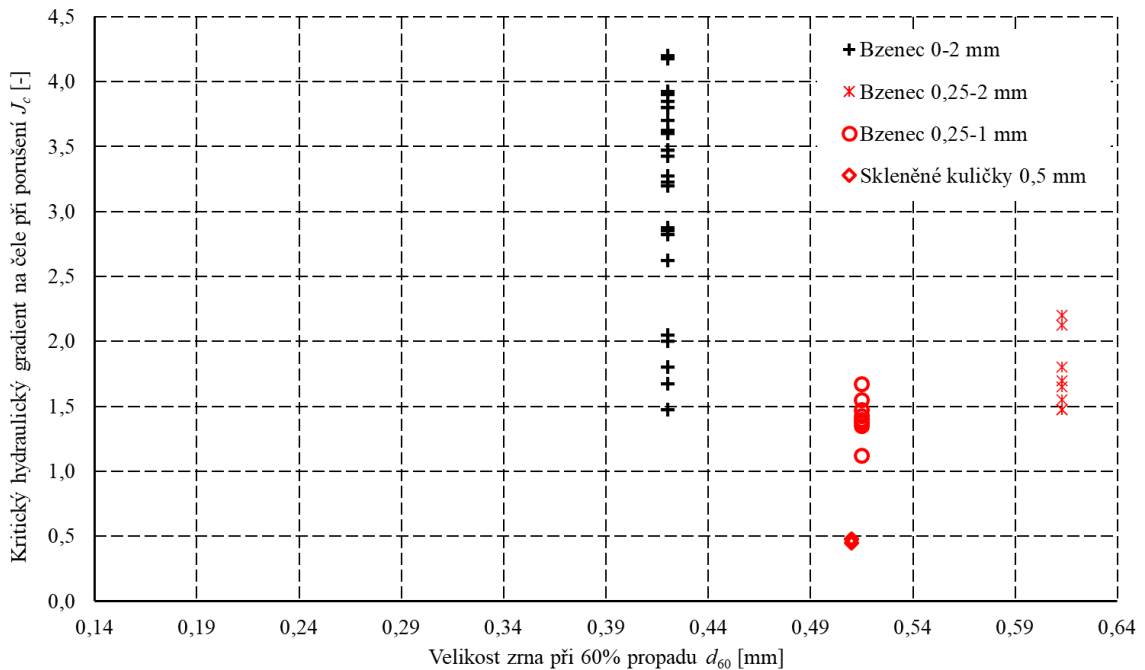
Obr. 6.44 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{10}



Obr. 6.45 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{17}



Obr. 6.46 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{50}



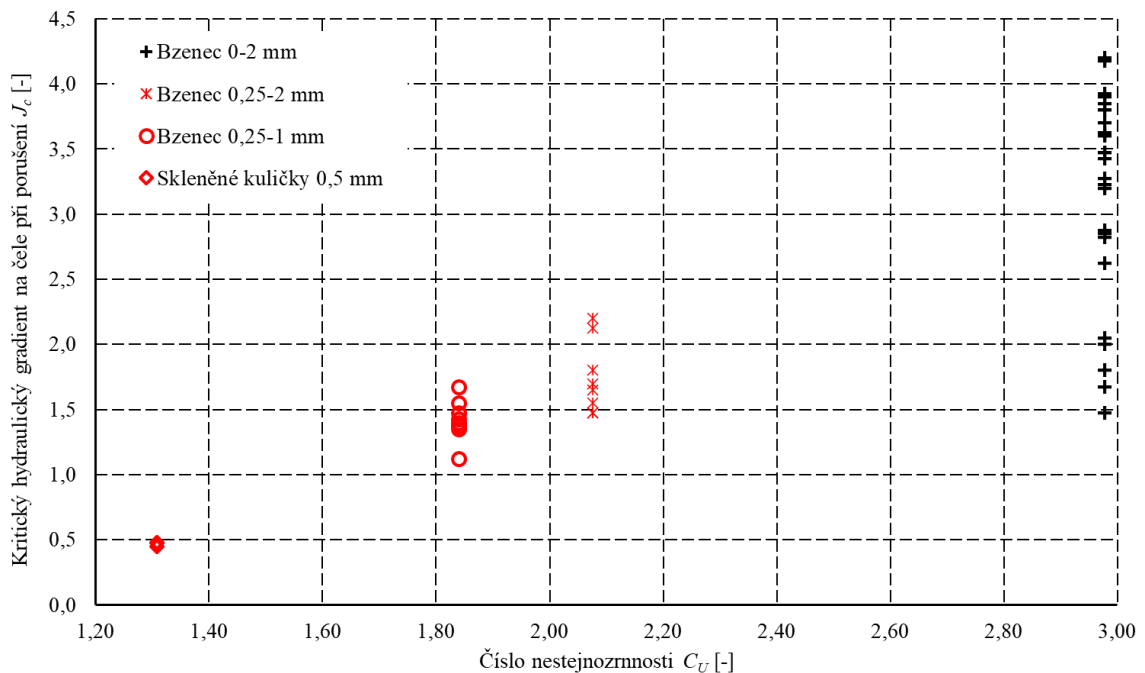
Obr. 6.47 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{60}

6.5.3.3.3 Vliv nesterjnozrnnosti

Všechny použité materiály pro experimenty byly dle Šimka et al. (1990) stejnozrnné ($C_U < 5$). Přesto byly zaznamenány rozdílné rozsahy hodnot kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty, které ukazuje obr. 6.48. Zde je možné pozorovat, že při odebrání zrnitostních frakcí klesá číslo nesterjnozrnnosti a s ním i kritický

hydraulický gradient. Vliv je však nepřímý, neboť prakticky není ovlivňován hydraulický gradient, ale pórovitost materiálu (viz obr. 6.43). Zde platí, že čím bude podíl jemnozrnné frakce v materiálech menší, tím bude pórovitost materiálu vyšší, neboť vzniklé póry nebudou zaplněny právě těmito jemnými zrny. Tímto zvýšením pórovitosti je pak ovlivněna odolnost zeminy proti počátku zpětné eroze.

Efekt byl předpokládán již před provedením experimentů. Právě proto byly pro testování zvoleny i skleněné kuličky, které mají číslo nestejnozrnnosti blízké 1,0, avšak později se ukázala jejich nevhodnost pro experimenty (kapitola 6.5.3.1) a na obr. 6.48 jsou uvedeny jen ilustrativně. Číslo nestejnozrnnosti též kleslo při vyloučení zrn větších než 2 mm (materiál Bzenec 0,25-1 mm). Taktéž klesl i kritický hydraulický gradient, což je možné vysvětlit tím, že se zde uplatnil efekt velikosti zrna pro zahájení jejich pohybu: na rozdíl od materiálu Bzenec 0,25-1 mm, u kterého je maximální velikost zrna 1 mm, bylo u materiálu Bzenec 0,25-2 mm třeba transportovat také zrna o velikosti až 2 mm, což teoreticky vyžaduje vyvinutí větší síly, resp. vyššího tlaku.

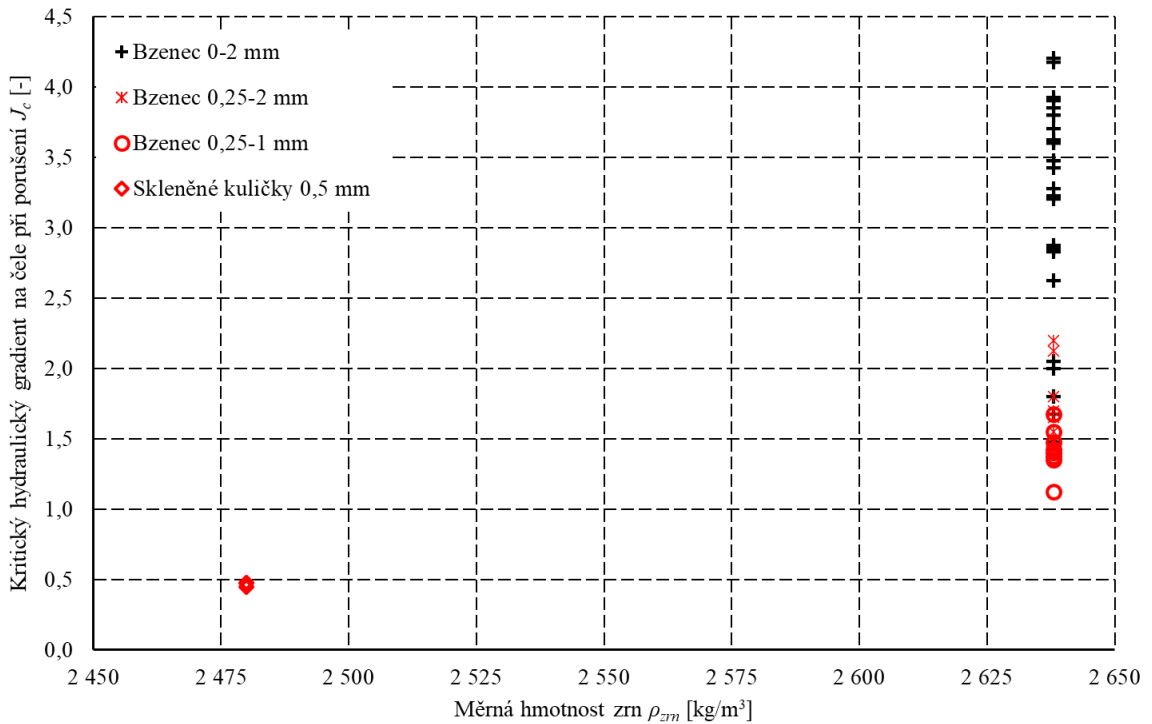


Obr. 6.48 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na čísle nestejnozrnnosti

6.5.3.3.4 Vliv měrné hmotnosti zrn

Vyšetření vlivu měrné hmotnosti zrn ukazuje obr. 6.49. Zde je možné pozorovat, že vliv měrné hmotnosti zrn není experimenty dostatečně zachycen. Důvodem bylo selhání experimentů prováděných se skleněnými kuličkami a celková časová náročnost každého experimentu. Nicméně lze předpokládat, že s rostoucí měrnou hmotností zrn (tj. s rostoucí

hmotností zrn) bude stoupat i kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty potřebný pro zahájení eroze. V případě dalšího výzkumu zpětné eroze průsakové cesty na prezentovaném zařízení se doporučuje použít i jiné materiály s odlišnou měrnou hmotností zrn.



Obr. 6.49 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na měrné hmotnosti zrn

6.5.3.3.5 Ostatní vlivy

Dle rovnice (5.19) lze popsat i další veličiny, které mají na výsledky vliv:

- objemová hmotnost materiálu ρ_V ,
- úhel vnitřního tření φ ,
- úhel sklonu svahu α .

Objemová hmotnost materiálu, resp. vzorku, je přímo vázána na vyšetřovanou pórovitost, jejíž efekt byl popsán v kapitole 6.5.3.3.1. Úhel vnitřního tření byl na materiálu pouze odhadnut na hodnotu 41° a nebyl dále vyšetřován z důvodu omezených možností laboratoře a vzhledem k časové náročnosti příslušných zkoušek. Obecně však lze konstatovat, že se zvětšujícím se průměrem zrn stoupá i velikost úhlu vnitřního tření. Při použití diametrálně odlišných materiálů příp. i jiného modelového měřítka, než které měly prováděné experimenty, se doporučuje sledovat i vliv této veličiny. Sklon svahu na čele průsakové cesty je přímo ovlivněn velikostí úhlu vnitřního tření. Při prováděných experimentech nebyla veličina měřena z důvodu omezených možností laboratoře a vzhledem k povaze

experimentu. Řešením, jak veličinu měřit by bylo průběžné měření tvaru a hloubky průsakové cesty pomocí laseru s výstupem do počítačového programu. Tímto způsobem by bylo možné na základě hloubek cesty a vzdáleností stanovit sklony svahů jak na čele průsakové cesty, tak i podél jejích stěn.

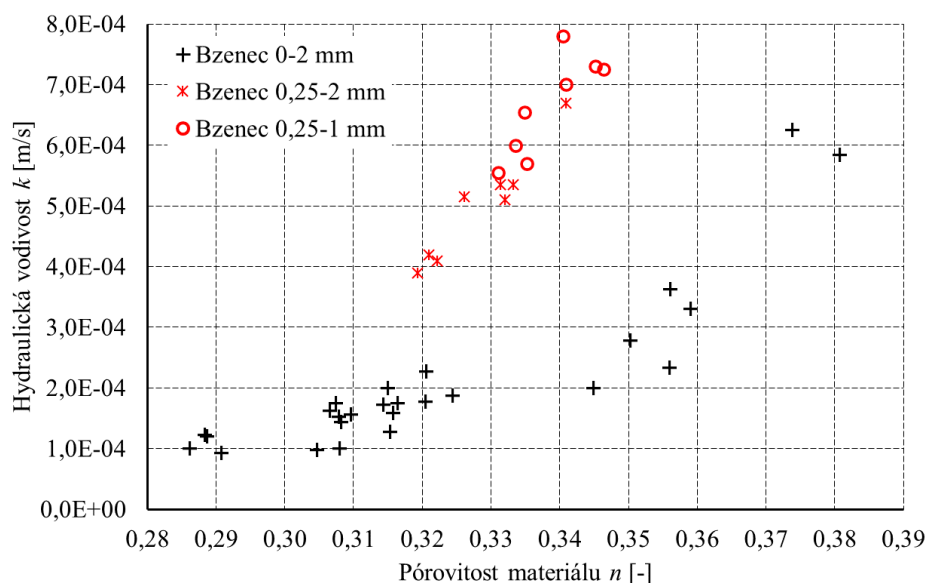
Porovnání s ostatními autory

Kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty zatím není možné porovnávat s dostupnou literaturou, která se soustředí pouze na střední hydraulický gradient podél vzorku, nebo je pozorování hydraulických gradientů limitováno jinou vzdáleností piezometrů, než bylo použito v této práci. Příkladem může být práce Robbinse et al. (2018), kde je sice pozorován hydraulický gradient ve více místech podél celého vzorku, ale za použití piezometrů vzdálených 10 cm. Lokální gradient na čele průsakové cesty je tak zkruslený.

6.5.3.4 Hydraulická vodivost vzorku

Hydraulická vodivost byla pro jednotlivé vzorky stanovena numerickým modelem na základě měřených průtoků a průběhů piezometrických výšek. Celý postup stanovení je popsán v kapitole 6.5.1.4, shrnutí hodnot obsahuje tab. 6.19 a příloha 6.

Hydraulická vodivost primárně závisí na pórovitosti materiálu (Bear a Verruijt, 1987). Graf takové závislosti ukazuje obr. 6.50. Zde je možné pozorovat, že se zvyšující se pórovitostí stoupá i hydraulická vodivost. Při širším pohledu na rozdílné materiály byl identifikován i nepřímý vliv zrnitosti na hydraulickou vodivost související i s obtížností připravit méně pórovité vzorky.



Obr. 6.50 Závislost hydraulické vodivosti na pórovitosti materiálu

Tab. 6.19 Shrnutí hydraulických vodivostí stanovených numerickým modelem

Materiál	Označení experimentu	Pórovitost materiálu	Hydraulická vodivost
		n	k
		[-]	[m/s]
Bzenec 0-2 mm	B_0-2_04	0,288	$1,23 \times 10^{-4}$
	B_0-2_05	0,381	$5,84 \times 10^{-4}$
	B_0-2_06	0,307	$1,75 \times 10^{-4}$
	B_0-2_07	0,307	$1,63 \times 10^{-4}$
	B_0-2_09	0,316	$1,59 \times 10^{-4}$
	B_0-2_10	0,310	$1,56 \times 10^{-4}$
	B_0-2_11	0,308	$1,44 \times 10^{-4}$
	B_0-2_12	0,315	$2,00 \times 10^{-4}$
	B_0-2_13	0,314	$1,73 \times 10^{-4}$
	B_0-2_14	0,374	$6,25 \times 10^{-4}$
	B_0-2_15	0,359	$3,31 \times 10^{-4}$
	B_0-2_18	0,315	$1,28 \times 10^{-4}$
	B_0-2_19	0,356	$3,63 \times 10^{-4}$
	B_0-2_20	0,350	$2,78 \times 10^{-4}$
	B_0-2_21	0,320	$1,78 \times 10^{-4}$
	B_0-2_22	0,321	$2,27 \times 10^{-4}$
	B_0-2_23	0,324	$1,87 \times 10^{-4}$
	B_0-2_24	0,308	$1,53 \times 10^{-4}$
	B_0-2_25	0,316	$1,75 \times 10^{-4}$
	B_0-2_27	0,291	$9,24 \times 10^{-5}$
	B_0-2_28	0,286	$1,00 \times 10^{-4}$
	B_0-2_29	0,289	$1,20 \times 10^{-4}$
	B_0-2_30	0,305	$9,72 \times 10^{-5}$
	B_0-2_32	0,308	$1,00 \times 10^{-4}$
B_0-2_33	0,356	$2,33 \times 10^{-4}$	
B_0-2_34	0,345	$1,99 \times 10^{-4}$	
Bzenec 0,25-2 mm	B_0,25-2_01	0,319	$3,90 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_02	0,326	$5,15 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_03	0,333	$5,35 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_04	0,322	$4,10 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_05	0,321	$4,20 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_06	0,332	$5,10 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_07	0,331	$5,35 \times 10^{-4}$
	B_0,25-2_08	0,341	$6,70 \times 10^{-4}$
Bzenec 0,25-1 mm	B_0,25-1_01	0,334	$6,00 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_02	0,341	$7,00 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_03	0,345	$7,30 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_04	0,335	$5,70 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_05	0,340	$7,80 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_06	0,331	$5,55 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_07	0,335	$6,55 \times 10^{-4}$
	B_0,25-1_08	0,346	$7,26 \times 10^{-4}$

Pro materiál Bzenec 0-2 mm se stanovené hydraulické vodivosti pohybovaly v rozmezí cca 1×10^{-4} až $6,3 \times 10^{-4}$ m/s. Materiál Bzenec 0,25-2 mm byl obecně více propustný z důvodu vyloučení zrn menších než 0,25 mm (hydraulická vodivost cca 4×10^{-4} až $6,7 \times 10^{-4}$ m/s). Vzorky z materiálu Bzenec 0,25-1 mm bylo možné připravit pouze s vyššími pórovitostmi než v případě Bzenec 0,25-2 mm, a to z důvodu vyloučení zrn větších než 1 mm.

Hydraulická vodivost Bzence 0,25-1 mm pak byla cca $5,5 \times 10^{-4}$ až $7,8 \times 10^{-4}$ m/s. U obou upravených bzeneckých písků platí, že čím více frakcí bylo vyloučeno (čím byl materiál stejnozrnější), tím vyšších pórovitostí bylo dosahováno. Důvodem je omezení vyplňování pórů jemnějšími zrny.

6.5.3.5 Průběh zpětné eroze

Průběh eroze byl zaznamenáván videokamerou a záznam byl přenesen do tvarů průsakové cesty v čase. Výsledné tvary průsakových cest ze všech provedených experimentů obsahuje příloha 11. Bylo možné pozorovat, že při překročení kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty došlo k mírné erozi, která většinou nevedla k úplnému porušení vzorku a po určité době ustala. Lokální eroze způsobila pokles hydraulického gradientu na čele cesty, resp. došlo k posunutí čela. Důvodem zastavení eroze bylo ustálení erozních podmínek, tj. pokles hydraulického gradientu, změna pórovitosti v okolí průsakové cesty a stabilizace polohy zrn (např. klenbovým účinkem nebo zaklíněním zrn). Vizualní kontrolou erodovaného materiálu po jeho vysušení bylo potvrzeno, že nedochází k vyplavování jemných zrn. Ke zkoušce zrnitosti však nebylo k dispozici dostatek erodovaného materiálu (jen cca 30 až 300 g).

Při dalším zvedání nádrže (tj. hydraulického gradientu) pak došlo k velmi rychlému porušení vzorku zpětnou erozí, které trvalo několik vteřin. Po úplném porušení následovala fáze bočního rozšiřování průsakové cesty. V některých případech nebylo možné rozšiřování průsakové cesty pozorovat z důvodu vysokého průtoku vody, a tudíž nebylo možné stanovit koeficient eroze C_e .

U některých experimentů byla identifikována místa, kdy se průsaková cesta rozdělovala na dvě větve. Tento jev po několika cyklech eroze vymizel a zpětná eroze probíhala v jedné trase. Jevo byl zohledněn při výpočtech rychlosti eroze.

6.5.3.6 Rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty

Průběhy rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty (přílohy 12 a 13) byly stanoveny na základě obrazových (kamerových) záznamů z experimentů. Ze sestavených křivek rychlosti eroze je možné pozorovat postupně se zvyšující rychlost zpětného postupu čela zvláště v závěrečné fázi každého experimentu. Jak zpětná eroze, tak i eroze boční jsou vysoce dynamické procesy. Dochází ke zrychlování postupu čela, který je zapříčiněn zkracováním průsakové délky (bráno od začátku vzorku po čelo průsakové cesty), a ke zvyšování hydraulického gradientu působícího na této délce, které má za následek stále

se zvyšující průsak a vyšší účinek proudu, který působí na zrna materiálu. Dosažená rychlost zpětného postupu čela (tj. před úplným porušením vzorku) se pohybovala v řádu desítek mm/s.

Při některých experimentech došlo naopak ke zpomalení postupu čela. Důvodem může být krátkodobé zvýšení odolnosti čela průsakové cesty např. vytvořením klenby z jednotlivých zrn, nebo obstrukce většími zrny.

Pro očištění od vlivu pórovitosti, která by mohla mít při porovnávání dat experimentů zásadní vliv, byly rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty normovány odpovídající hodnotou pórovitosti materiálu (příloha 12). Navíc byly průběhy rychlostí rozděleny do tří samostatných grafů pro lepší přehlednost (příloha 13). Porovnáním grafů v příloze 13 je možné pozorovat, že normované rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty u materiálu Bzenec 0-2 mm dosahují hodnot cca 0 až 220 mm/s, zatímco u materiálu Bzenec 0,25-2 mm pouze hodnot cca 0 až 130 mm/s. Materiál Bzenec 0,25-1 mm pak vykazuje hodnoty cca 0 až 90 mm/s. Základní materiál tedy vykazuje značnou nahodilost v rychlosti zpětného postupu čela, zatímco materiály s nižším číslem nestejnozrnnosti vykazují rozptyly nižší, ale též i nižší hodnoty obecně. Tento jev opět naznačuje vyšší odolnost upravovaných materiálů vůči erozi.

6.5.3.7 Rychlost eroze průsakové cesty

Rychlost eroze průsakové cesty se v čase postupně zvyšovala v závislosti na zpětném postupu čela cesty. Nejčastěji byla nejvyšší rychlost eroze zaznamenána v okamžiku úplného porušení vzorku, kdy byl primárně odnášen materiál z čela vzorku. Při fázi rozšiřování průsakové cesty (po protržení vzorku) rychlost boční eroze postupně klesala až do momentu ukončení experimentu. Rozšiřováním trubice docházelo k ustalování podmínek v porušeném vzorku (např. změna hydraulického poloměru v průřezu průsakové cesty) a tím i k postupnému poklesu intenzity eroze. Po porušení vzorku též došlo k vyrovnání sklonu čáry energie podél vzorku a také ke zvýšení hydraulické ztráty na sítěch a v přilehlém šterku. Ve šterku však i tak byla hydraulická ztráta v podstatě neměřitelná. Grafy s průběhy rychlosti eroze (zpětné a boční) podél průsakové cesty obsahuje příloha 14.

Obecně platí, že v každém řešeném čase eroze byla nejvyšší hodnota rychlosti eroze dosažena v oblasti čela průsakové cesty, tj. v oblasti, kde dochází primárně ke zpětné erozi. Ve zbytku průsakové cesty dochází k boční erozi, přičemž ta byla zpravidla nižší. Důvodem

je zde nízká rychlost proudění, resp. nízká hodnota vyvozovaného tečného napětí proudící vodou.

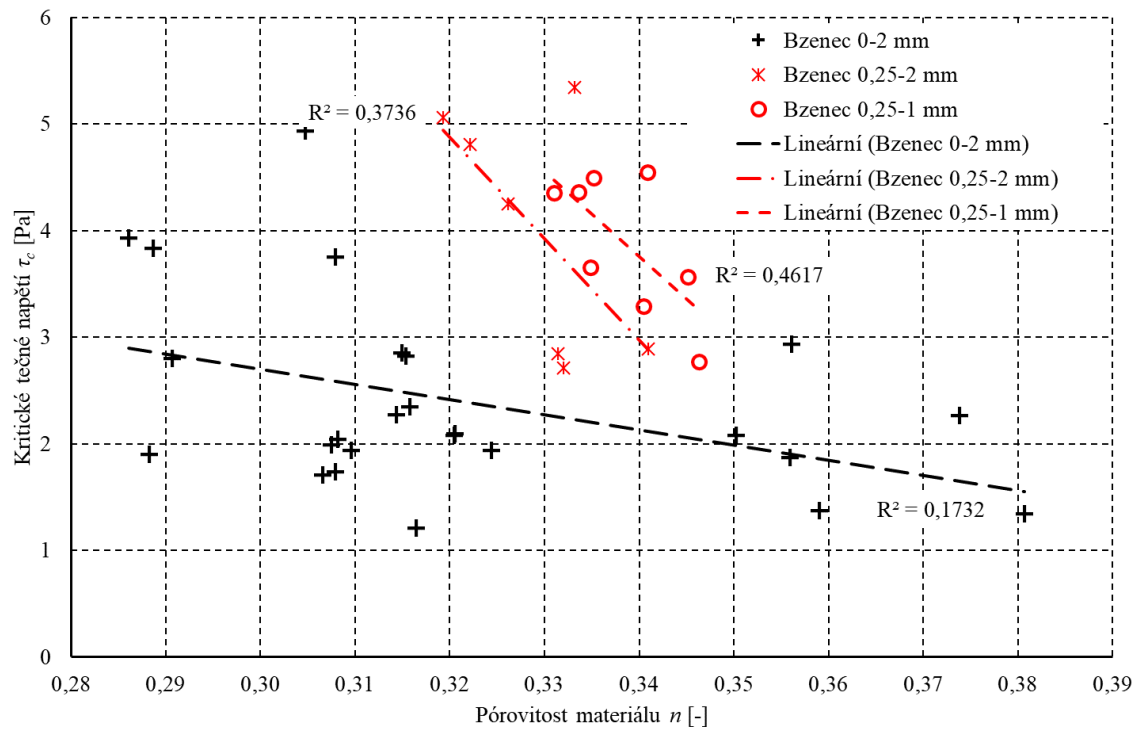
U materiálu Bzenec 0-2 mm dosahovala rychlost zpětné eroze nejčastěji hodnot 20 až 40 kg/s/m², rychlost boční eroze pak dosahovala hodnot v rozmezí 25 až 45 kg/s/m². U materiálu Bzenec 0,25-2 mm byly hodnoty rychlosti zpětné eroze v intervalu 3 až 40 kg/s/m², a rychlost boční eroze se pohybovala v intervalu 16 až 50 kg/s/m². U Bzenec 0,25-1 mm dosahovala rychlost zpětné eroze hodnot 20 až 40 kg/s/m² a rychlost boční eroze se pohybovala v rozmezí 32 až 50 kg/s/m².

Při přímém pohledu na rozsahy hodnot nelze dojít k jednoznačným závěrům, přesto však lze předpokládat, že pro materiály s vyšší pórovitostí budou hodnoty rychlostí eroze nižší z důvodu odnosu menšího množství materiálu (menší hmotnosti erodovaného množství). Je zde třeba vzít v úvahu i výsledné koeficienty eroze (kapitola 6.5.3.8). V části trubice, ve které docházelo pouze k jejímu rozšiřování (i během zpětné eroze před porušením vzorku) dosahovala rychlost boční eroze hodnot cca 0,25 až 2 kg/s/m², a to u všech materiálů.

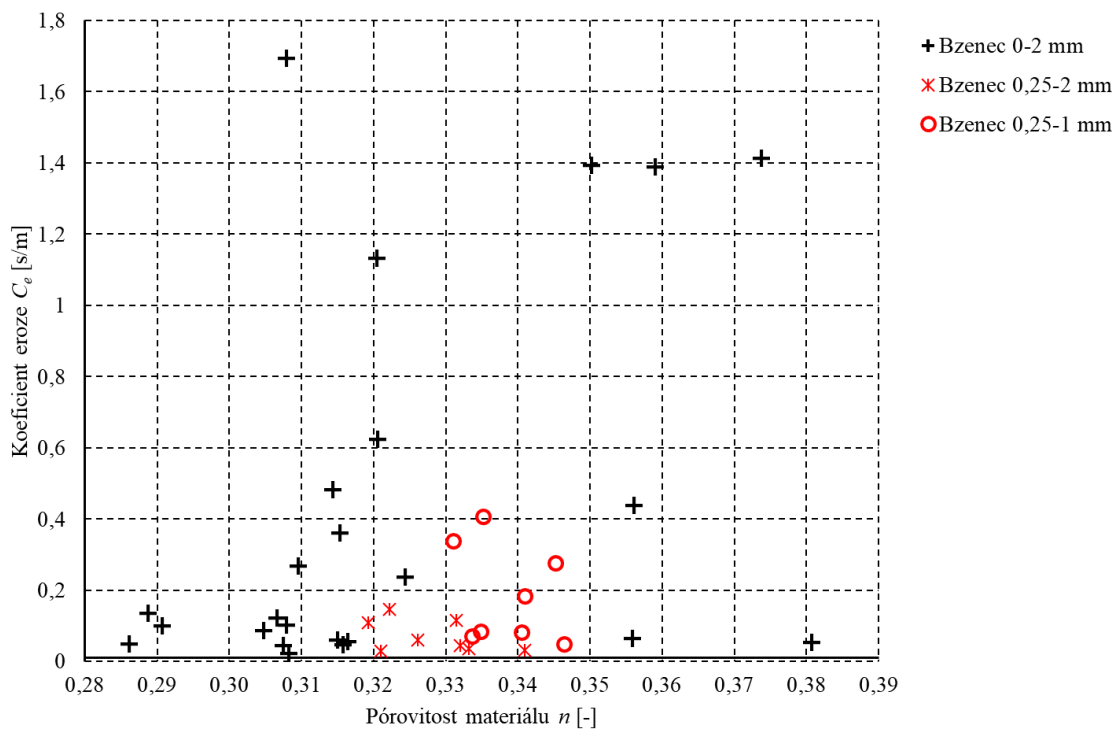
6.5.3.8 Koeficient eroze a kritické tečné napětí

Dle postupu v kapitole 6.5.1.14 byly stanoveny koeficienty eroze C_e a kritické tečné napětí τ_c . Primární vliv na jejich hodnoty měla pórovitost materiálu n . Grafy s vykreslením vzájemné závislosti obsahují obr. 6.51 a 6.52.

Na obr. 6.51 je možné pozorovat výrazné závislosti kritického tečného napětí na pórovitosti materiálu. Po rozdělení dat dle materiálů platí, že pro materiály více stejnozrnné bylo dosahováno vyšších hodnot kritického tečného napětí. Oproti tomu však lze též říci, že u stejnozrnnějších materiálů (bráno oproti písku Bzenec 0-2 mm) je vliv pórovitosti mnohem výraznější (viz sklony proložených linií metodou nejmenších čtverců). Rozdíly ve sklonech proložených funkčních závislostí mohou být ale také způsobeny omezeným počtem experimentů provedených na materiálech Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm. Proto se pro další výzkum za použití více materiálů doporučuje testovat stejné počty vzorků.



Obr. 6.51 Závislost kritického tečného napětí na pórovitosti materiálu



Obr. 6.52 Závislost koeficientu eroze na pórovitosti materiálu

Při zkoumání závislosti koeficientu eroze na pórovitosti bylo pozorováno, že zde není zcela jednoznačný trend v datech. Hodnoty koeficientů eroze pro Bzenec 0-2 mm dosahují hodnot cca 0,02-1,7 s/m. Naopak pro materiály stejnozněžší se hodnoty pohybovaly

do 0,4 s/m. Důvodem tak výrazných odlišností v dosahovaných hodnotách může být vyšší náchylnost materiálu Bzenec 0-2 mm k erozi, což podporuje i obr. 6.51. Naopak materiály Bzenec 0,25-2 mm a Bzenec 0,25-1 mm jsou proti erozi odolnější, a i po začátku eroze nedochází k tak výraznému odnosu materiálu. Materiál Bzenec 0,25-2 mm vykazuje ze všech tří písků nejnižší koeficienty eroze z důvodu absence jemnozrnných částic, které by mohly být snadno unášeny, a také z důvodu přítomnosti zrn o velikosti 2 mm, pro jejichž odnos je třeba vyšších rychlostí proudění než v případě materiálu Bzenec 0,25-1 mm.

Vliv pórovitosti je v datech zastoupen nepřímo, a to ovlivněním hmotnosti odneseného materiálu. Vzhledem k dosahovaným hodnotám lze konstatovat, že dle Wana a Fella (2004b) se jedná o **extrémně rychlou erozi**, která je dána testováním nesoudržného materiálu.

Porovnání s ostatními autory

Vzhledem k charakteru prováděných analýz nebylo možné srovnat získaná data s ostatními autory. Z hlediska rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty nebylo možné provést srovnání z důvodu absence relevantní literatury. Rychlost eroze i koeficienty eroze sice byly stanovovány např. Hansonem a Cookem (2004) nebo Wanem a Fellem (2002, 2004a, 2004b), autoři se však zaměřovali převážně na soudržné zeminy, literatura tudíž není relevantní pro porovnání.

6.5.3.9 Shrnutí výsledků

Vybrané písky z bzenecké pískovny byly pro experimenty použitelné před i po úpravě zrnitosti. Naopak skleněné kuličky se pro svoji stejnozrnnost, tvar a hladkost zrn jeví jako problematické ať už z hlediska přípravy vzorku, tak i v průběhu experimentu.

Při grafickém znázornění středních kritických hydraulických gradientů byl pozorován jeho pokles se zvyšující se pórovitostí. Též byl pozorovatelný jev, kdy s odstraňováním jednotlivých frakcí z materiálu narůstá pórovitost a tím jsou ovlivněny i střední kritické hydraulické gradienty. Porovnáním s autory bylo zjištěno, že stanovené hydraulické gradienty se od publikovaných dat liší až 9krát. Primárním důvodem jsou vnesené bezpečnostní rezervy v datech a rozdílnost testovaných materiálů.

Pro kritický hydraulický gradient na čele průsakové cesty byl pozorován vliv pórovitosti. S její stoupající hodnotou klesala hodnota gradientu. Navíc byl pozorován i vliv nestejnozrnnosti materiálu, kdy se stoupající hodnotou C_U klesají možnosti zhutnění, a tudíž jsou dosahovány vyšší pórovitosti. Tím je opět ovlivněna hodnota kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty. Vliv měrné hmotnosti zrn nebylo možné pozorovat

z důvodu nevhodnosti skleněných kuliček. Z tohoto faktu byly učiněny příslušné závěry v kapitole 8.

Hydraulické vodivosti vzorků byly stanoveny numerickým modelem. Po shrnutí dat byl pozorován jasný vliv pórovitosti materiálu na dosahované hodnoty. Při širším pohledu na rozdílné materiály byl identifikován i nepřímý vliv zrnitostního složení na hydraulickou vodivost související s obtížností připravit méně pórovité vzorky.

Po započetí zpětné eroze bylo pozorováno, že v některých případech dojde k jejímu samovolnému zastavení vlivem ustálení erozních podmínek v průsakové cestě. Eroze pak byla znovu inicializována buď samovolně nebo po změně okrajových podmínek experimentu.

Výpočtem byla stanovena rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty. U většiny experimentů platí, že v závěrečné fázi experimentu dochází k postupnému zrychlování postupu čela, které je způsobeno zkracováním průsakové délky. Rychlost zpětného postupu se pohybovala v řádu desítek mm/s. Jak byly z původního materiálu odebírány frakce a vytvářeny nové jemnozrnější materiály, byl pozorován pokles rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty spolu s rozsahem vypočtených hodnot.

Provedením příslušných výpočtů byly stanoveny průběhy rychlosti zpětné a boční eroze. Jejich vývoj v čase a podél průsakové cesty a byl zobrazen v grafech. V datech byla zjištěna lokální kulminace rychlosti eroze právě na čele průsakové cesty a v jeho okolí. Na základě oddělení rychlosti zpětné a boční eroze byly zjištěny koeficienty eroze a kritické smykové napětí (pro boční erozi) a byl sestaven vztah pro výpočet rychlosti zpětné eroze (kapitola 6.5.4). Byla identifikována závislost kritického tečného napětí na pórovitosti. Platí, že se zvyšující se pórovostí kritické tečné napětí klesá. Také zde bylo možné identifikovat rozdíly v dosahovaných hodnotách pro jednotlivé materiály. Z hlediska koeficientů eroze je možné říci, že materiály nestejnnozrné jsou snadněji erodovatelné než materiály stejnozrné. Pro všechny materiály byl průběh eroze klasifikován jako extrémně rychlý.

6.5.4 Vztahy pro kritický střední hydraulický gradient a rychlost zpětné eroze

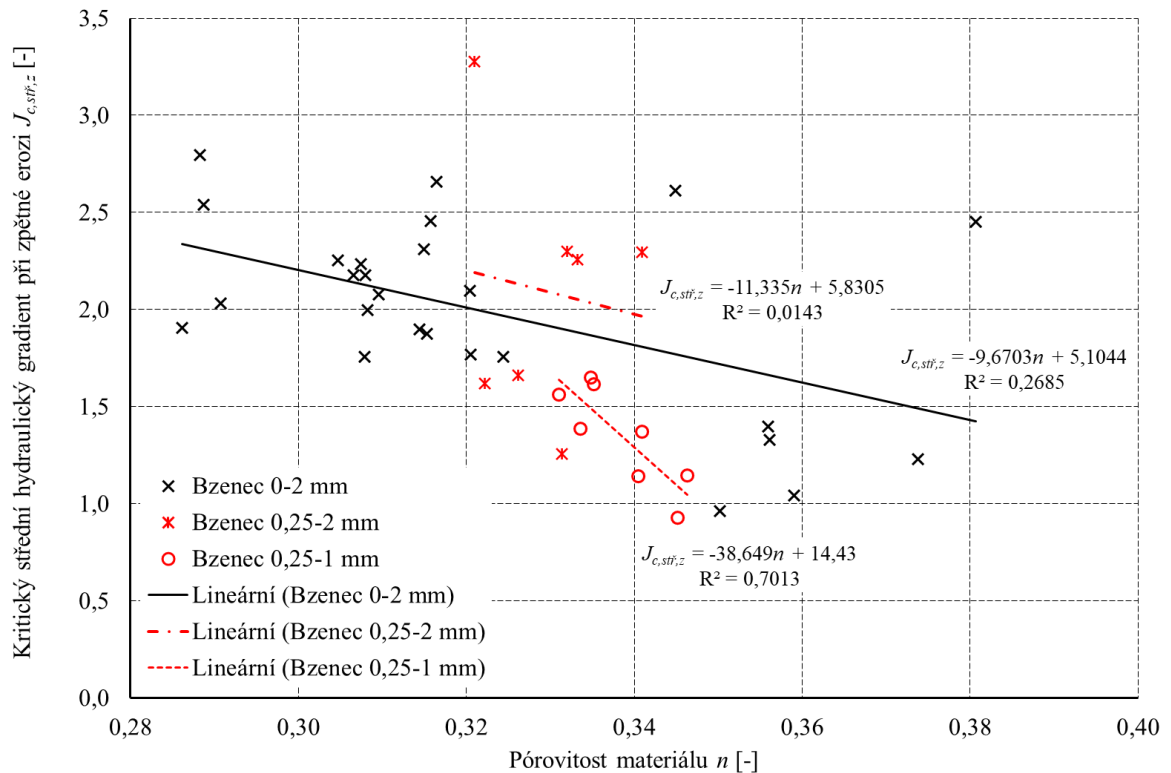
Na základě vyhodnocených dat byly sestaveny vztahy pro výpočet středního kritického hydraulického gradientu a rychlosti zpětné eroze. Veličinami vstupujícími do vztahů byly:

- střední hydraulický gradient při zpětné erozi $J_{stř,z}$,
- pórovitost materiálu n ,
- velikost zrna d_{50} .

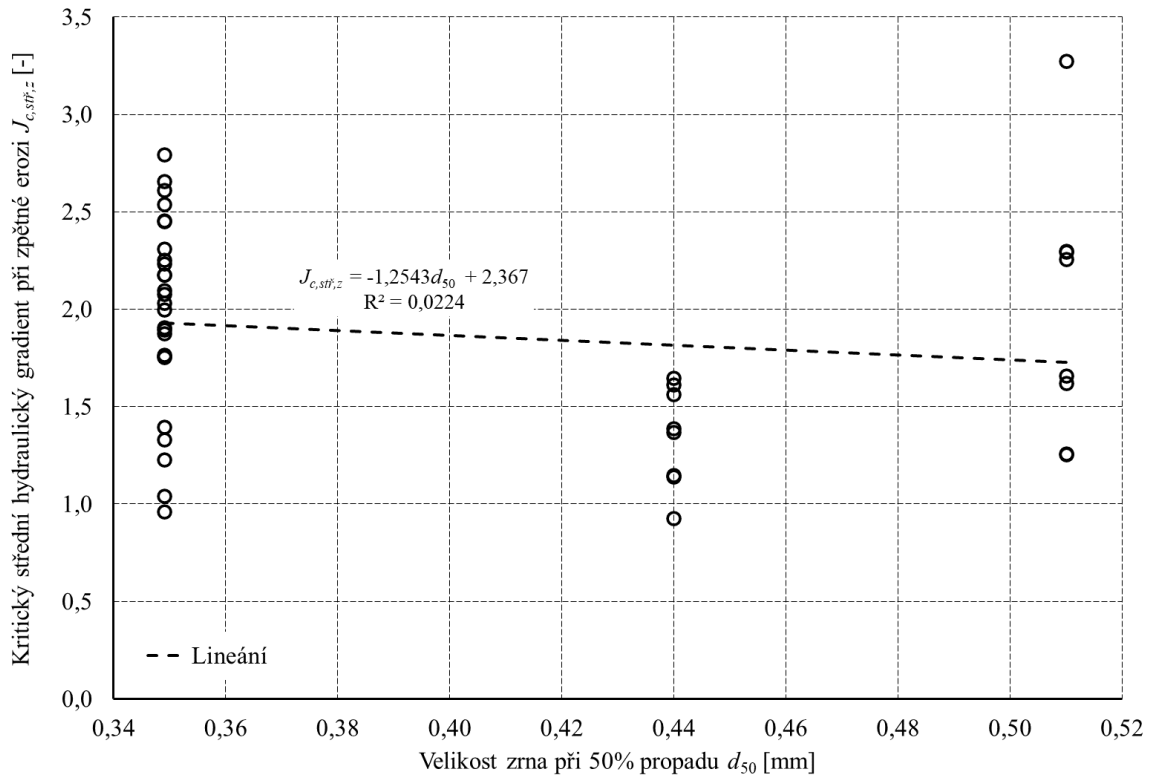
Následující kapitoly popisují postupy použité pro sestavení jednotlivých vztahů.

6.5.4.1 Vztah pro kritický střední hydraulický gradient

Vztah popisovaný v této kapitole byl odvozen pro závěrečnou fázi experimentu, tj. od započetí intenzivní eroze po porušení vzorku. Vzhledem k omezení metody měření hydraulických gradientů, resp. měření piezometrických výšek během intenzivní eroze, bylo pro odvození vztahu možné použít pouze hodnoty středních hydraulických gradientů při zpětné erozi $J_{c,stř,z}$ dle rovnice (6.48). Pro každý experiment byl z vyhodnocených dat stanoven kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi $J_{c,stř,z}$. Následně byly analyzovány funkční závislosti vstupujících veličin. Primární vliv na kritický střední hydraulický gradient měla pórovitost materiálu (viz obr. 6.53). Další mírný vliv na hodnoty měla samotná zrnitost materiálu, resp. velikost zrn. Pro zjednodušení je jako reprezentativní veličina popisující zrnitost uvažována velikost zrna d_{50} . Graf závislosti $J_{c,stř,z}$ na velikosti zrna d_{50} uvádí obr. 6.54.



Obr. 6.53 Závislost kritického středního hydraulického gradientu na pórovitosti



Obr. 6.54 Závislost kritického středního hydraulického gradientu na velikosti 50% zrna

Pomocí metody nejmenších čtverců integrované v programu EXCEL byly sadami dat proloženy různé funkční závislosti a byly stanovovány koeficienty determinace R^2 . Jak pro vliv pórovitosti, tak pro velikost 50% zrna vychází nejlepší hodnoty koeficientů determinace pro lineární funkční závislosti. Lze tedy odhadnout, že pro hledaný vztah bude možné použít lineární regresi, tzn. vztah bude mít obecný tvar:

$$J_{c, stř, z} = a_{0, J} + a_{1, J}n + a_{2, J}d_{50} \quad [-], \quad (6.55)$$

kde $a_{0, J}$... základní konstanta pro vztah na stanovení hydraulického gradientu [-],
 $a_{1, J}$... koeficient vlivu pórovitosti [-],
 $a_{2, J}$... koeficient vlivu velikosti zrna [mm^{-1}],
 $J_{c, stř, z}$... kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi [-].

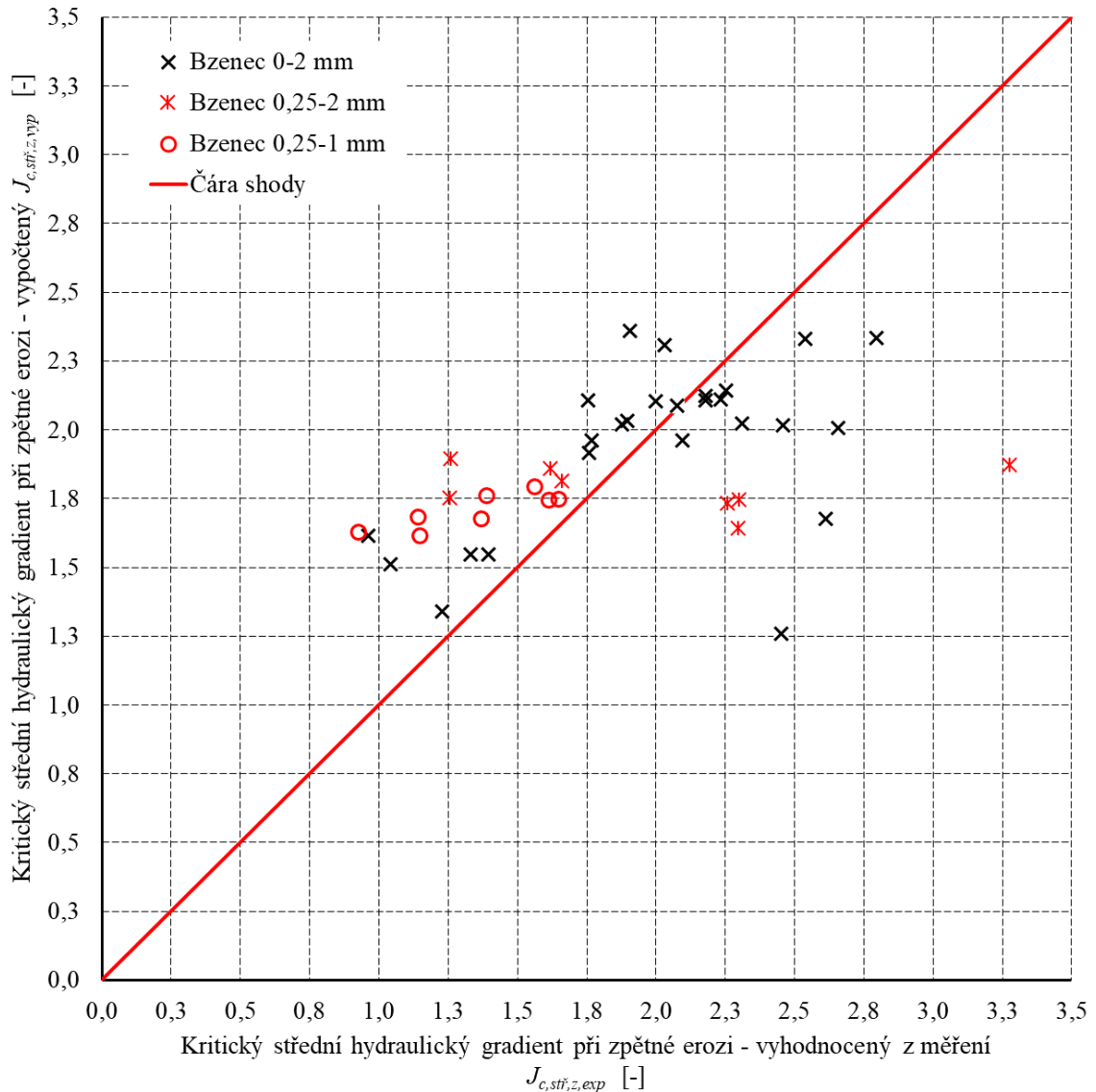
Pro výše popsáný vztah bylo nutné stanovit hodnoty pro veličiny $a_{0, J}$, $a_{1, J}$ a $a_{2, J}$. To bylo provedeno pomocí nástroje pro regresní analýzu integrovaného do programu EXCEL. Výsledné hodnoty byly:

- $a_{0, J} = 5,864$;
- $a_{1, J} = -11,64$;
- $a_{2, J} = -0,5 \text{ mm}^{-1}$.

Dosažením do rovnice (6.55) byl pro každý experiment vypočten kritický střední hydraulický gradient a bylo provedeno grafické porovnání s daty získanými

z experimentů (obr. 6.55). Je možné pozorovat, že nebyla dosažena úplná shoda dat z experimentů s vypočtenými hodnotami. Důvodem mohou být vlivy dalších charakteristik sledovaných materiálů jako je nestejnzrnnost a tvar, příp. i drsnost zrn.

Dalším problémem je u vztahu jeho aplikovatelnost v dalších krocích disertační práce, zejména při stanovení vztahu pro rychlost zpětné eroze. Pro lepší pochopení je tento problém popsán v následující kapitole, ve které se vztah pro zpětnou erozi odvozuje.

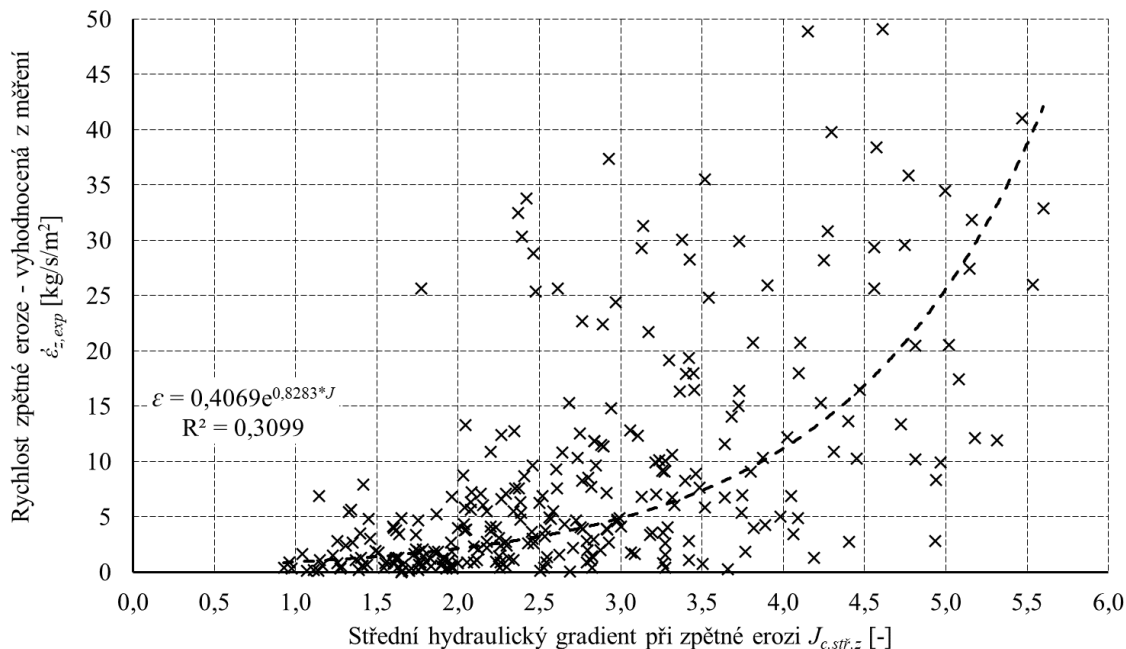


Obr. 6.55 Zobrazení shody dat kritických středních gradientů dle vztahu a z experimentů

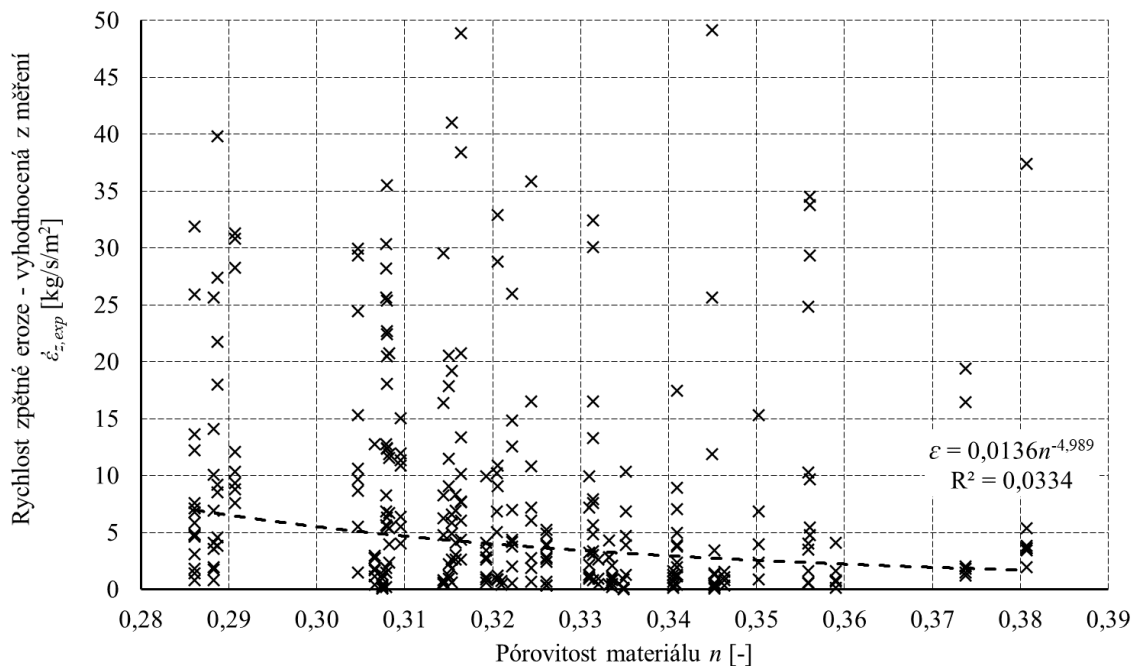
6.5.4.2 Vztah pro rychlost zpětné eroze

Pro definování vztahu a funkčních závislostí jednotlivých proměnných byly použity souhrny všech vypočtených rychlostí eroze seříděných dle experimentů, ze kterých byly získány. Takto bylo možné analyzovat vazbu rychlosti eroze na pórovitost materiálu, velikost 50% zrna a střední hydraulický gradient. Velikost zrna byla vybrána jako nejvíce vyhovující charakteristika popisující sledované materiály.

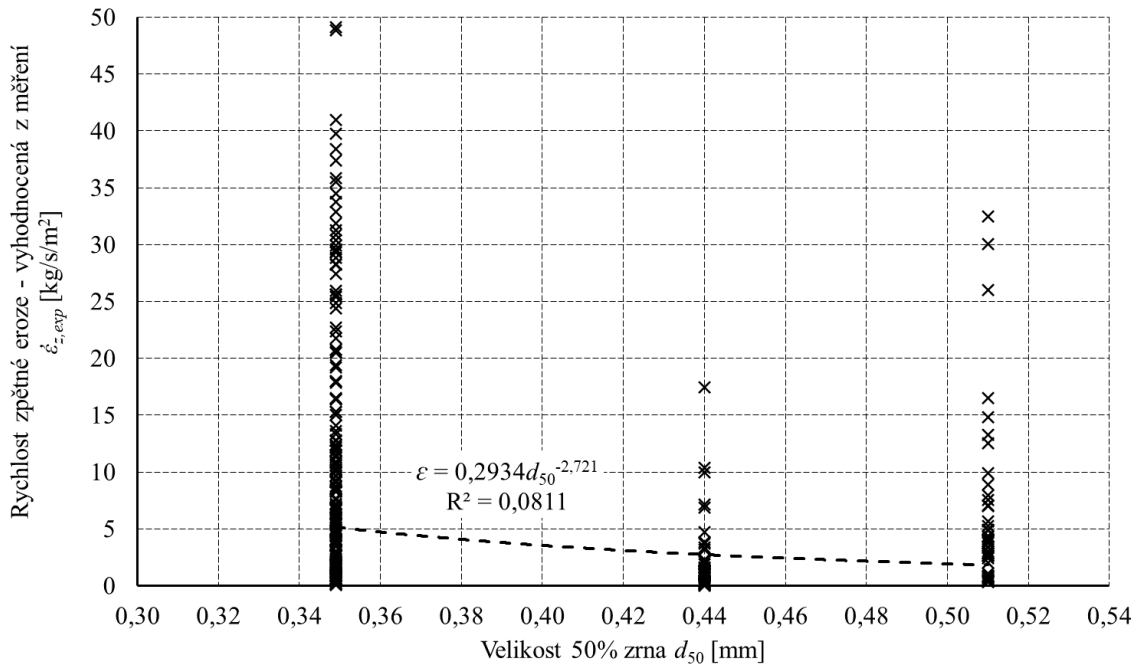
Metodou nejmenších čtverců integrované v programu EXCEL byly odhadnuty tvary funkčních závislostí rychlosti eroze na jednotlivých proměnných, což umožnilo získání tvaru hledaného vztahu. Kritériem pro výběr tvaru funkční závislosti byl koeficient determinace R^2 . Grafické zobrazení vybraných funkčních závislostí ukazují obr. 6.56 až 6.58.



Obr. 6.56 Korelace rychlosti zpětné eroze a středního hydraulického gradientu



Obr. 6.57 Korelace rychlosti zpětné eroze a pórovitosti materiálu



Obr. 6.58 Korelace rychlosti eroze a velikosti 50% zrna

Vzhledem k funkčnímu tvaru v obr. 6.56 nebylo možné použít postup z kapitoly 6.5.4.1 a přímo využít funkce regresní analýzy v programu EXCEL. Proto byly využity následující podmínky, podle kterých byl sestaven tvar hledaného vztahu:

- Se zvyšujícím se středním hydraulickým gradientem rychlost zpětné eroze stoupá přibližně exponenciálně.
- Se zvyšující se pórovitostí klesá rychlost eroze. Vysvětlení uvádí následující modelová situace:
 - Za daný čas je erodován pevně daný objem dvou vzorků o pórovitostech $n^{(1)}$ a $n^{(2)}$ a o shodné hustotě zrn ρ_{zm} .
 - Po přípravě vzorku bylo zjištěno, že $n^{(1)} > n^{(2)}$ a tudíž platí, že $\rho_V^{(1)} < \rho_V^{(2)}$.
 - Za podmínky, že byl u obou vzorků erodován shodný objem, musí platit, že $m_{E,TP:TP-1}^{(1)} < m_{E,TP:TP-1}^{(2)}$.
 - Pro rychlost eroze tedy též musí platit, že $\dot{\epsilon}_{E,TP:TP-1}^{(1)} < \dot{\epsilon}_{E,TP:TP-1}^{(2)}$.
- Se zvyšující se velikostí zrna obecně klesá rychlost eroze z důvodu nutnosti překonání vyšší tíhové síly působící na zrno.

Pro střední hydraulický gradient platí, že do vztahu bude vstupovat ve formě exponenciály. Pro ostatní veličiny bylo (dle obr. 6.57 a 6.58) možné použít jak exponenciální, tak i lineární tvary. Dále bylo vhodné do tvaru zahrnout i kritickou hodnotu středního hydraulického gradientu $J_{c,stř,z}$. Použití veličiny zajistilo limitaci vypočtených

hodnot v případě, že se střední hydraulický gradient $J_{stř,z}$ blíží kritické hodnotě. K tomu byla použita minimální hodnota $J_{c,stř,z}$, z vyhodnocených dat. Použití dříve odvozeného vztahu nebylo možné (viz komentář v kapitole 6.5.4.3). Po zahrnutí všech předešlých podmínek byl navržen následující vztah:

$$\dot{\epsilon}_{z,vyp} = 0,94 \left[-1 + e^{0,8283(J_{stř,z} - J_{c,stř,z})} \right] * \frac{0,35}{d_{50}} * \frac{0,476}{n} \text{ [kg/s/m}^2\text{]}, \quad (6.56)$$

pro $J_{stř,z} > J_{c,stř,z}$,

kde d_{50} ... velikost zrna při 50% propadu [mm],

$J_{c,stř,z}$... kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi [-]; $J_{c,stř,z} = 0,92$,

$J_{stř,z}$... střední hydraulický gradient při zpětné erozi [-],

n ... pórovitost materiálu [-],

$\dot{\epsilon}_{z,vyp}$... rychlost zpětné eroze vypočtená novým vztahem [kg/s/m²].

První konstanta ve vztahu rovna 0,94 je charakterizována jako základ rychlosti zpětné eroze z_0 a jde o konstantu získanou použitím metody nejmenších čtverců s váhami. Konstanta -1 v závorce zajišťuje limitaci vypočtených hodnot v případech, kdy $J_{stř,z}$ se blíží $J_{c,stř,z}$. Konstanta násobící exponent Eulerova čísla e byla získána ze závislosti popsané v obr. 6.56 a jedná se tzv. faktor středního hydraulického gradientu f_j . Dále se v exponentu nachází rozdíl středního hydraulického gradientu a kritického středního hydraulického gradientu rovného hodnotě 0,92. Použití obojího bylo popsáno výše. Následují dva zlomky jejichž prvky popisují poměry veličin d_{50} , příp. n . První zlomek obsahuje v čitateli konstantu 0,35. Jedná se o hodnotu velikosti 50% zrna (d_{50}) teoretického materiálu, pro který lze sestavený vztah použít ($d_{50,max}$). Jedná se o mez použitelnosti vztahu. Konstanta 0,476 popisuje maximální pórovitost (n_{max}), které lze teoreticky dosáhnout u přesně kulových zrn při $C_U = 1$. Stanovení hodnoty bylo publikováno Říhou et al. (2018).

Z experimentů stanovená rychlost zpětné eroze a data vypočtená nově definovaným vztahem byla porovnána v grafu proti čáře shody.

Pro přesnější stanovení konstanty z_0 byla při návrhu vztahu zavedena funkce pro minimalizaci čtverců odchylek dat vypočtených vztahem od dat z experimentů. K jednotlivým čtvercům byla navíc přiřazena váha udávající, že čím lepší shoda je pro danou dvojici dat nalezena, tím má čtverec vyšší váhu. Hodnota váhy tedy upřednostňuje více se shodující data oproti těm více rozptýleným, u kterých nelze očekávat přílišnou shodu. Optimalizační funkce tedy zní:

$$\sum S_q = \sum_{i=1}^w \left[(\dot{\epsilon}_{z,exp} - \dot{\epsilon}_{z,vyp})^2 * \frac{1}{\dot{\epsilon}_{z,exp} \dot{\epsilon}_{z,vyp}} \right] = \min, \quad (6.57)$$

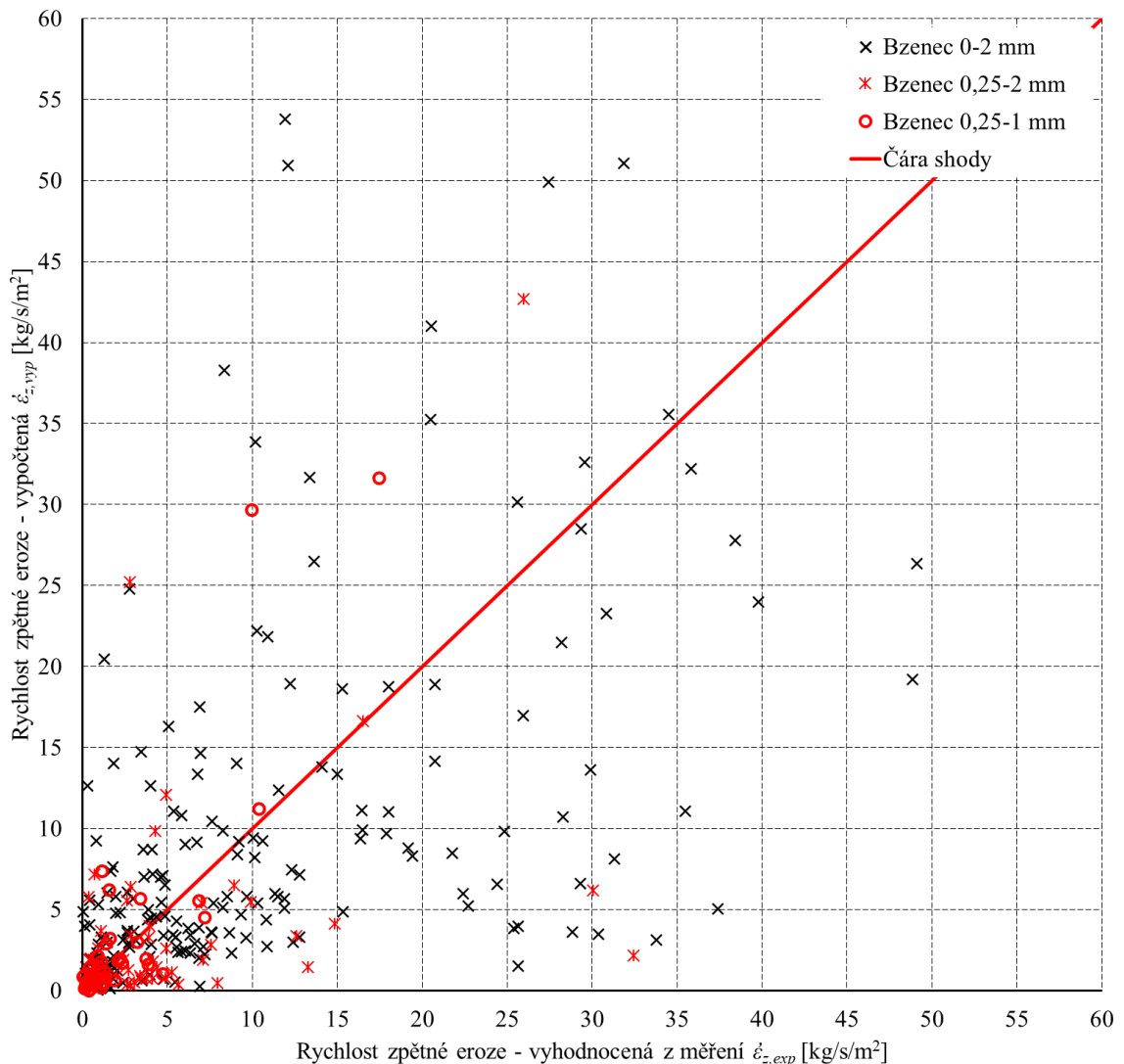
kde S_q ... suma čtverců odchylek dat vypočtených a získaných z experimentu [$\text{kg}^2/\text{s}^2/\text{m}^4$],

w ... počet vyhodnocených dat rychlosti zpětné eroze [-],

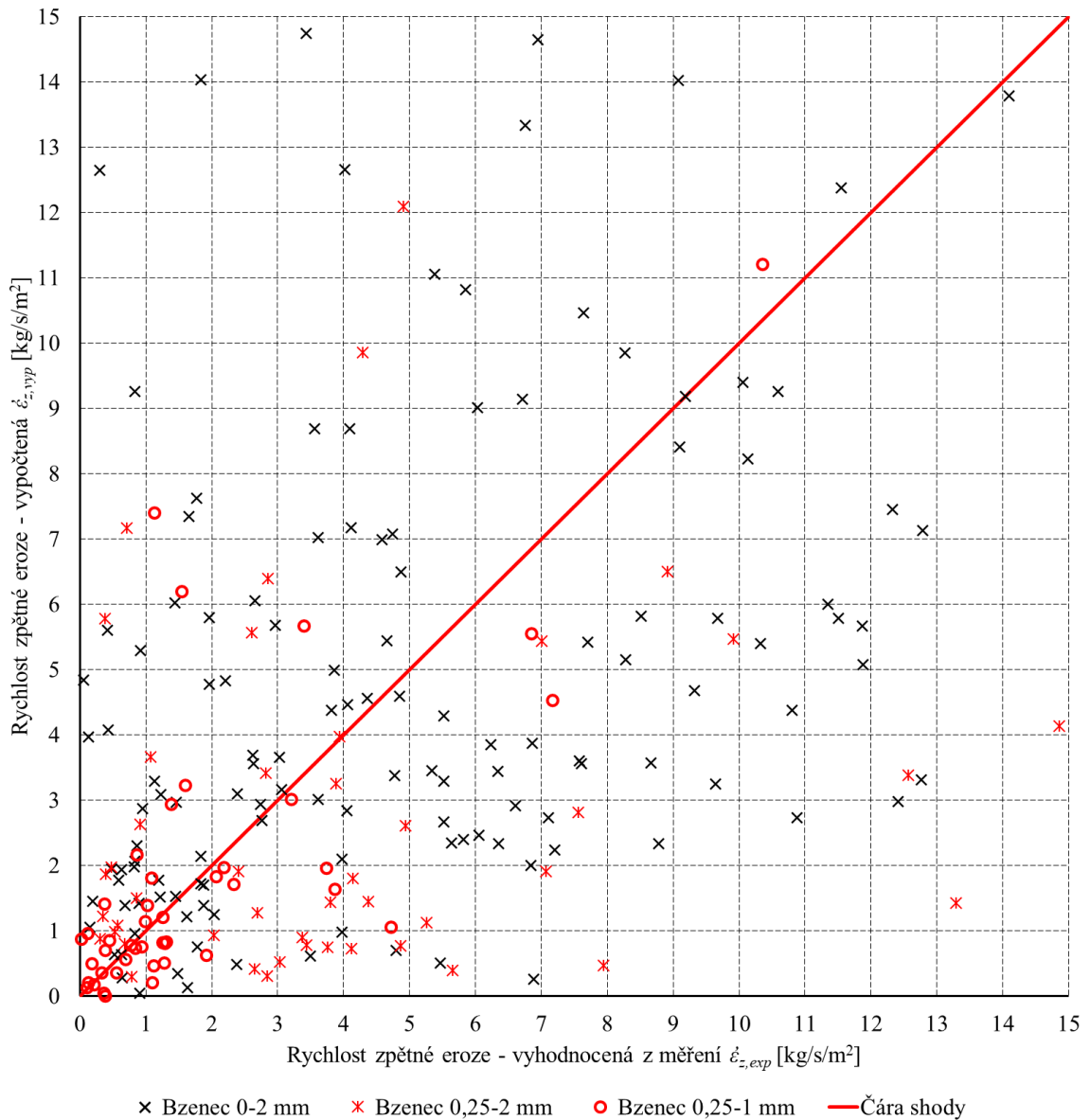
$\dot{\epsilon}_{z,exp}$... rychlost zpětné eroze získaná z experimentů [$\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$],

$\dot{\epsilon}_{z,vyp}$... rychlost zpětné eroze vypočtená novým vztahem [$\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$].

Pro získání minimální hodnoty na funkci (6.57) byla upravována pouze konstanta z_0 . Po dosažení nejlepší shody byly pro konstantu z_0 stanoveny jednotky [$\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$]. Grafické znázornění shody je prezentováno v obr. 6.59 a 6.60.



Obr. 6.59 Shoda dat vyhodnocených z měření a vypočtených novým vztahem – celkové měřítko



Obr. 6.60 Shoda dat vyhodnocených z měření a vypočtených novým vztahem – přibližné na nízké hodnoty rychlostí eroze

6.5.4.3 Diskuse k nově sestaveným vztahům

Pro navrhované výpočtové vztahy platí několik omezení, která jsou diskutována v následujících podkapitolách.

Vztah pro výpočet kritického středního hydraulického gradientu

Jak již bylo popsáno v kapitole 6.5.4.1, hodnoty kritických středních hydraulických gradientů z experimentů jsou vázány na počátek intenzivní zpětné eroze. V mnoha případech se však stávalo, že již dříve k mírné erozi docházelo. Jinými slovy, k hodnotě kritického středního gradientu z experimentu je možné ve stejném čase přiřadit i nízkou, avšak stále nenulovou rychlost eroze. V případě, že by se vztah použil pro odvození rychlosti zpětné

eroze, docházelo by zde k logickým nesrovnalostem. Pro přehlednost je uvedena následující situace:

1. Pomocí rovnice (6.55) byl vypočten kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi $J_{c,stř,z}$.
2. Hodnota $J_{c,stř,z}$ z výpočtu byla vyšší než hodnota středního hydraulického gradientu při zpětné erozi $J_{stř,z}$ vyhodnocená z experimentu.
3. Po porovnání podmínek platnosti rovnice (6.56) byla rychlost zpětné eroze stanovena na hodnotu 0 kg/s/m^2 , protože platí, že $J_{stř,z} < J_{c,stř,z}$.
4. Při pohledu na rychlost eroze vyhodnocené z experimentu však bylo pozorováno, že nulová hodnota není dosažena prakticky nikdy.
5. Výpočet $J_{c,stř,z}$ je tedy z tohoto pohledu velice nespolehlivý a nedoporučuje se ho využívat jako mezní hodnotu pro stanovení rychlosti eroze.

Závěrem tohoto příkladu je, že vztah pro stanovení kritického středního hydraulického gradientu při zpětné erozi $J_{c,stř,z}$ je nutné požívat **pouze pro odhad počátku intenzivní eroze** a není možné ho v žádném ohledu využít pro stanovení rychlosti zpětné eroze.

Vztah pro rychlost zpětné eroze

V obr. 6.59 a 6.60 je možné pozorovat, že největší shoda je dosažena v oblasti $0-5 \text{ kg/s/m}^2$. Se zvyšujícími se hodnotami rychlosti eroze je možné sledovat stále menší shodu. Vyšší rozptyly mohou být způsobeny jednak odchylkami vyhodnocených rychlostí eroze, příp. dalšími faktory nezahrnutými v nově navrhovaném vztahu.

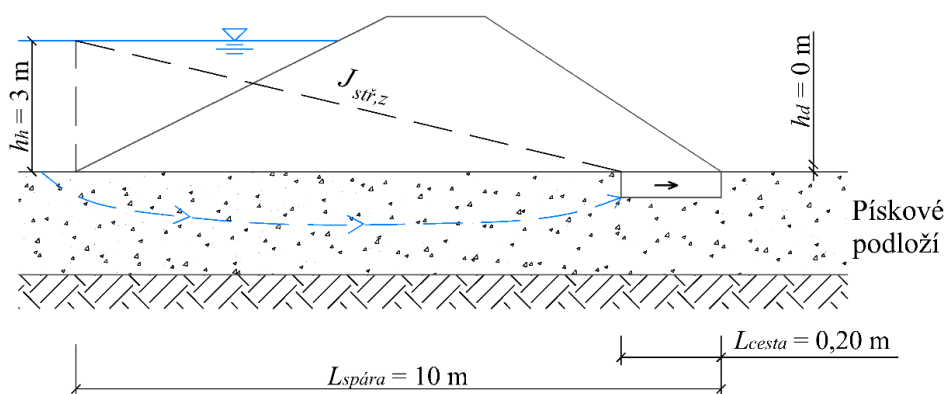
Odchytky ve výpočtu mohly vzniknout např. nedostatečnou přesností odečtu tvaru průsakové cesty, nepřesností v časovém odečtu, nebo v chybě odhadu hloubky průsakové cesty. Poslední ze jmenovaných by se dala eliminovat použitím laserové metody měření hloubky průsakové cesty. Zároveň platí, že čím vyšší byla rychlost eroze, tím obtížnější bylo získání dostatečně kvalitních dat vzhledem k rychlosti celého procesu.

Faktory, které nebyly zahrnuty ve vztahu jsou především celková charakteristika zrnitosti materiálu, tvar zrn a případně i jejich drsnost. Tyto faktory již nebyly pro svoji složitost a potřebu více testovaných materiálů zahrnuty do práce a doporučuje se je zkoumat v dalších fázích výzkumu.

6.5.4.4 Aplikace vztahu na modelovém příkladu

Pro ověření aplikovatelnosti vztahu byl sestaven modelový příklad eroze privilegované průsakové cesty. Ideově se jedná o erozi materiálu ve vodorovné základové spáře konstrukce

o délce 10 m. Na návodní straně je udržována hloubka vody 3 m, na vzdušné straně se voda nevyskytuje, resp. nachází se v hloubce 0 m nad základovou spárou. Střední hydraulický gradient tedy je $J_{stř,z} = (3-0)/10 = 0,3$. Podzákladí konstrukce je tvořeno pískem o charakteristikách shodných s pískem Bzenec 0-2 mm (charakteristiky materiálu byly zvoleny, příp. odvozeny, dle provedených experimentů). V tomto materiálu byla předdefinována průsaková trubice tvaru dolní poloviny válce o průměru 0,2 m a o délce 0,2 m. Vlivem zpětné a boční eroze bude docházet k postupnému zvětšování trubice až do plného propojení horní a dolní hladiny. Počáteční stav modelu ukazuje obr. 6.61, parametry příkladu jsou pak uvedeny v tab. 6.20.



Obr. 6.61 Počáteční stav v modelovém příkladu eroze privilegované průsakové cesty

Postup v simulaci byl následující:

1. Porovnáním délky průsakové cesty L_{cesta} a délky základové spáry $L_{spára}$ bylo rozhodnuto, zda bude řešen krok simulace. V případě, že $L_{cesta} \geq L_{spára}$, simulace se ukončila a výsledky byly uloženy do XLSX souboru. V opačném případě následovaly další body algoritmu.
2. Na základě středního hydraulického gradientu při boční erozi $J_{stř,b}$ bylo stanoveno tečné napětí vyvolané proudící vodou τ .
3. Tečné napětí vyvolané proudící vodou τ se porovnávalo s kritickým tečným napětím τ_c a stanovila se rychlost boční eroze $\dot{\epsilon}_{boč}$ dle rovnice (5.20).
4. Dle rychlosti boční eroze se stanovila hmotnost a objem erodovaného materiálu ($m_{er,boč}$ a $V_{er,boč}$).

Tab. 6.20 Definice modelového příkladu eroze privilegované průsakové cesty

Konstrukce		
Délka základové spáry	$L_{spára}$	10 m
Hloubka vody nad konstrukcí	h_h	3 m
Hloubka vody pod konstrukcí	h_d	0 m
Střední hydraulický gradient	$J_{stř}$	0,3
Předdefinovaná průsaková cesta		
Průměr průsakové cesty	D_{cesta}	0,20 m
Délka průsakové cesty	L_{cesta}	0,20 m
Podzákladí		
Materiál podzákladí	Bzenec 0-2 mm	
Pórovitost materiálu	n	0,30
Měrná hmotnost zrn	ρ_{zrn}	2638 kg/m ³
Velikost zrna při 50% propadu	d_{50}	0,31 mm
Kritické tečné napětí	τ_c	4,5 Pa
Koeficient eroze	C_e	0,09 s/m
Kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi	$J_{c,stř,z}$	0,92
Simulace		
Čas začátku simulace	t_0	0 s
Časový krok simulace	Δt_{sim}	1 s
Gravitační zrychlení	g	9,81 m/s ²
Hustota vody	ρ_w	1000 kg/m ³
Střední hydraulický gradient při boční erozi	$J_{stř,b}$	0,01
Minimální rychlost boční eroze	$\dot{\epsilon}_{boč,min}$	0,004 kg/s/m ²
Minimální rychlost zpětné eroze	$\dot{\epsilon}_{z,min}$	0,55 kg/s/m ² (odhad dle B_0-2_30)

5. Dle objemu erodovaného materiálu $V_{er,boč}$ byla vypočtena změna průřezové plochy průsakové cesty a nový průměr průsakové cesty dle vztahů:

$$\Delta A_{boč} = \frac{V_{er,boč}}{L_{cesta}} \text{ [m}^2\text{]}, \quad (6.58)$$

$$D_{cesta}^{(2)} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \Delta A_{boč} + \left(D_{cesta}^{(1)}\right)^2} \text{ [m]}, \quad (6.59)$$

- kde $D_{cesta}^{(1)}$... původní průměr průsakové cesty [m],
 $D_{cesta}^{(2)}$... nový průměr průsakové cesty [m],
 L_{cesta} ... délka průsakové cesty [m],
 $V_{er,boč}$... objem erodovaného materiálu při boční erozi [m³],
 $\Delta A_{boč}$... změna průřezové plochy průsakové cesty [m²].

6. Stanovil se střední hydraulický gradient při zpětné erozi $J_{stř,z}$, porovnal se s kritickou hodnotou $J_{c,stř,z}$ a vypočetla se rychlost zpětné eroze $\dot{\epsilon}_z$ dle rovnice (6.56).

7. Dle rychlosti zpětné eroze se stanovila hmotnost a objem erodovaného materiálu ($m_{er,z}$ a $V_{er,z}$).
8. Dle objemu erodovaného materiálu $V_{er,z}$ byla vypočtena nová délka průsakové cesty dle:

$$\Delta L'_{cesta} = \frac{V_{er,z}}{A} \text{ [m]}, \quad (6.60)$$

$$L_{cesta}^{(2)} = L_{cesta}^{(1)} + \Delta L_{cesta} \text{ [m]}, \quad (6.61)$$

kde A ... průtočná plocha průsakové cesty [m^2],

$L_{cesta}^{(1)}$... původní délka průsakové cesty [m],

$L_{cesta}^{(2)}$... nová délka průsakové cesty [m],

$V_{er,z}$... objem erodovaného materiálu při zpětné erozi [m^3],

$\Delta L'_{cesta}$... změna délky průsakové cesty [m].

9. Výsledné hodnoty se zapsaly a postup se opakoval od bodu 1.

Kompletní algoritmus simulace sestavený v programu MATLAB obsahuje příloha 16. Výsledná data se po provedení simulace vykreslila do grafů zobrazujících průběhy jednotlivých veličin v čase.

Rychlost zpětné eroze byla stanovována podle rovnice (6.56). Při aplikaci meze platnosti vztahu (kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi $J_{c,stř,z}$) lze pozorovat, že v počátku simulace by ke zpětné erozi docházet nemělo, resp. ke zpětné erozi by docházelo v míře nedefinovatelné rovnicí (6.56). Z toho důvodu byla do simulace zavedena veličina minimální rychlosti zpětné eroze $\dot{\epsilon}_{z,min}$. Tato hodnota se používala v každém kroku simulace až do okamžiku, kdy byla podmínka pro použití rovnice (6.56) splněna. V případě výpočtu boční eroze byla situace obdobná s tím rozdílem, že minimální rychlost boční eroze byla aplikována i za podmínky, kdy rychlost eroze stanovená dle rovnice (5.20) byla nižší než hodnota $0,004 \text{ kg/s/m}^2$. Důvod použití minimální hodnoty ukazuje následující situace:

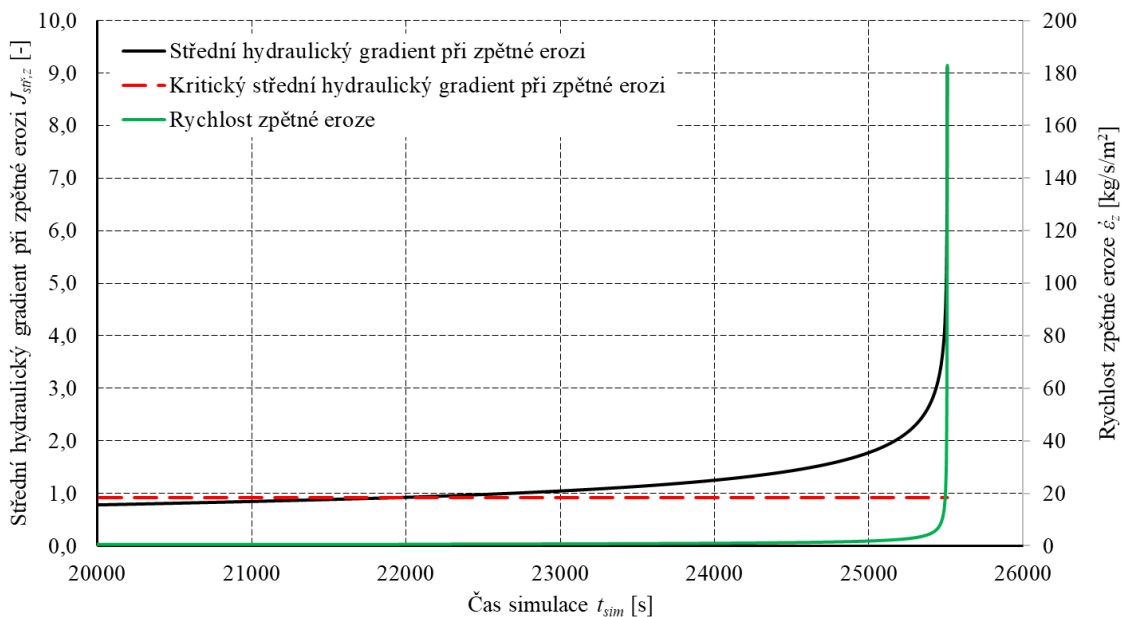
V případě, kdy se jednalo o průsakovou cestu s relativně malými rozměry, bylo tečné napětí vyvolané proudící vodou velice malé. V situaci, kdy bylo kritické tečné napětí τ_c překročeno a rozdíl tečného napětí a kritického tečného napětí byl velice malý (viz rovnice (5.20)), hodnota rychlosti boční eroze byla též velice malá (až blízká nule). V této situaci by se průsaková cesta téměř nezvětšovala do stran, což by nevedlo ke zvyšování hydraulického poloměru, tečného napětí vyvolaného proudící vodou a následně ani ke zvyšování rychlosti zpětné eroze.

Použití minimální hodnoty zajistilo přijatelné a pozvolné rozšiřování průsakové cesty a též celkovou návaznost hodnot rychlosti boční eroze v simulaci. Tento jev je často diskutován při aplikacích rovnice (5.20).

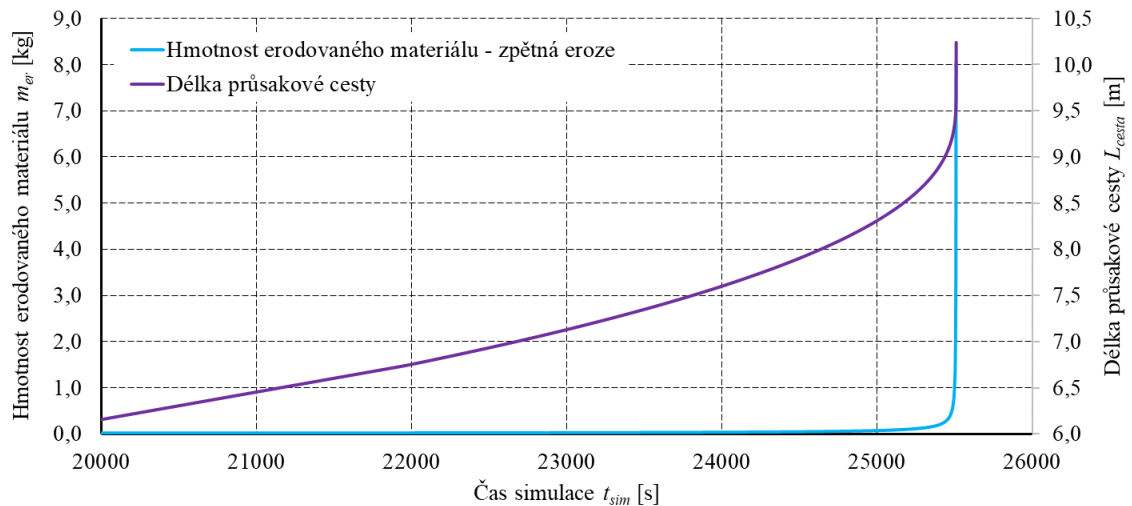
Nutno podotknout, že simulace nemá za úkol přesně popsat počátek zpětné ani boční eroze, ale spíše časové charakteristiky eroze po jejím započetí. V tomto ohledu byla zkoumána zejména eroze zpětná. Při použití minimálních hodnot rychlostí eroze lze tedy konstatovat, že relevantní jsou až data z konce simulace, kdy již bylo možné aplikovat výpočtový vztah (6.56). Průběhy jednotlivých veličin v relevantní části simulace ukazují obr. 6.62, 6.63 a 6.66 (zpětná eroze) a 6.64 až 6.66 (boční eroze).

Délka provedené simulace byla cca $25500 \text{ s} \approx 7 \text{ hod.}$ K zintenzivnění eroze došlo přibližně v čase simulace $t_{sim} = 25000 \text{ s}$, tj. cca po 6,94 hod. Průsaková cesta se vlivem eroze rozšířila z 0,20 m na 0,33 m.

Na obr. 6.62 je možné pozorovat, že kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi byl překročen v čase simulace cca 22000 s. Střední hydraulický gradient se však v této oblasti zvyšoval jen velmi pomalu, což mělo za následek i pomalé prodlužování průsakové cesty. S postupem času je možné pozorovat i pozvolné zintenzivňování eroze až do náhlého nárůstu v čase cca 25500 s, kdy došlo k plnému propojení horní a dolní hladiny. Náhlý nárůst v intenzitě eroze nastal v posledních 25 s simulace, což přibližně odpovídá i datům z provedených experimentů.

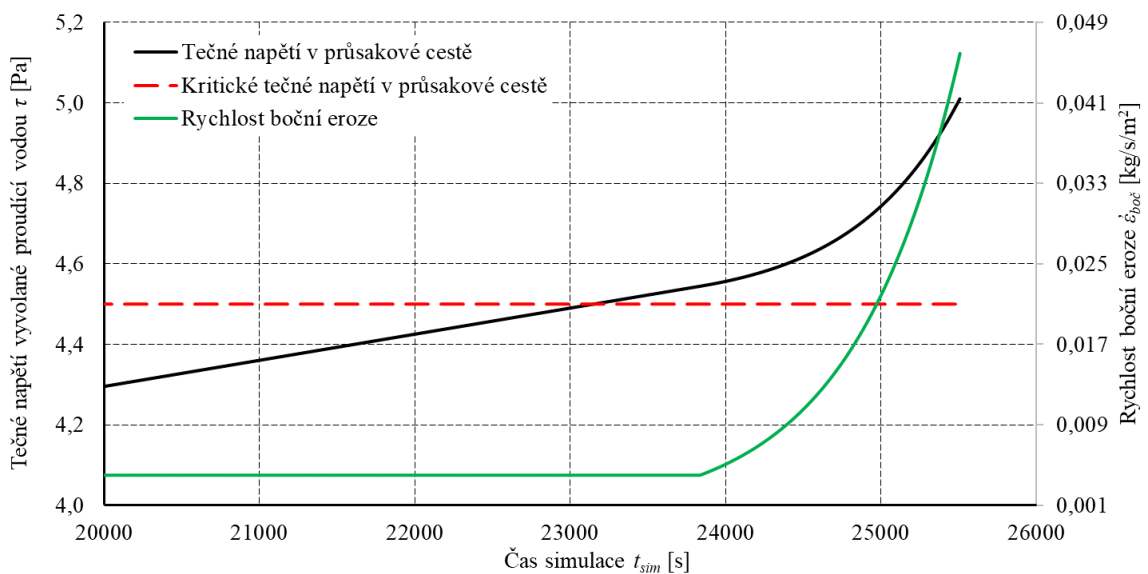


Obr. 6.62 Střední hydraulický gradient a rychlost zpětné eroze v čase – modelový příklad

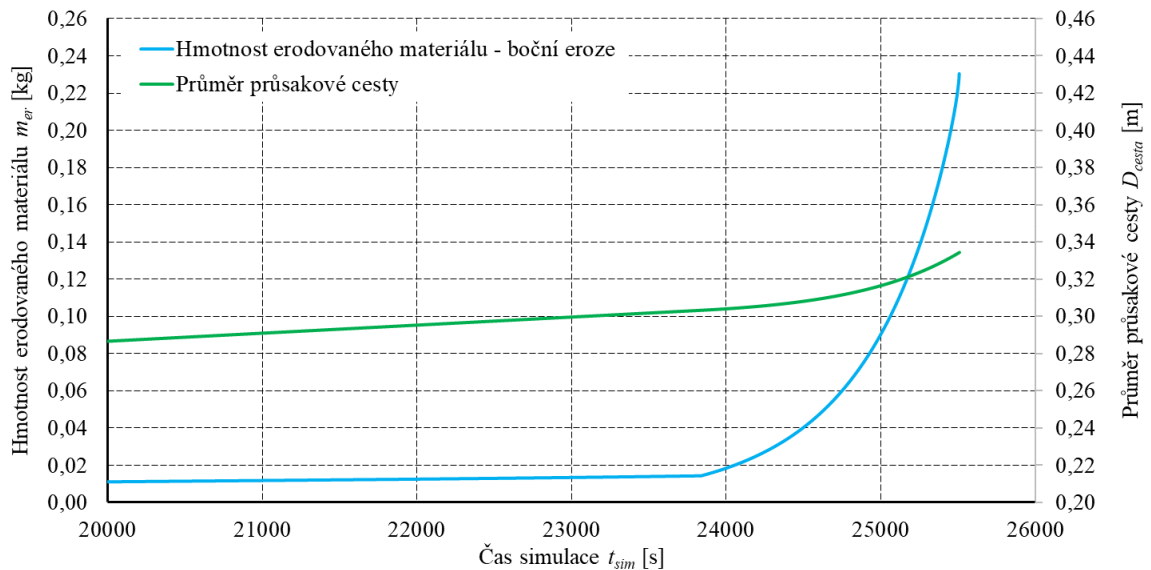


Obr. 6.63 Vývoj délky průsakové cesty a hmotnosti erodovaného materiálu v čase – modelový příklad

Kritické tečné napětí pro boční erozi bylo překročeno v čase simulace cca 23000 s (obr. 6.64). Přestože kritická hodnota byla překročena, následujících cca 800 s nebyla vypočtená rychlost boční eroze vyšší než minimální. Z toho důvodu se boční eroze začala zintenzivňovat až v čase cca 23800 s. Obr. 6.65 ukazuje pozvolné rozšiřování průsakové cesty z průměru 0,20 m na 0,33 m. Též je zde možné pozorovat změnu ve vývoji průměru průsakové cesty v okamžiku, kdy se již rychlost boční eroze začala počítat dle standardní rovnice (5.20).

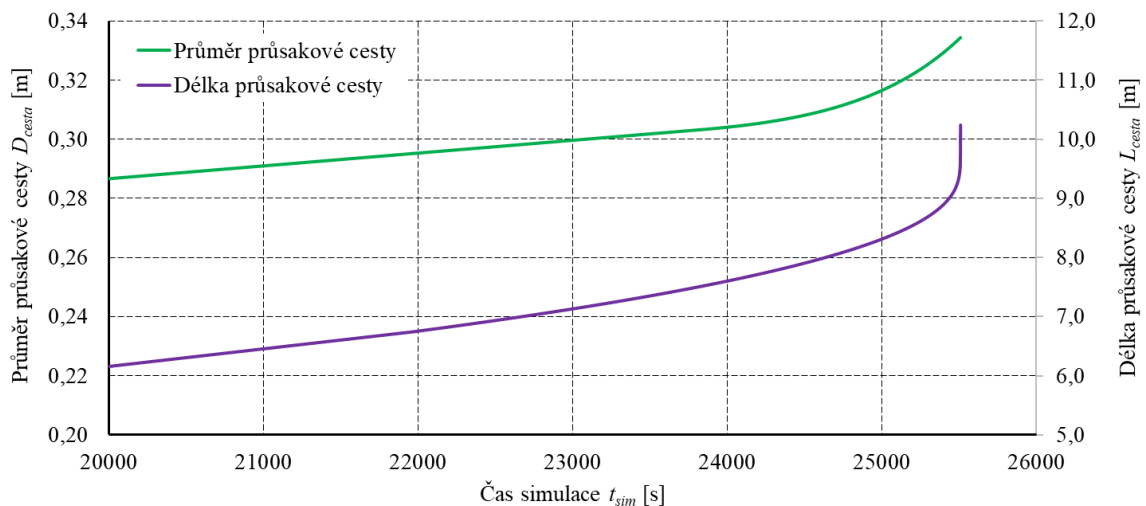


Obr. 6.64 Tečné napětí a rychlost boční eroze v čase – modelový příklad



Obr. 6.65 Průměr průsakové cesty a hmotnost erodovaného materiálu v čase – modelový příklad

Pro doplnění vazby mezi prodlužováním průsakové cesty a zvětšováním jejího průměru byl doplněn obr. 6.66 ukazující jejich průběhy v čase. Zde je možné pozorovat, že ani jedna veličina není v čase lineární. V případě zpětné eroze je toto způsobeno použitým vztahem, který popisuje nelineární závislost rychlosti eroze (a přeneseně i délky průsakové cesty) na středním hydraulickém gradientu. U boční eroze má na výsledné průměry jednoznačný vliv tečné napětí a hydraulický poloměr průsakové cesty. Porovnáním obou koncových rozměrů průsakové cesty a též i porovnáním obou rychlostí eroze lze konstatovat, že eroze zpětná byla mnohonásobně intenzivnější.



Obr. 6.66 Vývoj délky průsakové cesty a jejího průměru v čase – modelový příklad

Při provádění experimentů byla intenzivní eroze zaznamenávána cca v poslední minutě měření. To přibližně odpovídá i datům ze simulace. Sestavený vztah je tedy v rámci mezi platnosti použitelný. Problémem může být pouze hodnota kritického středního hydraulického gradientu při zpětné erozi $J_{c, stř, z}$, kterou se doporučuje dále upřesňovat v rámci navazujícího výzkumu.

7. NUMERICKÝ MODEL

Součástí disertační práce je ideový návrh numerického modelu sestaveného pro simulace vývoje průsakové cesty. Model byl sestaven v programu ANSYS, konkrétně v ANSYS Mechanical 2021 R2, kde pro proudění podzemní vody byla využita analogie s vedením tepla. V rámci modelu byla provedena i analýza napjatosti simulovaného vzorku. Stabilita elementů byla posuzována na stěnách privilegované průsakové cesty.

Jelikož při experimentech byl vždy vzorek plně nasycen a piezometrické výšky byly vždy měřeny vyšší, než byla úroveň horní desky přístroje, jednalo se o tlakové proudění v nasycené zóně. Vývoj průsakové cesty byl simulován změnou hydraulické vodivosti (resp. tepelné vodivosti) oderodované části vzorku. Následující kapitoly podrobně popisují použitý program, postup sestavení modelu a výstupy modelu. Kompletní algoritmus obsahuje příložené CD.

7.1 *Použitý program*

Pro sestavení numerického modelu byl použit program ANSYS Mechanical APDL 2021 R2. První verze programu byla vydána v roce 1970 (ANSYS, 2013a). Program umožňuje provádět analýzy proudění tepla, statické a dynamické analýzy objektů (deformace, napjatost) a řadu dalších úloh mechaniky kontinua. Dále umožňuje řešení plasticity, hyperelasticity, bobtnání, dotvarování a teplotní závislosti materiálových charakteristik. Úlohy mohou být dle svého charakteru řešeny ve 2D nebo 3D. Pro diskretizaci pak ANSYS nabízí více než 60 různých typů elementů (ANSYS, 2013a). Vstupní data jsou zpracovávána v integrovaném preprocesoru a model stejně jako konečné výsledky řešení jsou zobrazovány v grafickém rozhraní (postprocessing).

Pro vlastní programování byl použit jazyk APDL (ANSYS, 2010), pomocí kterého lze nastavit analýzu včetně definic materiálů, geometrie, okrajových podmínek, řešení, zpracování výsledků i jejich export do jiných formátů. Jazyk také umožňuje zápisy parametrů do předem definovaných matic, sestavování podmínek, smyček a další standardní operace v programovacích jazycích.

7.2 *Koncepční model*

Primární snahou bylo sestavení modelu a provedení simulace odpovídající experimentům z předchozí části práce. Ve fázi vytváření koncepčního modelu byla nejprve provedena analýza možností vybraného programu ANSYS Mechanical APDL. Na základě technické dokumentace programu a zavedených předpokladů byl přesně definován postup sestavení modelu.

7.2.1 Použití analogie

ANSYS Mechanical neosahuje přímo možnost analýzy proudění podzemní vody. Pro analýzu proudění ale byla použita analogie neustáleného vedení tepla kontinuem, tj. lze zaměnit veličinu hydraulická vodivost za tepelnou vodivost a piezometrickou výšku za teplotu. Zásobnost pórového prostředí je možné nahradit tepelnou kapacitou materiálu. Z hlediska simulovaného písku je však její hodnota zanedbatelná a do výpočtu vstupuje jen pro formální správnost modelu.

7.2.2 Předpoklady

Pro modelování byly použity předpoklady uvedené v následujících kapitolách.

Nestacionarita proudění a eroze

Z povahy rozebíraného děje vyplývá, že se jedná o úlohu neustálenou, a to jak z hlediska proudění, tak z hlediska eroze. Navíc jsou oba děje vzájemně provázány, což ovlivnilo postup řešení modelu.

Rozměrovost úlohy a rozsah modelu

Úloha eroze průsakové cesty byla řešena v trojrozměrném prostředí. Z důvodu snížení doby výpočtu, která roste kvadraticky s počtem uzlů v oblasti (resp. počtem neznámých), a vzhledem k předpokládané osově symetrii úlohy bylo možné model rozdělit podél osy vzorku a uvažovat pouze s jednou jeho polovinou. Tím byl celkový počet elementů redukován na polovinu. Vyšší úroveň zjednodušení na 2D (rovina vedená v ose vzorku) nebyla po konzultacích se členy EWG-IE doporučována.

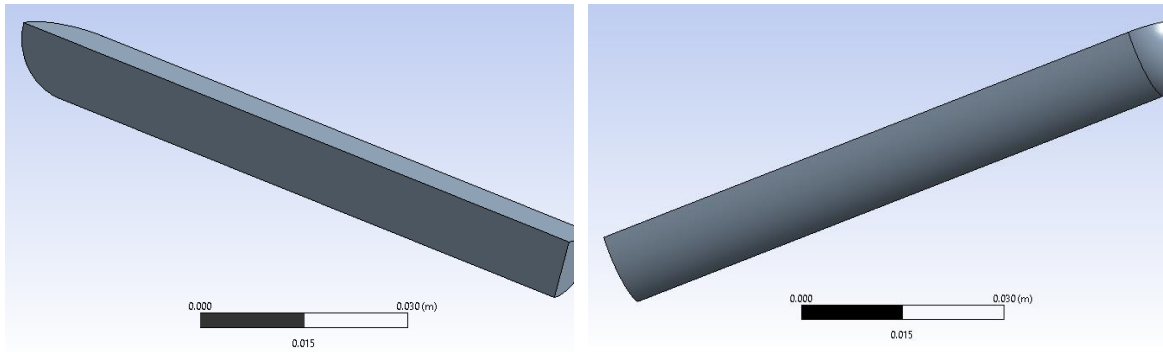
Geometrie průsakové cesty

Při provádění experimentů byla pozorována nahodilost vývoje průsakové cesty. V rámci zjednodušení sestavení modelu bylo uvažováno s průsakovou cestou tvaru dolní poloviny podélně uloženého válce s připojenou čtvrtinou koule. Průsaková cesta pak byla podélně rozdělena (viz Rozměrovost úlohy a rozsah modelu). Vzniklý tvar ukazuje obr. 7.1.

Diskretizace náhradní oblasti

Pro lepší vystihnutí tvaru čela průsakové cesty byla jako základní těleso použita část koule. Z toho důvodu byly pro diskretizaci zvoleny čtyřstěny s 10-ti uzly (4 ve vrcholech elementu, 6 na jeho hranách), které nejlépe vystihly zadaný tvar. Jejich použití mělo navíc výhodu, že ANSYS používá pro 3D modelování vedení tepla i pro napjatost elementy

stejného řádu, a tudíž nebylo nutné měnit síť při střídání analýz. Velikost elementů byla zvolena s ohledem na požadované výsledky a jejich další použití (2-20 mm).



Obr. 7.1 Tvar předdefinované průsakové cesty

Vlastnosti prostředí

Materiály vzorku a průsakové cesty byly uvažovány jako homogenní izotropní s konstantní objemovou hmotností. Tento úvodní předpoklad byl potvrzen během provádění experimentů.

Pružnost prostředí

Po řešení testovacích úloh napjatosti bylo zjištěno, že výsledné posuny uzlů modelu jsou velice malé a úloha se tedy pohybuje v řádu malých deformací. Pro analýzy napjatosti bylo možné vždy použít původní geometrii modelu (pouze s upravenými charakteristikami materiálu tak, jak postupně docházelo k erozi), tj je uvažováno s plně elastickým materiálem. Podkladem k tomuto zjištění je zde uvedený výpočet dle standardních vztahů pro elastické prostředí. Pro zjednodušení výpočtu podélné deformace vzorku bylo uvažováno s rovnoměrným zatížením nátokového čela vzorku.

Maximální posun ve směru podélné osy vzorku (dle modelu: osa x)

Délka vzorku:	$l_{vzorek} = 0,25 \text{ m}$
Modul pružnosti materiálu vzorku:	$E_{vzorek} = 20 \text{ MPa}$
Rozdíl piezometrických výšek:	$H = 0,212 \text{ m}$
Hustota vody:	$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
Maximální tlak = maximální napětí v ose x :	$p_{max} = \sigma_x = Hg\rho_w =$ $= 0,212 \times 9,81 \times 1000 = 2079,7 \text{ Pa}$
Poměrné přetvoření v ose x :	$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_{vzorek}} = \frac{2079,7}{20 \times 10^6} = 0,000104$

Přetvoření v ose x:

$$\begin{aligned}\Delta l_{vzorek,x} &= \varepsilon_x * l_{vzorek} \\ &= 0,000104 * 0,25 = \\ &= 0,000026 \text{ m} = \mathbf{0,026 \text{ mm}}\end{aligned}$$

Maximální posun ve svislém směru (dle modelu: osa y)

Hustota vody:

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Pórovitost materiálu:

$$n = 0,345$$

Efektivní měrná hmotnost materiálu vzorku:

$$\begin{aligned}\rho_{vzorek,ef} &= (\rho_{zrn} - \rho_w)(1 - n) = \\ &= (2638 - 1000)(1 - 0,345) = \\ &= 1072,9 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Výška propustoměru = výška vzorku:

$$a_{prop} = 0,12 \text{ m}$$

Maximální napětí v ose y:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \rho_{vzorek,ef} g a_{prop} = \\ &= 1072,9 \times 9,81 \times 0,12 = 1263 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Poměrné přetvoření v ose y:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_{vzorek}} = \frac{1263}{20 \times 10^6} = 0,000063$$

Přetvoření v ose y:

$$\begin{aligned}\Delta a_{pr} &= \varepsilon_y \times a_{prop} \\ &= 0,000063 \times 0,12 = \\ &= 0,0000076 \text{ m} = \mathbf{0,0076 \text{ mm}}\end{aligned}$$

Z výsledků je patrné že při zjednodušeném zatížení vznikají pouze malé deformace vzorku. Pro modelování napjatosti a přetvoření tedy bylo možné použít teorii prvního řádu, tj. geometrie modelu se neměnila a nedocházelo k plastickým deformacím.

Vlastnosti kapaliny

Při řešení analýzy proudění bylo uvažováno s nestlačitelností vody a s její konstantní hustotou v čase.

Předpoklad determinismu

Pro model byl použit předpoklad determinismu. Veškeré vstupní i výstupní hodnoty modelu byly jisté, tj. neuplatňovala se zde žádná nahodilost.

7.2.3 Stavové veličiny

Stavové veličiny v modelu jsou čtyři:

- vektor piezometrických výšek \mathbf{H} (pro model proudění podzemní vody),
- vektor posunů \mathbf{u} (pro model napjatosti),
- vektor poměrných přetvoření $\boldsymbol{\varepsilon}$ [-],
- tenzor napětí $\boldsymbol{\sigma}$ [Pa].

Z těchto veličin lze odvodit další veličiny, které byly použity buď jako vstup do následující analýzy nebo pro posouzení podmínky pro erozi materiálu. Konkrétně se jednalo o následující veličiny:

- vektor gradientů piezometrických výšek $\mathbf{grad H} = \mathbf{J}$ [-],
- vektor objemových sil působících na elementy $\mathbf{F}_V^{(ELEM)}$ [N],
- vektor hlavních napětí $\boldsymbol{\sigma}_h$ [Pa].

7.2.4 Strategie při simulaci eroze

Zvolený program pro modelování implicitně nezahrnuje simulaci eroze. Proto byla použita strategie dvou částí modelu:

1. vzorek,
2. průsaková cesta.

Každá část byla pro účely diskretizace popsána jedním makroelementem (viz obr. 7.10). Elementy obou částí měly na rozhraní společné uzly sítě. Pro jednotlivé části byly definovány materiálové vlastnosti. První část modelu (vzorek) byla definována materiálovými charakteristikami písku, druhá část simulovala průsakovou cestu, resp. vodu v průsakové cestě a hydraulická vodivost této části byla cca 100 000× vyšší. Materiál byl také i mnohem stlačitelnější. Při simulování proudění vody byly právě na rozhraní těchto dvou částí vyvozovány vyšší proudové síly než jinde ve vzorku, což bylo indikátorem možné eroze. Zda k erozi dojde bylo řešeno za použití analýzy napjatosti, kdy vstupní veličinou byly mimo jiné i proudové síly působící na jednotlivé elementy sítě. Výstupem analýzy napjatosti byl stupeň stability elementů náležících pod geometrii první části (vzorek) na kontaktu průsakové cesty a vzorku. V případě, že stabilita elementu klesla pod předem stanovenou mez, byla u předmětného elementu provedena změna materiálu (materiál vzorku byl nahrazen materiálem průsakové cesty). Tímto bylo zajištěno rozšiřování a prodlužování modelové průsakové cesty.

Alternativní přístup k vytvoření geometrie a řešení eroze

Jiným způsobem vytvoření geometrie je vyřiznutí části objemu představujícího průsakovou cestu z původního kvádru vzorku. Samotná průsaková cesta by pak nebyla součástí modelu. Vývoj průsakové cesty by mohl být modelován postupnou změnou výpočtové sítě, kdy místo prosté změny vlastností materiálu by došlo ke změně původní geometrie modelu a předefinování ploch použitých ke generování sítě. Takový postup se však jevil jako neschůdný vzhledem k časové náročnosti výpočtu vyžadujícího generování nové výpočtové sítě a přípravu nových výstupních matic (s každým generováním sítě by došlo k vytvoření jiného počtu elementů oproti předchozímu časovému kroku).

7.3 Formulace úlohy

Primární analýzou popisující změnu modelu byla analýza proudění podzemní vody. Na základě výsledků bylo provedeno vyhodnocení stability všech elementů na stěnách průsakové cesty (případně i v hlubších vrstvách) (viz kapitola 7.4.2), podle kterého se pak prováděly změny materiálu. Pro nástin podmínek napětí ve vzorku byla po vyřešení proudění vody provedena i analýza napjatosti. Při analýze napjatosti byl vzorek zatížen vlastní vahou, vztakovou silou od vody a proudovými silami. Proudové síly bylo nutné předem stanovit, na základě výsledků analýzy proudění vody (viz kapitola 7.4.1).

Pro zajištění přesné počáteční podmínky byla před vlastní simulací vyřešena úloha ustáleného proudění podzemní vody. Výsledné piezometrické výšky na celé oblasti byly použity jako počáteční hodnoty na oblasti v čase t_{beg} .

Jak již bylo řečeno, standardně by se jednalo o úlohy neustálené (jak proudění, tak i napjatost). Z důvodu omezení použitého programu ale nebylo možné provádět obě analýzy současně a používat výstupy z analýzy proudění jako vstupy analýzy napjatosti. Vzhledem k tomu, že jsou obě úlohy provázané, bylo nutné v každém časovém kroku jednu analýzu přerušit a spustit druhou analýzu. Výsledky pak byly přenášeny mezi analýzami pomocí číselných matic. Pro pokrytí změn okrajových podmínek mezi časy t a $t+\Delta t$ bylo ale třeba provádět neustálenou „sub-analýzu“ proudění s časovým krokem menším než vlastní časový krok simulace (viz. obr. 7.3). Poslední výsledek sub-analýzy proudění byl použit pro definici sil vstupujících do analýzy napjatosti. Prakticky se tedy jednalo o úlohy kvazi-ustálené, kde se řešení provádělo s časově navazujícími ustálenými úlohami. Uložené piezometrické výšky ze sub-analýzy byly použity v dalším časovém kroku jako počáteční podmínka nové sub-analýzy.

Pro přehlednost následuje pořadí úloh v modelu (viz též obr. 7.3):

1. ustálená úloha proudění podzemní vody (pro získání počáteční podmínky celé simulace),
2. neustálená sub-analýza proudění podzemní vody,
3. úloha napjatosti.

7.3.1 Ustálené proudění podzemní vody

Hledanou stavovou veličinou v úloze proudění podzemní vody byly piezometrické výšky v uzlech sítě. Řídící rovnice ustálené úlohy má tvar (Bear a Verruijt, 1987):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) = 0 \quad [s^{-1}], \quad (7.1)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 k_i ... hydraulická vodivost v souřadné ose x_i [m/s],
 x_i ... souřadná osa, $i = 1, 2, 3$,

Vztah je následně nutné doplnit o okrajové podmínky (OP), které slouží k nalezení řešení. Pro model ustáleného proudění byly na nátok a výtok zadány Dirichletovy okrajové podmínky 1. druhu, které mají tvar:

$$H(x, y, z) |_{\Gamma_1} = \bar{H}(x, y, z), \quad (7.2)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 \bar{H} ... známá piezometrická výška na hranici oblasti [m],
 Γ_1 ... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 1. druhu.

Na okraje oblasti, přes které se proudění nerealizuje, se doplňuje podmínka nulového toku, tj. upravená Neumannova okrajová podmínka 2. druhu:

$$k_i \frac{\partial H}{\partial x_i} n_i |_{\Gamma_2} = 0 \quad [m/s], \quad (7.3)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 k_i ... hydraulická vodivost v souřadné ose x_i [m/s],
 n_i ... směrový kosinus vektoru vnější normály k hranici Γ_2 [-],
 Γ_2 ... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 2. druhu.

Pro řešení úlohy lze využít metodu analytickou či numerickou. V případě složitějších modelů (jako je v této práci) je výhodné používat numerické metody. Zvolený program ANSYS pro takovéto úlohy používá metodu konečných prvků.

7.3.2 Neustálené proudění podzemní vody

Neustálená úloha proudění byla použita v rámci sub-analýzy proudění. Hledanou stavovou veličinou byly opět piezometrické výšky v uzlech sítě. Pro neustálené proudění je třeba do rovnice (7.1) zahrnout změnu hmotnosti vody v systému. Po úpravě nabývá vztah tvaru (Bear a Verruijt, 1987):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + S_o \frac{\partial H}{\partial t} = Q'_D \quad [\text{s}^{-1}], \quad (7.4)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 k_i ... hydraulická vodivost v souřadné ose x_i [m/s],
 Q'_D ... objemový zdroj/propad [s^{-1}],
 S_o ... specifická zásobnost [m^{-1}],
 x_i ... souřadná osa, $i = 1, 2, 3$.

Pro získání jednoznačného řešení je třeba model doplnit o okrajové podmínky a jejich případné změny v čase. V této práci byly použity OP 1. a 2. druhu (viz kapitola 7.3.1):

$$H(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = \bar{H}(x, y, z) \quad [\text{m}], \quad (7.5)$$

$$k_i \frac{\partial H}{\partial x_i} n_i |_{\Gamma_2} = 0 \quad [\text{m/s}], \quad (7.6)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 \bar{H} ... známá piezometrická výška na hranici oblasti [m],
 n_i ... směrový kosinus vektoru vnější normály k hranici Γ_2 [-],
 t ... čas [s],
 Γ_1 ... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 1. druhu,
 Γ_2 ... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 2. druhu.

Dále je třeba stanovit výchozí stav modelu, tj. piezometrické výšky v čase t_{beg} . K tomu slouží počáteční podmínka (PP), která má tvar:

$$H(x, y, z, t_{beg}) |_{\Omega} = H_0 \quad [\text{m}], \quad (7.7)$$

kde H ... piezometrická výška [m],
 H_0 ... počáteční piezometrická výška [m],
 Ω ... náhradní oblast.

Stejně jako pro řešení úlohy ustáleného proudění, je možné pro řešení využít metodu analytickou nebo numerickou. Vzhledem k náročnosti neustálené úlohy byla použita metoda konečných prvků integrovaná v programu ANSYS.

7.3.3 Kvazi-ustálená úloha napjatosti

Pro účely práce byla použita kvazi-ustálená úloha napjatosti. Formálně se jedná o úlohu ustálenou, do které vstupují data z předcházející časově závislé úlohy proudění podzemní vody. Dle předpokladů modelu lze použít teorii 1. řádu. Stavovou veličinou v úloze napjatosti je posun, resp. vektor posunů \mathbf{u} . Pro jednotlivé složky posunů pak je možné odvodit vektor přetvoření $\boldsymbol{\varepsilon}$ a tenzor napětí $\boldsymbol{\sigma}$. Celkem je v úloze 15 rovnic o 15 neznámých, které se aplikují pro celou náhradní oblast (ANSYS, 2013b):

Geometrické rovnice:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad [-], \quad (7.8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad [-], \quad (7.9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad [-], \quad (7.10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad [-], \quad (7.11)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \quad [-], \quad (7.12)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad [-], \quad (7.13)$$

Materiálové rovnice:

$$\sigma_x = \frac{E[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z]}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [\text{Pa}], \quad (7.14)$$

$$\sigma_y = \frac{E[(1-\nu)\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_z]}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [\text{Pa}], \quad (7.15)$$

$$\sigma_z = \frac{E[(1-\nu)\varepsilon_z + \nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y]}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [\text{Pa}], \quad (7.16)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xz} \quad [\text{Pa}], \quad (7.17)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xy} \quad [\text{Pa}], \quad (7.18)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{yz} \quad [\text{Pa}], \quad (7.19)$$

Statické rovnice:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \bar{X} = 0 \text{ [Pa/m]}, \quad (7.20)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \bar{Y} = 0 \text{ [Pa/m]}, \quad (7.21)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \bar{Z} = 0 \text{ [Pa/m]}, \quad (7.22)$$

kde	E	... modul pružnosti [Pa],
	u_x, u_y, u_z	... posun ve směru osy x , y a z [m],
	$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	... vnější síly [Pa/m],
	$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	... smykové zkosení [-],
	$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	... poměrné přetvoření v osách x , y , a z [-],
	ν	... Poissonova konstanta [-],
	$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	... normálová napětí v osách x , y , a z [Pa],
	$\tau_{xz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$	... smyková napětí [Pa].

Vztahy je nutné doplnit o okrajové podmínky. Zde se jednalo o Dirichletovu OP 1. druhu a definování posunů na hranicích oblasti, které mají sloužit jako podpory a umožňovat posuny jen v omezených směrech. Formálně má OP 1. druhu tvar:

$$u_i(x, y, z) |_{\Gamma_1} = \bar{u}_i(x, y, z) \text{ [m]}, \quad (7.23)$$

kde	u_i	... posun ve směru osy x , y , nebo z [m],
	\bar{u}_i	... známý posun ve směru osy x , y , nebo z na hranici oblasti [m],
	Γ_1	... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 1. druhu.

Pro řešení úloh napjatosti se nejčastěji používá metoda konečných prvků. Vzhledem k přístupnosti této metody v programu ANSYS byla metoda použita i zde.

Analýza napjatosti přímo navazovala na řešení analýzy proudění vody. Na základě gradientů piezometrických výšek byly stanoveny proudové síly dle rovnice (5.15) působící na elementy. Vzhledem k tomu, že síly lze v analýze napjatosti aplikovat pouze na uzly výpočtové sítě, byly proudové síly na elementech přepočteny na síly v uzlech (kapitola 7.4.1).

7.3.4 Způsob vyhodnocování

Výstupem analýzy proudění podzemní vody byly piezometrické výšky na celé náhradní oblasti a z nich odvozené hydraulické gradienty působící na elementy. Získaná data byla vizualizována a z hodnot hydraulických gradientů byly vypočteny proudové síly působící na jednotlivé elementy.

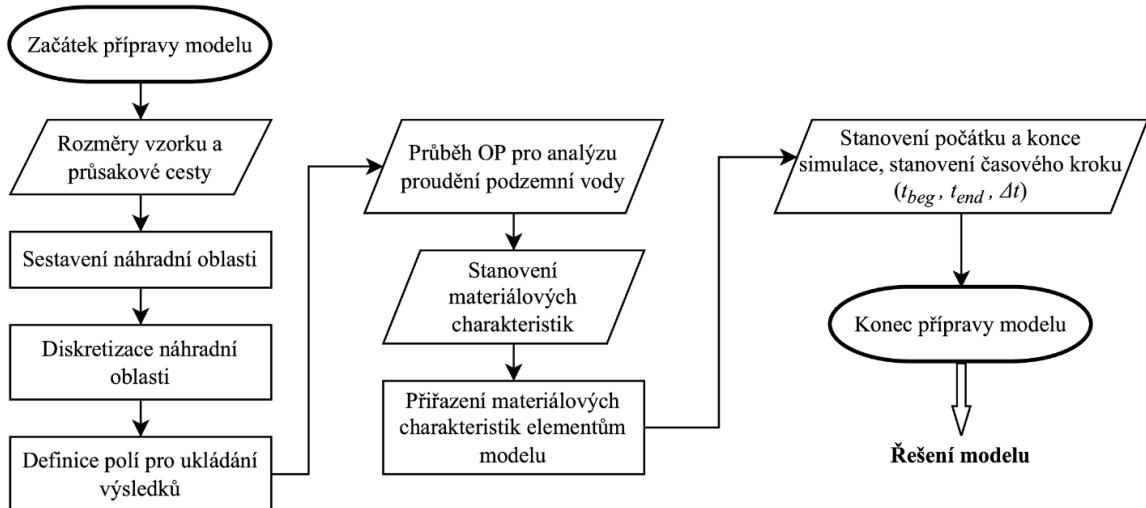
Výstupem analýzy napjatosti jsou vizualizace průběhů normálových, smykových a hlavních napětí.

Z geometrie elementů, sklonu kontaktu vzorku a průsakové cesty, a hydraulického gradientu byl stanoven stupeň stability vybraných elementů dle rovnic (5.18) a (7.40) a byla provedena posouzení, zda u elementů dochází k erozi. V případě, že k erozi došlo, provedla se změna jejich materiálových vlastností a výpočet přešel do dalšího časového kroku.

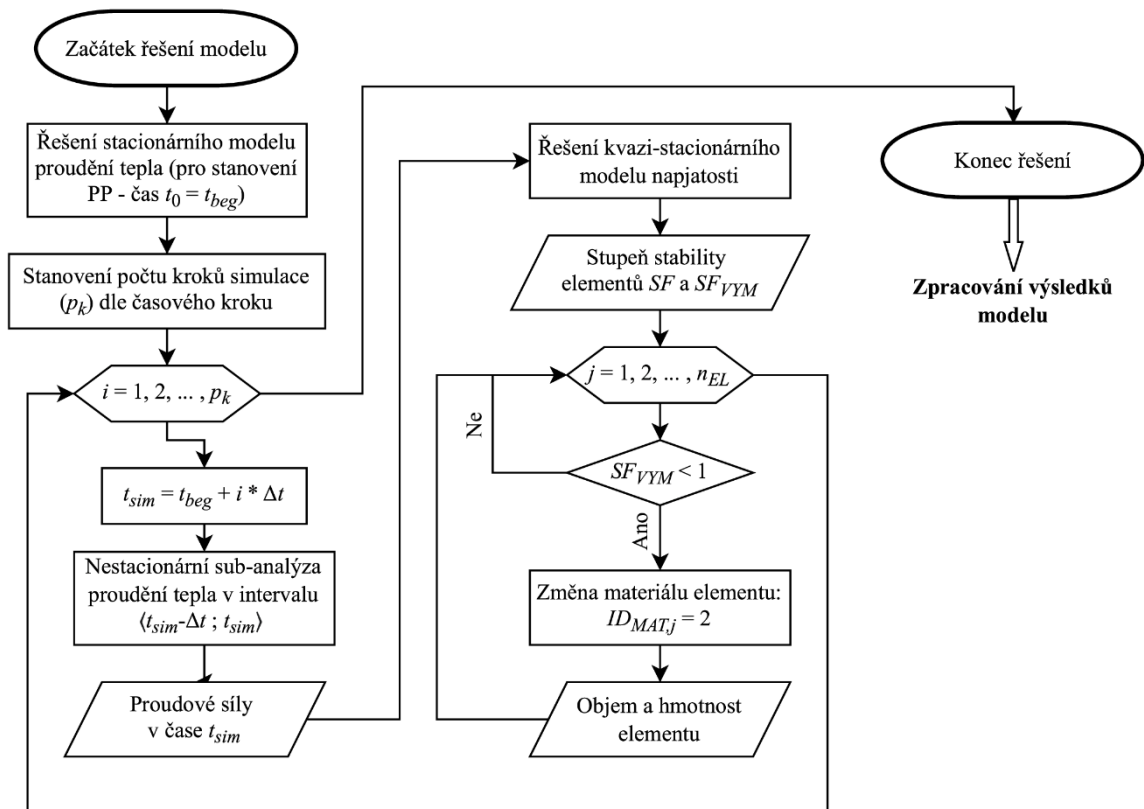
7.4 Algoritmizace a programování

Hlavním výstupem analýz byla stabilita elementů, z čehož následně vycházela změna modelu dle stanovených pravidel. Analýzu proudění vody bylo tedy nutné v každém kroku výpočtu doplnit řešením úlohy napjatosti. Jednou ze vstupních veličin úlohy napjatosti byly proudové síly vyvolané právě prouděním vody. Vzhledem k tomu, že data jsou při spuštění nové analýzy ztracena a nebylo by možné zcela zachovat nestacionaritu modelu, bylo přistoupeno k vytvoření nestacionární sub-analýzy proudění (viz. obr. 7.3) s časovým krokem menším než vlastní časový krok simulace. Poslední krok sub-analýzy byl uložen do matice, výsledky se vizualizovaly a provedla se analýza napjatosti v daný časový okamžik opět následovaná vizualizací. Poté byla provedena změna modelu dle navrženého schéma. Následoval další časový krok, ve kterém opět byla provedena sub-analýza proudění vody následovaná analýzou napjatosti. Vývojové diagramy pro numerický model ukazují obr. 7.2 až 7.4.

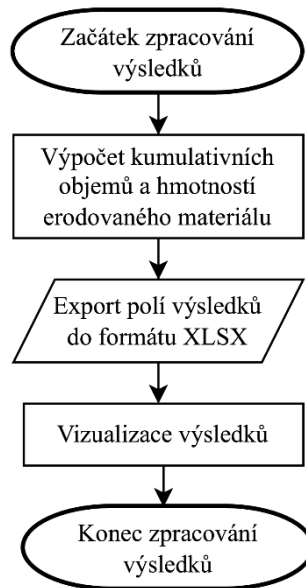
Programování bylo provedeno v ANSYS Mechanical APDL. Jedná se o jazyk založený na jazyku FORTRAN což je patrné při zápisech do matic a při vybírání jejich prvků. Výhodou byla rozsáhlá technická dokumentace, možnost přímého výběru elementů, dalších částí geometrie a jednoduchost získání jejich popisných informací. Přímé programování v jazyce se zde muselo využít též z důvodu aplikace mnoha smyček a uživatelsky definovaných výpočtů, které ve standardním grafickém rozhraní ANSYS provádět nelze.



Obr. 7.2 Vývojový diagram přípravy modelu (preprocessing)



Obr. 7.3 Vývojový diagram řešení modelu



Obr. 7.4 Vývojový diagram zpracování výsledků modelu (postprocessing)

Problematika počáteční podmínky na začátku simulace

Pro první nestacionární sub-analýzu bylo třeba připravit počáteční podmínku pro řešení proudění. Tu bylo nutné zadat průběhem piezometrických výšek stanovených řešením ustálené úlohy. Pokud by byla zadána konstantně pro celou oblast pouze odhadem, došlo by v prvních sekundách simulace k pomalému procesu stabilizace hydraulických podmínek, což nebylo na začátku simulace žádoucí, neboť simulace měla začínat ve fázi stabilních podmínek proudění (viz obr. 7.19 a 7.20). Před vlastní simulací byla předržena úloha ustáleného proudění s okrajovými podmínkami (OP) nastavenými pro počáteční čas simulace t_{beg} . Výsledky byly použity jako výchozí stav pro proudění neustálené.

7.4.1 Stanovení zatížení pro analýzu napjatosti

Součástí algoritmu bylo i stanovení vybraných objemových sil na elementech a způsob jejich rozdělení do uzlů. Do uzlů byly síly rozdělovány z důvodu omezení modelu, který povoloval pouze zadání sil do uzlů sítě, nebo tlaků na plochy elementů. Na daný element obecně působila vlastní tíha, tíha vody v pórech materiálu a objemové síly vztlakové a od proudící vody. Problematikou výpočtu sil a jejich rozdělením do uzlů se zabývá následující text. Součástí kapitoly je též způsob, jakým se dělily proudové síly do uzlů a testování navrhovaných postupů.

Pro část vzorku se aplikovaly všechny síly s tím, že vztlakovou sílu lze zahrnout do objemové hmotnosti materiálu, v případě průsakové cesty se vztlakové síly neuplatňují.

Na elementy průsakové cesty působila pouze vlastní tíha a proudové síly (které byly vzhledem k velice nízkým hydraulickým gradientům velice malé).

Platilo tedy následující:

$$\rho_{vzorek,ef} = (\rho_{zrn} - \rho_w)(1 - n) \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (7.24)$$

$$\rho_{cesta} = \rho_w \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (7.25)$$

kde ρ_{cesta} ... měrná hmotnost materiálu průsakové cesty [kg/m³],
 $\rho_{vzorek,ef}$... efektivní objemová hmotnost materiálu vzorku [kg/m³],
 ρ_{zrn} ... měrná hmotnost zrn materiálu [kg/m³].

Pro elementy v modelu platily následující vztahy sestavené pro použitou orientaci souřadnicového systému v ANSYS:

$$F_{G,vzorek,ef}^{(ELEM)} = -V_{ELEM} * \rho_{vzorek,ef} * g \text{ [N]}, \quad (7.26)$$

$$F_{G,cesta}^{(ELEM)} = -V_{ELEM} * \rho_{cesta} * g \text{ [N]}, \quad (7.27)$$

$$F_{V,x}^{(ELEM)} = -V_{ELEM} * \rho_w * g * J_x^{(ELEM)} \text{ [N]}, \quad (7.28)$$

$$F_{V,y}^{(ELEM)} = -V_{ELEM} * \rho_w * g * J_y^{(ELEM)} \text{ [N]}, \quad (7.29)$$

$$F_{V,z}^{(ELEM)} = -V_{ELEM} * \rho_w * g * J_z^{(ELEM)} \text{ [N]}, \quad (7.30)$$

$$F_V^{(ELEM)} = \sqrt{\left(F_{V,x}^{(ELEM)}\right)^2 + \left(F_{V,y}^{(ELEM)}\right)^2 + \left(F_{V,z}^{(ELEM)}\right)^2} \text{ [N]}, \quad (7.31)$$

kde $F_{G,cesta}^{(ELEM)}$... tíhová síla působící na element průsakové cesty [N],
 $F_{G,vzorek,ef}^{(ELEM)}$... efektivní tíhová síla působící na element vzorku [N],
 $F_V^{(ELEM)}$... výslednice objemové síly působící na element [N],
 $F_{V,x}^{(ELEM)}$... objemová síla ve směru x působící na element [N],
 $F_{V,y}^{(ELEM)}$... objemová síla ve směru y působící na element [N],
 $F_{V,z}^{(ELEM)}$... objemová síla ve směru z působící na element [N],
 $J_x^{(ELEM)}$... hydraulický gradient ve směru x vypočtený na elementu [-],
 $J_y^{(ELEM)}$... hydraulický gradient ve směru y vypočtený na elementu [-],
 $J_z^{(ELEM)}$... hydraulický gradient ve směru z vypočtený na elementu [-],
 n ... pórovitost materiálu [-],
 V_{ELEM} ... objem elementu [m³],
 ρ_{cesta} ... měrná hmotnost materiálu průsakové cesty [kg/m³],
 ρ_v ... objemová hmotnost materiálu [kg/m³],
 $\rho_{vzorek,tot}$... celková měrná hmotnost materiálu vzorku [kg/m³],
 ρ_w ... hustota vody [kg/m³].

V analýze napjatosti nebylo třeba provádět výpočet vlastní tíhy elementů. Tu program stanoví sám v první fázi analýzy. Bylo však třeba stanovit výše zmíněné proudové síly a následně je rozdělit do uzlů výpočtové sítě, neboť jiné zadání sil software neumožňoval. Rozdělení sil do uzlů proběhlo následujícím postupem:

1. V programu byl vybrán 1. element sítě a byla stanovena síla $F_V^{(ELEM)}$ a její příslušné složky dle vztahů (7.28) až (7.31).
2. Byly identifikovány uzly popisující vybraný element.
3. Síla $F_V^{(ELEM)}$ a její složky byly rovnoměrně rozděleny (viz kapitola 7.4.1.1) do všech uzlů elementu (vzhledem k použitému 10tubodovému elementu byly síly děleny 10):

$$F_{V,uzel}^{(ELEM)} = \frac{1}{10} F_V^{(ELEM)} \text{ [N]}, \quad (7.32)$$

$$F_{V,x_i,uzel}^{(ELEM)} = \frac{1}{10} F_{V,x_i}^{(ELEM)} \text{ [N]}, \quad (7.33)$$

kde $F_{V,uzel}^{(ELEM)}$... část objemové síly působící v uzlu [N],

$F_{V,x_i,uzel}^{(UZEL)}$... část objemové síly ve směru x_i (kde $x_i = x, y, z$) působící v uzlu [N].

4. Pro každý uzel výpočtové sítě byly identifikovány elementy k němu připojené.
5. Vypočtené části sil v uzlech byly zapsány do číselné matice a byl vybrán následující element.
6. Po provedení výpočtu na všech elementech byly části sil v uzlech sečteny a pro každý uzel výpočtové sítě byla stanovena jedna sada objemových sil (3 složky – x, y a z):

$$F_{V,x_i}^{(UZEL)} = \sum_{j=1}^{n^{(ELEM)}} F_{V,j,x_i}^{(ELEM)} \text{ [N]}, \quad (7.34)$$

kde $F_{V,x_i}^{(UZEL)}$... objemová síla ve směru x_i (kde $x_i = x, y, z$) působící v uzlu [N],

$F_{V,j,x_i,uzel}^{(ELEM)}$... část objemové síly ve směru x_i od elementu j přenesená na uzel [N],

j ... pořadí elementu ($j = 1, 2, \dots, n^{(ELEM)}$) [-],

$n^{(ELEM)}$... počet elementů připojených k danému uzlu [-].

Hydraulické gradienty v rovnicích (7.28) až (7.30) byly extrahovány z výsledků posledního kroku předcházející sub-analýzy proudění vody. Koncepti dělení sil popisuje kapitola 7.4.1.1.

7.4.1.1 Testování koncepce zatížení a dělení sil

Před samotnou aplikací dělení sil v modelu byla provedena testovací sada výpočtů ověřující správnost koncepce. Testy byly provedeny na krychli jednotkového objemu a jednotkových rozměrů zatížené v následujících variantách:

- pouze vlastní tíhou,
- vlastní tíhou a vztakovou silou,
- vlastní tíhou, vztakovou silou a vzestupným prouděním.

Výsledkem testování bylo potvrzení správnosti, resp. výběr varianty dělení objemových proudových sil do uzlů, jehož mechanismus je detailně popsán v předchozí kapitole.

Materiál krychle byl zvolen přibližně shodný s materiálem použitým v experimentech:

hydraulická vodivost: $k = 7,99 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,

modul pružnosti: $E = 20 \text{ MPa}$,

Poissonova konstanta: $\nu = 0,33$.

Vzorek byl podepřen na dolní straně, kde byla zadána OP nulového posunu ve vertikálním směru, u ostatních stěn mimo horní byly nastaveny podmínky nulových posunů ve směrech jejich normál. Formálně se jednalo o stejné nastavení okrajových podmínek jako v experimentu. Při aplikaci proudové síly na testovací krychli byl zkoumán vliv jednotkového hydraulického gradientu při vzestupném proudění. Spodní stěna krychle byla zatěžována piezometrickou výškou 2 m v. s., na horní stěně pak byla zadána OP jako piezometrická výška 1 m v. s. Při výšce krychle 1 m tak bylo dosaženo hydraulického gradientu $J = 1$, tedy:

$$J_y = \frac{\Delta H}{\Delta y} = \frac{2 - 1}{1} = 1, \quad (7.35)$$

kde J_y ... hydraulický gradient ve směru y [-],

ΔH ... rozdíl piezometrických výšek [m],

Δy ... průsaková délka ve směru y [m].

Zatížení vzorku vlastní tíhou suchého materiálu

V první fázi byla ověřena správnost výpočtu napětí ve vzorku zatíženého pouze vlastní tíhou materiálu bez přítomnosti vody. Pro jednotkovou krychli z materiálu odpovídající zkoumanému písku platilo:

$$\rho_{zm} = 2638 \text{ kg/m}^3,$$

$$n = 0,345,$$

$$\rho_V = \rho_{zm} (1 - n) = 2638 * (1 - 0,345) = 1727,89 \text{ kg/m}^3.$$

Vertikální napětí σ_y při jednoosé napjatosti lineárně klesá s hloubkou vzorku dle vztahu:

$$\sigma_y = -h_k \rho_V g \text{ [Pa]}, \quad (7.36)$$

kde g ... gravitační zrychlení [m/s^2] (zde: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$),

h_k ... výška testovací krychle [m],

ρ_V ... objemová hmotnost materiálu [kg/m^3],

σ_y ... normálové napětí ve vertikálním směru (osa y) [Pa].

Teoretická hodnota vertikálního napětí na dolní stěně testovací krychle je dle rovnice (7.36) $\sigma_y = -16951 \text{ Pa}$. Po provedení simulace v ANSYS byla vypočtená hodnota cca -16953 Pa , což lze považovat za přijatelný výsledek (odchylka cca $-0,01 \%$). Průběhy vertikálního normálového napětí pro tuto konfiguraci ukazuje obr. 7.5.

Zatížení vzorku vlastní tíhou materiálu nadlehčeného vodou

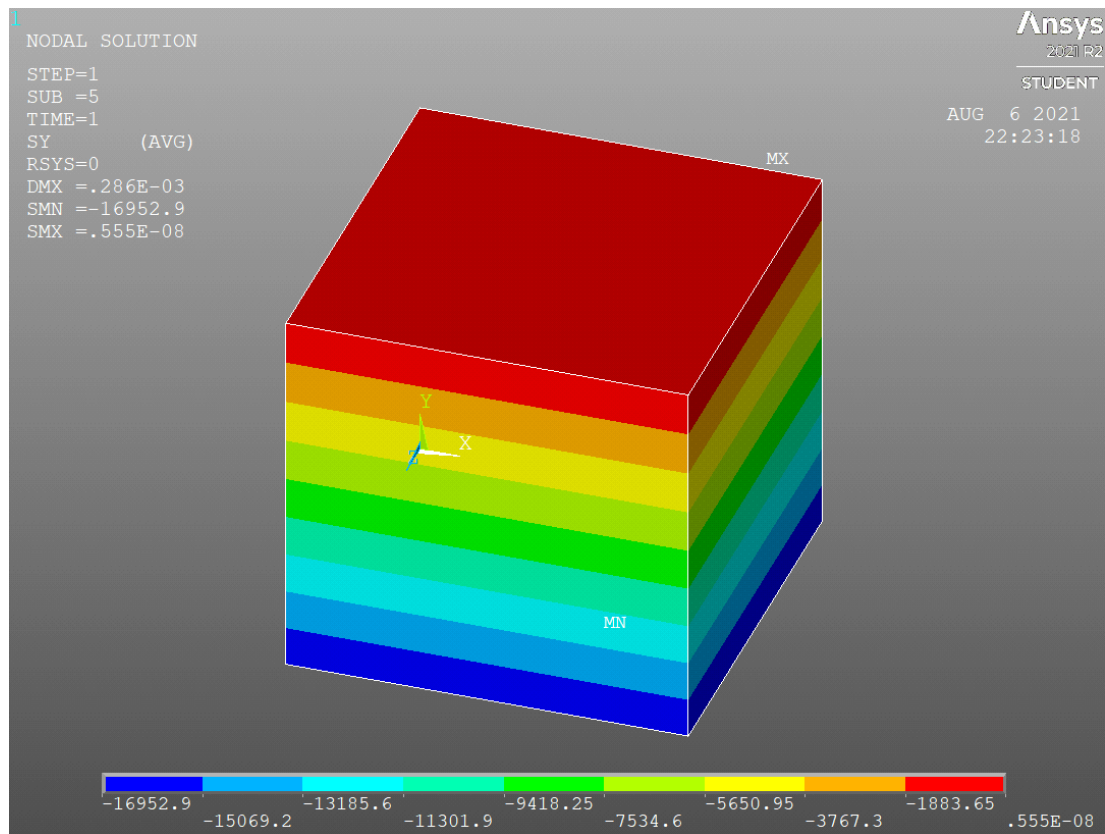
Obdobně byl proveden test výpočtu na krychli s materiálem nadlehčeným vodou (tzv. efektivní měrná hmotnost). Parametry výpočtu byly následující:

$$\rho_{zm} = 2638 \text{ kg/m}^3,$$

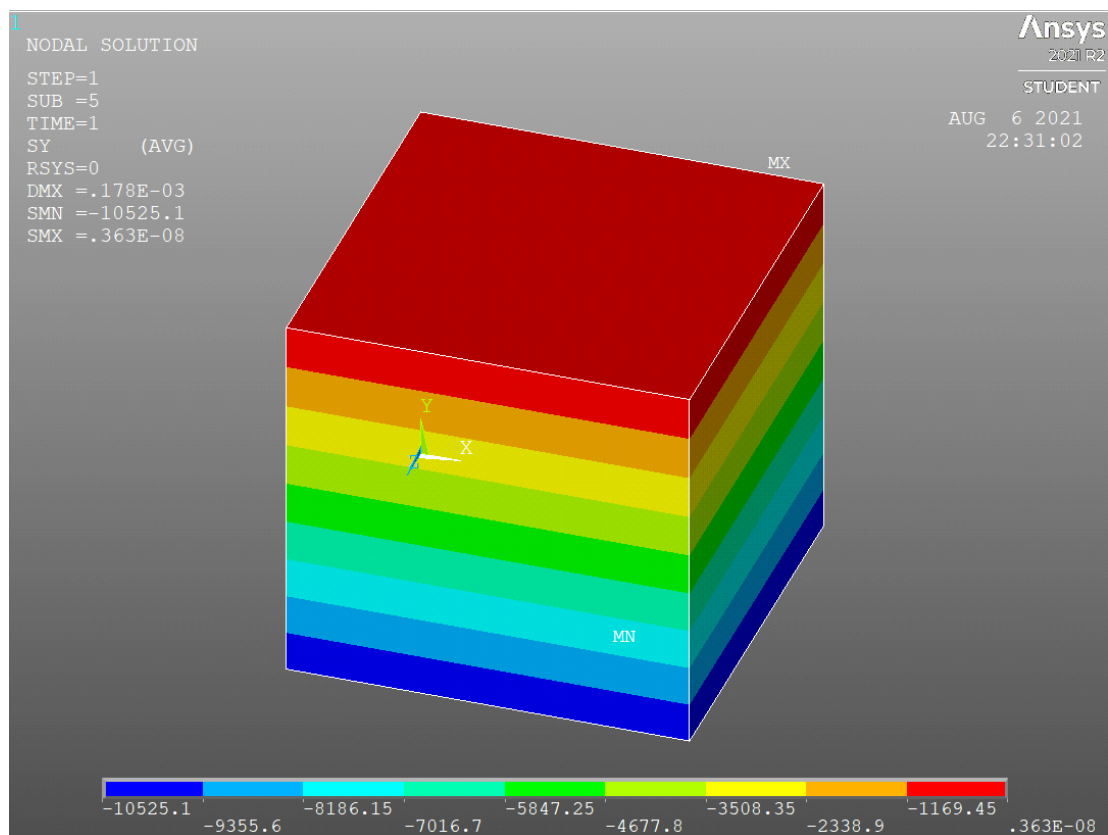
$$n = 0,345,$$

$$\rho' = (\rho_{zm} - \rho_w) (1 - n) = (2638 - 1000) (1 - 0,345) = 1072,89 \text{ kg/m}^3.$$

Teoretické napětí se řídí analogicky dle rovnice (7.36). Na dně krychle dosaženo napětí $\sigma_y = -10525,1 \text{ Pa}$. Programem vypočtená hodnota je $-10525,05 \text{ Pa}$ (viz obr. 7.6). Výsledek opět lze považovat za dostatečně přesný (odchylka cca $0,0005 \%$).



Obr. 7.5 Průběh vertikálních napětí v testovací krychli zatížené vlastní tíhou suchého materiálu



Obr. 7.6 Průběh vertikálních napětí v testovací krychli zatížené vlastní tíhou materiálu pod vodou

Zatížení vzorku proudovou silou a kombinací vlastní tíhy s proudovou silou

Po ověření správnosti výpočtu zatížení vzorku vlastní tíhou byl proveden test správnosti nastavení přepočtu sil z elementů na uzly sítě. Nejdříve bylo vyřešeno vertikální proudění podzemní vody o spočteném hydraulickém gradientu $J = 1$. Piezometrické výšky dle očekávání rovnoměrně klesaly směrem k horní stěně testovací krychle. Vzorek (resp. jednotlivé jeho elementy) byl zatížen vertikální proudovou silou. Následuje popis problematiky zadání proudových sil do uzlů sítě.

Proudové síly jsou silami objemovými, tj. vztahují se k řešenému elementu. Síly pro řešení napjatosti ale bylo nutné zadat do jednotlivých uzlů sítě. Bylo nutné stanovit postup, jakým se budou objemové síly přenášet do uzlů. Nejprve byla provedena analýza použitého elementu z hlediska jeho tvaru a možného zadání sil a přenosu sil stěnami. Následně byly stanoveny dvě možnosti přenosu objemových sil do uzlů:

1. rovnoměrné rozdělení síly z elementu do všech uzlů dle rovnic (7.32) a (7.33),
2. vážené rozdělení síly do hlavních a vedlejších uzlů na základě objemů částí elementů přispívajících k celkové proudové síle v uzlu.

Rovnoměrné rozdělení bylo provedeno prostým dělením síly do deseti uzlů definujících daný element. Rozdělení na základě vah bylo provedeno na základě výpočtu objemů a počtu přispívajících „podelementů“ pro daný uzel. Váhy byly zvoleny následovně (viz obr. 7.13):

- pro 4 hlavní uzly v rozích elementu: 1,4/32;
- pro 6 uzlů na hranách elementu: 4,4/32.

Oba tyto postupy dělení sil byly otestovány. Nejlepší srovnání výsledků bylo možno provést na vertikálních napětích vypočtených pro dané testy. V případě rovnoměrného dělení byly zjištěny relativně hladké průběhy vertikálních normálových napětí. Naopak při použití vah byly identifikovány nerovnoměrné průběhy posunů i napětí způsobené právě použitím vah. Vzhledem k tomuto zjištění byly obě varianty aplikovány i v ostrém modelu, aby se prošetřilo chování variant při jejich reálné aplikaci. Jejich rozdíly zde byly v podstatě zanedbatelné. Proto se dospělo k závěru, že spíše záleží na celkové konfiguraci modelu a na jemnosti výpočtové sítě (pro jemné dělení byly průběhy napětí prakticky identické). Pro jednoduchost bylo v ostrém modelu použito rovnoměrné dělení proudové síly do uzlů sítě dle rovnic (7.32) a (7.33).

7.4.2 Postup řešení vývoje průsakové cesty

Průsaková cesta byla v modelu simulována mnohem propustnějším materiálem, než byl samotný vzorek. Na kontaktu vzorku a průsakové cesty byly vyvozovány mnohem vyšší proudové síly než ve vlastním vzorku (byly zde dosahovány vyšší hydraulické gradienty). Elementy na tomto kontaktu a v jeho bezprostřední blízkosti byly erodovány za podmínky ztráty stability. Po ztrátě stability byla eroze simulována změnou materiálových charakteristik elementu vzorku na charakteristiky průsakové cesty.

Stupeň stability elementu SF , který byl stanoven dle rovnice (5.18) závisel na:

- vypočteném hydraulickém gradientu,
- sklonu kontaktu mezi materiály,
- efektivním úhlu vnitřního tření materiálu vzorku,
- objemové hmotnosti materiálu,
- úhlu působící průsakové síly (vztaženo k vodorovné rovině).

Při řešení eroze se postupovalo následovně:

1. Identifikovaly se všechny elementy, které by teoreticky mohly být erodovány.
2. K vybraným elementům se přiřadily jejich materiálové vlastnosti (efektivní úhel vnitřního tření, objemová hmotnost atp.).
3. Pro každý element se dle výsledků sub-analýzy proudění podzemní vody stanovil hydraulický gradient a úhel působení proudové síly.
4. Stanovil se stupeň stability pro každý řešený element.
5. Posoudila se podmínka eroze.
6. Pro elementy, které dle předchozí podmínky ztratily stabilitu, se provedla změna materiálových charakteristik.

Rychlost eroze je teoreticky dána:

$$\dot{\epsilon} = f(SF) = f(\alpha, \beta, J, \varphi, c), \quad (7.37)$$

- kde
- c ... koheze zeminy [Pa],
 - J ... hydraulický gradient [-],
 - α ... úhel sklonu svahu [°],
 - β ... úhel svírající výslednice průsakové síly od vodorovné roviny [°],
 - φ ... úhel vnitřního tření [°].

Stupeň stability byl stanovován vždy na stěnách průsakové trubice, přesněji na elementech tvořených testovaným materiálem, které byly v kontaktu s materiálem

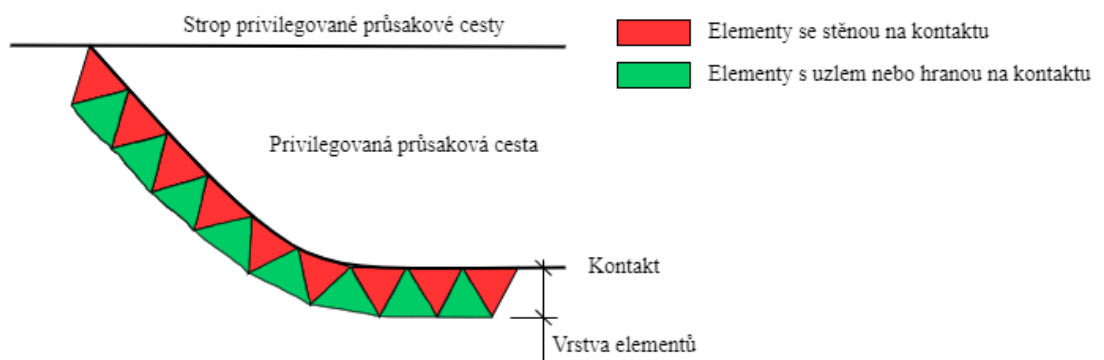
simulujícím vodu (obr. 7.7). Z vykresleného zjednodušeného řezu průsakovou cestou je patrné, že v modelu existovaly i elementy, které na kontaktu přímo neležely, měly na něm pouze jednu ze svých hran či pouze uzel. V takovém případě byla hodnota SF vypočtena z průměru hodnot SF okolních elementů:

$$\overline{SF} = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} SF_i \quad [-], \quad (7.38)$$

kde n_s ... počet elementů majících společnou stěnu s řešeným elementem [-],

SF_i ... stupeň stability i-tého elementu [-],

\overline{SF} ... průměrný stupeň stability elementu [-].



Obr. 7.7 Detail řešených elementů

Po stanovení stupňů stability elementů na kontaktu a v přidružených elementech bylo třeba určit, za jakých podmínek bude docházet k erozi průsakové cesty. Při přímém porovnávání SF proti hodnotě 1,0 ($SF \geq 1,0$ popisuje stabilní element, naopak $SF < 1,0$ definuje element nestabilní) docházelo ve srovnání s výsledky experimentů k dřívější a rozsáhlejší erozi dna i stěn průsakové cesty. Bylo proto třeba do modelu zahrnout faktory neobsažené v podmínce rovnováhy:

- tvar zrn,
- drsnost zrn, tření mezi zrny,
- uložení zrn s možným klenbovým účinkem na čele průsakové cesty,
- vliv měřítka modelu (poměr mezi charakteristickým rozměrem modelu a velikostí zrna materiálu).

Potřeba zahrnutí těchto faktorů byla též podepřena pozorováním během reálných experimentů, kdy docházelo k mnohem intenzivnější erozi čela cesty oproti dnu a stěnám. Souhrn těchto faktorů vstupujících do modelu se nazval koeficient průběhu eroze a_{SF} . Zavedení koeficientu zajistilo regulaci průběhu eroze dna a stěn průsakové cesty.

Nastavením hodnoty a_{SF} bylo možné erozi dna i stěn kalibrovat na data získaná z experimentu. Koeficient a_{SF} v byl v modelu dán pevnou hodnotou.

Dalším prvkem, který byl do modelu zahrnut je hloubkový faktor r_{SF} , který byl založen na následující úvaze:

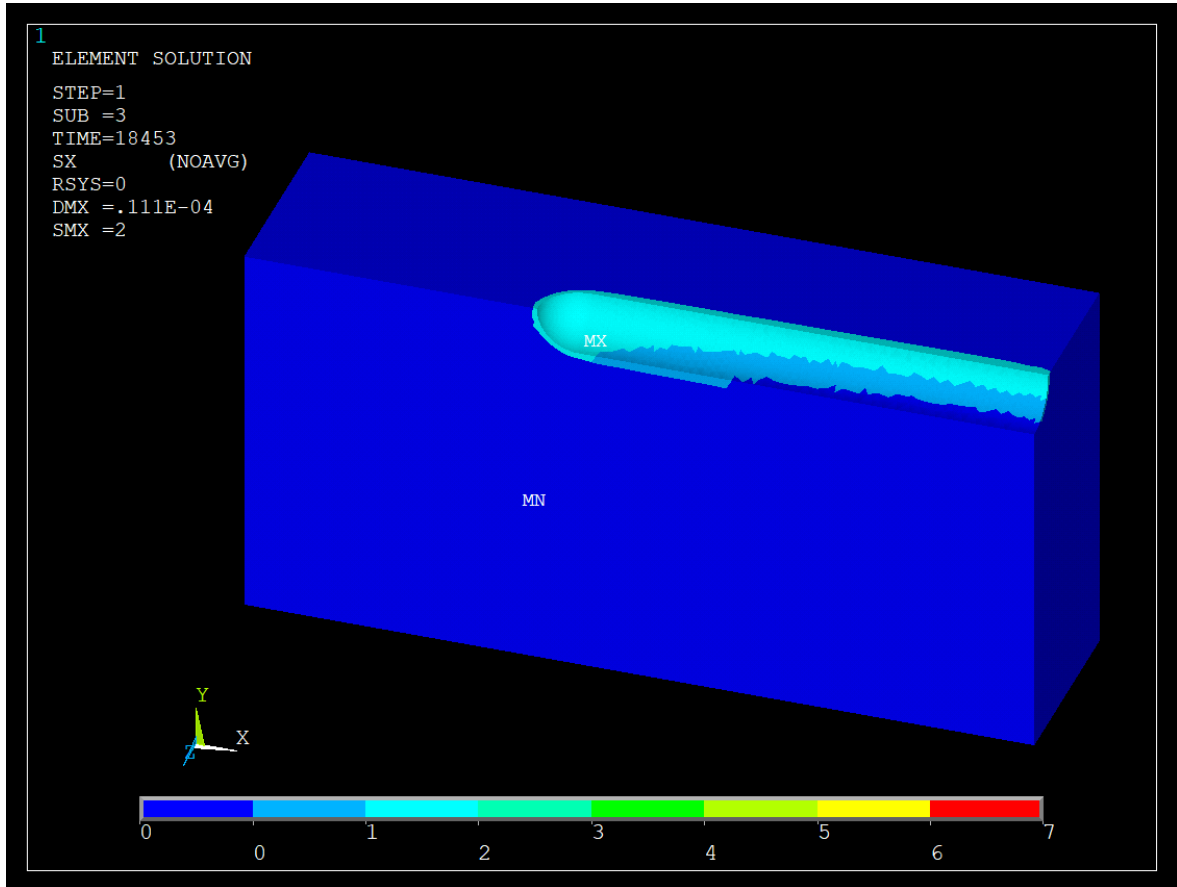
Je znám maximální stupeň stability SF_{MAX} vypočtený v nejstabilnější části modelu (zpravidla na dně průsakové cesty u výtoku). Stejně tak je známa i minimální hodnota SF nacházející se typicky na vrcholu čela průsakové cesty – SF_{MIN} . Příklad míst s extrémními hodnotami ukazuje obr. 7.9. Z těchto dvou veličin pak lze stanovit poměr dle:

$$r_{SF} = \frac{SF_{MAX}}{SF_{MIN}} [-], \quad (7.39)$$

kde r_{SF} ... hloubkový faktor [-],
 SF_{MAX} ... maximální stupeň stability [-],
 SF_{MIN} ... minimální stupeň stability [-].

Z poměru r_{SF} pak lze stanovit, kolikrát méně stabilní byl element s vypočteným SF_{MIN} , dle vztahu (5.18), oproti SF_{MAX} . Typicky se jednalo o hodnoty v rozmezí 10 až 15. Tímto poměrem bylo možné stanovit, kolik následujících vrstev za nestabilním elementem bylo třeba prověřit (vše ve stejném čase simulace) z hlediska jejich stability. Vzhledem k umístění extrémních hodnot tedy bylo více vrstev prověřováno na čele průsakové cesty, neboť právě tam se vyskytovaly velice nízké hodnoty SF – probíhala zde intenzivnější eroze. Počet vrstev byl stanoven na základě vypočtených hodnot SF a velikosti SF_{MAX} dle postupu:

1. Interval $(0; SF_{MAX}]$ byl rovnoměrně rozdělen na předem stanovený počet pod-intervalů, který limitoval počet prověřovaných vrstev.
2. Ke každému intervalu bylo přiřazeno číslo určující počet navazujících vrstev, které bylo třeba vyřešit. Nejnižší číslo bylo přiřazeno intervalu nejbližšímu hodnotě SF_{MAX} , neboť zde byla eroze teoreticky málo intenzivní.
3. Bylo určeno, do kterého intervalu hodnota SF náleží. a tím byl pro každý element stanoven počet navazujících vrstev k řešení (obr. 7.8).



Obr. 7.8. Příklad počtu řešených vrstev

Zde platilo, že r_{SF} byl závislý na hodnotách ve výpočtu, model byl tudíž částečně seberegulující.

Po zavedení hloubkového faktoru a koeficientu průběhu eroze bylo zjištěno, že vhodnější než porovnávat SF proti hodnotě 1, je vhodnější porovnávat hodnotu stupně stability pro vymílání SF_{VYM} dle rovnice (7.40) proti hodnotě 1. Pro všechny prověřované elementy se stanovila hodnota stupně stability elementu pro vymílání:

$$SF_{VYM} = SF \frac{SF_{MAX}}{SF_{MIN}} a_{SF} [-], \quad (7.40)$$

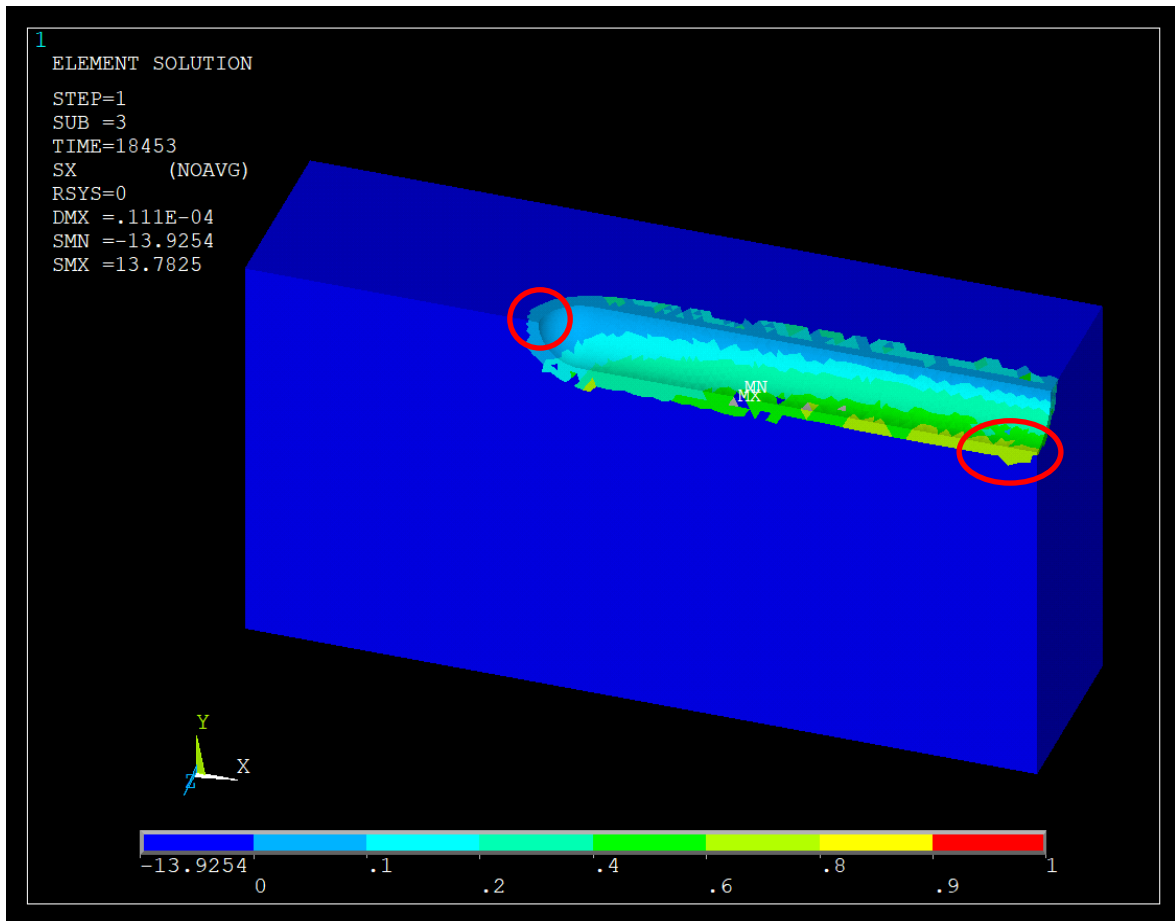
kde a_{SF} ... koeficient průběhu eroze [-],
 SF ... stupeň stability elementu dle rovnice (5.18) [-],
 SF_{MAX} ... maximální stupeň stability [-],
 SF_{MIN} ... minimální stupeň stability [-],
 SF_{VYM} ... stupeň stability elementu pro vymílání [-].

Vypočtené stupně stability tedy byly násobeny koeficientem:

$$k_{SF} = \frac{SF_{MAX}}{SF_{MIN}} a_{SF} = r_{SF} a_{SF} [-], \quad (7.41)$$

kde k_{SF} ... regulační koeficient eroze [-].

Lze předpokládat, že při použití materiálu s hladšími a kulatějšími zrny bude třeba hodnotu a_{SF} změnit na základě provedených pozorování.



Obr. 7.9 Příklad umístění extrémních hodnot stupně stability a výpočet v navazujících vrstvách

Po porovnání hodnot SF_{VYM} oproti hodnotě 1,0 byly identifikovány elementy, které budou erodovány. V modelu byla eroze prováděna změnou materiálového atributu z hodnoty označující materiál vzorku na hodnotu označující materiál průsakové cesty. Zjednodušený algoritmus v programu ANSYS zní:

Pro $i_{EL} = 1, 2, 3, \dots, n_{EL}$:
 když $SF_{VYM} < 1$, pak:
 $ID_{MAT} = 2$ (změna na ID materiálu průsakové cesty);
 jinak:
 $ID_{MAT} = ID_{MAT}$ (element je beze změny);
 konec podmínky;

kde ID_{MAT} ... identifikační číslo materiálu elementu [-],
 i_{EL} ... číslo elementu [-],
 n_{EL} ... počet elementů [-],
 SF_{VYM} ... stupeň stability elementu pro vymílání [-].

Objemy měněných elementů byly zapisovány do matic za účelem budoucího sestavení kumulovaných objemů a hmotností erodovaného materiálu v čase, které by bylo možné porovnat s měřeními daty:

$$m_{EL} = \rho_V V_{EL} \text{ [kg]}, \quad (7.42)$$

$$V_{er} = \sum V_{EL} \text{ [m}^3\text{]}, \quad (7.43)$$

$$m_{er} = \sum m_{EL} \text{ [kg]}, \quad (7.44)$$

$$V_{er,cumul} = V_{er,TP-1} + V_{er,TP} \text{ [m}^3\text{]}, \quad (7.45)$$

$$m_{er,cumul} = m_{er,TP-1} + m_{er,TP} \text{ [kg]}, \quad (7.46)$$

kde	m_{EL}	... hmotnost elementu [kg],
	m_{er}	... hmotnost erodovaného materiálu [kg],
	$m_{er,cumul}$	... kumulovaná erodovaná hmotnost [kg],
	$m_{er,TP}$	... hmotnost erodovaného materiálu v časovém bodě TP [kg],
	$m_{er,TP-1}$	... hmotnost erodovaného materiálu v časovém bodě TP-1 [kg],
	V_{EL}	... objem elementu [m ³],
	V_{er}	... objem erodovaného materiálu [m ³],
	$V_{er,cumul}$	... kumulovaný erodovaný objem [m ³],
	$V_{er,TP}$	... objem erodovaného materiálu v časovém bodě TP [m ³],
	$V_{er,TP-1}$	... objem erodovaného materiálu v časovém bodě TP-1 [m ³],
	ρ_V	... objemová hmotnost materiálu vzorku [kg/m ³].

Prováděním celého výše uvedeného postupu docházelo k přesunu elementů z části sítě tvořící vzorek do části sítě tvořící průsakovou cestu, čímž byla simulována eroze.

7.5 Řešení

Následující kapitoly obsahují podrobné postupy sestavení modelu, popisy validace jednotlivých úloh a kalibraci modelu. V závěru řešení je uveden testovací scénář vč. všech vstupních veličin.

7.5.1 Sestavení modelu

Postup sestavení numerického modelu sestával z přípravy dat, definování geometrie modelu, definování výpočtové sítě, definování okrajových a počátečních podmínek pro ustálené proudění, řešení a kalibrace ustáleného proudění, definování počáteční podmínky a okrajových podmínek sub-analýzy proudění, definování okrajových podmínek a počáteční podmínky pro analýzu napjatosti.

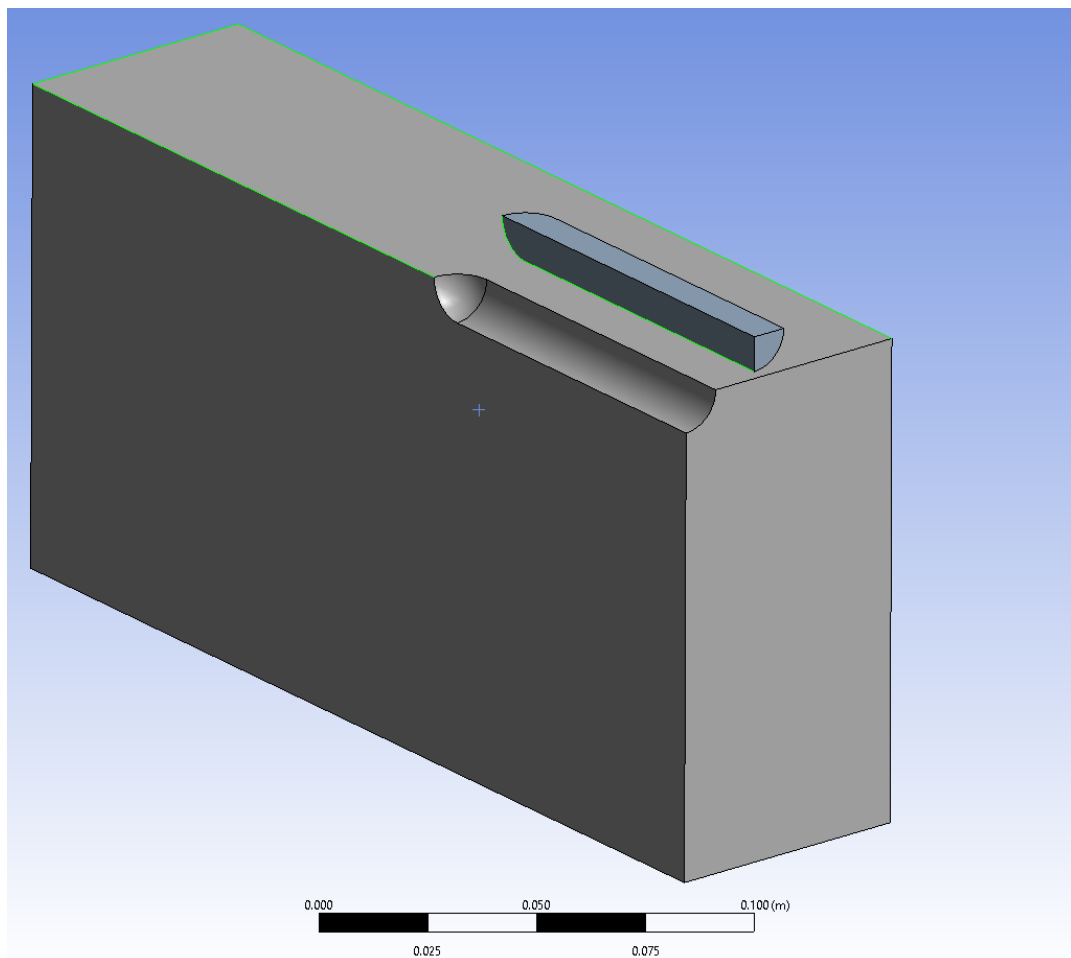
Příprava dat spočívala ve stanovení rozměrů modelu, vlastností simulovaných materiálů, sestavení matic obsahujících data o okrajových podmínkách a počáteční podmínce, a stanovení časových charakteristik simulace. Pro lepší přehlednost byly části práce týkající se přípravy dat zahrnuty do dílčích kapitol popisující kroky sestavení modelu.

7.5.1.1 Geometrie modelu

Z důvodu simulace eroze a zadávání okrajových podmínek bylo účelné sestavit model ze dvou částí:

1. vzorek,
2. průsaková cesta.

Jednotlivé části geometrie ukazuje obr. 7.10. Pro lepší grafickou názornost byl k vytvoření obrázku použit program ANSYS Workbench verze 2021 R2.



Obr. 7.10 Geometrie vzorku a průsakové cesty

Pro definování geometrie modelu bylo třeba určit rozměry vzorku (např. dle vybraného experimentu), poloměr zjednodušené průsakové cesty (polovina válce s kulovou výsečí tvořící čelo) a délku její přímé části. Rozměry vzorku byly dány příčnými rozměry měřicího

zařízení a délkou vzorku l_{vzorek} . Délku a poloměr přímé části průsakové cesty bylo možné zvolit dle požadavků na simulaci. V testovacím příkladu byly parametry určeny dle obrazového záznamu experimentu. Poloměr průsakové cesty byl stanoven dle počátečního objemu průsakové cesty, který byl vypočten dle:

$$r_{cesta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8V_{cesta}}{\pi L_{cesta,prima}}} \text{ [m]}, \quad (7.47)$$

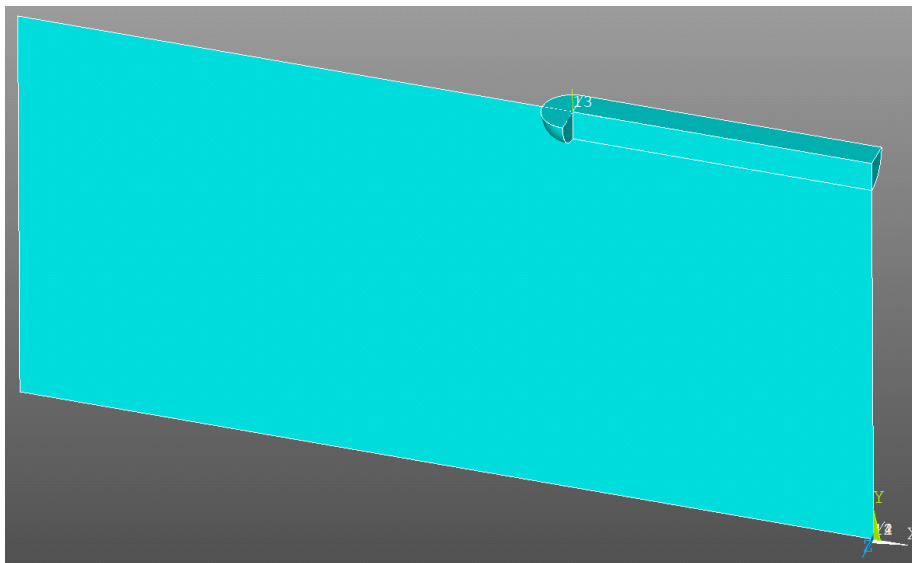
kde $L_{cesta,prima}$... délka přímé části průsakové cesty [m],
 r_{cesta} ... poloměr zjednodušené průsakové cesty [m],
 V_{cesta} ... objem přímé části průsakové cesty [m³].

Zakončení průsakové cesty bylo provedeno kulovou výsečí o poloměru shodném s průsakovou cestou za účelem dobrého vystižení skutečného tvaru průsakové cesty pozorovaného při experimentech a též pro eliminaci singulárních bodů v řešení.

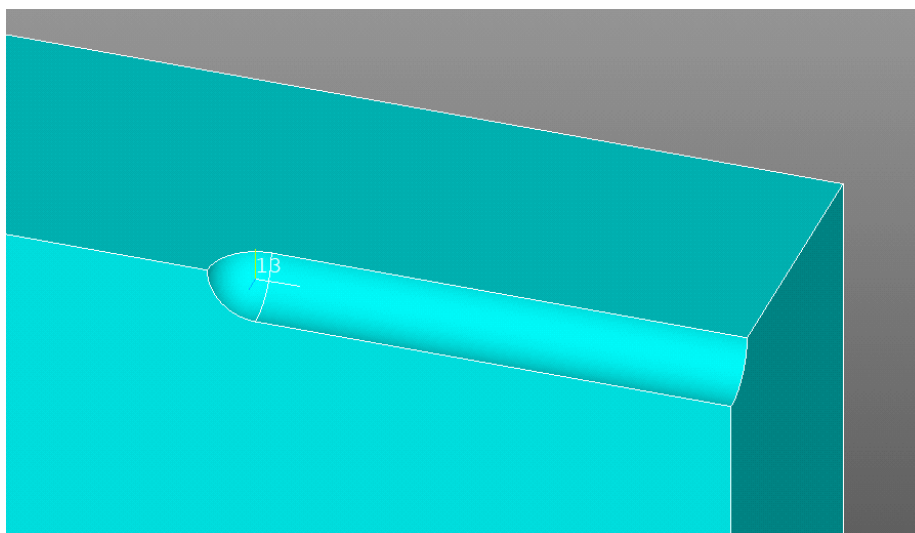
Základní geometrie modelu byla vytvořena pomocí makroelementů vzorku a průsakové cesty. Vzhledem k tomu, že v ANSYS nelze přímo definovat výše zmíněné tvary makroelementů, bylo nutné provést několik mezikroků.

Nejprve byla v prostředí ANSYS vytvořena průsaková cesta (válec s připojenou polovinou koule) o daných rozměrech. Následně byly přidány jednotlivé body tvořící vrcholy vzorku, linie a plochy. Část průsakové cesty, která přesahovala přes okraj vzorku byla odříznuta pomocí roviny tvořící hranici modelu (obr. 7.11) a bylo vytvořeno vlastní těleso vzorku. Jelikož se modelovaná tělesa nesmí protínat, byl ve vzorku vyříznut tvar průsakové cesty (obr. 7.12). Tímto krokem byl sestaven geometrický základ modelu.

Pro výpočty a následné vizualizace byla použita implicitní orientace souřadnicového systému (viz obr. 7.11) – svislý směr dán osou y . V dalších částech simulace musela být orientace souřadného systému zohledňována.



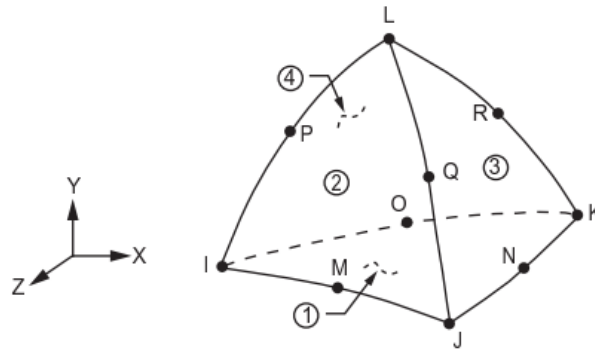
Obr. 7.11 Ořezová rovina průsakové cesty



Obr. 7.12 Výřez tělesa průsakové cesty ve vzorku

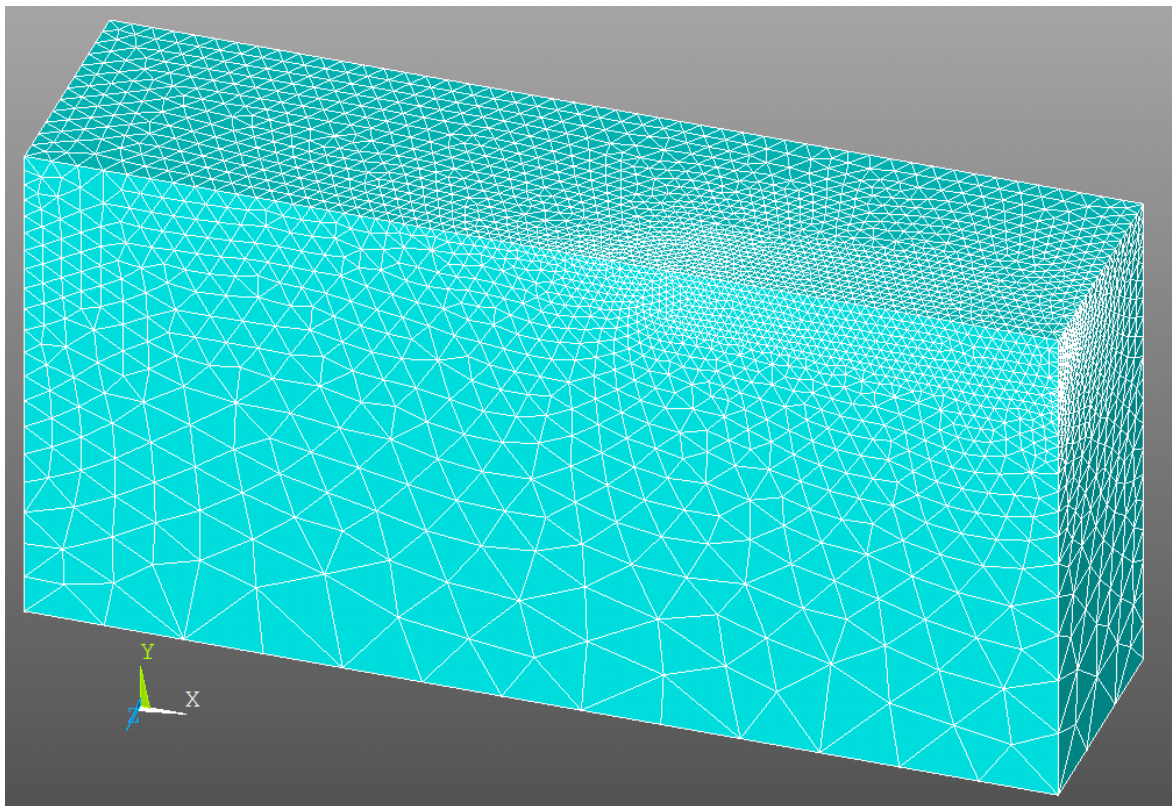
7.5.1.2 Diskretizace náhradní oblasti

Diskretizace náhradní oblasti byla provedena automaticky pomocí nástroje Mesh Tool v prostředí ANSYS. Pro jeho použití bylo potřeba určit typ elementů, jejich standardní velikosti a velikost elementů na liniích, příp. plochách vytvořených těles. Pro 3D model s nepravidelnými částmi (zakřivení na čele průsakové cesty) se jevil nejvhodnější obecný jehlan (viz obr. 7.13). Stejný druh elementu byl použit pro obě prováděné analýzy (označení v ANSYS: SOLID87 pro vedení tepla a SOLID187 pro analýzu napjatosti – 10tíbodový jehlan). Zvolený software umožňuje jednoduché přepínání mezi analýzou proudění a analýzou napjatosti pomocí příkazu, který zajistí výměnu typu elementů při zachování výpočtové sítě.

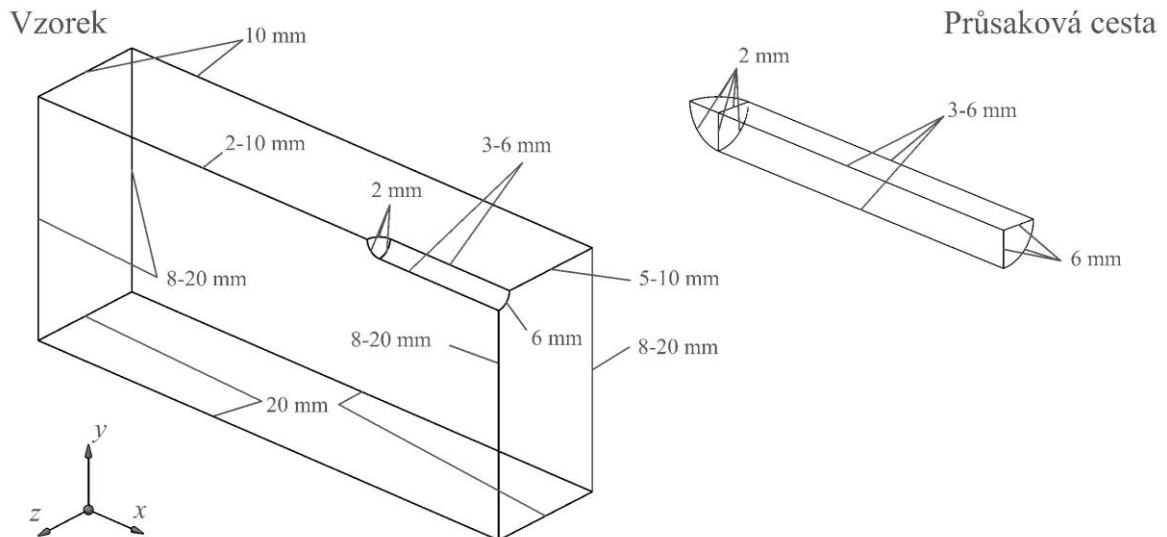


Obr. 7.13 Element použitý pro diskretizaci oblasti (ANSYS, 2011)

Vzhledem k charakteru úlohy bylo možné model rozdělit na část modelu, ve které probíhala eroze, a na část, kde eroze nebyla pravděpodobná. Pro urychlení výpočtu pak na základě tohoto členění bylo možné v části, kde by k erozi nedocházelo, použít elementy větší velikosti. Naopak v oblasti, kde by k erozi mohlo teoreticky docházet, byly použity elementy menší. Tímto se zajistila celková časová efektivita řešení. Velikost elementů byla řízena nastavením diskretizace hran tvořících náhradní oblast. Diskretizaci hran ukazuje obr. 7.15, výpočtovou síť pak ukazuje obr. 7.14. Pro takto stanovenou diskretizaci byl celkový počet elementů cca 63000.



Obr. 7.14 Nastavení velikosti elementů v modelu



Obr. 7.15 Použitá výpočtová síť

Komunikace mezi průsakovou cestou a vzorkem byla zajištěna společnými uzly obou částí ve výpočtové síti.

7.5.1.3 Délka simulace a časová diskretizace

Pro simulaci bylo třeba zadat její počáteční a koncový čas ($t_0 = t_{beg}$ a t_{end}), velikost časového kroku simulace Δt_{sim} a velikost časového kroku pro sub-analýzu proudění Δt_{sub} . Počáteční a koncový čas byl dán potřebnou délkou simulace s ohledem na výpočtovou náročnost. V případě testovacího scénáře se počáteční stav určil jako začátek fáze intenzivní eroze u daného experimentu.

Vzhledem k pozorované rychlosti děje byl nastaven časový krok simulace $\Delta t_{sim} = 1$ s a pro sub-analýzu krok $\Delta t_{sub} = 0,25$ s. V rámci přechodu z 1. časového okamžiku simulace do 2. časového okamžiku tedy byla provedena sub-analýza proudění o 4 časových krocích ($\Delta t_{sim} / \Delta t_{sub} = 1/0,25 = 4$). Sub-analýza byla použita pro pokrytí změn v okrajových podmínkách (patrné v obr. 7.17).

7.5.1.4 Materiálové charakteristiky

Pro modelování bylo třeba stanovit materiálové charakteristiky vzorku a průsakové cesty. Zejména se jednalo o objemové a měrné hmotnosti, hydraulické vodivosti, zásobnost, moduly pružnosti a Poissonovy konstanty. Pro vzorek byla použita hodnota modulu pružnosti $E_{vzorek} = 20$ MPa a Poissonova konstanta $\nu_{vzorek} = 0,33$. Tyto hodnoty byly stanoveny podle publikace Beera a Russell Johnsona (1992). Obecně lze o pružnosti

zvoleného materiálu konstatovat, že $E_{vzorek} = f(n)$. Pružnost průsakové cesty byla zadána na základě následujících úvah:

1. Přestože průsaková cesta je tvořena vodou, nelze použít pro modul pružnosti hodnotu 2 GPa jako při standardních úlohách. Důvodem je to, že voda v systému není uzavřená a tlak v trubici se prakticky nemění (při deformaci vzorku by voda odtekla mimo systém).
2. Pro umožnění deformací vzorku je nutné použít hodnotu modulu pružnosti vody menší než v případě materiálu vzorku.
3. Aby byla zajištěna dobrá návaznost výsledků u vzorku a průsakové cesty je nutné použít shodné Poissonovy konstanty.

Na základě těchto úvah byl zvolen a následně ověřen modul pružnosti materiálu průsakové cesty $E_{cesta} = 1$ MPa a Poissonova konstanta $\nu_{cesta} = 0,33$.

Hydraulická vodivost vzorku při testovacím scénáři byla stanovena na základě měření. Společně s fiktivní hydraulickou vodivostí průsakové cesty se jedná o parametr, který byl později kalibrován (kapitola 7.5.3). Obecně ale platilo, že hydraulická vodivost průsakové cesty byla cca $100\,000\times$ vyšší než u vzorku.

Zásobnost materiálů byla též parametrem pro kalibraci. V testovacím scénáři byla stanovena odborným odhadem dle (Duchan et al., 2014). Hodnota byla odhadnuta dle příslušných tabulek, konkrétně se jednalo o hodnotu na hranici ulehlého a neulehlého písku: $S_o = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že byla použita analogie o vedení tepla, bylo nutné použít přepočtení zásobnosti na tepelnou kapacitu materiálu (Říha, J. a kol., 1997):

$$c_M = \frac{S_o}{\rho_w} \text{ [J/kg/K]}, \quad (7.48)$$

kde c_M ... tepelná kapacita materiálu [J/kg/K],

S_o ... specifická zásobnost [m^{-1}],

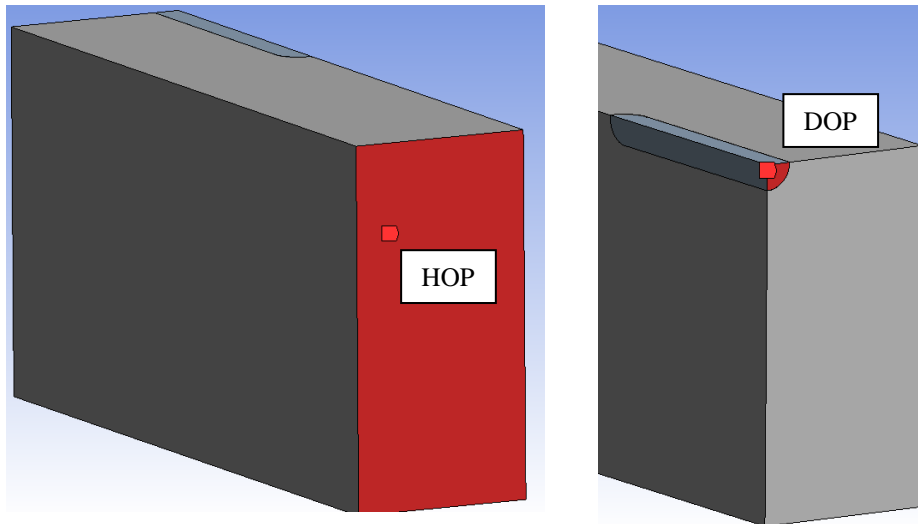
ρ_w ... hustota vody [kg/m^3].

Při použití písku, který je popisován v této práci, je specifická zásobnost v neustálené úloze velmi malá a v úloze se projeví pouze nepatrně. Materiálová charakteristika byla zadána i pro úlohu ustálenou pro formální účely řešení v ANSYS.

7.5.1.5 Okrajové podmínky modelu

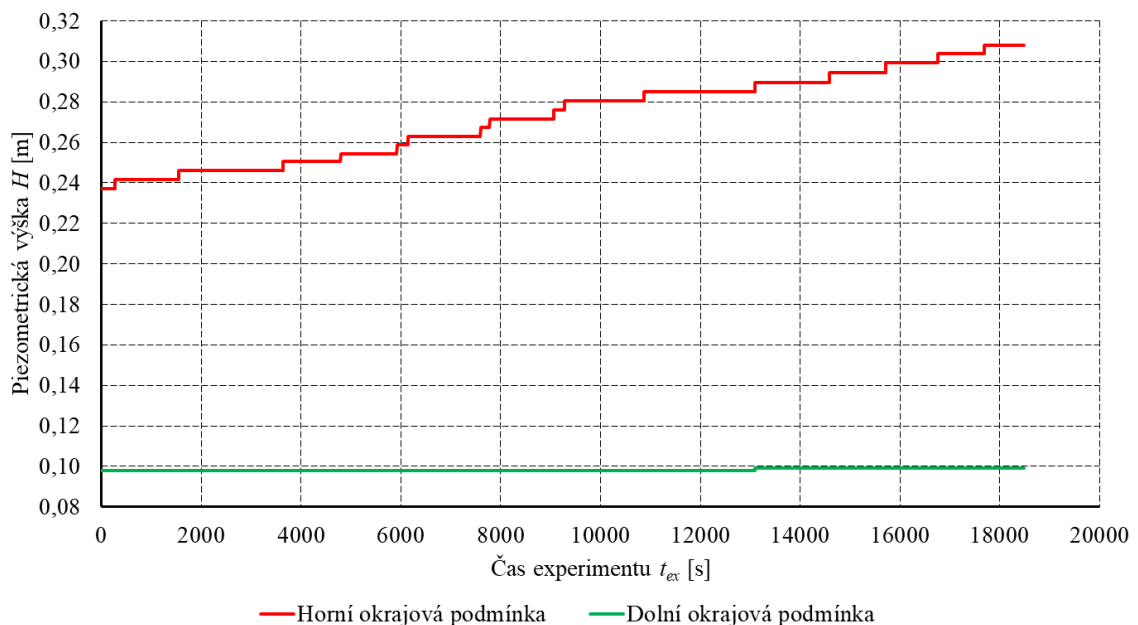
Okrajové podmínky byly popsány maticemi obsahujícími čas a příslušnou hodnotu horní a dolní okrajové podmínky (piezometrické výšky).

Horní okrajová podmínka (HOP) byla zadána na nátokovou plochu vzorku, dolní (DOP) pak byla zadána na „čelo výtoku“ z průsakové cesty (obr. 7.16). V obou případech šlo o známé piezometrické výšky, tj. šlo o Dirichletovu okrajovou podmínku 1. druhu. Na ostatní plochy modelu byla zadána podmínka nulového toku (Neumannova okrajová podmínka 2. druhu).



Obr. 7.16 Plochy pro zadání okrajových podmínek

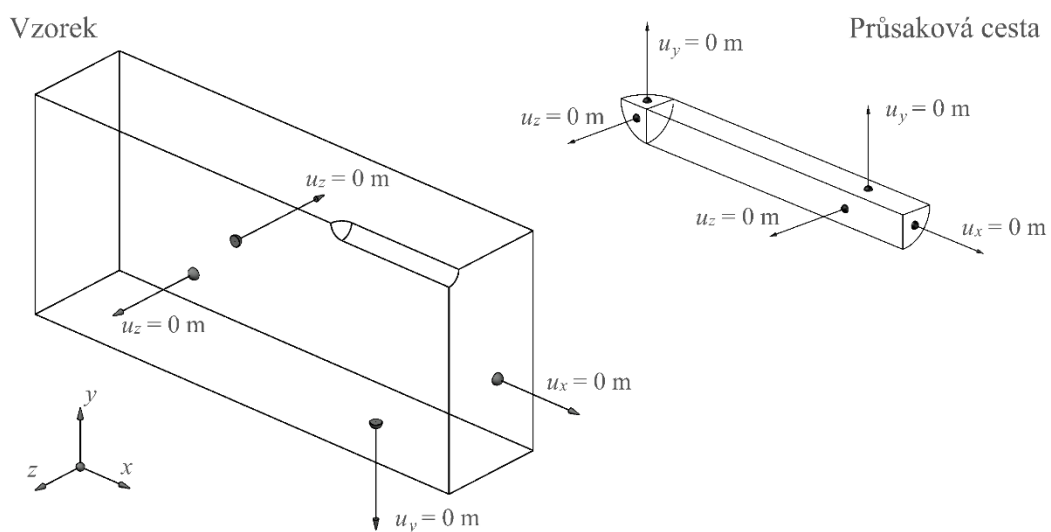
Pro ustálený stav platilo, že okrajové podmínky byly zadány dle připravené časové řady okrajových podmínek pro $t = t_{beg} = 0$ s (obr. 7.17). Hodnota DOP se z důvodu vysoké vodivosti materiálu průsakové cesty propagovala až na čelo průsakové cesty, tj. až k rozhraní mezi průsakovou cestou a vzorem.



Obr. 7.17 Časové řady okrajových podmínek pro experiment B_0-2_34

Okrajové podmínky pro sub-analýzy proudění byly zadány pomocí Dirichletovy okrajové podmínky, stejně jako v případě úlohy ustáleného proudění. Prakticky se jednalo o časové řady piezometrických výšek zadané na nátokové a výtokové čelo modelu. Příklad části časové řady uvádí obr. 7.17.

Pro analýzu napjatosti byly jako okrajové podmínky zadány nulové posuny na příslušných stěnách modelu (Dirichletova podmínka 1. druhu). Stěny s nulovými posuny byly odvozeny od konfigurace reálného experimentu s podmínkou statické určitosti modelu. Omezení posunů bylo aplikováno na celé čelo na výtokové straně (těleso vzorku i průsakové cesty), po bocích a na spodní stěnu vzorku. Zadání okrajové podmínky ukazuje obr. 7.18.



Obr. 7.18 Okrajové podmínky pro analýzu napjatosti

7.5.1.6 Počáteční podmínka modelu

Počáteční podmínka (PP) pro ustálený stav byla aplikována pomocí známé piezometrické výšky v čase t_{beg} . Prakticky se jednalo o první hodnotu v iteraci při výpočtu řešení. Nicméně se doporučuje používat hodnotu z rozsahu měření, která by udávala plné nasycení vzorku. Úloha ustáleného proudění sloužila pouze pro kalibraci hodnoty hydraulické vodivosti (kapitola 6.5.1.4) a k získání PP pro první sub-analýzu neustáleného proudění. Počáteční podmínku pro ustálenou úlohu bylo možné odhadnout jednou hodnotou, která byla aplikována na všechny uzly výpočtové sítě, tedy:

$$H(x, y, z, t_{beg})|_{\Omega} = H_0 \quad [\text{m}], \quad (7.49)$$

- kde H ... piezometrická výška [m],
 H_0 ... počáteční piezometrická výška [m],
 Ω ... náhradní oblast.

Celý postup získání první PP pro neustálenou úlohu byl následující:

1. Nastavil a vyřešil se model ustáleného proudění pro okrajové podmínky v počátečním čase simulace s odhadnutou počáteční podmínkou (v mezích měřených hodnot).
2. Vypočtené piezometrické výšky z uzlů se zapsaly do matice výsledků.
3. Hodnoty z matice výsledků se aplikovaly na náhradní oblast jako PP neustálené sub-analýzy.

Pokud by byla PP pro první sub-analýzu zadávána shodně jako v případě úlohy ustálené (tj. pouze odhadem pro 1. iteraci řešení), bylo by při simulaci potřeba dlouhé doby pro stabilizaci hydraulických podmínek. Navíc by byly v prvních vteřinách řešení vypočteny vysoké hydraulické gradienty související s propagací HOP (obr. 7.19 a 7.20), které by následně ovlivňovaly vývoj průsakové cesty.

Na konci každé sub-analýzy byla data o piezometrických výškách v uzlech modelu uložena do matic výsledků, byla použita k výpočtu proudových sil působících na elementy a později sloužila jako počáteční podmínka pro další sub-analýzu proudění. Tímto byla zajištěna návaznost řešení proudění (kvůli ztrátě dat při střídání analýz v ANSYS nebylo možné použít tzv. „restart file“, který ANSYS standardně ukládá).

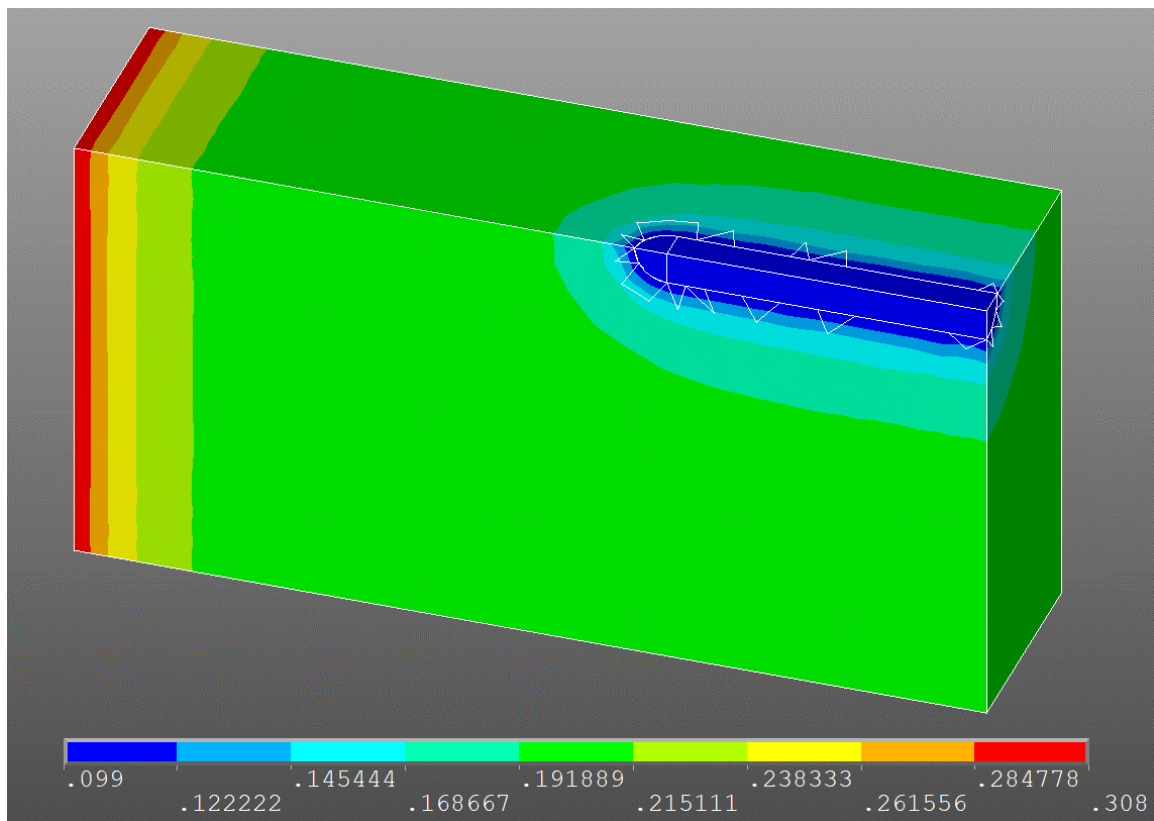
Zjednodušující předpoklad udává, že v každém kroku simulace lze uvažovat s původní nedeformovanou geometrií modelu a že napjatost je řešena kvazi-stacionárně. ANSYS formálně vyžaduje zadání počáteční podmínky, která slouží jako nultá iterace při řešení metodou konečných prvků. PP byla zadána nulovými posuny na začátku každého časového kroku simulace:

$$u_{x,0}|_{\Omega} = 0 \text{ [m]}, \quad (7.50)$$

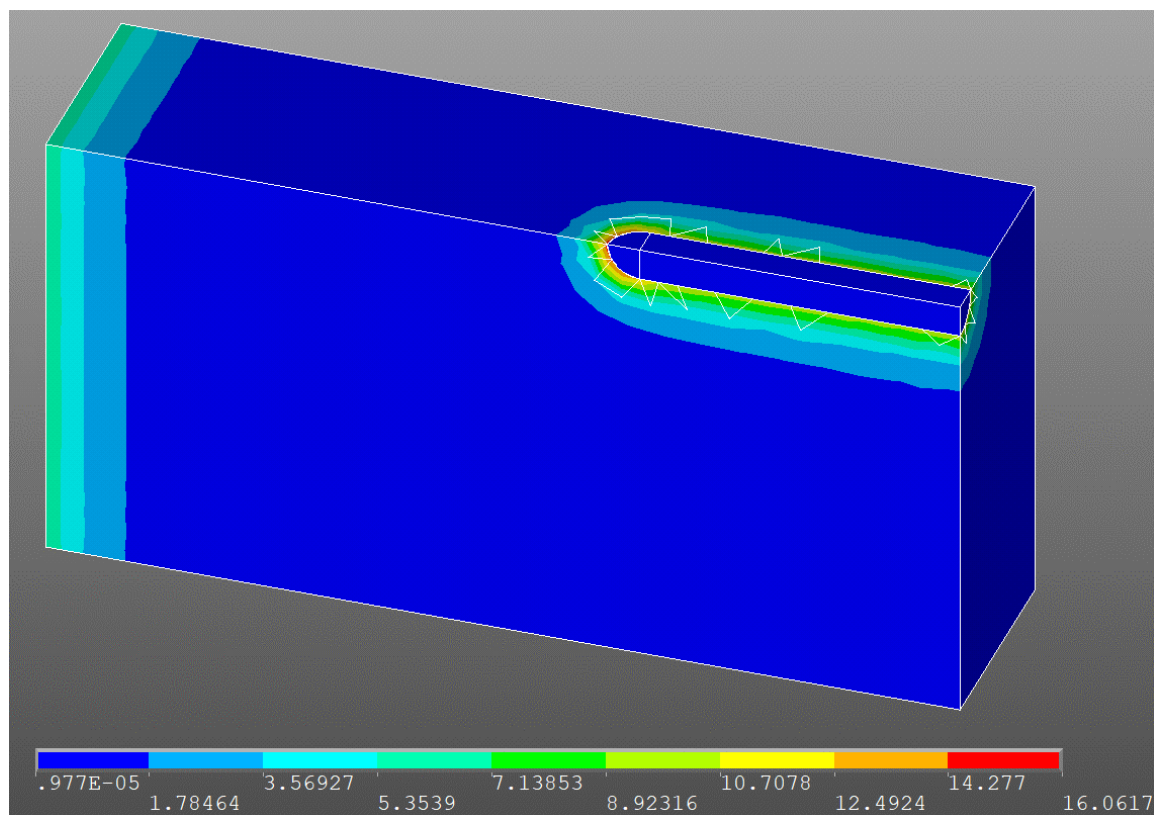
$$u_{y,0}|_{\Omega} = 0 \text{ [m]}, \quad (7.51)$$

$$u_{z,0}|_{\Omega} = 0 \text{ [m]}, \quad (7.52)$$

kde $u_{x,0}$... počáteční podmínka posunu ve směru osy x [m],
 $u_{y,0}$... počáteční podmínka posunu ve směru osy y [m],
 $u_{z,0}$... počáteční podmínka posunu ve směru osy z [m],
 Ω ... náhradní oblast.



Obr. 7.19 Příklad průběhu piezometrických výšek v 1. sekundě simulace při špatně zadané počáteční podmínce



Obr. 7.20 Příklad průběhu hydraulických gradientů v 1. sekundě simulace při špatně zadané počáteční podmínce

7.5.1.7 Volba metody řešení

Pro řešení modelu byla pro všechny úlohy použita metoda konečných prvků. Řešič pro danou úlohu byl zvolen Sparse Matrix Solver (řešič řídkých matic), který byl doporučen dle ANSYS (2013b).

Doba výpočtu v případě ustáleného proudění trvala cca 10 s. Řešení jedné neustálené sub-analýzy řešení trvalo cca 15 min a jedno řešení napjatosti trvalo cca 5 min.

Z předešlých dob výpočtů se může zdát, že řešení není příliš časově náročné a jeden krok řešení byl spočten za cca 20 min. Hlavní část výpočtu však zabíralo řešení uživatelsky definovaných úloh tvořených zápisy do a z matic výsledků, vizualizací dat, a výběry částí výpočtové sítě a operacemi s nimi. Jeden krok výpočtu tak nakonec trval až 1 hodinu v závislosti na počtu erodovaných elementů.

7.5.1.8 Definování a zápis výsledků

Po řešení jednotlivých úloh byly definovány výsledky, část z nich byla vizualizována a další část byla použita k posouzení eroze.

Pro zpracování výsledků byl s výhodou použit postprocesor v programu ANSYS. Výsledné piezometrické výšky, hydraulické gradienty, proudové síly, normálová, smyková a hlavní napětí, stupně stability SF i SF_{VYM} bylo možné vizualizovat a hodnoty uložit do připravených matic Datové výstupy (matice) bylo možné exportovat příkazy v APDL do souborů CSV.

Ustálená úloha proudění vody

Řešením úlohy byly piezometrické výšky v uzlech a hydraulické gradienty, které byly přeneseny do matice výsledů a vizualizovány. Takto uložená data byla v dalším kroku použita jako počáteční podmínka neustálené sub-analýzy proudění.

Neustálená úloha proudění vody

Hledaným řešením na konci sub-analýzy proudění vody byly průběhy piezometrických výšek a hydraulických gradientů. Obě veličiny, jakož i jednotlivé složky hydraulického gradientu, byly uloženy do připravených matic výsledů. Vizualizovaná data byla uložena do obrázků k dalšímu zpracování.

Kvazi-ustálená úloha napjatosti

Při řešení byly hledanými stavovými veličinami posuny uzlů ve všech třech směrech (vektor posunů \mathbf{u}), poměrná přetvoření modelu (vektor přetvoření ϵ), a normálová a smyková napětí (tenzor napětí σ). Dalšími veličinami byla hlavní napětí σ_1 , σ_2 a σ_3 . Dle rovnic (5.11) a (5.12) bylo stanoveno i maximální normálové a maximální smykové napětí (σ_N a τ_{max}).

7.5.2 Validace

Při návrhu modelu se postupovalo tak, že analýzy proudění i napjatosti byly nejdříve sestaveny a testovány odděleně. Některé součásti validace, které měly vliv na postup modelování (např. rozdělení proudových sil do uzlů nebo řešení vývoje průsakové cesty), jsou pospány v kapitole 7.4 Po ověření funkčnosti analýz byly obě spojeny do jedné simulace. Následně byly provedeny testy chování modelu s oběma analýzami.

7.5.3 Kalibrace

Fáze kalibrace zahrnovala především upřesnění hydraulické vodivosti vzorku za účelem získání správného řešení úlohy (průběhu piezometrických výšek). Ke kalibraci byla použita ustálená úloha proudění podzemní vody. Postup sestával z cyklických modifikací hydraulických vodivostí vzorku a materiálu simulujícího průsakovou cestu, resp. jejich poměru. V testovacím scénáři byly jako kalibrační data použity průběhy piezometrických výšek a měřený průtok. Detailní postup kalibrace je popsán v kapitole 6.5.1.4 z důvodu jeho nutnosti pro stanovení hydraulických vodivostí testovaných vzorků a zde již není uváděn.

Z hlediska neustáleného proudění bylo možné provést kalibraci jediného vstupujícího parametru – zásobnosti. Vzhledem k tomu, že modelovaný materiál byl plně vodou nasycený písek, měla zásobnost velmi malý vliv a na výsledcích řešení se prakticky neprojevila. Kalibrace v tomto ohledu nebyla prováděna.

Z hlediska vývoje průsakové cesty bylo provedeno srovnání rozsahu průsakové cesty v několika časových krocích.

7.5.4 Verifikace

Navrhovaný model je pouze ve fázi ideového návrhu a nebyla pro něj provedena verifikace. Předem lze však konstatovat, že po kalibraci hydraulických vodivostí by řešení z úloh proudění měly být v dobré shodě se vstupními daty. Postup eroze by bylo možné řídit koeficientem průběhu eroze a_{SF} .

7.5.5 Simulace na testovacím scénáři

Jako testovací scénář pro simulaci byl zvolen experiment B_0-2_34 (materiál: Bzenec 0-2 mm). Vzorek materiálu byl hutněn ručně, přičemž dosažená pórovitost byla 0,345. Délka připraveného vzorku byla 242,7 mm. Ve vzorku byla předdefinována průsaková cesta o délce 95 mm a šířce 25 až 34 mm. Celková doba experimentu vč. sycení byla cca 9,5 h. Během experimentu bylo prováděno i měření průtoku a numerickým modelem byla zpětně stanovena hydraulická vodivost vzorku. Její hodnota byla

přibližně 2×10^{-4} m/s. Maximální dosažený rozdíl hladin před a za vzorkem byl cca 200 mm, průtok byl pak cca $1,3 \times 10^{-3}$ l/s. Střední hydraulický gradient při počátku eroze byl přibližně 0,9.

První výraznější eroze byla pozorována po 6,4 h experimentu při kritickém hydraulickém gradientu na čele cesty $J_c = 2,875$. Postupem času docházelo k zintenzivňování eroze, přičemž průsaková cesta se vyvíjela přibližně v ose zařízení. V čase měření cca 9,48 h došlo k úplnému porušení vzorku, poté docházelo již pouze k rozšiřování vzniklého otvoru. Celkové erodované množství bylo 35 ml, což odpovídá cca 55 g materiálu.

Pro úsporu dat byla z celého experimentu uvažována pouze jeho druhá část, kdy už byla velká pravděpodobnost inicializace intenzivní eroze. Hodnota času simulace $t_{sim} = 0$ zde odpovídá času experimentu $t_{ref} = 15662,54$ s (což je čas experimentu 4:21:2,5). Změny okrajových podmínek v časových řadách nebyly prováděny skokově, ale za čas 2 s, což přibližně odpovídá rychlosti, s jakou byla při experimentu zvedána nádrž definující HOP. Okrajové podmínky pro analýzu proudění ukazuje obr. 7.17. Další parametry popisující scénář jsou obsaženy v tab. 7.1. Scénář sloužil pro ověření funkčnosti navrženého modelu.

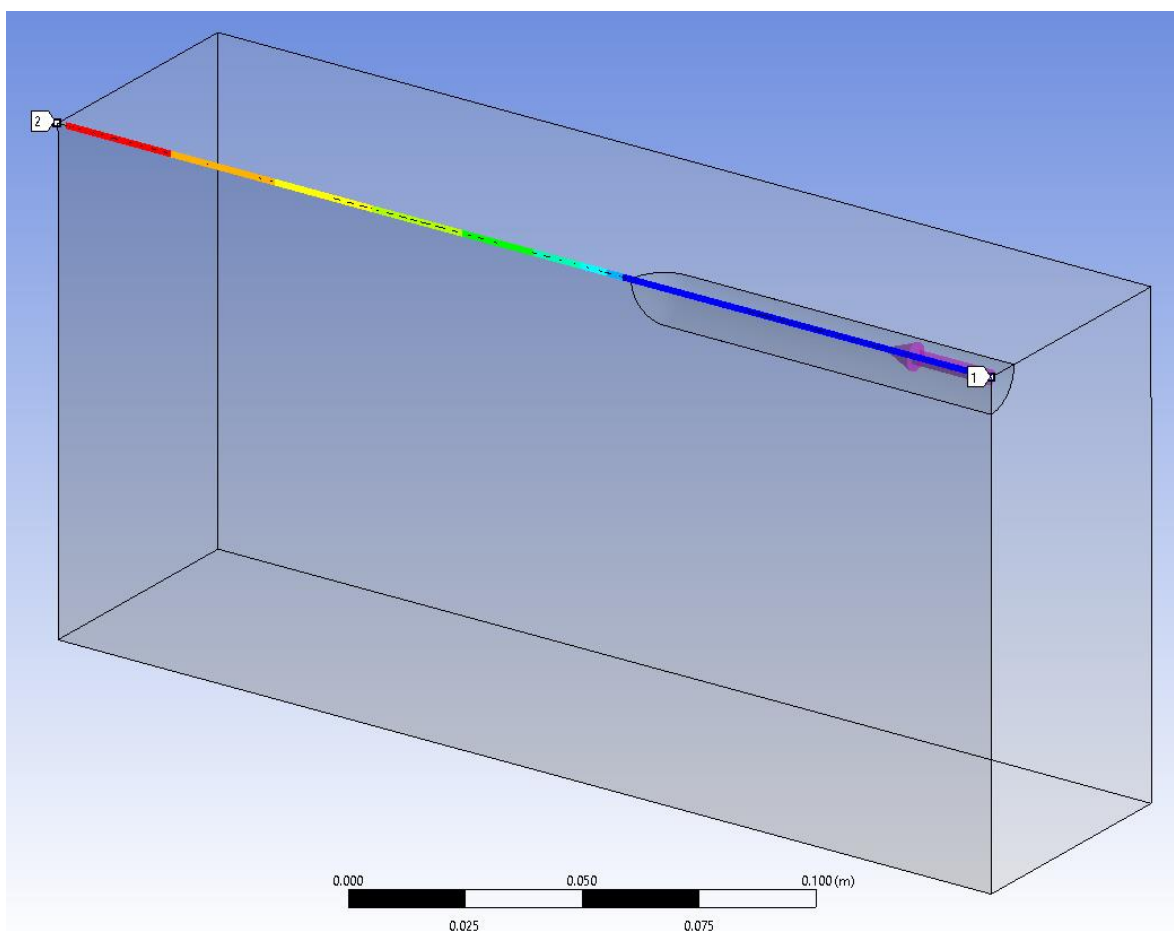
Tab. 7.1 Charakteristiky testovacího scénáře

Charakteristika	Symbol	Jednotka	Hodnota
Příčné rozměry vzorku (výška, šířka – předpoklad osově symetrie)	$a_{prop};$ ($b_{prop}/2$)	[mm]	12; 6
Délka vzorku	l_{vzorek}	[mm]	242,7
Délka přímé části průsakové cesty	$L_{cesta,prima}$	[mm]	85
Poloměr zjednodušené průsakové cesty	r_{cesta}	[mm]	8,6
Hustota zrn	ρ_{zrn}	[kg/m ³]	2638
Objemová hmotnost materiálu vzorku	ρ_V	[kg/m ³]	1728,12
Objemová hmotnost zeminy nadlehčené vodou	ρ'	[kg/m ³]	1072,89
Pórovitost materiálu	n	[-]	0,345
Hustota vody	ρ_w	[kg/m ³]	1000
Hydraulická vodivost vzorku	k_{vzorek}	[m/s]	2×10^{-4}
Hydraulická vodivost průsakové cesty	k_{cesta}	[m/s]	1
Specifická zásobnost	S_o	[m ⁻¹]	$1,0 \times 10^{-5}$
Modul pružnosti vzorku materiálu	E_{vzorek}	[MPa]	20
Modul pružnosti materiálu průsakové cesty	E_{cesta}	[MPa]	1
Poissonova konstanta materiálu vzorku	ν_{vzorek}	[-]	0,33
Poissonova konstanta materiálu průsakové cesty	ν_{cesta}	[-]	0,33
Úhel vnitřního tření	φ	[°]	41
Základní velikost elementu vzorku	Δ_{vzorek}	[mm]	viz obr. 7.15
Základní velikost elementu průsakové cesty	Δ_{cesta}	[mm]	
Základní velikost elementu kontaktu těles	Δ_{kont}	[mm]	
Počet elementů vzorku	$n_{EL,vzorek}$	[-]	cca 45000
Počet elementů průsakové cesty	$n_{EL,cesta}$	[-]	cca 15000
Čas pro kalibraci hydraulické vodivosti	-	[s]	15820,485
Počáteční čas simulace	t_{beg}	[s]	18467
Koncový čas simulace	t_{end}	[s]	18480
„0“ času simulace oproti času experimentu – pro OP v obr. 7.15	t	[s]	15662,54
Časový krok simulace	Δt_{sim}	[s]	1
Časový krok sub-analýzy proudění	Δt_{sub}	[s]	0,25
Počáteční podmínka (pro celou náhradní oblast)	H_0	[m]	0,2
Okrajové podmínky pro analýzu proudění	HOP, DOP	[m]	viz obr. 7.17

7.5.5.1 Kalibrace hydraulické vodivosti

Nejprve bylo nutné provést kalibraci modelu z hlediska hydraulické vodivosti, resp. poměru mezi hydraulickou vodivostí vzorku a průsakové cesty. Pro určení míry shody mezi modelem a experimentem byly vyneseny průběhy piezometrických výšek v podélné ose horní stěny modelu (obr. 7.21). Kalibrace byla provedena pro čas experimentu 15820,485 s. Čas byl vybrán pro dobrý průběh piezometrických výšek v experimentu a též z důvodu dobré polohy čela průsakové cesty (mezi piezometry).

Vynesení piezometrických výšek z experimentů a z modelu ukazuje obr. 7.22. Další kontrolovanou veličinou byl průtok vzorkem, resp. průtok okrajovou podmínkou na výtoku z modelu. Ten byl v tomto případě $9,406 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.



Obr. 7.21 Umístění linie pro vynesení piezometrických výšek (ANSYS Workbench)

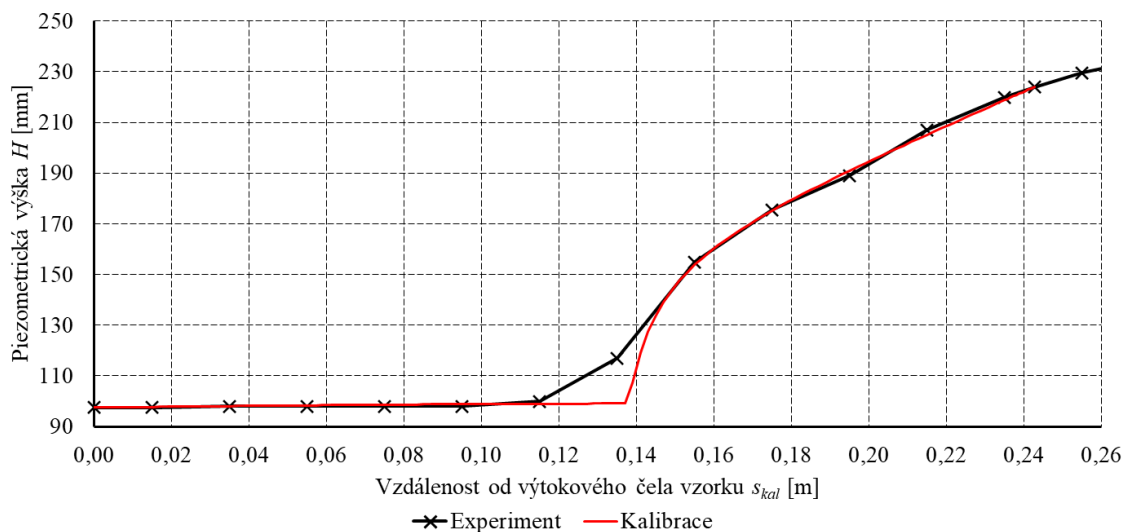
Dle teoretického základu (Bear a Verruijt, 1987) platí, že ve zde daném případě průběh piezometrických výšek odpovídá poměru hydraulických vodivostí materiálů v modelu. Kalibrace tedy musela být prováděna s ohledem právě na tento poměr, a tudíž nebylo možné dosáhnout úplné shody s daty z experimentu. Dalším problémem kalibrace byla hustota měřených dat při experimentu, kdy hodnoty podél vzorku byly měřeny pouze

po vzdálenostech 20 mm, zatímco v modelu byly použity mnohem menší elementy, což vedlo k hladšímu průběhu výsledků podél průsakové cesty.

7.5.5.1.1 Výsledky kalibrace

Výslednou shodu při kalibraci hydraulických vodivostí ukazuje obr. 7.22. Nejproblematictějším místem při kalibraci bylo identifikováno na rozhraní materiálů. Zde docházelo k největším odchylkám modelu oproti experimentu. Pro porovnání bylo použito jak porovnávání průběhů piezometrických výšek, tak i porovnání průtoků. Konečný průtok vzorkem po kalibraci byl $9,41 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, což je přijatelným výsledkem. Výsledku kalibrace bylo dosaženo za použití následujících hodnot:

- hydraulická vodivost vzorku: $k_{vzorek} = 2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$,
- hydraulická vodivost průsakové cesty: $k_{cesta} = 1 \text{ m/s}$.



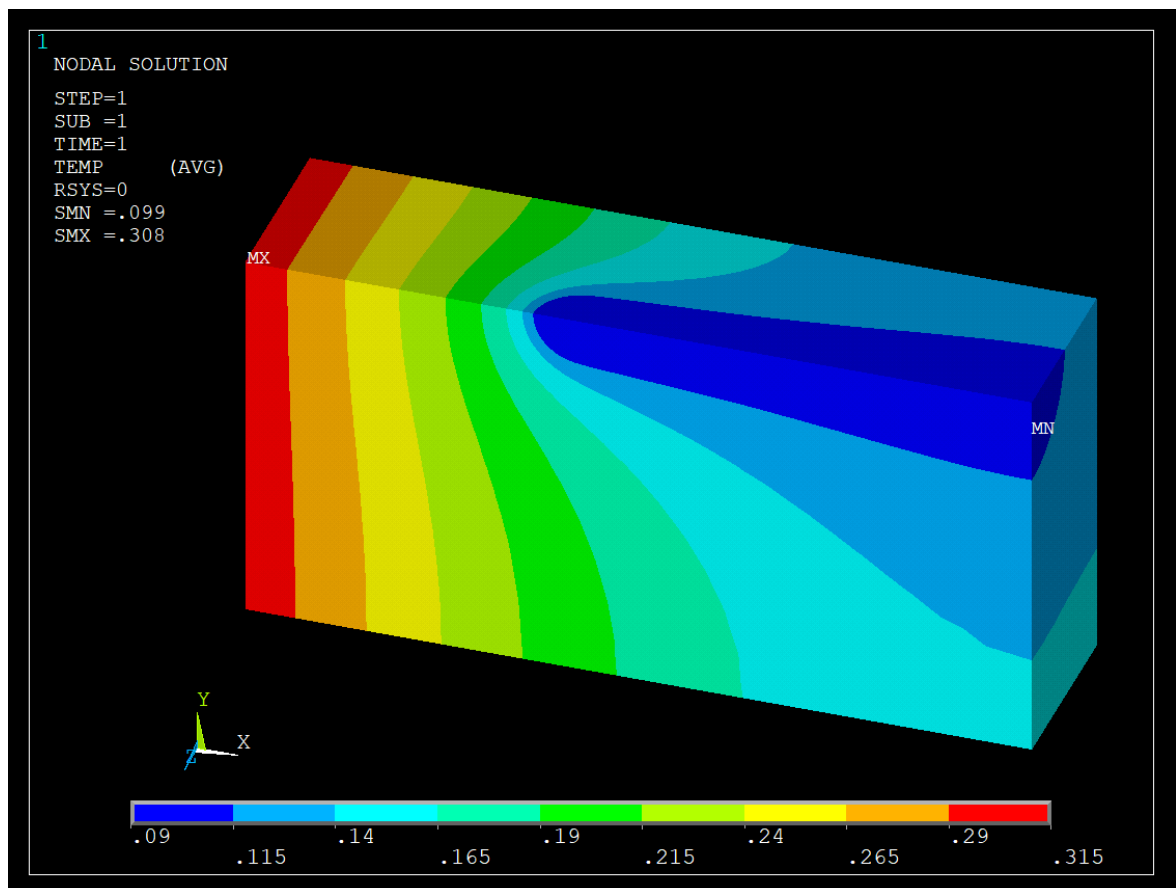
Obr. 7.22 Průběhy piezometrických výšek z experimentu a z numerického modelu

7.5.5.2 Výsledky analýzy proudění podzemní vody

Jak již bylo popsáno výše, proudění podzemní vody bylo neustálené a výsledky závisely jak na aktuálně zadaných okrajových podmínkách, tak i na konfiguraci modelu z hlediska rozsahu průsakové cesty. Z těchto důvodů následující kapitoly obsahují pouze rámcový rozbor průběhů piezometrických výšek a hydraulických gradientů.

7.5.5.2.1 Piezometrické výšky

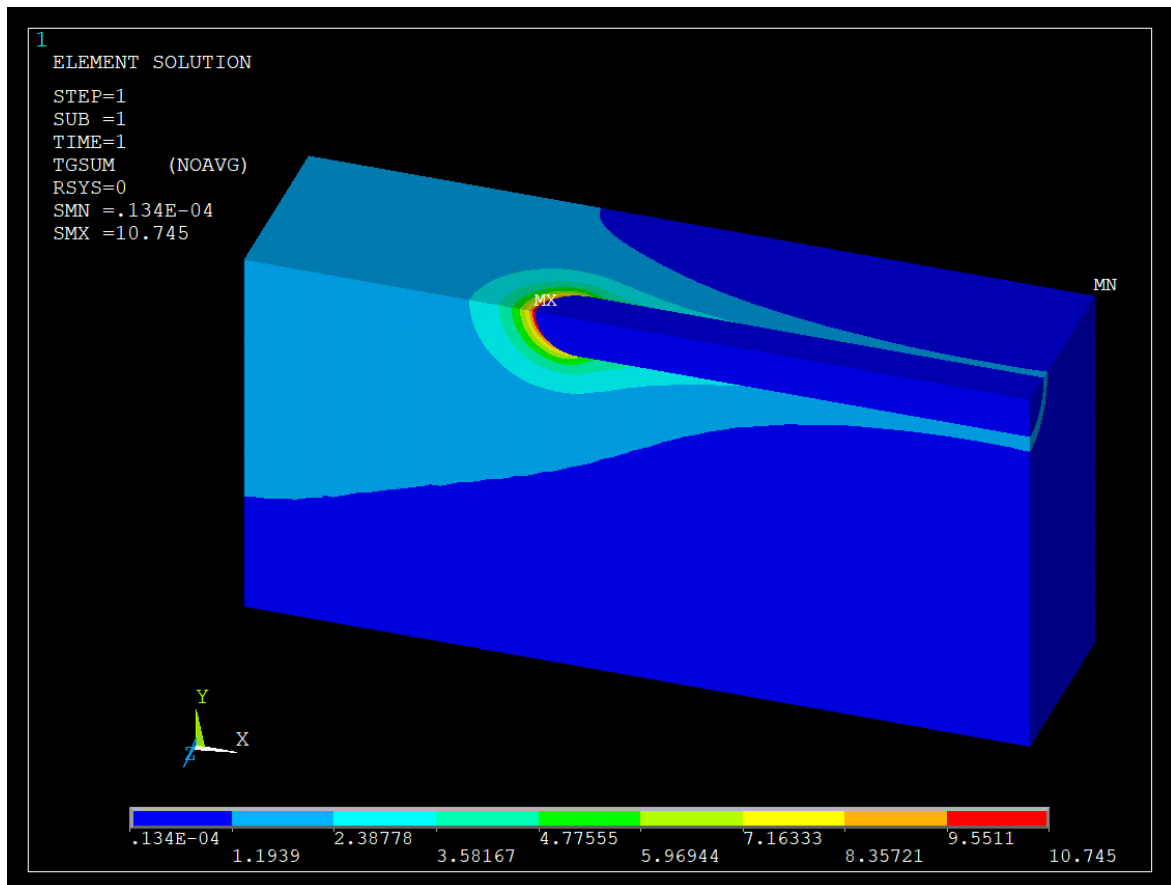
Průběh piezometrických výšek na počátku simulace ukazuje obr. 7.23. Zde je možné pozorovat relativně horizontální proudění při nátoku, které ale bylo rychle deformováno umístěním průsakové cesty. V koncové části vzorku převládá směr proudění k předdefinované průsakové cestě. Též je možné pozorovat, jak proudnice směřovaly k plášti průsakové cesty, tj. zvýšené průsaky se neprojevovaly jen na čele průsakové cesty, ale i na jejím plášti. Na straně výtoku ze vzorku bylo proudění ovlivněno zadáním Neumannovy OP na čelní ploše vzorku (viz obr. 7.16), které v této části způsobovalo vzestupné proudění. V průsakové cestě proudila voda převážně směrem k výtokové ploše na konci vzorku.



Obr. 7.23 Průběh piezometrických výšek na počátku simulace

7.5.5.2.2 Hydraulické gradienty

Průběh hydraulických gradientů na počátku simulace ukazuje obr. 7.24. Maximální hydraulické gradienty byly dle očekávání dosaženy na čele průsakové cesty. V porovnání s čelem vzorku a jeho nejbližším okolím byly hodnoty hydraulických gradientů ve zbytku vzorku relativně malé. V průsakové cestě byly hydraulické gradienty velmi malé (v řádu 10^{-2}) z důvodu vysoké hydraulické vodivosti „náhradního“ materiálu simulujícího vodu.



Obr. 7.24 Průběh hydraulických gradientů na počátku simulace

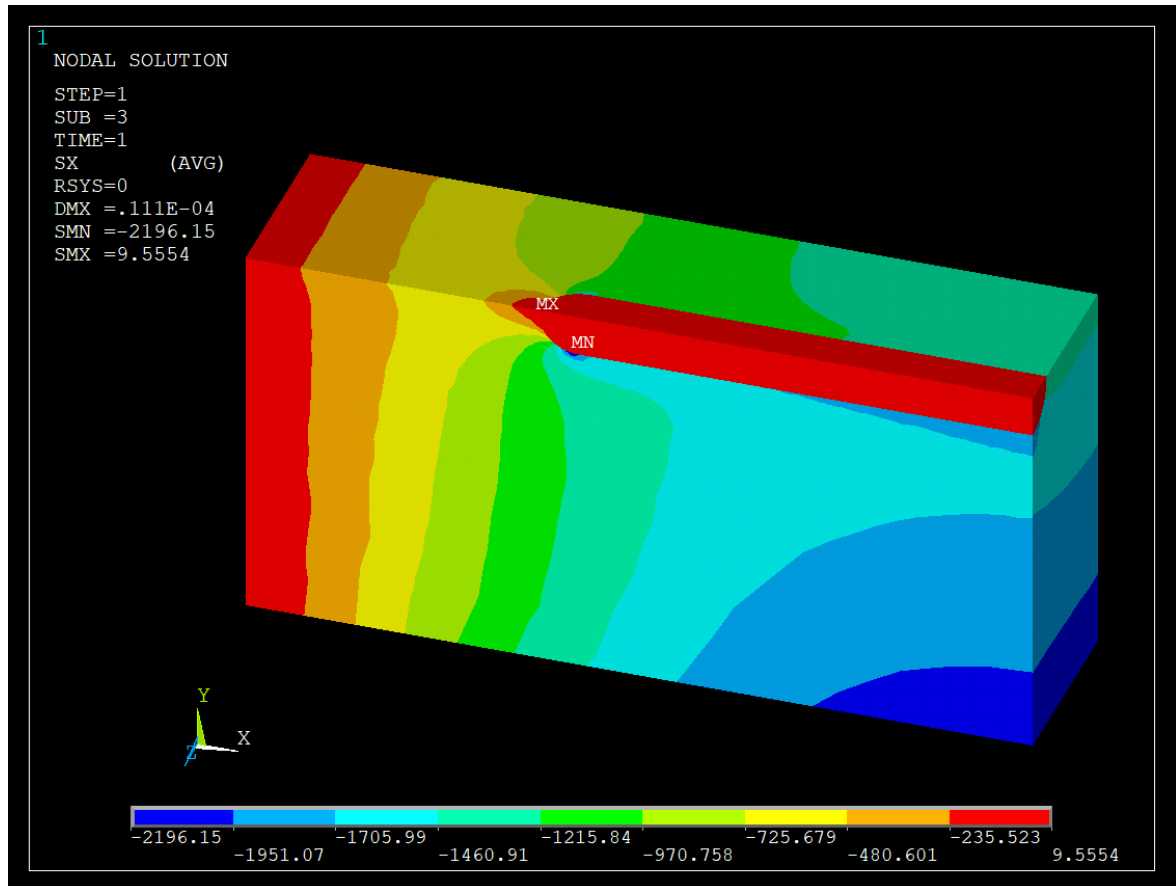
7.5.5.3 Chování modelu v analýze napjatosti

Výsledkem řešení napjatosti byly sady normálových napětí, smykových napětí a hlavních napětí. V následujících kapitolách bude stručně popsáno, jak se testovaný vzorek choval z hlediska výběru sledovaných veličin, konkrétně z hlediska normálových napětí.

7.5.5.3.1 Normálové napětí v ose x

Výsledky normálového napětí v ose x ukazuje obr. 7.25. Minimální normálové napětí v ose x (tlak) bylo identifikováno u dna vzorku na straně výtoku a na kontaktu průsakové cesty se vzorkem. Umístění extrému u dna vzorku bylo očekávané s ohledem na zadanou

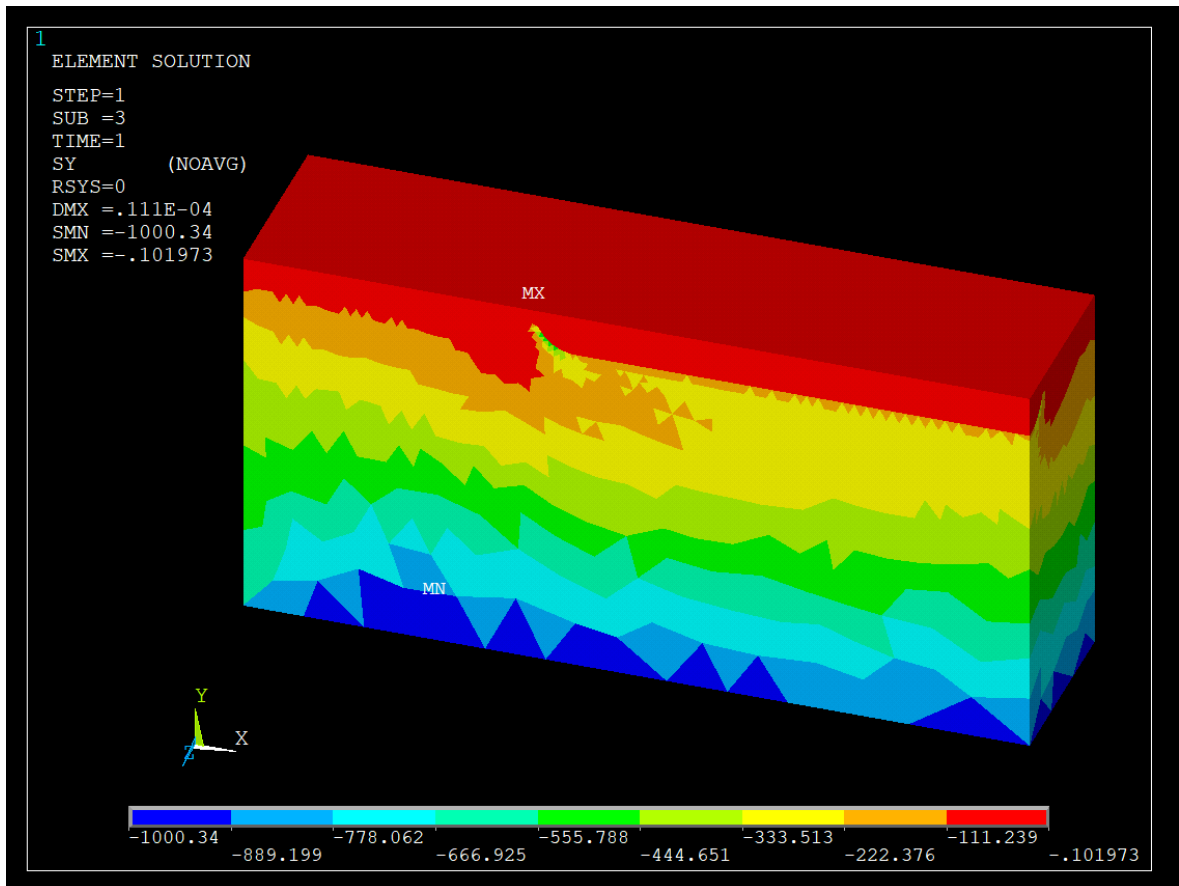
okrajovou podmínku nulových posunů na ploše odtoku. Naopak minimální tlak se nacházel na začátku vzorku, což bylo způsobeno relativně horizontálním působením proudových sil. Na čele průsakové cesty se nacházela malá oblast tahů, která byla způsobena poddajností průsakové cesty.



Obr. 7.25 Průběhy normálových napětí v ose x na počátku simulace

7.5.5.3.2 Normálová napětí v ose y (vertikální osa)

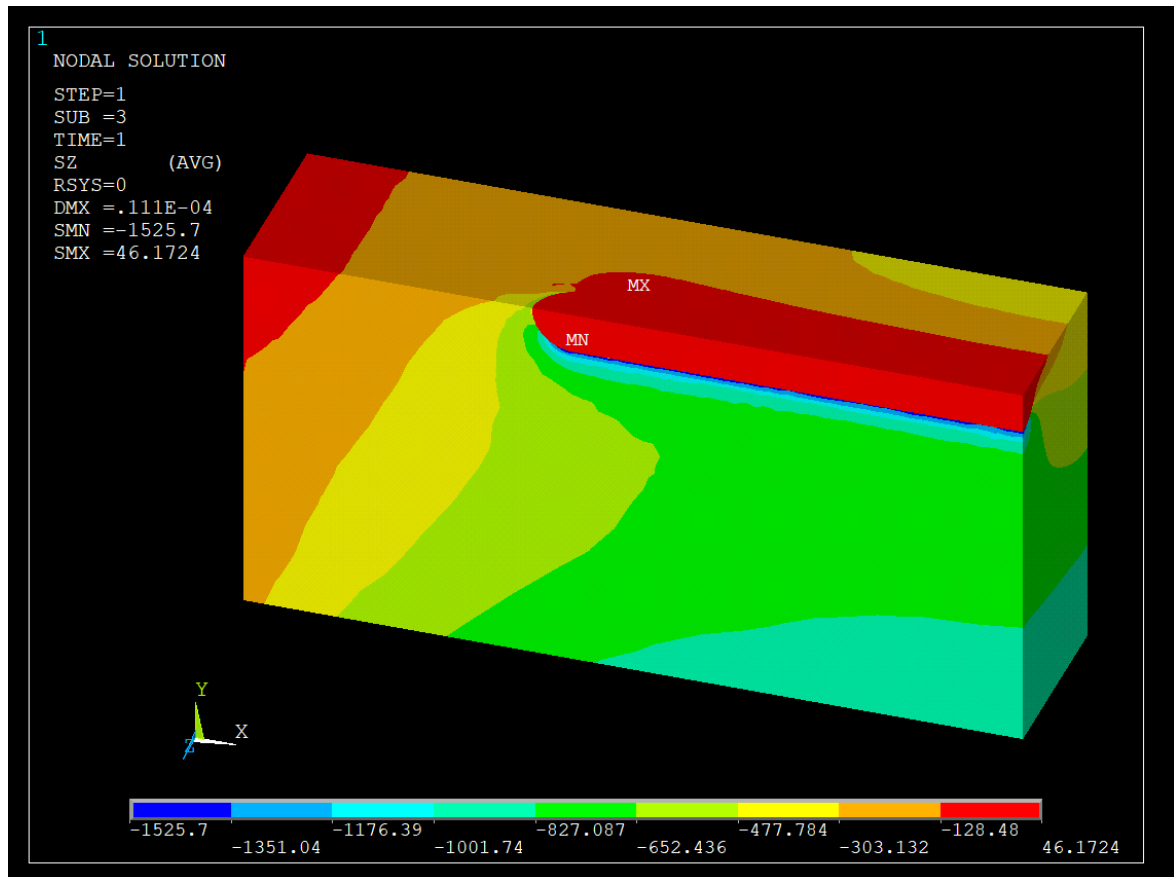
Výsledky jsou kombinací působení vlastní tíhy materiálu nadlehčeného vodou a proudění podzemní vody (obr. 7.26). Vizualizace výsledků byla provedena na elementech namísto standardního zobrazení na uzlech z důvodu lepší interpolace nad vypočtenými daty. Ve výsledcích je možné pozorovat vyšší hodnoty tlaků u dna vzorku přibližně v 1/3 jeho délky (měřeno od nátokové stěny). Dále po proudu hodnoty klesaly. Efekt byl dán vzestupným prouděním, které vyvozuje vzestupné proudové síly. V horní vrstvě vzorku docházelo k vyvozování malých napětí. Kolem průsakové cesty byly izolinie napětí zakřiveny vlivem rozdílného modulu pružnosti materiálu průsakové cesty.



Obr. 7.26 Průběhy normálových napětí v ose y na počátku simulace

7.5.5.3.3 Normálová napětí v ose z

Výsledky normálového napětí v ose z ukazuje obr. 7.27. Zde je možné pozorovat relativně rovnoměrné rozdělení napětí v dolní části vzorku (myšleno rovnoměrné napříč vzorkem). Ve vyšších vrstvách vzorku docházelo k ovlivnění napětí rozdílným modulem pružnosti materiálu průsakové cesty. Tlaky v řádu stovek Pa je možné pozorovat i v rohu vzorku na straně výtoku, které byly způsobeny aplikací Poissonovy konstanty, která přenášela napětí z jedné osy na ostatní dvě.

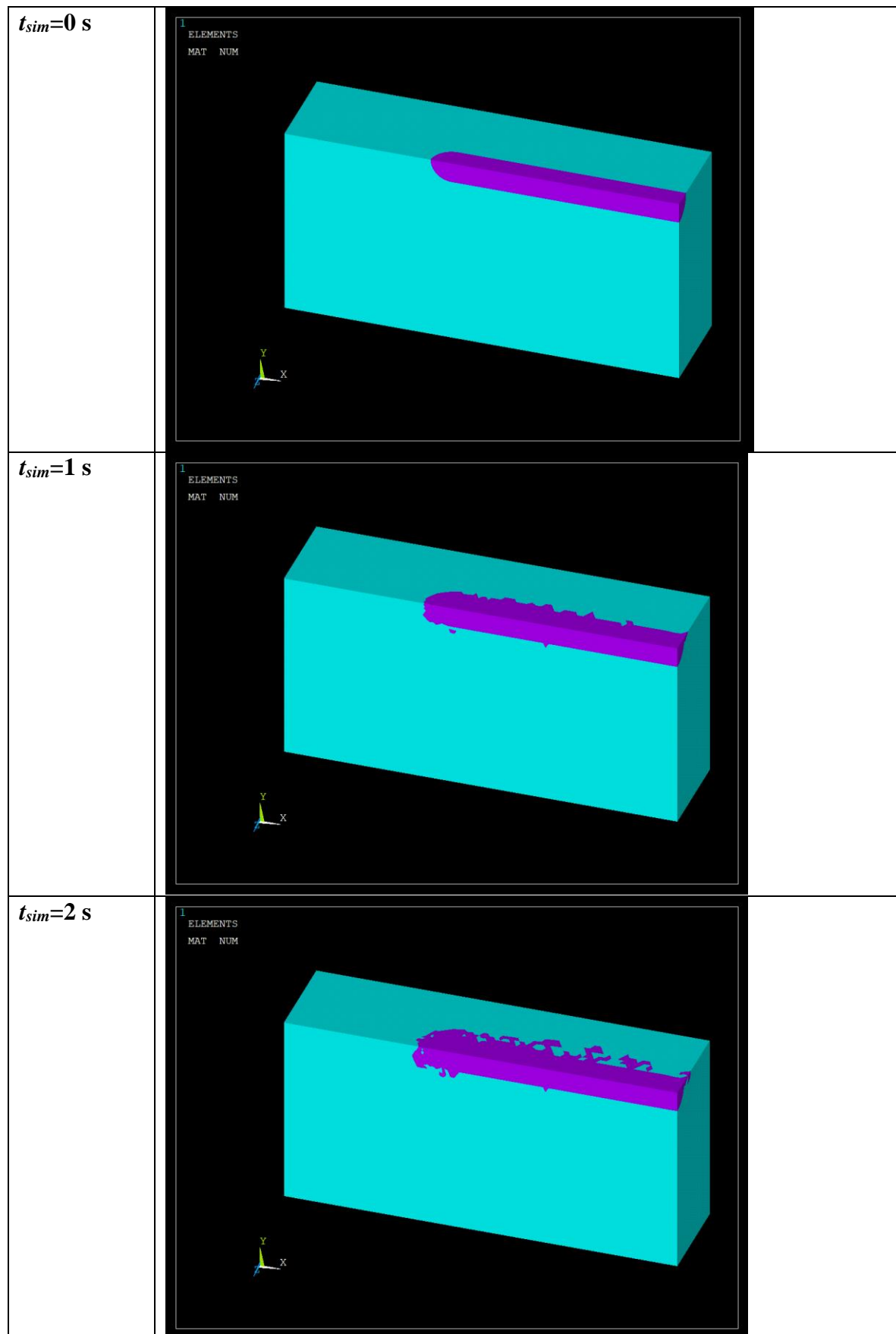


Obr. 7.27 Průběhy normálových napětí v ose z na počátku simulace

7.5.5.4 Výsledky průběhu eroze

Provedením simulace byla potvrzena funkčnost navrženého modelu. Průběh eroze (změnu materiálu) v prvních 3 s výpočtu ukazuje obr. 7.28. Z výsledků je patrné, že docházelo k prodlužování průsakové cesty i k jejímu rozšiřování. Je zřejmé, že v čase simulace $t_{sim} = 0$ s modelovaný tvar průsakové cesty zcela neodpovídá experimentu. Důvodem bylo použití zjednodušeného tvaru průsakové cesty (viz kapitola 7.2.2), který byl stanoven na základě erodovaného objemu materiálu při experimentu v daném startovacím čase. Poznámky k modelu eroze obsahuje kapitola 7.6.

V čase $t_{sim} = 2$ s je možné pozorovat určité diskontinuity ve vývoji průsakové cesty. To je způsobeno vizualizací dat. Lepší zobrazení nebylo možné použít z důvodu vysokého množství elementů a z důvodu softwarových omezení. Nicméně, provedenými algoritmicznými úpravami bylo zajištěno, aby vývoj průsakové cesty, resp. změny materiálových charakteristik elementů, byl kontinuální.



Obr. 7.28 Průběh eroze dle kalibračního scénáře (modrá barva: písek; fialová barva: voda)

7.6 Diskuse k navrženému numerickému modelu

Navržený numerický model je funkční. Přesto zde bylo identifikováno několik problémů, které jsou popsány v následujících kapitolách, a ze kterých byla odvozena doporučení v závěru práce.

Omezení ANSYS pro navrhovaný model eroze

Po provedení několika simulací bylo zjištěno, že program ANSYS není zcela optimalizován pro všechny prováděné operace v modelu. Hlavním problémem bylo ukládání potřebných dat do 3D a 4D matic v rozsahu celé výpočtové sítě (4D matice bylo třeba použít pro ukládání 3D výsledků jak v prověřovaných vrstvách, tak i ve všech časových krocích). Pro použitou výpočtovou síť o cca 60 000 elementech byly zjištěny procesní limity ANSYS při simulaci delší než 40 s (nestabilita načtené databáze a dlouhá doba řešení analýz proudění i napjatosti). Všechny simulace eroze musely být nastaveny s délkou kratší než tento limit.

Omezená časová závislost

Jelikož v modelu byl prověřován pouze kontakt průsakové cesty, nelze zde přesně hovořit o nestacionárním modelu eroze. Problém byl částečně vyřešen dodáním poměru r_{SF} , který udává, kolik dalších vrstev modelu bude z hlediska stability prověřováno. Hledání dalšího modelového přístupu nebylo cílem disertační práce.

Vliv diskretizace náhradní oblasti

Jak bylo popsáno dříve, z důvodu zefektivnění výpočtu a úspory paměti byla sestavena výpočtová síť s malými elementy u čela průsakové cesty a s většími elementy na okraji modelu. Z obr. 7.28 je patrné, že jak eroze postupovala do šířky, bylo prováděno posouzení SF na stále větších a větších elementech, což vedlo k dalšímu neúměrnému rozšiřování průsakové cesty. Dále pak velikost elementu ovlivňovala i velikost hydraulického gradientu na element působící, neboť hydraulický gradient je v ANSYS odvozen od hodnot piezometrických výšek a vzdálenosti uzlů elementu.

Řešením problému by mohlo být použití homogenní výpočtové sítě. Tím by ale nastal problém s nárůstem velikostí matic ve výpočtu, a k mnohonásobnému prodloužení výpočtového času. Též by celkově narostl objem dat uložených v databázi ANSYS což by opět vedlo k problémům s limity programu.

Vliv napjatosti

Navržený model nezahrnuje vliv napjatosti na stabilitu elementů. Přístup přímého řešení stability čistě na základě napjatosti byl vyzkoušen, nedodával však příliš uspokojující výsledky. Nejlepší výsledky byly zjištěny za použití posudku stability kontaktu průsakové cesty, který zde byl prezentován. Přesto lze předpokládat, že nějaký efekt napjatosti je v experimentech přítomen, jen nebyl zahrnut v modelu právě pro svoji obtížnou kvantifikovatelnost.

8. ZÁVĚR

Disertační práce se zaměřuje na experimentální výzkum vývoje privilegované průsakové cesty u konstrukcí založených na píscích. Pro výzkum bylo navrženo měřicí zařízení malého měřítka a metodika měření. Měřicí zařízení bylo registrováno jako užitný vzor na Úřadu průmyslového vlastnictví roku 2019 (užitný vzor č. 33584). Jako testovací materiál byl zvolen písek z Bzence o velikosti zrn 0-2, 0,25-2 a 0,25-1 mm, a skleněné kuličky o velikosti zrn 0,2 a 0,5 mm. Experimenty na skleněných kuličkách nebyly z hlediska přípravy vzorku vhodné, proto byla výsledná data použita pouze pro ilustraci a dál nebyla podrobněji zkoumána. Nevhodnost kuliček byla dána jejich hladkými zrny a velmi nízkým úhlem vnitřního tření.

Experimentální data byla vyhodnocena a byly identifikovány hodnoty kritických hydraulických gradientů. Též byla data o erodovaných množstvích rozdělena na část zpětné eroze a boční eroze z nichž byly stanoveny příslušné rychlosti eroze. Pro boční erozi byly stanoveny koeficienty eroze a kritická tečná napětí.

Střední kritické hydraulické gradienty byly porovnány s dostupnou literaturou. Všichni z uvedených autorů uvádějí hodnotu středního hydraulického gradientu do 0,3, přičemž výsledky experimentů hodnotu převyšují až 9×. Důvodem je rozdílnost analyzovaných materiálů a také bezpečnostní rezerva vnesená do publikovaných dat. Lepší shodu vykazovala novější data (Schmertmann, 2000; van Beek, 2015; Sellmeijer, 2011 a Robbins et al., 2018). Opět zde však nedocházelo k úplné shodě z důvodu testování rozdílných materiálů (z hlediska velikosti zrn i pórovitosti) na odlišných měřicích zařízeních.

Lokální kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty nebylo možné plně porovnat z důvodu absence publikovaného výzkumu v této oblasti. V práci byly prošetřeny vlivy materiálových charakteristik na měřené hodnoty. Bylo zjištěno, že s klesající pórovitostí materiálu stoupá kritický hydraulický gradient. Při úpravě původního materiálu odstraněním jemné frakce $< 0,25$ mm, tj. vytvoření stejnozrnějšího materiálu (úprava na $C_U = 2,08$ a $d_{50} = 0,51$ mm), vznikl materiál obecně hůře zhutnitelný, tudíž nebylo možné dosahovat pórovitostí stejných jako v případě původního materiálu. Zjištěný jev se dále prohluboval s odstraněním další frakce > 1 mm (úprava C_U na hodnotu 1,839 a $d_{50} = 0,44$ mm). Tento fakt má též vliv na dosahované kritické hydraulické gradienty, kdy byly měřené hodnoty až poloviční. V další fázi šetření byl zjišťován vliv zrnitostního složení na hodnotu kritického hydraulického gradientu. Číslo nestejnozrnnosti se u vybraných materiálů pohybovalo v rozmezí 1,8 až 3. Při vyloučení zrn $< 0,25$ mm a posléze

i zrn > 1 mm byl identifikován efekt snižování kritického hydraulického gradientu. Vliv měrné hmotnosti nebyl vyšetřen z důvodu absence materiálů s dostatečně rozdílnými hustotami zrn.

V další části vyhodnocení byly prošetřeny dosažené rychlosti eroze a koeficienty eroze. Z pohledu inicializace bylo možné konstatovat, že upravené materiály vykazují nižší kritické hydraulické gradienty, tudíž jsou méně odolné vůči počátku eroze. Při pohledu na smyková napětí při boční erozi je ale zřejmé, že jsou upravené materiály mírně odolnější, neboť neobsahují jemná zrna. Absence jemných částic též zapříčinila snížení koeficientů eroze u upravených materiálů, tj. materiály nejsou tak erodovatelné jako původní materiál. Dle dostupné literatury byla rychlost eroze klasifikována jako extrémně vysoká. Důvodem je právě nesoudržnost použitého písku a absence výzkumu pro tyto typy materiálů. Ke klasifikaci byla použita stupnice publikovaná Wanem a Fellem (2004b), která byla odvozena pro materiály s obsahem jílu.

Na základě rychlostí eroze a dalších veličin byly pro boční erozi stanoveny koeficienty eroze a kritická tečná napětí. Pro zpětnou erozi byl dle vyhodnocených dat sestaven nový výpočtový vztah zohledňující charakteristiky materiálu (d_{50} a n).

V poslední části práce byl navržen numerický model v programu ANSYS. Jednalo se o sdruženou úlohu proudění podzemní vody a napjatosti. Pro proudění podzemní vody byla využita analogie o vedení tepla z důvodu softwarových omezení. Obě úlohy byly v jádru řešeny jako kvazi-ustálené, tj. okrajové podmínky byly závislé v čase, jednotlivé analýzy se však prováděly pro jeden časový krok a vzájemně se pak navazovaly (výsledkově i časově). Privilegovaná průsaková cesta byla simulována materiálem o vysoké hydraulické vodivosti a její rozšiřování bylo simulováno změnou materiálových charakteristik elementů. Vlastnosti materiálu na elementech byly měněny na základě výpočtu stupně stability elementů na kontaktu vzorku s průsakovou cestou. Intenzita eroze byla částečně redukována hloubkovým faktorem popisujícím počet vrstev, na kterých se posuzování stability provedlo, a koeficientem průběhu eroze, který do simulace vnášel faktory jako je vliv měřítka experimentů, klenbový účinek na čele průsakové cesty (částečně pozorován v experimentech) a další vlivy dané uložením zrn ve vzorku, drsností a tvarem zrn. Koeficient průběhu eroze je parametr, který by bylo možné později kalibrovat. Při prověřování jedné vrstvy na kontaktu vzorku s průsakovou cestou by nebyla zajištěna nestacionarita celého modelu. Problém byl vyřešen prověřováním stability v hlubších vrstvách vzorku v jednom časovém kroku na základě hloubkového faktoru. Model byl

po návrhu otestován za použití reálných dat z experimentu a výsledky byly popsány. Limity modelu jsou dány zjednodušením formulované úlohy, softwarovými omezeními a časovou náročností výpočtů. Zjednodušení bylo vneseno jak do geometrie průsakové cesty, tak i do řešení nestacionarity, která byla simulována prověřováním stability více vrstev pod průsakovou cestou. Softwarovým omezením se rozumí celková paměťová omezení a nestabilita programu při delších simulacích. Nakonec muselo být zavedeno pravidlo, podle kterého simulace nesmí trvat déle než 40 s. Výrazným limitujícím prvkem byla rychlost zpracovávání uživatelských výpočtů a další operace, které vedly k tomu, že doba řešení jednoho časového roku simulace byla cca 1 hodina. Z toho důvodu byla simulace uvedená v této práci jen velmi krátká.

Pro další výzkum lze formulovat následující doporučení:

1. Pro lepší stanovení rychlosti postupu čela se doporučuje další výzkum za použití delšího měřicího zařízení.
2. Pro měření hloubky a průřezové plochy průsakové cesty se doporučuje používat laserová zařízení, která by umožnila velice přesná měření i během průběhu experimentu. Vzhledem ke konstrukci prezentovaného zařízení však možná vyvstane potřeba zmenšení tloušťky horní desky propustoměru, případně by bylo potřeba provádět korekci měřených hloubek.
3. Existuje zde potřeba dalšího výzkumu na rozdílných materiálech pro vyšetření vlivu hustoty zrn na sledované veličiny (těžší a lehčí zrna, jiné křivky zrnitosti). Skleněné kuličky jsou pro své vlastnosti nevhodné pro experimenty a nedoporučuje se jejich další testování.
4. Při stanovování charakteristik materiálů pro další experimenty se doporučuje použít krabicovou smykovou zkoušku pro přesné stanovení jejich úhlů vnitřního tření.
5. Ve všech experimentech bylo pozorováno vytvoření proudnicového tvaru průsakové cesty na výtoku, a ve fázi po porušení vzorku i na nátoku. Tyto tvary jsou výrazně ovlivněny turbulentním prouděním v těchto oblastech a nejsou předmětem výzkumu. Pro další experimenty se doporučuje používat delší měřicí zařízení a začátek a konec vzorku nebrat v úvahu při vyhodnocování rychlostí eroze a dalších veličin.

6. Při vyhodnocování rychlostí eroze se doporučuje proces eroze rozdělovat na zpětný a boční, a to už ve fázi vyhodnocování tvarů průsakové cesty. Rozdělení výrazně usnadní další vyhodnocování a též bude jednodušší definovat rychlost zpětné a boční eroze.
7. Nově sestavený vztah pro stanovení rychlosti eroze popisuje pouze materiály obsažené v této práci. Při dalších aplikacích musí být použit materiál o podobných charakteristikách jako v této práci. Při doplnění výzkumu (např. při použití dalších materiálů) je možné vztah modifikovat jak ze strany koeficientů, tak ze strany kritického středního hydraulického gradientu při zpětné erozi $J_{c, st\check{r}, z}$.
8. Návrh numerického modelu byl velice časově náročný. V disertační práci je uveden pouze jeden z možných přístupů ve vybraném programu. Pro zachycení variability zadání by bylo třeba dalšího výzkumu v této oblasti. K numerickému modelu se vážou následující doporučení:
 - 8.1. Eliminaci vlivu diskretizace výpočtové sítě je možné provést výpočtem za použití zcela homogenní sítě s malou velikostí elementů. Při použití ANSYS je však třeba brát ohled na jeho limity z hlediska ukládaných objemů dat a provést redukci ukládaných dat.
 - 8.2. Omezení ANSYS z hlediska ukládání dat je možné obejít ukládáním dat do externích souborů, mazáním nepotřebných dat z databáze, příp. zpětným načtením potřebných dat. 4D matice lze v omezené míře nahradit 3D maticemi za cenu horší práce s nimi ve fázi programování.
 - 8.3. V rámci výpočtu stability elementů se doporučuje prověřit i další možné přístupy s vlivem napjatosti, tvarem a drsností zrn.
 - 8.4. Doporučuje se prověřit vhodnost i dalších programů příp. i jiných přístupů v celému modelu jako je např. přímé řešení postupu transportovaného materiálu průsakovou cestou.

9. SUMMARY

The work focuses on the experimental research on backward erosion piping in foundations of water retaining structures. A partial goal of this research was to design and test a new experimental device. Using it, over 40 experiments were performed on sand from Bzenec quarry (grain size: 0-2 mm, 0,25-2 mm, 0,25-1 mm) and on glass beads of diameter 0,2 mm and 0,5 mm. When experimenting, samples of glass beads showed a problem when a slit was formed underneath the top wall of the device. This phenomenon rendered measured data useless and glass beads were then excluded from further assessments.

After experiments, a critical hydraulic gradient and rates of erosion (backward and lateral) were derived. Averaged critical hydraulic gradients were compared with available literature. All authors researching the BEP phenomenon declare a value of averaged critical hydraulic gradient up to 0,3. Research done in this work exceeds this value even $9\times$ which is due to differences between tested materials, experimental devices and safety factors introduced in previous publications. Better agreement showed Schmertmann (2000), van Beek (2015) Sellmeijer (2011) and Robbins et al. (2018). Local critical hydraulic gradients on the pipe tip were not compared due to the lack of relevant data.

While using material Bzenec 0-2 mm, it was observed, that with a decrease of material porosity an increase of critical hydraulic gradients occurs. When grains smaller than 0,25 mm were removed (the material was made more uniform), only limited porosity could be achieved which also affected values of critical hydraulic gradient. The same effect was observed when grains > 2 mm were removed. Also, an effect of sand uniformity was observed.

Materials Bzenec 0,25-2 mm and Bzenec 0,25-1 mm showed lower critical hydraulic gradients which results in lower resistance against initialisation of backward erosion. However, critical shear stresses evaluated show that these materials are more resistant to lateral erosion. In larger view, all erosion phenomena in this work were classified as extremely fast due to the character of tested sands.

Based on obtained erosion rates, a new formula to calculate a backward erosion rate was derived. This formula uses acting hydraulic gradient and material properties as input.

In the last part of the work, a design of a numerical model was done. The model uses a standard ANSYS Mechanical environment. In core, the model consists of a part in which a groundwater flow is solved, and of part in which stress conditions of the sample are solved.

Both parts were solved as quasi-stationary, and the time dependence was simulated by chaining one solution on the other. The seepage pipe was simulated using the material with very high hydraulic conductivity. Changes in the pipe length and its dimensions were simulated by a change of material characteristics of sample elements when their stability was lost. The intensity of the erosion was regulated by introducing coefficients which can be calibrated. These coefficients cover factors which were not introduced in the element stability assessment (e.g. grain configuration, grain shape and roughness). The element stability assessment was done on the contact of the sample and the pipe. Also, given observed processes during experiments and to cover erosion time dependency, more sample layers under the contact were assessed.

V Brně dne 3. 10. 2022

.....

Ing. Lubomír Petrula

10. PODKLADY

10.1 Literatura

- AKRAMI, S., BEZUIJEN, A., ROSENBRAND, E., KOELEWIJN, A., FÖRSTER, U., VAN BEEK, V. M. 2018. Investigating the Formation of a Filter Cake in Column Experiments, for Combinations of Filter and Fine Sand in a Coarse Sand Barrier. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 211-220. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- AKRAMI, S., BEZUIJEN, A., VAN BEEK, V. M., ROSENBRAND, E., FÖRSTER, U., KOELEWIJN, A. 2019. Analysis of Pipe Progression during Backward Erosion Piping in the Presence of a Coarse Sand Barrier. In: *Book of Abstracts, 27th Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion EWG IE*, 18.-21. 6. 2019, Vancouver: University of British Columbia, s. 30-31.
- ANSYS, 2010. *ANSYS Mechanical APDL Command Reference*. Verze 13.0, listopad 2010. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
- ANSYS, 2011. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. Verze 14.0, listopad 2011. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
- ANSYS, 2013a. *ANSYS Mechanical APDL Verification Manual*. Verze 15.0, listopad 2013. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
- ANSYS, 2013b. *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. Verze 15.0, listopad 2013. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
- ARULANANDAN, K., SARGUNAM, A., LOGANATHAN, P., KRONE, R. B. 1973. *Application of chemical and electrical parameters to prediction of erodibility. Soil Erosion: Causes and Mechanisms*. Prevention and Control. Special Report 135, Highway Research Board, s 42-51.
- BEAR, J., VERRUIJT, A. 1987. *Modeling Groundwater Flow and Pollution*, 1st ed. Springer Netherlands, Nizozemsko, 414 s. ISBN: 978-1-55608-014-2.
- BEER, F. P., RUSSELL JOHNSON, E., Jr. 1992. *Mechanics of Materials*. 2nd ed. McGraw-Hill, Inc.

- BÉGUIN, R., OXARANGO, L., SAPIN, L., GARANDET, A., VIGLINO, A., FRANCOIS, E., MORA, H., MARTINS, F., DUCHESNE, L., ALBRAECHT, D., ESNAULT-FILET, A., GUTJAHR, I., LÉPINE, L. 2018. Experimental Tests of Soil Reinforcement Against Erosion and Liquefaction by Microbially Induced Carbonate Precipitation. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 16-24. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- BENAHMED, N., BONELLI, S. 2012. Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing hole erosion tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. **16**(1), s. 43-58.
- BEZUIJEN, A. 2017. The influence of the leakage length on the initiation of backward erosion piping. In: *Proceedings of 25th Meeting of European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams and their Foundation*. Delft: Deltares, s. 88-96. ISBN: 978-90-827468-1-5.
- BLIGH, W. G. 1910. Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*, **64**, s. 708-710.
- BONELLI, S. 2012. *Erosion of Geomaterials*. Londýn: ISTE Ltd.
- BONELLI, S., BENAHMED, N., BRIVOIS, O. 2006. On Modelling of the Hole Erosion Test. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Scour and Erosion*. Amsterdam: ICSE.
- BULLETIN 164. 2015. *Intenal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. Volume 1: Internal erosion proces and engineering assessment*. Francie.
- BUSCH, K. F., LUCKNER, L., TIEMER, K. 1993. *Geohydraulik*. 3. ed. Berlín: Gebrüder Borntraeger.
- BUSCH, K. F., LUCKNER, L. 1973. *Geohydraulik*. VEB Deutscher für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- DE BAECQUE, M., CHEVALIER, C., PALMA LOPES, S., LE FEUVRE, M., REIFFSTECK, P., CHARLES, I., HERRIER, G. 2017. Resistance to erosion of lime treated soils and perspectives for coastal dikes. In: *Proceedings of 25th Meeting of European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams and their Foundation*. Delft: Deltares, s. 133-142. ISBN 978-90-827468-1-5.

- DUCHAN, D., ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. 2014. *Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod: Hydraulika vsakování dešťových vod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 160 s., ISBN: 978-80-214-5017-2.
- GERE, J. M., TIMOSHENKO, S. P. 1990. *Mechanics of Materials*, 3rd ed. Boston: PWS-KENT Publishing Company.
- GRIFFITH, W. M. 1913. The stability of weir foundations on sand and soil subject to hydrostatic pressure. In: *Minutes of Proceedings. J.C.E.*, Vol. 197 pt III, s. 221. (12) (PDF) A Historical Review of Embankment Seepage Design. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317801416_A_Historical_Review_of_Embankment_Seepage_Design [přístup Oct 08 2020].
- HALA, M. *Hodnocení možnosti vzniku vnější sufoze/ztekucení a řešení metodou dílčích součinitelů*. 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.
- HANSON, G. J., COOK, K. R. 2004. Apparatus, Test Procedures, and Analytical Methods to Measure Soil Erodibility *Situ*. *Applied Engineering in Agriculture*. **20**(4), s. 455-462.
- CHAPUIS, R. P., GATIEN, T. 1986. An improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays. *Canadian Geotechnical Journal*, **23**, s. 83-87.
- CHUGAEV, R. R. 1962: *Gründungsumriss von Wasserbauwerken*. Moskva, Rusko.
- JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2002. *Porušení sypaných hrází v důsledku přelití*. Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně. Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- KERNSTOCKOVÁ, M. 2007. *Paleonapjatostní analýza heterogenních souborů dat*. Rešeršní projekt. Brno: Masarykova univerzita v Brně: Přírodovědecká fakulta.
- KOELEWIJN, A. R., BRIDLE, R. 2017. Internal erosion in dams and dikes. In: *Proceedings of 25th Meeting of European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams and their Foundation*. Delft: Deltares, s. 1-11. ISBN: 978-90-827468-1-5.
- KOLÁŘ, V., KRATOCHVÍL, J., LEITNER, F., ŽENÍŠEK, A. 1972. *Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury (Teoretická knihovna inženýra, TKI).
- KOVÁCS, G. 1981. *Seepage Hydraulics*. Budapešť: Akadémia Kiadó.

- LANE, E. W. 1934. Security from under-seepage masonry dams on earth foundations. In: *Proceedings American Society of Civil Engineers*, **60**, s. 926-966.
- MOORE, W. L., MASCH, F. D. Jr. 1962. Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments. *Journal of Geophysical Research*, **67**(4), s. 1437-1449.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H., RANKL, M., SCHLÖTZER, C. 1993: Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages. In: BRAUNS, HEIBAUM a SCHULER. *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*. Rotterdam, Balkema, s. 369-376.
- PERZLMAIER, S., MUCKENTHALER, P., KOELEWIJN, A. R. 2007. Hydraulic Criteria for Internal Erosion in Cohesionless Soil. In: AUFLEGER, M., FRY, J. J., GOLTZ, M., PERZLMAIER, S. *Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees*. Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD. Příspěvky na sympozium 17.-19. 9. 2007, Freising, Německo.
- REDDI, L. N., LEE, I. M., BONALA, M. V. S. 2000. Comparison of Internal and Surface Erosion Using Flow Pump Tests on a Sand Kaolinite Mixture. *Geotechnical Testing Journal*. GTJODJ, **23**(1), s. 116-122.
- ROBBINS, B. A., GRIFFITHS, D. V. 2018. Modelling of Backward Erosion Piping in Two and Three Dimensional Domains. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 149-158. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- ROBBINS, B. A., GRIFFITHS, D. V., FENTON, G. A. 2019. Application of the Random Finite Element Method to Backward Erosion Piping. In: *Book of Abstracts, 27th Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion EWG IE*, 18.-21. 6. 2019, Vancouver: University of British Columbia, s. 37-38.
- ROBBINS, B. A., VAN BEEK, V. M. 2017. Physical measurement of the backward erosion piping process. In: *Proceedings of 25th Meeting of European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams and their Foundation*. Delft: Deltares. ISBN: 978-90-827468-1-5, s. 29-37.
- ROBBINS, B. A., VAN BEEK, V. M., LÓPEZ SOTO, J. F., MONTALVO BARTOLOMEI, A. M., MURPHY, J. 2018. A novel laboratory test for backward erosion piping. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, **18**(5), s. 266-279, DOI: <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00016>.

- ROBBINS, B., STEPHENS, I., VAN BEEK, V. M., KOELEWIJN, A., BEZUIJEN, A. 2019. Hydraulic Losses through Sand Boils: Measurements and Theory. In: *Book of Abstracts, 27th Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion EWG IE*, 18.-21. 6. 2019, Vancouver: University of British Columbia, s. 27-28.
- ROSENBRAND, E., VAN BEEK, V. M., FÖRSTER, U., VAN DER KOLK, B., WIERSMA, A., TERWINDT, J., PETERS, D., AKRAMI, S., KOELEWIJN, A., VAN GERVEN, K., VOOGT, L., BEZUIJEN, A. 2019. Large-Scale Test of a Coarse Sand Barrier as a Measure Against Backward Erosion Piping. In: *Book of Abstracts, 27th Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion EWG IE*, 18.-21. 6. 2019, Vancouver: University of British Columbia, s. 23-25.
- ROSENBRAND, E., VAN BEEK, V. M., KOELEWIJN, A., AKRAMI, S., FÖRSTER, U., GERVEN, K. V., BEZUIJEN, A. 2018. Scale Effects in Coarse Sand Barrier Experiments. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 301-312. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- ROTUNNO, A. F., CALLARI, C., FROIO, F. 2018. A Numerical Approach for the Analysis of Piping Erosion in Hydraulic Works. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 159-167. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- ŘÍHA, J. a kol., 1997. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 185 s., ISBN: 80-214-0827-8.
- ŘÍHA, J., ŠPANO, M., ADAM, K., VRUBEL, J., HALA, M. 2016. *Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou mezních stavů*. Certifikovaná metodika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 154 s, ISBN: 978-80-214-5326-5.
- SELLMEIJER, H., LOPEZ DE LA CRUZ, J., VAN BEEK, V. M., 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), s. 1139-1154.
- SELLMEIJER, H., LOPEZ DE LA CRUZ, J., VAN BEEK, V. M., 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), s. 1139-1154.

- SELLMEIJER, J. B. 1988. *On the mechanism of piping under impervious structures*, Delft, Nizozemsko, Disertační práce.
- SELLMEIJER, J. B. 2006. Numerical computation of seepage erosion below dams (piping). In: *Proceedings of Third International Conference on Scour and Erosion*. ISCE 3, 1.-3. 11. 2006, Nizozemsko, Amsterdam, Amsterdam: ISCE, s. 596-601.
- SHIELDS, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, **26**, Berlín, Německo.
- SCHMERTMANN, J. H. 2000. The non-filter factor of safety against piping through sands, Geotechnical Special Publication No. 111, In: SILVA, F., KAVAZANJIAN, E. *Judgment and innovation*, Reston: ASCE.
- ŠIMEK, J., JESENÁK, J., ECHLER, J., VANÍČEK, I. 1990. *Mechanika zemin*. 1. vyd. Praha: SNTL. 387 s. ISBN: 80-03-00428-4.
- VAN BEEK, V. M. 2015. *Backward erosion piping: Initiation and Progression*. Delft, Nizozemsko, Disertační práce. Technická univerzita v Delftu.
- VAN BEEK, V. M., KNOEFF, H., SCHWECKENDIEK, T. 2011. Piping: Over 100 Years of Experience, From Empiricism Towards Reliability Based Design. In: *A Feeling for Soil and Water – A Tribute to Prof. Frans Barends*.
- VAN BEEK, V. M., NOORDMAN, A., ROBBINS, B. A., GRIFFITHS, D. V. 2019. 3D Numerical Simulation of Backward Erosion Piping Tube Experiments. In: *Book of Abstracts, 27th Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion EWG IE*, 18.-21. 6. 2019, Vancouver: University of British Columbia, s. 31-35.
- VAN BEEK, V. M., YAO, Q., VAN, M., BARENDs, F. 2012. Validation of Sellmeijer's model for backward piping under dikes on multiple sand layers. Paříž: ICSE 6-39, s. 92-99.
- VANDENBOER, K., VAN BEEK, V. M., BEZUIJEN, A. 2017. Pipe depth measurement in small-scale backward erosion piping experiments. In: *Proceedings of 25th Meeting of European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams and their Foundation*. Deltares, Delft: Deltares, s. 21-28. ISBN: 978-90-827468-1-5.
- VNIIG, 1976. *Rukovodstvo po rasčotam filtracionnoj pročnosti plotin iz gruntovyh materialov*. s. 78.

- VUKOVIĆ, M., PUŠIĆ, M. 1992. *Soil Stability and Deformation due to Seepage*. Water research publication. Colorado.
- WAN, C. F., FELL, R. 2002. *Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the Slot Erosion Test and Hole Erosion Test*. UNICIV Report No. R-412. Sydney: Univerzita Nového Jižního Walesu, Fakulta stavební.
- WAN, C. F., FELL, R. 2004a. Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams. *Geotechnical Testing Journal*, **27**(3), s. 295-303.
- WAN, C. F., FELL, R. 2004b. Investigating of the rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **30**(4), s. 373-380.
- WEIJERS, J. B. A., SELLMER, J. B. 1993: A new model to deal with the piping mechanism. In: BRAUNS, HEIBAUM a SCHULER. *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Rotterdam, Balkema, s. 345-355.

10.2 Publikace autora

- DUCHAN, D., PETRULA, L., ŘÍHA, J. Numerical analysis for the dam break of the Choltický dam. 2019. In: *Sborník příspěvků z 18. Mezinárodní konference technické kontroly hrází*. 10. 9. 2019. Varšava: Instytut meteorologii i Gospodarki Wodnej. ISBN: 978-83-64979-32-3.
- HALA, M., PETRULA, L., ALHASAN, Z. 2020. Comparison of Hydraulic Conductivity Values Obtained from Empirical Formulae and Laboratory Experiments. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, **68**(4), s. 669-678.
- KOTAŠKA, S., PETRULA, L., ŘÍHA, J. 2019. Hydraulické modelování průběhu zvláštní povodně v kaskádě vodních děl. In: *Sborník konference Vodní toky 2019*. Kostelec nad Černými Lesy: Lesnická práce, s. r. o. ISBN: 978-80-7458-118-2.
- PETRULA, L. 2020. Zařízení pro výzkum zpětné eroze. In: *Sborník příspěvků 22. odborné konference doktorského studia Juniorstav 2020*. 23. 1. 2020. Brno: Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební. ISBN: 978-80-86433-73-8. s 593-597.
- PETRULA, L. 2021. Stanovení rychlosti eroze a erodibility průsakové cesty v písčích. In: *Sborník příspěvků 23. odborné konference doktorského studia Juniorstav 2021*. 28. 1. 2021. Brno: Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební. ISBN: 978-80-86433-75-2.

- PETRULA, L., HALA, M., ŘÍHA, J. 2018. Uncertainty in Determining the Critical Hydraulic Gradient of Uniform Glass Beads. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 81-90. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- PETRULA, L., ŘÍHA, J. 2022. A new small-scale experimental device for testing backward erosion piping. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, **70**(3), s. 376-384. ISSN: 0042-790X. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0023>.
- PETRULA, L., ŘÍHA, J., JULÍNEK, T. 2018. Evaluation of groundwater contamination in the area of former military airport. *GRADEVINAR*, **70**(4), s. 369-375. ISSN: 0350-2465.
- ŘÍHA, J., KOTAŠKA, S., PETRULA, L. 2020. Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the Čížina River in the Czech Republic. *Water* 2020, **12**(8). ISSN:2073-4441, DOI: <https://doi.org/10.3390/w12082309>.
- ŘÍHA, J., PETRULA, L. 2019. A New Design and Testing of a Small-Scale Experimental Device of Backward Erosion Piping. In: *Proceedings of 27th Annual Meeting of European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*, 18.-21.červen 2019, Vancouver: University of British Columbia.
- ŘÍHA, J., PETRULA, L., ALHASAN, Z., POPIELSKI, P., DABSKA, A., FRY, J., SOLSKI, S., PEREVOSHCHIKOVA, N., LANDSTORFER, F. 2018. Harmonisation of Terminology and Definitions on Soil Deformation Due to Seepage. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 347-366. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- ŘÍHA, J., PETRULA, L., HALA, M. 2020. Statistical analysis of experimentally determined critical hydraulic gradients for heave. *Géotechnique Letters* 10, **10**(2). E-ISSN: 2045-2543, DOI: <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00054>.
- ŘÍHA, J., PETRULA, L., HALA, M., ALHASAN, Z. 2018. Assessment of empirical formulae for determining the hydraulic conductivity of glass beads. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, **66**(3), s. 337-347. ISSN: 0042-790X.

10.3 Technické normy

- ČSN 72 1007. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, s. 22, 33.
- ČSN EN 1097-7. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva*. Praha: Český normalizační institut, 2008, s. 38.
- ČSN ISO 3310-1. *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení. Část 1: Zkušební síta z kovové tkaniny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- ČSN ISO 3310-2. *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení. Část 2: Zkušební síta z děrovaného plechu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- ČSN 75 0120. *Vodní hospodářství – Terminologie hydrotechniky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- EN B.1997.1. *Eurocode 7: Geotechnical Design-Part 1: General rules*. Londýn: British Standards, 2004.

10.4 Použité zkratky

2D	... dvoudimenzionální
3D	... třídímní
A/D	... Analog/Digital
APDL	... Ansys Parametric Design Language
ASCII	... American Standard Code for Information Interchange
BEP	... Backward Erosion Piping (zpětná eroze s navazujícím vývojem průsakové cesty)
CSV	... Comma-Separated Values
DN	... vnitřní průměr potrubí
DOP	... dolní okrajová podmínka
E	... element
EWG-IE	... European Working Group on Internal Erosion
HOP	... horní okrajová podmínka
ID _{MAT}	... identifikátor materiálu v programu ANSYS
LVV VUT FAST	... Laboratoř vodohospodářského výzkumu VUT FAST
OP	... okrajová podmínka

PP	... počáteční podmínka
PVC	... polyvinylchlorid
S.R.	... srovnávací rovina
TP	... časový bod
USB	... Universal Serial Bus
VUT FAST	... Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební
XLSX	... spreadsheetový formát souboru EXCEL
XS	... příčný řez

11. VELIČINY A JEDNOTKY

$a_{0,J}$	... základní konstanta pro vztah na stanovení hydraulického gradientu	[-]
$a_{1,J}$	... koeficient vlivu pórovitosti	[-]
$a_{2,J}$	... koeficient vlivu velikosti zrna	[mm ⁻¹]
a_{prop}, b_{prop}	... rozměry propustoměru	[m]
a_{SF}	... koeficient průběhu eroze	[-]
A	... průtočná plocha průsakové cesty	[m ²]
$A_{BK,E,TP:TP-1}$	... průřezová plocha průsakové cesty pro element E při zpětné erozi	[m ²]
$A_{BK,TP:TP-1}$	... průřezová plocha průsakové cesty při zpětné erozi	[m ²]
$A_{dno,E,TP}$	... plocha dna elementu E v časovém bodě TP	[m ²]
$A_{dno,E,TP-1}$	... plocha dna elementu E v časovém bodě $TP-1$	[m ²]
$A_{dno,pr,E,TP:TP-1}$	... průměrná plocha dna elementu E mezi časovými body TP a $TP-1$	[m ²]
$A_{dno,pr,TP:TP-1}$	... průměrná plocha dna mezi časovými body TP a $TP-1$	[m ²]
$A_{dno,TP}$	... celková plocha dna v časovém bodě TP	[m ²]
$A_{dno,TP-1}$	... celková plocha dna v časovém bodě $TP-1$	[m ²]
A_{prum}	... průměrná průřezová plocha elementu	[m ²]
A_{R1}, A_{R2}	... průřezová plocha na okraji elementu	[m ²]
A_{XS}	... průřezová plocha řezu XS průsakovou cestou	[m ²]
A_{XS-1}	... průřezová plocha řezu $XS-1$ průsakovou cestou	[m ²]
b	... šířka průsakové cesty	[m]
b_p	... 2. parametr rovnice přímky	[kg/s/m ²]
c	... koheze zeminy	[Pa]
$c_{\check{s}}$	... šířka průsakové cesty	[m]
c_{hl}	... hloubka průsakové cesty	[m]
c_B	... koeficient délky průsakové cesty dle Bligha	[-]
c_M	... tepelná kapacita materiálu	[J/kg/K]
C_e	... koeficient eroze	[s/m]
C_U	... číslo nestejnzrnnosti	[-]
d_{10}	... velikost zrna při 10% propadu	[mm]
d_{17}	... velikost zrna při 17% propadu	[mm]

d_{50}	... velikost zrna při 50% propadu	[mm]
$d_{50,max}$	... maximální velikost zrna pro použití vztahu pro rychlost zpětné eroze	[mm]
d_{60}	... velikost zrna při 60% propadu	[mm]
d_{70}	... velikost zrna při 70% propadu	[m]
d_{zrno}	... velikost zrna	[mm]
D_{bed}	... mocnost vrstvy písku v podzákladi	[m]
D_{cesta}	... průměr průsakové cesty	[m]
$D_{cesta}^{(1)}$	... původní průměr průsakové cesty	[m]
$D_{cesta}^{(2)}$	... nový průměr průsakové cesty	[m]
$D_{válec}$	... vnitřní průměr odměrného válce	[m]
e	... počet elementů průsakové cesty	[-]
E	... modul pružnosti	[Pa]
E_{cesta}	... modul pružnosti materiálu průsakové cesty	[Pa]
E_{vzorek}	... modul pružnosti materiálu vzorku	[Pa]
f_G	... faktor geometrie	[-]
f_J	... faktor středního hydraulického gradientu	[-]
f_n	... zastoupení prachových částic (pro $d < 0,063$)	[%]
f_R	... faktor odolnosti	[-]
f_S	... faktor měřítka	[-]
F_G	... objemová tíhová síla zeminy	[N]
F_G'	... jednotková objemová efektivní tíhová síla zeminy	[N/m ³]
$F_{G,cesta}^{(ELEM)}$	... tíhová síla působící na element průsakové cesty	[N]
$F_{G,vzorek,ef}^{(ELEM)}$	... efektivní tíhová síla působící na element vzorku	[N]
\vec{F}_J	... vektor objemové síly vyvolané proudící vodou	[N]
\vec{F}_J'	... vektor jednotkové objemové síly vyvolané proudící vodou	[N/m ³]
$\mathbf{F}_V^{(ELEM)}$	... vektor objemových sil působících na elementy	[N]
$F_V^{(ELEM)}$	... výslednice objemové síly působící na element	[N]
$F_{V,j,x_i,uzel}^{(ELEM)}$	... část objemové síly ve směru x_i od elementu j přenesená na uzel [N]	
$F_{V,j,x_i}^{(ELEM)}$	... objemová síla ve směru x_i (kde $x_i = x, y, z$) působící na element j [N]	

$F_{V,x_i}^{(UZEL)}$	... objemová síla ve směru x_i (kde $x_i = x, y, z$) působící v uzlu	[N]
$F_{V,x_i,uzel}^{(UZEL)}$	... část objemové síly ve směru x_i (kde $x_i = x, y, z$) působící v uzlu	[N]
$F_{V,uzel}^{(ELEM)}$	... část objemové síly působící v uzlu	[N]
$F_{V,x}^{(ELEM)}$	... objemová síla ve směru x působící na element	[N]
$F_{V,y}^{(ELEM)}$	... objemová síla ve směru y působící na element	[N]
$F_{V,z}^{(ELEM)}$	... objemová síla ve směru z působící na element	[N]
F_{vz}	... objemová vztlaková síla	[N]
g	... gravitační zrychlení	[m/s ²]
h_d	... hloubka vody pod konstrukcí	[m]
h_h	... hloubka vody nad konstrukcí	[m]
h_i	... i -tá piezometrická výška	[m]
$h_{i,rel}$	... relativní piezometrická výška vzhledem k délce vzorku	[-]
$h_{i,senz}$	... piezometrická výška měřená tlakovým senzorem	[m]
h_k	... výška testovací krychle	[m]
h_m, h_n	... piezometrické výšky pro stanovení hydraulického gradientu	[m]
$h_{senz,max}$	... maximální piezometrická výška měřená tlakovým senzorem	[m]
h_{tabule}	... vzdálenost mezi čtením „nuly“ na tabuli a osou tlakového senzoru	[m]
\mathbf{H}	... vektor piezometrických výšek	[m]
H	... piezometrická výška	[m]
\bar{H}	... známá piezometrická výška na hranici oblasti	[m]
H_0	... počáteční piezometrická výška	[m]
H_1	... piezometrická výška před elementem	[m]
H_2	... piezometrická výška za elementem	[m]
H_h	... rozdíl hladin nad a pod objektem	[m]
$H_{nádrž,b}$	... výška hladiny v nádrži při boční erozi	[m]
$H_{nádrž,z}$	... výška hladiny v nádrži při zpětné erozi	[m]
$H_{sed,b}$	... výška hladiny v přípravku pro sedimentaci při boční erozi	[m]
$H_{sed,z}$	... výška hladiny v přípravku pro sedimentaci při zpětné erozi	[m]
i_{EL}	... číslo elementu	[-]
ID _{MAT}	... identifikační číslo materiálu elementu	[-]

I_E	... index eroze	[-]
I_p	... index plasticity	[%]
j	... pořadí elementu ($j = 1, 2, \dots, n^{(ELEM)}$)	[-]
\mathbf{J}	... vektor hydraulického gradientu	[-]
J	... hydraulický gradient	[-]
J_c	... kritický hydraulický gradient	[-]
$J_{c,stř}$	... střední kritický hydraulický gradient	[-]
$J_{c,stř, Schm}$	... střední kritický hydraulický gradient dle Schmertmanna (2000)	[-]
$J_{c,stř, Sell}$	... střední kritický hydraulický gradient dle Sellmeijera (2011)	[-]
$J_{c,stř,z}$	... kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi	[-]
$J_{c,stř,z,exp}$	... kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi – vyhodnocený z měření	[-]
$J_{c,stř,z,vyp}$	... kritický střední hydraulický gradient při zpětné erozi – vypočtený	[-]
J_S	... sklon čáry energie v průsakové cestě	[-]
$J_{stř}$	... střední hydraulický gradient	[-]
$J_{stř,b}$	... střední hydraulický gradient při boční erozi	[-]
$J_{stř,z}$	... střední hydraulický gradient při zpětné erozi	[-]
$J_x^{(ELEM)}$	... hydraulický gradient ve směru x vypočtený na elementu	[-]
J_y	... hydraulický gradient ve směru y	[-]
$J_y^{(ELEM)}$	... hydraulický gradient ve směru y vypočtený na elementu	[-]
$J_z^{(ELEM)}$	... hydraulický gradient ve směru z vypočtený na elementu	[-]
k	... hydraulická vodivost materiálu	[m/s]
k_{cesta}	... hydraulická vodivost průsakové cesty v simulaci	[m/s]
k_i	... hydraulická vodivost v souřadné ose x_i	[m/s]
k_{SF}	... regulační koeficient eroze	[-]
k_{vzorek}	... hydraulická vodivost vzorku v simulaci	[m/s]
l_E	... délka elementu E průsakové cesty	[m]
$l_{E,pr}$	... poloha středu elementu E průsakové cesty	[m]
$l_{E,TP}$	... délka elementu E průsakové cesty v časovém bodě TP	[m]
$l_{gr,prům}$	... průměrná poloha měření hydraulického gradientu	[m]

$l_{gr,rel}$	... relativní poloha měření hydraulického gradientu vztažená k poloze posledního piezometru	[-]
l_i	... poloha propustoměru měřená ze strany nátoky	[m]
l_{i+1}	... poloha piezometru měřená ze strany nátoky	[m]
$l_{i,max}$	... poloha posledního piezometru měřená ze strany nátoky	[m]
$l_{i,rel}$	... relativní vzdálenost měření vztažená k poloze posledního piezometru	[-]
l_{prop}	... délka propustoměru	[m]
$l_{řez,XS}$	... poloha příčného řezu XS na průsakové cestě	[m]
$l_{řez,XS-1}$	... poloha příčného řezu XS-1 na průsakové cestě	[m]
l_{vzorek}	... délka vzorku	[m]
L	... mezní délka průsakové cesty	[m]
L'	... průsaková délka	[m]
L_{cesta}	... délka průsakové cesty	[m]
$L_{cesta,prima}$	... délka přímé části průsakové cesty	[m]
$L_{cesta}^{(1)}$	... původní délka průsakové cesty	[m]
$L_{cesta}^{(2)}$	... nová délka průsakové cesty	[m]
$L_{čelo,rel}$	... relativní poloha čela vzhledem k délce vzorku	[-]
$L_{čelo,TP-1}$	... poloha čela průsakové cesty v časovém bodě TP-1	[mm]
$L_{čelo,TP}$	... poloha čela průsakové cesty v časovém bodě TP	[mm]
$L_{čelo,v}$	... střed intervalu, na kterém byla vypočtena rychlost $v_{čelo}$	[mm]
$L_{spára}$	... délka základové spáry	[m]
m_{cesta}	... odebraná hmotnost materiálu	[kg]
m_E	... dílčí hmotnost odneseného materiálu mezi řezy XS a XS-1	[kg]
$m_{E,TP}$	... dílčí hmotnost chybějícího materiálu v elementu E v časovém bodě TP	[kg]
$m_{E,TP-1}$	... dílčí hmotnost chybějícího materiálu v elementu E v časovém bodě TP-1	[kg]
$m_{E,TP:TP-1}$	... hmotnost erodovaného materiálu mezi časovými body TP a TP-1	[kg]
m_{EL}	... hmotnost elementu	[kg]
m_{er}	... hmotnost erodovaného materiálu	[kg]
$m_{er,boč}$	... hmotnost erodovaného materiálu při boční erozi	[kg]

$m_{er,cumul}$	... kumulovaná erodovaná hmotnost	[kg]
$m_{er,TP}$	... hmotnost erodovaného materiálu v časovém bodě TP	[kg]
$m_{er,TP-1}$	... hmotnost erodovaného materiálu v časovém bodě TP-1	[kg]
$m_{er,z}$	... hmotnost erodovaného materiálu při zpětné erozi	[kg]
m_{eroze}	... kumulativní hmotnost erodovaného materiálu	[kg]
$m_{eroze,konc}$	... hmotnost erodovaného materiálu na konci experimentu	[kg]
$m_{kel,1}$	... hmotnost kelímku na zachycení materiálu z průsakové cesty	[kg]
$m_{kel,1 + cesta}$	... hmotnost kelímku včetně odebraného materiálu	[kg]
$m_{konc.}$	... hmotnost kbelíku se zbývajícím materiálem	[kg]
m_{P1}	... hmotnost pyknometru naplněného zeminou	[kg]
m_{P2}	... hmotnost pyknometru naplněného destilovanou vodou	[kg]
m_{P3}	... hmotnost pyknometru se zeminou a destilovanou vodou	[kg]
$m_{poč.}$	... hmotnost kbelíku s testovaným materiálem	[kg]
m_{TP}	... celková hmotnost chybějícího materiálu v časovém bodě TP	[kg]
m_{TP-1}	... celková hmotnost chybějícího materiálu v časovém bodě TP-1	[kg]
$m_{TP:TP-1}$	... celková hmotnost erodovaného materiálu mezi časovými body TP a TP-1	[kg]
m_{vzorek}	... hmotnost materiálu v propustoměru	[kg]
n	... pórovitost materiálu	[-]
$n^{(ELEM)}$	... počet elementů připojených k danému uzlu	[-]
n_{EL}	... počet elementů	[-]
$n_{EL,cesta}$	... počet elementů průsakové cesty	[-]
$n_{EL,vzorek}$	... počet elementů vzorku	[-]
n_i	... směrový kosinus vektoru vnější normály k hranici Γ_2	[-]
n_{max}	... maximální teoretická pórovitost	[-]
n_S	... počet elementů majících společnou stěnu s řešeným elementem	[-]
O	... omočený obvod	[m]
O_{cest}	... obvod elementu průsakové cesty	[m]
O_d	... obvod dna průsakové cesty	[m]
$O_{d,1}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu 1	[m]
$O_{d,2}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu 2	[m]
$O_{d,prum}$	... průměrný obvod dna průsakové cesty	[m]
$O_{d,XS}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu XS	[m]

$O_{d,XS,TP}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu XS v časovém bodě TP	[m]
$O_{d,XS-1,TP}$	... obvod dna průsakové cesty v řezu $XS-1$ v časovém bodě TP	[m]
O_{XS}	... obvod dna průsakové cesty	[m]
p	... tlak	[Pa]
p_1, p_2	... tlak vody působící na element	[Pa]
p_k	... počet kroků simulace	[-]
p_{max}	... maximální tlak	[Pa]
p_w	... tlak vody	[Pa]
$P\%$	... celkový propad (při rozboru zrnitosti)	[%]
q	... specifický průtok	[m/s]
q_i	... specifický průtok v daném směru souřadné osy	[m/s]
q_{vyp}	... vypočtený specifický průtok	[m/s]
Q	... průtok vzorkem	[m ³ /s]
$Q'D$	... objemový zdroj/propad	[s ⁻¹]
$Q_{válec}$	... průtok měřený pomocí odměrného válce	[m ³ /s]
Q_{vyp}	... vypočtený průtok	[m ³ /s]
r_{cesta}	... poloměr zjednodušené průsakové cesty	[m]
r_{SF}	... hloubkový faktor	[-]
R	... hydraulický poloměr	[m]
R^2	... koeficient determinace	[-]
$R_{E,pr}$	... průměrný hydraulický poloměr elementu E průsakové cesty	[m]
$R_{řez,XS}$	... hydraulický poloměr příčného řezu XS na průsakové cestě	[m]
$R_{řez,XS-1}$	... hydraulický poloměr příčného řezu $XS-1$ na průsakové cestě	[m]
$R_{váž,b}$	... vážený hydraulický poloměr pro boční erozi	[m]
s_{pr}	... průměrná délka pláště elipsy	[m]
s_x	... poloha okraje průsakové cesty od osy	[mm]
S_1, S_2	... plocha zatěžovacího obrazce	[m ²]
S_{DOP}	... plocha dolní okrajové podmínky	[m ²]
S_o	... specifická zásobnost	[m ⁻¹]
S_{prop}	... průřezová plocha propustoměru	[m ²]
S_q	... suma čtverců odchylek dat vypočtených a získaných z experimentu	[kg ² /s ² /m ⁴]
$S_{válec}$	... průřezová plocha odměrného válce	[m ²]

SF	... stupeň stability elementu	[-]
\overline{SF}	... průměrný stupeň stability elementu	[-]
SF_i	... stupeň stability i-tého elementu	[-]
SF_{MAX}	... maximální stupeň stability	[-]
SF_{MIN}	... minimální stupeň stability	[-]
SF_{VYM}	... stupeň stability elementu pro vymílání	[-]
t	... čas	[s]
t_0	... relativní počátek simulace ($t_0 = 0$ s)	[s]
t_{beg}	... počáteční čas simulace	[s]
t_{end}	... koncový čas simulace	[s]
t_{ex}	... čas experimentu	[s]
t_Q	... časový úsek pro měření průtoku vody	[s]
t_{ref}	... referenční čas měření	[s]
t_{sim}	... čas simulace	[s]
t_{TP}	... čas zaznamenaného bodu TP	[s]
t_{TP-1}	... čas zaznamenaného bodu $TP-1$	[s]
$t_{TP:TP-1}$	... délka časového kroku (doba mezi časovými body TP a $TP-1$)	[s]
$t_{TP:TP-1,pr}$	... střed časového intervalu $TP:TP-1$	[s]
T	... tečná síla	[N]
T_w	... teplota vody	[°C]
\mathbf{u}	... vektor posunů	[m]
u_i	... posun ve směru osy x , y , nebo z	[m]
\bar{u}_l	... známý posun ve směru osy x , y , nebo z na hranici oblasti	[m]
u_x	... posun ve směru osy x	[m]
$u_{x,0}$	... počáteční podmínka posunu ve směru osy x	[m]
u_y	... posun ve směru osy y	[m]
$u_{y,0}$	... počáteční podmínka posunu ve směru osy y	[m]
u_z	... posun ve směru osy z	[m]
$u_{z,0}$	... počáteční podmínka posunu ve směru osy z	[m]
$U_{i,senz}$	... výstupní napětí měřené tlakovým senzorem	[V]
$U_{senz,max}$	... maximální výstupní napětí měřené tlakovým senzorem	[V]
$v_{čelo}$	... rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty	[mm/s]
$v_{čelo,norm}$	... normovaná rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty	[mm/s]

V	... objem elementu zeminy	$[m^3]$
V'_i	... dílčí objem mezi dvěma řezy průsakové cesty	$[m^3]$
V_{cesta}	... objem přímé části průsakové cesty	$[m^3]$
V_E	... dílčí objem elementu E mezi řezy XS a $XS-1$ průsakové cesty	$[m^3]$
V_{EL}	... objem elementu	$[m^3]$
V_{ELEM}	... objem elementu	$[m^3]$
V_{er}	... objem erodovaného materiálu	$[m^3]$
$V_{er,boč}$	... objem erodovaného materiálu při boční erozi	$[m^3]$
$V_{er,cumul}$	... kumulovaný erodovaný objem	$[m^3]$
$V_{er,TP}$	... objem erodovaného materiálu v časovém bodě TP	$[m^3]$
$V_{er,TP-1}$	... objem erodovaného materiálu v časovém bodě $TP-1$	$[m^3]$
$V_{er,z}$	... objem erodovaného materiálu při zpětné erozi	$[m^3]$
V_{eroze}	... kumulativní erodovaný objem v sedimentačním kuželi	$[m^3]$
$V_{eroze,konc}$	... erodovaný objem v přípravku pro sedimentaci na konci experimentu	$[m^3]$
V_Q	... objem vody proteklé vzorkem za čas t_Q	$[m^3]$
V_{vzorek}	... objem vzorku	$[m^3]$
V_{zrn}	... objem zrn ve vzorku	$[m^3]$
w	... počet vyhodnocených dat rychlosti zpětné eroze	$[-]$
w_{opt}	... optimální vlhkost	$[\%]$
x_i	... souřadná osa, $i = 1, 2, 3$	
X	... hodnota řešené veličiny ve výpočtu relativní odchylky	
$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	... vnější síly	$[Pa/m]$
z_0	... základ rychlosti zpětné eroze	$[kg/s/m^2]$
α	... úhel sklonu svahu	$[^\circ]$
β	... úhel, který svírá hydraulický gradient s vodorovnou rovinou	$[^\circ]$
γ_p'	... měrná tíha zrn	$[N/m^3]$
γ_w	... měrná tíha vody	$[N/m^3]$
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	... smykové zkosení	$[-]$
Γ_1	... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 1. druhu	
Γ_2	... hranice oblasti pro okrajovou podmínku 2. druhu	
δ	... relativní odchylka	
δa	... relativní odchylka hloubky průsakové cesty	$[\%]$

δa_{prop}	... relativní odchylka rozměru a_{prop}	[%]
$\delta A_1, \delta A_2$	... relativní odchylka průřezové plochy na okraji elementu	[%]
δA_{prum}	... relativní odchylka průměrné průřezové plochy elementu	[%]
δA_{XS}	... relativní odchylka průřezové plochy řezu XS průsakovou cestou	[m ²]
δb	... relativní odchylka šířky průsakové cesty	[%]
δb_{prop}	... relativní odchylka rozměru b_{prop}	[%]
δC_e	... relativní odchylka koeficientu eroze	[%]
δd_{ef}	... relativní odchylka velikosti efektivního zrna	[%]
$\delta H_{nádrž,z}$	... relativní odchylka výšky hladiny v nádrži při zpětné erozi	[m]
$\delta H_{sed,z}$	... relativní odchylka výšky hladiny v přípravku pro sedimentaci při zpětné erozi	[m]
δI_E	... relativní odchylka indexu eroze	[%]
δJ	... relativní odchylka hydraulického gradientu	[%]
δJ_c	... relativní odchylka kritického hydraulického gradientu	[%]
$\delta J_{stř,b}$	... relativní odchylka středního hydraulického gradientu při boční erozi	[-]
$\delta J_{stř,z}$	... relativní odchylka středního hydraulického gradientu při zpětné erozi	[-]
δk	... relativní odchylka hydraulické vodivosti	[%]
δL_{cesta}	... relativní odchylka délky průsakové cesty	[m]
δl_{vzorek}	... relativní odchylka délky vzorku	[%]
$\delta l'_{vzorek}$	... relativní odchylka délky vzorku	[%]
$\delta m'_i$	... relativní odchylka dílčí hmotnosti chybějícího materiálu mezi řezy	[%]
δm_{konc}	... relativní odchylka hmotnosti kbelíku se zbývajícím materiálem	[%]
$\delta m_{poč}$	... relativní odchylka hmotnosti kbelíku s testovaným materiálem	[%]
δm_{vzorek}	... relativní odchylka hmotnosti vzorku v propustoměru	[%]
δn	... relativní odchylka pórovitosti materiálu	[%]
δO_{cest}	... relativní odchylka obvodu elementu průsakové cesty	[%]
$\delta O_{d,1}$	... relativní odchylka obvodu dna průsakové cesty v řezu 1	[m]
$\delta O_{d,2}$	... relativní odchylka obvodu dna průsakové cesty v řezu 2	[m]
$\delta O_{d,prum}$	... relativní odchylka průměrného obvodu dna průsakové cesty	[m]

$\delta O_{d, XS}$	... relativní odchylka obvodu dna průsakové cesty v řezu XS	[m]
δq	... relativní odchylka specifického průtoku	[%]
δQ	... relativní odchylka průtok vzorkem	[%]
δR	... relativní odchylka hydraulického poloměru	[%]
δS_{prop}	... relativní odchylka průřezové plochy propustoměru	[%]
δT_w	... relativní odchylka teploty vody	[%]
$\delta V'_i$	... relativní odchylka dílčího objemu mezi dvěma řezy průsakové cesty	[%]
δV_{vzorek}	... relativní odchylka objemu vzorku	[%]
δV_{zrn}	... relativní odchylka objemu zrn	[%]
δX	... relativní odchylka hodnoty řešené veličiny	
$\delta(\Delta h)$	... relativní odchylka rozdílu piezometrických výšek	[%]
$\delta(\Delta l)$	... relativní odchylka vzdálenosti mezi piezometry	[%]
$\delta(\Delta m_w)$	... relativní odchylka hmotnosti vody protékající vzorkem	[%]
$\delta(\Delta t)$	... relativní odchylka časového úseku pro měření průtoku vody	[%]
$\delta(\Delta V)$	... relativní odchylka objemu vody protékající vzorkem	[%]
$\delta \dot{e}$	... relativní odchylka rychlosti eroze	[%]
$\delta \rho_v$	... relativní odchylka objemové hmotnosti materiálu	[%]
$\delta \rho_w$	... relativní odchylka hustoty vody	[%]
$\delta \rho_{zrn}$	... relativní odchylka měrné hmotnosti zrn	[%]
$\delta \tau$	... relativní odchylka tečného napětí vyvolaného proudící vodou	[%]
$\delta \tau_c$	... relativní odchylka kritického tečného napětí	[%]
Δ	... absolutní odchylka	
Δa	... absolutní odchylka hloubky průsakové cesty	[m]
Δa_{pr}	... přetvoření vzorku v ose y	[m]
Δa_{prop}	... absolutní odchylka rozměru a_{prop}	[mm]
$\Delta A_1, \Delta A_2$	... absolutní odchylka průřezové plochy na okraji elementu	[m ²]
$\Delta A_{boč}$	... změna průřezové plochy průsakové cesty	[m ²]
ΔA_{prum}	... absolutní odchylka průměrné průřezové plochy elementu	[m ²]
ΔA_{XS}	... absolutní odchylka průřezové plochy řezu XS průsakovou cestou	[m ²]
Δb	... absolutní odchylka šířky průsakové cesty	[m]
Δb_{prop}	... absolutní odchylka rozměru b_{prop}	[mm]

ΔC_e	... absolutní odchylka koeficientu eroze	[s/m]
Δ_{cesta}	... základní velikost elementu průsakové cesty	[m]
Δd_{ef}	... absolutní odchylka velikosti efektivního zrna	[m]
Δh	... rozdíl piezometrických výšek	[m]
$\Delta h_{válec}$	... změna polohy hladiny v odměrném válci	[m]
ΔH	... rozdíl hladin nad a pod konstrukcí	[m]
$\Delta H_{nádrž,z}$	... absolutní odchylka výšky hladiny v nádrži při zpětné erozi	[m]
$\Delta H_{sed,z}$	... absolutní odchylka výšky hladiny v přípravku pro sedimentaci při zpětné erozi	[m]
ΔI_E	... absolutní odchylka indexu eroze	[-]
ΔJ	... absolutní odchylka hydraulického gradientu	[-]
ΔJ_c	... absolutní odchylka kritického hydraulického gradientu	[-]
$\Delta J_{stř,b}$	... absolutní odchylka středního hydraulického gradientu při boční erozi	[-]
$\Delta J_{stř,z}$	... absolutní odchylka středního hydraulického gradientu při zpětné erozi	[-]
Δk	... absolutní odchylka hydraulické vodivosti	[m/s]
Δ_{kont}	... základní velikost elementu kontaktu těles	[m]
Δl	... vzdálenost mezi piezometry	[m]
Δl_{vzorek}	... absolutní odchylka délky vzorku	[m]
$\Delta l_{vzorek,x}$	... přetvoření vzorku v ose x	[m]
ΔL	... délka elementu	[m]
ΔL_{cesta}	... absolutní odchylka délky průsakové cesty	[m]
$\Delta L'_{cesta}$	... změna délky průsakové cesty	[m]
$\Delta L_{čelo}$	... délka postupu čela průsakové cesty	[mm]
$\Delta m'_i$	... absolutní odchylka dílčí hmotnosti chybějícího materiálu mezi řezy	[kg]
$\Delta m''_i$	... hmotnost erodovaného materiálu mezi dvěma časovými body	[kg]
Δm_{konc}	... absolutní odchylka hmotnosti kbelíku se zbývajícím materiálem	[kg]
$\Delta m_{poč}$	... absolutní odchylka hmotnosti kbelíku s testovaným materiálem	[kg]
Δm_{vzorek}	... absolutní odchylka hmotnosti vzorku v propustoměru	[kg]
Δm_w	... hmotnost vody proteklé vzorkem	[g]

Δn	... absolutní odchylka pórovitosti materiálu	[-]
ΔO_{cest}	... absolutní odchylka obvodu elementu průsakové cesty	[m]
$\Delta O_{d, 1}$	... absolutní odchylka obvodu dna průsakové cesty v řezu 1	[m]
$\Delta O_{d, 2}$	... absolutní odchylka obvodu dna průsakové cesty v řezu 2	[m]
$\Delta O_{d, prům}$	... absolutní odchylka průměrného obvodu dna průsakové cesty	[m]
$\Delta O_{d, XS}$	... absolutní odchylka obvodu dna průsakové cesty v řezu XS	[m]
Δq	... absolutní odchylka specifického průtoku	[m/s]
ΔQ	... absolutní odchylka průtok vzorkem	[m ³ /s]
ΔR	... absolutní odchylka hydraulického poloměru	[m]
ΔS_{prop}	... absolutní odchylka průřezové plochy propustoměru	[m ²]
$\Delta t_{čelo}$	... doba zpětného postupu čela průsakové cesty	[s]
Δt_Q	... časový úsek pro měření průtoku tlakovým senzorem	[s]
Δt_{sim}	... časový krok simulace	[s]
Δt_{sub}	... časový krok sub-analýzy proudění	[s]
ΔT_w	... absolutní odchylka teploty vody	[°C]
Δv_{zorek}	... základní velikost elementu vzorku	[m]
$\Delta V'_i$	... absolutní odchylka dílčího objemu mezi dvěma řezy průsakové cesty	[m ³]
ΔV_{vzorek}	... absolutní odchylka objemu vzorku	[m ³]
ΔV_{zrn}	... absolutní odchylka objemu zrn	[m ³]
ΔX	... absolutní odchylka hodnoty řešené veličiny	
Δy	... průsaková délka ve směru y	[m]
$\Delta(\Delta h)$	... absolutní odchylka rozdílu piezometrických výšek	[m]
$\Delta(\Delta l)$	... absolutní odchylka vzdálenosti mezi piezometry	[m]
$\Delta(\Delta m_w)$	... absolutní odchylka hmotnosti vody proteklé vzorkem	[g]
$\Delta(\Delta t)$	... absolutní odchylka časového úseku pro měření průtoku vody	[s]
$\Delta(\Delta V)$	... absolutní odchylka objemu vody proteklé vzorkem	[m ³]
$\Delta \dot{\epsilon}$	... absolutní odchylka rychlosti eroze	[kg/s/m ²]
$\Delta \rho_v$	... absolutní odchylka objemové hmotnosti materiálu	[kg/m ³]
$\Delta \rho_w$	... absolutní odchylka hustoty vody	[kg/m ³]
$\Delta \rho_{zrn}$	... absolutní odchylka měrné hmotnosti zrn	[kg/m ³]
$\Delta \tau$	... absolutní odchylka tečného napětí vyvolaného proudící vodou	[Pa]
$\Delta \tau_c$	... absolutní odchylka kritického tečného napětí	[Pa]

$\boldsymbol{\varepsilon}$	... vektor poměrných přetvoření	[-]
ε_x	... poměrné přetvoření v ose x	[-]
ε_y	... poměrné přetvoření v ose y	[-]
ε_z	... poměrné přetvoření v ose z	[-]
$\dot{\varepsilon}$	... rychlost eroze	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{boč,min}$	... minimální rychlost boční eroze	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{boč}$	... rychlost boční eroze	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{max}$	... maximální rychlost eroze	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{E,TP:TP-1}$	... rychlost eroze na elementu E mezi časovými body TP a $TP-1$	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{TP:TP-1}$	... rychlost eroze mezi časovými body TP a $TP-1$	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{z,exp}$	... rychlost zpětné eroze – vyhodnocená z měření	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{z,min}$	... minimální rychlost zpětné eroze	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_z$	... rychlost zpětné eroze	[kg/s/m ²]
$\dot{\varepsilon}_{z,vyp}$	... rychlost zpětné eroze – vypočtená	[kg/s/m ²]
η	... Whitesova konstanta	[-]
ϑ	... sklon uložení vrstvy písku	[°]
κ	... propustnost materiálu ($\kappa = k\mu/\gamma_w$)	[m ²]
μ	... dynamická viskozita vody	[Pa.s]
ν	... Poissonova konstanta	[-]
ν_{cesta}	... Poissonova konstanta materiálu průsakové cesty	[-]
ν_{vzorek}	... Poissonova konstanta materiálu vzorku	[-]
ν_w	... kinematická viskozita vody	[m ² /s]
ρ'	... objemová hmotnost zeminy nadlehčené vodou	[kg/m ³]
ρ_{cesta}	... měrná hmotnost materiálu průsakové cesty	[kg/m ³]
ρ_{eroze}	... střední objemová hmotnost materiálu v přípravku pro sedimentaci	[kg/m ³]
$\rho_{vzorek,ef}$	... efektivní objemová hmotnost materiálu vzorku	[kg/m ³]
$\rho_{vzorek,tot}$	... celková měrná hmotnost materiálu vzorku	[kg/m ³]
ρ_V	... objemová hmotnost materiálu	[kg/m ³]
ρ_w	... hustota vody	[kg/m ³]
ρ_{zrn}	... měrná hmotnost zrn materiálu	[kg/m ³]
$\boldsymbol{\sigma}$	... tenzor napětí	[Pa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	... hlavní napětí	[Pa]

σ_h	... vektor hlavních napětí	[Pa]
σ_N	... maximální normálové napětí	[Pa]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	... normálová napětí v osách $x, y, a z$	[Pa]
τ	... tečné napětí vyvolané proudící vodou	[Pa]
τ_c	... kritické tečné napětí	[Pa]
τ_{max}	... maximální smykové napětí	[Pa]
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$	... smyková napětí	[Pa]
φ	... úhel vnitřního tření	[°]
φ'	... efektivní úhel vnitřního tření	[°]
Ω	... náhradní oblast	

12. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Rozdělení filtračních deformací (Říha et al., 2018)	2
Obr. 1.2 Typy sufoze (Bush a Luckner, 1973)	3
Obr. 1.3 Schéma vnitřní, vnější a kontaktní eroze (Bush a Luckner, 1973).....	4
Obr. 1.4 Schéma zpětné eroze a vývoje průsakové cesty (Sellmeijer, 2006)	4
Obr. 1.5 Příklad ztekucení/nadzvednutí povrchové vrstvy (Říha et al., 2020).....	5
Obr. 1.6 Fáze vývoje privilegované průsakové cesty (van Beek, 2015)	6
Obr. 2.1 Závislost kritického hydraulického gradientu dle van Beek (2015).....	12
Obr. 5.1 Mohrova kružnice a stanovení hlavních napětí (Beer a Russell Johnson, 1992) ..	22
Obr. 5.2 Elipsoid napjatosti (Kernstocková, 2007)	22
Obr. 5.3 Síly působící na čele privilegované průsakové cesty – rovinná schematizace	25
Obr. 5.4 Ilustrativní graf stanovení koeficientu eroze a kritického tečného napětí (Wan a Fell, 2002)	26
Obr. 5.5 Odvození tečného napětí působícího na stěny průsakové cesty	28
Obr. 6.1 Materiál Bzenec 0-2 mm (Hala, 2020)	30
Obr. 6.2 Skleněné kuličky: vlevo – 0,2 mm, vpravo – 0,5 mm (Hala, 2020).....	31
Obr. 6.3 Sušička.....	32
Obr. 6.4 Třepačka	32
Obr. 6.5 Digitální posuvné měřidlo	33
Obr. 6.6 Křivky zrnitosti písku Bzenec	34
Obr. 6.7 Křivky zrnitosti skleněných kuliček	35
Obr. 6.8 Stanovování měrné hmotnosti zrn (Hala, 2020).....	37
Obr. 6.9 Celkové schéma měřicího zařízení	39
Obr. 6.10 Skutečné provedení měřicího zařízení (bez napojení na hydraulický okruh)	40
Obr. 6.11 Tělo propustoměru a mřížka na jeho horní desce.....	40
Obr. 6.12 Čelní deska na nátok do zařízení	41
Obr. 6.13 Čelní deska na výtok ze zařízení	41
Obr. 6.14 Přípravek pro sedimentaci	42
Obr. 6.15 Hydraulický okruh v LVV VUT FAST)	43
Obr. 6.16 Zásobní nádrž v LVV VUT FAST	43
Obr. 6.17 Rozložené měřicí zařízení	44
Obr. 6.18 Podložka pod propustoměr	45
Obr. 6.19 Váha použitá při práci v laboratoři	45
Obr. 6.20 Rozložená sada sít a textilie.....	46
Obr. 6.21 Štěrka použitá pro zajištění rovnoměrného rozdělení proudu.....	46
Obr. 6.22 Kovová trubička použitá k vytvoření privilegované průsakové cesty.....	47
Obr. 6.23 Příprava propustoměru – část 1	48
Obr. 6.24 Příprava vzorku – sestavený propustoměr.....	49

Obr. 6.25 Připravené zařízení se vzorkem	51
Obr. 6.26 Senzory pro měření tlaků podél průsakové cesty a větších průtoků.....	53
Obr. 6.27 Připojení tlakových senzorů ke zdroji napětí a k A/D převodníku.....	54
Obr. 6.28 A/D převodník (nahore – přední strana, dole – zadní strana).....	54
Obr. 6.29 Válec pro měření větších průtoků.....	55
Obr. 6.30 Příklad průběhu piezometrických výšek a hydraulických gradientů podél vzorku – B_0-2_4	66
Obr. 6.31 Příklad průběhu hmotnosti erodovaného materiálu v čase – B_0-2_16.....	68
Obr. 6.32 Příklad tvarů privilegované průsakové cesty v čase – B_0-2_24.....	70
Obr. 6.33 Příklad průběhu rychlosti zpětného postupu čela průsakové cesty – B_0-2_6 ...	72
Obr. 6.34 Příklad rozdělení na zpětnou a boční erozi (B_0-2_24)	73
Obr. 6.35 Vztažné plochy pro výpočet rychlosti zpětné eroze (B_0-2_24)	75
Obr. 6.36 Příklad vypočtené rychlosti zpětné eroze podél průsakové cesty – B_0-2_23....	77
Obr. 6.37 Příklad rychlosti boční eroze podél průsakové cesty – B_0-2_23.....	77
Obr. 6.38 Znázornění zvyšování hydraulického gradientu při prodlužování průsakové cesty	79
Obr. 6.39 Střední kritické hydraulické gradienty v závislosti na pórovitosti materiálu	89
Obr. 6.40 Porovnání středního kritického hydraulického gradientu se vztahem dle Schmertmanna (2000).....	91
Obr. 6.41 Porovnání vypočteného středního hydraulického gradientu s ostatními autory..	92
Obr. 6.42 Porovnání středního kritického hydraulického gradientu s výpočty dle Sellmeijera (2011).....	92
Obr. 6.43 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na pórovitosti	95
Obr. 6.44 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{10}	96
Obr. 6.45 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{17}	96
Obr. 6.46 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{50}	97
Obr. 6.47 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na velikosti zrna d_{60}	97
Obr. 6.48 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na čísle nestejnzrnnosti	98
Obr. 6.49 Kritické hydraulické gradienty na čele průsakové cesty v závislosti na měrné hmotnosti zrn	99
Obr. 6.50 Závislost hydraulické vodivosti na pórovitosti materiálu.....	100
Obr. 6.51 Závislost kritického tečného napětí na pórovitosti materiálu.....	105

Obr. 6.52 Závislost koeficientu eroze na pórovitosti materiálu.....	105
Obr. 6.53 Závislost kritického středního hydraulického gradientu na pórovitosti	108
Obr. 6.54 Závislost kritického středního hydraulického gradientu na velikosti 50% zrna	109
Obr. 6.55 Zobrazení shody dat kritických středních gradientů dle vztahu a z experimentů	110
Obr. 6.56 Korelace rychlosti zpětné eroze a středního hydraulického gradientu	111
Obr. 6.57 Korelace rychlosti zpětné eroze a pórovitosti materiálu	111
Obr. 6.58 Korelace rychlosti eroze a velikosti 50% zrna	112
Obr. 6.59 Shoda dat vyhodnocených z měření a vypočtených novým vztahem – celkové měřítko	114
Obr. 6.60 Shoda dat vyhodnocených z měření a vypočtených novým vztahem – přiblížené na nízké hodnoty rychlostí eroze	115
Obr. 6.61 Počáteční stav v modelovém příkladu eroze privilegované průsakové cesty....	117
Obr. 6.62 Střední hydraulický gradient a rychlost zpětné eroze v čase – modelový příklad	120
Obr. 6.63 Vývoj délky průsakové cesty a hmotnosti erodovaného materiálu v čase – modelový příklad	121
Obr. 6.64 Tečné napětí a rychlost boční eroze v čase – modelový příklad	121
Obr. 6.65 Průměr průsakové cesty a hmotnost erodovaného materiálu v čase – modelový příklad	122
Obr. 6.66 Vývoj délky průsakové cesty a jejího průměru v čase – modelový příklad	122
Obr. 7.1 Tvar předdefinované průsakové cesty	125
Obr. 7.2 Vývojový diagram přípravy modelu (preprocessing).....	134
Obr. 7.3 Vývojový diagram řešení modelu.....	134
Obr. 7.4 Vývojový diagram zpracování výsledků modelu (postprocessing).....	135
Obr. 7.5 Průběh vertikálních napětí v testovací krychli zatížené vlastní tíhou suchého materiálu	140
Obr. 7.6 Průběh vertikálních napětí v testovací krychli zatížené vlastní tíhou materiálu pod vodou	140
Obr. 7.7 Detail řešených elementů.....	143
Obr. 7.8. Příklad počtu řešených vrstev	145
Obr. 7.9 Příklad umístění extrémních hodnot stupně stability a vypočet v navazujících vrstvách.....	146
Obr. 7.10 Geometrie vzorku a průsakové cesty	148
Obr. 7.11 Ořezová rovina průsakové cesty	150
Obr. 7.12 Výřez tělesa průsakové cesty ve vzorku.....	150
Obr. 7.13 Element použitý pro diskretizaci oblasti (ANSYS, 2011).....	151
Obr. 7.14 Nastavení velikosti elementů v modelu.....	151

Obr. 7.15 Použitá výpočtová síť	152
Obr. 7.16 Plochy pro zadání okrajových podmínek	154
Obr. 7.17 Časové řady okrajových podmínek pro experiment B_0-2_34	154
Obr. 7.18 Okrajové podmínky pro analýzu napjatosti	155
Obr. 7.19 Příklad průběhu piezometrických výšek v 1. sekundě simulace při špatně zadané počáteční podmínce	157
Obr. 7.20 Příklad průběhu hydraulických gradientů v 1. sekundě simulace při špatně zadané počáteční podmínce	157
Obr. 7.21 Umístění linie pro vynesení piezometrických výšek (ANSYS Workbench)	162
Obr. 7.22 Průběhy piezometrických výšek z experimentu a z numerického modelu	163
Obr. 7.23 Průběh piezometrických výšek na počátku simulace	164
Obr. 7.24 Průběh hydraulických gradientů na počátku simulace	165
Obr. 7.25 Průběhy normálových napětí v ose x na počátku simulace	166
Obr. 7.26 Průběhy normálových napětí v ose y na počátku simulace	167
Obr. 7.27 Průběhy normálových napětí v ose z na počátku simulace	168
Obr. 7.28 Průběh eroze dle kalibračního scénáře (modrá barva: písek; fialová barva: voda)	169

13. SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Střední kritické hydraulické gradienty dle koeficientu délky průsakové cesty	11
Tab. 2.2 Střední kritické hydraulické gradienty dle ostatních autorů (Perzmaier et al., 2007)	11
Tab. 2.3 Střední kritické hydraulické gradienty dle VNIIG (1976).....	11
Tab. 2.4 Střední kritický hydraulický gradient dle Robbinse et al. (2018).....	13
Tab. 2.5 Hodnoty koeficientů eroze a kritického tečného napětí (Wan a Fell, 2002)	13
Tab. 6.1 Plán experimentů	29
Tab. 6.2 Charakteristiky testovaných přírodních materiálů – všechna měření.....	34
Tab. 6.3 Průměrné charakteristiky testovaných přírodních materiálů	35
Tab. 6.4 Průměrné charakteristiky testovaných skleněných kuliček	35
Tab. 6.5 Měřené měrné hmotnosti zrn a jejich průměrné hodnoty.....	37
Tab. 6.6 Příklad zpracování časů a délek činností při experimentu	64
Tab. 6.7 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin pro stanovení pórovitosti materiálu	83
Tab. 6.8 Absolutní a relativní odchylky vypočtených veličin pro stanovení pórovitosti materiálu	83
Tab. 6.9 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin pro stanovení hydraulické vodivosti vzorku	84
Tab. 6.10 Absolutní a relativní odchylky vypočtených veličin pro stanovení hydraulické vodivosti vzorku.....	84
Tab. 6.11 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin a kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty	84
Tab. 6.12 Absolutní a relativní odchylky měřených veličin pro stanovení rychlosti eroze.....	85
Tab. 6.13 Absolutní a relativní odchylky vypočtených veličin pro stanovení rychlosti eroze.....	85
Tab. 6.14 Absolutní a relativní odchylky veličin pro stanovení středního hydraulického gradientu při zpětné erozi	86
Tab. 6.15 Absolutní a relativní odchylky veličin pro stanovení středního hydraulického gradientu při boční erozi	86
Tab. 6.16 Absolutní a relativní odchylky pomocných veličin a tečného napětí.....	87
Tab. 6.17 Souhrn absolutních a relativních odchylek vyhodnocovaných veličin	87
Tab. 6.18 Shrnutí stanovených kritických hydraulických gradientů	93
Tab. 6.19 Shrnutí hydraulických vodivostí stanovených numerickým modelem.....	101
Tab. 6.20 Definice modelového příkladu eroze privilegované průsakové cesty	118
Tab. 7.1 Charakteristiky testovacího scénáře	161

14. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Schéma složeného zařízení pro výzkum zpětné eroze
Příloha 2	Tělo propustoměru
Příloha 3	Čelní deska na nátok do zařízení a těsnění
Příloha 4	Čelní deska na výtoku ze zařízení
Příloha 5	Přípravek na sedimentaci
Příloha 6	Seznam provedených experimentů
Příloha 7	Průběhy piezometrických výšek a hydraulických gradientů
Příloha 8	Průběhy hmotností erodovaného materiálu v čase
Příloha 9	Průtoky vody měřené tlakovým senzorem
Příloha 10	Průběhy piezometrických výšek měřených senzory
Příloha 11	Tvary průsakové cesty v čase
Příloha 12	Rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty
Příloha 13	Rychlost zpětného postupu čela průsakové cesty – souhrny
Příloha 14	Rychlost zpětné a boční eroze podél průsakové cesty
Příloha 15	Algoritmus pro kalibraci hydraulické vodivosti
Příloha 16	Algoritmus modelového příkladu použití vztahu pro stanovení rychlosti zpětné eroze