



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Fyzikální model transportu v rozpukaném porézním prostředí

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011-90 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor práce: **Petr Antoni**

Vedoucí práce: Doc. Mgr. Jan Březina, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Fyzikální model transportu v rozpukaném porézním prostředí

Jméno a příjmení: **Petr Antoni**
Osobní číslo: M17000028
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy
Zadávací katedra: Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte měření hydraulické vodivosti kuliček 1- 1.3mm.
2. Sestavte experiment s ustáleným proudovým polem s přítokem regulovatelným od 0.5 – 3 litrů za minutu.
3. Pro bodový zdroj kontaminace nafilmujte transport až po výtok. Provedte porovnání záznamu vůči numerickému modelu.
4. Navrhněte model pro 3d tisk jako zjednodušenou realizaci puklinové zóny.
5. Provedte transportní experiment s instalovanou modelovou puklinou.
6. Porovnejte průběh transportu vůči numerickému modelu.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
30-40 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Berre, Inga, Florian Doster, and Eirik Keilegavlen. „Flow in Fractured Porous Media: A Review of Conceptual Models and Discretization Approaches.“ *Transport in Porous Media* 130, no. 1 (October 1, 2019): 215?36. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1171-6>.
- [2] Brown, S.R. „Fluid Flow through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness.“ *Journal of Geophysical Research* 92, no. B2 (1987): 1337/47. <https://doi.org/10.1029/JB092iB02p01337>.

Vedoucí práce:

doc. Mgr. Jan Březina, Ph.D.
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání práce:

9. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

18. května 2020

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Josef Novák, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 17. října 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. 6. 2020

Petr Antoni

Poděkování

Největší poděkování patří samozřejmě mému vedoucímu práce, který mi poskytl cenné rady při experimentech, numerických modelacích a psaní této práce. A dalším, jako Ing. Petru Parmovi, Ph.D., který se mnou provedl měření hydraulické vodivosti a Ing. Vratislavu Žabkovi, Ph.D., za poskytnutí právě různých velikostí skleněných kuliček pro měření a experimenty.

Fyzikální model transportu v rozpuhaném porézním prostředí

Abstrakt

Byl zprovozněn fyzikální model transportu kontaminantu v rozpuhaném porézním prostředí. Transport kontaminantu z úložiště radioaktivního materiálu skrze horninový masiv v řádu jednotek kilometrů trvá miliony let. Zde byl nahrazen transportem skrze lože skleněných kuliček o rozměru 800 mm v časech řádově jednotek minut. Byla provedena měření hydraulické vodivosti kuliček o různých průměrech. Jako realizace zjednodušené puklinové zóny v hornině byla na 3D tiskárně vytištěna puklina. Provedena byla dvě měření. První měření bylo bez pukliny se samotnými kuličkami a druhé s puklinou. Obě měření byla nafilmovaná a jsou srovnána s numerickým modelem.

Klíčová slova: Porézní prostředí, porozita, permeabilita, hydraulická vodivost, fyzikální model, numerický model

Physical model of fractured porous media

Abstract

A physical model of contaminant transport in a cracked porous media was put into operation. The transport of contaminants from the repository of radioactive material through the rock mass in the order of kilometers takes millions of years. Here it was replaced by transport through a bed of glass balls measuring 800 mm at times of the order of units of minutes. Measurements of the hydraulic conductivity of balls of different diameters were performed. As an implementation of a simplified fracture zone in the rock, a fracture was printed on a 3D printer. Two measurements were performed. The first measurement was without a fracture with the beads alone and the second with a fracture. Both measurements were filmed and are compared with a numerical model.

Keywords: Porous medium, porosity, permeability, hydraulic conductivity, physical model, numeric model

Obsah

1	Úvod	10
2	Porézní prostředí a související fyzikální veličiny	11
2.1	Porézní prostředí a porozita	11
2.2	Hydraulická vodivost	11
3	Měření a výpočty hydraulické vodivosti	14
3.1	Měření hydraulické vodivosti	14
3.2	Výpočty hydraulické vodivosti	15
3.3	Celková hydraulická vodivost i s chybou měření	16
3.4	Extrapolace vodivosti pro naše časy a rychlosti průtoku	18
4	Model a realizace akvária a pukliny pro simulaci	19
4.1	Model akvária	19
4.2	Finální návrh akvária	20
4.3	Model a realizace pukliny	20
4.4	Popis prvních experimentů a testů	21
4.5	Výsledky z předchozích měření a návrh pro následující experimenty	22
5	Experimenty s kuličkami o průměru jeden milimetr	23
5.1	Transportní experiment bez pukliny	23
5.2	Transportní experiment s puklinou	25
5.2.1	Měření s jednou puklinou	25
5.2.2	Měření se dvěma puklinami	27
5.3	Zpracování videa z měření	29
5.4	Měření porozity kuliček	29
6	Porovnání reálných experimentů s numerickým modelem	31
6.1	Porovnání chování transportu reálného a numerického modelu samotnými kuličkami	31
6.2	Porovnání chování transportu reálného a numerického modelu s puklinou	36
7	Závěr	41

Použitá literatura	42
Přílohy	43
A Příloha 1	43

Seznam obrázků

2.1	Orientační hodnoty pórovitosti	12
2.2	Orientační hodnoty hydraulické vodivosti	13
3.1	Aparatura pro měření hydraulické vodivosti	15
3.2	Graf závislosti změny tlaku na průtokové rychlosti	17
3.3	Závislost hydraulické vodivosti na druhé mocnině průměru kuliček	18
4.1	Popis modelu akvária	19
4.2	3D model realizované pukliny	20
4.3	Rozměry pukliny při pohledu shora	21
5.1	Fotografie akvária před experimentem. Vlevo je hadička přítoku, uprostřed žlutý čtverec, který naznačuje místo výtoku barviva a vpravo je odčerpávací hadička	24
5.2	Fotografie akvária s puklinou před experimentem	26
5.3	Fotografie pukliny, do které se vlivem tlaku dostaly kuličky a snížili tak vodivost pukliny	27
5.4	Dvě pukliny k sobě těsně sesazené pro větší odolnost	28
5.5	Zdeformovaná puklina vlivem tlaku kuliček, které se dostaly mezi lamely při měření	28
6.1	Porovnání fotografie a numerického modelu při nasycení kuliček. Na horní fotce je vidět nenasyčení kuliček u přítoku vody a téměř stejné nenasyčení vyšlo i v numerickém modelu na dolním obrázku	33
6.2	Na obrázcích je vidět jeden transport barviva kuličkami. Na snímcích je zviditelněna pouze jedna složka spektra pro zvýraznění barviva.	34
6.3	Na obrázcích je vidět jeden transport barviva kuličkami z numerického modelu. Čas transportu je stejný jako v reálném modelu	35
6.4	Na obrázcích je zobrazený postupný transport jednou puklinou. Je vidět ze sytosti barvy kontaminantu, že koncentrace před a za puklinou se mírně změnila	37
6.5	Na obrázcích je zobrazený postupný transport dvěma puklinami. Zde je již vidět výrazná změna sytosti barvy a posun kontaminantu při průchodu puklinami	38
6.6	Na obrázcích z numerického modelu je zobrazený postupný transport jednou puklinou	39

A.1	Fotografie akvária při zmenšeném objemu polystyrenem s 3mm kuličkami	43
A.2	Fotografie akvária při zmenšeném objemu polystyrenem s 400–600mm kuličkami	43
A.3	Numerický model objemu akvária zmenšený polystyrenem při experimentu se vzorkem kuliček o průměru 400–600 μm	45
A.4	Numerický model akvária, podle výsledků a předpokladů z předchozích měření	46

1 Úvod

Práce se zabývá velmi zjednodušeným modelem jaderného úložiště, kdy za několik tisíc let dojde k rozpadu kontejnerů s radioaktivním materiálem a ten se začne rozšiřovat do okolí. Rychlost, směr a čas šíření závisí na určitých vlastnostech prostředí. Provádím fyzikální model, který je náhradou za reálný. V tomto případě jde o změnu prostorového a časového měřítka. Popis prostředí, se kterým pracuji a je simulací horninového, se nazývá porézni. S porézním prostředím souvisí fyzikální veličiny jako je porozita n , hydraulická vodivost K , permeabilita k a další.

Za standardních podmínek v přírodě je radioaktivní odpad uložen v betonitu a hornině, tedy časy potřebné k uražení vzdálenosti 1 km jsou stovky tisíc let v tomto prostředí. V této práci nahrazuji horninové prostředí skleněnými kuličkami, abychom tyto časy zkrátily na dobu maximálně několika minut.

Na začátku práce, v kapitole (2), uvádím teoretický popis výše zmíněných fyzikálních veličin, základní vztahy a tabulky pro orientaci. V následující kapitole (3), pro zmíněné kuličky různých velikostí měřím závislost změny tlaku na průtokové rychlosti v koloně s kuličkami. Z této závislosti poté vypočítávám hydraulickou vodivost s chybou měření. Díky tomuto číslu jsem schopen v numerickém modelu měnit vodivost, tedy dobu transportu kontaminantu v akváriu, jakožto zjednodušeném modelu úložiště. V kapitole (4) je uveden návrh akvária, v němž simuluji šíření látek za pomoci průtoku vody a barviva jako indikátoru. Rovněž je zde uveden 3D model pukliny, která slouží jako nahrazení reálné puklinové zóny v hornině. Zkráceně jsou zde popsány první experimenty v akváriu s různými velikostmi kuliček.

V kapitole (5) jsem provedl experimenty s 1mm kuličkami, které vyšly jako nejlepší volba pro tento model. Provedl jsem v dvě měření, kdy v prvním je experiment se samotnými kuličkami a v druhém je experiment navíc s puklinou. Obě měření jsou zdokumentovaná na videu.

V poslední kapitole (6) jsem provedl nastavení numerického modelu a srovnání transportu kontaminantu s reálným modelem. Výstupem práce je zjištění hydraulické vodivosti kuliček, srovnání chování transportu reálného a numerického modelu, podněty a vylepšení pro příští měření.

2 Porézní prostředí a související fyzikální veličiny

V této kapitole jsou teoreticky vysvětleny fyzikální veličiny. Zejména to jsou hydraulická vodivost a porozita. Tyto parametry jsou dále klíčové pro experiment a numerické modelace.

2.1 Porézní prostředí a porozita

Porézní neboli pórovité prostředí je takové prostředí, které je tvořeno ze zrn, či vláken pevné látky, které jsou vzájemně propojeny póry. Tyto póry nebo pukliny tvoří volný prostor, který může být zaplněn tekutinou. Z hlediska proudění a transportu látek je důležité, jak jsou póry vzájemně propojeny mezi sebou. Při propojení je celý systém propustný pro plynné a kapalnou fázi, které ho společně vyplňují. Porozita (pórovitost) n je bezrozměrné číslo a udává množství pórů v materiálu, tedy jaké množství materiálu je tvořeno plynem, či kapalinou. Číslo nabývá hodnot 0–1, případně v procentech 0–100. Čím je toto číslo větší, tím větší je porozita, tedy prostředí se stává více porézní. Porozitu můžeme vypočítat dle vzorce

$$n = \frac{V_p}{V_c}, \quad (2.1)$$

kde V_p je objem pórů v prostoru a V_c je celkový objem prostředí. Prostředí dobře propustné má obvykle porozitu 0,2 až 0,4. Porozita slabě propustné horniny nabývá hodnot 0,05 až 0,2. Tyto hodnoty se nejčastěji určují v laboratořích ze vzorků materiálu. Hodnota porozity stejně velkých, dokonale hladkých skleněných kuliček je od 0.359 do 0.375. Příklady pórovitosti různých materiálů (viz Obrázek 2.1), kde v našem případě můžeme brát materiál písek hrubý, jako naše kuličky. [1][2].

2.2 Hydraulická vodivost

Hydraulickou vodivost K [m/s] můžeme dále pod stejným významem pojmenovat i jako koeficient filtrace nebo filtrační koeficient. Říká nám, jakou rychlostí protéká tekutina porézním prostředím. Je nejvíce závislá na hustotě kapaliny, propustnosti

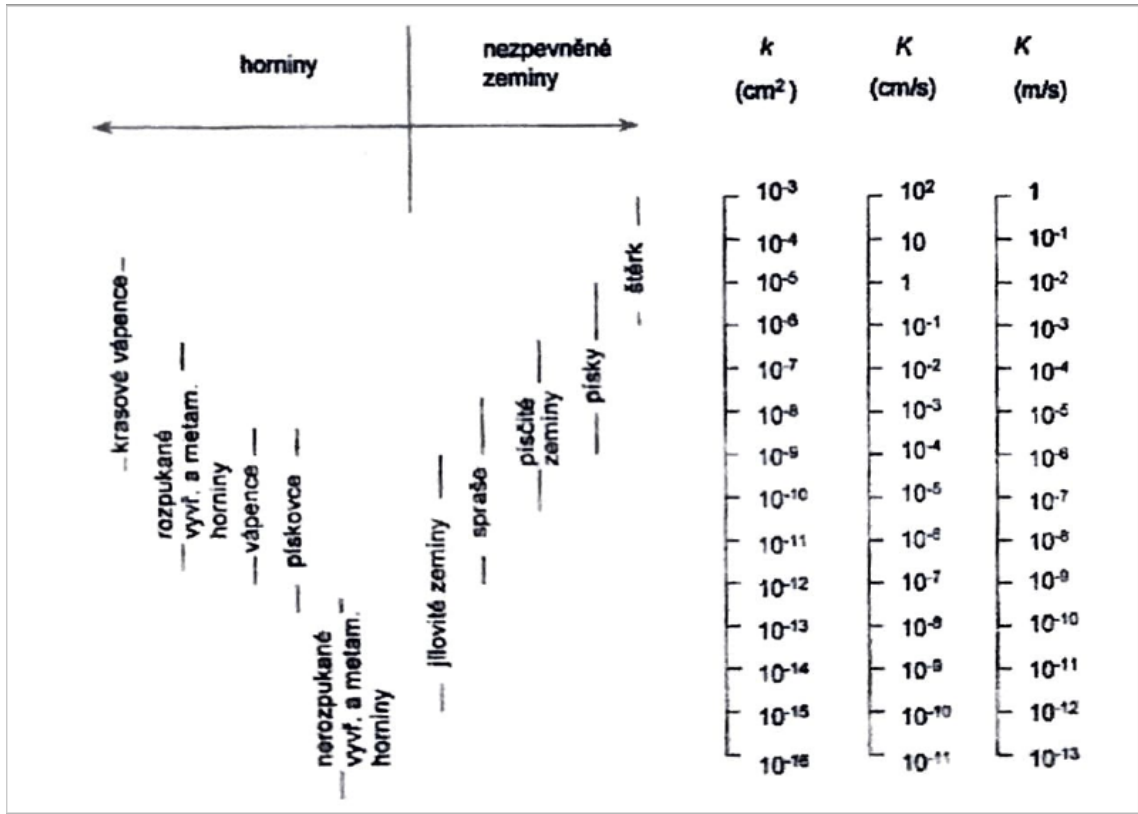
a dynamické viskozitě (tabulková hodnota). Propustnost neboli permeabilita k [m²], je veličina, která závisí na geometrii a vlastnostech povrchu pevné fáze a vyjadřuje schopnost pórovitého prostředí propouštět tekuté fáze. Z hlediska proudění a transportu látek je propustnost jedním z nejdůležitějších parametrů. Možností, jak vypočítat hydraulickou vodivost je mnoho, ale základní vzorec je

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}, \quad (2.2)$$

kde μ je dynamická viskozita [kg/m/s], v tabulkách však častěji [Pa · s] a ρ [kg/m³] je hustota. Dalším vzorcem používaným k našim výpočtům je Carman-Kozenyho vztah $k = A\epsilon d^2$. V této rovnici je ϵ porozita prostředí, d je průměr kuliček a A je faktor proporcionality prostředí závislý na porozitě, která je u našich kuliček konstantní. Příklady hydraulické vodivosti různých druhů materiálů, jsou na obrázku (2.2). [1][2][4].

Materiál	Pórovitost (%)
štěrk hrubý	24-36
štěrk jemný	25-38
písek hrubý	31-46
písek jemný	26-53
prach	34-61
jíl	34-60
pískovec	5-30
prachovec	21-41
vápenec, dolomit	0-20
krasový vápenec	5-50
rozpukané krystalinikum	0-10
nerozpukané krystalinikum	0-5
zvětralá žula	34-57
zvětralé gabro	42-45

Obrázek 2.1: Orientační hodnoty pórovitosti



Obrázek 2.2: Orientační hodnoty hydraulické vodivosti

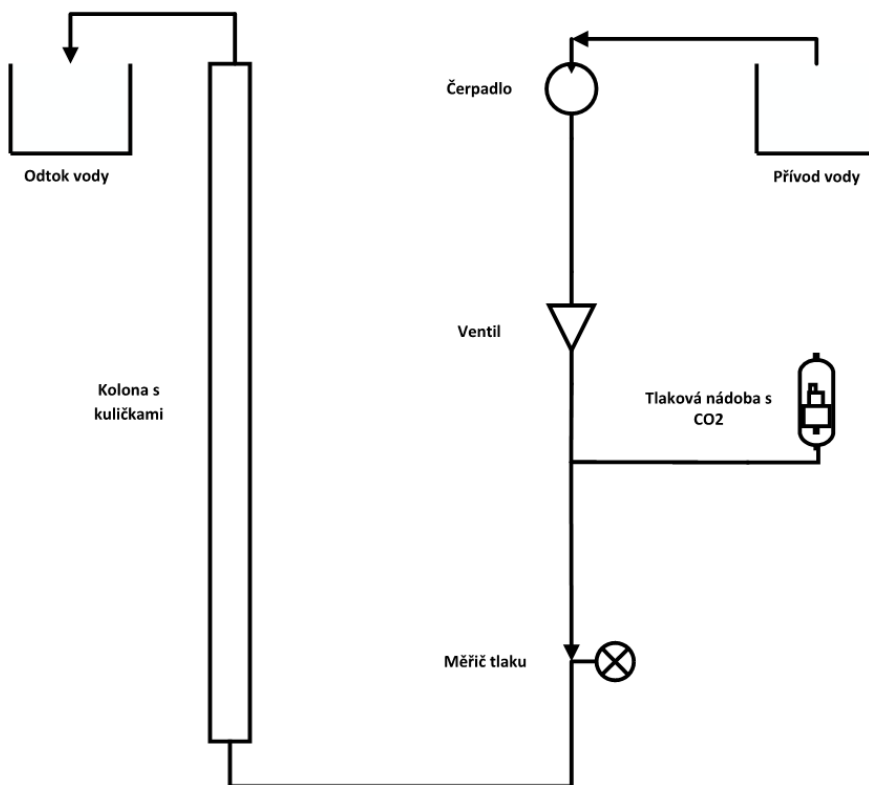
3 Měření a výpočty hydraulické vodivosti

Pro náš experiment jsme zvolili jako simulaci horniny skleněné kuličky, protože díky konstantnímu průměru mají přesně definovanou hydraulickou vodivost, která je tím pádem velmi přesně stejná v celém objemu. Pro rozsah průměrů jako v našem případě to již tak striktně neplatí, ale volbou průměru kuliček je možno přímo vodivost ovlivnit. Je tedy možné dosáhnout dobré shody s numerickým modelem, protože známe přesné parametry modelu. Změřili jsme hydraulickou vodivost u 5 různých průměrů kuliček. V prvním měření jsme změřili rozměry 100–200 μm , 200–300 μm , 400–600 μm a 2 mm. V druhém měření proběhlo doměření kuliček o průměru 1 mm. Měření proběhlo, abychom byli schopni zvolit správný rozměr kuliček pro naši simulaci. V simulaci chceme, aby celkový průtok vody a barviva kuličkami trval jen několik málo minut, což je závislé právě na vodivosti.

3.1 Měření hydraulické vodivosti

Pro měření hydraulické vodivosti jsme použili 1 metr dlouhou kolonu z plexiskla s vnitřním průměrem 14 mm. Tomu odpovídá celkový objem válce 154 cm^3 . Poté jsme sestavili měřící aparaturu. Kolonu jsme uzavřeli z obou stran zátkou s vývodem a horní vývod jsme umístili do nádoby, kam odtékala přebytečná voda. Zespodu kolony byl přívod vody, a aby nedocházelo k propadávání kuliček o jemné zrnitosti do přívodní hadičky, tak naspod kolony byly nasypány větší kamínky o velikosti 2–4 mm, které mají pouze zanedbatelný vliv na měření. Nyní jsme do kolony umístili měřený vzorek jemných skleněných kuliček, které jsme poklepáním na stěny kolony trochu zhutnili, aby nedošlo po zavodnění k velkému propadu a úbytku vzorku v důsledku zhutnění vlivem vody. Na vršek kolony jsme opět přidali kamínky, aby vlivem vyšších průtokových rychlostí, tedy i tlaku, naopak vzorek neunikal pryč do výpusti. Po tomto procesu jsme změřili délku lože, tedy výšku samotného vzorku v koloně. Nyní jsme do aparatury pustili přívod CO_2 , abychom z pórů vzorku vyhnali veškerý O_2 . Oxid uhličitý se následně po zavodnění rozpouští lépe. Nejdříve jsme otevřeli přívod CO_2 do aparatury, tlak do aparatury jsme stanovili dle zrnitosti kuliček. Tlak se pohyboval od 30 do 220 mBar. Vývod z aparatury byl ponořen ve výpustné nádobě s vodou, aby se po vypnutí přívodu CO_2 do vzorku nevrátil kyslík. Po vypnutí přívodu CO_2 jsme kolonu zavodnili až do výpusti. Rychlost zavodňování byla mezi 10–20 ml/min. Tlak při zavodňování rostl lineárně s výškou sloupce, dle předpokladu. Při plném zavodnění jsme peristaltické čerpadlo vypnuli

a nechali tlak ustálit při nulové průtokové rychlosti (tlak odpovídá hydrostatickému tlaku soustavy). Poté jsme změřili závislost tlaku na rychlosti proudění, proměřovali jsme hodnoty od 0 do 43,5 ml/min. Větší průtokovou rychlost nám čerpadlo při daném průměru přívodního vedení neumožnilo. Pro odečítání hodnot tlaku v soustavě jsme používali tlakoměr připojený k počítači a v programu se nám zobrazovaly hodnoty i průběh grafu tlaku.



Obrázek 3.1: Aparatura pro měření hydraulické vodivosti

3.2 Výpočty hydraulické vodivosti

Rychlosti průtoku v_0 a tlaky P_0 jsme dle výše popsaného měření měřili v ml/min a v mBar. Tyto hodnoty jsme museli přepočítat na m/s a Pa, kvůli následným výpočtům vodivosti. Ml/min na m/s jsme přepočítali, dle vztahu

$$v = \frac{v_0 10^{-6}}{60S}, \quad (3.1)$$

kde v_0 je rychlost v ml/min a S [m²] je průřez kolony. Tlak z mBar na Pa, se pak přepočítá pouhým vynásobením stem.

Využitím Darcyho zákona vypočítáme přírůstek tlakové výšky ΔP .

$$\Delta P = \frac{P_0 100}{\rho g l}, \quad (3.2)$$

kde je P_0 tlak v mBar, ρ hustota vody, g tíhové zrychlení, l je délka lože a P je tlak. Pro samotný výpočet vodivosti jsme použili vztah 3.3, kde v je průtočná rychlost a ΔP dosadíme ze vztahu 3.2

$$K = v \Delta P \quad (3.3)$$

3.3 Celková hydraulická vodivost i s chybou měření

Na naměřená data (viz. příloha A) jsme dále aplikovali lineární regresi pro závislost tlaku na rychlosti, abychom byli schopni určit celkovou hydraulickou vodivost, včetně její chyby měření. Chyby měření jsme počítali pomocí lineární regrese. [3] Platí, že $Y = \beta X$, kde $Y = \Delta P$, $X = v$ a $\beta = 1/k$, tedy dále počítáme:

$$\frac{1}{\hat{k}} = \beta = \frac{\sum_{i=1}^n v \Delta P}{\sum_{i=1}^n v^2} \quad (3.4)$$

Dále vypočítáme směrodatnou odchylku směrnice β podle,

$$\Delta \beta = \sqrt{\frac{s^2}{\sum_{i=1}^n (v^2 - \bar{v})^2}}, \quad (3.5)$$

kde s^2 je

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P - \beta v^2}{N - 1} \quad (3.6)$$

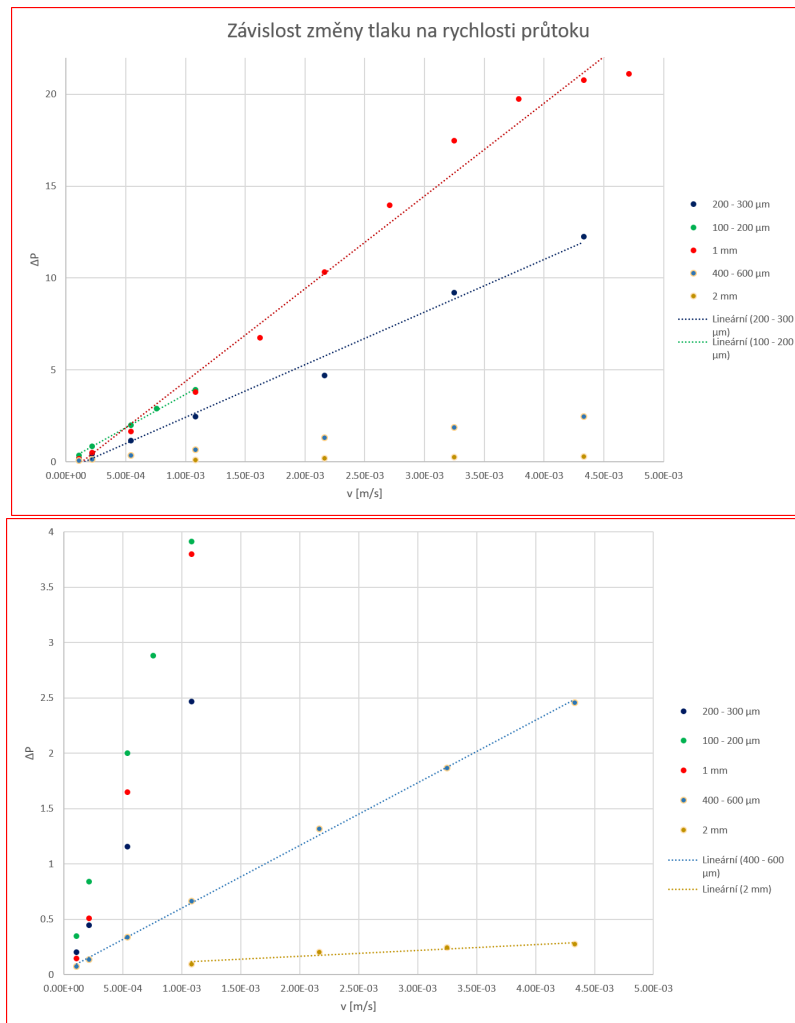
Vztah (3.9) je konečným vzorcem pro výpočet chyby měření.

$$K = 1/\beta = 1/(\beta_0 \pm \Delta \beta) \approx 1/\beta_0 \pm \Delta \beta / \beta_0^2 \quad (3.7)$$

Takto vyšla celková hydraulická vodivost i s odchylkou (viz Tabulka 3.1)

Tabulka 3.1: Tabulka hodnot hydraulické vodivosti s vypočtenou chybou, kde kuličky rozměru $1000\ \mu\text{m}$ byly doměřovány samostatně

Vzorek [μm]	K [m/s]
100–200	$(2,718 \pm 0,065) \times 10^{-4}$
200–300	$(3,675 \pm 0,204) \times 10^{-4}$
400–600	$(1,734 \pm 0,029) \times 10^{-3}$
1000	$(2,060 \pm 0,094) \times 10^{-4}$
2000	$(1,401 \pm 0,286) \times 10^{-2}$



Obrázek 3.2: **Nahoře:** Při druhém měření, kdy byly doměřovány 1mm kuličky došlo k systematické chybě měření. Vychází, že mají podobnou hodnotu vodivosti jako ty nejmenší vzorky, což je nesmysl. Vzorek $100-200\ \mu\text{m}$ přestal brzy zvládat propouštět objemový tok z čerpadla a došlo k ucpání kolony. **Dole:** Nejméně výrazné je stoupání průběhu hodnot kuliček o průměru 2 mm, protože mají velkou vodivost, tedy nejméně reagovali na změnu průtokové rychlosti.

3.4 Extrapolace vodivosti pro naše časy a rychlosti průtoku

Protože měření kuliček o průměru 1 mm bylo chybné (viz 3.2), museli jsme provést extrapolaci hydraulické vodivosti pomocí Carman-Kozenyho vztahu uvedeného zde (2.2).

Extrapolaci jsme provedli přesně podle vztahu, tedy vynesli jsme závislost hydraulické vodivosti na druhé mocnině průměru kuliček. Do grafu není zahrnuto měření 1mm kuliček kvůli chybě, která by zkreslila extrapolovanou hodnotu.



Obrázek 3.3: Závislost hydraulické vodivosti na druhé mocnině průměru kuliček

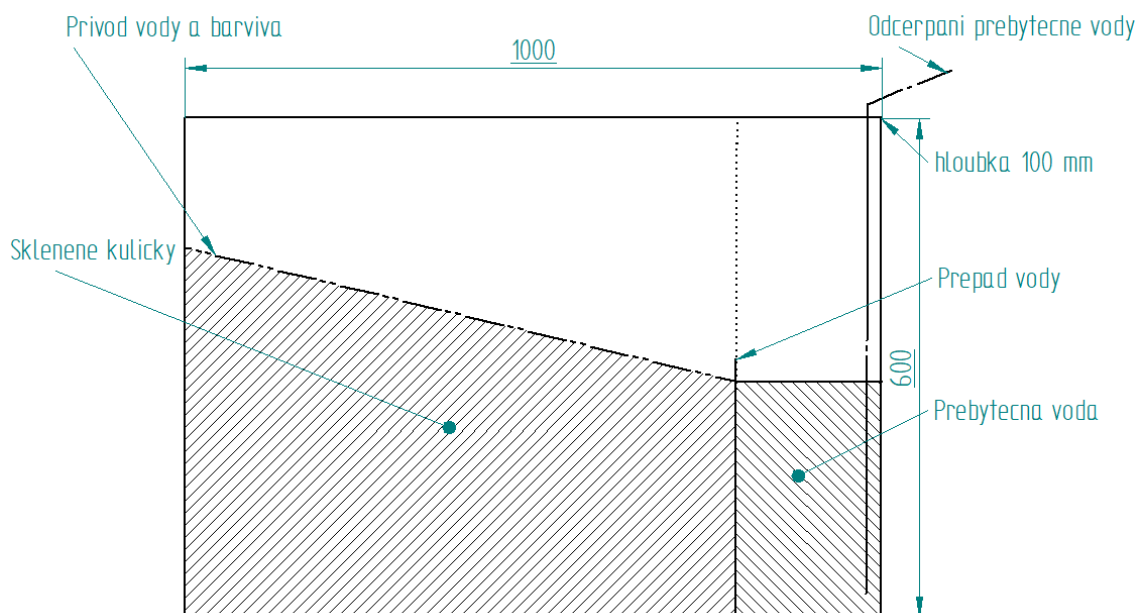
Ze závislosti je vidět, že předpokládaná hodnota vodivosti bude okolo 4×10^{-3} m/s. Tuto hodnotu nemůžeme brát jako naprosto přesnou, spíše se bude vodivost okolo této hodnoty pohybovat. Tento předpoklad ověříme v kapitole (6), kde budeme hodnotu vodivosti korigovat v numerickém modelu, aby se nám časy transportu mezi reálným a numerickým modelem shodovali.

4 Model a realizace akvária a pukliny pro simulaci

Vytvořili jsme model akvária a pukliny a oboje jsme následně realizovali. Proběhlo několik prvních experimentů s různými průměry kuliček, kde jako nejlepší ze závěru bakalářského projektu vychází průměr kuliček 1 mm.

4.1 Model akvária

Jako materiál pro akvárium jsme zvolili plně transparentní plexisklo lepené z jednotlivých desek dimenzované tak, aby lepené spoje a samotné stěny vydržely tlak vody a skleněných kuliček o hmotnosti přibližně 130 kg. Akvárium je rozděleno do dvou částí, v jedné z nich jsou nasypány kuličky do svahu a dle popisu na obrázku (Obrázek 4.1) jsou zavlažovány z čerpadla hadičkou. Druhá část je od první oddělena přepadem vody, kam přebytečná voda odtéká a je odčerpávána do odpadní nádoby.



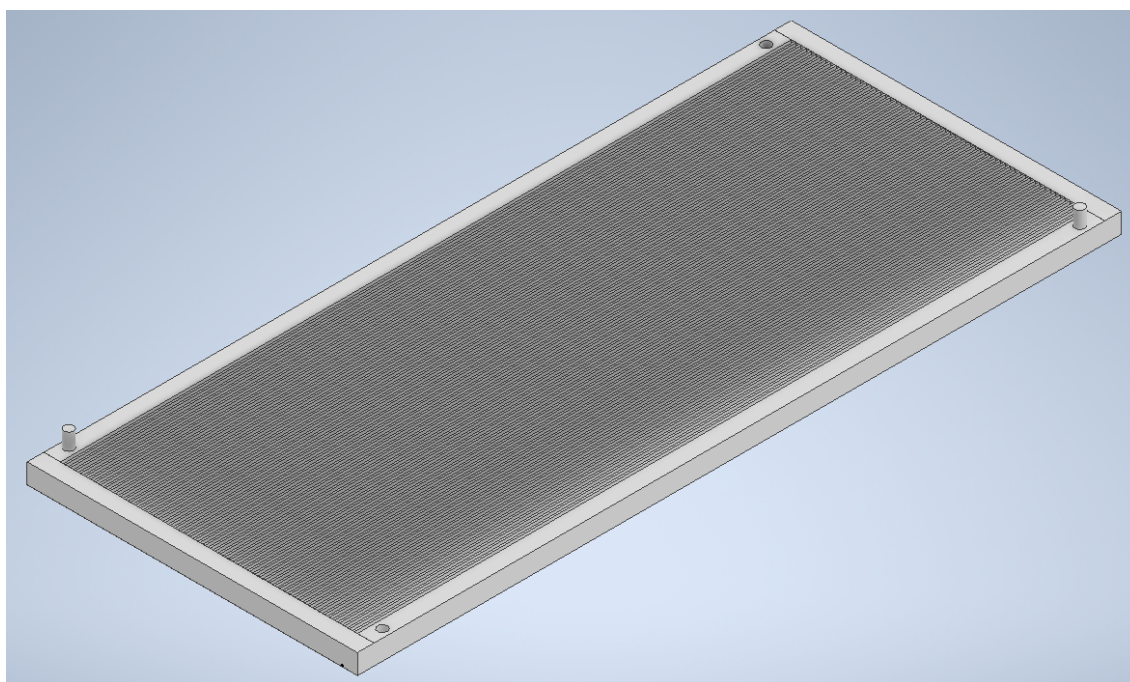
Obrázek 4.1: Popis modelu akvaria

4.2 Finální návrh akvária

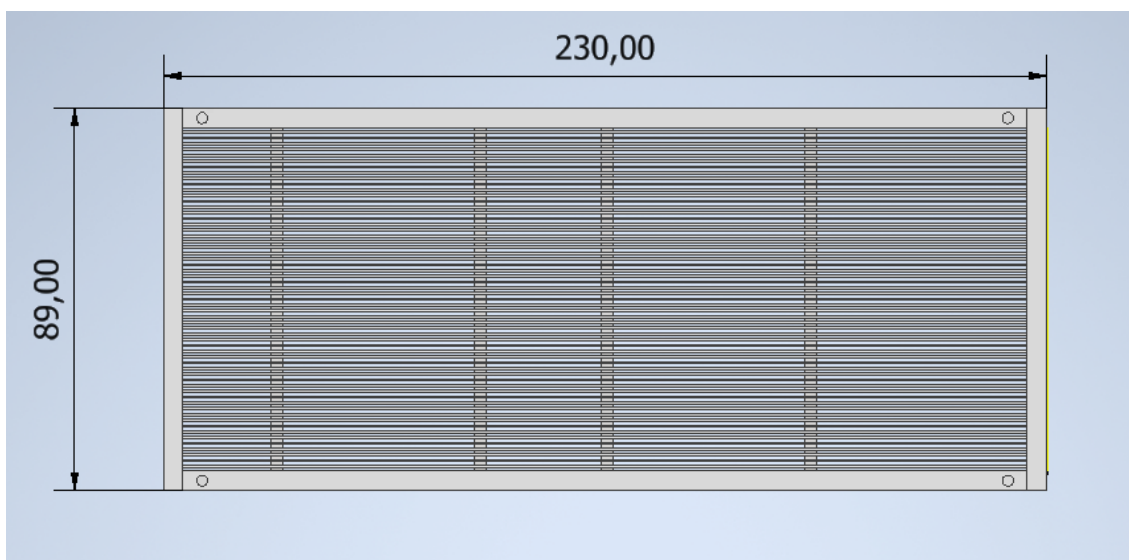
Finální vnější rozměry akvária jsou trochu upravené na rozměry 1020 x 610 x 130 mm a vnitřní rozměry jsou 980 x 590 x 90 mm, tedy síla stěny je 20 mm. Nejprve jsme pro experimenty používali pouze část z celého objemu akvária, který jsme zmenšili pomocí polystyrenu, abychom si nejprve s menším počtem kuliček mohli vyzkoušet funkčnost celého návrhu. Celý návrh je vhodný pro prezentaci studentům a veřejnosti. Ukazuje, jak dochází k pohybům látek v porézním, tedy v horninovém prostředí. Nevýhodou je pouze hmotnost celého akvária. Samotné akvárium váží okolo 25 kg a společně s plným objemem kuliček a vody bude vážit okolo 155 kg.

4.3 Model a realizace pukliny

Dalším krokem bylo vytvoření návrhu, jak by mohla vypadat puklina. Puklina má simulovat prasklinu nebo dutinu v hornině. Tato puklina by měla změnit parametry šíření kontaminantu prostředím, jako je rychlost a směr šíření. Výstupem měření s puklinou by měl být opět numerický model, který porovnáme s fyzickým modelem a zjistíme skutečný vliv pukliny na šíření barviva. Jako realizaci jsme zvolili plastovou puklinu vytištěnou na 3D tiskárně. Model jsem vytvořil v programu Inventor od Autodesku. Model pukliny je vyobrazen níže.



Obrázek 4.2: 3D model realizované pukliny



Obrázek 4.3: Rozměry pukliny při pohledu shora

Na obrázku 4.3 můžeme vidět rozměry puklin, které jsou 230 mm výška a 89 mm šířka. Výška má tyto rozměry, protože se diagonálně ponoří do kuliček pod sklonem přibližně 30°. Na šířku se vejde přesně do akvária. Je složena z jednotlivých lamel, které jsou 0,6 mm silné a rozestup mezi nimi je 0,9 mm, aby mezi ně nevnikaly kuličky. Zespodu jsou výztuže, aby měla větší pevnost a vydržela tlak kuliček a vody v akváriu. Na horní straně jsou čepy a můžou být případně sesazeny dvě do sebe pro větší pevnost, kdyby bylo potřeba. Abychom měli jistotu, že puklina má řádově větší hydraulickou vodivost, než mají kuličky, a tudíž bude splňovat svůj účel, udělali jsme rychlý test průtoku. V prvním případě jsme kolmo k puklině dali trubku a naplnili ji 1 mm kuličkami do výšky 15 cm, přes které jsme čerpali vodu a pozorovali, při jaké průtokové rychlosti se začne zvyšovat hladina v trubce a nestihne odtékat. Již při průtokové rychlosti 0,25 l/min voda nestíhala proudit přes kuličky a puklinu a hladina se rychle zvyšovala. Druhý test byl s trubkou bez kuliček a ani při průtokové rychlosti 12 l/min se hladina nezvedla a stačila bez problémů odtékat skrz. Tím jsme dokázali, že puklina má skutečně několikanásobně větší vodivost, než kuličky a splňuje tedy naše požadavky.

4.4 Popis prvních experimentů a testů

Pomocí polystyrenu jsme si zmenšili objem akvária pro vyzkoušení simulace s 3mm kuličkami. Testovali jsme viditelnost použitého barviva, kterým byl Fluorescein, ale hlavně rychlost průtoku vody a barviva kuličkami. Při pokusu s 3mm kuličkami jsme zjistili, že hydraulická vodivost, tedy průtočná rychlost vody kuličkami je moc velká a barvivo tudíž velmi rychle prošlo přes kuličky, aniž by jakékoliv zůstaly nenasyčené a barvivo ihned kleslo ke dnu. Fotografie akvária s kuličkami můžeme vidět

na obrázku (A.1). Poté jsme testovali vzorek 400–600 μm a ten se již svou vodivostí a tudíž časem, který je potřebný k nasycení vzorku přiblížil k našemu žádanému. Měřili jsme, jaká je hodnota rovnovážného toku pro tyto kuličky a tedy toku, který téměř kompletně nasytí veškerý objem kuliček, viz A.2 Při pohledu na obrázek (A.3) můžeme vidět numerický model akvária, při měření s 400–600 μm , a jak by mělo vypadat proudění vody a barviva skrz skleněné kuličky. Čáry naznačují proudění zleva doprava, přičemž přívod vody je v levém horním rohu. Modré trojúhelníky na vrchní části spádu značí ne zcela nasycené prostředí, což můžeme vidět i na obrázku (A.2). Zbytek akvária je plně nasycen a samozřejmě s rostoucí hloubkou nasycených kuliček roste tlak, který je zobrazen na stupnici tlaku vlevo. Ovšem problém u této zrnitosti kuliček byl, že při tomto úhlu svahu se po nasycení začal úhel zmenšovat a kuličky pomalu odtékaly společně s vodou přepadem. Při této zrnitosti kuliček by dle výpočtů musel být sklon velmi malý, aby nedocházelo k odtoku vzorku.

4.5 Výsledky z předchozích měření a návrh pro následující experimenty

Pro další experiment nám vyšel nejlépe podle numerického modelu (A.4) a výpočtů průměr skleněných kuliček 1 mm při výšce svahu 100 mm a délce celého vzorku 850 mm. Hydraulická vodivost u tohoto průměru kuliček vychází na 4×10^{-3} m/s, tomu by měl odpovídat objemový tok 0,659 l/min, který zapříčiní rovnovážné proudění. Čas, kdy začne a přestane vytékat podstatná koncentrace barviva, by měl být přibližně mezi 2–4 minutami. Tento závěr plyne z bakalářského projektu a hypotéza je ověřována v následujících kapitolách (5) a (6).

5 Experimenty s kuličkami o průměru jeden milimetr

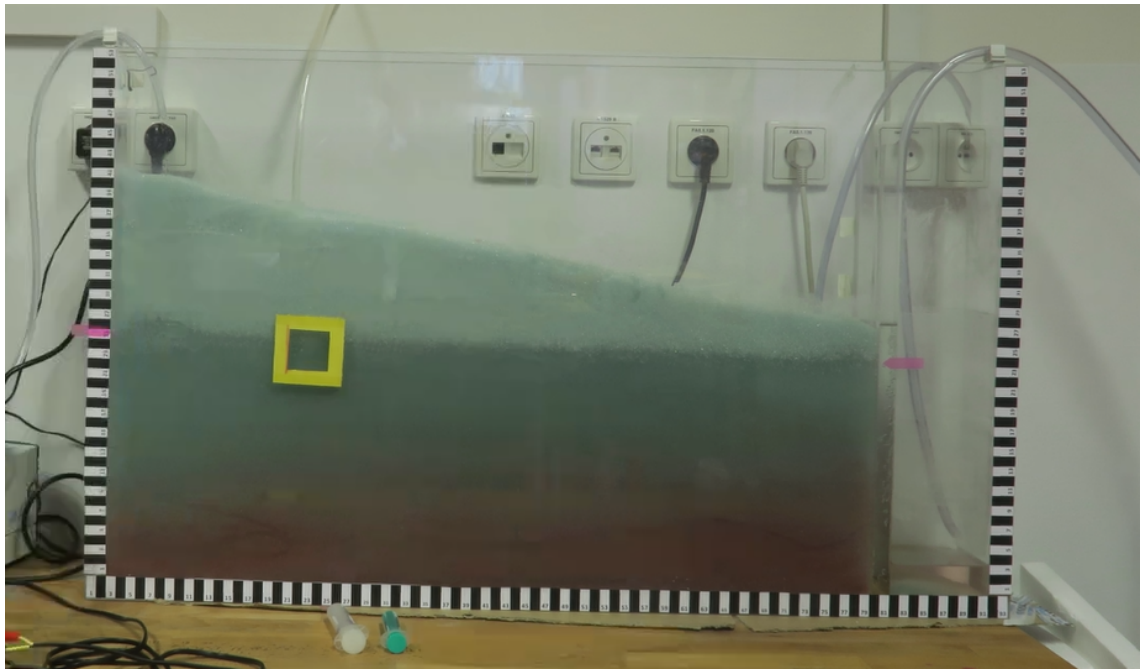
Provedli jsme experimenty s transportem barviva kuličkami o průměru 1 mm. V prvním experimentu jsme měřili transport samotnými kuličkami a ve druhém jsme do lože kuliček vložili puklinu. Obě měření byla nahrávána a poté skriptem zpracována po pozdější analýzu a porovnání s numerickým modelem. Byla změřena porozita kuliček, abychom měli tuto hodnotu přesně a mohli jí použít při nastavení numerického modelu.

5.1 Transportní experiment bez pukliny

V prvním experimentu jsme provedli měření bez pukliny, pouze se samotnými kuličkami, abychom měli následně porovnání, jak se průtok barviva chová bez a s puklinou. Z předchozích měření vyšel nejlépe pro naše potřeby rozměr skleněných kuliček 1 mm při určitých parametrech, jako je rozmístění kuliček v akváriu a objemový tok vody z čerpadla. Experimenty s těmito kuličkami jsme již nafilmovali a přesně zdokumentovali, pro porovnání s numerickým modelem.

Pro čerpání vody do akvária jsme v předchozích případech používali peristaltické čerpadlo, ovšem to nám nyní svým výkonem na přísun vody nestačilo. Potřebovali jsme, aby při čerpání došlo k velkému nasycení kuliček, tedy aby se hladila zvedla u přítoku alespoň o několik centimetrů. Použili jsme 12V čerpadlo, které jsme řídili napětím na zdroji, pro náš požadovaný tok. Přítok čerpadla jsme nastavili na 1,60 l/min. Stejně čerpadlo jsme použili i pro odčerpávání vody z přepadu.

Jako barvivo jsme nepoužili fluorescein jako v předchozích měřeních, protože je nejlépe vidět pod UV zářením a museli bychom řešit zatemnění místnosti a speciální nasvícení akvária. Rozhodli jsme se pro potravinářské barvivo, které je velmi dobře rozpustitelné ve vodě a výborně vidět. Použili jsme červené barvivo, přesněji barvivo E122, ve kterém je jako nosič barviva E514. Velmi dobře se rozpustilo a vytvořilo nasycený roztok, který jsme použili při experimentech. Nasycený roztok tvořil 10 g barviva na 200 ml vody. Barvivo jsme dávkovali pomocí 20ml injekční stříkačky do hadičky, která vedla přímo do kuliček (5.1). Výška svahu kuliček byla 130 mm a délka vzorku 820 mm.



Obrázek 5.1: Fotografie akvária před experimentem. Vlevo je hadička přítoku, uprostřed žlutý čtverec, který naznačuje místo výtoku barviva a vpravo je odčerpávací hadička

Po přípravě a nastavení experimentu jsme spustili čerpadlo a začali čerpat vodu do akvária. Během několika málo sekund došlo k nasycení kuliček a tím k ustálenému průtoku vody akváriem. Pro indikaci, jak se změnila výška hladiny, jsme použili barevné štítky pro označení výšky na stupnici (Na obrázku po pravé i levé straně akvária 6.1). Růžový štítek naznačuje počáteční hladinu před začátkem čerpání vody, tedy 24 cm. Žlutý štítek značí výšku hladiny při nasycení kuliček, která je 37 cm.

Při nasycení většinového objemu akvária došlo na dávkování barviva. Nejdříve jsme zkusili různé objemy barviva, které jsme injekční stříkačkou dávkovali do hadičky a pozorovali, jak je v akváriu viditelné při transportu a zda se nerozptýlí dříve, než dorazí k odtoku. Nejlépe vyšel objem injektovaného barviva 20 ml. Po těchto objemech jsme provedli několik testovacích transportů barviva kuličkami.

Po ověření správného nastavení experimentu došlo na ostrý test. Zapnuli jsme kameru v režimu časosběr, aby každých 15 sekund kamera zaznamenala snímek. Barvivo jsme začali do akvária dávkovat v různých časových intervalech. Nejprve jsme zkusili, aby barvivo celé prošlo akváriem až do výpusti a tím zjistili, jak dlouho trvá jeden transport. Další pokusy byly vypustit barvivo v rychlejším sledu, aby v akváriu bylo více kontaminantu najednou a pozorovali jsme, zda se smísí mezi sebou a jak se bude dál průtok chovat. Celkově jsme provedli sedm transportů v různých časových

intervalech. Doba transportu jednotlivých dávek barviva byla vždy 300–315 sekund.

5.2 Transportní experiment s puklinou

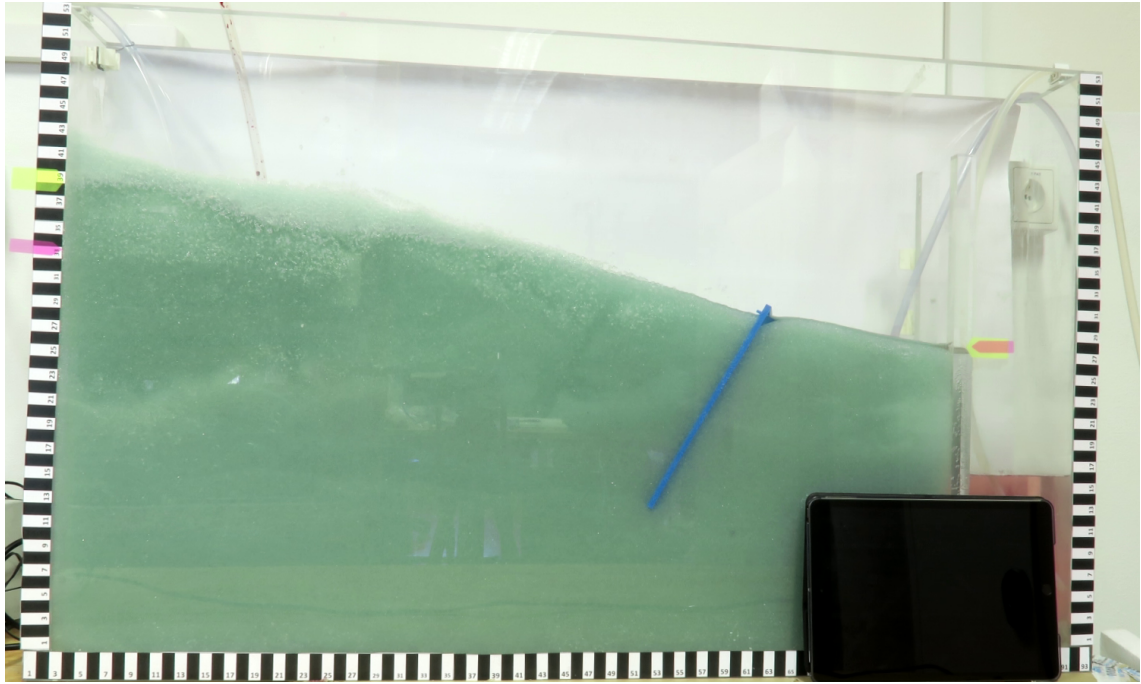
Nastavení experimentu bylo téměř totožné s tím prvním. Opět jsme provedli záznam na kameru ve formě časosběru. Odlišná byla hodnota přítoku čerpadla, která zde byla 1,66 l/min. Ostatní parametry jako výška svahu kuliček a délka vzorku byly shodné s prvním měřením. Opět jsme si barevnými štítky naznačili výšky hladin před a při čerpání vody. Počáteční hladina byla ve výšce 33 cm a při nasycení se zvedla na 39 cm.

Na začátku jsme nejprve provedli transporty bez pukliny, abychom si ověřili, že podmínky v akváriu je nijak nezměnily. Ověřili jsme si čas a tvar transportu, který byl totožný.

Dále se experiment dělí na dvě části. V té první se prováděly experimenty s jednou puklinou a té druhé jsme k té jedné paralelně přidali ještě druhou puklinu pro zvýšení efektu. Chceme, aby puklina vytvořila prostor s daleko vyšší vodivostí, než mají kuličky. Předpoklad je, že větší část barviva projde lamelami podélně vnitřkem pukliny a menší část projde puklinou do odtoku.

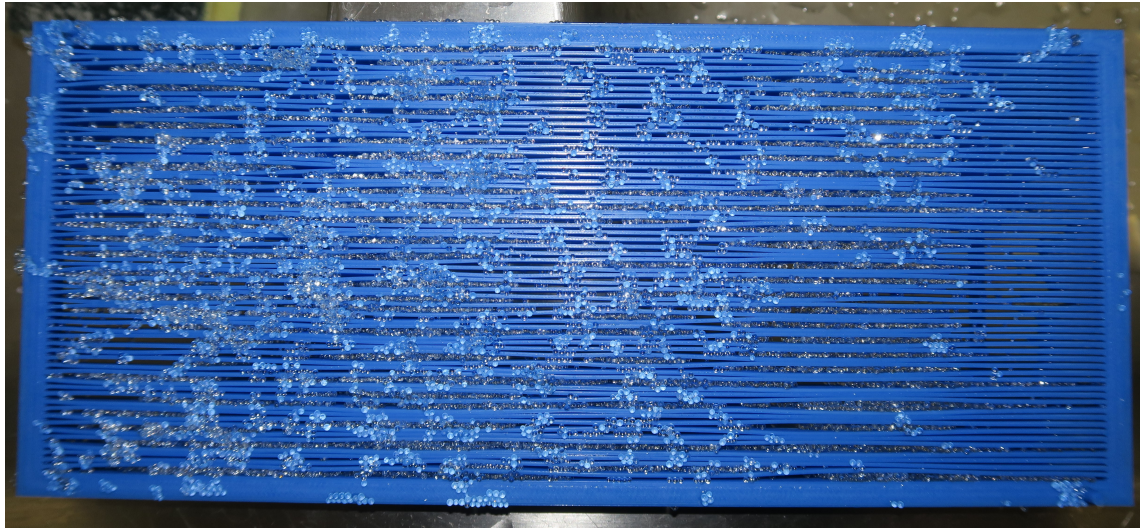
5.2.1 Měření s jednou puklinou

Puklinu jsme do akvária vložili pod úhlem 30°. Při měření s jednou puklinou jsme opět provedli několik transportů kontaminantu, který byl injektovaný do hadičky, jako v předchozím experimentu.



Obrázek 5.2: Fotografie akvária s puklinou před experimentem

Po těchto měřeních jsme puklinu vyjmuli, abychom zkontrolovali její stav. Bohužel vlivem tlaku se i přes těsné lamely a výztuže do pukliny dostaly kuličky. Tím se snížila vodivost pukliny a neplnila tak svůj předpokládaný účel dostatečně (viz 5.3). Část barviva sice putovala podél lamel pukliny, ale stále majoritní část objemu barviva prošla puklinou bez větších změn.

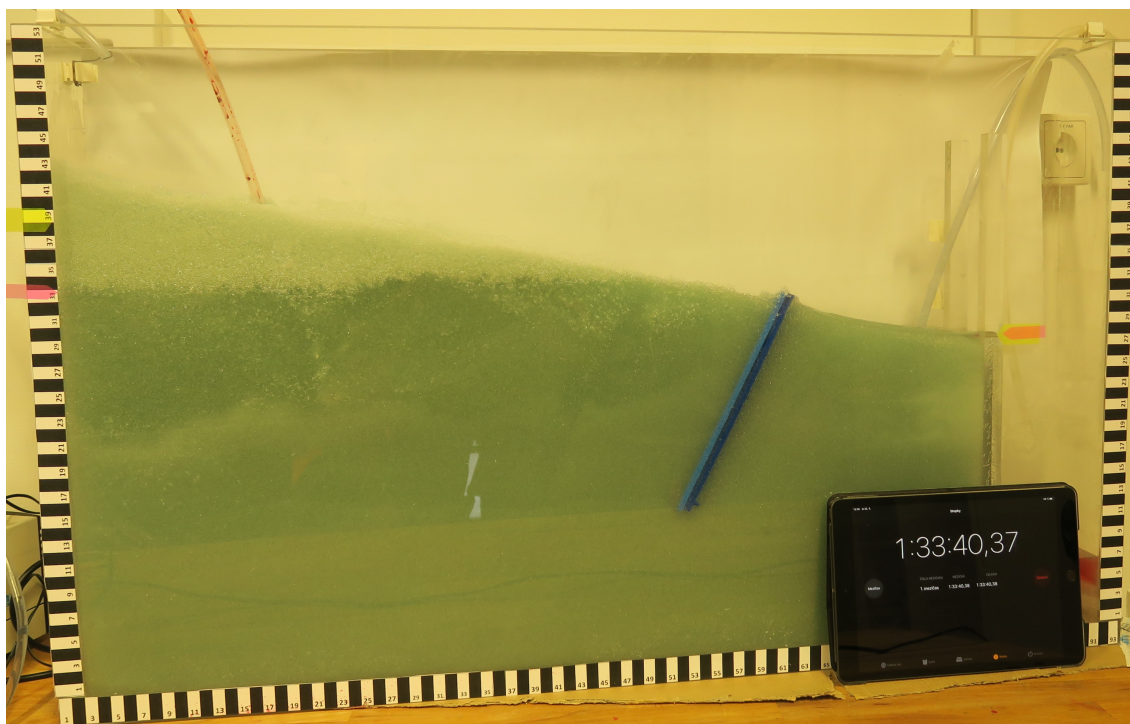


Obrázek 5.3: Fotografie pukliny, do které se vlivem tlaku dostaly kuličky a snížili tak vodivost pukliny

Zkoušeli jsme puklinu vkládat pod různými úhly a styly do kuliček, ovšem tlak na puklinu byl moc velký a výztuže na puklině nedokázaly lamely udržet pevně při sobě.

5.2.2 Měření se dvěma puklinami

Počítali jsme, že se může stát, že jedna puklina bude moc málo odolná proti kuličkám. Proto jsme vyrobili dvě pukliny, které jdou k sobě sesadit, pro větší odolnost. Dvě pukliny těsně při sobě jsme vložili do kuliček a zopakovali transporty barviva. Úhel puklin v kuličkách byl stejný, jako v případě s jednou puklinou.



Obrázek 5.4: Dvě pukliny k sobě těsně sesazené pro větší odolnost

Po vytažení puklin na konci měření měli v sobě velké množství kuliček jako v předchozím případě. Kuličky se poté v umyvadle z pukliny relativně dobře vymývaly. I když v puklině zbyde jen malé množství kuliček, dochází stále k velké deformaci lamel a to výrazně snižuje podélnou vodivost pukliny. Pro příští měření je nutné upravit 3D návrh pukliny přidáním více výztuží po obou stranách.



Obrázek 5.5: Zdeformovaná puklina vlivem tlaku kuliček, které se dostaly mezi lamely při měření

5.3 Zpracování videa z měření

Obě natočená časosběrná videa byla pomocí Python skriptu upravena. Nejprve byla provedena úprava perspektivy, čili natočení akvária do rovné polohy, protože kamera nestála přesně rovně přes akvárium. Poté byl záznam oříznut dle souřadnic rohů pouze na rozměry akvária. Z videa byly vytvořeny jednotlivé snímky, kde každý snímek se odečítal od referenčního snímku. Byla použita pouze zelená komponenta spektra pro lepší viditelnost barviva při transportu. Na každý snímek do pravého horního rohu byl přidán reálný čas ze stopek a číslo snímku.

Přidaný čas na jednotlivé snímky je podle snímané frekvence časosběru, tedy 15s na jeden snímek. Odečítaný referenční snímek byl u každého videa jiný. Odečítán byl snímek s nejméně odlesky a ve chvíli, kdy v akváriu nebylo žádné barvivo, bylo pouze nasyceno vodou.

V tabulce (5.1) jsou vyčísleny doby trvání jednotlivých transportů barviva. Je to čas, kdy na povrch dorazí maximální koncentrace barviva. Na časech je vidět, že puklina má skutečně vliv na čas transportu a bez pukliny jsou časy transportu nižší než s puklinami.

Tabulka 5.1: Tabulka hodnot trvání jednotlivých transportů barviva v akváriu. První sloupec udává pořadové číslo transportu. Druhý je čas transportu barviva přes samotné kuličky, třetí je transport s jednou puklinou a čtvrtý je transport se dvěma puklinami.

Transport	Kuličkami [s]	S 1 puklinou [s]	Se 2 puklinami [s]
1.	300	345	360
2.	300	360	390
3.	315	360	360
4.	300	345	360
5.	300	345	360
6.	300		
7.	300		

5.4 Měření porozity kuliček

Měření porozity kuliček proběhlo kvůli numerickým modelacím, kde se tato hodnota zadává jako proměnná v závislosti na prostředí. V literatuře jsou rozsahy porozit materiálů (viz. 2.1), které jsou pro náš případ příliš nepřesné. V případě, že by naše kuličky byly velmi dobře poskládané a ztuhlé, jsme schopni dosáhnout porozity 0,259. Ovšem v našem případě, kdy jsou kuličky náhodně nasypány do akvária a jsou hutněny pouze vodou, která je do nich čerpána, je tato hodnota teoreticky 0,37.

Pro zvětšení přesnosti jsme proto provedli měření porozity pro naše kuličky sami. Do kádinky o objemu jeden litr jsme nasypali kuličky a zhutnili je poklepáním na stěny nádoby. Zhutněné tedy byly přibližně jako lože kuliček v akváriu. Poté jsme do kuliček pomalu přilévali vodu, než hladina byla v úrovni kuliček. Tehdy se kuličky plně nasýtily. Kuličky jsme poté zamíchali skleněnou tyčinkou, aby se případný vzduch v pórech uvolnil a póry byly zaplněny pouze vodou. Objem vody, který kompletně nasýtil objem kuliček, byl 360 ml. Podle známého vzorce (2.1) jsme spočítali, že porozita našich kuliček je 0,36. Tato hodnota odpovídá předpokládanému rozsahu 0,26–0.37 a s naší změřenou hodnotou budeme počítat i v numerickém modelu. [7]

6 Porovnání reálných experimentů s numerickým modelem

Z nafilmovaného videa rozděleného na snímky můžeme provést porovnání s numerickým modelem. Po nastavení modelu vidíme srovnání nenasycení při čerpání v akváriu mezi reálným a numerickým modelem. Pozorujeme, jak se barvivo chová při transportu samotnými kuličkami a následně jaký vliv má puklina na kontaminant. Vidíme, že puklina má skutečně vliv na šíření a odvod barviva skrze ní nahoru.

6.1 Porovnání chování transportu reálného a numerického modelu samotnými kuličkami

Na obrázcích (6.1) je vidět, že velikost nenasycení je velice podobná. Jedná se ovšem pouze o kvalitativní shodu. Přesného tvaru nejsme schopni docílit, protože kuličky nejsou dokonale homogenní, a protože model počítá pouze nasycený stav. Hranici nenasycené oblasti nejsme tedy schopni zachytit přesně.

Díky informaci o času ze snímků, jsme schopni porovnat rychlost transportu reálného modelu s numerickým modelem. Z informace o času transportu jednoho běhu, si můžeme ověřit naši extrapolaci hydraulické vodivosti pro 1mm kuličky z kapitoly (3.4) a můžeme ji případně korigovat. Na obrázcích (6.2), jenž jsou upravené snímky z videa, je zobrazen jeden transport kuličkami a na obrázcích (6.3) je transport z numerického modelu. Numerický model byl vytvořen tak, aby se transport shodoval s reálným modelem.

Nastavení modelu probíhalo tak, že jsme přepočítali tok z čerpadla 1,60 l/min na proměnnou $bcflux$, která nám říká na jakou plochu kuliček dopadá objemový tok vody z čerpadla.

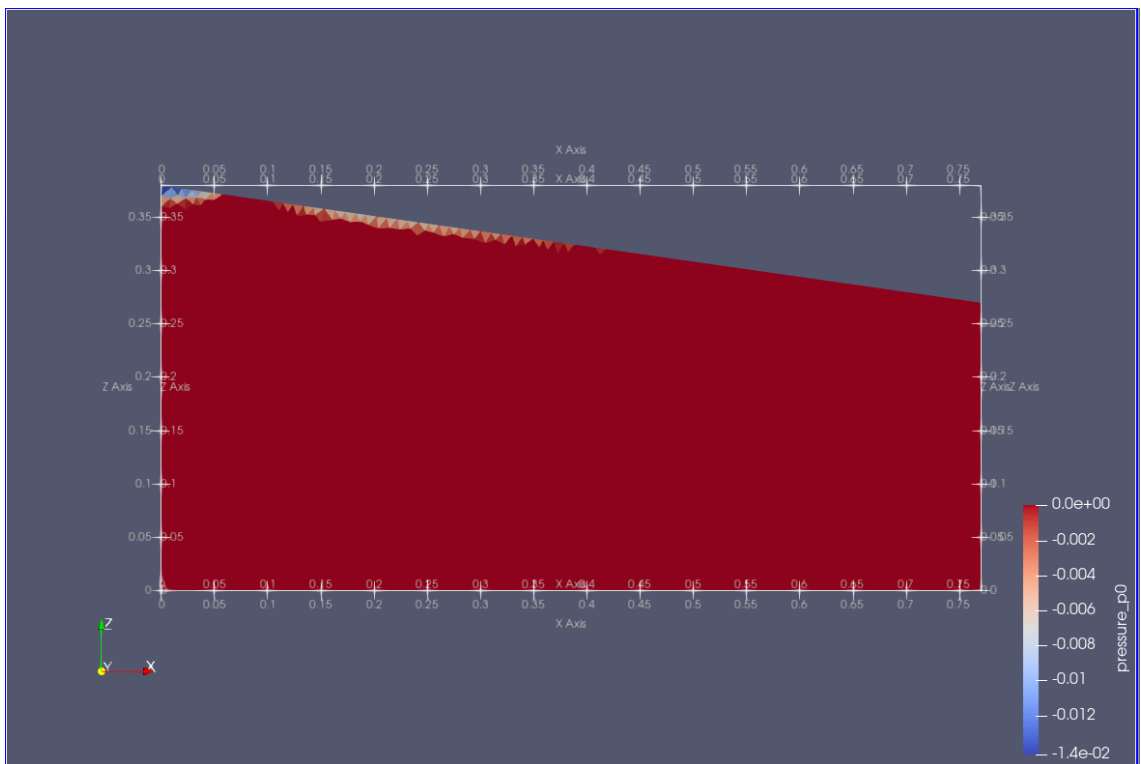
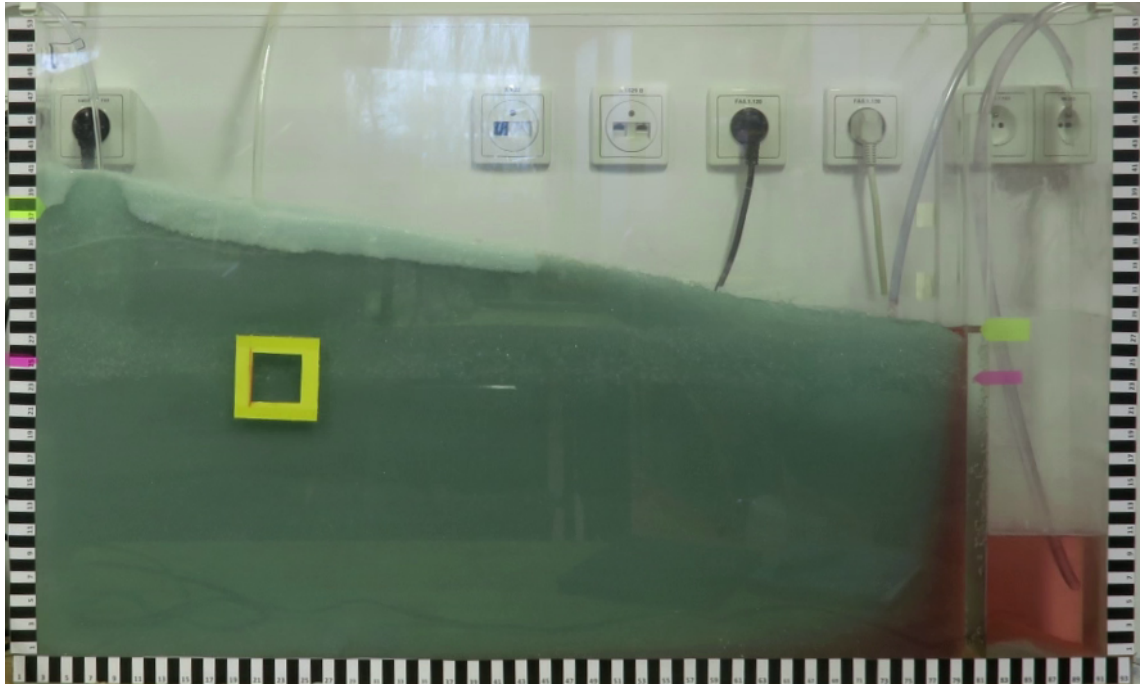
$$bcflux = \frac{Q}{S}, \quad (6.1)$$

kde Q [m³/s] je objemový tok z čerpadla a S [m²] je plocha zdroje v modelu vypočítaná podle vzorce $S = 0,01 * 0,77 * 0,08$, což je setina délky akvária vynásobená šířkou akvária. Konečná hodnota $bcflux$ je tedy $4,33 \times 10^{-2}$

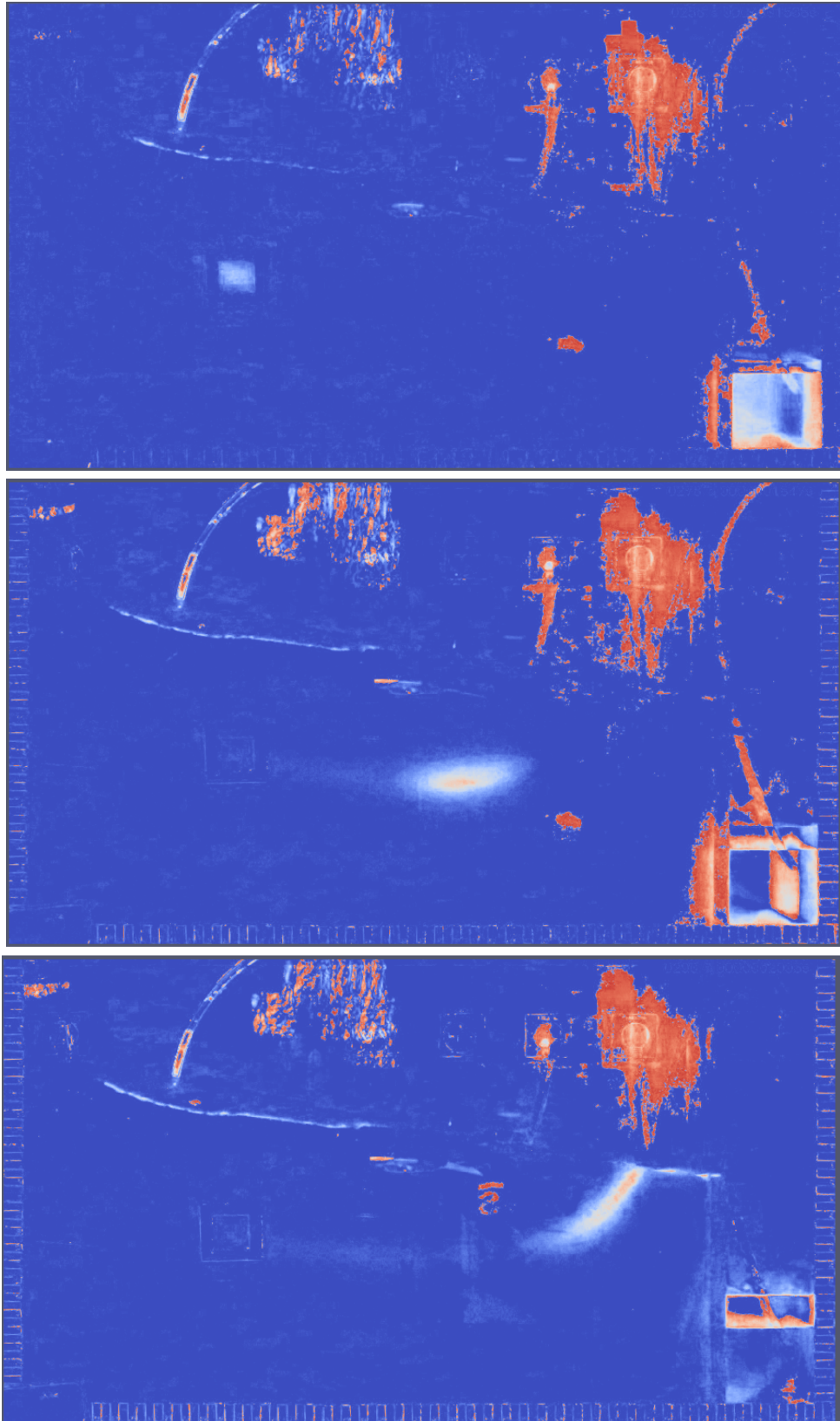
Jako další parametr je porozita, kterou jsme nastavili na změřenou hodnotu 0,36.

Jako poslední parametr, který se mění a nejvíce ovlivňuje dobu transportu barviva a nasycení kuliček, je hydraulická vodivost. Tu jsme korigovali tak, aby nasycení na modelu odpovídalo reálnému nasycení a doba transportu byla shodná. Nakonec reálná vodivost vyšla na 5×10^{-3} m/s, což je vyšší než předpokládaná z extrapolace v kapitole (3.4).

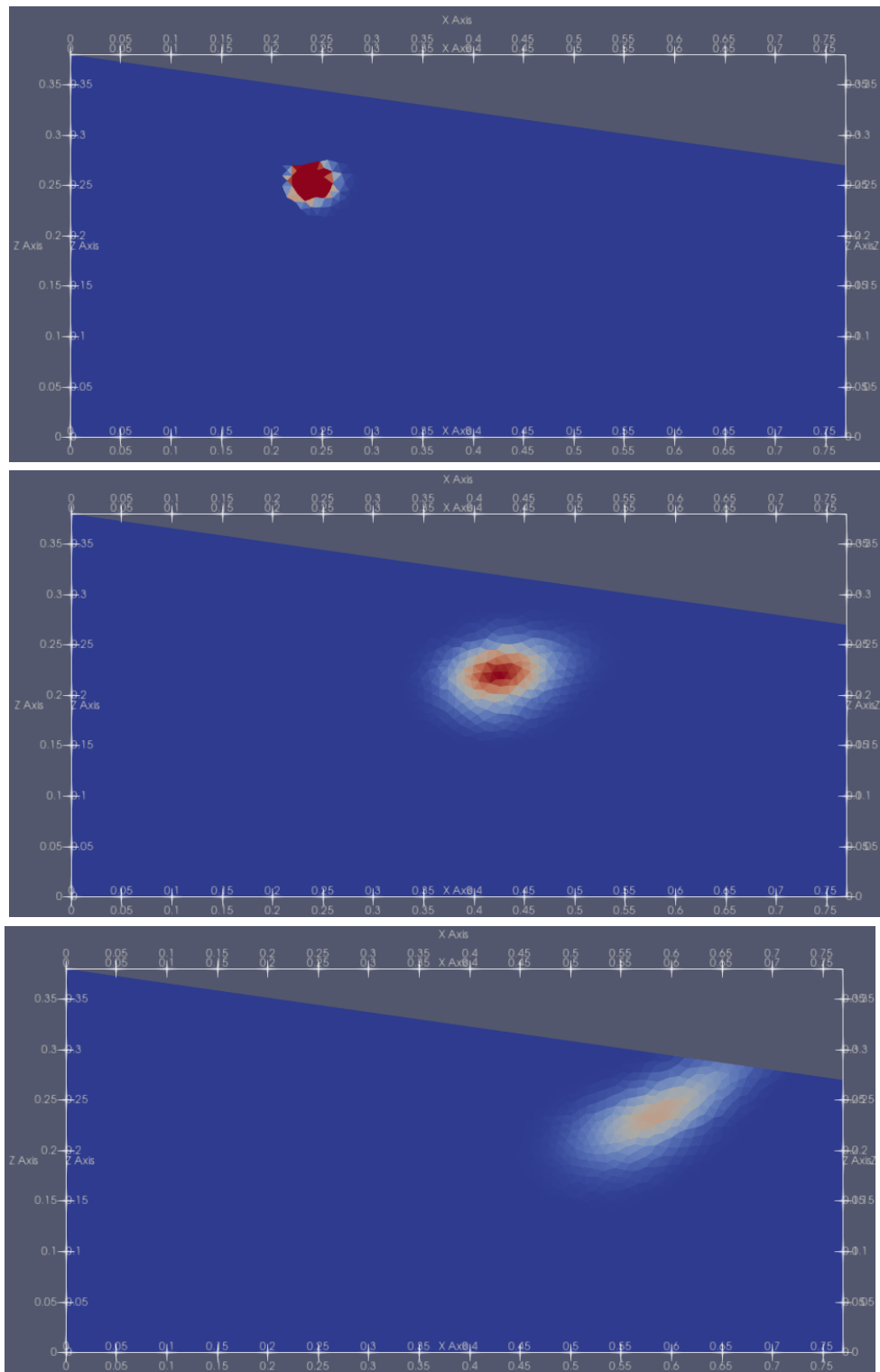
Srovnáním kontaminačního mraku z reálného a numerického modelu zjistíme, že v numerickém je mrak delší a širší. To znamená, že reálná hydrodynamická disperze v akváriu s kuličkami je daleko menší a dochází k menšímu rozmazání mraku během transportu.



Obrázek 6.1: Porovnání fotografie a numerického modelu při nasycení kuliček. Na horní fotce je vidět nenасыcení kuliček u přítoku vody a téměř stejné nenасыcení vyšlo i v numerickém modelu na dolním obrázku



Obrázek 6.2: Na obrázcích je vidět jeden transport barviva kuličkami. Na snímcích je zviditelněna pouze jedna složka spektra pro zvýraznění barviva.



Obrázek 6.3: Na obrázcích je vidět jeden transport barviva kuličkami z numerického modelu. Čas transportu je stejný jako v reálném modelu

6.2 Porovnání chování transportu reálného a numerického modelu s puklinou

I v tomto případě jsme v modelu nejprve přepočítali hodnotu toku z čerpadla, tedy 1,66 l/min na proměnnou $bcflux$, která zde vyšla $4,49 \times 10^{-2}$. Jako druhou proměnnou jsme vypočítali vodivost pukliny dle vztahu [7]

$$K = \frac{1}{\mu} \frac{1}{12} \delta^2 \rho g, \quad (6.2)$$

kde μ je dynamická viskozita vody, δ je šířka lamel v puklině, ρ je hustota vody a g je gravitační zrychlení. Výsledná hydraulická vodivost pukliny je $K=0,667$ m/s.

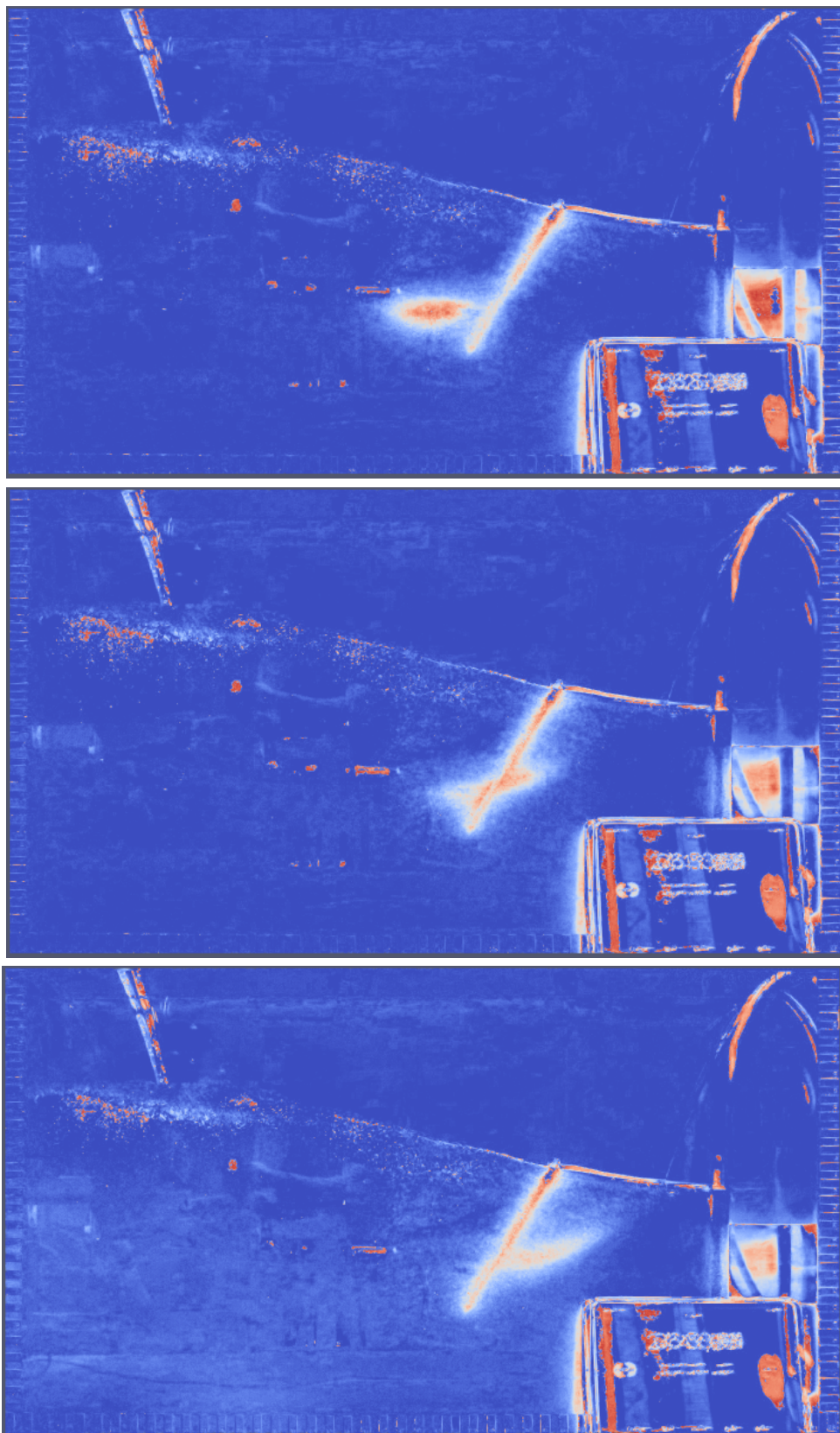
Porozitu pukliny jsme vypočítali využitím vzorce (2.1). Zde V_p je šířka mezi lamelami a V_c je šířka lamely plus mezera mezi lamelami, tedy vyčísleně $n = 0,9/1,5$, výsledná porozita pukliny je 0,6.

Posledním parametrem byla *crosssection* [m²], která nám říká, jaký má puklina průřez. Vypočítá se jako tloušťka pukliny vynásobená šířkou pukliny. V našem případě *crosssection* vyšla jako 0,000534 m².

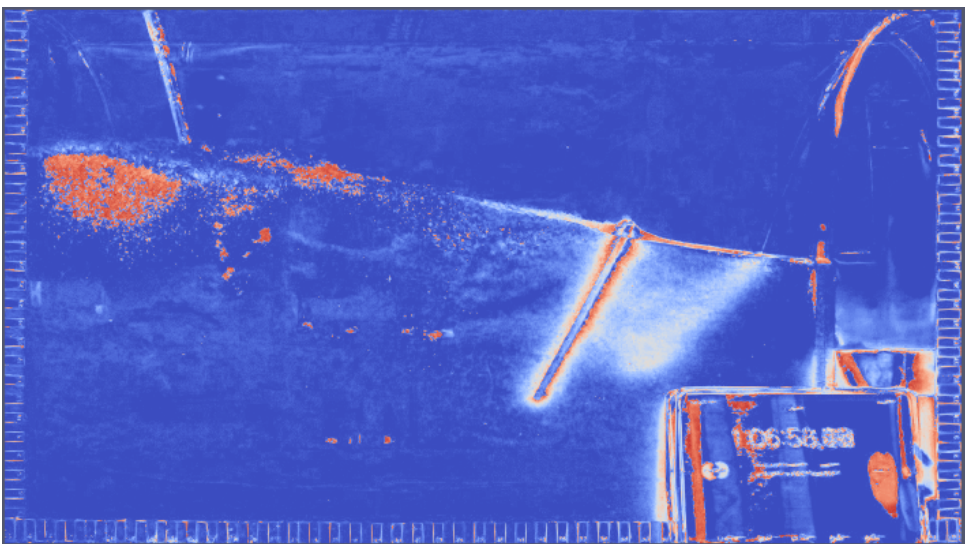
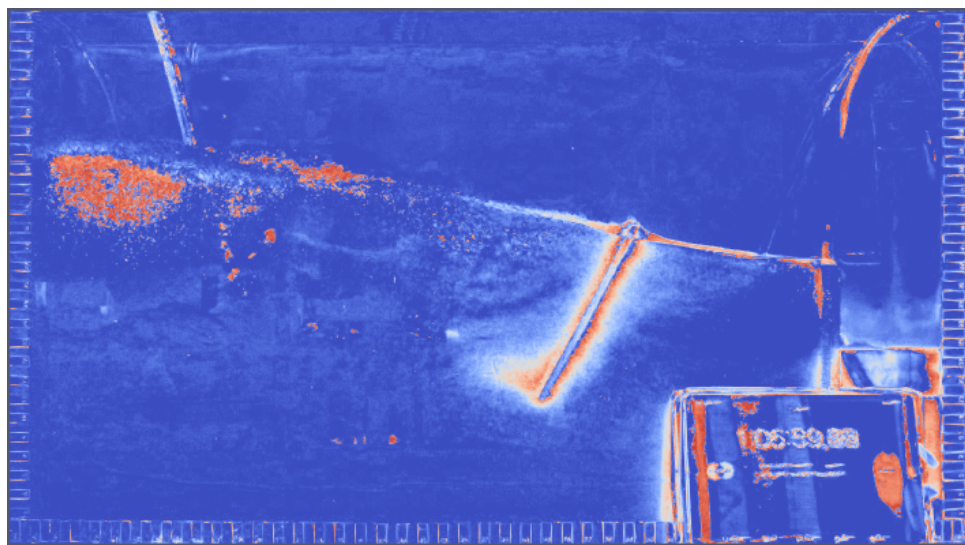
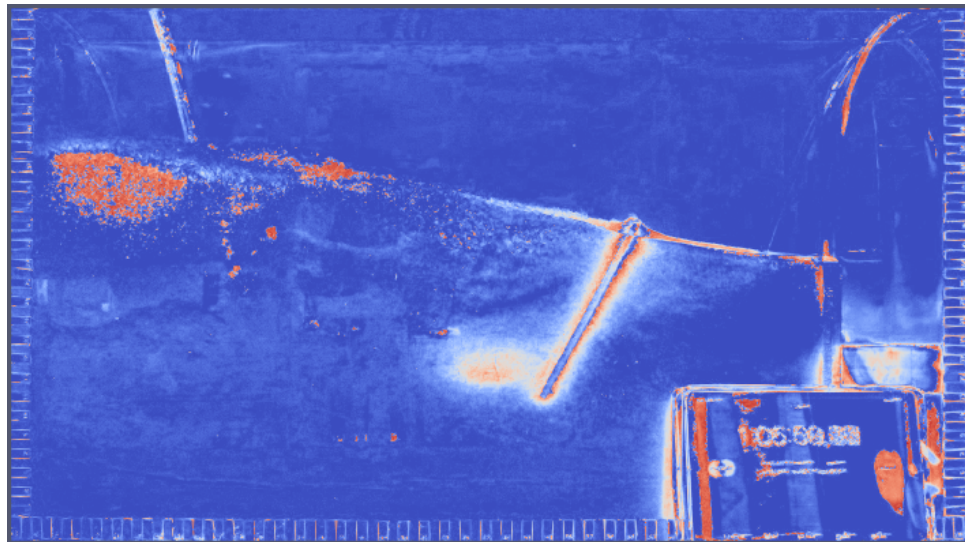
Parametry pro kuličky, jako porozita a vodivost se již neměnily.

Tvar nasycení kuliček u přítoku je v reálném a numerickém modelu stejný jako v experimentu bez puklin na obrázku (6.1).

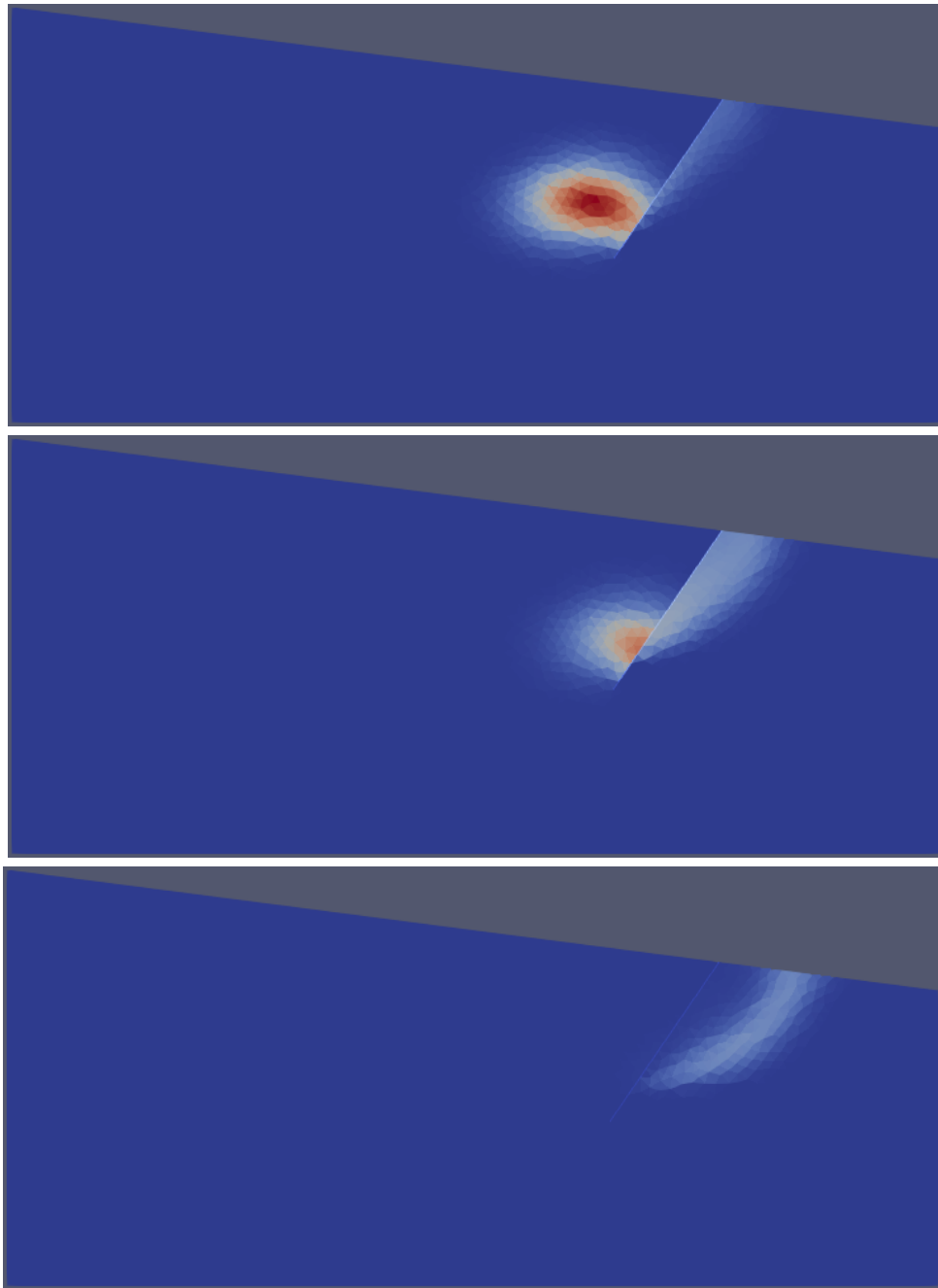
Na upravených snímcích z kamery je opět zobrazeno jen jedno barevné spektrum, na kterém je dobře vidět porovnání sytosti barvy kontaminantu, při průchodu jednou a dvěma puklinami. Sytost kontaminantu je snížena při průchodu jednou puklinou a ještě výrazněji snížena při průchodu oběma puklinami. Při porovnání transportu barviva přes pukliny na obrázcích (6.4) a (6.5) vidíme znatelně lepší funkci puklin v případě, kdy jsou dvě na sobě. Nedochozí tam k takovému ucpání lamel, jako na obrázku (5.3), a tím k lepší funkci pukliny ve smyly vytvoření prostoru s vyšší vodivostí. Na obrázku (6.5) je krásně vidět žádaný jev, kdy větší množství barviva odchází uvnitř pukliny lamelami nahoru a menší množství prochází dále, posunuto výše k hladině. Časy transportu dle tabulky (5.1) jsou s puklinami větší, přestože puklina je více vodivá a barvivo uvnitř ní proteče daleko rychleji. Je to způsobeno nehomogenitou přechodu mezi kuličkami a puklinou, proto se transport zpomalí. Pouze uvnitř pukliny je vodivost velká a barvivo v podélném směru uvnitř ní projde rychleji. Nemáme nikde změřeno nebo zaznamenáno množství barviva a čas, kdy začne vytékat nahoře z pukliny. Tím by se dalo zjistit, jaké množství barviva projde puklinou dál a jaké skrze ní proteče na hladinu. To může být podnět pro příští měření. U měření s dvěma puklinami se nám ověřila naše hypotéza, jak by se měl transport chovat při průchodu puklinou v porézním prostředí.



Obrázek 6.4: Na obrázcích je zobrazený postupný transport jednou puklinou. Je vidět ze sytosti barvy kontaminantu, že koncentrace před a za puklinou se mírně změnila



Obrázek 6.5: Na obrázcích je zobrazený postupný transport dvěma puklinami. Zde je již vidět výrazná změna sytosti barvy a posun kontaminantu při průchodu puklinami



Obrázek 6.6: Na obrázcích z numerického modelu je zobrazený postupný transport jednou puklinou

Při porovnání obrázků reálného transportu a transportu z numerického modelu vidíme opět podobnost v chování pukliny. I v tomto případě je hydrodynamická disperze mraku kontaminantu rozdílná v realitě a v modelu.

V dalších měřeních můžeme použít vylepšenou puklinu o další výstuže, aby do ní nepronikaly kuličky. Můžeme se zaměřit na lepší zpracování obrazu a pomocí skriptu analyzovat množství pixelů mraku ve videu a provést korekci numerického mode-

lu. Zlepšit numerický model, abychom lépe napodobili tvar nasycených a nenasycených kuliček. Nastudovat více problematiku hydrodynamické disperze kontaminantu a provést potřebné výpočty pro zpřesnění popisu chování transportu. Nakonec provést znovu měření všech průměrů hydraulických vodivostí kuliček, abychom dosáhli lepší přesnosti a porovnání našich předchozích měření s novými.

Skript pro úpravu videa a kód numerické simulace jsem převzal od vedoucího práce Doc. Mgr. Jana Březiny, Ph.D. Já oboje modifikoval pro vlastní potřebu a vytvoření funkčních simulací.

7 Závěr

Cílem této práce bylo provést měření hydraulické vodivosti 1mm kuliček. Vytvořit návrh a realizovat 3D tisk pukliny. Sestavit experiment pro simulaci šíření látek v samotných kuličkách a poté s přidanou puklinou. Oboje nafilmovat a následně záznam porovnat s numerickým modelem pro srovnání výsledků.

První bylo provedeno měření hydraulické vodivosti kuliček o průměru 1 mm. Měření se ovšem při zpracování výsledků ukázalo jako chybné, kde pravděpodobně došlo k systematické chybě při měření. Bohužel již nebyla šance toto měření zopakovat.

V druhé řadě byl vytvořen 3D model pukliny, jako zjednodušení reálné pukliny v horninovém prostředí. Tento model byl následně vtištěn na 3D tiskárně a provedeno měření, které ověřilo, že puklina má násobně větší hydraulickou vodivost než kuličky, což je nutný parametr.

Dalším bodem byly samotné experimenty s transportem barviva kuličkami. Byly provedeny dvě měření, kdy v prvním proběhl transport samotnými kuličkami a v druhém se do kuliček přidala puklina. Obě měření byla natočena a následně zpracována skriptem pro lepší srovnání s numerickým modelem. Byla změřena porozita kuliček a provedeny potřebné výpočty okolo numerického modelu, abychom byli schopni provést co nejpřesnější srovnání transportů.

Posledním bodem bylo samotné nastavení numerických simulací a srovnání s reálným modelem. Vyšlo nám, že hydraulická vodivost 1mm kuliček je 5×10^{-3} m/s, tedy větší než extrapolovaná, což jsme předpokládali, že se může stát. Na konci byly uvedeny možnosti pro příští měření a jejich možná vylepšení.

Použitá literatura

- [1] Hokr, Milan *Transportní procesy*. (2005)
- [2] *MUNI IS*. MUNI IS [online]. Praha: Masarykova univerzita, 2019[cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2004/G2101/um>
- [3] ANDĚL, Jiří *Matematická statistika. 2. vyd.*. Praha: SNTL, 1985, 346 s.
- [4] KAVIANY, M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media. 2nd.* New York, NY, United States: Springer-Verlag New York, 1999. ISBN 978-1-4684-0412-8.
- [5] BERRE, I., DOSTER, F. KEILEGAVLEN E. *Flow in Fractured Porous Media: A Review of Conceptual Models and Discretization Approaches*. *Transport in Porous Media* 130, no. 1 (October 1, 2019): 215–36. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1171-6>.
- [6] BROWN, S.R. *Fluid Flow through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness*. *Journal of Geophysical Research* 92, no. B2 (1987): 1337–47. <https://doi.org/10.1029/JB092iB02p01337>.
- [7] SNOW, D. T. *Anisotropic Permeability of Fractured Media*. *Water Resources Research* [online]. 1969, 5(6), 1273-1289 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1029/WR005i006p01273. ISSN 00431397. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR005i006p01273>

A Příloha 1



Obrázek A.1: Fotografie akvária při zmenšeném objemu polystyrenem s 3mm kuličkami



Obrázek A.2: Fotografie akvária při zmenšeném objemu polystyrenem s 400–600mm kuličkami

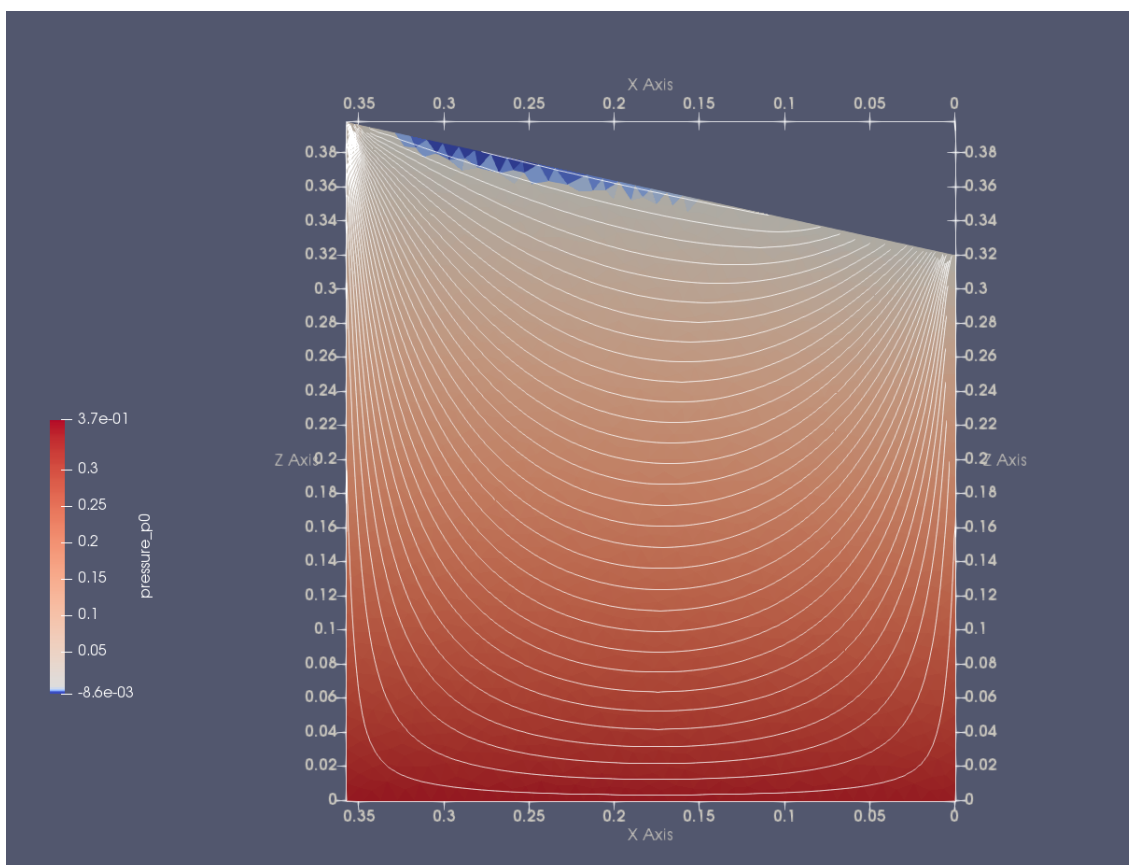
Vzorek 100–200 µm		
Délka lože 0,915 m		
v [m/s]	P [Pa]	K [m/s]
1.08E-04	3.10E+03	3.13E-04
2.17E-04	7.50E+03	2.58E-04
5.41E-04	1.79E+04	2.71E-04
7.58E-04	2.58E+04	2.63E-04
1.08E-03	3.50E+04	2.77E-04

Vzorek 200–300 µm		
Délka lože 0,965 m		
v [m/s]	P [Pa]	K [m/s]
1.08E-04	1.90E+03	5.38E-04
2.17E-04	4.20E+03	4.87E-04
5.41E-04	1.09E+04	4.69E-04
1.08E-03	2.33E+04	4.39E-04
2.17E-03	4.43E+04	4.61E-04
3.25E-03	8.70E+04	3.52E-04
4.33E-03	1.16E+05	3.53E-04

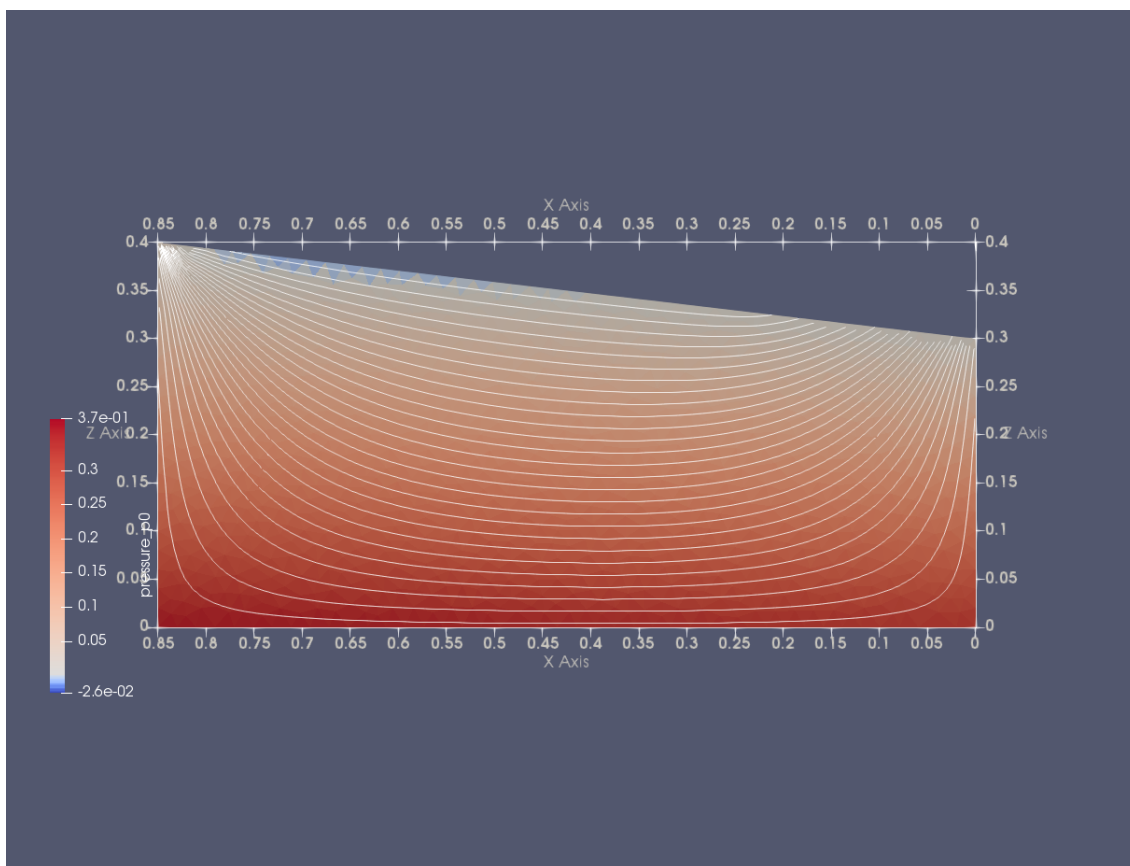
Vzorek 400–600 µm		
Délka lože 0,97 m		
v [m/s]	P [Pa]	K [m/s]
1.08E-04	7.00E+02	1.47E-03
2.17E-04	1.30E+03	1.58E-03
5.41E-04	3.20E+03	1.60E-03
1.08E-03	6.30E+03	1.63E-03
2.17E-03	1.25E+04	1.64E-03
3.25E-03	1.77E+04	1.74E-03
4.33E-03	2.33E+04	1.76E-03

Vzorek 2 mm		
Délka lože 0,97 m		
v [m/s]	P [Pa]	K [m/s]
1.08E-03	9.00E+02	1.14E-02
2.17E-03	1.90E+03	1.08E-02
3.25E-03	2.30E+03	1.34E-02
4.33E-03	2.60E+03	1.58E-02

Vzorek 1 mm		
Délka lože 0,99 m		
v [m/s]	P [Pa]	K [m/s]
1.08E-04	1.42E+03	7.36E-04
2.17E-04	4.90E+03	4.28E-04
5.41E-04	1.60E+04	3.28E-04
1.08E-03	3.68E+04	2.85E-04
1.62E-03	6.53E+04	2.41E-04
2.17E-03	1.00E+05	2.09E-04
2.71E-03	1.35E+05	1.94E-04
3.25E-03	1.69E+05	1.86E-04
3.79E-03	1.91E+05	1.92E-04
4.33E-03	2.01E+05	2.09E-04
4.71E-03	2.05E+05	2.23E-04



Obrázek A.3: Numerický model objemu akvária zmenšený polystyrenem při experimentu se vzorkem kuliček o průměru 400–600 μm



Obrázek A.4: Numerický model akvária, podle výsledků a předpokladů z předchozích měření