



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# **NÁVRH ČERPAČÍ STANICE PRO DOPRAVU HYDROSMĚSI**

THE PUMP STATION DESIGN FOR HYDRO-MIXTURE TRANSPORT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. MATEJ BÉREŠ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. VLADIMÍR HABÁN, Ph.D.**

BRNO 2014





Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Matej Béreš

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh čerpací stanice pro dopravu hydrosměsi**

v anglickém jazyce:

### **The pump station design for hydro-mixture transport**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při dopravě hydrosměsí je nutno počítat ztráty v potrubí a charakteristiku čerpal s vlivem nerozpuštěných látek ve vodě. Množství a zrnitost částic ovlivňují ztráty. Úkolem diplomanta bude stanovení ztrát při dopravě hydrosměsí, pomocí měřených tlaků a průtoku. Porovnání měřených dat s empirickými vztahy pro výpočet tlakové ztráty. Dle měření bude navržena čerpací stanice pro zvolenou lokalitu.

Cíle diplomové práce:

Porovnání měřených ztrát s teoretickým výpočtem.

Návrh čerpací stanice.

Seznam odborné literatury:

Bude úkolem diplomanta provést literární rešerši problematiky.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Diplomová práca sa zaoberá problematikou prúdenia hydrozmesí v potrubí. V prvej časti práce sa zaoberám vlastnosťami disperzných sústav, používaných čerpadiel a dopravných potrubí. Zvláštna pozornosť je venovaná bagrovacím čerpadlám a polyetylénovým HDPE potrubiam. V druhej časti spracovávam dáta namerané v spolupráci s firmou PROGROUPE Sediment Removal a.s. na vodnom diele Gabčíkovo na rieke Dunaj. Na základe nameraných dát následne navrhujem potrebnú charakteristiku bagrovacieho čerpadla pre prečerpávaciu stanicu umiestnenú na projekte revitalizácie Kazašského jazera Borovoe.

## **KĹÚČOVÉ SLOVÁ**

hydrozmes, sediment, HDPE, bagrovacie čerpadlo, hydrodoprava, sací bager

## **ABSTRACT**

This master's thesis is concerned about the flow of hydro-mixture in pipelines. In the first part, I am reviewing the characteristics of disperse systems, pumps and pipelines used in hydro-mixture transportation. Slurry pumps and polyethylene HDPE pipelines receive an extra attention. In the second part, I am working with data obtained from the co-operation with the PROGROUPE Sediment Removal company. These data were measured during revitalization of the water dam Gabčíkovo. In the next step, I use the data to suggest the required characteristic for the slurry pump for pump station in project of revitalizing Borovoe lake, situated in Kazakhstan.

## **KEYWORDS**

hydro-mixture, sediment, HDPE, slurry pump, hydro transport, dredging boat

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

BÉREŠ, M. *Návrh čerpací stanice pro dopravu hydrosměsi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D..

---



## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 30. mája 2014

.....

Bc. Matej Béreš

---





## **POĎAKOVANIE**

Týmto ďakujem doc. Ing. Vladimírovi Habánovi, Ph.D. za ústretový prístup, rady, pripomienky a pomoc so spracovaním neskutočného objemu meraných dát. Zároveň chcem poďakovať rodine a priateľom a psychickú a ekonomickú podporu počas celého štúdia.

---

# OBSAH

Úvod.....	14
1 Hydrozmesi .....	16
1.1 Vlastnosti dopravovaných materiálov .....	16
1.1.1 Hustota .....	17
1.1.2 Vlhkosť a nasiakavosť .....	17
1.1.3 Pevnosť materiálu .....	18
1.1.4 Krivka zrnitosti .....	19
1.1.5 Merný povrch zrna .....	20
1.1.6 Stredná veľkosť zrna .....	20
1.2 Vlastnosti suspenzií .....	21
1.2.1 Koncentrácia .....	21
1.2.2 Viskozita .....	22
1.2.3 Rýchlosť suspenzie .....	23
1.3 Prúdenie suspenzií .....	23
1.3.1 Sedimentačná rýchlosť .....	24
1.3.2 Sedimentačná rýchlosť v obmedzenom prostredí .....	26
1.3.3 Prúdenie hydrosmesi vo vertikálnom potrubí .....	27
1.3.4 Prúdenie hydrosmesi v horizontálnom potrubí .....	28
2 Čerpadlá .....	30
2.1 Charakteristika čerpadla .....	30
2.2 Bagrovacie čerpadlá .....	30
2.3 Vysokotlakové odstredivé čerpadlá.....	31
2.4 Piestové čerpadlá .....	31
2.5 Kalové čerpadlá .....	32
2.6 Vretenové čerpadlá .....	32
2.7 Piškótové čerpadlá .....	33
2.8 Dávkovače .....	33
3 Potrubie .....	34
3.1 Charakteristika potrubia .....	34
3.2 Oceľové potrubie .....	34
3.3 Polyetylénové potrubie .....	34
3.4 Spájanie potrubí .....	35
4 Meraný obvod .....	37

---

4.1	Zdrž Hrušov .....	37
4.2	Technológia DESET .....	38
4.3	Sací bager PERM Haren .....	39
5	Charakteristika čerpadla .....	42
6	Kontinuálne meranie hustoty .....	44
7	Tlaková strata v potrubí .....	45
7.1	Merané údaje .....	45
7.2	Merná stratová energia .....	46
7.3	Súčiniteľ trenia .....	47
7.4	Teoretický výpočet tlakovej straty .....	53
8	Jazero Borovoe .....	55
	Záver .....	60
	Zoznam použitých zdrojov .....	61
	Zoznam použitých symbolov .....	62

---

# Úvod

Najstaršie zachované pokusy ľudstva o skrotenie vodného živla sú datované do rokov okolo 3000 BC. V tomto období sa obyvatelia starovekej Mezopotámie snažili prehradiť rieky Eufrat a Tigris aby zmiernili pravidelne sa striedajúce obdobia záplav a obdobia sucha. Primitívne vodné nádrže mali slúžiť ako zásobáreň vody pre obdobie sucha a v období záplav ako akýsi kompenzátor objemu, ktorý prebytočnú vodu zachytí kým môže bez ohrozenia okolia odtečť.

Od starovekých čias sa k regulačnej funkcii vodného diela postupne pridávali ďalšie. Budované umelé, ale aj prírodné vodné nádrže sa využívajú na chov a lov rýb, rekreačné účely, logistiku, výrobu elektrickej energie a ako zdroj pitnej a technologickej vody. Väčšina uvedených funkcií vodných diel je podmienená kvalitou vody a objemom samotnej nádrže.

Kvalitu vody, ale aj aktívny objem nádrže priamo ovplyvňuje množstvo sedimentov na dne nádrže. Od rozpadu Sovietskeho zväzu sa revitalizácii vodných nádrží nevenovala prílišná pozornosť. Jediné revitalizačné bagrovanie, ktoré bolo pravidelne prevádzkované, je bagrovanie vyznačených plavebných dráh. Zaručenie minimálnej plavebnej hĺbky v plavebnej dráhe je totiž správcovi toku nariadené Európskymi pravidlami pre plavbu na vnútrozemských vodných cestách (CEVNI).

Zanedbanie revitalizačných postupov na tak dlhú dobu (od rozpadu SSSR vyše 20 rokov) má za následok obmedzené využívanie niektorých vodných diel v súčasnosti. Ako príklad môžem uviesť rekreačnú oblasť Slnčné jazera pri meste Senec. Dnové sedimenty, ktorých pôvodom bol chov rýb a rybolov, začali v roku 2005 spôsobovať ekonomické problémy. Zápach a ďalšie pridružené (hlavne estetické) problémy boli dôvodom nižšej návštevnosti miestnych ubytovacích a stravovacích kapacít. V nasledujúcom roku pristúpilo mesto Senec v spolupráci s EÚ k projektu revitalizácie Slnčných jazier. V priebehu dvoch rokov bolo z jazera číslo 3 plávajúcim sacím bagrom vytážených a spracovaných 80000 m<sup>3</sup> sedimentu.

Ďalším príkladom obmedzeného využívania vodnej plochy z dôvodu nadmerného zanesenia dnovými sedimentami je vodná nádrž na rieke Hron v obci Veľké Kozmálovce. Táto vodná nádrž slúži ako zdroj chladiacej vody pre jadrovú elektrárňu Mochovce. Z dôvodu nadmerného zanesenia riečneho dna sedimentami klesla kvalita vody a kapacita vodnej nádrže. Do čerpacej systému jadrovej elektrárne sa dostávali sedimenty, ktoré mali nepriaznivé účinky na čerpaciu techniku a kládli zvýšené nároky na úpravu vody. V priebehu dvoch rokov bolo z nádrže vytážených 130000 m<sup>3</sup> suchého sedimentu.

Posledným projektom revitalizácie vodného diela je odstraňovanie sedimentov zo zdrže Hrušov, vodné dielo Gabčíkovo. Množstvo sedimentov na Gabčíkove má vplyv na regulačnú schopnosť vodného diela a na kvalitu podzemnej vody. Celkovo bolo počas troch rokov realizácie projektu vytážených 400000 m<sup>3</sup> suchého sedimentu, čo odpovedá 70 t/hod suchého sedimentu pri jednozmennej prevádzke. Počas posledného týždňa realizácie práve tohto projektu mi bolo umožnené s podporou spoločnosti PROGROUPE Sediment Removal a.s. inštalovať potrebné snímače a na poslednú chvíľu realizovať potrebné merania.

Výstupom tejto práce bola požiadavka zo strany spoločnosti PROGROUPE Sediment Removal a.s. o odborný odhad potrebného výkonu čerpadla pre čerpaciu stanicu. Predmetná čerpacia stanica bude umiestnená na projekte revitalizácie Kazaškého jazera Borovoe, kde výkon

---

bagrovacieho čerpadla na sacom bagri takmer s určitou nebude postačovať na preklopenie dopravnej vzdialenosti od miesta ťažby do miesta spracovania zvodnených sedimentov.

# 1 HYDROSMESI

Disperzná sústava je hmotný systém, ktorý sa skladá najmenej z dvoch látok, z ktorých jedna je rozptýlená v druhej ako malá častica. Rozptýlená látka sa nazýva disperzum, nerozptýlená látka disperzné prostredie. Disperzné prostredie môže predstavovať plyn, kvapalina aj tuhá látka, dispergovanými časticami môžu byť mikroskopické častice, s ktorými sa stretávame v roztokoch nízkomolekulárnych látok, makromolekuly, ich agregáty, prípadne makromolekulárne ionty a konečne najrôznejšie útvary, zložené z veľkého počtu molekúl, ktoré predstavujú samostatnú fázu. [1]

Disperzní prostredí	Dispergovaná časť	Disperzní soustava
plynné	plynná	aerodisperzní systém
	kapalná	aerosol
	tuhá	
kapalné	plynná	pěna
	kapalná	emulze
	tuhá	kapalná suspenze lyosol
tuhé	plynná	tuhá pěna
	kapalná	tuhá emulze
	tuhá	tuhý sol

Obr. 1.1 Základné rozdelenie disperzných sústav[1]

Hydrozmes je potom možné definovať ako disperznú sústavu, ktorej disperzné prostredie je kvapalná a je tvorené vodou. V rámci tejto práce sa zaoberám hydrozmesou, ktorej disperzum je tvorené čiastočkami tuhej látky a je preto charakterizovaná ako kvapalná suspenzia.

## 1.1 VLASTNOSTI DOPRAVOVANÝCH MATERIÁLOV

K základným charakteristikám dopravovaných materiálov patrí predovšetkým ich veľkosť a tvar. Údaj o veľkosti častice môže byť jednoznačný iba vtedy, ak sú dispergované častice rovnako veľké. Takúto sústavu nazývame sústavou monodisperznou. Ak však majú dispergované častice rôznu veľkosť (ide teda o polydisperznú sústavu), charakterizujeme veľkosť častíc len vhodnou priemernou hodnotou veľkosti. Okrem toho je v polydisperznej sústave potrebné poznať rozdeľovaciu funkciu veľkosti častíc. Častice nazývame izometrickými, ak sú ich rozmery vo všetkých troch priestorových smeroch približne rovnaké. V opačnom prípade (prevláda jeden alebo dva z rozmerov častice) hovoríme o časticiach anizometrických. [2]

Dispergované častice nie sú v disperzných sústavách pevnými útvarmi nemenného charakteru, ale môžu podľa okolností viac alebo menej meniť svoj tvar. Potom hovoríme o ich

deformabilite, pričom zmeny tvaru môžu byť vratné alebo nevratné. Tvar a deformabilita majú obvykle veľký vplyv na mnohé fyzikálne vlastnosti disperznej sústavy. [2]

### 1.1.1 HUSTOTA

Pri vytvorení suspenzie ponorením materiálu do vody sa môže stať, ak zrná nie sú od seba príliš vzdialené, že medzi jednotlivými zrnami materiálu bude nielen kvapalina, ale aj vzduch. Vzduch v medzerách materiálu pri pohybe častice čiastočne vymizne a čiastočne ostane viazaný na častici. Samotná častica môže obsahovať uzavreté póry a dutinky, do ktorých sa voda dostáva len obťažne, prípadne vôbec. Preto je potrebné pri určovaní mernej hmotnosti pevnej fázy a zmesi rozlišovať materiál na vodou nasýtený a nenasýtený. [1][3]

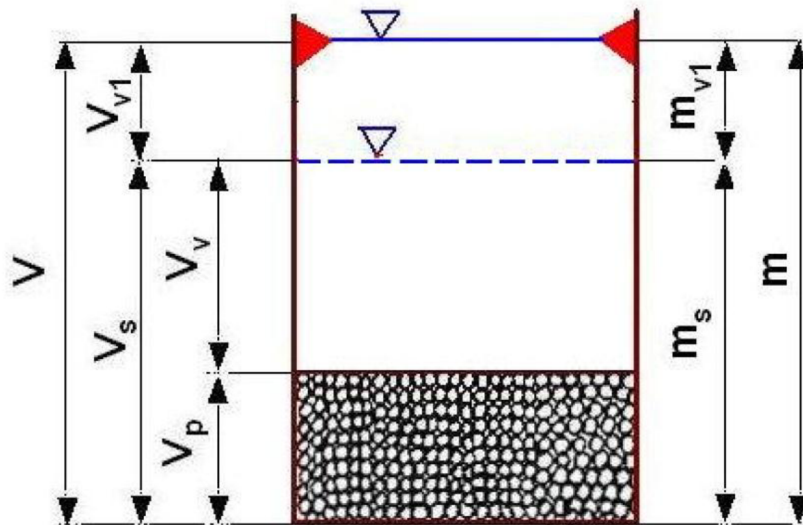
Hustotu pevnej fázy je možné definovať ako

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (1.1)$$

a hustotu suspenzie ako

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_v + V_p} = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.2)$$

Hustota sa určuje vážením pomocou pyknometru. Kontinuálne meranie hustoty prúdiacej suspenzie je možné pomocou rádioizotopových snímačov mernej hmotnosti, prípadne pomocou hydrostatického snímača koncentrácie. [1][3]



Obr. 1.2 Schéma pyknometra [1]

### 1.1.2 VLHKOSŤ A NASIAKAVOSŤ

Veľmi dôležitým kritériom pri hydraulikej doprave je nasýtenie pevnej fázy vodou. Vodu kryštalovú a štruktúrnú je možné v tomto prípade pokladať za súčasť pevnej fázy. Pri zisťovaní obsahu poréznej vody zahrievame vzorku materiálu na 105°C, aby sme vodu vyparili. Potom pomer hmotnosti vyparenej vody k hmotnosti pevnej fázy je označovaný ako vlhkosť vzorku. [1][2]

---

$$W_{zm} = \frac{m_v}{m_p} \quad (1.3)$$

Pri objemovom pomere hovoríme o stupni nasýtenia pevnej fáze vodou.

$$NV = \frac{V_v}{V_p} \quad (1.4)$$

Ako parameter vyjadrujúci schopnosť materiálu prijímať vodu býva často uvádzaná nasiakavosť  $\omega^*$ . Nasiakavosť sa stanovuje ako rozdiel mernej hmotnosti materiálu ponechaného sedem dní pod vodou a mernej hmotnosti toho istého materiálu vysušeného pri 105°C. Tento rozdiel mernej hmotnosti sa obvykle vyjadruje v % mernej hmotnosti vysušeného materiálu. [1][2]

### **1.1.3 PEVNOSŤ MATERIÁLU**

Pevnosť, všeobecne určená prostou pevnosťou v tlaku, sa udáva obvykle v MPa. Sledovanie pevnosti materiálu má význam pri degradácii častíc pri hydraulickej a pneumatickej doprave, používa sa však aj pri posudzovaní veľkostí prevádzkových tlakov v potrubí pri diaľkovej hydraulickej doprave. Väčšina dopravovaných materiálov (uhlie, piesok) z hľadiska pevnosti vyhovuje požiadavkám potrubnej dopravy. U niektorých mäkkších materiálov (íl, hlina) môže v dôsledku zvýšeného tlaku nastať oddeľovanie jednotlivých častí materiálu, čo nemusí byť závadné. Pevnosť dopravovaného materiálu má však zásadný význam pri zhodnotení abrázie potrubia. [1][2]



Poř. čís.	Materiál	Pevnost - $p^*$ [MPa]	Hustota - $\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup> ]	Nasákavost - $\omega^*$ [%]
1	čedič	$p^* > 200$	$2,8 < \rho_p < 3,1$	$0,04 < \omega^* < 0,80$
2	křemenec		2,6 2,8	0,10 1,20
3	železná ruda		3,5 4,0	0,04 0,75
4	trachyt	$160 < p^* < 200$	2,0 2,7	0,50 4,60
5	žula		2,5 2,9	0,10 0,70
6	dolomit	$120 < p^* < 160$	1,8 2,2	0,15 4,50
7	rula		2,6 2,8	0,10 0,70
8	magnezit	$80 < p^* < 120$	3,0 3,4	0,12 1,50
9	písek		2,5 2,7	0,30 4,20
10	pískovec		2,2 2,4	0,30 2,20
11	sádrovec		2,0 2,2	0,60 4,80
12	slín. opuka		1,9 2,6	1,70 9,60
13	štěrk		2,5 2,7	0,30 2,10
14	uhlí černé	$40 < p^* < 80$	1,2 1,4	2,20 7,30
15	uhlí hnědé		1,1 1,3	4,50 9,90
16	lignit		1,1 1,3	8,80 20,00
17	struska		2,0 2,9	1,20
18	antracit	$40 > p^*$	1,6 1,8	2,80 6,50
19	hlína		1,6 2,0	3,00 15,00
20	jíl		2,4 2,9	4,50 18,00
21	kaolín		2,4 2,6	4,80 14,00
22	popílek		1,4 2,6	3,00 15,50
23	sůl kamenná		2,1 2,2	
24	uhelný kal		1,1 1,3	4,70 12,00
25	vodárenský kal		1,0 1,2	

Obr. 1.3 Pevnost, hustota a nasiakavost materiálov [1]

### 1.1.4 KRIVKA ZRNITOSTI

Pri stanovení krivky zrnitosti sa určí percento obsahu zrn rôznej veľkosti, z ktorých je sypký materiál zložený. Takto určené hodnoty sa zobrazia do grafu, ktorý udáva hmotnosť zrn menších ako určitý priemer v percentách celkovej hmotnosti pôvodného vzorku. Pri konštrukcii krivky zrnitosti sa na vodorovnú osu v logaritmickej mierke vynesie priemer zrn v mm a na zvislú os sa vynesie podiel zrn v % celkovej hmotnosti vzorku. Krivka zrnitosti je teda v podstate súčtová čiara percentuálneho podielu zrn rôznej veľkosti. [1][2]

V niektorých prípadoch je výhodné používať pre zostrojenie krivky zrnitosti graf podľa Rozina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta. Menovaní autori na základe množstva zrnitostných rozborov stanovili zrnitostný zákon. [1][2]

$$R = 100 \cdot \exp(-b \cdot d^n) \quad (1.5)$$

Medzi sedimentačné metódy založené na odpore pri pohybe častice v kľudnej kvapaline patrí usadzovanie. Sedimentačné rýchlosti sa počítajú podľa lineárneho Stokesovho zákona za predpokladu, že merná hmotnosť častíc je vyššia ako merná hmotnosť kvapaliny. Pohyb guľovej častice je zo začiatku nerovnomerný a až po určitej dráhe sa rýchlosť vyrovná a ostane konštantná. Táto metóda je obmedzená koncentráciou suspenzie, ktorá by nemala byť vyššia ako 35g dispergovaných častíc v 1 litri vody.[1][2]

### 1.1.5 MERNÝ POVRCH ZRNA

Z diagramu RRSB je možné určit merný povrch zrna, tj. plochu povrchu zrna o hmotnosti jedného gramu. Ak má častica guľový tvar, bude jej merný povrch  $O_0$  a merný povrch neguľovej častice bude: [2]

$$O = \frac{k \cdot \rho_v}{\rho_p} \cdot O_0 \quad (1.6)$$

### 1.1.6 STREDNÁ VEĽKOSŤ ZRNA

Samostatnú časticu materiálu je možné charakterizovať najväčším, najmenším, alebo niektorým stredným priemerom. Rozmer jednotlivých častíc prichádza do úvahy jedine pri určovaní sedimentačnej rýchlosti. Pri posudzovaní fyzikálnych vlastností suspenzií pomocou veľkosti častíc máme na mysli rozmerové charakteristiky všetkých jednotlivých častíc tvoriacich suspenziu, pričom tieto určujú rozmerové charakteristiky celej hmoty. [1][2]

Pre posudzovanie rozmerových charakteristík sa používajú nasledujúce parametre:

#### Ekvivalentný priemer

-priemer gule, ktorej objem je rovnaký ako objem častice.

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_{pN}}{\pi \cdot \rho_p \cdot N}} \quad (1.7)$$

#### Efektívny priemer

-priemer gule, ktorá má rovnakú sedimentačnú rýchlosť ako daná častica.

-závisí na mernej hmotnosti, rozmeroch a konfigurácii častice a na stave jej povrchu

#### Stredný aritmetický priemer

-najrozšírejšia charakteristika častice

$$d_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i \cdot d_i}{N} \quad (1.8)$$

#### Stredný logaritmickej priemer

-jeho hodnota pre rovnakú vzorku je menšia ako hodnota stredného aritmetického priemeru

$$\log d_g = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \log d_i}{N} \quad (1.9)$$

Nerovnorodosť dopravovaného materiálu má veľký vplyv na vytváranie prúdu a na jeho kinematické a dynamické vlastnosti. Vzniká tak nutnosť definície nerovnorodosti materiálu spolu s možnosťou jej zavedenia do výpočtových rovníc. Nerovnorodosť materiálu je definovaná číslom nerovnorodosti materiálu  $d^*$ . Pre materiály rovnorodé platí, že  $d^* < 5$ , a pre materiály nerovnorodé  $d^* > 15$ . [1][2]

$$d^* = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.10)$$

## 1.2 VLASTNOSTI SUSPENZIÍ

Medzi základné vlastnosti hydrozmesí (a disperzných sústav všeobecne) patrí najmä koncentrácia, viskozita a rýchlosť suspenzie. Dôležitým parametrom je aj typ disperznej sústavy, skupenstvo jednotlivých zložiek a kinetická stálosť sústavy. [1][2]

Suspenze	Velikost částic d (mm)	Kinetická stálost	Charakteristika pohybu a částic
analytická	$d \leq 10^{-6}$	stálá	intenzivní tepelný pohyb, částice amikroskopické
koloidní	$10^{-6} < d \leq 5 \cdot 10^{-3}$		intenzivní Brownův pohyb, částice submikroskopické
strukturní	$10^{-3} < d \leq 5 \cdot 10^{-2}$	nestálá	slabý Brownův pohyb, částice mikroskopické
jemnozrnná	$5 \cdot 10^{-2} < d \leq 2 \cdot 10^{-1}$		působí převážně vnější silové pole,
hrubodisperzní	$2 \cdot 10^{-1} < d \leq 2 \cdot 10^0$		částice makroskopické
heterogenní	$d > 2 \cdot 10^0$		

Obr. 1.4 Rozdelenie suspenzií podľa veľkosti dispergovaných častíc [1]

### 1.2.1 KONCENTRÁCIA

Koncentrácia je definovaná ako pomer medzi pevnou a kvapalnou fázou suspenzie. Tento pomer môže byť vyjadrený ako pomer objemov alebo hmotností, pričom najčastejšie používaná je objemová koncentrácia definovaná podľa ČSN 01 1320:

$$c_v = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_p - \rho_v} \quad (1.11)$$

Ďalšie vlastnosti suspenzie, ako konzistencia a kalnosť, sú na koncentrácii závislé a ich vzájomné vzťahy a definície podľa ČSN 01 1320 zobrazuje tabuľka Tab.1.2.1.

Čís.	Název	Označení	$C_v$	$C_m$	$k_v$	$k_m$	$c$	
1	objemová koncentrace	$C_v$	$\frac{V_p}{V_s}$	$\frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_p - \rho_v}$	$C_m \frac{\rho_s}{\rho_p}$	$k_v \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_p - \rho_v}$	$k_v \frac{\rho_p - \rho_s \rho_p}{\rho_p - \rho_v \rho_s}$	$\frac{c}{\rho_p}$
2	hmotnostní koncentrace	$C_m$	$\frac{m_p}{m_s}$	$C_v \frac{\rho_p}{\rho_s}$	$\frac{\rho_s - \rho_v \rho_p}{\rho_p - \rho_v \rho_s}$	$k_v \frac{\rho_p - \rho_s \rho_p}{\rho_p - \rho_v \rho_s}$	$k_v \frac{\rho_p - \rho_s \rho_v}{\rho_p - \rho_v \rho_s}$	$\frac{c}{\rho_s}$
3	objemová konzistence	$k_v$	$\frac{V_p}{V_v}$	$C_v \frac{\rho_p - \rho_v}{\rho_p - \rho_s}$	$C_m \frac{\rho_p - \rho_v \rho_s}{\rho_p - \rho_s \rho_p}$	$\frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_p - \rho_v}$	$k_m \frac{\rho_v}{\rho_p}$	$c \frac{\rho_p - \rho_v}{\rho_p(\rho_p - \rho_s)}$
4	hmotnostní konzistence	$k_m$	$\frac{m_p}{m_v}$	$C_v \frac{\rho_p - \rho_v \rho_p}{\rho_p - \rho_s \rho_v}$	$C_m \frac{\rho_p - \rho_v \rho_{ps}}{\rho_p - \rho_s \rho_v}$	$k_v \frac{\rho_p}{\rho_v}$	$\frac{\rho_s - \rho_v \rho_p}{\rho_p - \rho_s \rho_v}$	$c \frac{\rho_p - \rho_v}{\rho_v(\rho_p - \rho_s)}$
5	kalnost	$c$	$\frac{m_p}{V_s}$	$C_v \rho_p$	$C_m \rho_s$		$k_v \rho_v \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_p - \rho_v}$	$\frac{\rho_p(\rho_s - \rho_v)}{\rho_p - \rho_v}$

Obr. 1.5 Definícia koncentrácie, konzistencie a kalnosti podľa ČSN 01 1320[1]

Okrem spomenutých vlastností ešte rozlišujeme dopravnú koncentráciu, ktorá udáva pomer objemu dopravovaného materiálu k objemu dopravovanej zmesi.

Maximálna teoretická hodnota koncentrácie sa môže pohybovať do hodnoty  $c \leq 1$ . Teoretické riešenie pre všeobecný tvar a náhodné usporiadanie častíc sa však nedá vyjadriť, preto sa maximálna hodnota stanovuje meraním. [1][2]

## 1.2.2 VIZKOZITA

Väčšina suspenzií má viskozitu väčšiu ako čistá kvapalina. Tento fakt môže byť fyzikálne vysvetlený tým, že pri prúde suspenzie je s procesu disipácie energie vyňatá časť celkového objemu kvapaliny (ktorú zaberajú pevné častice). Hodnoty zmien zložiek rýchlostí, na ktorých je disipácia energie závislá, sa musia zväčšiť úmerne vyčlenenému priestoru. Výsledná disipácia energie však vždy zostáva väčšia ako energia disipovaná za rovnakých podmienok čistou kvapalinou. Podľa toho je teda viskozita suspenzií závislá na viskozite čistej kvapaliny, na koncentrácii pevnej fázy a na tvaru a veľkosti pevných častíc. Vzťah pre výpočet viskozity suspenzie bol odvodený viacerými autormi, z ktorých niektoré interpretácie uvádzam v tabuľke Tab. 1.2.1. [1]

Čís	Autor	Rovnice
1	Einstein	$\mu = \mu_v (1 + 2,5 c_v)$
2	Brinkman	$\mu = \mu_v (1 - c_v)^{-2,5}$
3	Eilere	$\mu = \mu_v \left[ 1 - \frac{1,25 c_v}{1 - 1,28 c_v} \right]^2$
4	Roscoe	$\mu = \mu_v (1 - 1,35 c_v)^{-2,5}$
5	Guth	$\mu = \mu_v (1 + 2,5 c_v + 14,1 c_v^2)$

Obr. 1.6 Výpočet viskozity suspenzií podľa rôznych autorov [1]

### 1.2.3 RÝCHLOSŤ SUSPENZIE

Pre kineticky stále suspenzie je možné disperzum považovať za kontinuálnu látku, ktorej fyzikálne vlastnosti sú určené zlučením vlastností jednotlivých fáz, alebo priamo meraním. Naproti tomu, pre kineticky nestále suspenzie je voľba modelového kontinua so spojitou hmotou možná len za zjednodušujúcich predpokladov, preto sa pre experimentálne overovanie odporúča oddelené riešenie oboch fáz. Pri prúdení disperznej sústavy môžu mať disperzné prostredie a dispergovaná látka rôznu rýchlosť. Z tohto dôvodu je nutné vhodne definovať rýchlosť prúdenia ťažiska nekonečne malého objemu suspenzie obklopujúcej daný bod. [1]

Táto rýchlosť sa obvykle definuje tromi spôsobmi:

- Ako aritmetický priemer rýchlostí oboch fáz vzhľadom k ich objemom

$$v_s = v_p \cdot c_v + v_v \cdot (1 - c_v) \quad (1.12)$$

- Ako aritmetický priemer rýchlostí oboch fáz vzhľadom k ich hmotnostiam

$$v_s = \frac{\rho_p \cdot v_p \cdot c_v + \rho_v \cdot v_v \cdot (1 - c_v)}{\rho_p \cdot c_v + \rho_v \cdot (1 - c_v)} \quad (1.13)$$

- Ako priemer kinetickej energie oboch fáz

$$v_s = \sqrt{\frac{\rho_p \cdot v_p^2 \cdot c_v + \rho_v \cdot v_v^2 \cdot (1 - c_v)}{\rho_p \cdot c_v + \rho_v \cdot (1 - c_v)}} \quad (1.14)$$

Podľa niektorých autorov nie je možné zavádzať do výpočtu rýchlosť disperznej sústavy ako celku, pretože je to fiktívna veličina. Preto je niekedy nutné vyjadriť rýchlosť pomocou skutočných rýchlostí oboch fáz. [1]

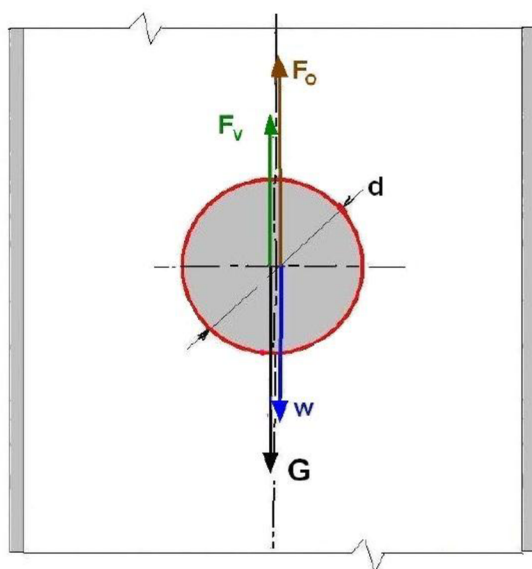
## 1.3 PRÚDENIE SUSPENZIÍ

Výpočet základných hydrodynamických parametrov prúdenia disperzných sústav je podmienené znalosťou prúdenia individuálnych častíc. Vzhľadom na náročnosť výpočtu sedimentačnej rýchlosti častice všeobecného tvaru, stanovuje sa najprv rýchlosť padania

hladkej gule v kludnej kvapaline, vyplňujúcej nekonečne veľký polopriestor. Takto vyjadrenú sedimentačnú rýchlosť je potrebné korigovať vzhľadom na nekulovitý tvar častice, stiesnené padanie a sedimentáciu pri koncentrácii  $c_v$  (tzv. sedimentácia mraku). [1][2]

### 1.3.1 SEDIMENTAČNÁ RÝCHLOSŤ

Na časticu, charakterizovanú priemerom  $d$ , pohybujúcu sa v kvapaline charakterizovanej hodnotami  $\rho_v$  a  $\mu$ , pôsobí tiažová sila  $G$ , vztlak  $F_v$  a odpor častice proti pohybu  $F_o$ .



Obr. 1.7 Sily pôsobiace na časticu pri sedimentácii [1]

Za predpokladu, že sa častica pohybuje rovnomernou rýchlosťou  $w_o$  (zotrvačná sila  $F_s$  je nulová), pre rovnováhu síl platí:

$$G = F_v + F_o \quad (1.15)$$

Po dosadení a úpravách dostávame vzťah pre sedimentačnú rýchlosť v tvare:

$$w_o = \sqrt{\frac{4 \cdot d \cdot (\rho_p - \rho_v) \cdot g}{3 \cdot c_{x0} \cdot \rho_v}} \quad (1.16)$$

Sedimentačná rýchlosť jednej guľovej častice závisí na priemere častice, súčiniteľovi odporu, mernej hmotnosti častice, mernej hmotnosti a väzkosti kvapaliny a na režime obtekania.

Vzhľadom k veľkosti Reynoldsovho čísla sedimentácie  $Re_w$  definujeme tri režimy obtekania:

- **Laminárny režim**,  $Re_w < 1$ ;

$$w_o = \frac{d^2 \cdot (\rho_p - \rho_v) \cdot g}{18 \cdot \nu \cdot \rho_v} \quad (1.17)$$

Tento režim, popísaný Stokesovým zákonom, platí pre gule o malých priemeroch, ktoré sú obtekané bez vzniku vírov a ich odtrhávaniu za guľami. Dráhy klesania guľí sú priamkového charakteru a sú rovnobežné s osou sedimentačnej nádoby.

- **Prechodový režim**,  $1 < Re_w < 1550$

$$w_o = \left(\frac{3}{4 \cdot a}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{[g \cdot (\rho_p - \rho_v)]^{\frac{2}{3}}}{(\mu \cdot \rho_v)^{\frac{1}{3}}} \quad (1.18)$$



Tento režim, popísaný Allenovým zákonom, je charakteristický rôznorodosťou sedimentačných trás, vzhľadom na veľkosť Reynoldsovho čísla. Pri  $Re_w < 5$  sa za guľami tvoria víry, ktoré sa však neodtrhávajú a dráhy guľí sú takmer priamkové s veľmi malým odklonom od zvislice. Pri  $5 < Re_w < 25$  je možné za guľami pozorovať stále víry, ktoré sa však neodtrhávajú. Dráhy guľí sú krivočiare a začínajú sa odkláňať od zvislice. U  $25 < Re_w < 350$  je možné pozorovať odtrhnutie jednotlivých vírov a väčšie zvlnenie sedimentačnej dráhy. Pri  $350 < Re_w < 1550$  je za guľami pozorovateľné nepretržité odtrhnutie vírov, pričom sedimentačné dráhy sú vlnovité a prechádzajú k skrutkoviciam.

- **Turbulentný režim,  $Re_w > 1550$**

$$w_o = \sqrt{\frac{4 \cdot d \cdot (\rho_p - \rho_v) \cdot g}{3 \cdot 0,44 \cdot \rho_v}} \quad (1.19)$$

Za guľami je možné pozorovať hromadné odtrhnutie vírov v tvare Karmanovej vírovej cesty, samostatné dráhy guľí majú tvar skrutkovice s veľkým odklonom od zvislice. Režim je popísaný Newton-Rittingerovým zákonom.

Čís.	Autor	Rovnice	Rozsah $Re_w$
1	Stokes	$c_{x0} = 24 Re_w^{-1}$	$10^{-4} \div 0,2$
2	Allen	$c_{x0} = k Re_w^{-0,5}$	$10 \div 10^3$
3	Goldstein	$c_{x0} = \frac{12}{Re_w} \left[ 1 + \frac{3}{16} Re_w - \frac{19}{1280} Re_w^2 + \dots \right]$	$< 2$
4	Schiller	$c_{x0} = 12 Re_w^{-1} \left[ 1 + 0,15 Re_w^{0,687} \right]$	$< 800$
5	Fair a Geyer	$c_{x0} = 24 Re_w^{-1} + 3 Re_w^{-0,5} + 0,34$	$0,5 \div 10^4$
6	Bird	$c_{x0} = 18,5 Re_w^{-\frac{3}{5}}$	$2 \div 5 \cdot 10^2$
7	Newton	$c_{x0} = 0,44$	$550 \div 2 \cdot 10^5$

Obr. 1.8 Najpoužívanejšie rovnice pre výpočet súčiniteľa odporu guľovej častice [1]

Keďže výpočet sedimentačnej rýchlosti závisí od Reynoldsovho čísla sedimentácie (ktoré závisí od rýchlosti sedimentácie), je pre výpočet potrebný predbežný odhad charakteru prúdenia a následné aproximovanie uvedenými rovnicami. Pre zjednodušenie výpočtu sedimentačných rýchlostí sa používa grafická závislosť tzv. Archimedovho čísla a Reynoldsovho čísla.

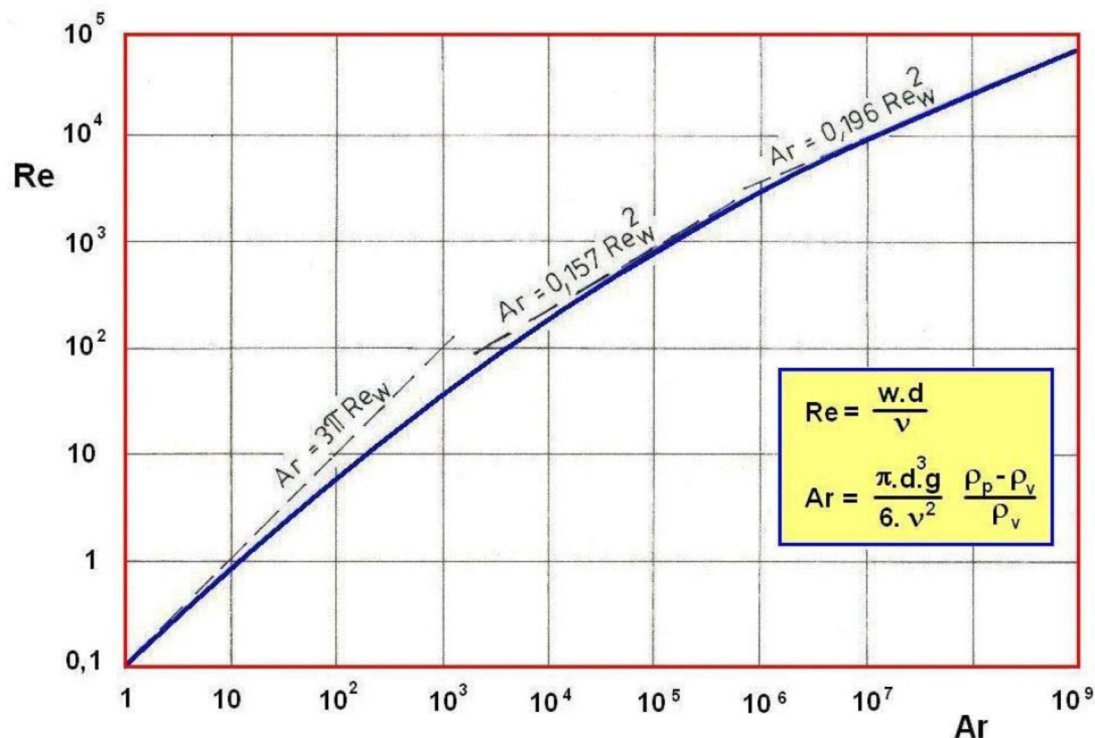
Archimedovo číslo je bezrozmerné číslo, vyjadrené z fyzikálnych konštánt sústavy.

$$Ar = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot g}{6 \cdot \nu^2} \cdot \frac{\rho_p - \rho_v}{\rho_v} \quad (1.20)$$

Reynoldsovo číslo je funkciou sedimentačnej rýchlosti.

$$Re_w = \frac{w_o \cdot d}{\nu} \quad (1.21)$$

Ak teda poznáme fyzikálnu charakteristiku suspenzie, môžeme z grafickej závislosti jednoducho odčítať veľkosť Reynoldsovoho čísla a určiť tým typ prúdenia a veľkosť sedimentačnej rýchlosti. Pri tomto postupe nie je potrebný aproximačný výpočet a je teda jednoduchší a časovo menej náročný. [1][2]



Obr. 1.9 Závislosť Reynoldsovoho a Archimedovho čísla [1]

### 1.3.2 SEDIMENTAČNÁ RÝCHLOSŤ V OBMEDZENOM PROSTREDÍ

Na rozdiel od sedimentácie v nekonečnom priestore, sa pri usadzovaní v nádobe o konečných rozmeroch nemôže rýchlostný profil plne vyvinúť. V praktických prípadoch dochádza k tzv. padaniu, kde je súčiniteľ odporu ovplyvnený stenami nádoby. Vplyv valcovej sedimentačnej nádoby o priemere  $D$  na sedimentačnú rýchlosť sa dá vyjadriť ako:

$$w_* = w_o \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (1.22)$$

Ďalším problémom je usadzovanie častíc v zhluku, alebo v tzv. mraku. V dôsledku blízkosti častíc sa nemôže medzi nimi plne rozvinúť rýchlostný profil, prípadne častice koagulujú a ich sedimentačná rýchlosť potom nezávisí na priemere jednotlivých častíc, ale na priemere zhluku častíc. Vzorce, ktoré danú problematiku zohľadňujú, sú prevažne empirické a ich platnosť je obmedzená na lineárny zákon odporu.

Dosadzovaním a úpravami môžeme z rovnice continuity odvodiť vzťah medzi sedimentačnou rýchlosťou jednej častice  $w$  a sedimentačnou rýchlosťou súboru častíc  $w_c$  o koncentracii  $c$ .

$$w_c = w \cdot (1 - c)^\beta \quad (1.23)$$

Exponent  $\beta$  predstavuje konštantu úmernosti zahrnujúcu vplyv nerovnomerného rozloženia rýchlosti kvapaliny po pridaní nových častíc, určuje sa meraním. [1][2]



Čís.	Autor	Rovnice	Platnosť	Poznámky
1	Loeffer Ruth	$w_c = w \left[ \frac{1}{1-c_v} + \frac{2kc_v}{(1-c_v)^3} \right]^{-1}$	$c_v < 0,35$	$k = \text{exp.}$ konstanta
2	Oliver	$w_c = w(1-k_1c_v) \left( 1 - k_2c_v^{\frac{1}{3}} \right)$	$c_v < 0,4$	$k_1, k_2 = \text{exp.}$ konstanta
3	Richardson Meikl	$w_c = 0,149w \frac{(1-c_v)^3}{c_v}$	$c_v < 0,4$	
4	Richardson Zaki	$w_c = w(1-c_v)^m$	$c_v < 0,3$ $Re_v < 0,2$	$m = 4,8$
5	Robinson	$w_c = \frac{kd^2(\rho_p - \rho_v)g}{\mu}$	$c_v < 0,4$	$\mu = \text{viskozita}$ suspenze $k = \text{konstanta}$
6	Rouse	$w_c = \frac{w}{b} \left[ 1 - \left( \frac{c_v}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$	$c_v < 0,3$	$a, b = \text{exp.}$ konstanta
7	Steinour	$w_c = 0,123 \frac{w(1-c_v)^3}{c_v}$	$0,3 < c_v < 0,7$	
8	Thomas	$w_c = w \exp(-5,9c_v)$	$c_v < 0,43$	
9	Maude	$w_c = w(1-c_v)^\beta$		$\beta = f(Re_w)$

Obr. 1.10 Rovnice pre výpočet sedimentčnej rýchlosti mraku [1]

### 1.3.3 PRÚDENIE HYDROZMESI VO VERTIKÁLNO M POTRUBÍ

Rozdiel medzi sedimentáciou v stojacej kvapaline a v kvapaline prúdiacej v potrubí spočíva v tom, že súčiniteľ čelného odporu je závislý na režime prúdenia kvapaliny. Vzhľadom na to, že prúdenie vody a plynov je vo väčšine prípadov turbulентné, nemusí byť hodnota sedimentačnej rýchlosti a rýchlosti vznosu rovnaká. Tieto rýchlosti sú si rovné iba ak je obtekanie laminárne.

Pre rovnováhu síl pri prúdení vo vertikálnom potrubí platí:

$$F_o - G + F_v + F_d = 0 \quad (1.24)$$

Zanedbaním vztlakovej (za predpokladu, že  $\rho_p \gg \rho_v$ ) a dynamickej sily (uvažujeme ustálené prúdenie) dostávame:

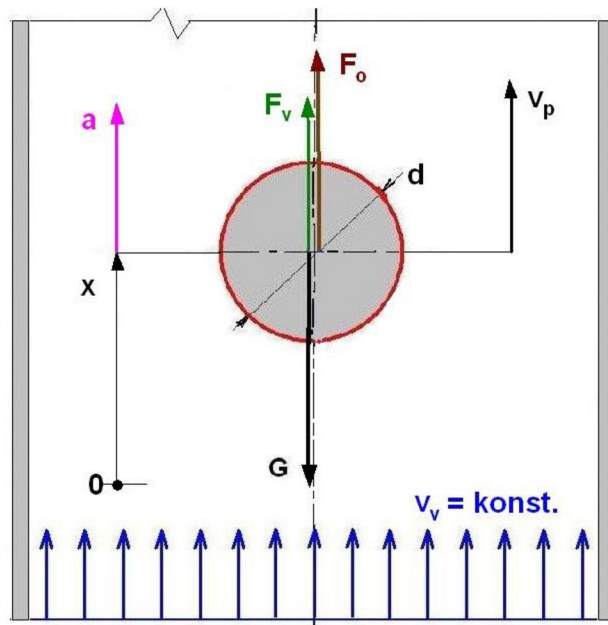
$$F_o = G \quad (1.25)$$

Dosadením a úpravami dostávame rovnicu pre rýchlosť vznosu formálne totožnú s rovnicou pre sedimentačnú rýchlosť.

$$w = \sqrt{\frac{4 \cdot d \cdot \rho_p \cdot g}{3 \cdot c_{xv} \cdot \rho_v}} \quad (1.26)$$

Konečná rychlost pevné častice za rovnovážného stavu je teda definovaná:

$$v_p = v_v - w \quad (1.27)$$



Obr. 1.11 Rovnováha síl pri vznose častice [1]

Rozdielnosť rýchlostí vznosu rôzne veľkých častíc je možné využiť v triediacom procese, kedy rýchlosť nosného média vo vertikálnom potrubí bude regulovaná tak, aby vo vznose ostali iba častice s určitým (alebo menším) priemerom a zvyšné sa usadili na spodku vertikálnej časti potrubia. Pri hydraulickej a pneumatickej doprave je však potrebné voliť takú rýchlosť nosného média, aby absolútna rýchlosť všetkých častíc bola kladná ( $v_v - w > 0$ ). [1][2]

### 1.3.4 PRÚDENIE HYDROZMESI V HORIZONTÁLNOU POTRUBÍ

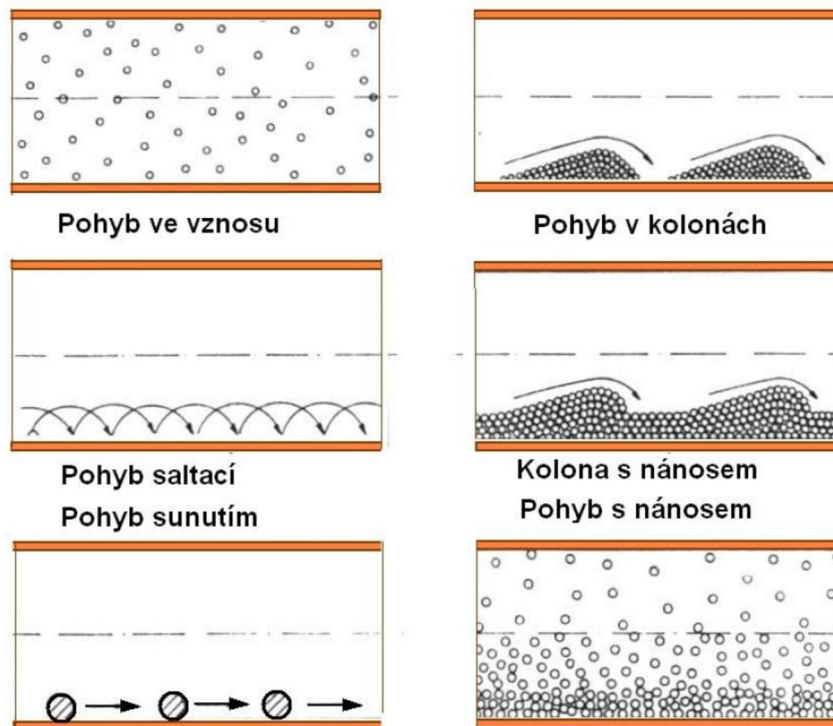
Pri pohybe suspenzie vo vertikálnom potrubí kruhového prierezu môžeme rozlíšiť nasledujúce druhy pohybu jednotlivéj pevnéj častice:

- Pohyb vo vznose ( $\rho_p = \rho_v$ ); týka sa prevažne štruktúrnych a jemnozrnných suspenzií
- Pohyb saltáciou (skokom); častice sa po určitej dráhe odrážajú od steny nádoby alebo nánosovej vrstvy
- Klzavý pohyb; častice sa pohybujú po dne potrubia jednotlivito alebo vo vrstvách

Z hľadiska prúdu suspenzie ako celku rozlišujeme pohyb v suspenzii bez nánosovej vrstvy, pohyb lavíc po dne potrubia, pohyb lavíc s nánosovou vrstvou a nánosovú vrstvu s klzným povrchom. Toto rozdelenie pohybov má význam pri určovaní tlakového spádu a koncentrácie. Nepriame vplyvy pohybu sa prejavujú na degradácii dopravovaného materiálu a dopravnej trasy.

Pri doprave polydisperznej suspenzie vznikajú jednotlivé pohyby iba v rámci daných zrnitostných frakcií, takže výsledný pohyb môže byť zložitý. Pri znižovaní rýchlosti prúdenia začnú z prúdu najprv vypadávať častice s najväčším priemerom a začnú sa po dne potrubia pohybovať saltáciou. Naproti tomu, že veľké častice sa začnú ako prvé pohybovať saltáciou, k ich usadeniu na dne potrubia dochádza za nižších rýchlostí ako je tomu u menších častíc.

Práve neskoršie usadzovanie väčších častíc je dôvod, prečo pre uvedenie častíc do vznosu je potrebná vyššia rýchlosť prúdenia, ako je potrebná pre ich udržanie vo vznose.



*Obr. 1.12 Základné druhy pohybu materiálu v potrubí [1]*

Prítomnosť pevných častíc má zároveň vplyv na kinematiku a dynamiku prúdenia a prejavuje sa najmä tým, že sa zväčšuje vnútorné trenie suspenzie, znižuje veľkosť turbulentných pulzácií a klesá intenzita turbulencie. [1][2]

---

## 2 ČERPADLÁ

Medzi náročné požiadavky, kladené na čerpadlá hydraulickéj dopravy, patrí odolnosť voči erozívnym účinkom dopravovanej zmesi, veľký rozsah požadovanej dopravnej výšky, možnosť čerpať zmes vody a materiálu o veľkosti zrn až 100 mm, možnosť čerpať zmes o vysokej koncentrácii a dobrá účinnosť čerpadla.

Podľa veľkosti prevádzkového tlaku delíme hydraulickú dopravu na vysokotlakovú a nízkotlakovú. Nízkotlakovú dopravu, zväčša na vzdialenosť do troch kilometrov, zabezpečujú jednostupňové bagrovacie čerpadlá, ejektory, alebo ich kombinácie. Hydraulická doprava na vzdialenosť desiatok kilometrov a výšku stoviek metrov je zabezpečovaná vysokotlakovou dopravnou linkou, pozostávajúcou z viacstupňových čerpadiel, piestových čerpadiel alebo z dávkovačov rôznych konštrukcií. [1][2]

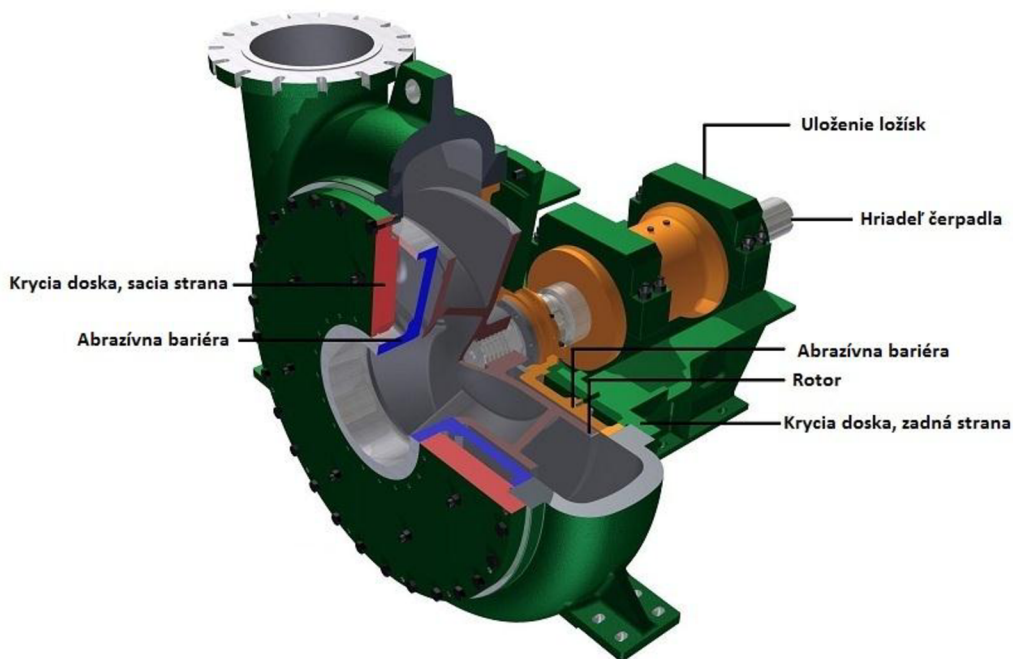
### 2.1 CHARAKTERISTIKA ČERPADLA

Je rozhodujúcim dokumentom dodávaným výrobcom pre voľbu čerpadla splňujúceho nároky na dopravu kvapaliny. Prietok a tlak sú u čerpadiel navzájom nezávislé veličiny. Pri stálych otáčkach čerpa čerpadlo veľký objem vody pri nízkom tlaku, alebo malý objem pri vysokom tlaku. Vzájomnú závislosť prietoku a dopravnej výšky vyjadruje charakteristika čerpadla. Z charakteristiky je možné získať tlak čerpadla pri určitých otáčkach a určitom prietoku čerpanej kvapaliny. [2][4]

### 2.2 BAGROVACIE ČERPADLÁ

Bagrovacie čerpadlá sa v hydraulickéj doprave hojne využívajú, najmä vzhľadom na ich jednoduchosť a nízke investičné náklady. Principiálne pracujú rovnako ako bežné odstredivé čerpadlá s tým rozdielom, že bagrovacie čerpadlo je konštrukčne usporiadané k čerpaniu zmesi s veľkým obsahom pevných častíc. Vzhľadom na riziko upchávania a prílišného opotrebenia nemajú bagrovacie čerpadlá rozvážacie koleso, ale špirálu. Toto riešenie má však za následok zníženie účinnosti čerpadla, ktorá sa tým pohybuje 10-20% pod účinnosťou bežných odstredivých čerpadiel. Obežné koleso musí mať z dôvodu bezpečného prechodu materiálu dostatočne široké kanály, čo vedie k menšiemu počtu lopatiek. Obežné kolesá bagrovacích čerpadiel sú bežne vybavené dvomi až tromi lopatkami, čo má tiež podiel na nízkej účinnosti. Malý počet lopatiek zároveň nedovoľuje stavať viacstupňové čerpadlá, ktoré sú bežné pri čerpaní čistej vody. Bagrovacie čerpadlá tak vo väčšine prípadov ostávajú jednostupňové, vo výnimočných prípadoch dvojstupňové.

V dôsledku dopravy abrazívneho materiálu bývajú najnamáhanejšie časti čerpadla (obežné koleso, špirála, tesniace plochy) vyrobené z kvalitných oderuvzdorných materiálov. Pre jednoduchú a častú vymeniteľnosť opotrebených častí sú bagrovacie čerpadlá konštruované s vertikálne delenou špirálnou skriňou.



Obr. 2.1 Hlavné časti bagrovacieho čerpadla [14]

Sacia výška týchto čerpadiel bežne nepresahuje 5 m, zatiaľ čo výtlačná výška dosahuje až 170 m pri objemovom prietoku  $23.5 \text{ m}^3/\text{min}$ , prípadne 90 m výtlačnej výšky pri prietoku  $165 \text{ m}^3/\text{min}$ . Vyššia potrebná dopravná výška vedie, vďaka nemožnosti stavať viacstupňové čerpadlá, k budovaniu finančne a prevádzkovo náročných prečerpávacích staníc. [1][2][14]

## 2.3 VYSOKOTLAKOVÉ ODSREDIVÉ ČERPADLÁ

V hydraulickej doprave sa vysokotlakové odstredivé čerpadlá používajú hlavne pre čerpanie jemnozrnných materiálov (uhlie, uholný kal) na veľké vzdialenosti (alebo veľké geodetické výšky) a pre čerpanie čistej vody pre dopravu dávkovačmi. Čerpadlá pre čerpanie jemnozrnných hydrozmesí vyžadujú použitie oderuvzdorných materiálov na najopotrebovanejšie časti (obežné koleso, rozvádzacie koleso, tesnenia). Pre dopravu čistej, prípadne mierne znečistenej vody pre dávkovače plne vyhovujú napríklad banské čerpadlá.

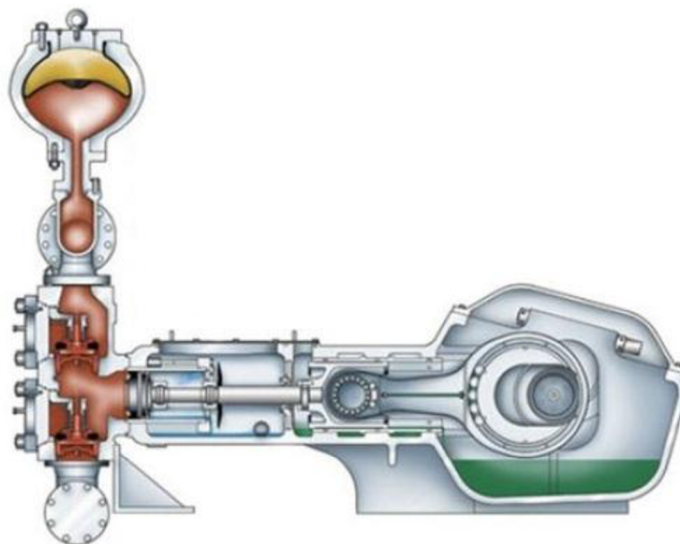
Tieto čerpadlá dosahujú prietoku  $15 \text{ m}^3/\text{min}$  pri dopravnej výške do 900 m pri použití desiatich stupňov, pričom maximálna veľkosť zrna môže byť až 30 mm. [2]

## 2.4 PIESTOVÉ ČERPADLÁ

Vhodnosť týchto čerpadiel je obmedzená malou veľkosťou dopravovaných častíc (3-6 mm), nízkou abrazivitou a hustotou suspenzie do  $1,5 \text{ t}/\text{m}^3$ . Keďže sa piestové čerpadlá často využívajú na čerpanie výplachu pri hlbinnom vŕtaní, nazývajú sa tiež výplachové čerpadlá. Piesty a ventily výplachových čerpadiel sú síce pogumované pre zvýšenie životnosti, ale niektoré časti napriek tomu podliehajú rýchlej degradácii (piesty, ventily, valce, sedlá ventilov). V posledných rokoch bolo podstatné zvýšenie životnosti dosiahnuté nahradením gumených polyuretánom a preplachovaním ventilov, sediel a plunžrov čistou vodou. Čerpadlá sa



vyznačujú pomalobežnou konštrukciou, kde menovité otáčky dosahujú približne  $50 - 60 \text{ } 1/\text{min}$ . Variabilita konštrukcií je široká, na trhu sú tak dostupné piestové čerpadlá horizontálne aj vertikálne, dvoj alebo trojpiestové, obvykle dvojčinné, s prevádzkovým tlakom do 12 MPa a objemovým prietokom do  $8,4 \text{ } m^3/\text{min}$ . [1][2]



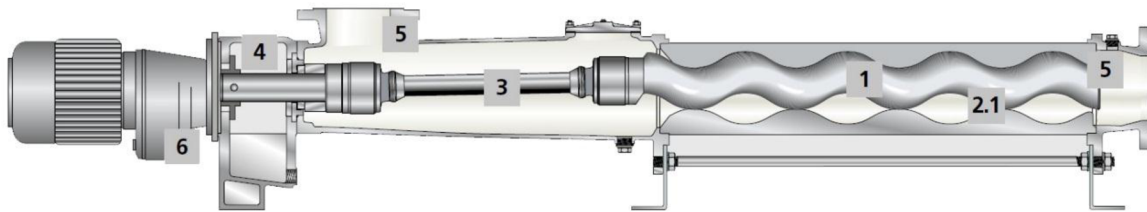
Obr. 2.2 Piestové čerpadlo [1]

## 2.5 KALOVÉ ČERPADLÁ

Tieto čerpadlá sa vyznačujú jednoduchým prevedením, ľahkou montážou a vysokou prevádzkovou spoľahlivosťou. Veľké prietochné prierezy telesa a obežného kolesa umožňujú čerpať zahustené kaly a vláknité látky. Pre dopravu hydrozmesí s obsahom abrazívnych častíc (piesok) je potrebné voliť variantu čerpadla z pancierovej rady, pričom veľkosť zŕn nesmie presiahnuť 5 mm a hustota suspenzie nesmie presiahnuť  $1,2 \text{ } t/m^3$ . V takomto prípade dosahujú kalové čerpadlá veľmi dobré technické parametre, keď umožňujú čerpanie do výšky 60 m s prietokom do  $15 \text{ } m^3/\text{min}$ . [2]

## 2.6 VRETENOVÉ ČERPADLÁ

Pre čerpanie kalov o vysokých koncentráciách je výhodné použiť vretenové čerpadlo. Medzi jednochodovým oceľovým rotorom a dvojchodovým elastickým statorom sa vytvára nepretržitá tesniaca línia, ktorá tesne uzatvára sací a výtlačný priestor čerpadla v každom okamžiku prevádzky a odstávky čerpadla. Pohybom rotora vznikajú medzi statorom a rotorom uzavreté a navzájom oddelené priestory, ktoré sa otáčaním rotora rovnomerne posúvajú v smere stúpania skrutkovice rotora. Vzniká tak kontinuálny prietok čerpanej zmesi bez tlakových pulzácií, ktorý sa mení len v závislosti na otáčkach rotora. Vretenové čerpadlá sa vyznačujú sacou výškou do 9 m, rozsahom operačných teplôt od  $-20^\circ\text{C}$  do  $200^\circ\text{C}$  a dopravnou kapacitou do  $8,5 \text{ } m^3/\text{min}$ . Medzi ďalšie benefity patrí možnosť čerpať hydrozmesí s rôznou viskozitou ( $1 \text{ mPas} - 1 \cdot 10^6 \text{ mPas}$ ) a vysokým podielom pevných častíc (s veľkosťou do 150 mm). [9]



Obr. 2.3 Hlavné časti vretenového čerpadla: 1-Rotor; 2-Stator; 3-Hnací hriadeľ; 4-Tesnenie hriadeľa; 5-Sanie/výtlak; 6-Motor a prevodovka [9]

## 2.7 PIŠKÓTOVÉ ČERPADLÁ

Jedná sa o čerpadlá s pozitívnym posunom a dobrou samonasávacou schopnosťou v bezventilovom prevedení. Sú určené pre kontinuálnu alebo prerušovanú prevádzku a poskytujú čerpanie bez rizika degradácie prepravovanej látky. Medzi hlavné výhody piškótočných čerpadiel patria nízke priestorové nároky, vysoká spoľahlivosť a jednoduchá servisovateľnosť, keďže všetky časti podliehajúce opotrebeniu je možné vymeniť bez potreby demontáže potrubných trás.

Výkon tohto typu čerpadla sa pohybuje od  $0,015 \text{ m}^3/\text{min}$  do  $15 \text{ m}^3/\text{min}$  pri tlaku do 1 MPa a veľkosti častíc do 70 mm. [9]



Obr. 2.4 Princíp funkcie a dizajn piškótového čerpadla [9]

## 2.8 DÁVKOVAČE

Dávkovač je zariadenie, ktoré umožňuje rovnomerný prechod dopravovaného materiálu do dopravného potrubia, v ktorom prúdi nosná kvapalina (voda) pod vysokým tlakom. Dávkovače je z konštrukčného hľadiska možné rozdeliť na trubkové, komorové, rotačné a šnekové. V porovnaní s bagrovacími čerpadlami majú dávkovače výhodu v menšom opotrebení častí čerpadiel, minimálnej degradácii dopravovaného materiálu, väčšej zrnitosti dopravovaného materiálu, vyššej koncentrácii hydrozmesi a vyššom prevádzkovom tlaku. [1][2]

---

## 3 POTRUBIE

Pre hydraulickú dopravu sa najčastejšie používa potrubie z oceľových rúr, ktoré sú z ekonomických dôvodov najvýhodnejšie. V niektorých prípadoch je pre hydraulickú dopravu možné použiť potrubie vyložené vložkami z taveného čadiča. Čadičové vložky, vyrábané odstredivým liatím, sa zapuzdrujú do oceľových trubiek, pričom medzikružie medzi vložkami sa vyplní epoxidovou živinicou. Čadičom vyložené potrubie sa používa zásadne pre nízke tlaky.

Pre dopravu suspenzií s chemickými účinkami sa používa pogumované potrubie, prípadne potrubie z polyetylénu PE100+. [2][10][11]

### 3.1 CHARAKTERISTIKA POTRUBIA

Charakteristika potrubia má tvar paraboly. Jej tvar je závislý predovšetkým na priereze použitého potrubia. Sústava s potrubím o malých priemeroch vytvára strmú charakteristiku, sústava s potrubím veľkých priemerov naopak plochú charakteristiku. Podobne ako pri čerpadlách, charakteristika potrubia vyjadruje závislosť medzi prietokom a dopravnou výškou v potrubí. [1][2]

### 3.2 OCEĽOVÉ POTRUBIE

V hydraulickej doprave najčastejšie používané potrubie je vyrábané s bezšvových oceľových rúr z ocele 11.353.0 podľa normy ČSN 131020. Výpočet dopravného potrubia spočíva v určení hrúbky steny vzhľadom k vnútornému pretlaku s prihliadnutím k vonkajšiemu namáhaniu. Potrubie je počas prevádzky namáhané vnútorným pretlakom, vlastnou tiažou, tiažou dopravovaného materiálu, ohybom medzi podporami a vlastnou tepelnou rozťažnosťou. Ďalšie silové zaťaženie môže vychádzať z nepresností pri výrobe (kruhovitosť prierezu, sústrednosť vonkajšieho a vnútorného priemeru) alebo montáži (nepresné zváranie). [1][2]

### 3.3 POLYETYLÉNOVÉ POTRUBIE

HDPE rúry sú vyrobené z lineárneho vysoko hustotného polyetylénu, inak označovaného aj ako PE, či PEHD. PE materiály musia garantovať tzv. MRS (minimal required strenght), čo je minimálna požadovaná pevnosť materiálu. Tento parameter vyjadruje 50 ročnú životnosť používania rúr pri referenčnom prevádzkovom tlaku a teplote dopravovanej látky 20°C. V praxi je však teoretický prevádzkový tlak znížený o tzv. bezpečnostný koeficient C, prípadne o redukčný koeficient pre vyššiu teplotu média. Polyetylén je totižto materiál s viskozitnoelastickými vlastnosťami, čo znamená, že jeho mechanická odolnosť sa znižuje so zvyšovaním prevádzkovej teploty. HDPE síce dokáže znášať aj teplotu 80°C a dokonca aj jej krátkodobé prekročenie, no pri prevádzke s plným tlakom za vyšších teplôt je potrebné počítať so zníženou životnosťou rúr. Naopak, pri nižších teplotách sa životnosť potrubia predlžuje, pričom ku krehnutiu materiálu dochádza až pri teplotách pod -20°C.





---

polyfúznom zváraní a elektrofúznom zváraní. Tepelným zvaracím procesom sa jednotlivé potrubia stanú jedinou súčasťou pričom platí, že pevnosť zvarového spoja v ťahu je minimálne rovnaká ako pevnosť spájaných rúr. Najpoužívanější postup pre zváranie rúr a tvaroviek rovnakej hrúbky a priemeru je zváranie na tupo. Princíp tejto technológie spočíva v nahriatí koncov rúr tzv. výhrevným zrkadlom, spojením pod predpísaným tlakom a vychladnutím. Medzi rozoberateľné spôsoby spájania HDPE potrubí patrí navarenie prírubových koncoviek rôzneho prevedenia na oba spojované konce a ich následné spojenie šraubami a použitie lisovacej tvarovky. Lisovacia tvarovka, tiež nazývaná ako „rýchlo uvoľniteľné spojenie“ či „svorkové spojenie“, pozostáva z hlavného tela zoskrutkovaného dvomi skrutkami. Tesnosť je zabezpečená elastometrickým tesnením stlačeným mechanickými telesami. [2][10][11]

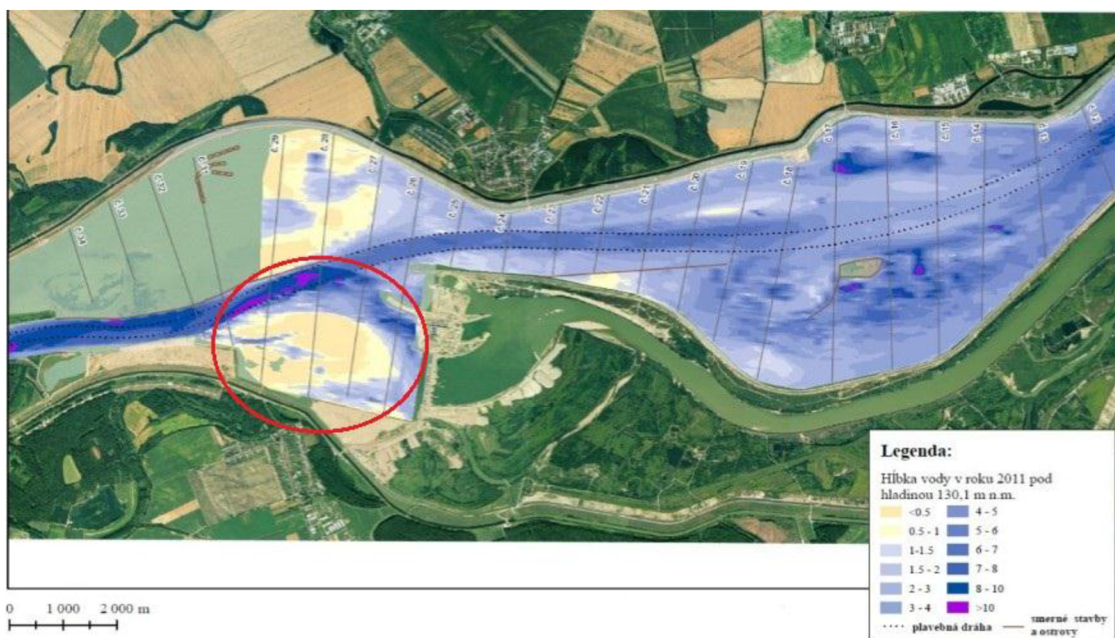
## 4 MERANÝ OBVOD

Praktické meranie samotného čerpadla a potrubnej trasy sa uskutočnilo počas piatich dní (23.10.2013 – 27.10.2013) na vodnej nádrži Gabčíkovo, zdrž Hrušov. Počas týchto dní prebiehala posledná časť tretej fázy ťažby riečnych sedimentov. Ťažba, meranie, zápis dát a ich spracovanie boli prevedené v spolupráci s firmou PROGROUPE Sediment Removal a.s.

### 4.1 ZDRŽ HRUŠOV

Vodné dielo Gabčíkovo-Nagymaros o celkovej vodnej ploche  $46 \text{ km}^2$  bolo do prevádzky uvedené v roku 1992. Hlavnými funkciami vodného diela sú výroba elektrickej energie (720 MW), ochrana územia pred záplavami, zaistenie celoročnej splavnosti Dunaja, zvýšenie kvality podzemnej vody a rekreačný rozvoj územia. Vodné dielo bolo budované od roku 1977 na základe medzinárodnej zmluvy medzi Slovenskom a Maďarskom z roku 1977. Cieľom bolo zabrániť pravidelným záplavám v tejto oblasti (napr. katastrofálne záplavy v rokoch 1954 a 1965). Záplava zasiahla 93 tisíc hektárov, 55 tisíc ľudí bolo evakuovaných, boli zničené domy, cesty, železnice. V roku 1992 Slovensko úspešne dokončilo vodné dielo separátne.

Od dokončenia a uvedenia vodného diela do prevádzky prešlo vyše 20 rokov. Za ten čas sa v zdrži usadzovali sedimenty prinášané prúdom z Rakúska, ale aj sedimenty produkované na území Slovenskej republiky (podmáčanie brehov, prikrmovanie rýb). Postupným usadzovaním stále väčšej vrstvy sedimentov na dno nádrže bola jej kapacita a tým aj schopnosť regulácie vodného stavu značne obmedzená.

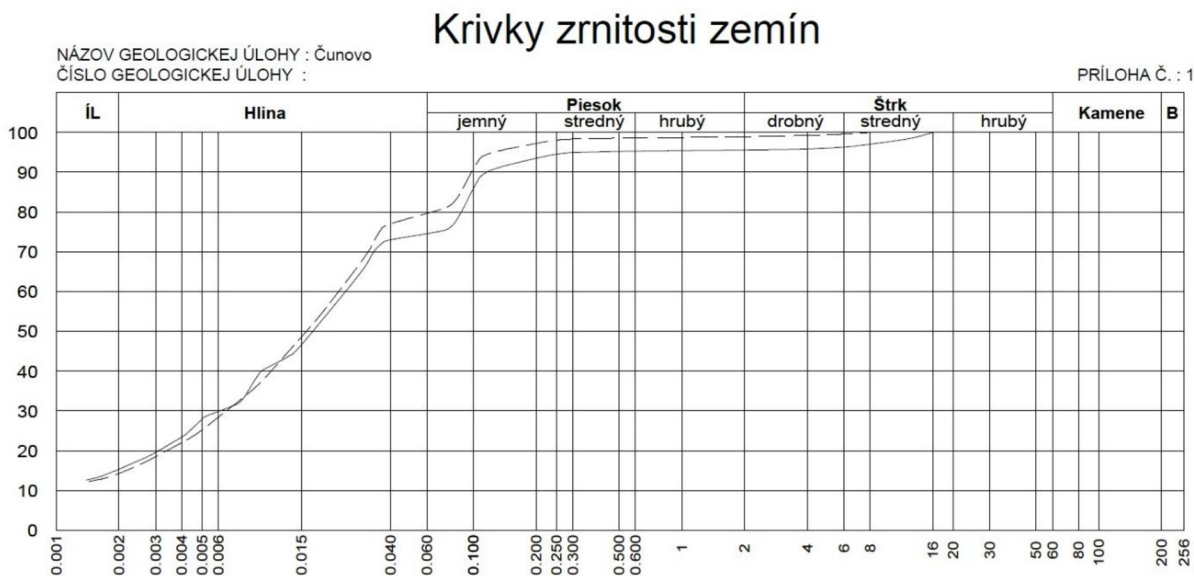


Obr. 4.1 Hĺbka vody v zdrži Hrušov v roku 2011 [13]

Z obrázka Obr. 4.1 je viditeľné, že hĺbka vody dosahuje požadované hodnoty iba v oblasti vytýčenej plavebnej dráhy. Vyznačená oblasť (smerovanie vody na turbíny vodnej elektrárne) je vo väčšine svojej plochy redukovaná na hĺbku menšiu ako 0,5 m.

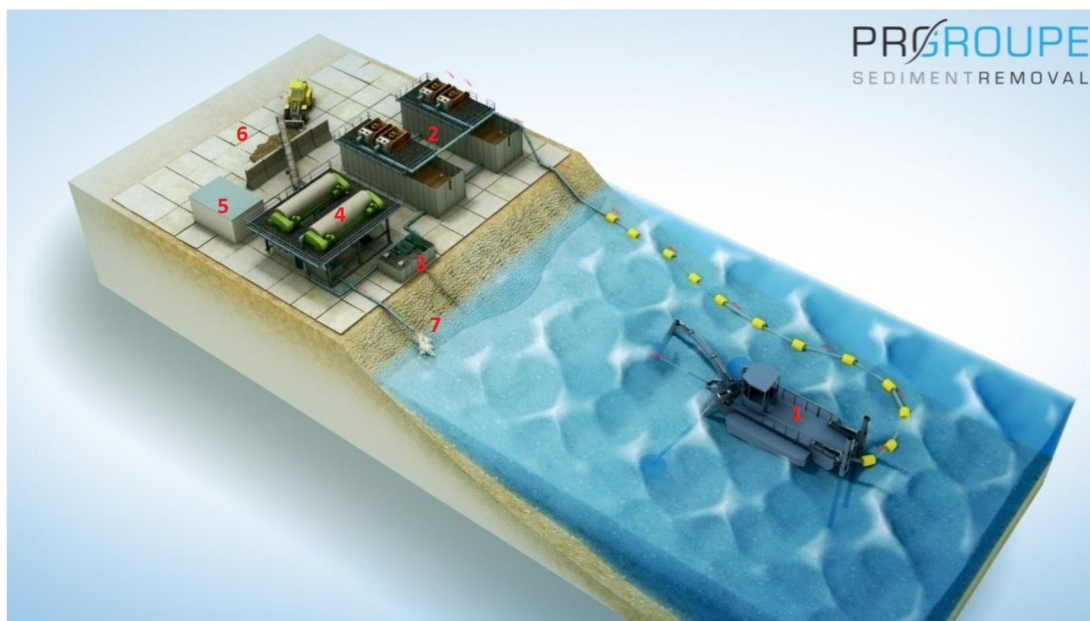
Riešenie spočíva vo vyťažení sedimentov z dna vodnej nádrže. Keďže vzhľadom na charakter zdrže Hrušov (zdrž postavená na rieke Dunaj) nebolo možné vodné dielo vypustiť a sediment vyťažiť suchou cestou (pásovými bagrami), bolo rozhodnuté o ťažbe tzv. mokrou cestou- sacím bagrom.

Na Obr.4.2 uvádzam granulometrický rozbor sedimentu ťaženého zo zdrže Hrušov, vodné dielo Gabčíkovo. [13]



Obr. 4.2 Granulometrický rozbor ťaženého sedimentu z vodnej zdrže Hrušov [12]

## 4.2 TECHNOLÓGIA DESET



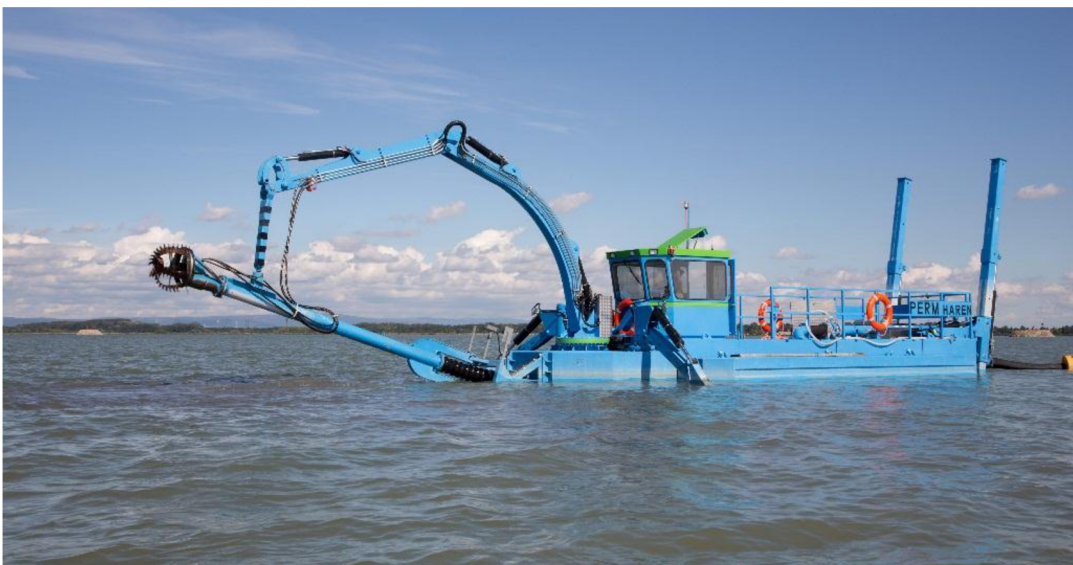
Obr. 4.3 Technológia DESET: 1. Sací bager; 2. Homogenizačné nádrže; 3. Flokulačná stanica; 4. Dekančné odstredivky; 5. Riadiaci systém; 6. Dočasná skládka odvodneného sedimentu; 7. Návrat vyčistenej vody do vodného diela [13]



Technológia DESET (DEwatering SEDiment Technology) je tvorená homogenizačnými nádržami, flokulačnou stanicou, dekančnými odstredivkami a riadiacim elektronickým systémom. Sací bager PERM Haren (model Dredge-King od spoločnosti SenwaTec) používa mechanickú frézu umiestnenú na konci hydraulicky ovládaného ramena na rozrušovanie vrstvy sedimentu. Uvoľnené sedimenty sú spolu s okolitou vodou nasávané masívnou liatinovou rúrou do útrob sacieho bagra, kde je umiestnené bagrovacie čerpadlo. Na výtlaku čerpadla je umiestnené HDPE potrubie s plavákmi, ktoré vedie nasávanú hydrozmes cez vibračné sítá do homogenizačných nádrží. Na vibračných sítach je oddelená najhrubšia časť sedimentu: riečny štrk, kusy organického materiálu a pod. Je snahou dosiahnuť, aby vlnosti hydrozmesi v homogenizačných nádržach boli v čase konštantné. Toto je dôležité pre správne nastavenie dávkovania flokulantov, ktoré znižujú povrchové napätie vody a umožňujú zhlukovanie najmenších častíc sedimentu a tým umožňujú ich oddelenie v dekančnej odstredivke. Technológia DESET používa odstredivky nemeckého producenta Flottweg, ktoré sú svetovo rozšírené vo viacerých oblastiach (potravinársky, ropný priemysel...).

Spojenie medzi sacím bagrom a technologickou jednotkou DESET zaisťuje HDPE potrubie o svetlosti DN200 v celej dĺžke potrubnej trasy. V rámci jednotky DESET sa používa nerezové potrubie, avšak toto z celkovej dĺžky potrubnej trasy tvorí menej ako 1 % dĺžky potrubia, preto budem jeho vplyv považovať za zanedbateľný. Rovnako zanedbateľný vplyv na tlakovú stratu (vzhľadom na dĺžku potrubnej trasy) v potrubí majú celkovo štyri 90°kolená umiestnené v jednotlivých častiach potrubnej trasy (tri na sacom bagri a jedno na pozemnej jednotke DESET). [12]

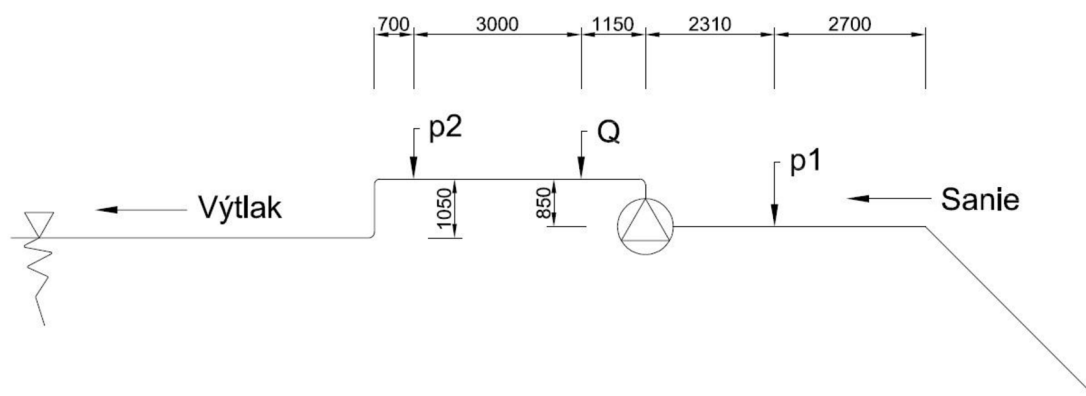
## 4.3 SACÍ BAGER PERM HAREN



*Obr. 4.4 Sací bager PERM Haren [13]*

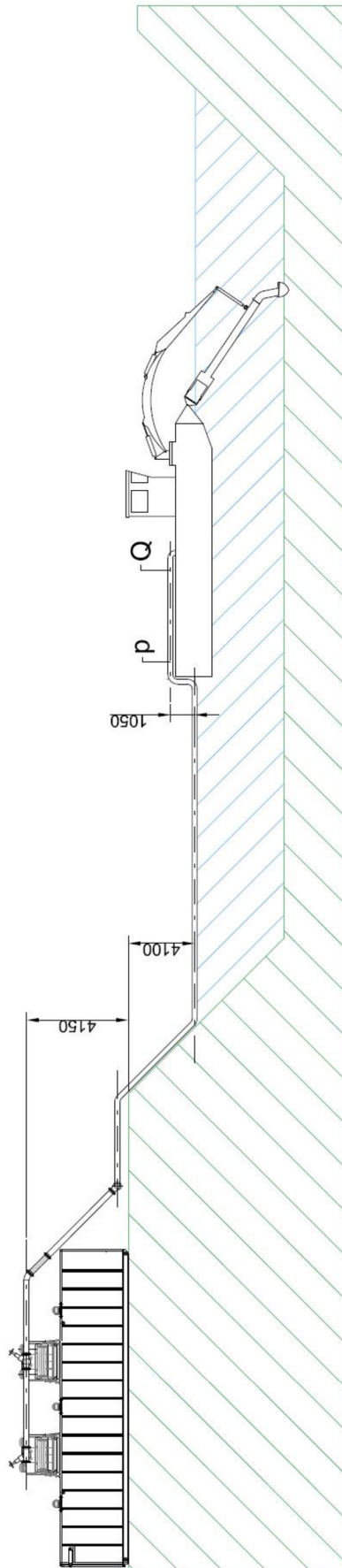
Nemecká spoločnosť SenwaTec je v posledných rokoch silnou konkurenciou pre, dovtedy takmer monopolný, holandský Watermaster. Senwatec Dredge-King a Watermaster Classic IV sa zhodujú vonkajšími rozmermi, kompaktnou konštrukciou a výkonomi bagrovania. Na rozdiel od Watermasteru, ktorý používa čerpadlo umiestnené na ponornom hydraulickom ramene, má Dredge-King bagrovacie čerpadlo umiestnené v trupe, 200 mm nad hladinou ponoru. Elektronické snímače sa v tejto kategórii strojov zrejme ešte nezačali používať, a tak bol bager

z výroby osadený len dvomi mechanickými tlakomerami. Ich prevedenie, kde médiom prenášajúcim informáciu o tlaku bola čerpaná hydrosmeš, nebolo úplne bezproblémové. Tenké hadičky sa často upchali pieskom či ílom a tlakomer prestal pracovať. Navyše, sací bager nemal žiadny snímač prietoku čerpaného média. Z týchto dôvodov bolo pristúpené k montáži elektronických diferenčných tlakomerov Endress&Hauser Cerabar PMC51, ktorých membrána je špeciálne určená pre použitie v abrazívnom prostredí. Meranie prietoku bolo realizované montážou elektromagnetického prietokomera Endress&Hauser Promag P200. Umiestnenie snímačov prietoku a tlaku bolo volené podľa odporúčaní výrobcu daného snímača, prípadne podľa priestorových podmienok na sacom bagri. Vzájomné umiestnenie snímačov a čerpadla je na obrázku Obr. 4.5. [13]



Obr. 4.5 Vzájomná pozícia čerpadla, snímačov a vodnej hladiny

Zároveň na Obr. 4.6. uvádzam celkovú výškovú dispozíciu bager-technológia DESET.

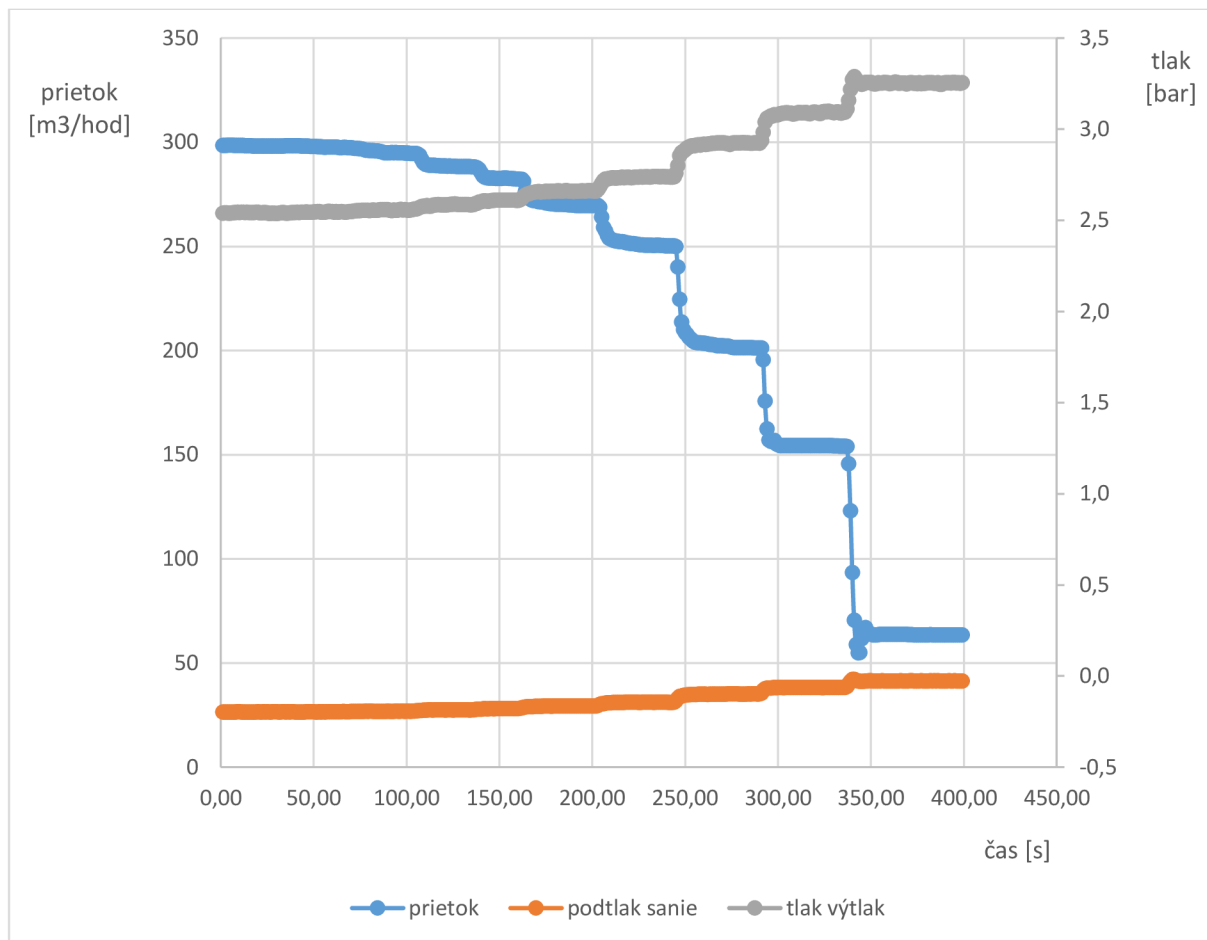


*Obr. 4.6 Výšková dispozícia sacieho bagra a technológie DESET*

## 5 CHARAKTERISTIKA ČERPADLA

25.10.2013 boli čerpaním čistej vody pri uzatváraní koncového šupátka namerané dáta potrebné pre stanovenie charakteristiky čerpadla. Tento, pre čerpadlá potrebný dokument, totižto čínsky výrobca ZIDONG PUMP nedodáva a ani ho na svojej stránke neuvádza. Charakteristiku čerpadla som vyjadril ako závislosť mernej energie na prietoku.

$$Y = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot z \quad (5.1)$$



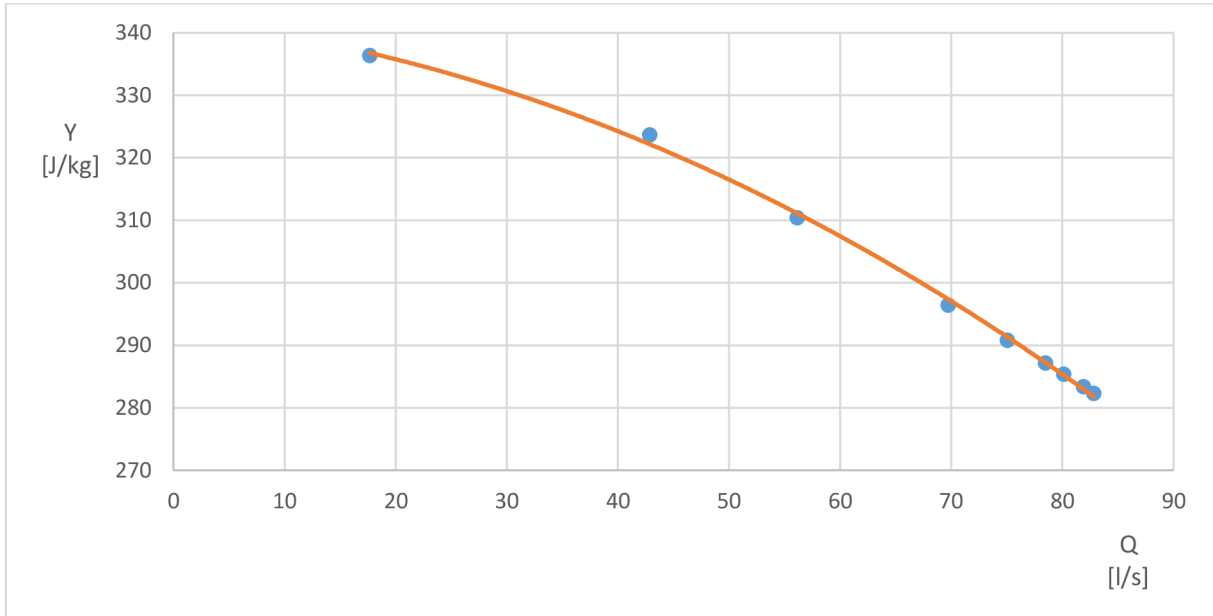
Obr. 5.1 Časová zmena prietoku, podtlaku na saní a pretlaku na výtlaku pri meraní charakteristiky čerpadla pri 1300 ot/min diesel agregátu. Tlaky sú relatívne.

Prepad hodnôt prietoku a ich návrat a ustálenie na hodnote  $63 \text{ m}^3/\text{hod}$  v 344. sekunde na obrázku Obr. 4.6 je spôsobené upchávkou na tesnení pred uzatváraným šupátkom. Pri úplnom zatvorení šupátka tlak v potrubí doslova roztrhol opotrebované tesnenie a voda pod tlakom vytekala z medzi prírubového priestoru. Smerom k vyšším tlakom a nižším prietokom (uzatváranie šupátka) bola snaha o zmenšenie kroku merania. Bohužiaľ, ako je na Obr. 4.6. vidieť, v posledných minútach merania sa prietok dokázal za 1 sekundu zredukovať zo  $150 \text{ m}^3/\text{hod}$  na  $123 \text{ m}^3/\text{hod}$ .

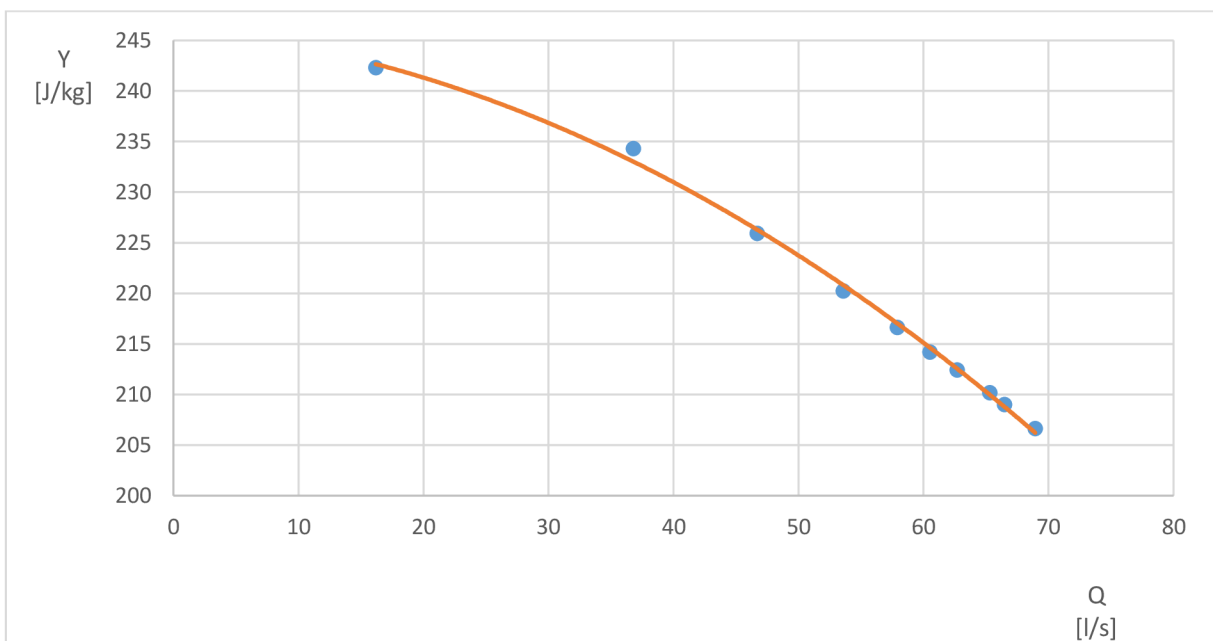
Charakteristiku čerpadla som vyhodnotil tak, že som ustálené hodnoty po nastavení šupátka (cca 50 hodnôt) priemerovoval a dané priemerné hodnoty v každom kroku nastavenia šupátka



som použil na výpočet mernej energie čerpadla. Meranie charakteristiky som spravil pre dvoje rôzne otáčky čerpadla. Bohužiaľ, vzhľadom k pohonu všetkého funkčného na sacom bagri pomocou hydrauliky nebolo v čase merania možné zistiť otáčky čerpadla, ale iba otáčky 6-valcového diesel agregátu Caterpillar. Vynesené hodnoty som preložil polynomicou trendovou čiarou 2. stupňa.



*Obr. 5.2 Charakteristika čerpadla pre 1300 ot/min diesel agregátu*



*Obr. 5.3 Charakteristika čerpadla pre 1100 ot/min diesel agregátu*

## 6 KONTINUÁLNE MERANIE HUSTOTY

Kontinuálne meranie hustoty je jedným z technicko-ekonomických problémov prevádzky sacieho bagra. Pri projektoch, kde sa počíta z čerpaním hydrozmesi do lagún, nasledované samovoľným odparením vlhkosti a odvezením odvodneného sedimentu je problémom fakturácia výkonov. Prietokomer na bagri síce poskytuje informáciu o množstve hydrozmesi, neposkytuje však informáciu o jej koncentrácii, či hustote. Z tohto dôvodu je snahou umiestniť na sací bager, alebo na pozemnú technologickú časť kontinuálny hustomer. Kontinuálne hustomery sa vyrábajú v širokej škále rôznych konštrukcií, od rádioizotopových po oscilačné. Ceny týchto snímačov pre priemer dopravného potrubia DN200 sú astronomické.

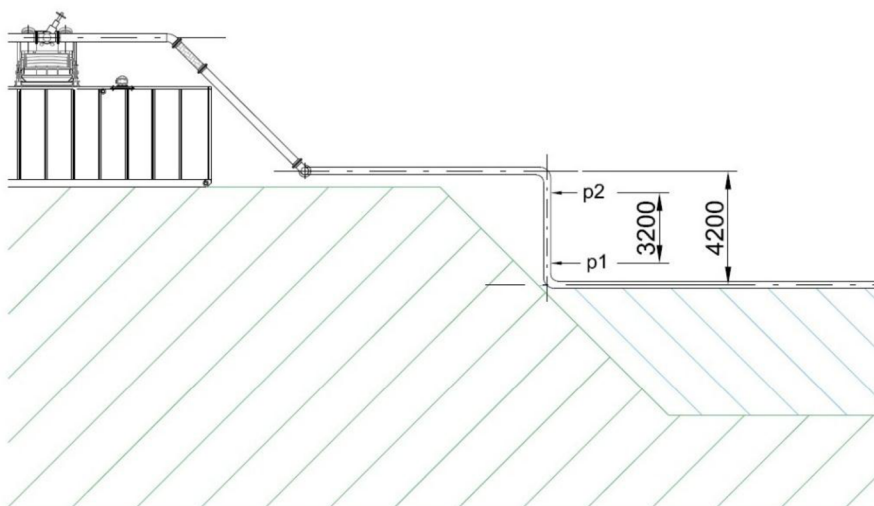
Podľa [3] existuje možnosť montáže tzv. hydrostatického snímača hustoty. Princíp tohto snímača je založený na meraní tlakovej diferencie medzi dvoma rôzne vysoko umiestnenými bodmi potrubia. Snímaná tlaková diferencia je priamo úmerná súčtu hydrostatického tlaku (ktorý je priamo úmerný hustote zmesi) a rýchlostnej tlakovej straty, ktorá závisí predovšetkým na kvadráte rýchlosti prúdenia hydrozmesi. Hydrostatický snímač je tým presnejší, čím je potrubie medzi tlakovými snímačmi zvislejšie a hladšie (bez kolien a iných hydraulických odporov). Presnosť takýchto snímačov hustoty dosahuje  $\pm 3\%$ . [3]

$$\Delta p = \rho_s \cdot g \cdot z + k_c \cdot v_s^2 \quad (6.1)$$

Daná rovnica platí za predpokladu, že hustota hydrozmesi, nachádzajúca sa medzi tlakomermi  $p_2$  a  $p_1$  je rovnaká, ako hustota zmesi vytekajúcej z dopravného potrubia do vibračného sita. Parameter  $k_c$  je potrebné určiť meraním čistou vodou. Po následnom upravení rovnice je možné z tlakovej diferencie a prietoku vyčíslieť hustotu zmesi prúdiacej v potrubí.

$$\rho_s = \frac{\Delta p - k_c \cdot v_s^2}{g \cdot z} \quad (6.2)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (6.3)$$



Obr. 6.1 Úprava uloženia dopravného potrubia pre montáž hydrostatického snímača hustoty

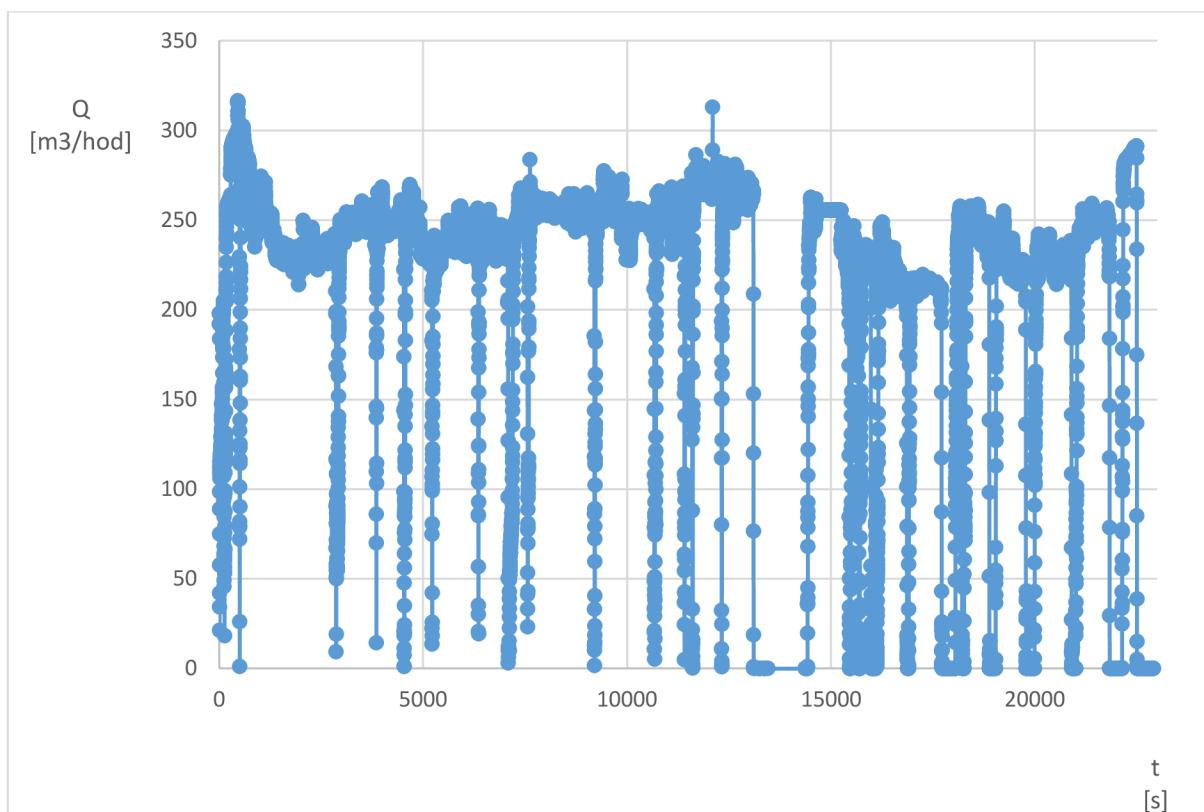
Merané dáta je následne potrebné skontrolovať iným meraním hustoty, napríklad tzv. kbelíkovou metódou a potvrdiť tým funkčnosť snímača.

## 7 TLAKOVÁ STRATA V POTRUBÍ

Hlavnou úlohou riešenou v tejto práci je stanovenie tlakovej straty v používanom dopravnom potrubí HDPE 100+. Vďaka informácii o tlakovej strate na meter použitého potrubia je možné odhadnúť potrebný výkon prečerpávacej stanice pri čerpaní na vzdialenosti väčšie ako 1500 m. Na základe potrebného čerpaceho výkonu bude rozhodnuté o množstve a výkone použitých prečerpávacích staníc.

### 7.1 MERANÉ ÚDAJE

Výstupy spomínaných snímačov boli vo vzorkovacej frekvencii 1 Hz (1 zápis za sekundu) zapisované do centrálného riadiaceho systému GreenArch. GreenArch, programovaný v Siemens SimuLink prostredí zabezpečuje tiež synchronizáciu časových údajov jednotlivých snímačov, takže všetky zapisované dáta majú rovnakú frekvenciu a rovnaký absolútny čas zápisu. Každý snímač okrem informácie o tlaku či prietoku zapisuje taktiež informáciu o čase a dátume daného zápisu. Z piatich dní, kedy bolo meracie zariadenie funkčné, som obdržal 5 .csv súborov, každý o veľkosti okolo 4000 kB. Spolu obsahujú 171000 riadkov meraných hodnôt a priradených časov.



*Obr. 7.1 Časový priebeh prietoku počas prvého dňa merania, nekorigovaný*

Na Obr. 7.1. je viditeľné, že prietok nie je počas dňa konštantný, ale často klesá až k nule, prípadne do záporných hodnôt. Tento jav je spôsobený samotnou funkciou sacieho bagra, keďže ten sa, po odbagrovaní vrstvy sedimentu, musí hydraulickými nohami posunúť do novej pozície. Počas presunu bagra do novej bagrovacej pozície obvykle operátor vypína čerpadlo.

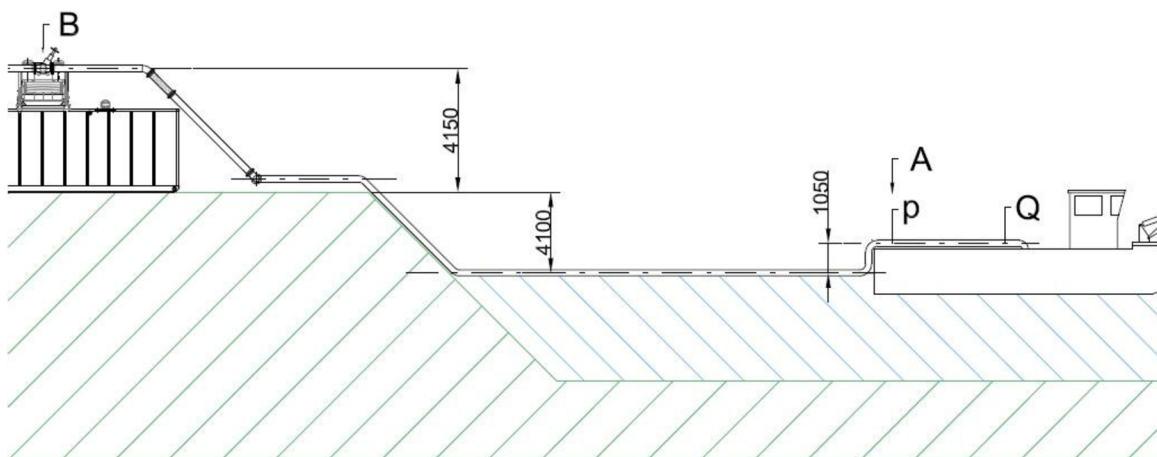
Hydrozmes, ktorá sa v potrubí nachádza, sa po zastavení čerpadla začne gravitačne pohybovať naspäť do vodného diela a tento pohyb sa odrazí na hodnotách meraných prietokomerom a oboma tlakomerami (na saní a výtlaku). Pre prvotný základný výpočet som extrahoval namerané dáta z 3 hodín prevádzky z dňa 23.10.2013, odstránil som riadky so zápornými hodnotami prietoku a takto vytvorenú kontrolnú skupinu som doplnil výpočtami.

## 7.2 MERNÁ STRATOVÁ ENERGIA

Pre výpočet mernej stratovej energie v potrubnej trase som použil Bernoulliho rovnicu, ktorá vyžaduje stanovenie dvoch pracovných bodov na meranom potrubí.

Stanovené pracovné body:

- A.) Tlakomer na výtlaku bagrovacieho čerpadla
- B.) Výstup hydrozmesi z dopravného potrubia do vibračného sita



Obr. 7.2 Pracovné body pre Bernoulliho rovnicu

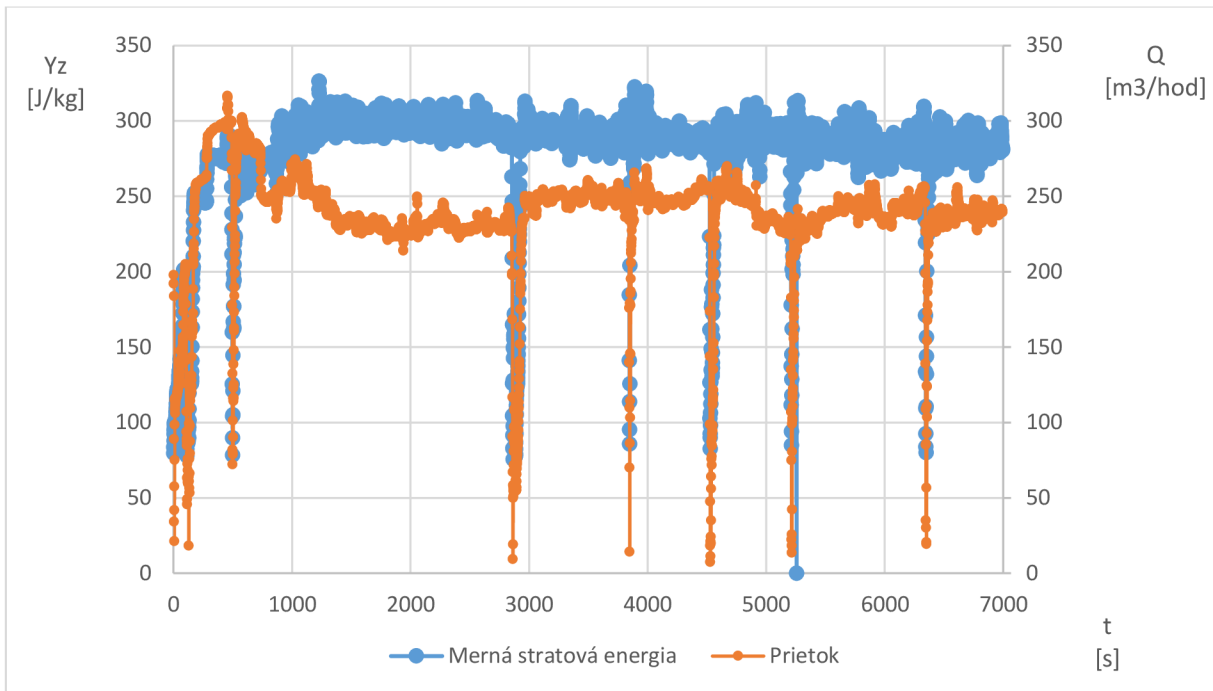
V bode A je tlak daný diferenčným tlakomerom a rýchlosť prúdenia predradeným prietokomerom (uvažujem prúdenie nestlačiteľnej kvapaliny). Hydrodynamickú výškovú hladinu volím nulovú.

V bode B je tlak atmosférický (výtok z potrubia do atmosféry), rýchlosť prúdenia je daná prietokomerom (dopravné potrubie má v celej dĺžke rovnaký priemer DN200) a výška od bodu A je 7200 mm.

Hustota čerpanej zmesi bola dlhodobým pozorovaním a meraním na infračervenej sušičke určená spoločnosťou PROGROUPE sediment removal a.s. ako  $1250 \text{ kg/m}^3$  (fakturovaná hustota). Hustota čerpanej zmesi samozrejme v čase konštantná nie je, no pokiaľ nie je na technologickej jednotke realizovaný kontinuálny senzor hustoty čerpanej zmesi, nie je možné túto nelinearitu zahrnúť do výpočtu. Použitá Bernoulliho rovnica:

$$\frac{p_A}{\rho_s} = \frac{p_B}{\rho_s} + g \cdot z + Y_z \quad (7.1)$$

$$Y_z = \frac{p_A - p_B}{\rho_s} - g \cdot z \quad (7.2)$$



Obr. 7.3 Časová závislosť mernej stratovej energie a prietoku

Z Obr. 7.3 je jasné, že odfiltrovanie nulových prietokov nebolo dostatočné, a aj keď sa tu záporné hodnoty prietoku nevyskytujú, nežiaduce dáta, blížiac sa nule, sú jasne viditeľné.

## 7.3 SÚČINITEĽ TRENIA

Mernú energiu je možné v závislosti na kvadráte rýchlosti prúdenia vyjadriť rôznymi spôsobmi:

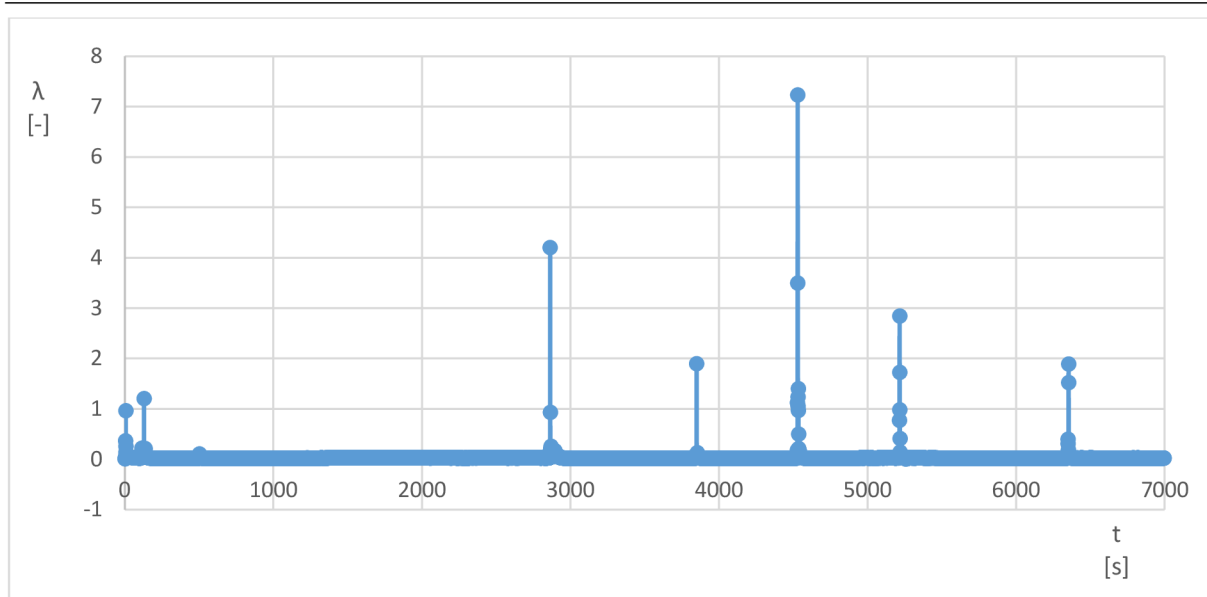
$$Y_z = K_z \cdot Q^2 \quad (7.3)$$

$$Y_z = \zeta_c \cdot \frac{v_s^2}{2} \quad (7.4)$$

$$Y_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_s^2}{2} \quad (7.5)$$

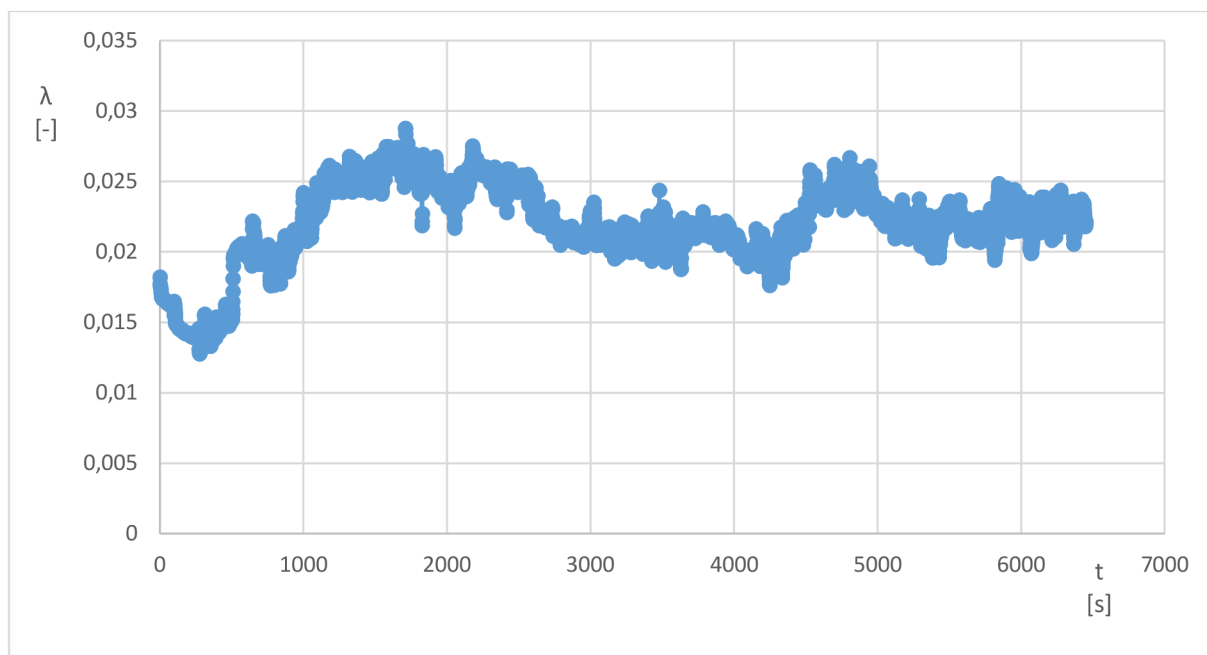
Ja som sa rozhodol pracovať s variantou 7.5, kde je možné do výpočtu zahrnúť geometrické parametre (priemer a dĺžku) dopravného potrubia. Jednoduchou úpravou dostaneme vzťah pre výpočet súčiniteľa trenia:

$$\lambda = \frac{2 \cdot d \cdot Y_z}{l \cdot v_s^2} \quad (7.6)$$



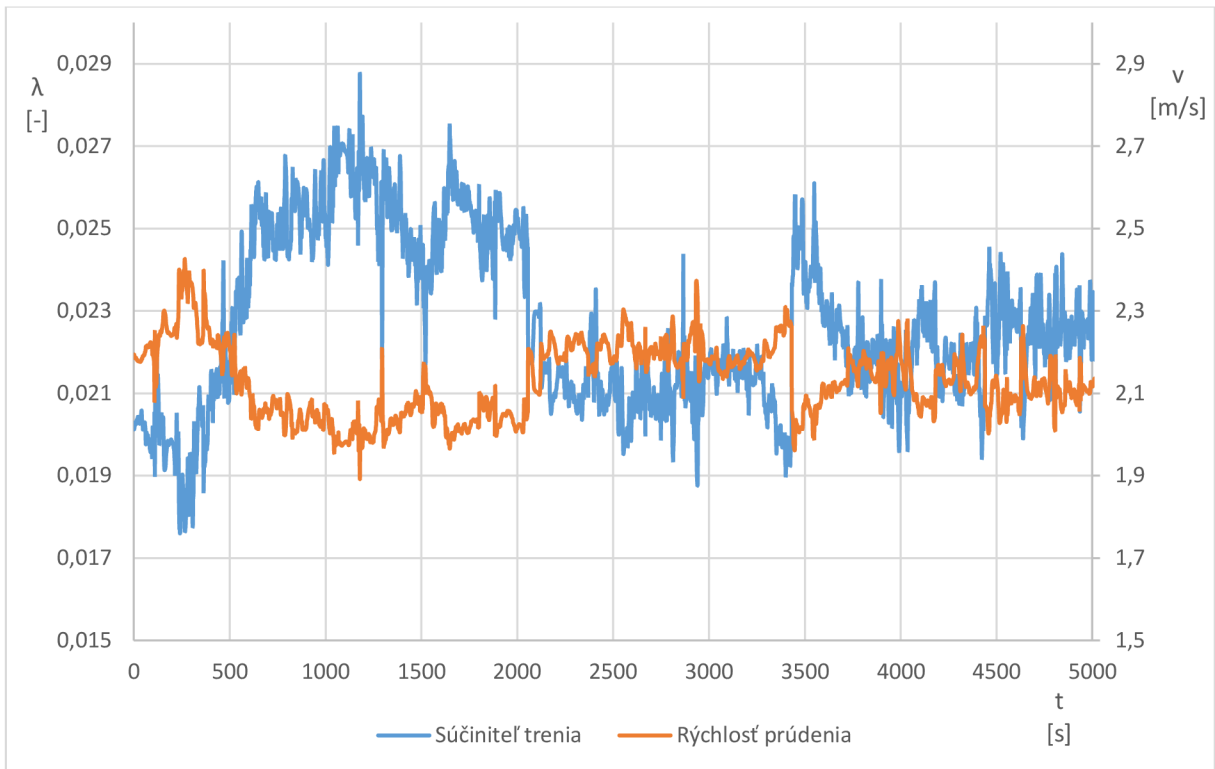
*Obr. 7.4 Časový priebeh súčiniteľa trenia*

Ako je z Obr. 7.4 viditeľné, smerom k nižším prietokom stúpa súčiniteľ trenia. Tieto vystupujúce body sú časovo zhodné s vystupujúcimi bodmi na Obr. 7.3. Po odobratí rušivých bodov z kontrolnej skupiny údajov dostávame korigovaný priebeh súčiniteľa trenia v čase (Obr. 7.5).



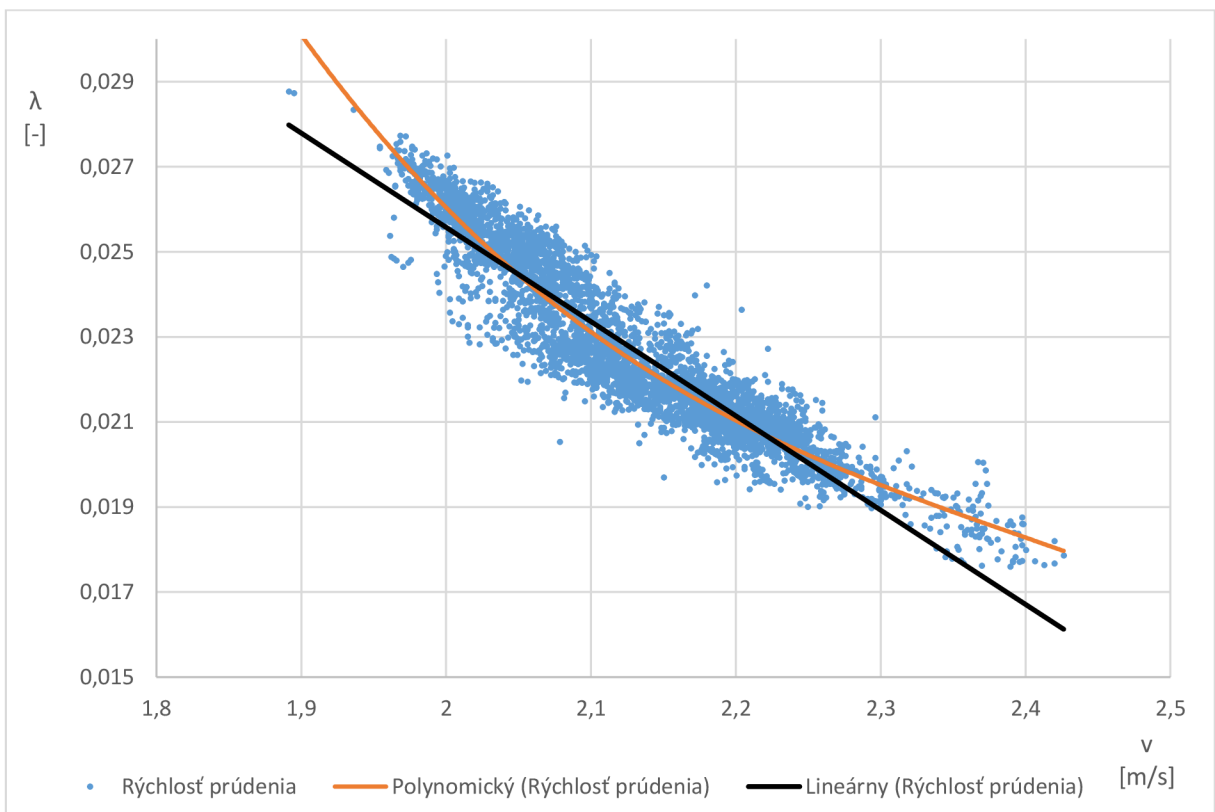
*Obr. 7.5 Korigovaný časový priebeh súčiniteľa trenia*

Po vykreslení priebehu rýchlosti prúdenia v čase je evidentná závislosť medzi rýchlosťou prúdenia a súčiniteľom trenia (Obr. 7.6). Rýchlosť prúdenia je, okrem iného, ovplyvnená aj objemovou koncentráciou zmesi, kde so stúpajúcou objemovou koncentráciou klesá rýchlosť prúdenia a naopak.



*Obr. 7.6 Časový priebeh rýchlosti prúdenia a súčiniteľa trenia*

Pre nájdenie závislosti medzi rýchlosťou prúdenia a súčiniteľom odporu som nechal vykresliť ich vzájomnú závislosť a následne som ju preložil viacerými trendovými čiarami.

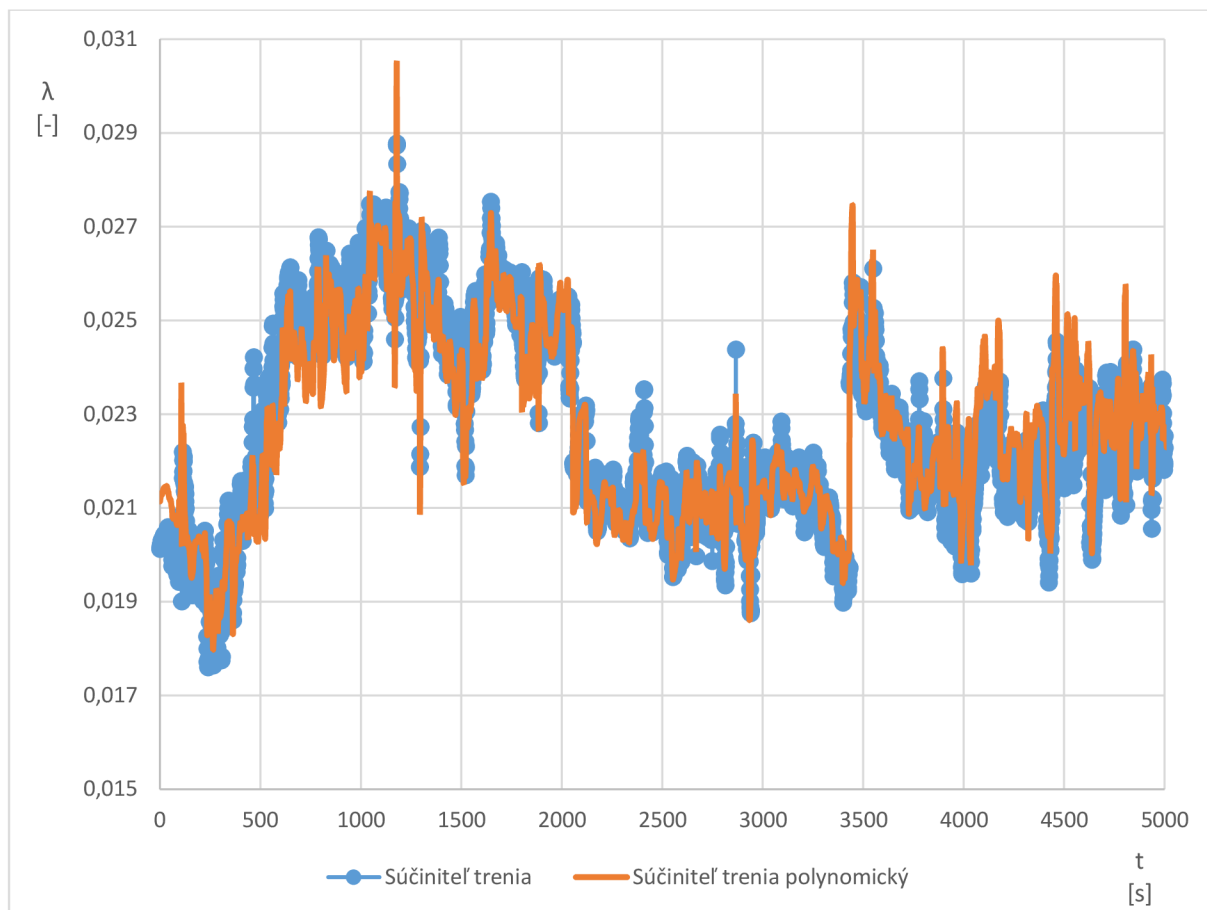


*Obr. 7.7 Závislosť súčiniteľa trenia na rýchlosti prúdenia*



Na Obr. 7.7 som vykreslil dva extrémny trendových čiar, lineárnu a polynomicnú tretieho stupňa. Všetky ostatné druhy závislosti sa graficky a hodnotovo pohybujú medzi týmito dvomi trendmi. Po posúdení metódou najmenších štvorcov bola ako funkcia s najnižšou odchýlkou určená polynomicná funkcia 3. rádu:

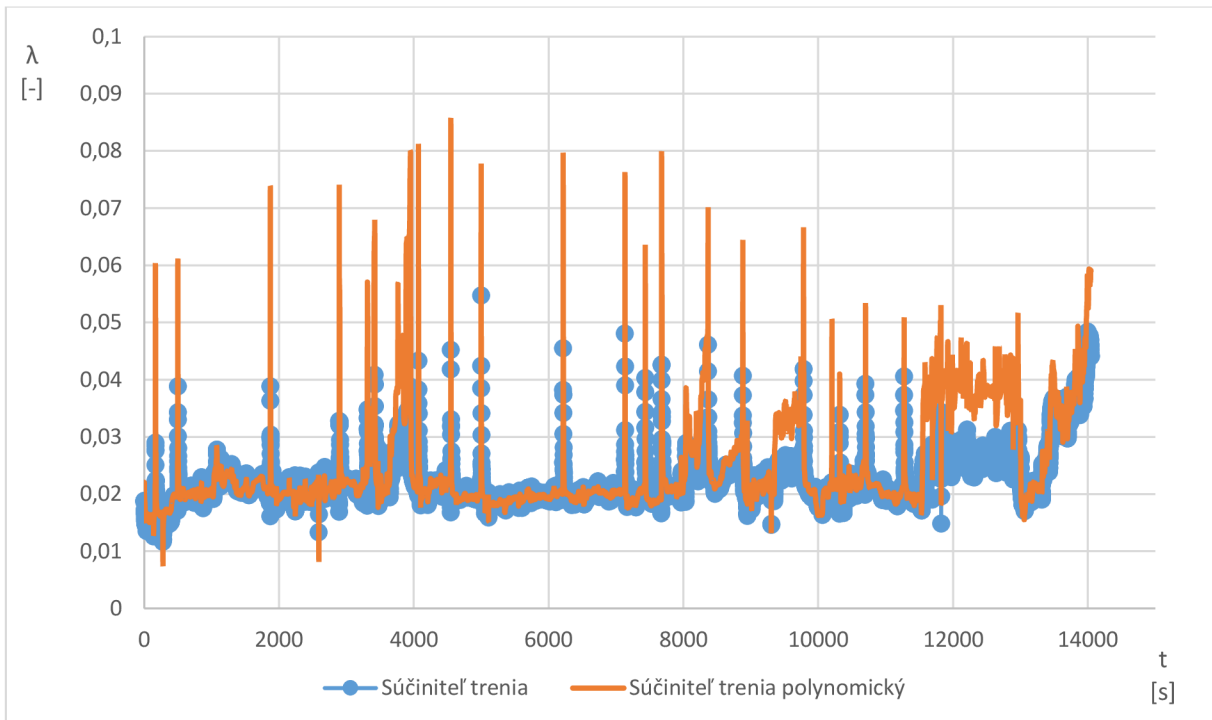
$$\lambda = -0,047098 \cdot v_s^3 + 0,339066 \cdot v_s^2 - 0,825539 \cdot v_s + 0,697641 \quad (7.7)$$



Obr. 7.8 Časový priebeh súčiniteľa trenia vypočítaného podľa nameraných hodnôt a podľa polynomickej funkcie pre kontrolnú skupinu dát

Z Obr. 7.8 je zjavné, že na kontrolnú skupinu polynomicná funkcia 3. rádu sedí. Otázkou ostáva, či sa rovnaká polynomicná funkcia bude dať úspešne použiť na popis súčiniteľa trenia pre zvyšné namerané dáta. Pre kontrolu úspešnosti určenia hodnoty súčiniteľa trenia v závislosti na rýchlosti prúdenia som pre každý deň merania stanovil v každom meranom bode súčiniteľ trenia z meranej stratovej energie a súčiniteľ trenia z polynomickej závislosti na rýchlosti prúdenia (rovnica 7.7). Z meranej tlakovej straty stanovujem mernú stratovú energiu a z nej následne meraný súčiniteľ trenia. Polynomický súčiniteľ trenia stanovujem na základe vzťahu 7.7 a meranej rýchlosti prúdenia.

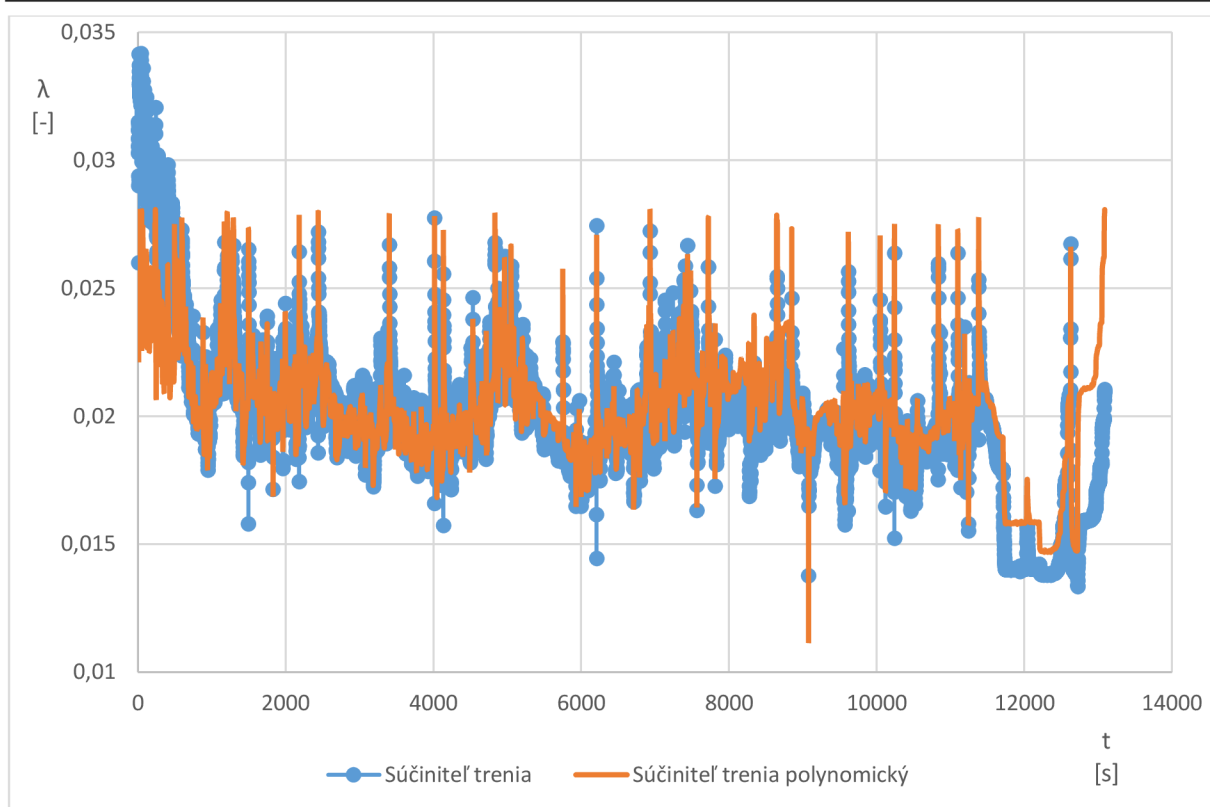




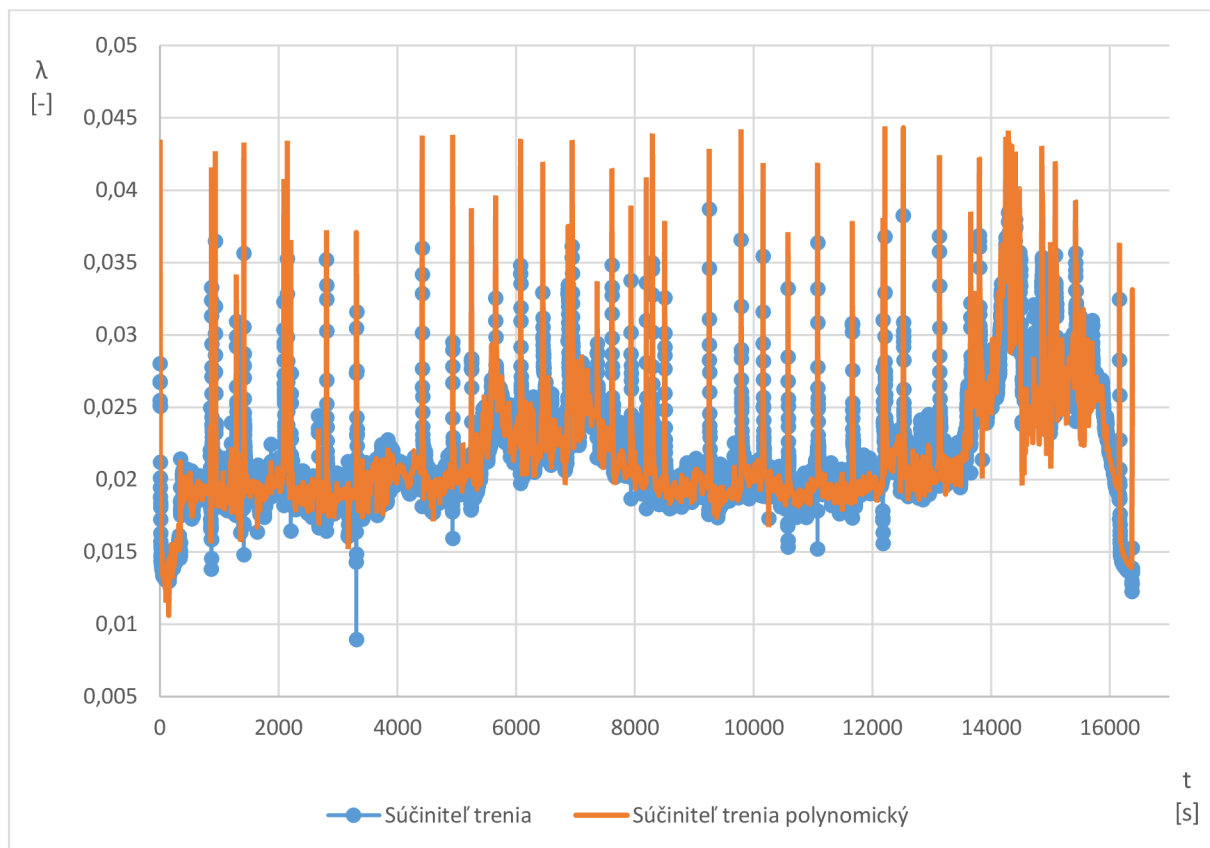
*Obr. 7.9 Časový priebeh súčiniteľa trenia vypočítaného podľa nameraných hodnôt a podľa polynomickej funkcie z dňa 24.10.2013*

Na Obr. 7.9 je viditeľné, že polynomický súčiniteľ trenia vyjadrený na základe dát z dňa 23.10.2013 celkom presne popisuje zmeny meraného súčiniteľa trenia z dňa 24.10.2013. Polynomický súčiniteľ sa s nameraným nezhoduje vo viacerých krátkodobých oblastiach. Vysvetlenie tejto odchýlky, keď nameraný súčiniteľ trenia je menší ako vypočítaný polynomom spočíva v čerpaní čistej vody. Ako bolo vyššie spomenuté, týždeň merania bol zároveň posledným týždňom na projekte revitalizácie vodnej zdrže Hrušov a pracovníci s čerstvými licenciami na obsluhu scieho bagra podstupovali základný praktický výcvik bez čerpania sedimentov, ale iba s čerpaním vody. Pri čerpaní vody je nameraný súčiniteľ trenia nižší ako polynomický, pretože ten počíta s prúdením zmesi o vyššej hustote a objemovej koncentrácii.

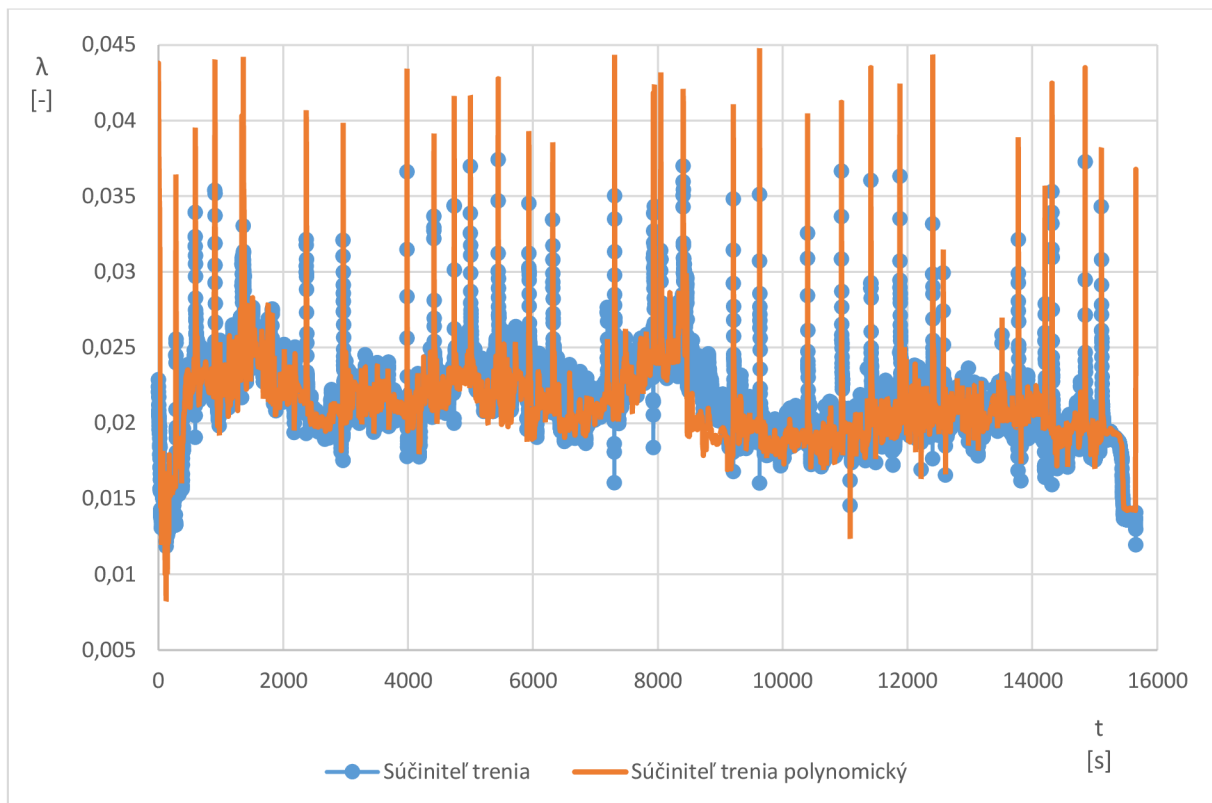
Situácia sa opakuje na Obr. 7.10, Obr. 7.11 a Obr. 7.12, kde sa vykreslený priebeh súčiniteľov trenia (meraného a polynomicky počítaného) nezhoduje iba v lokálnych časových intervaloch a ich existencia je vysvetlená zaškoľovaním obsluhy scieho bagra.



Obr. 7.10 Časový priebeh súčiniteľa trenia vypočítaného podľa nameraných hodnôt a podľa polynomickej funkcie z dňa 25.10.2013



Obr. 7.11 Časový priebeh súčiniteľa trenia vypočítaného podľa nameraných hodnôt a podľa polynomickej funkcie z dňa 26.10.2013



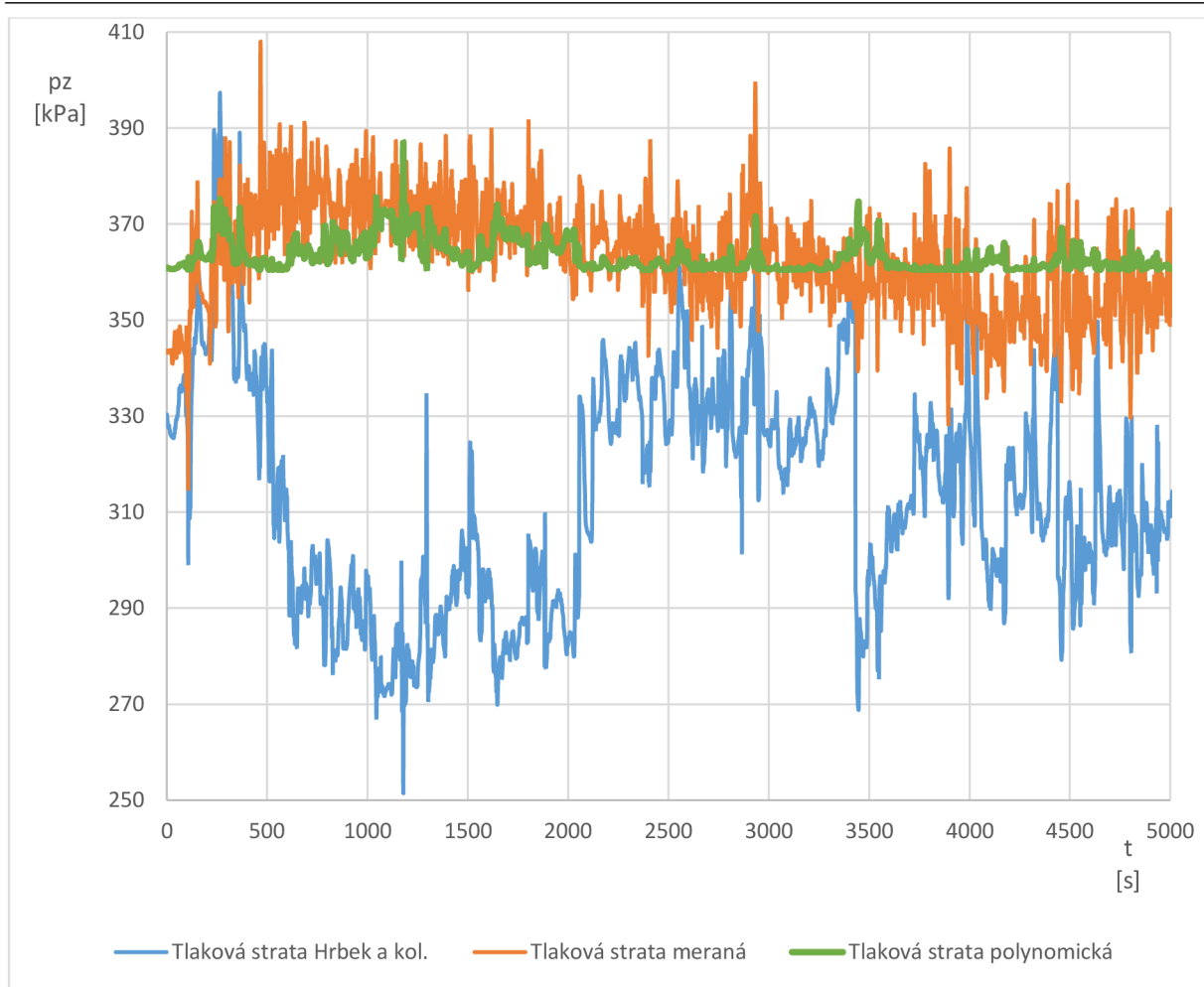
Obr. 7.12 Časový priebeh súčiniteľa trenia vypočítaného podľa nameraných hodnôt a podľa polynomickej funkcie z dňa 27.10.2013

## 7.4 TEORETICKÝ VÝPOČET TLAKOVEJ STRATY

Okrem nájdenia vzťahu medzi rýchlosťou prúdenia a súčiniteľom trenia v potrubí som sa pokúšal popísať namerané dáta známymi empirickými vzorcami. Väčšina z nich je však navrhnutá pre prúdenie hydrozmesi o konštantných charakteristikách rovnomerným prúdením v ocelovom potrubí. Vykreslená tlaková strata nameraná, vypočítaná podľa Hrbka a kolegov a vypočítaná podľa polynomickej funkcie (Obr. 7.13) však všetky nádeje na presnosť výpočtu empirického vzťahu pochovala. Prúdenie hydrozmesí pri bagrovaní riečnych sedimentov sacím bagrom polyetylénovým potrubím je od bežne počítaného modelu značne odlišné a dostupné empirické vzťahy sú z tohto dôvodu nepoužiteľné. [12]

Použitý vzťah pre výpočet tlakovej straty podľa Hrbka a kol.:

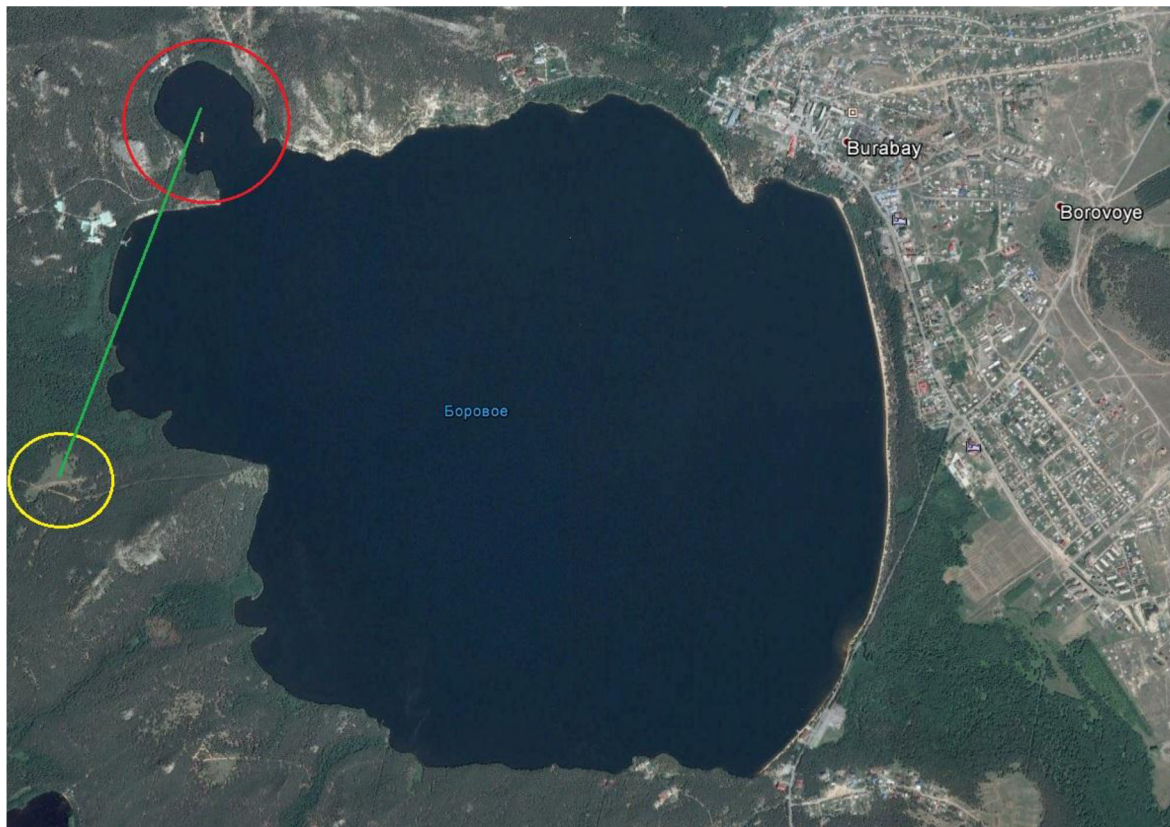
$$\Delta p_p = \rho_s \cdot g \cdot l_{vyp} \cdot (0,00072 + 0,00455 \cdot c_v^2) \cdot d^{-1,162} \cdot v_s^{1,838} \quad (7.8)$$



Obr. 7.13 Časové vykreslenie tlakovej straty vyčíslenej podľa rôznych výpočtových modelov a meranej tlakovej straty

## 8 JAZERO BOROVOE

Ako ďalší perspektívny projekt sa črtá revitalizácia rekreačného jazera Borovoe v Akmolskej oblasti Kazachstanu.



*Obr. 8.1 Jazero Borovoe s vyznačeným miestom ťažby (červená) a miestom lokalizácie pozemnej technologickej jednotky DESET (žltá) [15]*

Borovoe, ako rekreačné jazero, nemôže byť z ekonomických dôvodov vypustené a revitalizované suchou cestou. S rozmermi 3100 m severne a 3700 m východne v najširších bodoch je toto jazero ďaleko za hranicou dopravnej vzdialenosti bagrovacieho čerpadla umiestneného na sacom bagri Perm HAREN. V prvej fáze revitalizácie jazera je naplánovaná ťažba  $700000 \text{ m}^3$  sedimentu z miesta vyznačeného na Obr. 8.1. Priestor pre umiestnenie pozemnej technologickej jednotky DESET (na Obr. 8.1 vyznačené žltou farbou) sa od miesta ťažby nachádza vzdušnou čiarou cca 2000 m (na Obr. 8.1 vyznačené zelenou čiarou). Najmenšia vzdialenosť od umiestnenia technológie DESET po vodnú hladinu je približne 500 m. Úlohou je určiť polohu a výkon prečerpávacej stanice.

Predpokladám, že pri podobnom granulometrickom zložení čerpanej hydrozmesi (Obr. 8.2) ako na projekte čistenia vodnej zdrže Hrušov (Obr. 4.2), bude pre súčiniteľ trenia v potrubí platiť rovnica 7.7. Jej grafické zobrazenie, pre obmedzené hodnoty rýchlosti prúdenia od 1,9 po  $2,5 \text{ m/s}$  sa nachádza na Obr.8.2. Do uvedeného rozsahu rýchlostí prúdenia patrí 99,75 % dát nameraných na vodnom diele Gabčíkovo (po odfiltrovaní údajov spojených s vypínaním čerpadla), z čoho sa dá usudzovať, že prúdenie suspenzie pri samotnej ťažbe bude veľmi pravdepodobne prebiehať práve v tomto rozmedzí rýchlostí. Uvedenému rozsahu rýchlostí

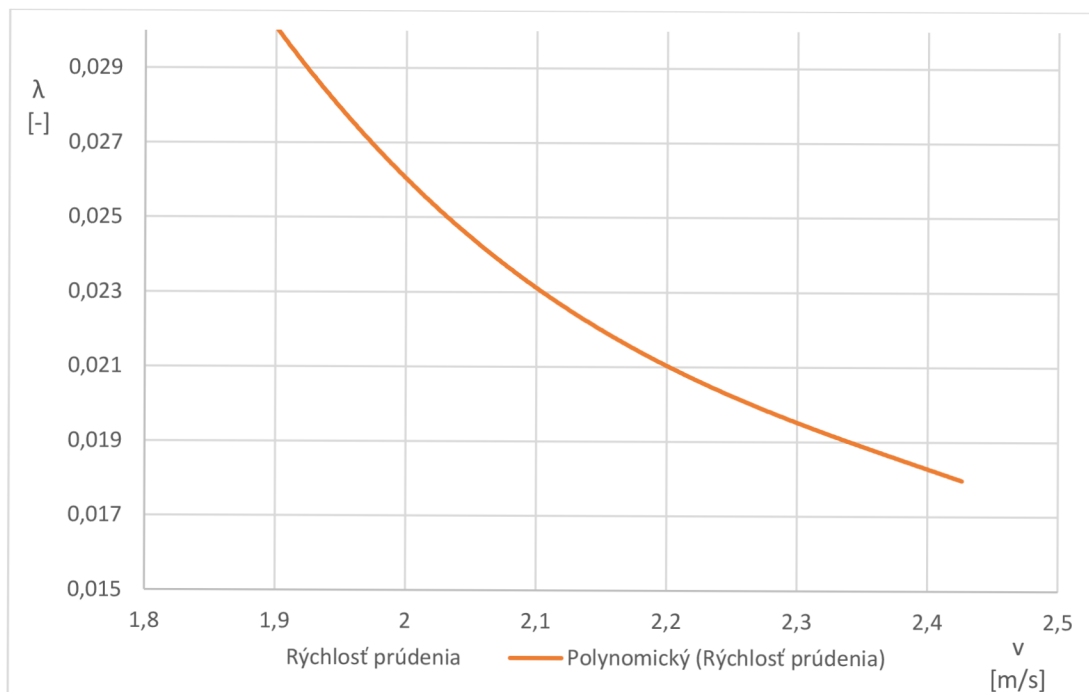


prúdenia odpovedá rozsah súčiniteľa trenia od 0,017 po 0,03. Pre predpoklad dopravnej vzdialenosti na jazere Borovoe budem uvažovať súčiniteľ trenia 0,03 (maximálny dosiahnutý na Gabčíkove) a rýchlosť prúdenia  $2 \text{ m/s}$  (aj keď uvedenému súčiniteľu trenia odpovedá nižšia rýchlosť prúdenia). Týmto sa dosiahne akési bezpečnostné predimenzovanie výpočtového modelu.

### Гранулометрический анализ

Размер зерна (мм)	Остаточное количество		Степень проходимости через сито (%)
	Масса (г)	Содержание (%)	
90	-	-	100.0
63	5.2	1.0	99.0
31.5	3.8	2.0	97.0
16.0	2.7	2.0	95.0
8.0	2.2	4.0	91.0
4.0	0.4	3.0	88.0
2.0	2.3	3.0	85.0
1.0	2.0	4.0	81.0
0.5	1.4	5.0	76.0
0.250	186.1	23.0	53.0
0.125	223.6	41.9	11.1
0.063			
Оболочка	43.2	11.1	
Сумма	389.5	100.0	
Гранулометрическая утруска	0.4		

Obr. 8.2 Granulometria sedimentov odobraných z jazera Borovoe, Kazachstan



Obr. 8.3 Grafické vyjadrenie rovnice 7.6 pre obmedzené hodnoty rýchlosti прúdenia

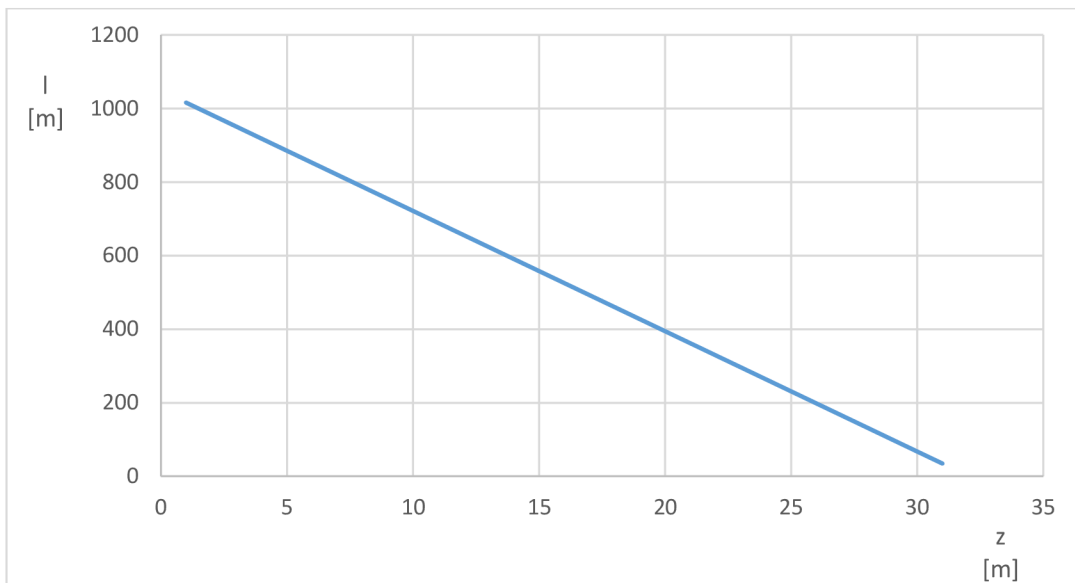
Stanovenej rýchlosti prúdenia ( $2 \text{ m/s}$ ) odpovedá prietok  $62,832 \text{ l/s}$ . Priesečník daného prietoku a trendovej čiary charakteristiky čerpadla na Obr. 5.2 stanovuje mernú energiu čerpadla ako  $304,693 \text{ J/kg}$ . Úpravou a zanedbaním vplyvu kinetickej energie vo vzťahu pre mernú energiu čerpadla

$$Y = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_s^2}{2} + g \cdot z \quad (8.1)$$

dostávam vzťah pre výpočet dopravnej vzdialenosti pri známych parametroch prúdenia:

$$l = \frac{2 \cdot (Y - g \cdot z) \cdot d}{\lambda \cdot v_s^2} \quad (8.2)$$

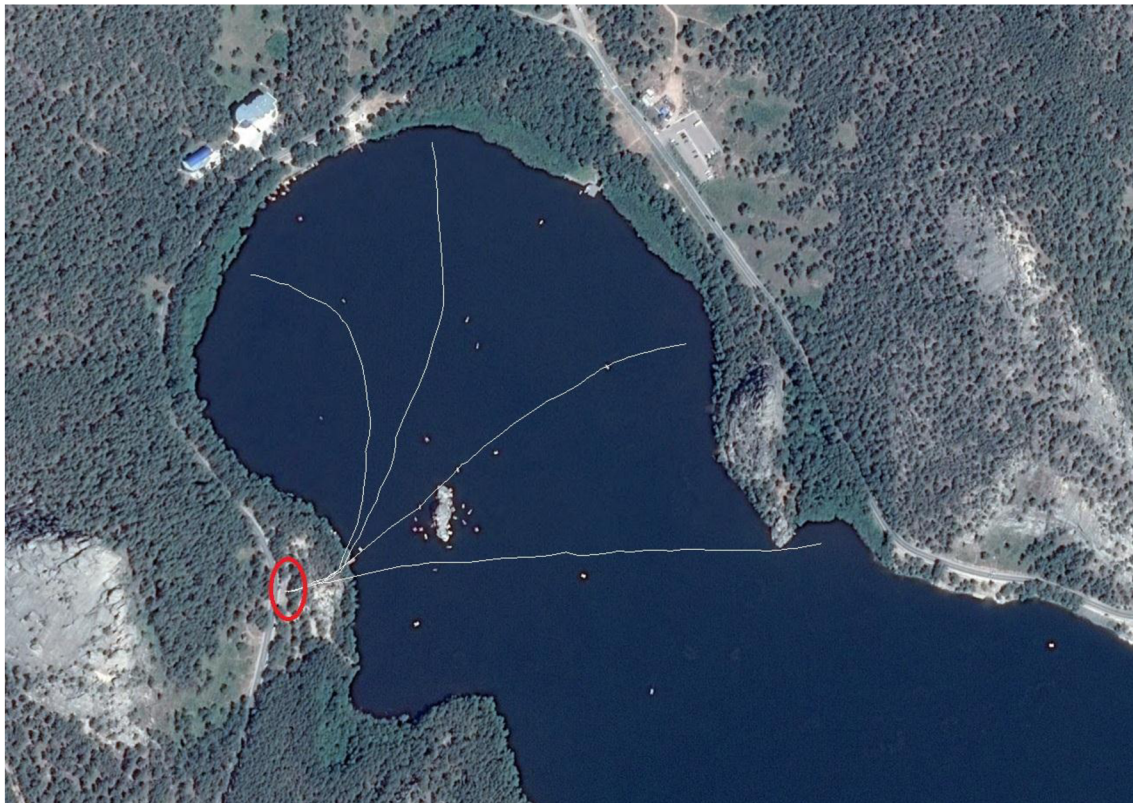
Po vykreslení dostávame závislosť dopravnej vzdialenosti od výtlačnej výšky (Obr. 8.3).



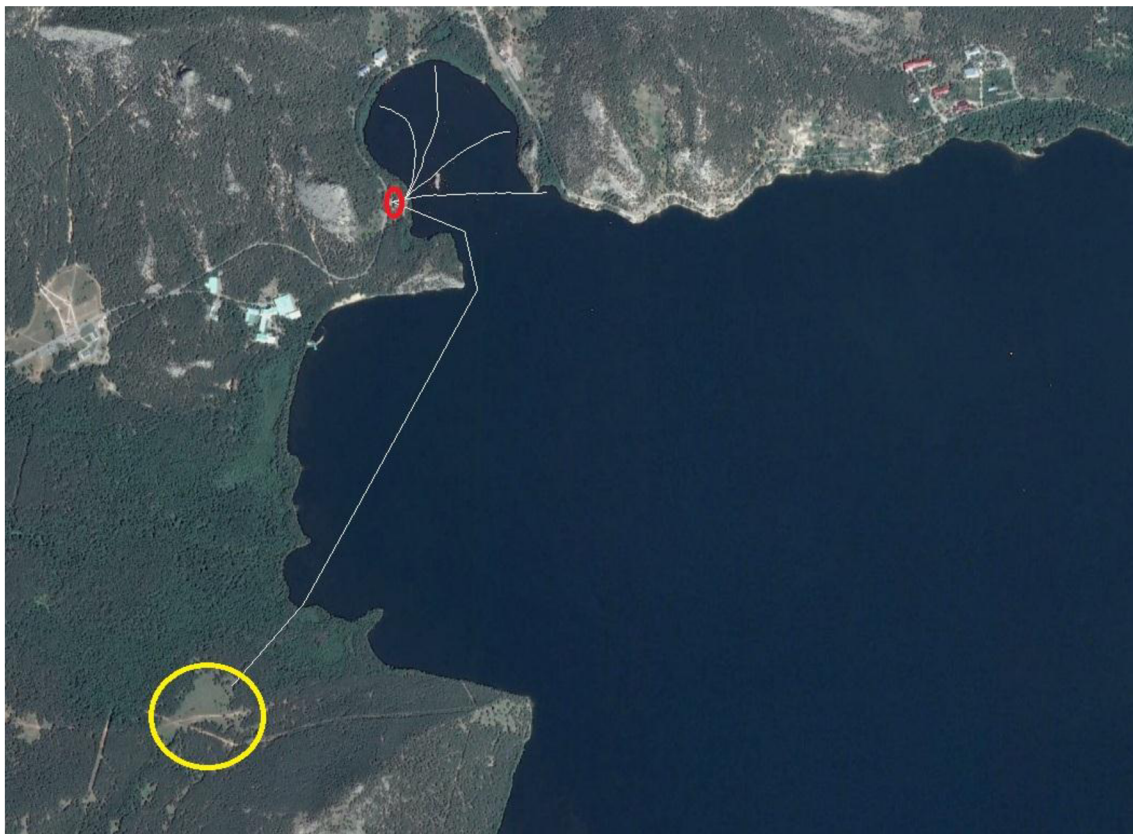
Obr. 8.4 Závislosť dopravnej vzdialenosti na výtlačnej výške

Po virtuálnej prehliadke okolia jazera Borovoe cez program Google Earth je možné stanoviť predbežnú ideálnu polohu prečerpávacej stanice. Správnosť stanovenej polohy bude nutné potvrdiť osobnou obhliadkou daného miesta. Je dôležité stanoviť jeho presnú výškovú dispozíciu vzhľadom k vodnej hladine, možnosť prístupu tankovacej cisterny a najmä overiť, či prečerpávacia stanica nebude v danom mieste obmedzovať využívanie vodnej plochy a okolitého priestranstva.

Na Obr. 8.5 sú vykreslené rôzne varianty vedenej potrubnej trasy zo sacieho bagra do miesta predpokladaného umiestnenia prečerpávacej stanice. Vďaka programu Google Earth je možné tieto predpokladané trasy merať. Najdlhšia z nich má dĺžku 439 m. Predpokladané miesto pre uloženie prečerpávacej stanice sa nachádza v blízkosti spevnenej pozemnej komunikácie vo výškovej hladine 12 m nad hladinou jazera Borovoe. Na základe závislosti z Obr. 8.4 sa dá maximálna dopravná vzdialenosť pre výtlačnú výšku 12 m odhadnúť na 492,44 m. Vzhľadom na započítané predimenzovanie výpočtového modelu uvedené na predchádzajúcej strane môžem predpokladať, že dopravná vzdialenosť je pre zvolené miesto čerpacej stanice dostatočná.



*Obr. 8.5 Návrh umiestnenia čerpacej stanice (červená) [15]*



*Obr. 8.6 Poloha čerpacej stanice vzhľadom na polohu technológie DESET (žltá) [15]*



Na Obr. 8.6 je naznačená potrubná trasa vedúca z prečerpávacej stanice na miesto umiestnenia technológie DESET. Dĺžka tejto potrubnej trasy je na základe merania dĺžky trás programu Google Earth 1910 m. Vzhľadom na absenciu polomerov ohybu potrubia predpokladám minimálnu potrebnú dĺžku potrubia na preklopenie danej vzdialenosti ako 2000 m. Výškový rozdiel medzi umiestnením technológie DESET a vodnou hladinou je podľa Google Earth približne 14 m.

Keďže u čerpacej stanice sa predpokladá umiestnenie vo výškovej hladine 12 m nad hladinou jazera, výšková diferenciacia medzi polohou technologickej stanice DESET a čerpacou stanicou je 2 m. Po pričítaní výšky samotnej stanice DESET z Obr. 4.6 je celková výšková diferenciacia 6,15 m.

Po doplnení známych údajov do vzťahu 8.1 je známa potrebná merná energia čerpadla čerpacej stanice pri prietoku  $62,8 \text{ l/s}$ :

$$Y = 660,33 \text{ J/kg} \quad (8.3)$$

Pre aplikovanie do čerpacej stanice bude čerpadlo o potrebnej charakteristike (rovnica 8.3) vybrané z ponuky miestneho výrobcu. Dôvodom je rýchla dostupnosť servisu a náhradných dielov.

---

## ZÁVER

Ťažba riečnych sedimentov sacím bagrom má svoje obmedzenia. Medzi jedno z najväčších patrí malá dopravná vzdialenosť (výtláčna výška) bagrovacieho čerpadla. Riešením je stavba mobilných čerpacej staníc kompaktnej konštrukcie. Mobilná čerpacia stanica, ktorá sa zapája na výtlak sacieho bagra, obsahuje pohonný agregát, nádrž pohonných hmôt a bagrovacie čerpadlo.

Hlavným problémom riešeným pri tvorbe projektu po technickej a ekonomickej stránke je potrebný výkon čerpacej stanice. Po stanovení parametrov potrebných pre prekonanie dopravnej vzdialenosti je už čisto ekonomická otázka, či bude použitých viac nízko výkonných alebo jedna vysoko výkonná čerpacia stanica.

Diplomová práca sa zaoberá problematikou tlakovej straty pri prúdení hydrozmesi polyetylénovým potrubím. Pre získanie vstupných dát som v spolupráci so spoločnosťou PROGROUPE Sediment Removal umiestnil na sací bager elektromagnetický prietokomer a dvojicu elektronických tlakomerov (na sanie a výtlak čerpadla). Predmetný sací bager bol následne použitý na ťažbu dnových sedimentov na vodnom diele Gabčíkovo. Prietok, podtlak pred čerpadlom a pretlak za čerpadlom z piatich dní ťažby sedimentu sú jediné dostupné kontinuálne merané informácie o dianí v potrubnej trase. Okrem priamo meraných veličín mi boli spoločnosťou PROGROUPE poskytnuté informácie o priemernej hustote a o priemernom obsahu sušiny v hydrozmesi.

V samotnom výpočte je zahrnutých približne 0,5 milióna vstupných údajov, ktoré sú zapísané v 19,1 megabajtoch v .csv súboroch. Počas ich spracovania som hľadal medzi meranými veličinami závislosť, ktorá by sa dala polynomicke aproximovať a bola by schopná s dostatočnou presnosťou popísať chovanie prúdu hydrozmesi v HDPE potrubí.

Metódou najmenších štvorcov bola ako funkcia s najmenšou odchýlkou od meraných hodnôt zvolená polynomicke funkcia 3. rádu, dávajúca do závislosti súčiniteľ trenia a rýchlosť púdenia hydrozmesi. Vykreslené priebehy meraných veličín, veličín počítaných podľa polynomickej závislosti a veličín počítaných podľa empirických vzťahov pre výpočet prúdenia hydrozmesi v potrubí ukazujú, že polynomicke funkcia má s meranou veličinou takmer indentický priebeh.

Na základe zistených skutočností predpokladám, že polynomicke funkcia, ktorá s dostatočnou presnosťou popisuje prúdenie zvodnených sedimentov z vodného diela Gabčíkovo, bude s dostatočnou presnosťou popisovať prúdenie hydrozmesi z kazachstanského jazera Borovoe. Podkladom pre tento predpoklad je granulometrický rozbor sedimentu z Gabčíkova a z jazera Borovoe.

S povedomím o priebehu súčiniteľa trenia vo vzťahu k rýchlosti prúdenia je možné vykresliť závislosť dopravnej vzdialenosti k výtláčnej výške, ktorá platí aj pre dopravu sedimentu z kazašského jazera. Na základe výškovej analýzy okolia jazera Borove som s pomocou programu Google Earth určil ideálnu polohu čerpacej stanice vzhľadom k dopravnej vzdialenosti, výtláčnej výške, dopravnej dostupnosti a obmedzeniu zásahu do využívania jazera. Poloha čerpacej stanice vo vzťahu k polohe technologickej jednotky pre spracovanie sedimentu určuje výtláčnu výšku a dopravnú vzdialenosť pre čerpadlo čerpacej stanice.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] JANALÍK, Jaroslav. Potrubní hydraulická a pneumatická doprava. 1. přeprac. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 1999, 194 s. ISBN 80-707-8595-0.
- [2] KUPKA, František, Jaroslav HRBEK a Jaroslav JANALÍK. Hydraulická doprava v potrubí. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1970, 306, [2] s.
- [3] Hydraulická doprava materiálu potrubím. 1. vyd. Banská Bystrica: Dom techniky ČSVTS, 1989, 213 s.
- [4] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2037-5.
- [5] WAISSER, Zdeněk. *Charakteristika odstředivého čerpadla a odpory v potrubí při čerpání hydrosměsí*. Brno: [s.n.], 1959, 15 s.
- [6] RÁČEK, Josef. *Bagrovací čerpadla*. Brno: Josef Ráček, 1959, 9 s.
- [7] STN EN 12201-2+A1. *Potrubné systémy z plastov na zásobovanie vodou a tlakové kanalizačné potrubia a stoky. Polyetylén (PE). Časť 2: Rúry*. Slovenská republika: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2014.
- [8] NETZSCH. *NEMO M. Champ*. Germany, 2010. Dostupné z: <http://www.netzsch-pumpen.de/en/media-downloads/product-brochures.html>
- [9] NETZSCH. *Product Range: Company, Technology and Application Areas*. Germany, 2012. Dostupné z: <http://www.netzsch-pumpen.de/en/media-downloads/product-brochures.html>
- [10] PIPECO. *Tlakové potrubné systémy PIPECO HDPE: HDPE 100+*. Slovensko, 2009. Dostupné z: [http://www.pipeco.sk/download/katalog\\_PIPECO\\_HDPE.pdf](http://www.pipeco.sk/download/katalog_PIPECO_HDPE.pdf)
- [11] PIPECO. *Technický manuál: Zváranie a inštalácia vodovodných potrubí z polyetylénu (PE)*. Slovensko, 2009. Dostupné z: [http://www.pipeco.sk/download/pipeco\\_tech\\_manual.pdf](http://www.pipeco.sk/download/pipeco_tech_manual.pdf)
- [12] MAREK, Pavel a Zdeněk FRANC. *Hydrosměsi: Plunžrové čerpadlo*. Česká republika, 2010.
- [13] PROGROUPE sediment removal. *Firemná literatúra*. Slovensko, 2014.
- [14] DREDGE YARD. *DREDGE YARD: Dredge Equipment & Technology* [online]. 2014 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.dredgeyard.com/>
- [15] *Google Earth* [online]. 2014 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.google.cz/intl/cs/earth/>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

$a$	[-]	súčiniteľ $a=10$
$Ar$	[-]	Archimedove číslo
$b = d_{36,8}^{-n}$	[mm]	veľkosť zrna odpovedajúca poradnici 38,6% hmotnosti vzorku
$c_v$	[-]	objemová koncentrácia
$c_{xo}$	[-]	odporový súčiniteľ
$c_{xv}$	[-]	súčiniteľ čelného odporu vo vznose
$D$	[m]	priemer sedimentačnej nádoby
$d$	[mm]	veľkosť častíc, priemer častice
$d$	[m]	vnútorný priemer dopravného potrubia
$d^*$	[-]	číslo nerovnorodosti materiálu
$d_{10}$	[m]	veľkosť častice, kde celková hmotnosť menších zrn tvorí 10% hmotnosti pôvodného vzorku
$d_{60}$	[m]	veľkosť častice, kde celková hmotnosť menších zrn tvorí 60% hmotnosti pôvodného vzorku
$d_e$	[m]	ekvivalentný priemer
$d_i$	[m]	priemer i-tej triedy veľkosti zrna
$F_d$	[N]	dynamická sila
$F_o$	[N]	odporová sila
$F_v$	[N]	vztlaková sila
$G$	[N]	tiažová sila
$g$	[ $m/s^2$ ]	gravitačné zrýchlenie
$k$	[-]	Súčiniteľ tvaru zrna
$k_c$	[ $kg/m^3$ ]	koeficient rýchlostnej tlakovej straty
$K_z$	[ $m^{-4}$ ]	výsledná stratová konštanta potrubného systému
$l$	[m]	dĺžka dopravného potrubia
$l_{vyp}$	[m]	výpočtová dĺžka potrubia
$m_p$	[kg]	hmotnosť pevnej fáze
$m_{pN}$	[kg]	hmotnosť N pevných častíc

$m_s$	[kg]	hmotnosť suspenzie
$m_v$	[kg]	hmotnosť vody
N	[-]	počet častíc
n	[-]	parameter nerovnorodosti
$n_i$	[-]	počet zrn v medziach danej triedy
NV	[-]	stupeň nasýtenia pevnej fáze vodou
$p_A$	[Pa]	tlak v bode A
$p_B$	[Pa]	tlak v bode B
Q	[ $m^3/s$ ]	prietok
R	[-]	hmotnostné % nadsátneho pre veľkosť zrna d
$Re_w$	[-]	Reynoldsove číslo sedimentácie
S	[ $m^2$ ]	plocha prierezu dopravného potrubia
t	[s]	čas
$v_p$	[ $m/s$ ]	rýchlosť pevnej fáze
$V_p$	[ $m^3$ ]	objem pevnej fáze
$v_s$	[ $m/s$ ]	rýchlosť suspenzie
$V_s$	[ $m^3$ ]	objem suspenzie
$v_v$	[ $m/s$ ]	rýchlosť kvapalnej fáze
$V_v$	[ $m^3$ ]	objem vody
$w_*$	[ $m/s$ ]	sedimentačná rýchlosť so zahrnutým vplyvom valcovej nádoby
$W_{zm}$	[-]	vlhkosť vzorku
Y	[ $J/kg$ ]	merná energia čerpadla
$Y_z$	[ $J/kg$ ]	merná stratová energia
z	[m]	výška medzi dvoma meranými bodmi
$\beta$	[-]	konštanta úmernosti zahrňujúca vplyv nerovnomerného rozloženia rýchlosti kvapaliny po pridaní nových častíc
$\Delta p$	[Pa]	tlaková diferencia
$\Delta p_p$	[Pa]	tlaková strata v potrubí podľa Hrbka a kol.
$\zeta_c$	[-]	celkový stratový súčiniteľ
$\lambda$	[-]	súčiniteľ trenia

---

$\mu$	$[Pa \cdot s]$	viskozita suspenzie
$\mu_v$	$[Pa \cdot s]$	viskozita kvapaliny
$\nu$	$[m^2/s]$	kinematická viskozita
$\pi$	$[-]$	Ludolfovo číslo
$\rho_p$	$[kg/m^3]$	hustota pevné fáze
$\rho_s$	$[kg/m^3]$	hustota suspenzie
$\rho_v$	$[kg/m^3]$	hustota vody
$\omega^*$	$[\%]$	nasiakavost'

---

# ZOZNAM ELEKTRONICKÝCH PRÍLOH

- Charakteristika\_cerpadla\_vypocet.xlsx
- Vypocet\_23.10.2013
- Vypocet\_24.10.2013
- Vypocet\_25.10.2013
- Vypocet\_26.10.2013
- Vypocet\_27.10.2013

