

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav energetiky



# Diplomová práce

Problematika čerpání čistírenských kalů

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fišer** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **475033**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**  
Specializace: **Energetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Problematika čerpání čistírenských kalů**

Název diplomové práce anglicky:

**Problematics of sewage sludge pumping**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte literární rešerši o dostupných metodách, umožňujících přepočít vybraných výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla z čisté vody na parametry v případě čerpání čistírenského kalu. Proveďte měření relevantních hydraulických a elektrických veličin na hydrodynamickém kalovém čerpadle instalovaném v ÚČOV v Praze Dejvicích. Experimentálně zjištěné veličiny při čerpání konkrétního čistírenského kalu porovnejte s parametry predikovanými podle vytypované metody přepočtu. Proveďte posouzení vlivu kalu na stěžejní parametry čerpadla.

Seznam doporučené literatury:

Handbook of Sludge Pumping, Published by ITT Water & Wastewater AB, Gesällvägen 33, SE-174 87 Sundbyberg, Sweden, 2011

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Jan Melichar, CSc. 12112**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **25.10.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jan Melichar, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 9.1.2023

.....

podpis

## Poděkování

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu práce panu prof. Ing. Janu Melicharovi, CSc. a panu Ing. Václavu Hodaňovi za ochotu, doporučenou literaturu a odborné rady při vedení diplomové práce. Poděkování také patří společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s. za umožnění vykonávat experimentální měření na území ÚČOV v Praze a Magnusovi Fahlgrenovi, M. Sc., Mech. Eng. za odborné konzultace k teoretické části diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

# Anotace

Autor:	Bc. Václav Fišer
Název:	Problematika čerpání čistírenských kalů
Rozsah práce:	90 str., 40 obr., 1 tab.
Školní rok vyhotovení:	2023
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12115 – Ústav energetiky
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jan Melichar, CSc.
Využití:	Teoretické poznatky v oblasti čerpání čistírenského kalu a následný dopad kalu (viskózní disperzní kapalina vykazující nenevtonské chování) na charakteristiku hydrodynamického kalového čerpadla.
Klíčová slova:	hydrodynamické (odstředivé) čerpadlo, čistírenský kal, nenevtonská kapalina, provozní bod hydrodynamického kalového čerpadla, přepočít výkonových charakteristik
Anotace:	Diplomová práce se zabývá teoretickými poznatky v oblasti čerpání čistírenského kalu, který negativně ovlivňuje výkonové charakteristiky hydrodynamického kalového čerpadla. Na základě znalosti obsahu sušiny čistírenského kalu byla stanovena predikce změny výkonových charakteristik hydrodynamického kalového

čerpadla a následně provedeno porovnání  
s experimentálně naměřenými hodnotami.

# Annotation

Author:	Bc. Václav Fišer
Title:	Problematics of sewage sludge pumping
Extent:	90 p., 40 fig., 1 tab.
Academic year:	2023
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12115 – Department of Energy Engineering
Supervisor:	prof. Ing. Jan Melichar, CSc.
Application:	Theoretical knowledge in the area of pumping sewage sludge and subsequent impact of sludge (viscous fluid, which is having non-newtonian character) on characteristic of hydrodynamic submersible pump.
Key words:	hydrodynamic (centrifugal) pump, sewage sludge, non-newtonian fluid, operating point of hydrodynamic sewage submersible pump, deration of centrifugal pumps for non-newtonian sludges
Annotation:	This master thesis deals with theoretical knowledge on the negative impact of sewage on centrifugal pump characteristics. A change of sewage pump characteristics was predicted based on the determination of sewage mass concentration. The change was then verified with experimentally values.

## Seznam použitých zkratk

AOR	Allowable operating region (dovolený pracovní rozsah)
ANSI	American National Standards Institute (Americký národní úřad pro normalizace)
ATS	Aerobní termofilní stabilizace
BEP	Best efficiency point (bod nejlepší účinnosti čerpadla)
ČOV	Čistírna odpadních vod (obecné pojetí významu)
HB	Reologický model Herschel-Bulkley
HI	Hydraulický institut
NMJ	Nová mokrá jímka
NPSH	Net positive suction head (čistá pozitivní sací výška)
OV	Odpadní voda
POR	Preferred operating region (doporučený pracovní rozsah)
VN	Vyhňivací nádrž
VS	Volatile solids (volatilní/těkavé pevné částice)
TS	Total solids (obsah sušiny v čistírenském kalu)
ÚČOV	Ústřední čistírna odpadních vod (konkrétní ÚČOV podléhající experimentálnímu měření)
VFD	Variable frequency driver (frekvenční měnič)

## Seznam použitých značek, jednotek a veličin

A	-	hladina v nádrži A
a	-	parametr závislý na typu proudění
B	-	hladina v nádrži B
$C_H$	-	korekční faktor pro diferenční výšku
$C_Q$	-	Korekční faktor pro průtok
$C_\eta$	-	Korekční faktor pro celkovou účinnost
c	$m \cdot s^{-1}$	střední hodnota rychlosti proudění kapaliny
$D_h$	m	Hydraulický rozměr





---

$D_{imp}$	m	průměr oběžného kola čerpadla
$d$	m	vnitřní průměr potrubí
$f(Q^a)$	$J.kg^{-1}$	měrná energie dynamické složky charakteristiky potrubí
$g$	$m.s^{-2}$	tíhové zrychlení
$H$	m	energetická výška
$H_g$	m	geodetický výška
$H_{kal}$	m	dopravní výška při čerpání kalu
$H_{vis}$	m	dopravní výška při čerpání viskózních látek
$H_{voda}$	m	dopravní výška při čerpání čisté vody
$H_z$	m	ztrátová výška
$H_{zs}$	m	ztrátová výška sacího řadu
$H_{zv}$	m	ztrátová výška výtlačného řadu
$H^{kl}$	m	dopravní výška přepočtená z vody na 5,8% kal
$H^v$	m	dopravní výška pro vodu
$K$	$Pa.s^r$	koeficient konzistence
$k_s$	-	konstanta úměrnosti mezi průměrným gradientem rychlosti deformace v oblasti oběžného kola a otáčkami čerpadla
$N$	$s^{-1}$	otáčky čerpadla
$n$	$ot.min^{-1}$	otáčky čerpadla
$n'$	-	index chování místního proudění
$P$ a $P_1$	W	příkon pohonu soustrojí (svorkový)
$P_{vis}$	W	příkon hydrodynamického čerpadla při čerpání viskózních směsí
$p'$	Pa	tlak v nádrži A
$p''$	Pa	tlak v nádrži B
$Q$	$m^3.s^{-1}$	objemový průtok
$Q_{vis}$	$m^3.s^{-1}$	objemový průtok viskózní látky
$Q_{voda}$	$m^3.s^{-1}$	objemový průtok čisté vody
$r$	-	reologický exponent
TS	%	objemová koncentrace



---

t	°C	teplota
v	m.s <sup>-1</sup>	rychlost proudění kapaliny
w	m	charakteristická délka čerpadla (metoda Pullum a kol.)
Y	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie
Y <sub>p</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie potrubí
Y <sub>st</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie statická
Y <sub>s</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie sacího řadu
Y <sub>sv</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie čerpadla
Y <sub>v</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie výtlačného řadu
Y <sub>z</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná energie ztrátová
Y <sub>zs</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná ztrátová energie sacího řadu
Y <sub>zv</sub>	J.kg <sup>-1</sup>	měrná ztrátová energie výtlačného řadu
H <sub>g</sub>	m	geodetická výška
H <sub>gs</sub>	m	geodetická výška sacího řadu
H <sub>gv</sub>	m	geodetická výška výtlačného řadu
η	%	účinnost
η <sub>c</sub>	%	celková účinnost čerpadla
η <sub>vis</sub>	%	účinnost při čerpání viskózních látek
η <sub>voda</sub>	%	účinnost při čerpání čisté vody
ρ	kg.m <sup>-3</sup>	hustota
ρ <sub>částic</sub>	kg.m <sup>-3</sup>	hustota částic
ρ <sub>kapaliny</sub>	kg.m <sup>-3</sup>	hustota kapaliny
ρ <sub>kl</sub>	kg.m <sup>-3</sup>	hustota kalu
ρ <sub>v</sub>	kg.m <sup>-3</sup>	hustota vody
τ	Pa	smykové napětí
τ <sub>p</sub>	Pa	počáteční smykové napětí
ν	cSt	kinematická viskozita
μ	Pa.s	dynamická viskozita (pro neneutonské látky zdánlivá viskozita)
γ <sub>b</sub>	s <sup>-1</sup>	hraniční gradient rychlosti deformace (smyková rychlost)
$\frac{du}{dy}$	s <sup>-1</sup>	gradient rychlosti (změna rychlosti kolmo ke směru proudění)

# Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Anotace .....	5
Annotation .....	7
Seznam použitých zkratk.....	8
Seznam použitých značek, jednotek a veličin .....	8
1 Úvod .....	13
2 Cíl práce.....	15
3 Čistírenský kal.....	16
3.1 Stupně čištění odpadních vod .....	16
3.2 Reologické vlastnosti kalů .....	18
3.3 Reologické modely a chování koncentrovaných kalů .....	19
3.3.1 Newtonův a Ostwald-de Waeleův (mocninný) model .....	20
3.3.2 Binghamský a Herschel-Bulkleyho model .....	22
3.4 Typizace čistírenských kalů .....	24
3.4.1 Primární kal .....	24
3.4.2 Sekundární nebo aktivovaný kal .....	25
3.4.3 Chemický kal.....	26
3.4.4 Gravitačně zahuštěný kal .....	26
3.4.5 Mechanicky zahuštěný kal .....	27
3.4.6 Vyhníly kal .....	28
3.4.7 Odvodněný kal .....	28
4 Hydraulický systém .....	30
4.1 Systémová charakteristika při čerpání čistírenského kalu .....	31
4.2 Charakteristika hydrodynamického čerpadla a změna jeho výkonových charakteristik při čerpání kalu.....	35
4.3 Pracovní bod hydrodynamického čerpadla při čerpání neneutonských kapalin .....	37
5 Čerpadla v kalovém hospodářství .....	40
5.1 Hydrodynamická čerpadla .....	42
5.1.1 Vířivé oběžné kolo.....	43
5.1.2 Kanálové oběžné kolo .....	45
5.1.3 Polootevřené oběžné kolo .....	46
Řezací oběžné kolo.....	46
Šroubové oběžné kolo.....	47

N – oběžné kolo.....	49
5.1.4 Samonasávací čerpadla .....	50
5.2 Hydrostatická (objemová) čerpadla .....	52
5.2.1 Pístová čerpadla .....	52
5.2.2 Vzduchem ovládaná membránová čerpadla.....	54
5.2.3 Zubová čerpadla .....	55
5.2.4 Čerpadla s rotačními písty (Lobe čerpadla).....	57
5.2.5 Čerpadla s posuvnými lopatkami (lamelami) .....	58
5.2.6 Peristaltické čerpadlo.....	60
6 Metody umožňující přepočítání výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla z čisté vody na parametry při čerpání čistírenských kalů.....	61
6.1 Přepočítání výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla pro newtonské kaly 62	
6.2 Přepočítání výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla pro neneutonské kaly 65	
6.2.1 Metoda Walker and Goulas .....	66
6.2.2 Metoda Sery a kol. ....	67
6.2.3 Metoda Pullum a kol. ....	68
6.2.4 Metoda publikovaná ITT Water & Wastewater AB.....	70
7 Vlastní měření vybraných elektrických a hydraulických veličin na hydrodynamickém kalovém čerpadle .....	71
8 Porovnání naměřených výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla s parametry přepočtenými podle metody publikované ITT Water & Wastewater AB.....	78
9 Posouzení vlivu kalu na stěžejní parametry hydrodynamického kalového čerpadla .....	81
10 Závěr.....	83
Seznam použité literatury .....	85
Seznam obrázků .....	88
Seznam tabulek.....	89
Seznam použitého softwaru .....	89
Seznam příloh.....	90
Seznam elektronických příloh .....	90

# 1 Úvod

Pro trvale udržitelné přirozené podmínky pro život, samotnou existenci organismů (člověka nevyjímaje) a celých soustav ekosystémů je nutné dbát na dostatečnou kvalitu a efektivitu provedení čištění odpadních vod. Životní prostředí sestávající zejména z půdy, hornin, ovzduší, vody nebo ekosystémů může být potenciálně znečištěno či nevratně poškozeno, v případech zanedbání, selhání či po úplném vynechání procesu čištění odpadních vod, vnášením takových chemických, biologických a fyzikálních činitelů, které svou podstatou či kvantitou mohou být cizorodé a ohrožující pro zdravé životní prostředí. Proces čištění odpadních vod probíhá v současnosti často ve velkokapacitních čistírnách odpadních vod, které jsou schopny pojmout v rámci procesu čištění OV města či větší aglomerace. Do ČOV nejčastěji ústí velice rozsáhlá kanalizační síť, jejíž cílem je zbavit kontinuálně přitékající surovou znečištěnou vodu většiny fyzikálních, biologických a chemických látek potenciálně nebezpečných pro životní prostředí a lidské zdraví. Vyčištěná a dále nijak zdraví ohrožující OV je vypouštěna zpět do přírody tak, aby se znovu mohla začlenit do hydrologického cyklu ve snaze zachovat stabilitu mezi znečišťujícími a revitalizačními procesy nakládání s vodou. Veškeré zde zmíněné látky, které jsou svou podstatou balastní či škodlivé, zachycené v jednotlivých procesech čištění OV, jsou produktem celého cyklu čištění OV a jako takové jsou označovány za odpad spadající do kategorie „ostatní odpad“ pod katalogovým číslem 19 08 05 (Čistírenský kal). [1]

Pro zajištění efektivního a spolehlivého chodu zařízení pro čištění OV je potřeba zajistit vhodnou čerpací techniku, která umožňuje bezpečnou a spolehlivou dopravu čistírenského kalu přes všechny stupně a fáze čištění. ČOV používají pro dopravu kalu čerpací techniku využívajících dvou hlavních principů, které jej dělí na čerpadla hydrostatická (objemová) a hydrodynamická (odstředivá). Čerpadla hydrostatická se používají především pro vysoké hodnoty podílu sušiny v čistírenských kalech (obvykle se jedná o objemovou koncentraci pevných částic v čistírenském kalu vyšší než 10 %). Aplikace a užití hydrodynamických čerpadel směřuje na nižší objemové koncentrace pevných částic v čistírenském kalu (uvádí se interval do cca 8 %).

Tato práce směřuje na provoz a aplikaci hydrodynamických kalových čerpadel při čerpání čistírenských kalů a jejich dopad na čerpatelnost při čerpání těchto viskózních kapalin. Čistírenský kal je svou podstatou a složením velice těžko předvídatelná kapalina, která se již od 1 % objemové koncentrace pevných částic stává tzv. neneutonskou kapalinou, jež je

charakterizována proměnlivou viskozitou měnící se v závislosti na rychlostním gradientu deformace kapaliny (závislá na střední rychlosti proudění pracovní látky potrubím) a lze tedy deklarovat její neschopnost řídit se dle Newtonova zákona o viskozitě. Tato skutečnost má za následek obtížnější výběr vhodného hydrodynamického kalového čerpadla a v ideálním případě stanovení provozního bodu či spíše pracovního rozpětí hydraulického systému pro aplikaci při čerpání čistírenských kalů.

Veškerá dostupná čerpací technika je výrobcí čerpadel testována při čerpání čisté vody a na základě těchto dat jsou stanoveny v technické specifikaci každého konkrétního výrobního typu hydraulického stroje specifické výkonové charakteristiky. Je tedy zřejmé, že v případě čerpání látky, jejíž reologické vlastnosti se odlišují od čisté vody, budou mít negativní dopad na výkonové charakteristiky čerpacího zařízení a tento fakt nelze brát na lehkou váhu při navrhování hydrodynamických kalových čerpadel do technologií pracujících s kaly. Řešením této problematiky se jeví snaha predikovat chování výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání čistírenských kalů z hlediska hledání co nejehospodárnějšího řešení a k tomuto okruhu problémů přispívá i tato diplomová práce.

Pro zajištění funkčnosti ČOV, resp. pro spolehlivé čerpání čistírenských kalů, jsou klíčová kalová čerpadla, jakožto základní funkční článek celého čistícího procesu. I s ohledem na různorodost kalů není doposud problematika čerpání kalů dokonale vědecky prozkoumána. Svou prací se snažím přispět k prohloubení lidského poznání a ke zdokonalení postupů při využívání vhodných hydrodynamických kalových čerpadel na ČOV.

## 2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je zpracovat literární rešerši o problematice čerpání čistírenských kalů zejména o dostupných metodách umožňujících přepočet vybraných výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla z čisté vody na parametry pro čerpání čistírenského kalu a zároveň provedení měření relevantních hydraulických a elektrických veličin na hydrodynamickém kalovém čerpadle instalovaném v ÚČOV v Praze.

Vlastní řešení bude obsahovat vyhodnocení experimentálních dat naměřených na hydrodynamickém kalovém čerpadle a ověření uvedených naměřených dat s výkonovými charakteristikami daného hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání čisté vody s predikovanými výkonovými charakteristikami z čisté vody při čerpání 5,2% čistírenského kalu.

Postup zpracování diplomové práce:

1. zhotovení literární rešerše problematiky čerpání čistírenských kalů a jejich čerpání hydrodynamickými kalovými čerpadly a o dostupných metodách umožňující přepočet vybraných výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla z čisté vody na parametry pro čerpání čistírenského kalu
2. realizace experimentálního měření vybraných výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání kalu o objemové koncentraci 5,2 %
3. volba vhodné metody přepočtu výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání čisté vody na výkonové charakteristiky daného čerpadla při čerpání 5,2% kalu
4. realizace přepočtu  
srovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla vycházejících z teoretického přepočtu a experimentálního měření
5. závěr

## 3 Čistírenský kal

Pojem kal lze definovat jako suspenzi koloidních a pevných částic organických či anorganických látek ve směsi s vodou. Kal je nevyhnutelný produkt vznikající při úpravě vody a čištění odpadních vod a představuje přibližně 1-2 % celého objemu čištěných odpadních vod, do nichž je právě transformováno 50-80 % původního znečištění. Náklady na přijatelné a bezpečné zpracování kalu rostou a mohou tvořit 50 % provozních nákladů na čištění OV. [2]

Množství vyprodukovaných kalů závisí na:

1. množství odpadní vody
2. kvalitě odpadní vody
3. použité technologii pro čištění odpadních vod
4. použité technologii pro zpracování kalů

Během čištění komunálních a průmyslových OV vznikají celé řady druhů odpadů, se kterými se musí provozovatelé ČOV umět vypořádat a řádně s nimi nakládat dle aktuální legislativy, kde poté samotné čištění OV lze dělit na jednotlivé procesy, které na sebe postupně navazují. V průběhu jednotlivých fází čištění OV jsou produkovány příslušné druhy odpadů. [3]

### 3.1 Stupně čištění odpadních vod

Nátok odpadních vod do ČOV je soustředěn v jedno vyústění, do kterého je vedena celá kanalizační síť dané oblasti. Kanalizace má úlohu jako dopravní cesta pro přepravu OV k řádnému čištění, na kterou jsou přímo napojeny nejen domácnosti, obchodní domy, společnosti atd., ale také svody ze silnic tzn. dešťové a technologické vody, přičemž mají sklon ke strhávání mechanických částí, vyskytujících se na povrchu silnic, chodníků a cest. Největší zastoupení mechanických částí v OV je písek, štěrku a pozůstatky stavebnin (cihly, zdivo aj.). [4]

Prvním stupněm čištění OV je tzv. mechanické předčištění, kterého je docíleno za použití k tomu vhodných technologických komponent. Přítok odpadních vod protéká nejdříve první částí přes lapák štěrku (vyspádované dno), kde dochází k sedimentaci štěrku a písku a k jeho následnému odčerpávání v různých intervalech. Druhou část mechanického předčištění vytvářejí hrubé česle s průchodností pevných částic do velikosti 50 mm, které oddělí větší plovoucí nečistoty z OV. Po této fázi čištění ústí odpadní voda do čerpací šachty osazené ponornými kalovými čerpadly. Surová odpadní voda je dopravována přes jemné česle



a lapák písku (často bývá i v kombinaci s lapákem tuku) do usazovací nádrže. V usazovací nádrži probíhá postupná sedimentace nerozpuštěných látek vločkovité či zrnité povahy a takové látky inklinují ke shlukování a následnému usazování. Vlivem usazování na základě rozdílné hustoty dochází k separaci primárního kalu, jenž sedimentuje na dně nádrže, a odděluje se tak od surové vody. Plovoucí nečistoty objevující se na hladině usazovací nádrže jsou odebírány strojně pomocí sběrného ramena. [4] [5]

Dalším stupněm úpravy, již vzniklé surové vody z usazovací nádrže, následuje biologická fáze čištění probíhající v aktivační nádrži. Proces biologického čištění OV směřuje k eliminaci organických látek, dusíku či fosforu za přítomnosti vybraných mikroorganismů, které mají schopnost buď využívat znečišťující látky jako zdroj energie nebo tyto látky separovat a dále akumulovat. V čistírenské praxi se ustálil název pro takovou směs obsahující příslušné mikroorganismy jako aktivovaný kal. Aktivační nádrž musí být pro správný chod homogenizována (míchadly) a provzdušňována (aerací) v konkrétně nastavených intervalech, aby byly vytvořeny ideální životní podmínky pro mikroorganismy. K separaci vyčištěné vody od aktivovaného kalu dochází v dosazovací nádrži vlivem sedimentace, kde část zahuštěného aktivovaného kalu je čerpána zpět do aktivační nádrže jako kal vratný, z důvodu zabránění úbytku mikroorganismů v systému a zbylý přebytečný zahuštěný kal je dopravován k finální úpravě do kalového hospodářství spolu s primárním kalem. [4] [6]

Po předchozích stupních předúpravy a čištění kalu, počínaje mechanickým a biologickým čištěním, následuje kalové hospodářství upravující kal do stavu, kdy již nebude hrozbou pro lidský organismus či životní prostředí. Taková úprava je označována jako stabilizace kalu, kdy je zastaven samovolný rozkladný proces a uvedení produktu čištění OV do koncového ustáleného stádia. V praxi používané metody, jimiž dochází ke stabilizaci kalu, jsou anaerobní stabilizace (za nepřístupu vzduchu) a aerobní termofilní stabilizace (za přístupu vzduchu) (ATS). První zmíněná technologie pro stabilizaci kalu je v ČR nejrozšířenější a dochází během ní k přeměně většiny biologicky rozložitelných organických látek na bioplyn. Stabilizace se v základu dělí také na teploty, za kterých je proces provozován. Termofilní průběh je doprovázen zvýšením teploty až na 55 °C, zatímco mezofilní průběh se pohybuje okolo 38-40 °C. Tímto provozem také vzniká vedlejší produkt v podobě bioplynu. V podobě odvodněného kalu, který se používá jako hnojivo v zemědělství, nebo po dostatečném vysušení, tedy zbavení kalu přebytečné vlhkosti, k termickému zpracování. Zřídka je tendence se uchýlovat ke skládkování (pouze krajní způsob řešení z důvodu ekologické resp. ekonomické zátěže). [6] [7]

Technologie úpravy odpadních vod může zahrnovat metody hygienizace kalů, která se instaluje zejména u menších ČOV, aby bylo dosaženo dostatečné kvality a nezávadnosti kalu. Kal po samotné stabilizaci může stále, i když v menší míře, obsahovat škodlivé látky, jako např. zvýšený obsah dusíku, nebo škodlivé mikroorganismy. Zde se aplikují metody fyzikální (působení teploty, radiace, ultrazvuku) a chemické (vápno, minerální kyseliny, flokulační činidla). [2] [3]

## 3.2 Reologické vlastnosti kalů

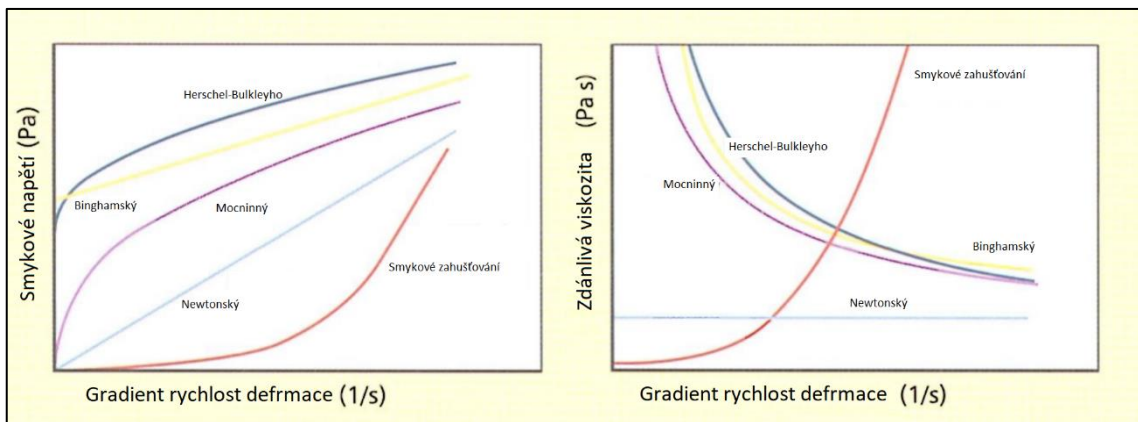
Studiem deformací hmoty a nalezení vztahů mezi deformací, napětím a rychlostí deformace se zabývá reologie. Hlavní parametry při zkoumání vlastností tekutých látek za pohybu (deformace způsobená smykovým zatížením) jsou viskozita, hustota, velikost částic, a zrnitost. Reologické vlastnosti kalů jsou zcela klíčové pro jejich dopravu a transport. Vyjma znalosti reologických vlastností kalu je také zapotřebí zahrnout do problematiky jejich ovlivňující faktory, které mohou být často rozhodující pro konkrétní aplikaci v provozu. [8]

### Faktory ovlivňující reologii kalu:

- Typ a původ kalu
- Obsah TS (obsah sušiny v čistírenském kalu)
- Tvar a délka vláken
- Velikost, tvar a síla koloidních částic
- pH
- Teplota
- Chemické substance (flokulanty a koagulanty)

Deformace tekutiny je způsobena buď tažnou nebo smykovou silou, která vede k určitému napětí tekutiny. Výsledná odezva tekutiny má elastické nebo viskózní chování. V reologických studiích je zajímavé pozorovat chování v rozmezí mezi ideálním elastickým a viskózním chováním tekutin. Reologická data lze prezentovat pomocí průtokové křivky. Průtoková křivka znázorňuje závislost smykového napětí, tedy napětí vyvolané smykem, na rychlosti deformace zkoumané pracovní látky. Závislost je zobrazena na Obr. 1 a). V případě lineárního průběhu je tvar křivky konstantní a zdánlivá viskozita je neměnná. Tyto tekutiny jsou známé jako newtonské tekutiny (řídí se dle Newtonova zákona viskozity). Závislost lze pozorovat na Obr. 1 b) a je popsána vztahem (3.1). [8]

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (3.1)$$



Obr. 1 a) Závislost smykového napětí na rychlosti deformace dané tekutiny pro vybrané reologické modely, b) Závislost zdánlivé viskozity na rychlosti deformace dané tekutiny pro vybrané reologické modely [8]

V případě nelineárního průběhu křivky (nelineární závislost smykového napětí na rychlosti deformace) nenewtonských kapalin se pro další charakteristiku těchto látek používá zdánlivé viskozity a rychlostního gradientu deformace pracovní látky. Zdánlivá viskozita má pro každou hodnotu rychlostního gradientu deformace specifický tvar křivky. Aby bylo možné popsat nenewtonské tekutiny, musí být takové chování popsáno několika parametry, které charakterizují vlastnosti tekutosti nenewtonské kapaliny a bývají závislé pouze na teplotě. [8]

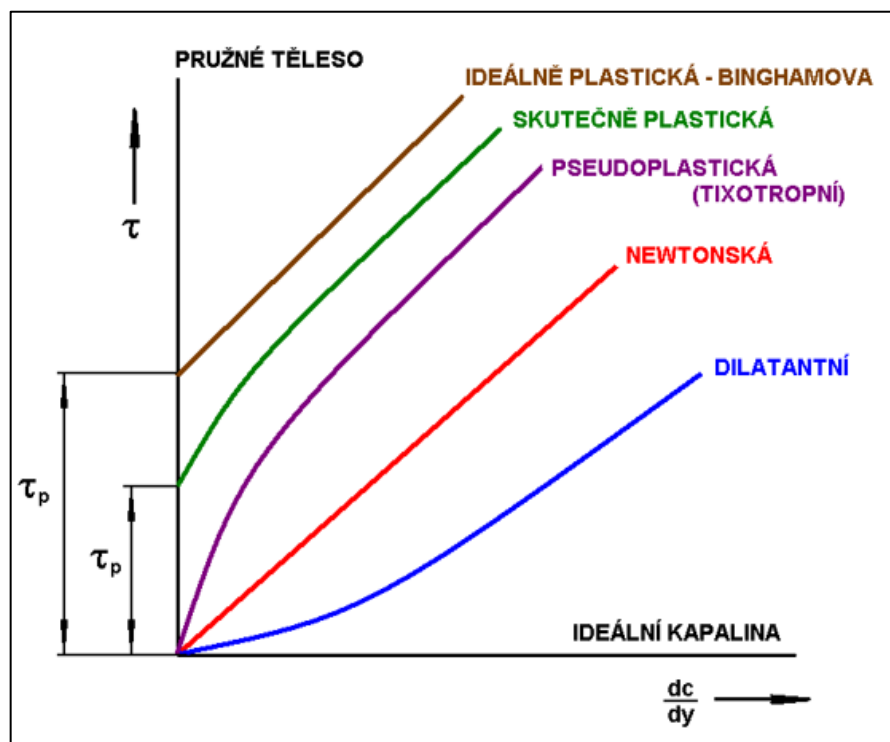
### 3.3 Reologické modely a chování koncentrovaných kalů

Pro matematické popsání problematiky závislosti smykového napětí vzniklého v tekutině na rychlostním gradientu deformace kapaliny se uplatňují reologické modely. V současnosti se lze shledat s mnoha rozdílnými reologickými modely vhodně popisujícími nenewtonské kapaliny, jimiž mohou být např. Herschel-Bulkleyho model, ideální či plastický Binghamův model, Newtonův a Ostwald-de Waeleův (mocninný) model. [9] [10]

Charakteristiky toku nenewtonské kapaliny mohou nabývat mnohých rozlišných závislostí, jak lze zpozorovat z Obr. 2. Nenewtonská kapalina může vykazovat zvyšující se zdánlivou viskozitu, tzv. chování při smykovém zahušťování. Ekvivalent pro klesající zdánlivou viskozitu je známý jako smykové ředění. Poslední známou variantou jsou látky s plastickou složkou deformace, kde jejich tok nastává až po určitém překročení prahového smykového napětí, tzv. meze kluzu (toku) tekutiny. [9] [10]

Čistírny odpadních vod (ČOV) zahrnují širokou škálu kapalinových transportů a

kapalinových suspenzí s různými průtokovými charakteristikami. Vodná suspenze se mění v závislosti na zvyšující se koncentraci částic a rozpuštěných látek. Splaškový kal je ovšem tekutina vykazující nelineární chování. Kromě toho se newtonské vlastnosti čistírenského kalu liší v závislosti na jeho původu a historii procesu. Procesy, kde se používají polymerní přísady nebo mechanické kroky, jako je např. mechanické odvodnění kalu, mění charakteristiky kalu. Způsob, jakým je původem komunální nebo průmyslový kal zpracován, ovlivňuje charakter kalu. Nedávná studie však ukazuje, že komunální kaly z čistíren odpadních vod standardně vykazují chování při smykovém ztenčování. [9] [10] [11]

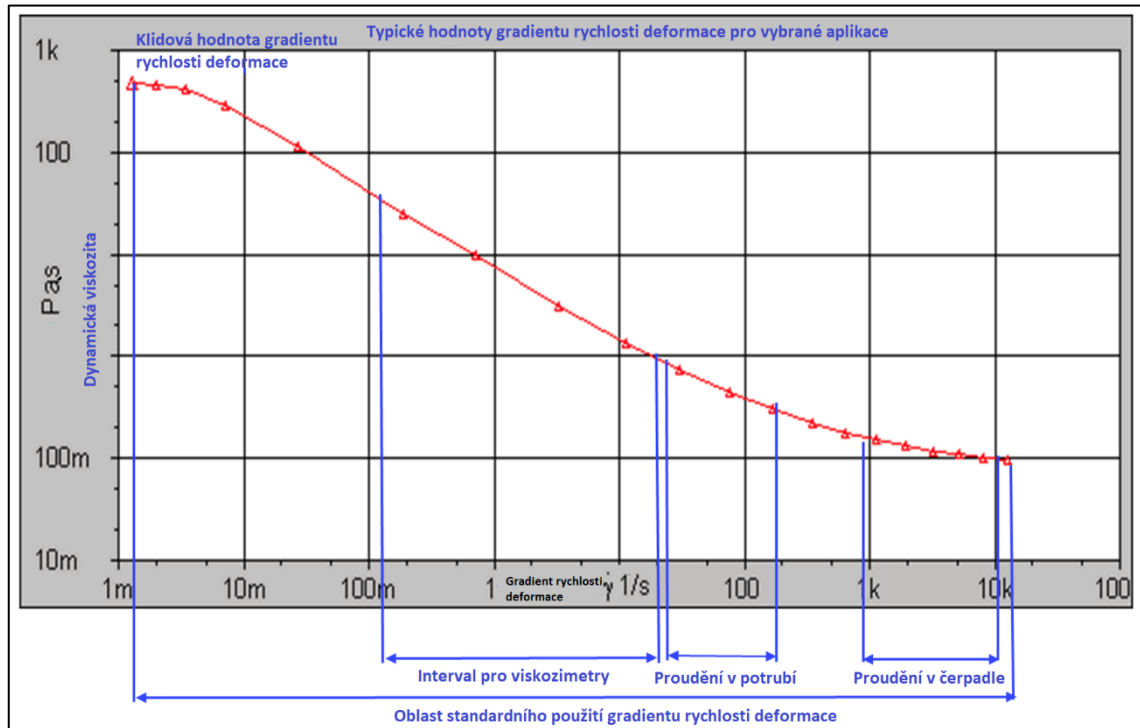


Obr. 2 Schematické zobrazení křivek matematických reologických modelů popisující závislost smykového napětí na rychlostním gradientu deformace kapaliny [12]

### 3.3.1 Newtonův a Ostwald-de Waeleův (mocninný) model

Newtonův zákon viskozity (3.1) a jeho matematické vyjádření je zcela exaktní a vyplývá z něho lineární průběh závislosti smykového napětí na rychlostním spádu deformace kapaliny. Na Obr. 2 je Newtonův model popsán červenou křivkou. Newtonův reologický model je uplatňován zejména u kapalin neprojevujících nenulové počáteční prahové napětí. Závislost zdánlivé viskozity na rychlostním gradientu deformace kapaliny je konstantní (není závislá na gradientu rychlosti), tedy v případě zmíněného modelu se jedná přímo o dynamickou viskozitu charakterizující interní tření newtonské kapaliny. Typickými kapalinami, řídící se výše

zmíněným zákonem, mohou být olej, voda, alkohol, benzen a jiné nízkomolekulární látky.



Obr. 3 Grafické znázornění závislosti zdánlivé viskozity na rychlostním gradientu pro typický rozsah využití [13]

Jedním z často používaných modelů je mocninný model (Ostwald-de Waeleův), jenž je popsán vztahem (3.2).

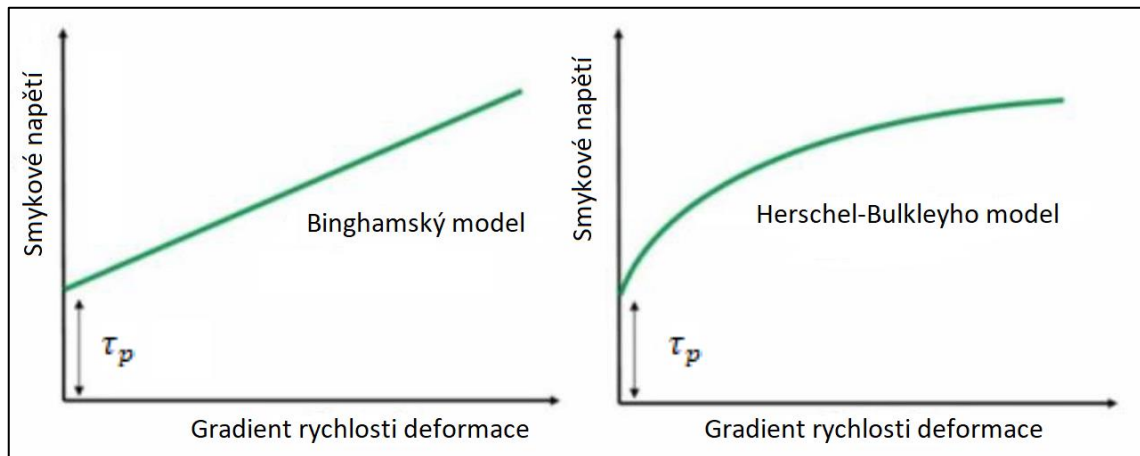
$$\tau = K \cdot \frac{du^r}{dy} \quad (3.2)$$

kde  $K$  je koeficient konzistence,  $r$  je mocninný (reologický) exponent představující newtonské chování,  $\frac{du}{dy}$  rychlostní gradient, jenž lze přirovnat k velikosti rychlosti proudění kapaliny v potrubí. V případě, kdy  $r = 1$ , se jedná o Newtonův případ, kde  $K$  představuje konstantní dynamickou viskozitu. Kapaliny vykazující chování pseudoplastické (tixotropní) zaujímá trend klesající zdánlivé viskozity s rostoucí rychlostí proudění kapaliny. Takové chování je matematicky popsáno v mocninném modelu velikostí reologického exponentu  $r$ , pro který platí  $r < 1$ . Naopak látky reagující na zvyšující se změnu rychlostního gradientu, s kladným přírůstkem reologického exponentu  $r$  ( $r > 1$ ), jsou označovány jako látky dilatantní, tzn. probíhající chování při smykovém zahušťování. Obr. 3 představuje typické znázornění závislosti zdánlivé viskozity na rychlostním gradientu pro typický rozsah využití v praxi, kdy se zkoumaná látka chová při smykovém ředění (tixotropně). V oblasti proudění v potrubí (angl. „Pipe shear“) je diference ve zdánlivé viskozitě značná a lze ji v tomto rozsahu popsat mocninným modelem,

tedy mocninný model se používá častěji v případech vyšších nabývajících hodnot rychlostního gradientu. [9] [13]

### 3.3.2 Binghamský a Herschel-Bulkleyho model

Viskoplastické tekutiny jsou definovány jako tekutiny s mezí kluzu, tzn. že se dostanou do stavu proudění (fluidace) až po jejím dosažení. Na Obr. 4 se lze shledat se dvěma verzemi modelů a to model Binghamský a Herschel-Bulkleyho, kde první z nich (vlevo) představuje ideální plastický model a druhý (vpravo) znázorňuje model skutečně plastický.



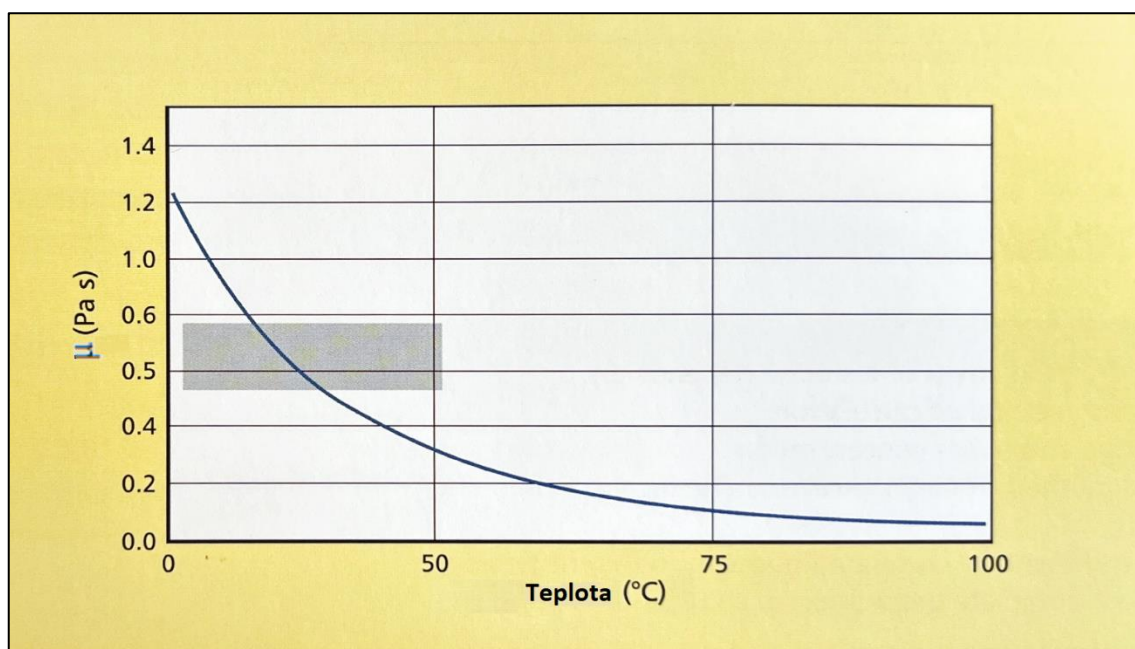
Obr. 4 Herschel-Bulkleyho model znázorněn v závislosti smykového napětí na rychlostním gradientu deformace kapaliny. a) Ideálně plastický b) Skutečně plastický [14]

U obou modelů je zřejmé, že musejí překonat mez kluzu, aby došlo k toku média, ovšem po překročení prahové rychlosti deformace, kdy tekutina se uvede vlivem zvyšujícího se rychlostního gradientu do pohybu, tak nastává zásadní změna v průběhu tokové křivky. Ideálně plastický model pokračuje, po dosažení fluidace, podle Newtonova zákona o viskozitě, kdy se dostává křivka závislosti smykového napětí na rychlostním gradientu deformace kapaliny do lineárního průběhu ( $r = 1$  a koeficient konzistence  $K$  se rovná dynamické viskozitě). Naopak u skutečně plastického modelu dochází dále k zakřivení tokové křivky dle mocninného modelu, kdy reologický parametr nabývá hodnot  $r < 1$ . K reprezentaci reologického chování koncentrovaných suspenzí se používají viskoplastické modely popsané nadcházejícími matematickými vztahy (3.3) a (3.4). Rovnice (3.3) je kombinací meze kluzu zkoumané látky (počáteční smykové napětí) v součtu s Newtonovým zákonem o viskozitě a vztah (3.4) je v souladu s mocninným modelem, jemuž je přidán také parametr počátečního smykového napětí. [15] [14] [9]

$$\tau = \tau_p + \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (3.3)$$

$$\tau = \tau_p + K \cdot \frac{du^r}{dy} \quad (3.4)$$

Jak již bylo dříve zdůrazněno, existence meze kluzu byla již dříve diskutována v různých studiích, ale otázkou bylo vědět, zda naměřená napětí na mezi kluzu nejsou pouze artefakty kvůli nedostatečné přesnosti reologických zařízení při nízkých smykových rychlostech. V současné době jsou zařízení pro měření viskozity stále přesnější a v případě agregovaných koncentrovaných suspenzí, jako jsou kaly z odpadních vod, se běžně připouští, že existují tekutiny s počátečním kluzovým napětím. [15] [14] [9]



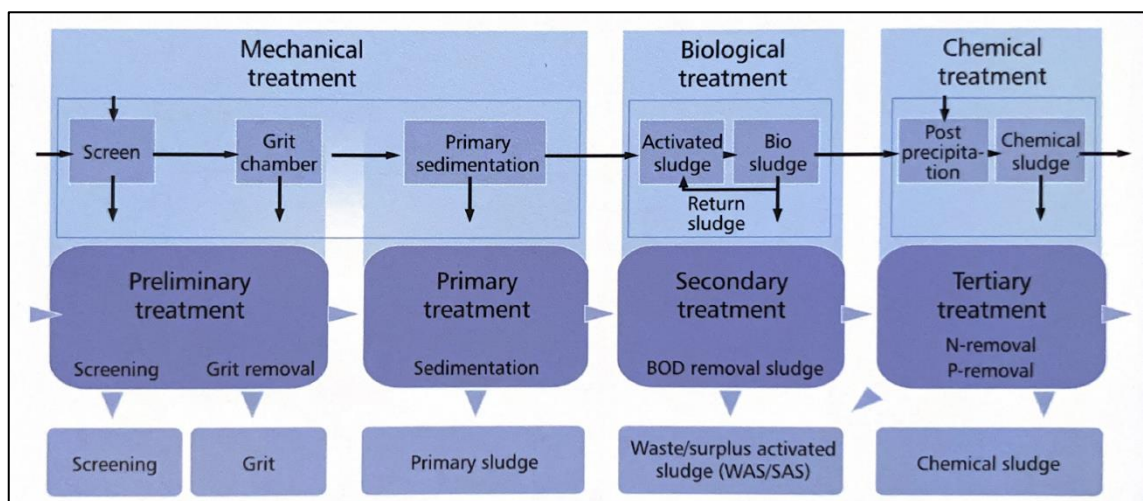
Obr. 5 Příklad teplotní závislosti dynamické viskozity pro případ cukrového sirupu. [8]

V kapitole 3.3.1 se pojednávalo o běžných mezích rychlostního gradientu neneutonské kapaliny při čerpání hydrodynamickými stroji se závěrem, že při práci s dostatečně vysokou smykovou rychlostí nebo smykovým napětím se může zvolit reologické modelování kalů z odpadních vod pomocí jednoduché rovnice smykového ztenčování (mocninný model). Nicméně existence meze kluzu a její velikost, která je v případě koncentrovaných suspenzí spojena s tvorbou fraktální propojené sítě (pouhým okem nerozpoznatelné složité struktury částic), se vyvíjí s různými fyzikálně-chemickými nebo provozními parametry. Většinou je popsán vliv koncentrace pevných látek nebo teploty na reologické parametry. Pro příklad teplotní závislosti zdánlivé viskozity je na Obr. 5 prezentován příklad cukrového sirupu reagujícího velmi signifikantně s jeho vzrůstající teplotou. Zdánlivá viskozita čistírenského kalu

má menší vliv (avšak stále nezanedbatelný) na stoupající teplotě a je vyobrazena v Obr. 5 šedým obdélníkem, jehož strany představují standardní interval teplot (osa  $x$ ) a zdánlivé viskozity (osa  $y$ ). [9] [8]

### 3.4 Typizace čistírenských kalů

Čistírenský kal je výsledný biologický produkt z procesu čištění odpadních vod a jeho charakter záleží na kvalitě vstupujících odpadních vod do technologie čištění stejně jako způsob, jakým je kal generován nebo produkován v systému ČOV. Níže na Obr. 6 je schematicky znázorněna základní struktura čištění OV v příslušných procesech s následnou produkcí jednotlivých druhů čistírenských kalů. [16] [17]



Obr. 6 Schematické znázornění základní struktury čištění OV. Překlad: Mechanical treatment (mechanické předčištění), Biological treatment (biologické čištění), Chemical treatment (chemické čištění), Screen (síta), Grit chamber (rozměňovací komora), Primary sedimentation (primární sedimentace), Activated sludge (aktivovaný kal), Bio sludge (biologický kal), Return sludge (vratný kal), Post-precipitation (předsrážení), Chemical sludge (chemický kal), Preliminary treatment (předúprava), Screening (deponace částic sítím), Grit removal (odebrání rozmělněných pevných částí), Primary treatment (primární čištění), Sedimentation (sedimentace), Secondary treatment (sekundární čištění), BOD – biological oxygen demand (organická hmota jako potrava pro bakterie), BOD removal sludge (vyjmutí BOD), Tertiary treatment (terciální čištění), N – removal (vyjmutí dusíku), P – removal (vyjmutí fosforu), Primary sludge (primární kal), Waste/surplus activated sludge (odpadní aktivovaný kal), Chemical sludge (chemický kal) [8]

#### 3.4.1 Primární kal

Primární kal se skládá z pevných látek vznikajících při tzv. primární sedimentaci, tj. separace gravitací (gravitační depozice) přímo po předběžných operacích (mechanické předčištění). Sediment je ze dna nádrže čerpán do nádrže přímo určené pro primární kal a poté je připraven k dalšímu stupni čištění či zpracování. [8]



#### **Charakteristika primárního kalu:**

- Nejednotný a hrudkovitý fyzický charakter
- Hnědá barva
- Intenzivní zápach
- Obsah TS 3-5 %
- Viskozita často variabilní
- Vysoká vyhnívací charakter
- 70-80 % VS/TS

Kolísání obsahu TS zapříčiňuje denní přítok odpadních vod. Za zvláštních okolností může obsah TS vzrůst dokonce více, než je uvedeno výše, například v situacích, kdy se používá vápnem zesílené usazování. Primární kal může také obsahovat abrazivní částice. Velké rozpětí možných viskozit vyžaduje správné posouzení viskozity [8]

#### **3.4.2 Sekundární nebo aktivovaný kal**

V procesu aktivace kalu vzniká sekundární neboli aktivovaný kal. Skládá se z bakterií, které se pěstují za účelem trávení organických znečišťujících látek v napájecí odpadní vodě. Část z bakterií aktivovaného kalu musí být odstraněny pro účely řízení procesu a aby se zabránilo nadměrnému bakteriálnímu růstu. Ve většině procesů čištění odpadních vod musí být stejný aktivovaný kal vrácen (recyklován) do přiváděné odpadní vody, aby se udržela aktivní biomasa. Aktivovaný kal má horší usazovací schopnost než primární kal. Zejména pokud se v procesu používají skrápěcí filtry, separace může být provedena pomocí flotace (rozdružování větších celků částic). [6] [17] [8]

#### **Charakteristika sekundárního nebo aktivovaného kalu:**

- Uniformní fyzický charakter (převážně biologický materiál)
- Hnědá barva
- Střední zápach
- 1-2 % TS
- 60-70 % VS/TS
- Nižší vyhnívací schopnost oproti primárnímu kalu
- Viskozita podobná čisté vodě

### 3.4.3 Chemický kal

Chemický kal vzniká vysrážením nečistot z odpadních vod (organických i anorganických) pomocí solí kovů (Al, Fe) nebo flokulantů (polymerů). Chemické srážení se zřídka používá jako samostatný procesní krok, ale je zahrnuto v jednom z dalších kroků. [8]

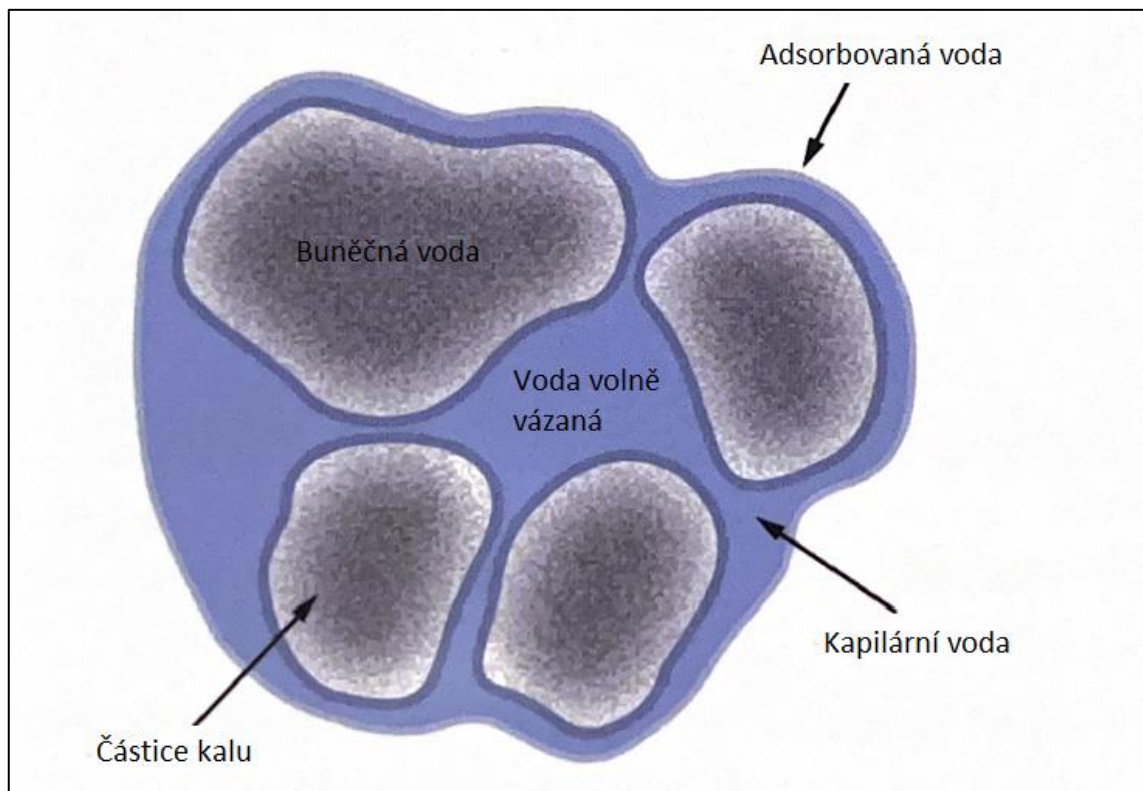
**Předsrážení:** spočívá přidání chemikálií do surové odpadní vody pro srážení fosforu v primárních sedimentačních zařízeních. Vysrážený fosfor se odstraní mechanicky společně s primárním kalem.

**Co-precipitace:** spočívá v přidání chemikálií do procesu aktivovaného kalu pro současné srážení fosforu v procesu aktivace kalu. Vysrážený fosfor je odstraněn mechanicky společně se sekundárním kalem.

**Post-precipitace:** zahrnuje přidávání chemikálií do odpadních vod odcházejících ze sekundárních sedimentačních zařízení a následné mechanické odstranění chemického kalu. V tomto procesu se chemický kal obvykle odstraňuje v samostatných sedimentačních zařízeních nebo v odpadních filtrech. [7] [8]

### 3.4.4 Gravitačně zahuštěný kal

Kal zahuštěný gravitací je produkován za využití gravitace, jako přírodního jevu (gravitační depozice částic) a ponecháním kalu odděleného z procesu čištění OV po delší dobu v běžné sedimentační nádrži. Poté je usazenina dopravena jako zahuštěný kal do nádrže, odkud je čerpán k dalšímu zpracování. Gravitační síla řeší a redukuje především vodu volně vázanou mezi částicemi kalu viz Obr. 7. [8]



Obr. 7 Grafické znázornění vázání vody na částice kalu [8]

**Gravitačně zahuštěný primární nebo sekundární (aktivovaný) kal má tyto vlastnosti:**

- Neuniformní a hrudkovitá fyzická struktura
- Tmavě hnědá barva
- Intenzivní zápach (pokud se jedná o primární kal)
- Obsah TS variabilní 3-6 %
- Variabilní hodnota VS/TS
- Nízká až střední viskozita (pro představu stupně viskozity k porovnání: voda až motorový olej)

### 3.4.5 Mechanicky zahuštěný kal

Mechanické zahušťování se používá k získání vyššího obsahu sušiny, než je možné u konvenčního gravitačního zahušťování kalu odděleného z odpadní vody. Může dále využívat gravitační sílu nebo hydrodynamické síly. Ke zlepšení procesu mechanického zahušťování se obvykle používají chemikálie. Mechanicky zahuštěný kal může být směsí několika různých typů kalů, ačkoliv primární a sekundární (aktivovaný) kal obvykle dominuje. [8]

**Mechanicky zahuštěný kal se vyznačuje těmito vlastnostmi:**

- Neuniformní a hrudkovitá fyzická struktura
- Hnědá barva
- Intenzivní zápach
- Variabilní obsah TS 4-8 %
- Variabilní hodnota VS/TS
- Střední až vysoká viskozita (pro představu stupně viskozity k porovnání: motorový olej až zubní pasta)

**Zařízení využívaná k mechanickému zahušťování:**

- Gravitační pás
- Rotační buben
- Odstředivka

### 3.4.6 Vyhníly kal

Vyhníly kal je produkt který prošel aerobní nebo anaerobní digescí (biologická degradace). Tyto procesy mění charakter a chování kalu, při nichž se kal stává homogennějším, méně viskózním a méně zapáchajícím. Digesce kalu se provádí za účelem stabilizace kalu a snížení objemu kalu. Stabilizace znamená vytvoření kalu, který nepodléhá další degradaci způsobující zápach nebo znečištění, v případě uložení na zemědělské půdě. Po anaerobní digesci se vyhníly kal snadněji odvodňuje a v této fázi má také menší obsah sušiny. Aerobní vyhnívání má velmi malý pozitivní vliv na odvodnění a minimalizaci objemu. Anaerobně vyhníly kal se obvykle skládá ze směsi převážně primárního a sekundárního kalu. [17] [8]

**Vyhníly kal se vyznačuje těmito vlastnostmi:**

- Uniformní fyzická struktura
- Černá barva
- Střední zápach
- Obsah TS 2-4 %
- Nízké hodnoty VS/TS
- Nízká viskozita (pro představu stupně viskozity k porovnání: voda až stolní olej)

### 3.4.7 Odvodněný kal

Odvodněný kal vystupuje jako produkt z odvodňovacího mechanického zařízení, kde se

odstraní takový obsah vody, aby vznikl kalový “koláč”, jenž lze zlikvidovat mimo místo jeho vzniku za podstatně nižších finančních nákladů na jeho dopravu. V této fázi je kal obvykle stabilizován (aerobně nebo anaerobně) a je méně zapáchající než dříve. [8]

**Odvodněný kal je charakterizován těmito vlastnostmi:**

- Půdní fyzická struktura
- Tmavá barva
- Střední až neutrální zápach
- Variabilní obsah TS 15-45 %
- Velmi vysoká viskozita

Vzhledem k nestejněměrnému a netekutému charakteru odvodněného kalu není viskozita obvykle dobře definována. [8]

**Zařízení používaná pro odvodnění zahrnují:**

- Pásové kalolisy
- Komorové kalolisy
- Odstředování

## 4 Hydraulický systém

Jakýkoliv hydraulický systém musí být tvořen pasivním a aktivním prvkem, který dohromady tvoří komplexní soustavu umožňující přepravu kapalin z jednoho místa na druhé. Za pasivní prvek se uvažuje potrubí zahrnující veškeré tvarovky (např. 90° koleno, odbočka, T-kusy, redukce aj.) a armatury (uzavírací ventil, zpětná klapka, nožové šoupě aj.). V případě prezentace pasivního prvku hydraulického systému z energetického hlediska se jedná o spotřebitele měrné energie, jelikož výše zmíněné komponenty potrubního systému měrnou energii pouze spotřebovávají (ztráty délkové, místní ztráty a geodetický rozdíl hladin nádrže na počátku a konci přepravy). Naopak prvek aktivní měrnou energii do systému dodává, tedy předává měrnou energii přepravovanému médiu. Existují potrubní systémy, které fungují čistě na gravitačním spádu, tzn. že aktivní prvek (hydrodynamické čerpadlo) není potřeba instalovat, jelikož je médium uváděno do pohybu vlivem gravitační síly Země. Aktivní prvek se považuje za zdroj měrné energie. Pro zaručení proudění přepravovaného média je nutné, aby hodnota produkované měrné energie aktivního prvku byla vyšší, než spotřeba měrné energie pro potrubní systém. [18] [19] [20]

Účelem nastavení čerpacího systému je zajistit požadovaný hydraulický výkon. Stanovení provozního bodu pro konkrétní čerpací systém vyžaduje znalost charakteristik křivek čerpadla a potrubního systému. Pracovní bod bude průsečíkem křivek charakteristiky potrubí (systémové charakteristiky) a charakteristiky čerpadla. [18] [19] [20]

Je možné přesně předpovědět provozní bod čerpadla pro vodu nebo kapaliny podobné vodě, protože téměř všichni výrobci čerpadel dodávají výkonnostní křivky čerpadel, které jsou založeny na testech nebo výpočtech využívajících vodu jako čerpanou kapalinu. Charakteristická křivka pro potrubní systém je spočítána explicitně přímým výpočtem pomocí metod, jako jsou Colebrook-White nebo Hazen-Williamse nebo pomocí Moodyho diagramu. Tato křivka je často označována jako systémová křivka. [18] [19] [20]

U kalových čerpacích systémů je situace složitější. K popisu chování kalu a jeho účinků na výkon čerpadla a tlakové ztráty v potrubních systémech je zapotřebí reologická charakterizace kalu. Lze připustit skutečnost, že pokud se změní charakteristiky kalu, změní se výkonnostní křivky systému a čerpadla a také jejich průnik. [8]

Kal s mírným obsahem celkových pevných látek (TS) 1 % je neneutonská kapalina;

jedná se typicky o chování při smykovém ztenčování a často má mez kluzu. Mez kluzu a stupeň smykového ztenčení se mohou u podobných typů kalů značně lišit. Navíc při stejné koncentraci pevných látek může kal z jednoho zdroje vykazovat mnohonásobně vyšší viskozitu, než kal odebraný z jiného zdroje. Do určité míry lze tuto variabilitu snížit kategorizací kalu podle příslušných procesů, kterými daný kal prošel, ale variabilita je stále velká. [8]

Značné úsilí bylo vynaloženo pro vývoj semi-empirického modelu, který lze prakticky použít pro výpočet tlakové ztráty toku kalu v potrubí. Snaha směřuje od vývoje vhodných metod pro hodnocení reologických parametrů modelu Herschel - Bulkley (viz str. 19) pomocí rotační viskozimetrie k přímému měření tlakových ztrát v provozu s reálným kalem, až po laboratoř používající simulátory syntetického kalu. Cílem bylo vyvinout model, který by nevyžadoval složité individuální testy pro každou čerpanou kapalinu. [8]

#### 4.1 Systémová charakteristika při čerpání čistírenského kalu

Systémová charakteristika, též přezdívaná jako charakteristika potrubí, vykresluje spojitost mezi hlavními parametry  $Q$  (objemový průtok) a  $Y$  (měrná energie) v rámci celého potrubního systému. Vztah (4.1) získáme patřičnou úpravou z rovnice kontinuity. Výsledný vztah tak vyjadřuje ustálený průtok nestlačitelné kapaliny kruhovým průřezem přepravního potrubí:

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{c}{4} \quad (4.1)$$

Každý potrubní systém lze z hlediska energetické bilance vyjádřit jako součet statické měrné energie  $Y_{st}$  a ztrátové měrné energie  $Y_z$ . Celková měrná energie potrubí (dána součtem  $Y_{st}$  a  $Y_z$ ) je označena  $Y_p$  a matematicky je vyjádřena viz (4.2). Statická měrná energie vyjadřuje diferenci potenciálních měrných energií kapaliny obsažených v počáteční (nádrž A) a koncové (nádrž B) nádrži. Matematicky lze vyjádřit jako:

$$Y_p = Y_{st} + Y_z \quad (4.2)$$

$$Y_{st} = Y_B - Y_A = \left( \frac{p''}{\rho} + g \cdot H_g \right) - \frac{p'}{\rho} \quad (4.3)$$

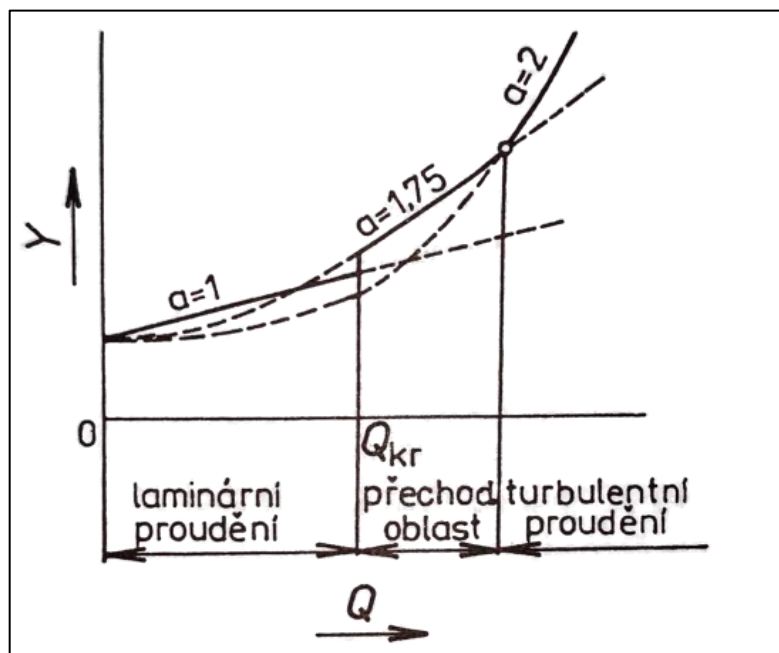
Složka  $Y_z$  vyznačuje, jak již bylo zmíněno výše, měrnou ztrátovou energii obsahující složky ztrát třecích (přeměna energie třením do tepla, též disipace energie) a ztrát místních (ztráty vzniklé prouděním čerpaného média různými armaturami, odbočkami či koleny).

V případě dosazení rovnice (4.1) do vztahu (4.2) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** za střední hodnotu rychlosti kapaliny  $c$  ve složce  $Y_z$  dostáváme souvislost mezi hlavními parametry  $Q$ - $Y$  označující charakteristiku potrubí (4.4):

$$Y_p = \frac{p'' - p'}{\rho} + g \cdot H_g + f(Q^a) \quad (4.4)$$

Obr. 8 prezentuje obecnou charakteristiku potrubí, která znázorňuje vliv proudění na průběh dané charakteristiky. Hodnota parametru  $a$  v rovnici (4.4) je závislá na charakteru proudění:

- Laminární proudění:  $a = 1$
- Přechodová oblast:  $a = (1 \text{ až } 2)$
- Turbulentní oblast:  $a = 2$  [18] [20] [19]



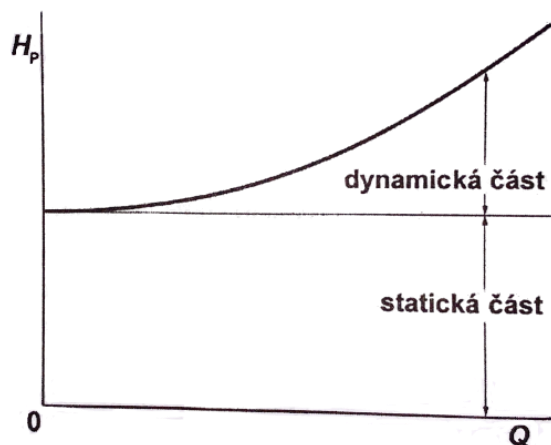
Obr. 8 Vliv režimu proudění na průběh charakteristiky potrubí [21]

První dvě složky charakteristiky potrubí (4.4) jsou nezávislé na průtoku. Jedná se pouze o rozdíl potenciálních energií kapaliny mezi hladinami jednotlivých nádrží. [18] [20]

Poslední člen rovnice charakteristiky potrubí (4.4) vyjadřuje dynamickou složku, která je již závislá na průtočném množství hydraulickým systémem a na souvisejících vzniklých místních ztrátách. Ztráty v potrubí jsou dány průměrem  $d$  (m) a délkou potrubí  $l$  (m), rychlostí proudění kapaliny  $c$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), součiniteli délkových a třecích ztrát  $\lambda$  (-) a součinitelem místních ztrát  $\xi$  (-). [18] [20]

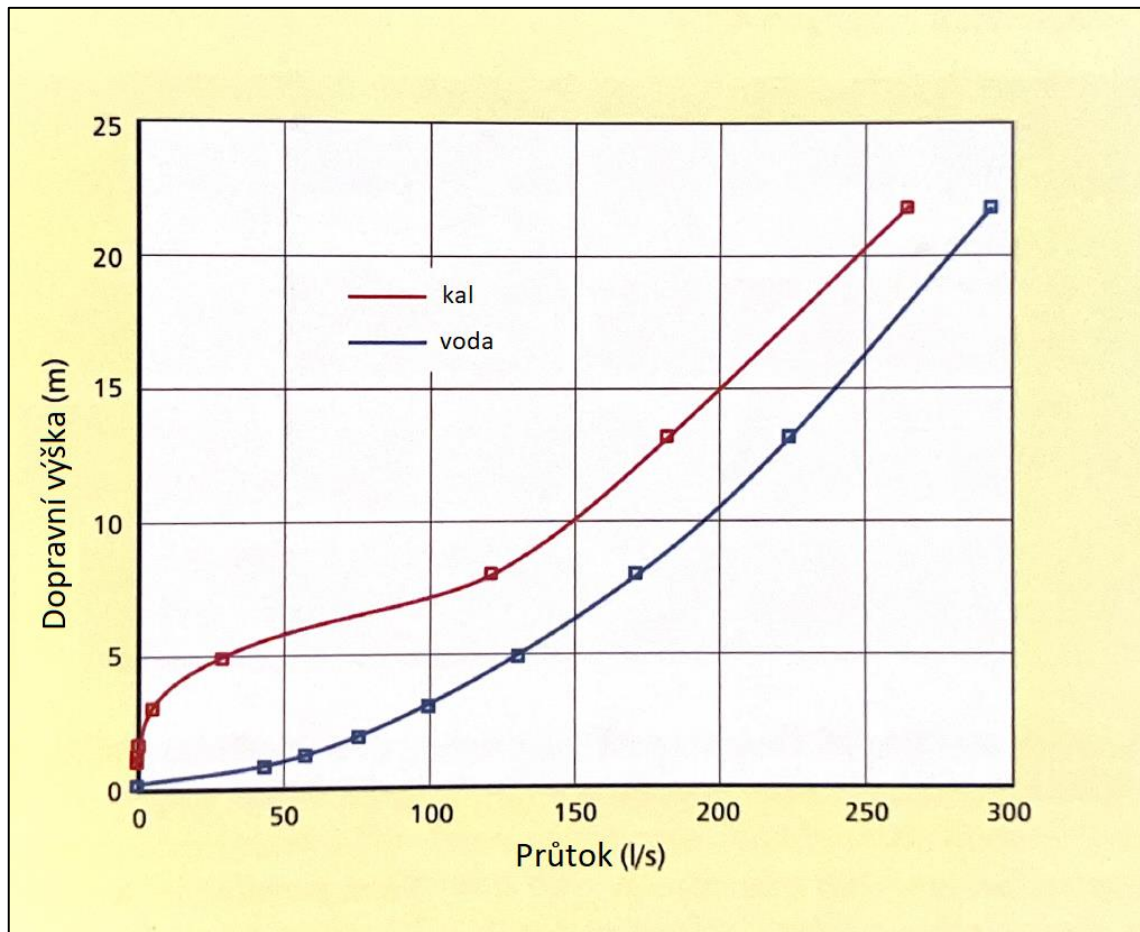


Dělení statické a dynamické části charakteristiky potrubí je představeno na Obr. 9.



Obr. 9 Charakteristika potrubí [20]

Následující popis se zabývá typy čistírenských kalů s celkovým obsahem pevných látek (TS) menším než 8 %. To odpovídá zjevné dynamické viskozitě menší než 1000 mPa.s při úrovních smykové rychlosti typické pro systémy kalového čerpání (20-200 s<sup>-1</sup>). Z hlediska aplikací lze říci, že popsané reologické metody lze aplikovat na kaly s viskozitou nepřesahující mechanicky zahuštěný kal s přidanými polymery, který je nejhustší a nejhůře čerpatelný v kapalinovém/pastovitém režimu. Zdánlivá viskozita odvodněného kalu může dosáhnout úrovně 50 000-100 000 mPa.s výjimečně i vyšších hodnot. Pro takto vysoce viskózní kapaliny neexistují žádné matematické modely pro výpočet ztrát v potrubním systému. Jedinými metodami pro výpočet takových údajů jsou předchozí empirické zkušenosti a provedené praktické testy. Vzhledem k tomu, že celkový obsah pevných látek v odvodněném kalu se může lišit v rozmezí 20-45 %, budou následovat změny tlakové ztráty. Ztráta tlaku u komunálního odvodněného kalu může být až 0,5.10<sup>5</sup> Pa.m<sup>-1</sup> nebo pro porovnání vyjádřeno jako 5 m vodního sloupce. [8]



Obr. 10 Graficky znázorněný rozdíl systémové charakteristiky potrubí při čerpání vody (modrá křivka) a 5 % kalu (červená křivka). [8]

Jak bylo uvedeno výše, provozní bod pro čerpadlo pracující v potrubním systému je dán průsečíkem křivky dopravní výšky a průtoku čerpadla s křivkou tlakové ztráty a průtoku systémem. Metoda vychází z předpokladu, že reologické chování kalu, který má být čerpán, je dostatečně dobře popsáno Herschel-Bulkley (HB) modelem (3.4) a že jsou známy jeho tři modelové parametry  $K$  ( $Pa \cdot s^r$ ),  $r$  (-) a  $\tau_p$  (Pa). Hodnoty parametrů HB by měly být přednostně stanoveny z přímých reologických měření daného kalu. V praxi se však kal a měřicí zařízení zřídka nacházejí na stejném místě a v mnoha případech se konstrukce systému čerpání kalu provádí před produkováním kalu. Je proto nutné spoléhat na hodnoty parametrů zjištěné empiricky. [14] [8] [9]

Na Obr. 10 lze pozorovat grafické znázornění systémové křivky pro 5% kal a vodu ve výše definovaném potrubním systému. V zásadě je nyní možné překrýt výkonovou křivku pro čerpadlo. Průsečík mezi systémovou charakteristikou a charakteristikou čerpadla určí provozní body při čerpání 5% kalu a při čerpání vody. [8]

## 4.2 Charakteristika hydrodynamického čerpadla a změna jeho výkonových charakteristik při čerpání kalu

Výkonnostní parametry hydrodynamického čerpadla, tj. dopravní výška, průtok, účinnost a výkon (výkon na hřídeli a hydraulický výkon), se určují z charakteristické křivky čerpadla a jsou generovány z testovacích dat provedených na vodě. Výkon čerpadla se mění při použití stejného čerpadla ve viskóznější kapalině. Příkon čerpadla se zvýší, výtlačná výška a účinnost se sníží. [8]

Chování odstředivých čerpadel ve viskózních kapalinách musí být známe pro výpočet provozního bodu v kalových aplikacích. Bohužel dostupné testovací údaje jsou specifické pro každé jednotlivé testované čerpadlo a postrádají obecný charakter. Kromě toho jsou údaje často omezeny na konkrétní typ čerpadla a rozsah viskozity. [8]

Teoretické metody založené na analýze ztrát mohou poskytnout přesnější předpověď chování čerpadla při čerpání viskózních kapalin. Přesný výpočet ztrát však vyžaduje znalost geometrie čerpadla a vlastností kapaliny. Skutečnost, že kal z odpadních vod sestává z neneutonských kapalin s viskozitou, která se mění se smykovou rychlostí, výpočty komplikuje. Proto přesné stanovení výkonu čerpadla s viskózními a neneutonskými kapalinami, jako je kal, vyžaduje empirická data z provedených experimentů. [19] [8]

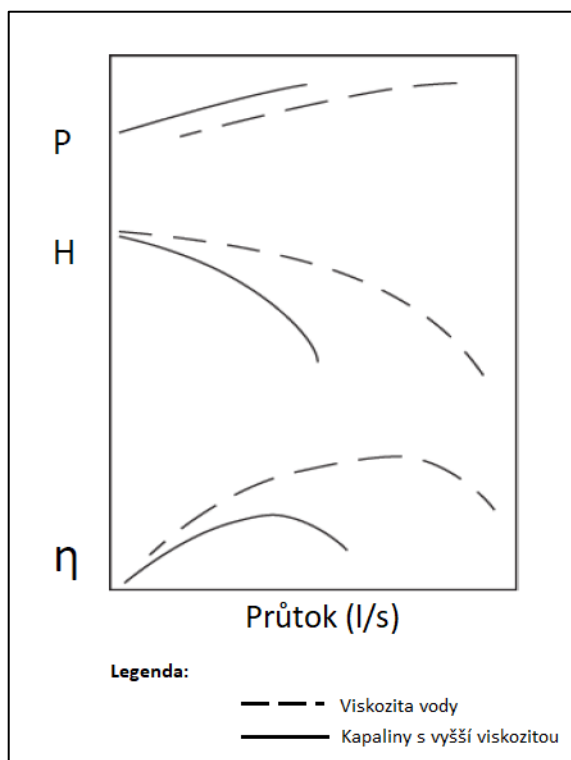
Když je hydrodynamickým čerpadlem čerpána kapalina s vyšší viskozitou než voda, Q-H charakteristika čerpadla klesá. Zvýšená viskozita ovlivňuje různé typy ztrát v čerpadle různými způsoby, jako například:

- **Mechanické ztráty**, které nejsou téměř ovlivněny změnou viskozity čerpané kapaliny.
- **Hydraulické ztráty**, které vznikají na sání, v oběžném kole, ve spirální skříni a na výtlačku čerpadla. Výtlačná výška čerpadla je rozdíl mezi teoretickou maximální výtlačnou výškou oběžného kola a hydraulickými ztrátami. Obecně lze říci, že průtok v oběžném kole není ovlivněn viskozitou kapaliny. Snížení dopravní výšky čerpadla je proto v zásadě výsledkem hydraulických ztrát daných viskózním tokem neneutonské kapaliny. Hydraulické ztráty jsou funkcí Reynoldsova čísla (číslo udávající typ proudění, které může být laminární, přechodné nebo turbulentní), drsnosti povrchu prvků čerpadla a ztrát v důsledku nerovnoměrného rozložení rychlosti proudění kapaliny.

- **Objemové ztráty**, které jsou způsobeny netěsnými toky skrz vůle mezi oběžným kolem a protikusem. Tyto úniky se snižují se zvyšující se viskozitou kapaliny, což má za následek zvýšení spádu pro daný průtok.
- **Ztráty třením** kotouče, které jsou dalším typem ztráty třením vznikající na všech mokřích, rotujících částech čerpadla. Tyto ztráty vznikají většinou na bočních stranách lopatek oběžných kol uzavřených nebo polouzavřených a zvyšují se s rostoucí viskozitou kapaliny. Ztráty třením kotouče mají silný dopad na spotřebu energie.

Ztráty energie se disipují jako teplo do kapaliny, což způsobí zvýšení místní teploty, po které následuje (obvykle mírný) pokles viskozity. [8]

Obr. 11 znázorňuje výkonové charakteristiky hydrodynamického čerpadla. Čárkovanou čarou jsou znázorněny výkonové charakteristiky hydrodynamického čerpadla při čerpání čisté vody a plnou čarou jsou zobrazeny výkonové charakteristiky stejného čerpadla při čerpání viskózních nenevtonských kapalin. Lze zaregistrovat pokles u Q-H charakteristiky a zároveň charakteristiky celkové účinnosti. Příkonová charakteristika P-Q zaujímá opačný důsledek působení nenevtonských kapalin, kdy příkon čerpadla stoupá nad charakteristiku při čerpání čisté vody. [8] [12]

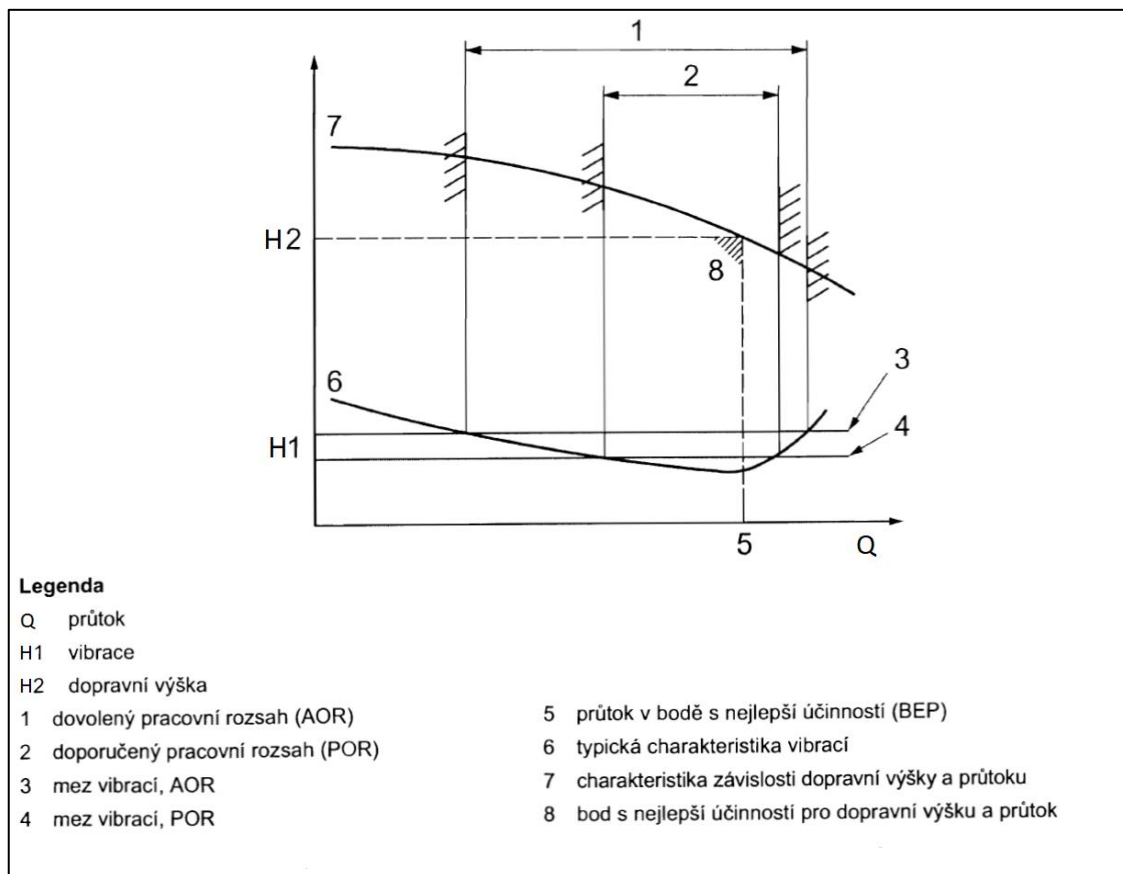


Obr. 11 Změna charakteristiky hydrodynamického čerpadla při čerpání nenevtonských kapalin, kde P představuje příkon onoho čerpadla, H dopravní výška čerpadla,  $\eta$  celková účinnost čerpadla. [12]

### 4.3 Pracovní bod hydrodynamického čerpadla při čerpání neneutonských kapalin

Jak již bylo v úvodu této kapitoly zmíněno. Provozní bod systému je dán průsečíkem charakteristiky potrubí a charakteristiky čerpadla při konstantních otáčkách čerpadla ( $n = \text{konst.}$ ). V zásadě má každé čerpadlo svoje unikátní výkonové charakteristiky, které jej definují a na základě těchto technických informací o čerpacím zařízení lze čerpadlo navrhnout do již mnohdy navrženého či zrealizovaného projektu obsahující potrubní systém sloužící pro transport kapalin. [19] [22]

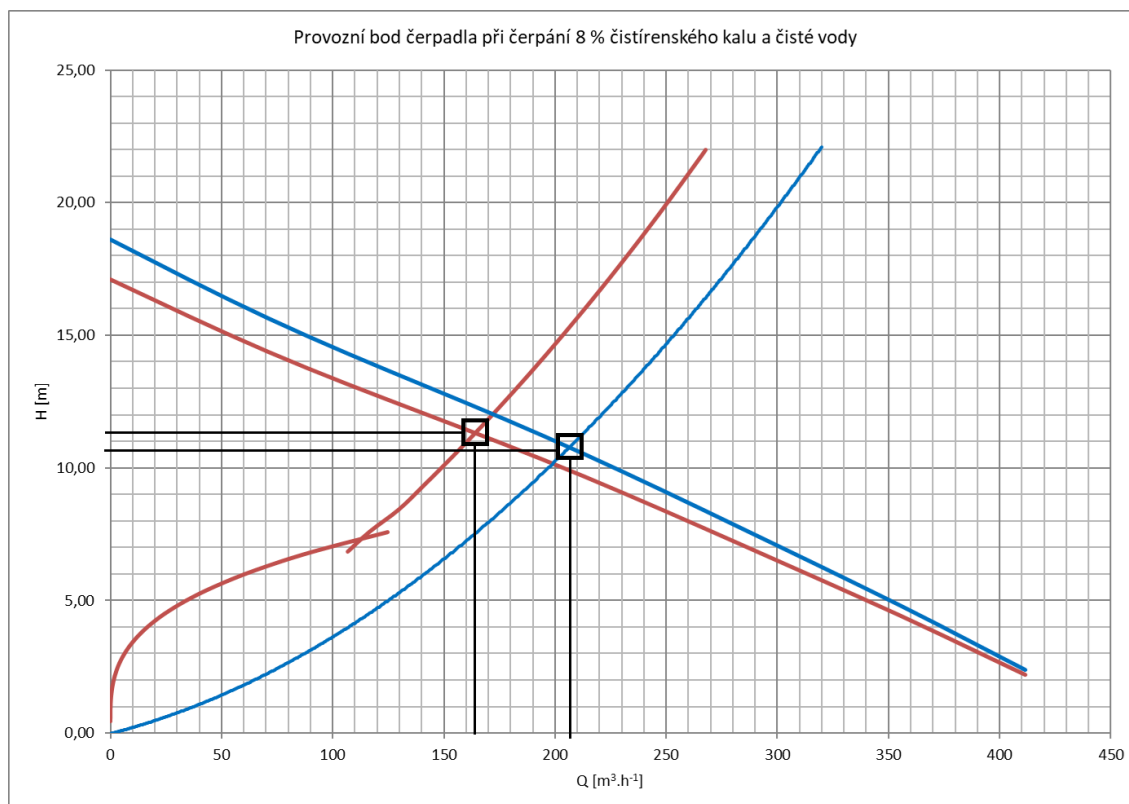
Výkonové charakteristiky jsou omezeny dovoleným pracovním rozsahem. Takový rozsah je nutno znát. V případě provozování čerpadla mimo dovolený pracovní rozsah může dojít k havárii hydraulického systému a k následnému kolapsu transportu kapalin v celém systému. Na Obr. 12 je zobrazen dovolený pracovní rozsah hydrodynamického čerpadla, kde část č. 2 vyznačuje optimální pracovní oblast, tedy oblast s nejvyšší účinností (většinou se jedná o interval v okolí bodu nejvyšší účinnosti). Část č. 1 prezentuje oblast, ve které lze čerpadlo bezpečně provozovat, aniž by docházelo k přetěžování a následnému poškození mechanických částí čerpadla a jeho komponentů. Bod č. 8 znázorňuje bod s nejlepší účinností pro dopravní výšku a průtok čerpadla. Křivka označená č. 6 značí typickou charakteristiku pro vibrace daného hydrodynamického čerpadla a č. 3 a 4 ukazuje intervaly pro příslušné meze (AOR, POR). [23] [20]



Obr. 12 Dovolený a doporučený pracovní rozsah hydrodynamického čerpadla. Vysvětlení a překlad zkratk: BEP – best efficiency point (bod s nejvyšší účinností); AOR – allowable operating region (dovolený pracovní rozsah); POR – preferred operating region (doporučený pracovní rozsah) [24]

Obr. 13 znázorňuje Q-H charakteristiku hydrodynamického čerpadla a systémovou charakteristiku (charakteristiku potrubí). Modrá barva křivek prezentuje charakteristiky pro vodu, kdežto barva hnědá označuje charakteristiky pro 8% kal (kal obsahující 8 % sušiny). Je patrné, že Q-H charakteristika hydrodynamického čerpadla poklesne s čerpáním neneutonské kapaliny oproti čerpání čisté vody. Charakteristika potrubí bude rovněž reagovat negativně (z hlediska čerpatelnosti) při proudění neneutonské kapaliny potrubním systémem. Systémová křivka pro 8% čistírenský kal bude ve srovnání s křivkou pro čistou vodu strmější, tedy bude docházet k větším ztrátám v potrubí pro stejnou rychlost proudění média v porovnání s čerpáním čisté vody. Jednotlivé průsečíky charakteristik obou variant (při čerpání čisté vody a 8% kalu) vyznačují provozní body hydraulického systému. Q-H charakteristika konkrétního hydrodynamického čerpadla zobrazeného na Obr. 13 se vyznačuje spíše rozsáhlejším intervalem z hlediska průtočného množství, nikoliv však s významným dopadem na dopravní výšku a tuto skutečnost lze ověřit graficky. Při odečtení Q-H hodnot z provozních bodů hydrodynamického čerpadla se docílí výsledku, že při čerpání 8% kalu dochází ke značnému

poklesu průtoku o cca  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a zároveň snížení dopravní výšky hydrodynamického čerpadla, vlivem poklesu jeho Q-H charakteristiky, o 1 m. [8] [25] [26]



Obr. 13 Znárodnění možného provozního bodu hydrodynamického čerpadla při čerpání 8% kalu ve srovnání s čerpáním čisté vody

Jak již bylo zmíněno výše, Obr. 13 zobrazuje systémové charakteristiky při čerpání čisté vody a 8% kalu. V druhém případě, tedy systémové křivky při čerpání 8% kalu, dochází k rapidní změně v průběhu křivky. První část, představující mocninnou funkci s exponentem menším než 1, prezentuje průběh laminárního proudění a druhá část, představující rovněž mocninnou funkci s rozdílem, kdy exponent nabývá hodnot větších než 1, prezentuje průběh turbulentního proudění. Tyto dva průběhy (funkce) mají také svůj průsečík, který značí kritickou rychlost proudění v potrubí, tedy změnu chování proudnic čerpaného média. V případě laminárního průběhu jsou proudnice čerpaného média rovnoběžné (nemísí se), ale za situace turbulentního proudění se začínají proudnice vychylovat a ztrácet rovnoběžnost, kdy dochází k jejich vzájemnému křížení a tvorbě vírů (turbulencí) zapříčiňující zvyšující se přírůstek tlakové ztráty v potrubním systému. [8] [27]

Z výše popsaných teoretických závěrů lze konstatovat, že nejcitelnější rozdíl při čerpání newtonské kapaliny bude při nižších průtocích v laminárním proudění, kde se nejvíce projevují její vazké vlastnosti způsobující vysoké třecí ztráty. [8]

## 5 Čerpadla v kalovém hospodářství

Tato kapitola popisuje nejčastěji používanou čerpací techniku pro čerpání čistírenského kalu. V některých zeměpisných oblastech se některá čerpadla nemusí vůbec používat. Kromě toho mohou existovat některé návrhy, které se používají ve velmi omezeném počtu a pouze lokálně. Čerpadla lze rozdělit do dvou různých technologií podle principu jejich fungování a to na hydrodynamická čerpadla a objemová čerpadla. Samonasávací hydrodynamická čerpadla jsou řešena samostatně, protože mají některé vlastnosti z obou předchozích provedení. [19] [8]

Jednotlivé typy a konfigurace oběžných kol (u hydrodynamických čerpadel) čerpací techniky:

### Hydrodynamická čerpadla

- Vířivé oběžné kolo
- Kanálové oběžné kolo
- Polootevřené oběžné kolo
- Řezací čerpadla
- Čerpadla se šroubovým oběžným kolem
- N - oběžná čerpadla

### Samonasávací odstředivá čerpadla

### Objemová čerpadla

- Pístová čerpadla
- Vzduchem poháněná membránová čerpadla
- Zubová čerpadla (Lobe rotor)
- Čerpadla lamelová
- Peristaltická čerpadla

Bez ohledu na typ čerpadla jsou základními výkonnostními parametry průtok čerpaného média a vytvářený tlak při tomto průtoku. Mezi uživateli a výrobcí odstředivých čerpadel je tlak obvykle udáván jako dopravní výška  $H$  v metrech vodního sloupce. U objemových čerpadel je tlak  $p$  standardně vyjádřen v jednotkách bar. Existuje přímá translace mezi dopravní výškou a tlakem prostřednictvím hustoty kapaliny  $\rho$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ ) a zrychlení

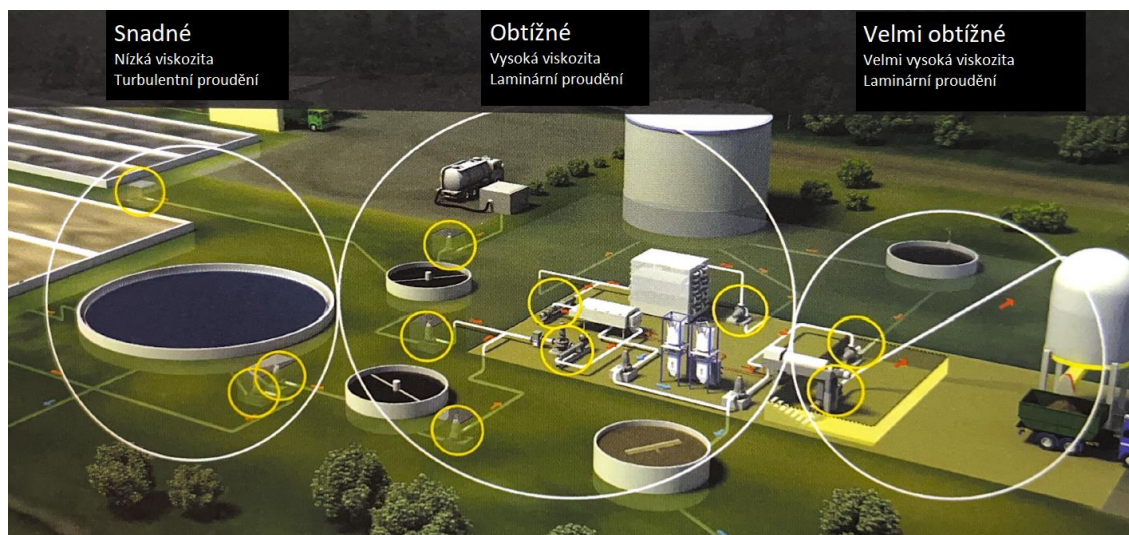


v důsledku gravitace  $g$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ). Vztah je popsán následující rovnicí:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} \text{ [m]} \quad (5.1)$$

V následujícím přehledu je vysvětlena „snadné“, „obtížná“ a „velmi obtížná“ aplikace čerpání kalů. Záměrem je kategorizovat aplikace čerpání kalů s ohledem na obtížnost čerpání a na problematiku ideálního umístění jejich instalace v rámci procesu čištění OV. [8]

„Snadné“ aplikace se týkají podmínek odpadních vod, výběru čerpadel a návrhu čerpacích systémů dle dopravní výšky podle běžných doporučení či standardů pro odpadní vody. Z hlediska koncentrace celkových pevných látek (TS) lze aplikaci čerpání považovat za snadnou, pokud TS leží v přibližném rozsahu 0-4 %. Ve snadných aplikacích je viskozita nízká a proudění je turbulentní nebo přechodné. U „obtížných“ aplikací je při výběru čerpadla nebo konstrukce čerpacího systému nutno brát v úvahu, že reologie kalu se značně liší od reologie odpadních vod. Obtížné aplikace se typicky vyskytují, když TS leží v rozmezí 4-8 %. V obtížných aplikacích je viskozita vysoká a proudění je typicky přechodné nebo laminární. Ve „velmi obtížných“ aplikacích, kde se hodnota TS může pohybovat mezi 8-45 %, kdy je kal dostatečně odvodněn a již nemá žádnou reologickou podobnost vůči čisté vodě. Proto je třeba věnovat ještě vyšší pozornost reologii kalu při výběru kalového čerpadla a návrhu systému. Pokud jsou koncepty režimu proudění a viskozity vůbec použitelné ve velmi obtížných aplikacích, tak viskozita dosahuje vysokých hodnot a jedná se o laminární proudění. [8]



Obr. 14 Typické rozdělení kalového hospodářství na tři hlavní kategorie [8]

Kategorie snadné aplikace zahrnuje především čerpání primárního kalu. Aplikace typické pro kategorii obtížné aplikace jsou čerpání importovaného a zahuštěného kalu. Aplikace spadající do kategorie velmi obtížné aplikace je podávání (transport) odvodněného kalu viz Obr. 14. [8]

## 5.1 Hydrodynamická čerpadla

Nejběžnějším čerpadlem na trhu čerpací techniky je dnes hydrodynamické čerpadlo. Jedná se o dynamický typ čerpacího stroje, kde kapalina proudí kanály v oběžném kole a nikdy není zachycena v uzavřených prostorech na rozdíl od objemových strojů. Hydrodynamická čerpadla mohou být situována do ponorných nebo suchých instalací za použití standardních průmyslových asynchronních elektromotorů s kotvou na krátko. [8] [16]

Princip fungování tohoto čerpadla je následující. Kapalina vstupuje na vstupní hranu lopatky oběžného kola a je urychlována v tangenciálním (obvodovém) směru podél lopatek oběžného kola. Ve spirálově tvarovaném tělese čerpadla (difuzoru) převádí kinetickou energii snížením rychlosti kapaliny na tlak. Pokud jde o výkon, hydrodynamické čerpadlo pracuje nejlépe při určitém průtoku a dopravní výšce, označované jako bod nejlepší účinnosti (BEP). Čím více se vzdálíme od BEP, tím nižší je účinnost čerpání. Použitelný rozsah pro čerpání hydrodynamickými čerpadly se udává 20-160 % od BEP z pohledu průtoku. Průtok hydrodynamického čerpadla se může výrazně lišit, pokud existují odchylky v dopravní výšce. Pro daný provozní interval dopravní výšky, ve kterém čerpadlo operuje během čerpacího cyklu, je dána specifická změna průtoku, která je definována Q-H charakteristikou čerpadla. Čím strmější je charakteristika čerpadla, tím méně změn se projeví na průtočném množství. V aplikacích kalového čerpání jsou změny v dopravní výšce obvykle způsobeny změnami ve složení kalu. Spotřeba energie pro hydrodynamické čerpadlo je obvykle nejmenší při nulovém průtoku a zvyšuje se v menší nebo větší míře s rostoucím průtokem. [8] [16]

Z hlediska použití, instalace, provozu a údržby mají odstředivá čerpadla následující vlastnosti.

### **Aplikace**

- Instalováno do snadných nebo obtížných aplikací technologií (TS = 0-8 %)

### Instalace

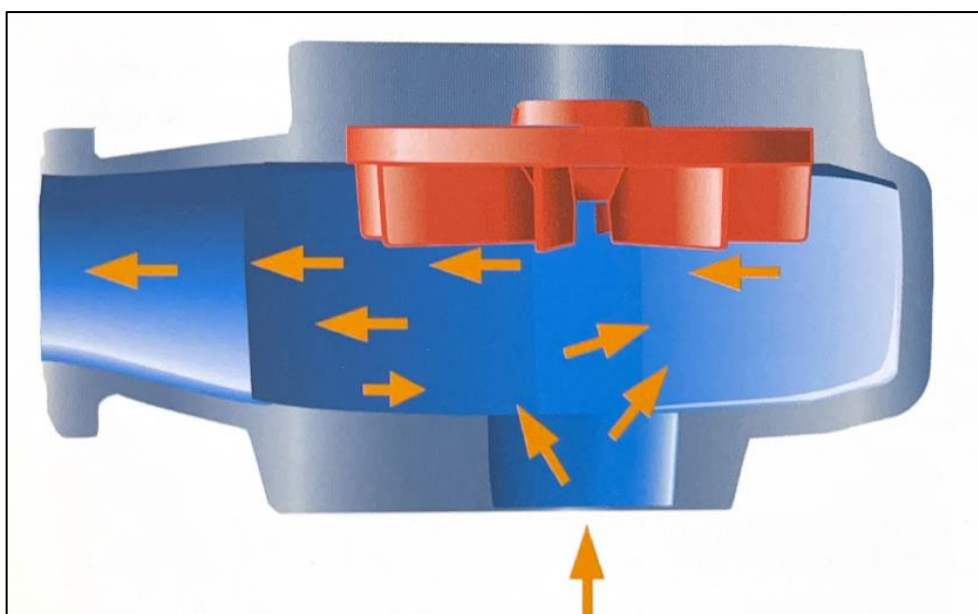
- Možná varianta pro ponorné i suché verze čerpacích jímek/stanic.
- Hydrodynamická čerpadla jsou standardně poháněna asynchronními elektromotory bez převodovky mezi motorem a hydraulickou částí.
- V případě potřeby regulace průtoku čerpadla se instaluje frekvenční měnič (VFD), jehož vlastností je možnost měnit hodnotu frekvence na vstupu do elektromotoru čerpadla a tím efektivně měnit otáčky elektromotoru za účelem snížení Q-H charakteristiky a tedy i průtoku. Pro plynulou regulaci průtoku je výhodou mít strmou Q-H charakteristiku čerpadla.
- Často je v systému vyžadována instalace zpětné klapky zabezpečující včasné zastavení reversního toku čerpaného média potrubním systémem v případě zastavení/kolapsu čerpací techniky.

### Údržba

- Důraz je kladen na jednoduchou konstrukci, vysokou efektivitu systému a na nízké provozní náklady a nenáročnost údržby.

Následující kapitola obsahuje detailnější popis nejčastějších hydrodynamických čerpadel používaných ve vodním hospodářství z hlediska jejich hydraulické části a oběžného kola. [8]

#### 5.1.1 Vířivé oběžné kolo



Obr. 15 Hydrodynamické čerpadlo s nezapuštěným oběžným kolem [8]

U hydrodynamického čerpadla používající vířivé oběžné kolo se neprodukuje proudění přímo oběžným kolem, ale vírem čerpané kapaliny vzniklým právě v důsledku rotace vířivého kola. Část kapaliny je nasávána do rotujícího oběžného kola a vypouštěna zpět do hydraulické části prostřednictvím odstředivého působení. Částečný průtok oběžným kolem uděluje odstředivý rotační pohyb celému objemu tekutiny v hydraulice čerpadla. Protože čerpání je vytvářeno vírem, většina částic v kapalině nepřichází do kontaktu s oběžným kolem, čímž se minimalizuje opotřebení čerpadla. Další výhodou je otevřená konstrukce hydraulické části čerpadla ve spojení s použitím polozapuštěného oběžného kola, které umožňuje volný průchod větších těles čerpadlem. [8]

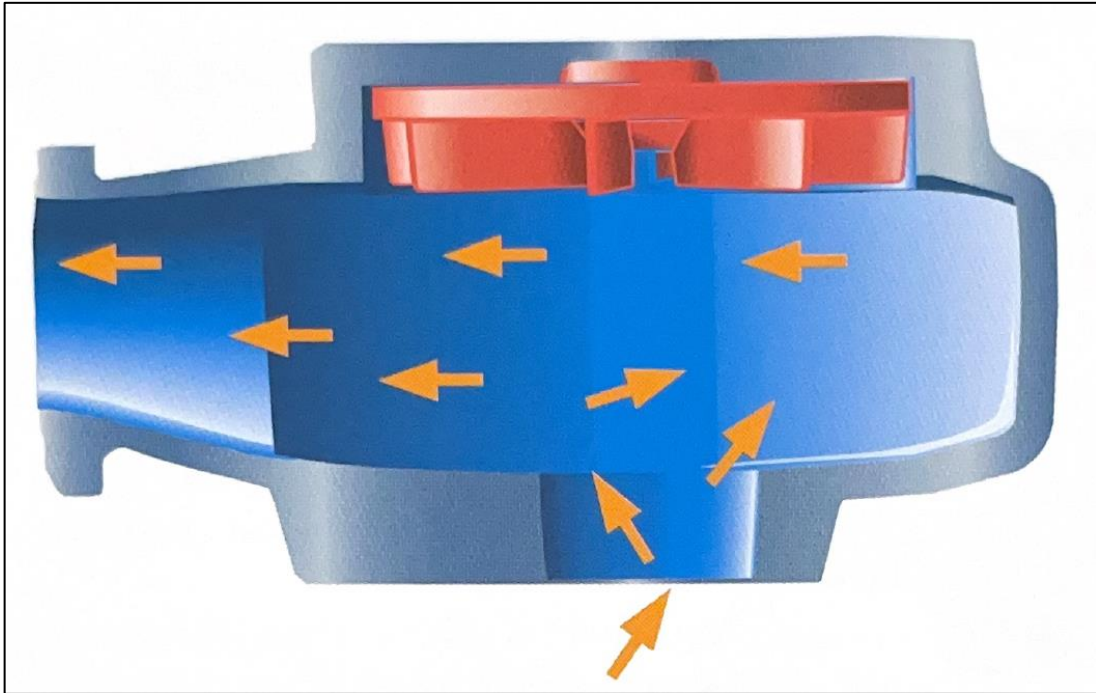
Typické vlastnosti této konstrukce čerpadla jsou:

- Používá se ve snadné aplikaci, 0-4 % TS.
- Přípustná velikost čerpaných částic závisí na velikosti výstupní příruby potrubí.
- Při dané rychlosti čerpadla se spotřeba energie zvyšuje přímo úměrně s průtokem.
- Nízká účinnost, o 5-20 % nižší než u standardních odstředivých čerpadel, která se nezanášejí.
- Průtok je citlivý na změny systémové křivky. Změny křivky systému mohou nastat v důsledku změn ve složení kalu nebo jiných vlivů, jako je znečištění potrubního systému. [8]

Existují dvě technická provedení čerpadla a to se zapuštěným oběžným kolem nebo nezapuštěným oběžným kolem. Použití konstrukce se zapuštěným oběžným kolem má obvykle tyto vlastnosti:

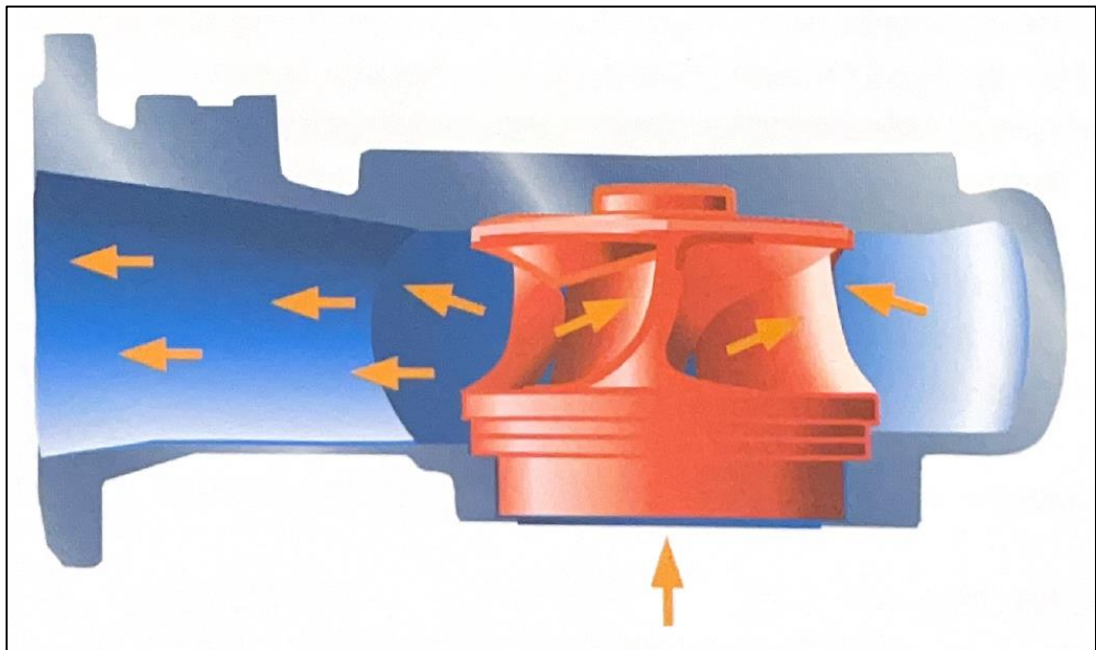
- Ještě nižší riziko ucpání.
- Přibližně 15 % kapaliny je v kontaktu s oběžným kolem, pokud je zapuštěno.
- Dosažitelný rozsah dopravní výšky je strmý, což vyžaduje pečlivé vyhodnocení provozních podmínek. [8]

Čerpadla se zapuštěným oběžným kolem se vyznačují lopatkami oběžného kola, které buď nezasahují do hydrauliky čerpadla, nebo zasahují do hydrauliky pouze částečně. Čerpadla se zapuštěným oběžným kolem jsou vhodná pro čerpání suspenzí obsahující pevné částice. [8]



Obr. 16 Hydrodynamické čerpadlo se zapuštěným vířivým kolem [8]

### 5.1.2 Kanálové oběžné kolo



Obr. 17 Pohled na typický typ čerpadla s kanálovým oběžným kolem. Samotné oběžné kolo tvoří jeden nebo více seřazených kanálů, kterými musí procházet čerpaná kapalina. [8]

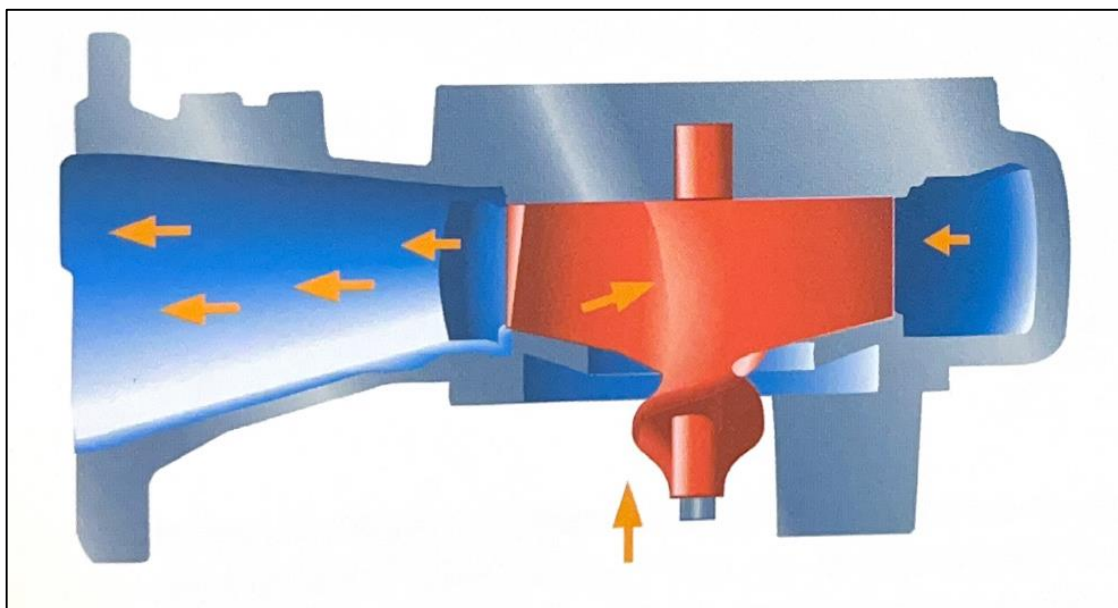
Jedná se o nejběžnější typ oběžného kola kalového hydrodynamického čerpadla. Má řadu kanálů tvořených lopatkami oběžného kola; krycí deska je integrována a otáčí se s oběžným kolem.

- Používá se ve snadné aplikaci, 0-4 % TS.
- Zřídka používané v kalových aplikacích kvůli tendenci k zanášení čerpadla.
- Oběžné kolo má obvykle 1-3 lopatky. Žádná samonasávací schopnost.
- Q-H charakteristika se mění v závislosti na ztrátě systému. Proto by měly být vypočteny systémové křivky pro předpokládaný nejhustší kal a systémová křivka pro vodu, aby bylo možné posoudit odpovídající posun.
- Spotřeba energie se zvyšuje úměrně s narůstajícím průtokem [8]

### 5.1.3 Polootevřené oběžné kolo

Polootevřené oběžné kolo nemá integrovanou krycí desku. Náběžné hrany lopatek oběžného kola tvoří těsnění proti skříni čerpadla. Tím jsou kanály procházející oběžným kolem zastřešeny stacionární skříní. V rámci této skupiny existují na dnešním trhu tři hlavní designy, které jsou popsány níže. [8]

#### Řezací oběžné kolo



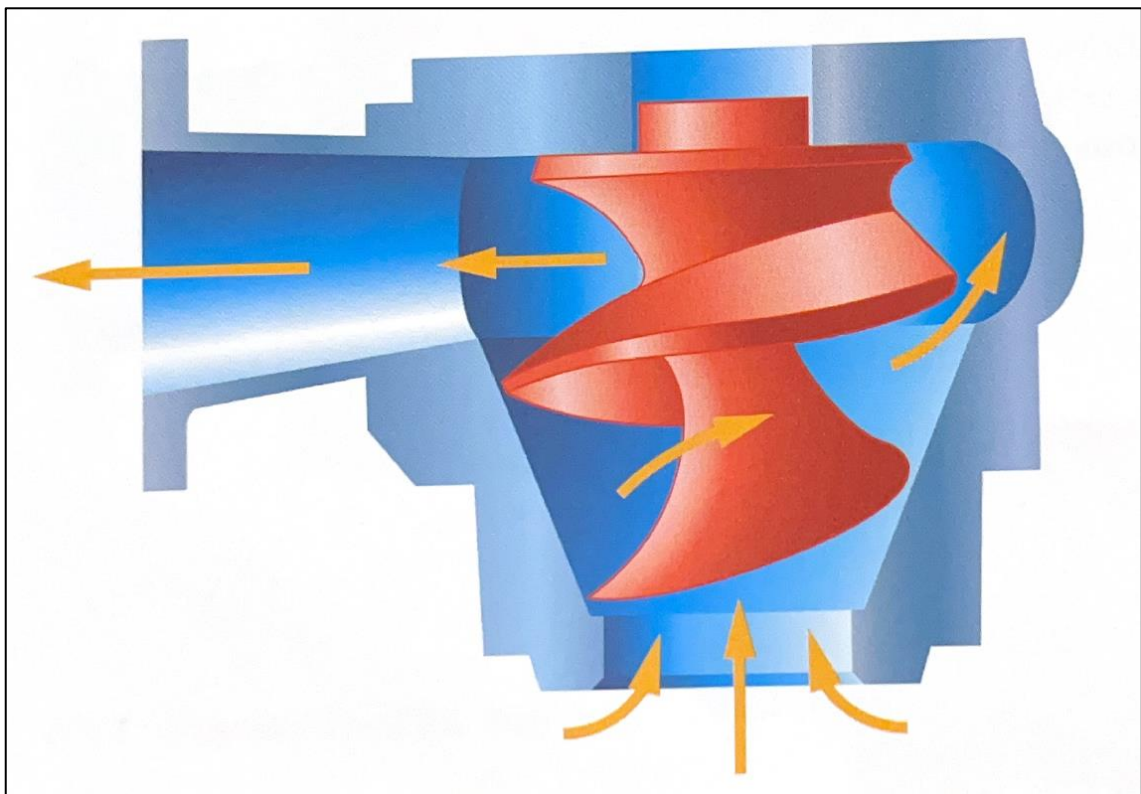
Obr. 18 Hydrodynamické čerpadlo s řezacím oběžným kolem a příslušným protikusem k oběžnému kolu. [8]

Tento typ čerpadla obsahuje spirálovou řeznou desku z tvrdého materiálu (protikus ku oběžnému kolu) na vstupu oběžného kola. Pevné látky obsažené v čerpané kapalině jsou nasávány do čerpadla, mezi nimiž jsou například hadry a jiná vlákna, které se při samotném čerpání záměrně stříhají mezi kalenými hranami oběžného kola a řeznou deskou, čímž se zmenšují na menší kousky, které snadno projdou čerpadlem a nakonec i celým hydraulickým systémem. [8]

- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci (broušení), 0-8% TS.
- Neucpává se.
- Řezné díly se opotřebovávají.
- Vyžaduje větší výkon kvůli řezání. Žádná samonasávací schopnost.
- Kapacita se mění v závislosti na ztrátě systému. Proto by se měly vypočítat systémové křivky pro očekávaný nejhustší kal a systémová křivka pro vodu, aby se posoudil odpovídající posun kapacity a spotřeby energie.
- Spotřeba energie se zvyšuje úměrně s rostoucím průtokem. [8]

Oběžné kolo a lopatky nožů je třeba seřadit za chodu čerpadla, z důvodu kontinuálního opotřebení čerpadla. Pokud se údržba zanedbá, může to výrazně snížit účinnost řezání čerpaného materiálu, což vede ke zvýšené spotřebě energie a zablokování čerpadla (nežádoucí havárii). Požadovaný výkon motoru je obvykle vyšší než u jiných odstředivých čerpadel při srovnatelných provozních bodech. Tato čerpadla mohou být při provozu hlučná. [8]

### Šroubové oběžné kolo



Obr. 19 Čerpadlo se šroubovým oběžným kolem. [8]

Šroubové oběžné kolo odstředivého čerpadla má tvar kuželového Archimedova šroubu. Šroubová odstředivá oběžná kola mají obvykle jednu spirálovou lopatku ovinutou kolem kuželového náboje a umožňuje snadný průchod pevných částic a snižuje riziko ucpání. Umožňuje také snadnou manipulaci (nepoškozuje přepravovanou látku), např. u čerpadel pro potravinářské směsi. [8]

- Používá se ve snadné aplikaci snadné/obtížné, 0-8% TS.
- Životnost závisí na správné údržbě/instalaci.

Tento typ čerpadla má obvykle následující vlastnosti:

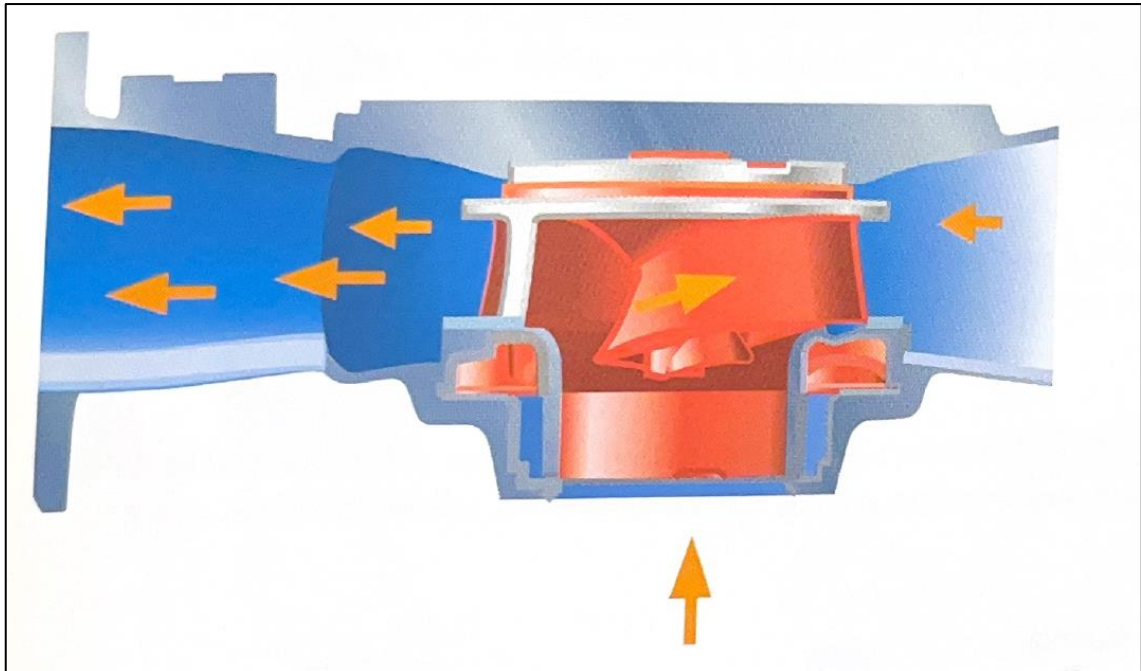
- Účinnost patří mezi nejvyšší u hydrodynamických čerpadel.
- Nastavitelná sací vložka. Žádná samonasávací schopnost.
- Plochá příkonová charakteristika, spotřeba energie téměř nezávislá na průtoku.
- Vysoká průchodnost.
- Nízká potřeba NPSH.
- Speciální vstupní geometrie pro snadné protažení větších hadrovitých celků, proto jsou v praxi údajně méně náchylné k problémům s ucpáváním.

Další konstrukční a provozní vlastnosti, které je třeba vzít v úvahu při výběru čerpadla se šroubovým oběžným kolem:

- Sací vložka musí být pravidelně seřizována, jinak hrozí ucpání. Oběžné kolo a sací vložka se opotřebovávají různou rychlostí, proto pro zajištění plné funkčnosti čerpadla bude potřeba vyměnit obě části.
- Šroubové oběžné kolo má tendenci hromadit pevné částice v pouzdru těsnění, což může vést k selhání těsnění.
- Čerpadlo by nemělo být typicky provozováno při průtocích nižších než 50 % průtoku v bodě nejlepší účinnosti (BEP) kvůli recirkulaci čerpaného média uvnitř šneku.
- Hadry obsažené v čerpané kapalině mohou uvíznout na náběžné hraně a na špičce oběžného kola.
- Při čerpání kapalin s vysokou viskozitou je nutné chlazení čerpadla vzduchem. [8]



## N – oběžné kolo



Obr. 20 Hydrodynamické čerpadlo s oběžným kolem typu „N“

Oběžné kolo typu „N“ je polootevřené, samočistící oběžné kolo s vysokou účinností pro víceúčelové použití. [8]

- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci, 0-8 % TS.
- Životnost závisí na správné údržbě/instalaci.
- Neucpává se oběžné kolo. [8]

Tento typ čerpadel má obvykle následující vlastnosti:

- Účinnost patří k nejvyšším u nezanášejících se odstředivých čerpadel.
- Nízký požadavek na NPSH, žádná samonasávací schopnost.
- Speciální vstupní geometrie pro manipulaci s hadrem, proto se údajně neucpávají.
- Vysokotlaká provedení tohoto čerpadla mají relativně strmé křivky čerpadla, typicky  $0,2-0,9 \text{ m} \cdot (\text{l} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ , což je výhodné, pokud je požadován konstantní průtok při čerpání kalu s reologií, která se mění v čase.
- Spotřeba energie se zvyšuje s rostoucím průtokem. [8]

Historicky byl kladen důraz na velikost průchodu. Pokud se totiž do jímky čerpadla dostanou větší nečistoty, čerpadlo musí být schopno je odčerpat. Výzkum vedl k jednolopatkovým oběžným kolům, u kterých je jejich účinnost obětována pro průtočný

průřez (předpokládané požadované vlastnosti pro neucpávání). V odpadních vodách jsou však velké pevné částice o velikosti srovnatelné s průměrem vstupu čerpadla poměrně vzácné a neměly by proto představovat rozhodující faktor pro konstrukci hydrauliky čerpadla nebo pro výběr typu čerpadla. Pokud však k takové nepříznivé avšak vzácné události dojde, naráz při střetu s rychle se otáčejícím oběžným kolem pravděpodobně způsobí vážné poškození čerpadla. V praxi je však hlavním problémem spíše postupné hromadění vláknitého materiálu na přední hraně oběžného kola, který pokud se s ním nepracuje správně, se může spojit do větších měkkých a deformovatelných útvarů, které následně mohou vyústit v ucpání čerpadla. [8]

N-oběžné kolo má polootevřené provedení, kde rotující oběžné kolo je odděleno od stacionárního protikusů úzkou štěrbinou. Aby se zabránilo hromadění materiálu mezi oběžným kolem a protikusem, má protikus odlehčovací drážku. Zde se uvolňují a odčerpávají hadry a jiné pevné látky, které se zachytí mezi oběžným kolem a protikusem. Odlehčovací drážka je důležitou součástí čerpadla s oběžným kolem typu „N“. [8]

Další potenciální oblastí ucpání je horní vůle mezi oběžným kolem a víkem pouzdra těsnění. Pro eliminaci rizika ucpání v této oblasti je v oběžném kole a v chladicím dně další odlehčovací drážka. [8]

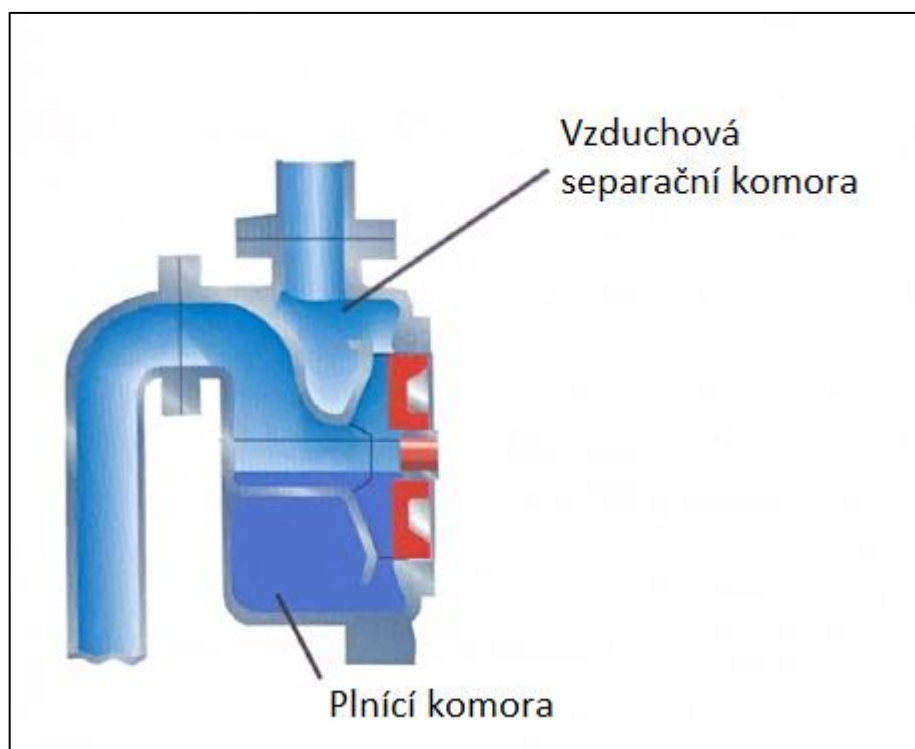
#### 5.1.4 Samonasávací čerpadla

Samonasávací čerpadla jsou navržena tak, aby byla umožněna samonasávací schopnost samotného čerpadla.

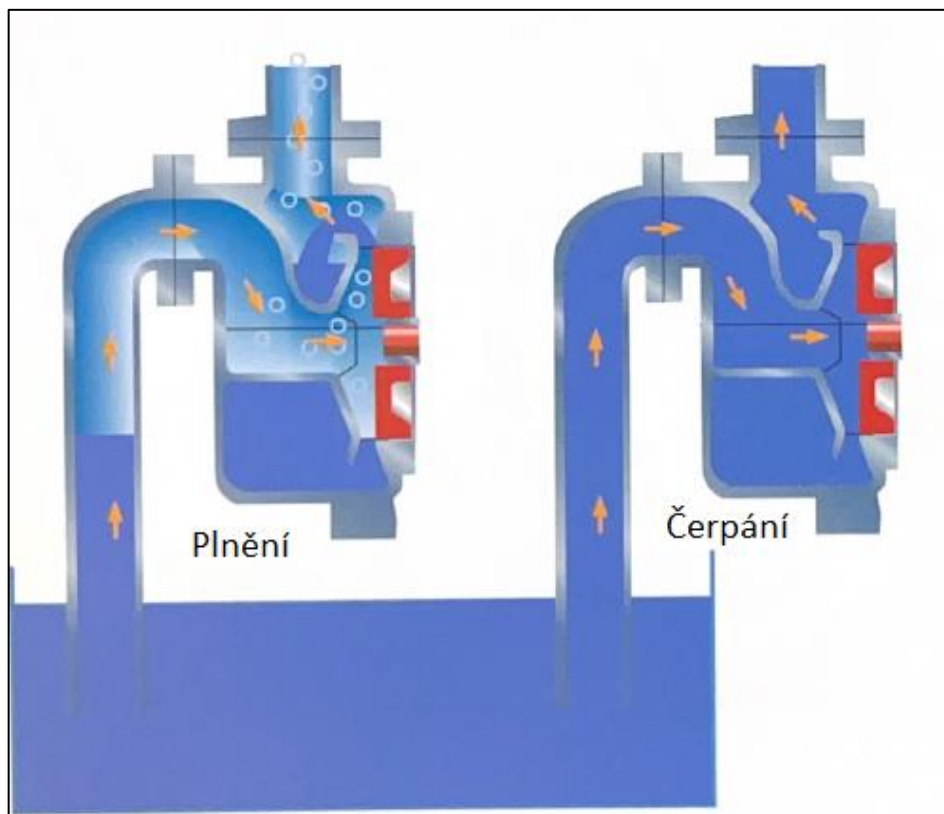
- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci.
- Sací schopnost 7,5 m.
- Přípustná velikost přepravovaných pevných částic do přibližně 80 mm.
- Oběžné kolo lze nastavit za chodu, což je důležité pro životnost/zanášení.
- Lze namontovat nad hladinu kapaliny.

Tato čerpadla mohou být výhodná pro koncového uživatele, protože eliminují potřebu ventilů, vakuových a ejektorových čerpadel, které se mohou ucpat nebo je jejich použití nepraktické. Ačkoli je čerpadlo samo o sobě navrženo k plnění tohoto úkolu, je důležité pochopit princip samonasávání, aby potrubní systém mohl být navržen tak, aby nebyl v rozporu s touto funkcí. [8]

Samonasávací čerpadlo je podle definice čerpadlo, které vytvoří směs vzduchu a čerpaného média při nasávání kapaliny ve spirální skříní čerpadla. Vzduch vystoupává dále výtlačným potrubím a je postupně nahrazován čerpaným médiem do doby, kdy proudí výtlačným potrubím zmiňované čerpané médium. Aby toho bylo dosaženo, musí být v plášti (Obr. 21) nebo v plnicí komoře zadržena dávka kapaliny dostatečná k naplnění čerpadla. Když se čerpadlo spustí, rotující oběžné kolo vytvoří částečné vakuum a vzduch ze sacího potrubí je pak nasáván do tohoto vaku a je dále strháván kapalinou nasávanou z plnicí komory. Tato směs vzduchu a kapaliny je poté čerpána do vzduchové separační komory (uvnitř pláště), kde je vzduch oddělen od kapaliny, přičemž vzduch je vytlačován ven do výtlačného potrubí Obr. 22 a kapalina se vrací do plnicí komory. Tento cyklus se opakuje, dokud není všechen vzduch ze sacího potrubí vytlačen a nahrazen pumpováním a dokud není zajištěno plnění Obr. 22. [8]



Obr. 21 Samonasávací čerpadlo (vyznačení komor). [8]



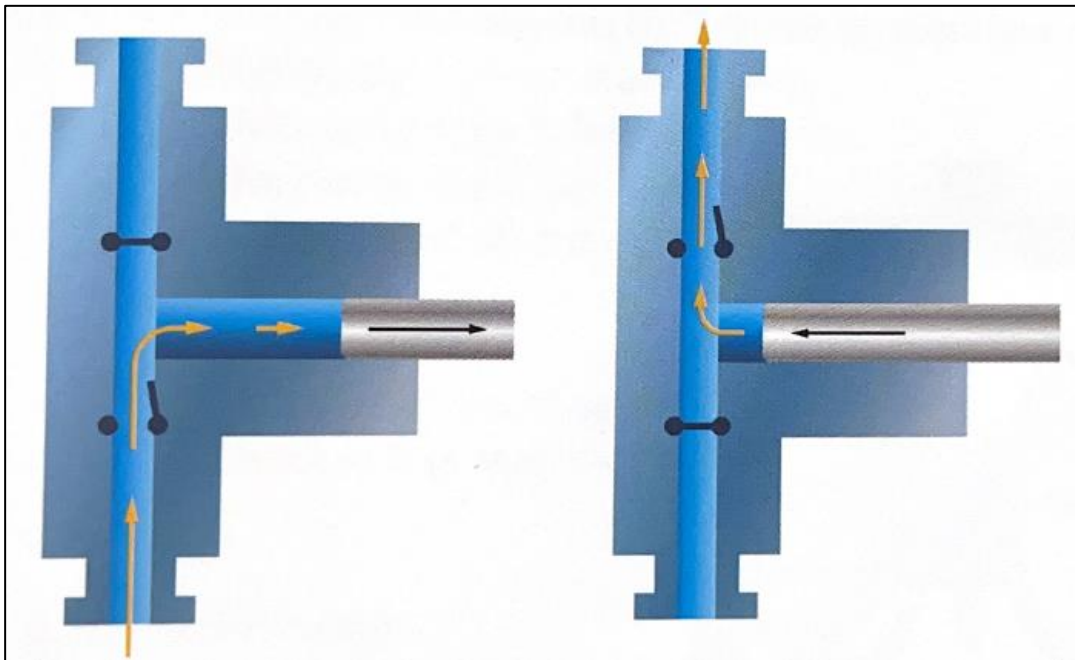
Obr. 22 Samonasávací čerpadlo (režimy plnění a čerpání). [8]

## 5.2 Hydrostatická (objemová) čerpadla

Základním principem činnosti čerpadel hydrostatických je vytvoření pracovních komor, které se naplní kapalinou přes vstup (sání), zachytí kapalinu v uzavřených pracovních komorách a nakonec kapalinu vytlačí výtlakem. Čerpadla hydrostatická mohou být s kmitavým pohybem pracovního prvku (např. píst) nebo rotační. Pístová čerpadla mají obvykle samočinné vstupní a výstupní ventily, zatímco rotační čerpadla mají obvykle pevné vstupní a výstupní otvory (tzv. výřezy) ve statoru. Čerpadla PD mají tuhou charakteristiku, tj. průtok je úměrný otáčkám čerpadla a tlak je prakticky nezávislý na průtoku čerpadla. [20] [8]

### 5.2.1 Pístová čerpadla

Existuje široká škála konstrukcí pístových čerpadel. Tato provedení lze kategorizovat jako pístová čerpadla s těsněním integrovaným v pístu, plunžrová čerpadla s těsněním ve válcích nebo membránová čerpadla. Pístová čerpadla mohou být poháněna mechanicky nebo hydraulicky. Princip činnosti je podobný jako u pístového motoru. Konstrukce využívá klikový mechanismus a vstupní a výstupní ventily; ty jsou však u čerpadel obvykle samočinné (bez vačkového hřídele). Může být jeden, dva, tři nebo více pístů vedoucích k simplexním, duplexním, triplexním atd. čerpacím soustrojím. [8]



Obr. 23 Pístové čerpadlo při (vlevo) sacím a (vpravo) výtlačném zdvihu [8]

### Aplikace

- Používá se ve snadných, obtížných a tvrdých aplikacích.

### Instalace

- Vyžaduje pevný a těžký základ kvůli pulzujícímu provozu tohoto typu čerpadla.
- Velký půdorys.
- Vyžaduje se nízkorychlostní pohon s vysokým točivým momentem

### Použití

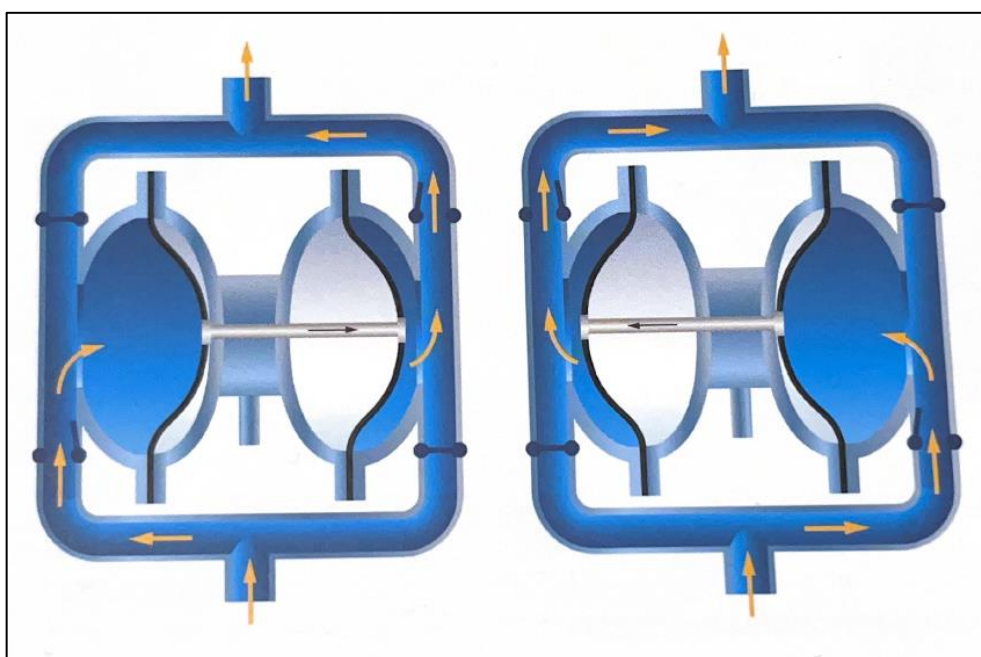
- Schopnost vysokého tlaku (až 2000 bar)
- Systém výtlačného potrubí nesmí být nikdy uzavřen
- Je nutný pojistný ventil
- Průtok nezávislý na tlaku
- Účinnost výrazně nižší než u odstředivých čerpadel.
- Výkon se zvyšuje s tlakem a průtokem.
- Vlastní samonasávací schopnost až 3 m.
- Princip činnosti předpokládá pulzující průtok.
- Typ čerpadla je obvykle hlučný.
- Nízká tolerance chodu nasucho.

## Údržba

- Vysoké nároky na údržbu při nepřetržitém provozu.
- Složitá konstrukce, nutná kvalifikovaná práce pro údržbu.
- Ventily se ucpou/vyžadují čištění. [8]

### 5.2.2 Vzduchem ovládaná membránová čerpadla

Samostatnou kategorii tvoří jednočinná a dvojčinná vzduchová membránová čerpadla. Následující obrázek nastiňuje princip fungování membránových čerpadel:



Obr. 24 Princip fungování membránového čerpadla. [8]

Vzduch je čerpán do centrálního rozdělovače a stlačuje se za první membránou, uzavírá sací ventil, otevírá výtlačný ventil, a tím vytlačuje čerpané médium do výtlačky. To má za následek vtažení druhé membrány dovnitř, uzavření vypouštěcího ventilu druhé membrány a tím vytvoření podtlaku ve druhé komoře. Tím se otevře sací ventil ve druhé komoře a nasává čerpané médium do komory. Rozdělovač vzduchu pak obrátí stranu tlakování a proces se obrátí. Membránová čerpadla jsou samonasávací, kapacita závisí na výtlačném tlaku a tlaku přiváděného vzduchu. Membránová čerpadla mohou zpracovávat viskózní kapaliny a suspendované pevné látky, ale v závislosti na velikosti kalů mohou být vyžadovány klapkové ventily. Tato čerpadla mohou běžet na sucho po neomezenou dobu bez poškození součástí. Membránová čerpadla mají obvykle vertikální konstrukci se vstupem dole a výtlačkem nahoře. [8]

Membránová čerpadla nemají rotační hřídele, které vyžadují těsnění. Pokud je výtlak uzavřen nebo ucpán čerpaným médiem, čerpadlo se zastaví bez jeho poškození. Čerpadla mohou být ponořena v čerpané kapalině. Při opotřebení membrány nedochází ke ztrátě průtoku. Porucha v důsledku opotřebení membrány však může být náhlá a bez předchozí indikace. [8]

#### **Aplikace**

- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci,  $TS \ll 8 \%$ .

#### **Instalace**

- Malé rozměry.
- Vyžaduje přístup k stlačenému vzduchu.
- Může být ponořen do čerpané kapaliny.

#### **Provoz**

- Schopnost tlaku až 7,5 bar
- Toleruje uzavřené výtlačné potrubí.
- Průtok závisí na výstupním tlaku a tlaku přiváděného vzduchu.
- Samonasávací schopnost až 8-9 m.
- Princip činnosti předpokládá pulzující proudění.
- Typ čerpadla je obvykle hlučný.
- Typ čerpadla snáší chod nasucho.
- Typ čerpadla dokáže zpracovat písek, pokud jsou použity klapky.
- Stlačený vzduch může způsobit námrazu vzduchových ventilů.

#### **Údržba**

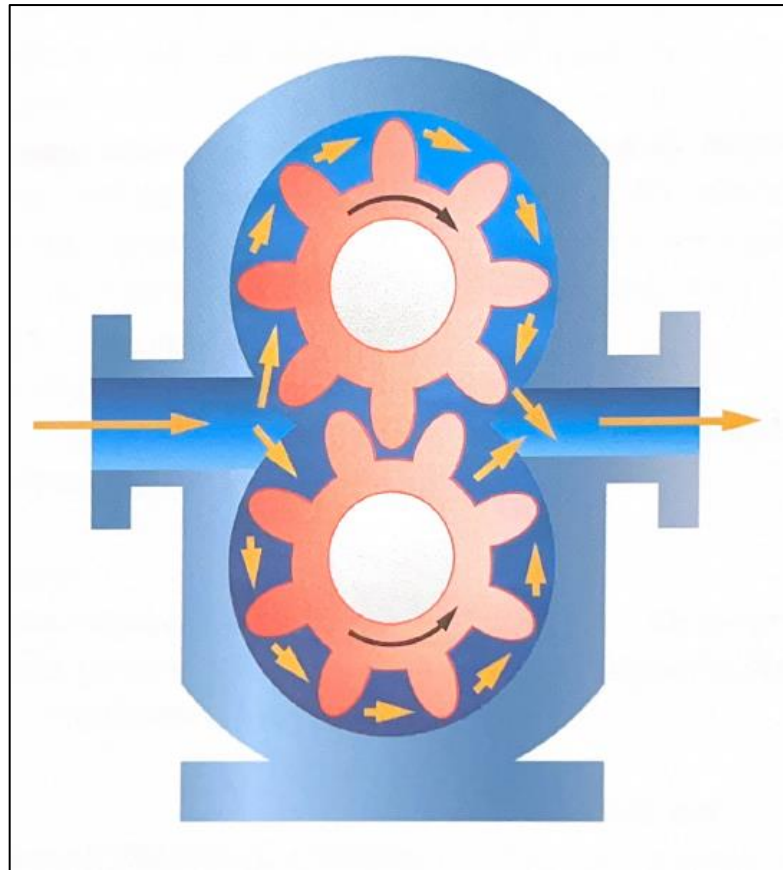
- Údržba a náhradní díly jsou nákladné.
- Zpětné ventily se mohou ucpat/vyžadovat čištění.

### 5.2.3 Zubová čerpadla

Existují 2 základní provedení a to s vnějším a vnitřním ozubením. Všechny se řídí stejným principem fungování. Jak zuby ozubeného kola vycházejí ze záběru, zvětšující se mezizubní otvor je naplněn kapalinou. Kapalina je zachycována a dopravována po obvodu do

výtlačného otvoru, kde zuby opět zabírají a vytlačují kapalinu z čerpadla. Čerpadla mají obvykle dvě až čtyři ložiska a jejich konstrukce obvykle využívá skříň čerpadla pro vůli rotujících částí.

[8]



Obr. 25 Zubové čerpadlo s vnějším ozubením [8]

#### **Aplikace**

- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci.

#### **Instalace**

- Menší velikost zařízení.
- Hřídelové ucpávky vystavené výtlačnému tlaku čerpadla.

#### **Provoz**

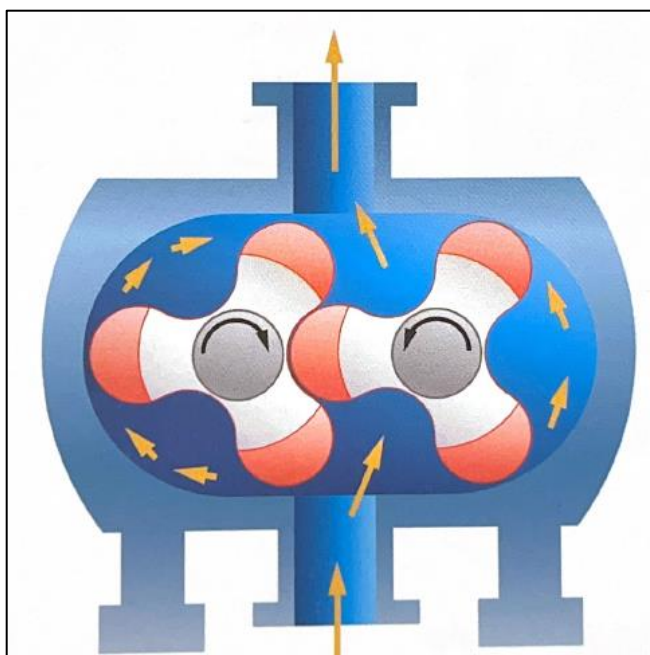
- Schopnost tlaku až 16 bar.
- Průtok je úměrný rychlosti čerpadla.
- Samonasávací schopnost, sací výška až 8,5 m.
- Průtok je bez pulzací.
- Tichý provoz.



- Omezená tolerance chodu nasucho.
- Malá tolerance proti oděru.
- Velké minerální pevné látky mohou ucpat čerpadlo. [8]

#### 5.2.4 Čerpadla s rotačními písty (Lobe čerpadla)

Čerpadla s rotačními písty přepravují čerpanou kapalinu v dutinách vytvořených mezi rotory a skříní čerpadla. V tomto aspektu je čerpadlo podobné zubovému čerpadlu s vnějším ozubením. Pro zajištění vůlí mezi rotory však bude vyžadováno externí rozvodové kolo. Rotory lobe čerpadla jsou obvykle dvou základních typů. U jednoho typu mají dva rotory cykloidního tvaru viz Obr. 26. Druhý typ se skládá z obloukových rotorových křídel většinou se dvěma křídly na rotor. Písty se pohybují v prstencových válcích obrobenech v tělese čerpadla. [20] [8]



Obr. 26 Lobe rotorové čerpadlo [8]

Další atraktivní vlastností lobe rotorových čerpadel je, že zabírají podstatně méně místa.

### **Aplikace**

- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci, TS < 10 %.

### **Instalace**

- Malé rozměry.
- Může běžet v obou směrech.
- Dvě nebo čtyři hřídelové ucpávky vystavené výtlačnému tlaku čerpadla.
- Nevyžaduje zpětný ventil.

### **Provoz**

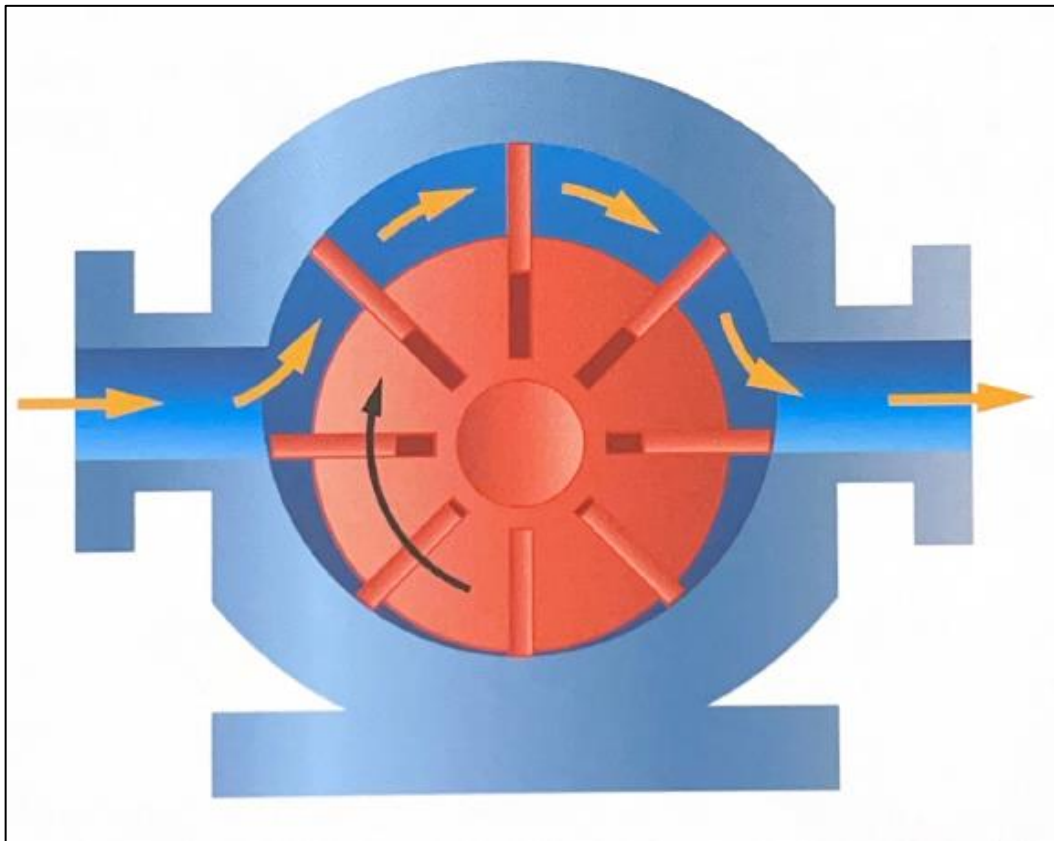
- Schopnost tlaku typicky až 10 bar.
- Tlak je téměř nezávislý na rychlosti.
- Průtok úměrný rychlosti čerpadla.
- Samonasávací schopnost.
- Sací zdvih až 8 m.
- Pulzující proudění. Pulsace může být snížena v závislosti na konstrukci rotorů.
- Lopatková rotorová čerpadla s kovovými rotory mají nízkou toleranci vůči chodu na sucho.
- Písek způsobuje nadměrné opotřebení v důsledku malých vůlí v čerpadle.
- Pokud dojde k selhání, obvykle tak činí bez předchozího varování.

### **Údržba**

- Snadná údržba, ale v aplikacích s kalem jsou vyžadovány časté servisní intervaly [8]

## 5.2.5 Čerpadla s posuvnými lopatkami (lamelami)

Princip činnosti pro posuvné lamelové čerpadlo je následující. Když lopatky procházejí sacím otvorem, zvětšuje se objem mezi lopatkami a vývrtem excentrického pouzdra. Kapalina vyplňuje prostory mezi lopatkami a je dopravována tangenciálně k výtlačnému otvoru. [8]



Obr. 27 Hydrostatické čerpadlo s posuvnými (kluznými) lopatkami (lamelami) [8]

Jak se excentricky umístěný náboj otáčí, lopatkové lamely jsou buď zatlačeny do náboje, nebo jsou vysunuty až ke stěně otvoru pouzdra. [8]

#### **Aplikace**

- Používá se v aplikacích snadné, TS < 4 %.

#### **Instalace**

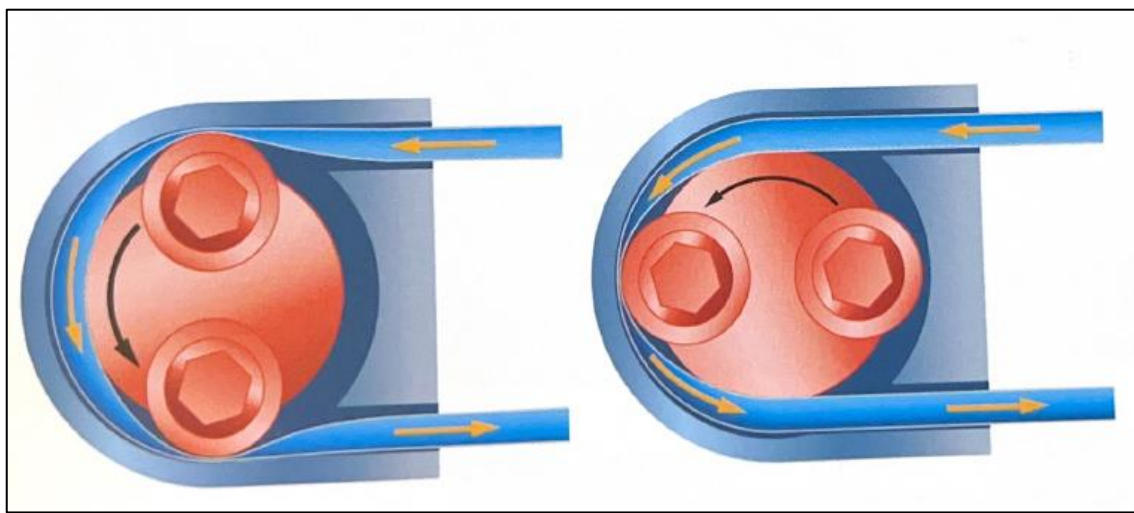
- Malé rozměry.
- Nízkorychlostní pohon
- Těsnění vystavená výtlačnému tlaku.

#### **Provoz**

- Schopnost tlaku až 70 bar.
- Průtok závisí na rychlosti čerpadla.
- Nepulzující proudění.
- Nevhodné pro manipulaci s pevnými látkami, pískem nebo hadry. [8]

### 5.2.6 Peristaltické čerpadlo

Peristaltické čerpadlo je typ objemového čerpadla. Kapalina je obsažena v ohebné trubici umístěné uvnitř kruhového pouzdra čerpadla. Rotor s řadou lamel stlačuje ohebnou trubku. Jak se rotor otáčí, stlačovaná část trubky se uzavírá, čímž je tekutina na tlakové straně pouzdra tlačena dopředu trubicí. Když se trubka po průchodu lamelou otevírá do svého přirozeného stavu, proudí kapalina do čerpadla. [8]



Obr. 28 Hydrostatické peristaltické čerpadlo [8]

Pohled v řezu na peristaltické (Obr. 28) čerpadlo znázorňující jeho provozní princip. Hadice se pomalu stlačuje, aby se dosáhlo hladkého, mírného proudění bez turbulencí nebo dodatečné emulgace. Čerpaná kapalina prochází pouze elastomernou hadicí a nedochází ke kontaktu s žádnými ventily nebo mechanickými díly. Nic jiného než hadice nebo hadička se nedotýká kapaliny, čímž se eliminuje riziko kontaminace kapaliny čerpadla nebo kontaminace čerpadla kapalinou. Úplné uzavření hadice dává čerpadlu jeho pozitivní výtlač, zabraňuje zpětnému toku a eliminuje potřebu zpětných ventilů, když čerpadlo neběží. [8]

#### **Aplikace**

- Používá se ve snadné a obtížné aplikaci, TS do 8 %.

#### **Instalace**

- Malé rozměry.
- Provoz při nízké rychlosti
- Není nutná hřídelová ucpávka.

### Provoz

- Provozní tlak 15 bar.
- Průtok je konstantní, ale nastavitelný bez ohledu na tlak ve výtlačném potrubí.
- Průtok je přímo úměrný rychlosti čerpadla.
- Samonasávací schopnost až 8,5 m.
- Pulzující proudění.
- Čerpaná kapalina prochází pouze hadičkou, tedy nedochází ke kontaktu s ostatními částmi.
- Čerpadlo může běžet nasucho.
- Žádné prokluzování mezi kapalinou a hadicí znamená omezené opotřebení abrazivem.
- Čerpadlo může běžet v obou směrech, průtok je reverzibilní.
- Zvládá kapaliny s vysokou viskozitou.
- Průtok lze přesně řídit a je opakovatelný.
- Hadice může prasknout bez varování.
- Nepoužívá se v nepřetržitém provozu.

## 6 Metody umožňující přepočítání výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla z čisté vody na parametry při čerpání čistírenských kalů

Proces snižování výkonu hydrodynamického čerpadla (při konstantní rychlosti otáčení oběžného kola) při čerpání nelineárních kapalin je realita, kterou je nutno brát v potaz při návrhu čerpací techniky do technologií, kde se vyskytují média neřídící se dle Newtonova zákona o viskozitě. Proces čerpání viskóznějšího materiálu než je voda, zahrnuje odhad sníženého výkonu čerpadla. To zahrnuje snížení dopravní výšky, průtoku a účinnosti ve srovnání se samotným čerpáním vody. [27] [25] [28]

Vzhledem k mnoha konstrukčním a výrobním parametrům (úhel lopatek, drsnost povrchu atd.) není možné určit danou výkonnostní křivku odstředivého čerpadla výpočtem. Výkonové charakteristiky hydrodynamického čerpadla jsou proto vždy stanoveny experimentálně skutečným měřením při čerpání čisté vody jako standardní testovací kapaliny.

V mnoha případech je však čerpaná kapalina (jako jsou kaly) viskóznější. V těchto případech se může výkon čerpadla značně lišit od výkonu při čerpání čisté vody. Viskózní kapaliny způsobují větší hydraulické ztráty v čerpadle, takže při vyšších viskozitách klesá dopravní výška a účinnost čerpadla, zatímco požadovaný příkon čerpadla stoupá. Q-H a účinnostní charakteristiky čerpadla pro viskózní kapaliny klesají pod odpovídající výkonové charakteristiky pro čistou vodu, ale závěrný bod zůstává stejný, bez ohledu na viskozitu. [27] [25] [28]

V roce 1983 Hydraulický Institut v USA poskytl metodu snížení výkonu odstředivých čerpadel pro newtonské kapaliny. To se stalo normou ISO 9906 v roce 1999 a následně byla revidována v roce 2012. Davidson a Bertele (2000) poskytli alternativní metodu a existuje také norma ANSI/HI (2015). V případě suspenzí, u nichž dochází k sedimentaci hrubých částic, vedly experimentální studie k vývoji řady empiricky založených rovnic a nomogramů a ke standardu ANSI/HI (2016). I když byly provedeny experimentální studie používající neneutonské kaly pro predikci chování hydrodynamického čerpadla, tak stále v současné době neexistuje žádný standardizovaný a běžně přijímaný přístup, který by mohl být aplikován na neneutonské kapaliny. Níže jsou uvedeny tři metody přepočtu výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla. [27] [25] [28]

## 6.1 Přepočet výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla pro newtonské kaly

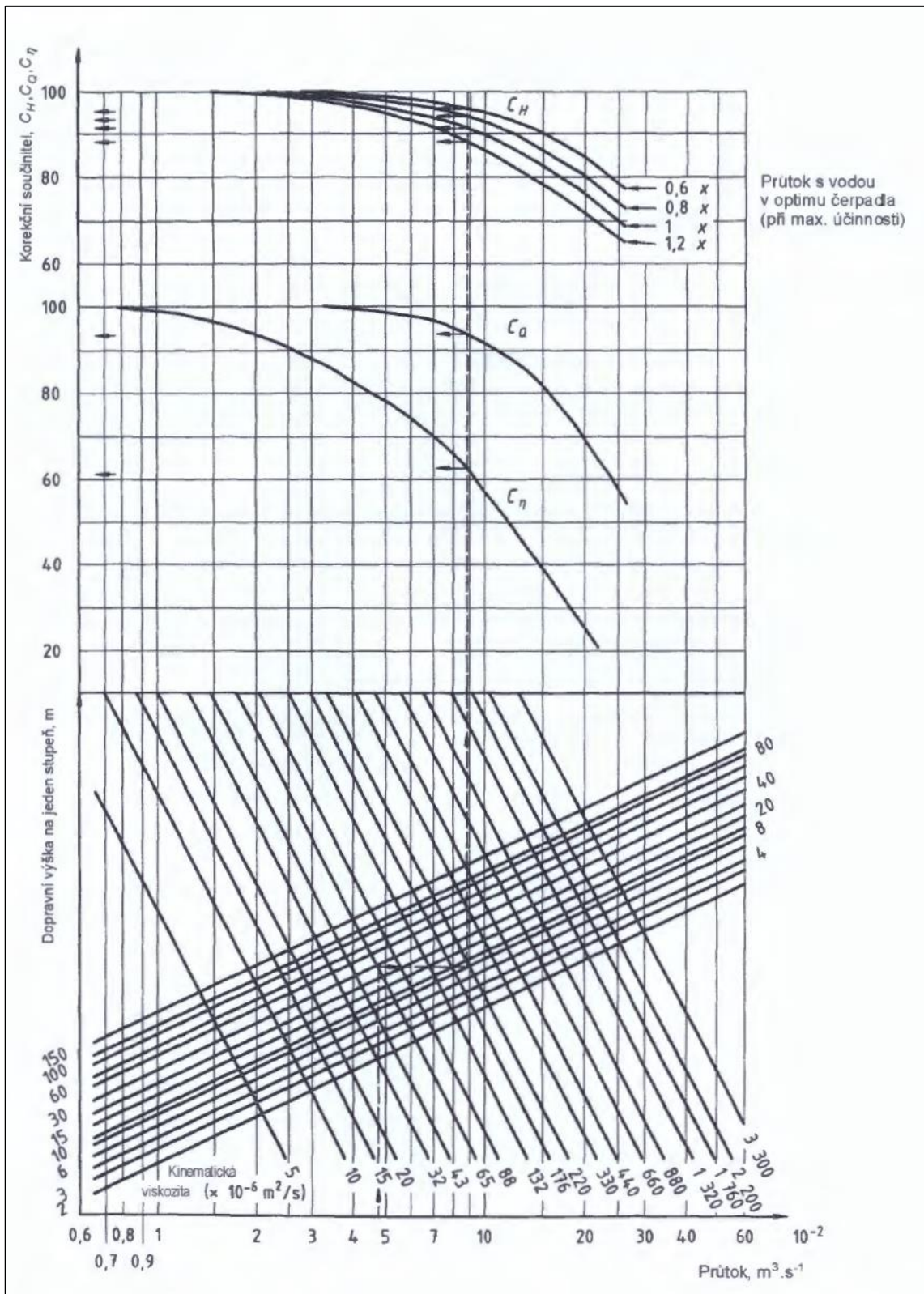
Diagram HI (1983) zobrazený na Obr. 29 lze použít k předpovědi výkonu čerpadla pro newtonské materiály o známé viskozitě, když je znám hydraulický výkon (parametry  $Q$  ( $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $H$  (m)) a celková účinnost  $\eta_c$  (-) hydrodynamického čerpadla při čerpání čisté vody. [28]

Vztah pro vliv kinematické viskozity  $\nu$  (cSt) na parametry čerpadla jsou uvedeny níže v rovnici (6.1). Průtočné množství čerpadlem  $Q$  ( $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a diferenciální výška  $H$  (m) (dopravní výška vytvořená provozem čerpadla), nejsou významně ovlivněny poskytovanou viskozitou. [28]

$$\nu < (Q)^{0.5} \cdot H^{0.25} \quad (6.1)$$

Obecný užitečný rozsah hydrodynamických čerpadel je omezen na:

$$\nu < 100 \cdot (Q)^{0.5} \cdot H^{0.25} \quad (6.2)$$



Obr. 29 HI diagram pro přepočet  $Q - H$  charakteristiky hydrodynamického čerpadla pro newtonské látky. [28]

Pokud tedy není splněna nerovnost (6.2), může být výhodnější použít hydrostatické (objemové) čerpadlo. Diagram HI byl upraven do podoby viz Obr. 30 s použitím parametru

$\frac{\nu}{(Q)^{0.5} \cdot H^{0.25}}$  a křivek zahrnující nejlepší účinnost při čerpání čisté vody. [28]

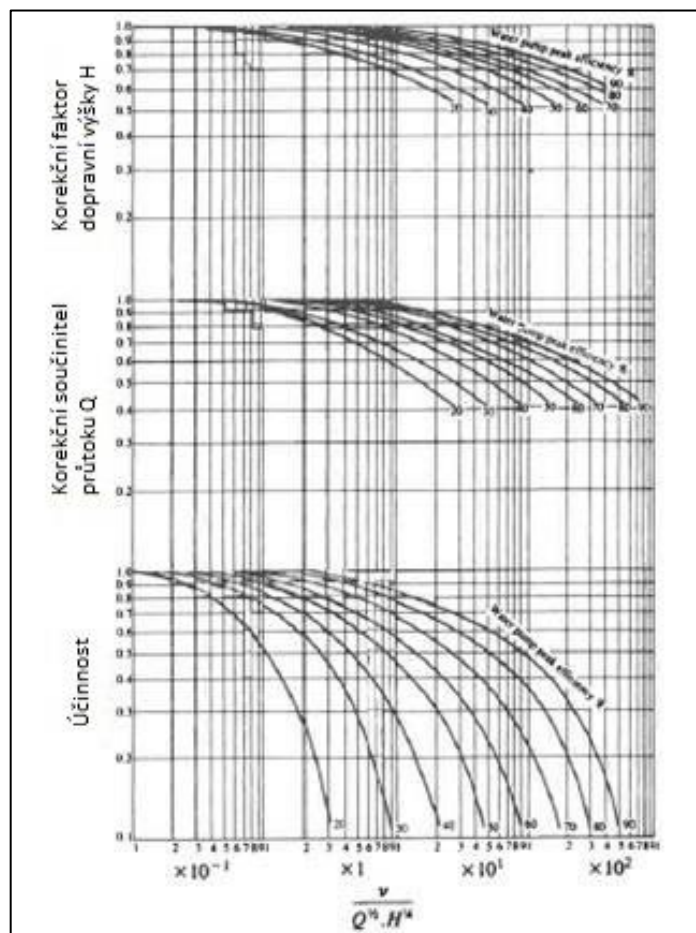
Následující rovnice (6.3) - (6.6) dovolují přepočet výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla při čerpání viskózních látek v případě znalosti výkonových charakteristik čerpadla při čerpání čisté vody a kinematické viskozity čerpané kapaliny.

$$Q_{vis} = C_Q \cdot Q_{voda} \quad (6.3)$$

$$H_{vis} = C_H \cdot H_{voda} \quad (6.4)$$

$$\eta_{vis} = C_\eta \cdot \eta_{voda} \quad (6.5)$$

$$P_{vis} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{vis} \cdot H_{vis}}{\eta_{vis}} \quad (6.6)$$



Obr. 30 Upravený HI diagram. [28]

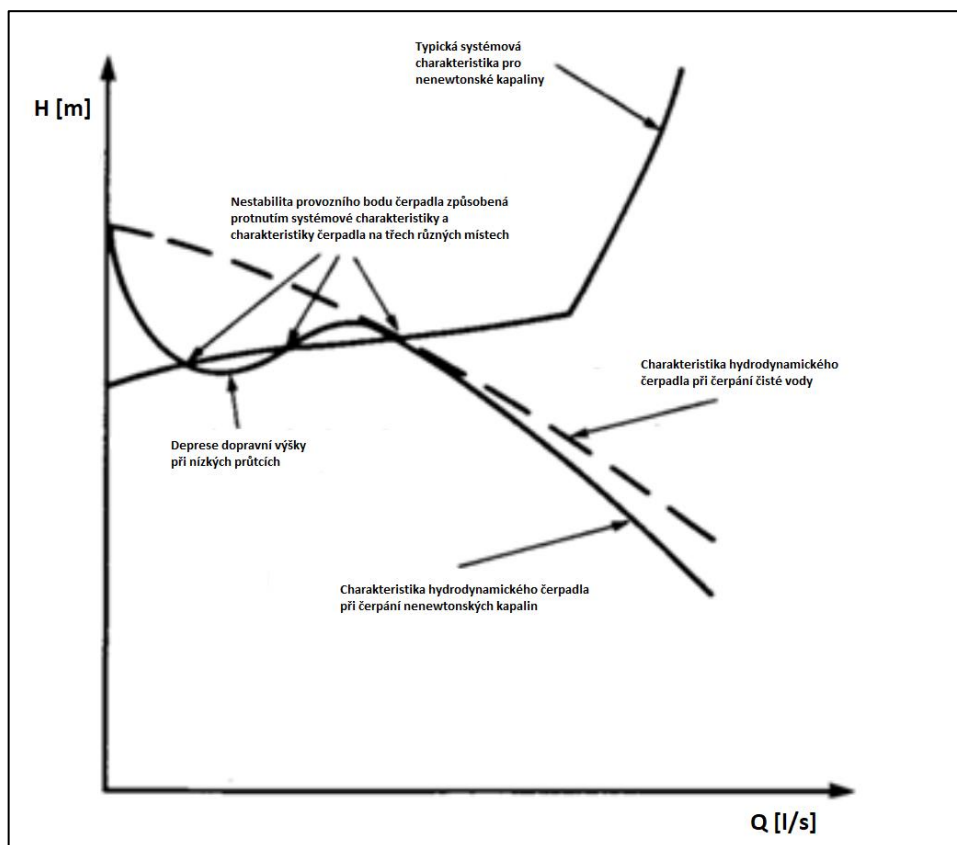
Přístup HI byl dále rozvíjen ve standardu ANSI / HI (2015), kdy je kinematická viskozita



nahrazena zdánlivou viskozitou, podle které jsou určeny (z nomogramů uvedených výše) příslušné korekční faktory. Není však jasné, zda Obr. 29 a Obr. 30 a standard ANSI/HI poskytují podobné výsledky. [28]

## 6.2 Přepočet výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla pro nenevtonské kaly

Čistírenské kaly často vykazují reologické vlastnosti smykového ztenčování, které se obvykle modeluje pomocí mocninného zákona, Binghamova plastického modelu nebo Herschel-Bulkleyho modelu. To může způsobit pokles Q-H charakteristiky čerpadla při nízkých průtocích (tuto skutečnost potvrzují následující metody přepočtu: Walker a Goulas, 1984; Wilson a Sellgren, 2006; Pullum a kol., 2007b), jak je znázorněno na Obr. 31, a může vést k několika provozním (pracovním) bodům, o kterých je známo, že se vyskytují v praxi. Wilson a Sellgren (2006) také poznamenali, že Q-H charakteristika čerpadla může vykazovat velmi pomalý nárůst s rostoucím průtokem. V důsledku toho se Q-H charakteristika čerpadla a systémová křivka často protínají pod poměrně malým úhlem. Výsledkem je, že i malé snížení dopravní výšky může mít za následek neúměrně velké snížení průtoku. [28]



Obr. 31 Dopad nenevtonské kapaliny na Q-H charakteristiku hydrodynamického čerpadla

V současné době existují tři hlavní publikované metody pro přepočet výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla při čerpání neneutonských kapalin, mezi nimiž jsou i čistírenské kaly. Obecné stanovisko vyplývající z dostupných metod se vždy shoduje ve snížení Q-H charakteristiky, snížení celkové účinnosti a změny hydraulického výkonu čerpadla, z nichž žádná dosud nebyla přijata jako standard doplňující standard ANSI/HI (2015). [23] [28]

### 6.2.1 Metoda Walker and Goulas

Walker a Goulas (1984) navrhli predikci předpověď výkonových charakteristik čerpadel pro neneutonské kaly na základě HI diagramu (Obr. 29). Pro vysoké průtoky se plastická viskozita určuje při nejvyšší možné smykové rychlosti umístěním přímky do reogramu (pro danou látku) nad hodnotou smykové rychlosti (rychlostní gradient deformace kapaliny) při průtoku v oblasti 10% BEP. To bylo poté použito jako plastická viskozita v Binghamském plastickém modelu pro použití v HI metodě (1983) k predikci výkonových charakteristik čerpadla. Pro nízké průtoky je třeba určit zdánlivou viskozitu pro smykové rychlosti odpovídající  $2N$ , kde  $N$  je úhlová rychlost oběžného kola. Bylo tvrzeno, že při nízkých smykových rychlostech je zdánlivá viskozita nejcitlivější na vliv meze kluzu, která se zdála být dominantním faktorem při poklesu dopravní výšky. Pomocí suspenzí uhlí/voda a kaolin/voda a dvou různých čerpadel předpověděli většinu datových bodů s přesností  $\pm 5$  %. Jiné studie (Kabamba, 2006; Kalombo, 2013; Sery a Slatter, 2002, 2004) však nebyly schopny dosáhnout podobných výsledků a důvody tohoto nesouhlasu nejsou zřejmé. [28] [29]

Ačkoli to Walker a Goulas výslovně nezmiňují, obhájí se existence hraniční smykové rychlosti  $\dot{\gamma}_b$ . Slatter (2005) potvrdil, že hraniční smyková rychlost označuje hranici mezi mezí kluzu a plastickou viskozitou (dominující viskozitě). Výpočet plastické viskozity pro hodnoty smykové rychlosti  $10-1500 \text{ s}^{-1}$  však činí postup Walkera a Goulase jen odhadem, nebo v nejlepším případě postupem platným pouze tehdy, jsou-li k dispozici experimentální údaje, ale tato skutečnost je v rozporu s cílem předpovědět výkonové charakteristiky hydrodynamického čerpadla. Kromě toho je plastická viskozita v podstatě vhodným parametrem bez reologického významu. Není použitelný pro žádný jiný reologický model, než plastický Binghamský. [28] [29]

### 6.2.2 Metoda Sery a kol.

Autoři metody Sery a kol. považovali metody odhadu relevantní viskozity při nízkém nebo vysokém průtoku podle Walkera a Goulase za nejednoznačné. Místo toho jejich práce zahrnuje výpočet zdánlivé viskozity z průměrné smykové rychlosti v oblasti oběžného kola čerpadla stanovené metodou Metzner a Otto (1957). Tato metoda byla původně vyvinuta pro definování točivého momentu zprůměrované smykové rychlosti pro rotaci v oblasti míchadla v míchací nádobě jako  $k_s N$ , kde  $N$  je rychlost oběžného kola a  $k_s$  je třeba nalézt experimentálně. Hodnota  $k_s$  je funkcí konstrukce oběžného kola, ale ne vlastností kapaliny. Sery určil charakteristickou průměrnou smykovou rychlost oběžného kola čerpadla pomocí metody Metzner a Otto, aby vypočítal zdánlivou viskozitu na základě reologie kapaliny. To bylo poté použito s nomogramem HI k předpovědi snížení výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla. Byl použit model toku Herschel Bulkley, který je dán rovnicí (3.3). [28]

Pomocí modelových parametrů pro různé materiály byla použita definice zdánlivé viskozity s HI diagramy k předpovědi dopravní výšky a celkové účinnosti pro hydrodynamické čerpadlo. [28]

$$\mu_{app} = \frac{\tau_p}{k_s N} + K \cdot (k_s N)^{r-1} \quad (6.7)$$

Uvádí se, že pro čistírenské kaly je přiměřená hodnota  $k_s = 4$ . V testovacích pracích bylo použito hydrodynamické čerpadlo s oběžným kolem o 5 lopatkách (Warman 6/4). Oběžné kolo bylo kovové o průměru 365 mm. Čerpací testy byly prováděny za použití dvou objemových koncentrací kaolinové suspenze o 21 % a 17 % TS při rychlostech čerpadla 1100-1400 ot.min<sup>-1</sup>. Sací a výtlačný tlak čerpadla byl měřen pomocí bodových tlakových převodníků. Tlakový gradient v potrubí byl měřen diferenčními tlakovými přístroji a průtok pomocí magnetického průtokoměru. Mezi motorem a čerpadlem byla namontována měřicí jednotka, která vyhodnocuje otáčky a točivý moment, aby bylo možné určit výkon na hřídeli čerpacího soustrojí. [28]

Byla zkoumána predikce výkonových charakteristik hydrodynamického čerpadla (Warman 6/4) na základě HI diagramu. Testovací data byla porovnána s odhadovanými hodnotami z HI diagramu a předpokládá se, pokud jde o dopravní výšku, že modifikovaná Metznerova a Ottova metoda by mohla poskytnout výsledky s rozumnou přesností (méně než

5% chybovost). Avšak v oblasti 60 % až 120 % BEP a tam, kde jsou k dispozici potřebná data, byla chyba v předpokládané účinnosti údajně až 20 %. Bylo také pozorováno, že chybové rozpětí se snižuje, když se kapalina stává viskóznější. Pravděpodobným vysvětlením bylo, že vztah mezi průměrnou smykovou rychlostí v oblasti oběžného kola a otáček čerpadla platí pouze tehdy, když ve zkoumaném procesu dominují viskózní síly (laminární režim). Metznerova a Ottova metoda pro míchadla je platná pouze tehdy, když je Reynoldsovo číslo míchadla menší než 10 a proudění se tedy pohybuje v laminární oblasti. Požadavky na hydraulické parametry čerpadla by byly podhodnoceny, když převládá režim turbulentního proudění. To směřuje spíše na hodnotu kritického Reynoldsova čísla, které je možná potřeba definovat. [28] [27]

### 6.2.3 Metoda Pullum a kol.

Pullum a kol. (2007a, b; 2011) a Graham a kol. (2009) rozpoznali, že viskozita není konstantní, ale je funkcí místní smykové rychlosti v oblasti oběžného kola hydrodynamického čerpadla. Je definována reprezentativní smyková rychlost pro průtok čerpadlem, a tedy reprezentativní smykové napětí, které se pak odečítá z reogramu měřené látky. Autoři definovali ekvivalentní průměr hydraulického potrubí  $D_h$  (m) na základě rozměrů čerpadla. Metoda vyžaduje, aby byl určen charakteristický rozměr čerpadla  $w$  (m), který se mění pro konkrétní konstrukci čerpadla, a parametr  $D_h$  (m) se pak použil k určení rychlosti ekvivalentním hydraulickým potrubím. Reprezentativní smyková rychlost je pak odvozena jak z rychlosti v potrubí, tak z průměru dimenze potrubí a byla použita k získání reprezentativní smykové viskozity. To bylo použito s metodou HI, ale mohlo být použito ve standardu ANSI / HI (2015). Předpokládá se, že proudění průchodem rotoru (nazývané „ekvivalentní hydraulické potrubí“) je laminární. Hydraulický průměr „potrubí“  $D_h$  je definován následujícím vztahem:

$$D_h = \frac{4 \cdot w \cdot \pi \cdot D_{imp}}{2 \cdot (\pi \cdot D_{imp} + w)} \quad (6.8)$$

Parametr  $w$  (m) je šířka průchodu rotoru, ale je velmi nepravděpodobné, že by taková hodnota byla vhodná, protože ekvivalentní potrubí musí zohledňovat všechny průtoky v čerpadle, a proto by se tato hodnota dala předpokládat jako nepřesná, ačkoli to bylo definováno jako „šířka mezi kryty uzavřeného oběžného kola“. Rychlost v potrubí se pak vypočítá z:

$$v = \frac{4 \left( \frac{Q}{1000} \right)}{\pi \cdot D_h^2} \quad (6.9)$$

Pro laminární proudění v potrubí se skutečná smyková rychlost u stěny získá pomocí rovnice Rabinowitsch-Mooney:

$$\dot{\gamma} = \left[ \frac{1 + 3n'}{4n'} \right] \cdot \left[ \frac{8v}{D_h} \right] \quad (6.10)$$

To se používá k získání zdánlivé viskozity z reogramu dané látky pro použití s jednou ze tří metod přepočtu pro newtonovské kaly. Buratto a kol. (2017) ve své experimentální práci použili širokou škálu kapalin a bylo zjištěno, že parametr  $w$  se liší podle použité kapaliny od 3,1 % do 7,9 %  $D_{imp}$  u jednoho typu čerpadla a 3,5 % až 37,5 %  $D_{imp}$  pro druhé čerpadlo. Naznačují, že je to v rozporu s metodou publikovanou Pullumem a kol. (2007b), která používá stejnou hodnotu  $w$  pro dané čerpadlo s různými použitými kapalinami. Proto není možné správně předpovědět hodnotu  $w$  a použít ji pro novou aplikaci. Kalombo a kol. (2014) také poznamenali, že přístup Pullum a kol. nedokázal předpovědět účinnost čerpadla při čerpání 21% až 28% kaolinových suspenzí, takže zdánlivá viskozita použitá v tomto přístupu nemůže být pouze reprezentativní neneutonská viskozita pro použití v HI metodě. Předpověděla však dopravní výšku lépe než metoda Walker a Goulas (1984). [28]

#### 6.2.4 Metoda publikována ITT Water & Wastewater AB

V rámci této metody byla provedena řada systematických testů provozu hydrodynamického čerpadla za řízených podmínek. Pro tento účel bylo navrženo speciální zkušební zařízení. Testovací zařízení se skládalo z nádrže, čerpadla (NT 3127 HT) a průtokové smyčky z akrylových trubek (průměr potrubí 100 mm) s šoupátkem pro řízení průtoku. Laboratorní testy byly nastaveny tak, aby se získaly čerpací křivky pro kapaliny různé viskozity. Použití čistírenských kalů v laboratoři není praktické z několika důvodů, ale především proto, že kal je biologicky aktivní a tudíž nestabilní. Místo toho byla použita stabilní modelová kapalina pro umožnění opakovaných měření. Zkušební zařízení bylo také instalováno na dvou čistírnách. Z podrobné analýzy výsledků testů bylo zjištěno, že Q-H a příkonová charakteristika čerpadla Flygt typu „N“ používaného v kalových aplikacích by měla být změněna podle následujícího základního pravidla: „Dopravní výška je snížena a příkon je zvýšen úměrně k celkovému obsahu pevných částic v kalu.“ To lze vyjádřit matematicky jako:

$$H_{kal} = (1 - TS) \cdot H_{voda} \quad (6.11)$$

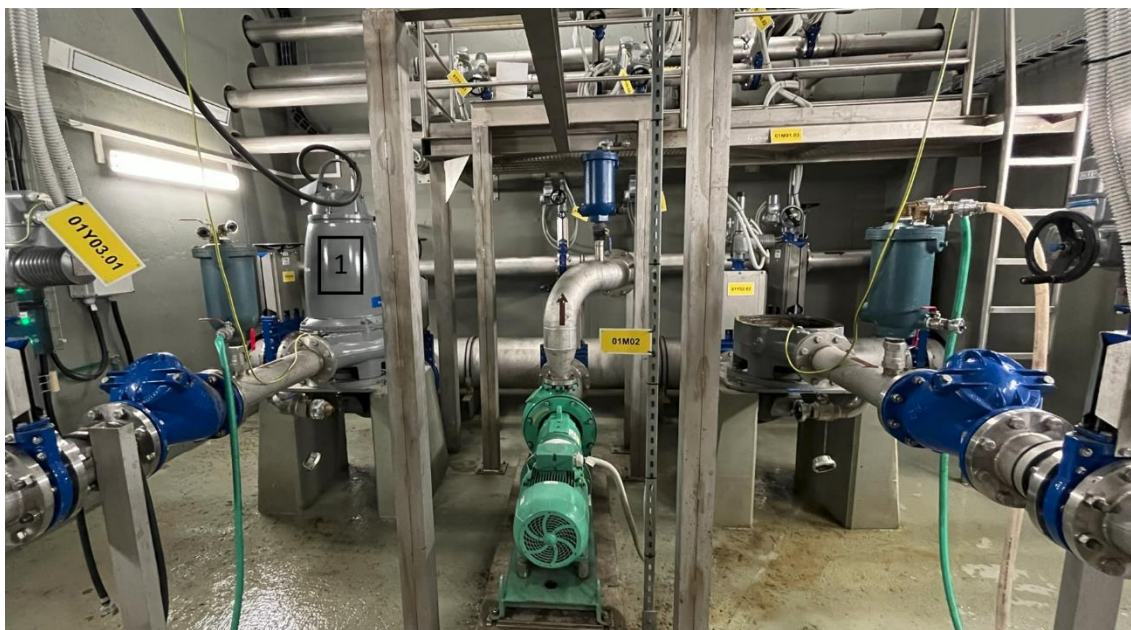
$$P_{kal} = (1 + TS) \cdot P_{voda} \quad (6.12)$$

kde TS je obsah pevných částic v kapalině, H dopravní výška a P příkon čerpadla. Dolní index *kal* a *voda* vyjadřují čerpaná média. Rovnice (6.11) a (6.12) platí pouze do obsahu  $TS \leq 8\%$ . [8]

Toto zdánlivě jednoduché pravidlo je pravděpodobně unikátní a bylo ověřeno pouze pro konkrétní typ hydrodynamických čerpadel doporučených společností Flygt pro použití v kalových aplikacích. Použití metody přepočtu pro jiné typy čerpadel nelze doporučit, dokud nebudou provedeny další ověřovací testy. Tato zjištění však nepřehodnocují metodu HI jako běžný nástroj pro stanovení křivek výkonu odstředivých čerpadel s viskózními kapalinami. Změny výkonových charakteristik podle tohoto pravidla vedou k menšímu snížení výkonu čerpadla, než když se snížení výkonu určuje podle metody HI. [8] [28]

## 7 Vlastní měření vybraných elektrických a hydraulických veličin na hydrodynamickém kalovém čerpadle

Experimentální měření bylo provedeno na ÚČOV Praha (Císařský ostrov) na trase nové mokré jímky (NMJ). Technologie čerpačích technik pro potrubní trasu NMJ je instalována v podzemní strojovně, která je osazena dvěma hydrodynamickými kalovými čerpadly značky Flygt a typu NT 3301.185 HT. Zmíněná čerpadla jsou zapojena do potrubního systému paralelně a provozují se ve střídavém režimu (vždy se provozuje pouze jedno čerpadlo, druhé čerpadlo v daný moment slouží jako záloha při výpadku čerpadla aktuálně pracujícího) tak, aby byl zajištěn pravidelný střídavý chod obou čerpadel.

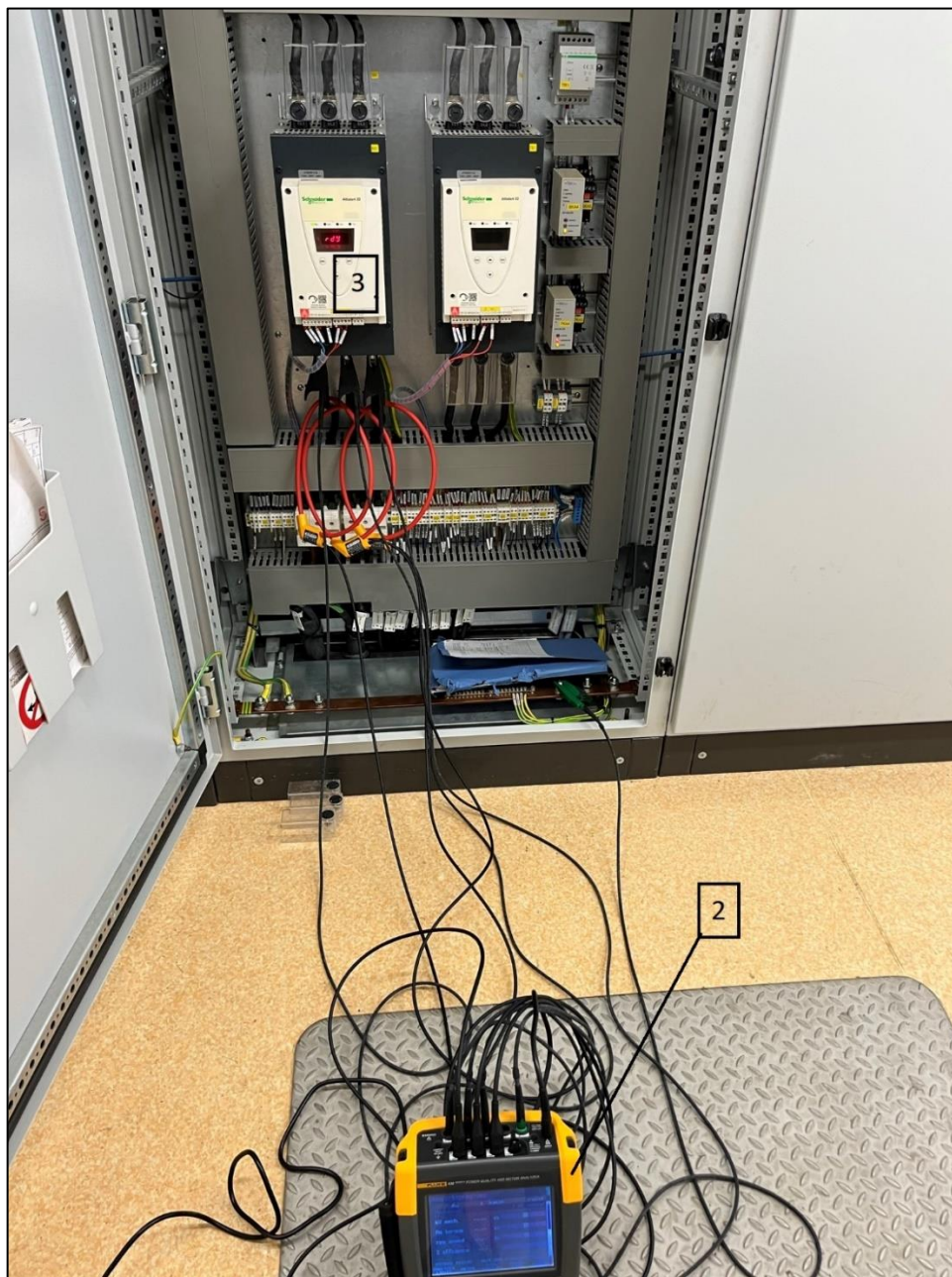


Obr. 32 Strojovna NMJ

Na Obr. 32 je pohled do strojovny NMJ, kde číslem 1 je zobrazeno čerpadlo využívané k experimentálnímu měření. U druhého čerpadla byla prováděna pravidelná údržba a lze si povšimnout pouze jeho hydraulické části.

Měření elektrických veličin hydrodynamického čerpadla bylo provedeno v hlavní rozvodné skříni, která byla umístěna v technickém kontejneru nacházejícím se na úrovni terénu nad strojovnou. Pro měření elektrických veličin hydrodynamického čerpadla byl použit přístroj Fluke 438-II, který je přímo určen pro analýzy elektromotorů. Daný přístroj pro měření

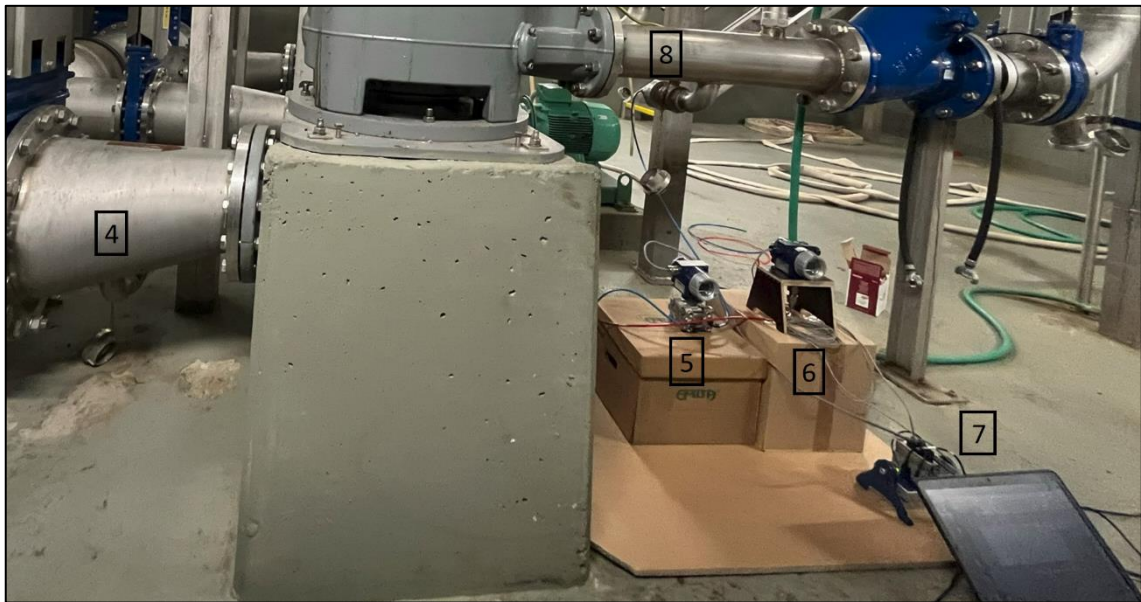
elektrických veličin byl odborně nainstalován obsluhou ÚČOV. Zapojení je uvedeno na Obr. 33.



Obr. 33 Zapojení přístroje pro měření elektrických veličin. Č. 2 označuje samotný přístroj (Fluke 438-II) a č. 3 instalovaný frekvenční měnič (FM), který slouží pro regulaci otáček instalovaného čerpadla.

Ve strojovně NMJ se provádělo měření diferenčního tlaku hydrodynamického kalového čerpadla. Zapotřebí byla instalace měřícího přístroje pro zaznamenávání tlaku. Pro instalaci tlakových čidel bylo využito již existujících návarků. Pro zjištění provozních bodů hydrodynamického čerpadla bylo nutné zjistit diferenční tlak, tedy rozdíl tlaků na výtlačku a sání čerpadla. Použité přístroje pro měření tlaku (snímač tlakové difference XMD) umožňovaly přímý kontinuální záznam diferenčního tlaku na čerpadle.





Obr. 34 Zapojení přístrojů pro měření diferenčního tlaku na čerpadle. Č. 4 je označen návarek na sání čerpadla, č. 5 označen diferenční snímač tlaku, č. 6 označen převodník absolutního tlaku, č. 7 hardwarová jednotka pro vyhodnocení měření tlaku a s ní propojený notebook s vyhodnocovacím softwarem, č. 8 označuje návarek na výtlačku čerpadla.

Měření průtoku čerpaného média probíhalo na sacím potrubí měřeného hydrodynamického čerpadla. Elektromagnetický průtokoměr (Promag 50W2H) je součástí technologie ÚČOV a slouží pro záznam dat z provozu a zároveň poskytuje aktuální kontrolu průtoku čerpaného média technologií.

Celé experimentální měření bylo prováděno za standardního nepřerušného provozu ÚČOV. Dodatečné technické úpravy zařízení ÚČOV pro vlastní měření nebylo potřeba realizovat, pro měření byla využita stávající přípojné místa (návarky pro zapojení tlakových snímačů), či měřicí přístroje (elektromagnetický průtokoměr). Zaznamenávány byly celé čerpací cykly. Jeden čerpací cyklus trval přibližně 15 minut a spočíval v přečerpávání primárního kalu (gravitačně zahuštěného) z usazovací nádrže do jednotlivých vyhnívacích nádrží. Zprvu se čerpá primární kal do první vyhnívací nádrže, jakmile je vyčerpán objemový limit přečerpávaného primárního kalu, tak se výtlačné potrubí do první nádrže začne uzavírat a současně se otevírá výtlačné potrubí do druhé vyhnívací nádrže. Tento algoritmus čerpání se opakuje do doby, kdy všech pět vyhnívacích nádrží splní přečerpávaný objemový limit primárního kalu. Poté čerpací cyklus končí a znovu začíná každou hodinu tzn. že čerpadlo operuje přibližně 15 minut a 45 minut je v rámci každé hodiny vypnuto (mimo provoz). Výsledné grafické znázornění naměřených hodnot popisující výkonové charakteristiky hydrodynamického čerpadla byly zaznamenány pro 4 ustálené stavy čerpání, kde ustálený stav čerpání znamená

doba, kdy měřené čerpadlo čerpá primární kal do plně otevřeného výtlačku jedné z nádrží. Snahou bylo eliminovat naměřené hodnoty při přechodových stavech čerpání v časový úsek, kdy se za provozu měnilo výtlačné potrubí do jednotlivých vyhnívacích nádrží. V den experimentálního měření (9. 8. 2022) probíhala údržba první vyhnívací nádrže, proto byly zaznamenány pouze 4 ustálené stavy. Pro vyhodnocení výkonových charakteristik měřeného hydrodynamického čerpadla byla zaznamenávána veškerá data z měřících přístrojů zmíněných výše v intervalech ukládání měřených dat 1 s.

Pro stanovení predikce výkonových charakteristik experimentálně testovaného hydrodynamického čerpadla při čerpání gravitačně zahuštěného primárního kalu byla v lokální laboratoři ÚČOV provedena měření koncentrace pevných částic v primárním kalu, která byla vyhodnocena na 5,2 % (TS = 5,2 %). Zároveň bylo provedeno měření hustoty primárního kalu v odměrném válci o objemu 1 l. Hustota primárního kalu po zvážení na kalibrované váze v lokální laboratoři ÚČOV byla stanovena na  $980 \text{ kg.m}^3$ . Na Obr. 35 je zobrazen zmíněný odměrný válec, jehož obsahem je primární kal. Obr. 36 představuje pohled na primární kal.



Obr. 35 Primární kal použitý pro vyhodnocení hustoty (měrné hmotnosti).



*Obr. 36 Pohled na zkoumaný primární kal podléhající experimentálnímu měření.*

Naměřená data průtoku a elektrických veličin hydrodynamického čerpadla bylo možno použít ihned ke zpracování pro vyhodnocení výkonových charakteristik daného čerpadla. Menší komplikace nastala u měření diferenčního tlaku, kdy na Obr. 34 lze zpozorovat jiný rozměr potrubí v místech měření tlaku na sání a na výtlaku. Tato skutečnost způsobuje nepřesnost měření diferenčního tlaku a musí být kompenzována. Důsledkem většího průměru potrubí v místech měření na sání, oproti rozměru potrubí na výtlaku, je pokles diferenčního tlaku změřeného na hydrodynamickém čerpadle. Pro dostatečnou kompenzaci této komplikace je nutné stanovit vzniklý tlakový rozdíl, v podobě rychlostní výšky, v místech měření tlaku na sání a přičíst tuto hodnotu k změřenému diferenčnímu tlaku. Výtlačné potrubí disponuje průměrem potrubí ve světlosti DN150 a na tomto průměru je také umístěn tlakový snímač. Poloha tlakového snímače na sání je v polovině délky (ve směru proudění) redukční armatury, která redukuje průměr potrubí z DN250 na DN200. Při znalosti průtoku a průměru potrubí na vstupu a výstupu z redukční armatury lze spočítat střední rychlost proudění v redukční armatuře pomocí kvadratického průměru.

Pro určení rychlostní výšky (způsobené rozdílným průměrem dimenze potrubí na sání a výtlačku v místech tlakového měření) lze použít následující vztah (7.1):

$$H_{rv} = \left( \frac{v_{\text{výtlačk}}^2 + v_{\text{sání}}^2}{2 \cdot g} \right) \quad (7.1)$$

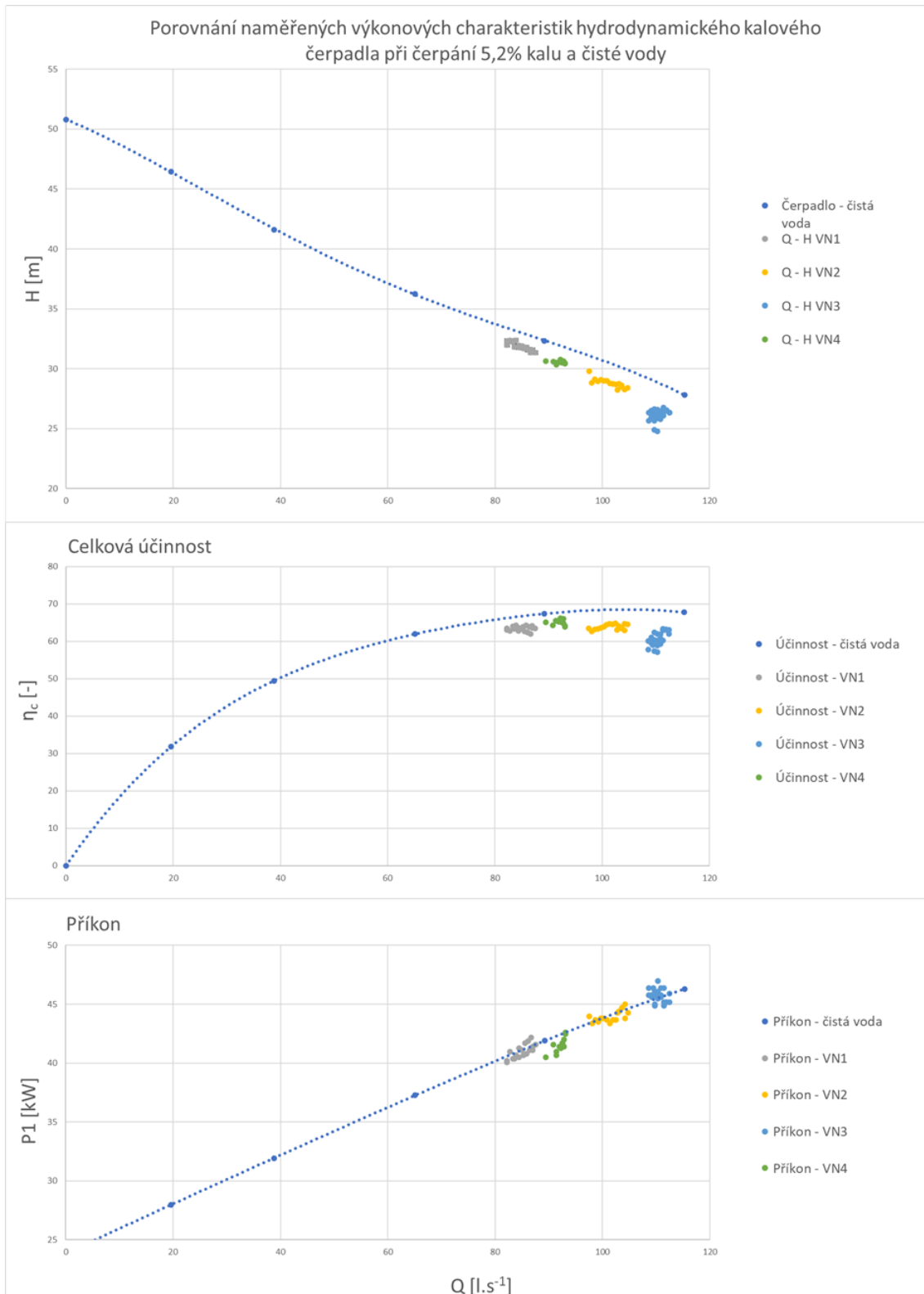
kde  $H_{rv}$  představuje rychlostní výšku v (m),  $v$  značí rychlost v potrubí (podle příslušné spodní indexace),  $g$  označuje gravitační zrychlení. Výslednou hodnotu je nutné přičíst ke každé příslušné hodnotě naměřené diferenční výšky (v závislosti na příslušném průtoku) na hydrodynamickém čerpadle.

Z Obr. 34 je také patrné, že je potřeba uvažovat rozdíl statické výšky v odběru tlaků na sání a na výtlačku. Daný rozdíl ve statické výšce představuje hodnotu  $H_{stat} = 0,41$  m, kterou je také potřeba přičíst k naměřenému diferenčnímu tlaku (nezávisle na průtoku, jelikož se jedná o statickou neměnnou složku).

Po nezbytné korekci naměřených tlakových hodnot bylo již možné určit výkonové charakteristiky testovaného hydrodynamického čerpadla. Od výrobce testovaného čerpadla byla poskytnuta reálná data, resp. výkonové charakteristiky daného čerpadla při čerpání čisté vody. Tyto data byla naměřena ve zkušebně k tomu určené těsně před tím, než bylo čerpadlo dopraveno na místo jeho instalace, tzn., že experimentálně naměřená data mohou být porovnána s parametry čerpadla při čerpání čisté vody. Zmíněné porovnání je graficky znázorněno na Obr. 37. V Tabulka 1 jsou uvedené údaje o nepřesnostech při měření elektrických a hydraulických měření. Použité měřicí přístroje při realizaci experimentálního měření podléhaly platné kalibraci.

*Tabulka 1 Zobrazení nepřesností měřících přístrojů při měření daných veličin*

Typ zařízení	měřené veličiny	přesnost přístroje
Fluke 438-II	P1 - příkon [kW]	±3 %
Snímač tlakové difference XMD	$\Delta p$ - tlaková difference [Pa]	±0,1 %
Promag 50W2H	Q - průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]	±0,5 %



Obr. 37 Porovnání experimentálně naměřených výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% kalu a čisté vody.

## 8 Porovnání naměřených výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla s parametry přepočtenými podle metody publikované ITT Water & Wastewater AB

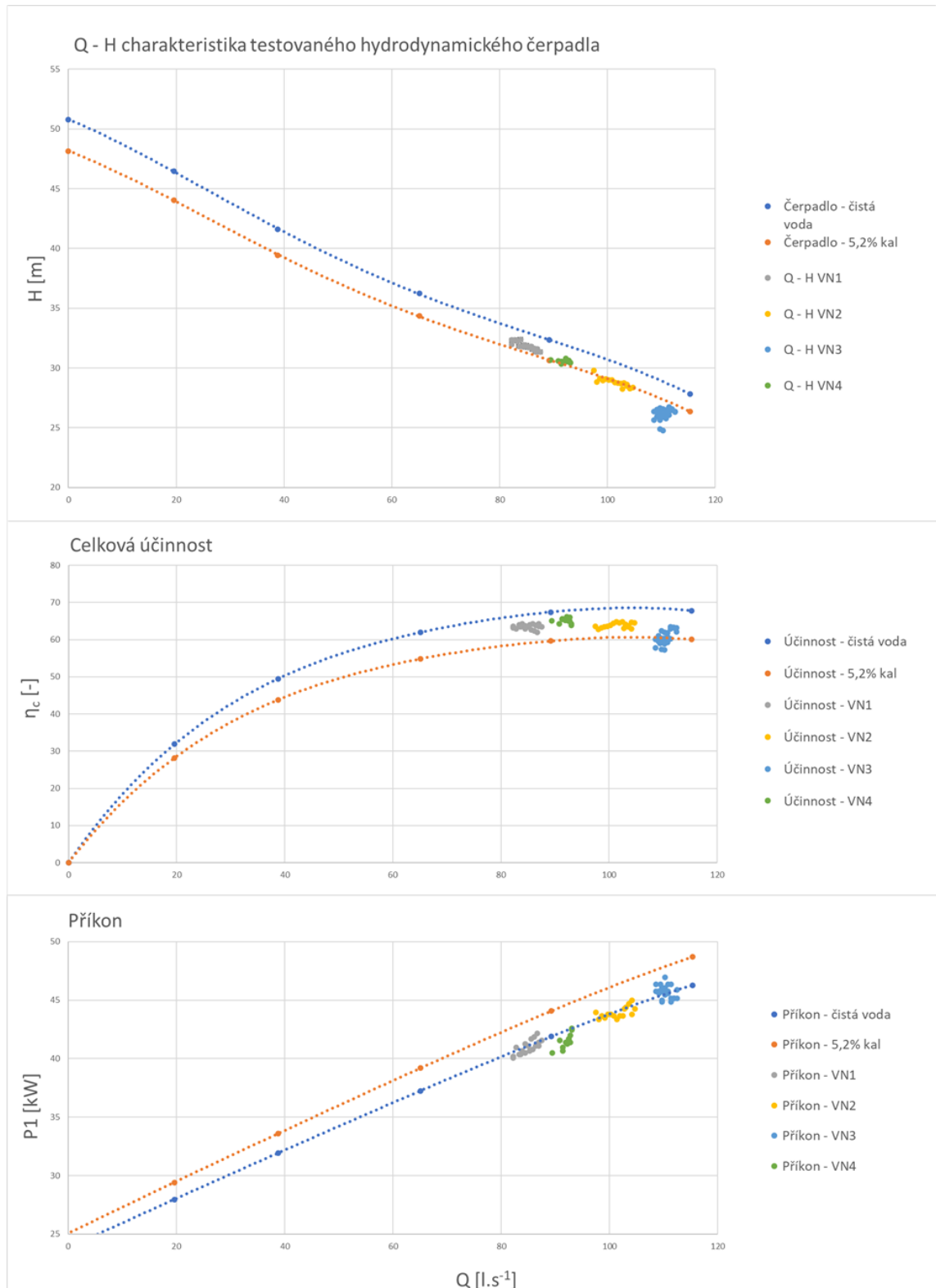
Pro porovnání výkonových parametrů měřeného hydrodynamického čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu s výkonovými charakteristikami predikovanými dle metody ITT Water & Wastewater AB je nutné přepočítat obdržená data ze zkušebních testů daného čerpadla při čerpání čisté vody podle vztahů (6.11) a (6.12). Výsledné porovnání je zobrazeno na Obr. 38.

Predikce dle výše zmíněné metody představuje pokles Q-H charakteristiky, pokles charakteristiky celkové účinnosti čerpacího zařízení a zároveň navýšení celkového příkonu čerpadla v závislosti na obsahu pevných částic v čerpaném médiu. V případě experimentálního měření se jedná o hmotnostní koncentraci 5,2 %.

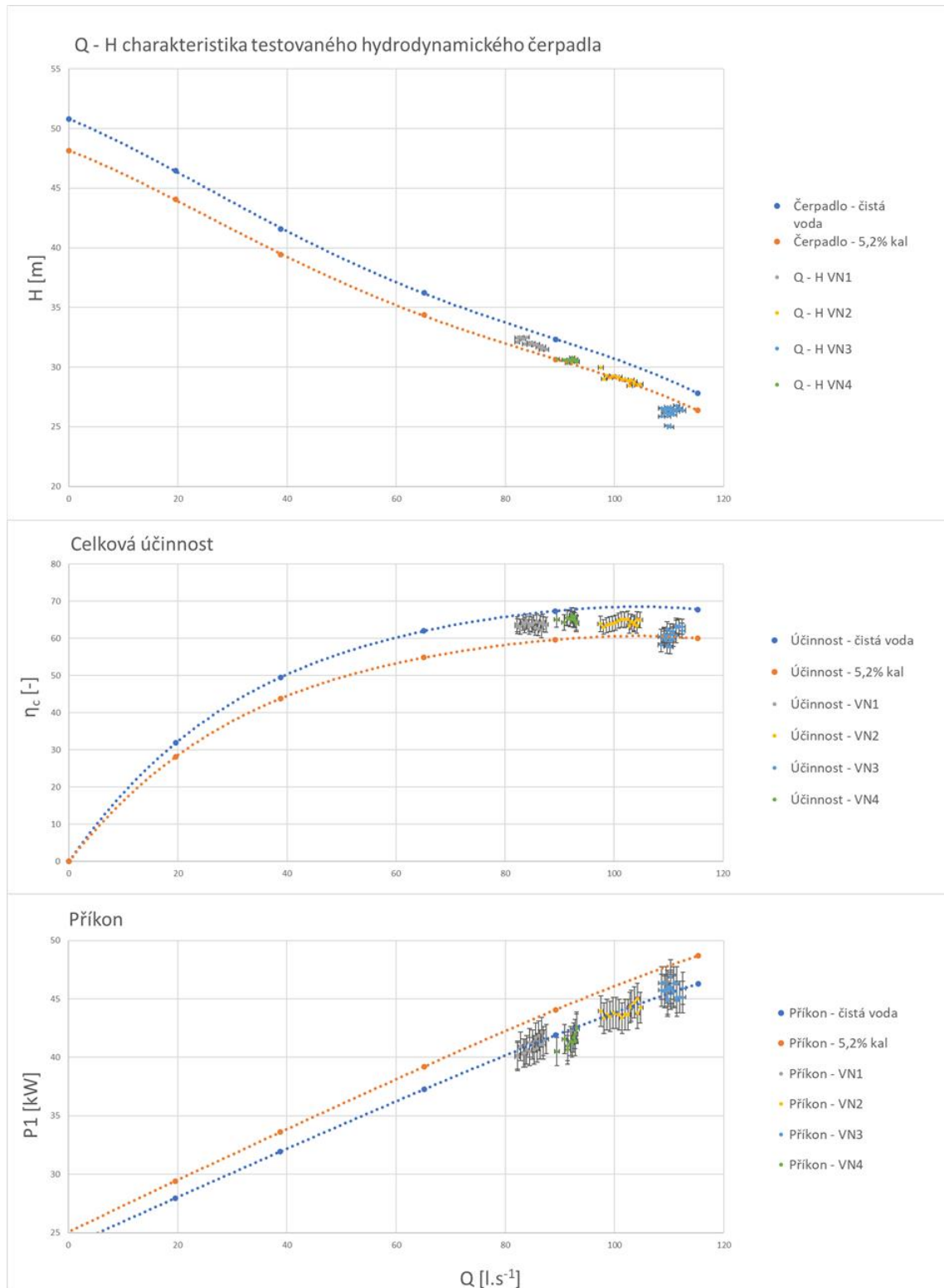
Z grafické závislosti (zobrazené na Obr. 38) je patrný pokles dopravní výšky testovaného čerpadla při shodném průtoku. Q-H charakteristika testovaného čerpadla predikovaná dle vztahů (6.11) a (6.12) se shoduje s naměřenými Q-H parametry v případě čerpání do vyhnívacích nádrží (VN) 1 a 2. V případě VN1 zde není zaznamenán takový pokles v dopravní výšce jako v případě predikované Q-H charakteristiky. Naměřená data naopak v případě čerpání do VN3 ukazují vyšší diferenci v dopravní výšce oproti predikovanému stavu.

Celkové účinnosti v naměřených bodech testovaného čerpadla také zaznamenaly pokles oproti čerpání čisté vody, ale ve srovnání s predikovanou charakteristikou celkové účinnosti při čerpání 5,2% kalu nebyl pokles tak signifikantní kromě zaznamenaných hodnot při čerpání do VN3.

Příkon testovaného hydrodynamického čerpadla při čerpání 5,2% kalu se příliš neměnil od příkonu při čerpání čisté vody, v případě VN4 byl zaznamenán příkon dokonce nižší, tedy zasahoval pod příkonovou charakteristiku při čerpání čisté vody. Lehké zvýšení příkonu zkoumaného čerpadla při čerpání 5,2% kalu bylo opět při vyšších rychlostech tedy při čerpání do VN3.



Obr. 38 Porovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu a čisté vody s experimentálně naměřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% primárního kalu



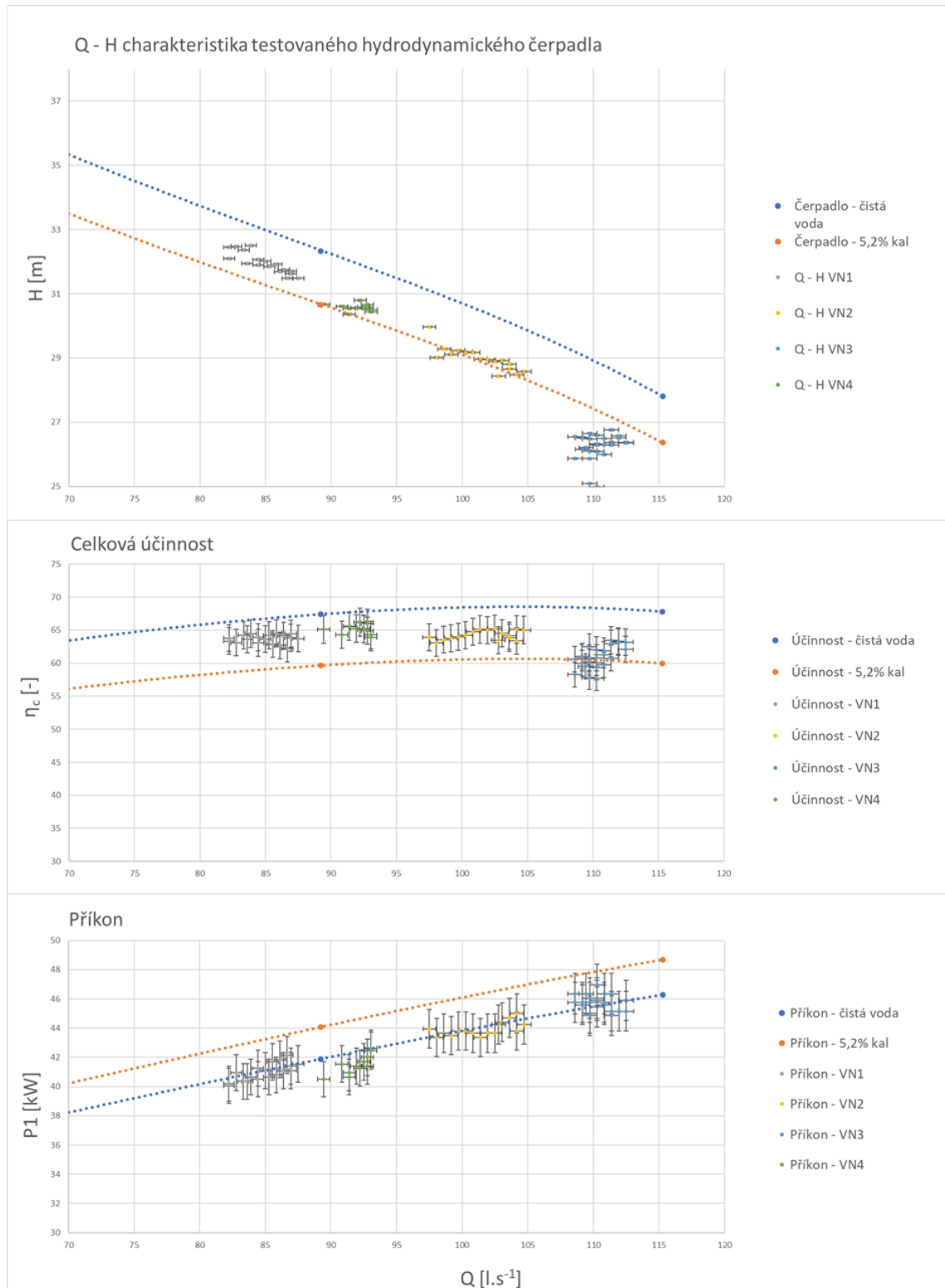
Obr. 39 Porovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu a čisté vody s experimentálně naměřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% primárního kalu s vyznačenými chybovými úsečkami znázorňující nepřesnost měřících přístrojů.



## 9 Posouzení vlivu kalu na stěžejní parametry hydrodynamického kalového čerpadla

Z výsledků realizovaného experimentálního měření viditelných na Obr. 38 je patrné, že zkoumaný primární kal o objemové koncentraci 5,2 % pevných částic má nezanedbatelný vliv na výkonové charakteristiky hydrodynamického kalového čerpadla, zejm. na Q-H charakteristiku a charakteristiku celkové účinnosti. Příkonová charakteristika dle experimentálních výsledků se příliš nemění od charakteristiky při čerpání čisté vody. Provedený přepočet výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání čistírenských kalů podle metody publikované ITT Water & Wastewater AB uvádí, že při čerpání čistírenských kalů o nenulové hodnotě objemové koncentrace pevných částic ( $TS > 0$ ) se úměrně zvyšuje příkon hydrodynamického čerpacího zařízení.

Při čerpání primárního kalu o objemové koncentraci pevných částic 5,2 % je zřejmě, že se jedná o čerpání neneutonské kapaliny, kdy se mění zdánlivá viskozita v závislosti na rychlostním gradientu deformace kapaliny, tedy záleží na rychlosti proudění primárního kalu v potrubí. Lze předpokládat, že při rychlostech proudění (3–6)  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  se jedná o vyvinuté turbulentní proudění, kdy se začíná závažně projevat vlastnost zvyšující se zdánlivé viskozity neneutonské kapaliny a zároveň masivní křížení trajektorií částic čerpaného média (relevantní spíše pro systémovou charakteristiku). Ovšem v prostorech hydraulické části čerpadla (spirální skříň) nabývá gradient rychlosti deformace kapaliny o řád vyšší hodnoty, než se vyskytují v potrubí při shodném hydraulickém systému a provozním bodu hydrodynamického čerpadla.



Obr. 40 Detailnější záběr porovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu a čisté vody s experimentálně naměřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% primárního kalu s vyznačenými chybovými úsečkami znázorňující nepřesnost měřících přístrojů.

## 10 Závěr

Literární rešerše zprvu řeší problematiku vzniku a přeměny čistírenského kalu během veškerých fází čištění OV za účelem poznání reologických vlastností kalu, na kterou navazuje matematické popsání reologických modelů kalů vyskytujících se v technologiích ČOV a jejich následná typizace. Dalším bodem byl objasněn hydraulický systém se záměrem definovat charakteristiku hydrodynamického čerpadla, systémovou charakteristiku a provozní bod čerpadla při čerpání čistírenských kalů. Následně navazovalo rozdělení a aplikace jednotlivých typů čerpadel vyskytujících se v technologiích ČOV. V posledním bodě teoretické části byly představeny metody umožňující přepočet výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla z čisté vody na parametry při čerpání čistírenských kalů.

Praktická část této práce obsahuje realizaci experimentálního měření výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% čistírenského kalu v reálném provozu na ÚČOV v Praze v Dejvicích. Naměřená experimentální data byla vyhodnocena a porovnána s výkonovými charakteristikami testovaného čerpadla při čerpání čisté vody (data byla poskytnuta výrobcem čerpadla při testovacích zkouškách) a výkonovými charakteristikami predikovanými metodou publikovanou ITT Water & Wastewater AB (charakterizována rovnicemi (6.11) a (6.12)). Použitá metoda pro přepočet výkonových parametrů hydrodynamického kalového čerpadla platí pro čistírenské kaly dosahující objemové koncentrace  $TS \leq 8 \%$ .

Na Obr. 40 je znázorněno porovnání výkonových charakteristik experimentálně testovaného hydrodynamického kalového čerpadla NT 3301.185 HT 458 při čerpání čisté vody s výkonovými charakteristikami predikovanými dle metody publikované ITT Water & Wastewater AB při čerpání 5,2% kalu a experimentálně změřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% kalu. Z grafu lze konstatovat, že při zvoleném průtoku  $Q$  ( $l \cdot s^{-1}$ ) dochází k poklesu dopravní výšky čerpadla  $H$  (m) a poklesu celkové účinnosti  $\eta_c$  (-). Příkonová charakteristika testovaného čerpadla dle použité metody přepočtu má být ovlivněna objemovou koncentrací sušiny v kalu vzrůstajícím trendem (hodnotou  $TS$ ). Výsledky experimentálního měření ukazují, že naměřené příkonové hodnoty mají podobný průběh jako v případě čerpání čisté vody. Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že přístroj pro měření elektrických veličin mohl být ovlivněn instalovaným frekvenčním měničem i přes to, že není používán k regulaci otáček čerpadla. Dalším vysvětlením může být nedostatečně vysoká hodnota objemové koncentrace sušiny v čistírenském kalu pro experimentálně testované

čerpadlo tzn., že je zapotřebí vyšších objemových koncentrací, aby se tento jev projevil. Pokles celkové účinnosti při čerpání 5,2% čistírenského kalu není tak vlivný, jako tomu je podle predikované charakteristice celkové účinnosti. Tento fakt lze odůvodnit nevzrůstajícím příkonem čerpadla při daném průtočném množství. Pokles naměřených Q-H parametrů lze shledat jako uspokojivý, kromě případů čerpání do vyhnívací nádrže 1 (VN1), kdy není pokles v dopravní výšce tak značný v porovnání s přepočtovou metodou. Naopak při čerpání do VN3 je pokles v dopravní výšce dokonce vyšší, než je tomu u zvolené metody. Vysvětlením tohoto poklesu v dopravní výšce testovaného čerpadla může být dáno projevením se čerpání nenewtonské kapaliny při vyšších průtocích, kde stěžejním fyzikálním parametrem je zdánlivá viskozita měnící se v závislosti na gradientu rychlosti deformace čerpaného média.

Jsem obeznámen s postupem pro správné provedení experimentálního měření na hydrodynamickém čerpadle dle příslušné normy. I přes skutečnost, že byly všechny použité přístroje pro experimentální měření kalibrované, tak si uvědomuji, že nepřesnosti vzniklé během experimentálního měření mohly mít mnohem zásadnější dopad na naměřená data, než právě chyby způsobené nepřesností samotného přístroje. Měření mohla nejvíce ovlivnit absence dostatečné uklidňovací délky potrubí při měření tlaku, vzdálená instalace průtokoměru a tím vzniklé časové prodlevy mezi tlakoměrem a reakcí průtoku. Odlišené měřicí podmínky při testování čerpadla výrobcem při čerpání čisté vody. Instalace tlakových sond měla být umístěna přímo na potrubí o stejných průměrech. Bohužel nebyla přípustná možnost jakékoliv dodatečné úpravy, jelikož se jednalo o majetek Pražských vodovodů a kanalizací, a. s., a zároveň by tím mohl být ohrožen stávající provoz ÚČOV.

Jsem přesvědčen, že uvedená metoda přepočtu relevantních výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání čistírenských kalů publikovaná ITT Water & Wastewater AB a k tomu provedené experimentální měření na ÚČOV v Praze dokazuje opodstatněnou skutečnost, že je velmi důležité při navrhování čerpací techniky do konkrétních projektů nezanedbat vliv čerpaného média na hydrodynamické čerpadlo.

Cíl práce považuji za splněný a samotnou diplomovou práci hodnotím z vědeckého hlediska jako přínosnou. Svou prací jsem chtěl přispět k dalšímu důležitému posunu v oblasti systému čištění OV.

## Seznam použité literatury

1. *Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů* [online]. 2001 [cit. 2022-Prosince]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
2. JENIČEK, P. *Původ a vlastnosti čistírenských kalů* [Prezentace]. Praha: Asociace pro vodu ČR z.s. 2019.
3. Problematika kalového hospodářství. *Vodní hospodářství* [online]. 2017 [cit. 2020-Červenec-02]. Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/problematika-kaloveho-hospodarstvi/>
4. HOLOUBEK, I. a HORSÁK, Z. In: *C6890 Technologie ochrany prostředí* [online]. [cit. 2022-Říjen]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/sci/podzim2012/C6890/um/05\\_Technologie\\_ochrany\\_prostredi\\_Uprava\\_a\\_cisteni\\_vod\\_z\\_mest\\_a\\_obci.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/podzim2012/C6890/um/05_Technologie_ochrany_prostredi_Uprava_a_cisteni_vod_z_mest_a_obci.pdf)
5. LYČKOVÁ, B. a FEČKO, P. Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů. In: *Zpracování kalů* [online]. [cit. 2022-Říjen]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/stabilizace.html>
6. PODOLKA, J. In: *Čistírny odpadních vod: zpracování kalu* [online]. 2017 [cit. 2022-Říjen]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73879/F2-BP-2018-Podolka-Jan-Bakalarska-prace-JP-final.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
7. HAVLÍK, A. Hydraulika ČVUT FSv. In: *Čištění odpadních vod* [online]. 24. 5. 2007 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke\\_stazeni/Cistení\\_odpadnich\\_vod.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Cistení_odpadnich_vod.pdf)
8. FAHLGREN, M. *Handbook of Sludge Pumping*. Sundbyberg: ITT & Wastewater AB, 2011. ISBN 978-91-633-8686-2.
9. SEYSSIECQ, I. FERRASSE, J.H. a ROCHE, N. In: *State-of-the-art: rheological characterisation* [online]. 21. Leden. 2003 [cit. 2022-Listopad]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X03000214>
10. HOLM, R. In: *Rheological characterization of centrifuged thickened waste excess activated sludge (EAS): the ...* [online]. 5. Červen. 2008 [cit. 2022]. Dostupné z: [https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf/er/rapporter/avlopp/avloppsrening/itt\\_holm\\_9.pdf](https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf/er/rapporter/avlopp/avloppsrening/itt_holm_9.pdf)
11. MATOUŠEK, V. *Základní pojmy a definice v proudění a čerpání směsí* [Prezentace]. Praha: ČVUT Fakulta Stavební, 2019.
12. MATOUŠEK, V. *Čerpání newtonských směsí: provozní bod a vliv směsi na charakteristiky odstředivého čerpadla* [Prezentace]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2019.
13. The Importance of Newtonian and Non-Newtonian Fluid Dynamics in Processing. In: *csidesigns.com* [online]. 24. Květen. 2022 [cit. 2022-Listopad]. Dostupné z: <https://>

- [www.csidesigns.com/blog/articles/newtonian-and-non-newtonian-fluids](http://www.csidesigns.com/blog/articles/newtonian-and-non-newtonian-fluids)
14. Yield Stress Calculation Methods. In: *azom.com* [online]. 2013. Dostupné také z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9929>
  15. In: *Investigation of activated sludge pumping through a case study* [online]. 15. Květen. 2020 [cit. 2022-Listopad]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/345319188\\_Investigation\\_of\\_activated\\_sludge\\_pumping\\_through\\_a\\_case\\_study](https://www.researchgate.net/publication/345319188_Investigation_of_activated_sludge_pumping_through_a_case_study)
  16. FADRŇÝ, T. *Čerpání kalu v technologii ČOV*. Brno: 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42169](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42169)
  17. ANDERLI, V. C. SPERLING, M. a FERNANDES, F. *Biological Wastewater Treatment Series VOLUME SIX Sludge Treatment and Disposal*. Londýn: IWA Publishing, 2007. ISBN 13:9781843391661.
  18. BLÁHA, J. a BRADA, K. *Příručka čerpací techniky*.. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01626-9.
  19. BRADA, K. a HLAVÍNEK, P. *Čerpadla ve vodním hospodářství*.. Brno: Vydavatelství NOEL, 2004. ISBN 80-86020-43-6.
  20. MELICHAR, J. *Úvod do čerpací techniky*.. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05056-9.
  21. MELICHAR, J. a BLÁHA, J. *Problematika soudobé čerpací techniky*.. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03719-5.
  22. MELICHAR, J. *Problematika čerpání suspenzí* [Prezentace]. Praha: ČVUT v Praze, 2016.
  23. ČSN EN ISO, 9. *Hydrodynamická čerpadla - Přejímací zkoušky hydraulických výkonových paramterů - Stupně přesnosti 1 ...* [Česká technická norma].. Praha: Český normalizační institut, 2000. 64 s. Třídící znak 11 0033.
  24. *e-cerpadla.cz* [online]. [cit. 2022-prosinec-11]. Dostupné z: <https://www.e-cerpadla.cz/ponorne-cerpadlo-alfapumpy-35sem212-230-v-kabel-20-m-d-8961.html>
  25. FROST, R. C. *How to design sewage sludge pumping systems* [Technical Report TR 185]. Medmenham: Water Research Centre, 1983.
  26. VIHOLAINEN, J. In: *ENERGY-EFFICIENT CONTROL STRATEGIES FOR VARIABLE SPEED DRIVEN PARALLEL PUMPING SYSTEMS BASED ON ...* [online]. 14. Březen. 2014 [cit. 2022-Listopad]. Dostupné z: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/95540/isbn9789522655516.pdf?sequence=2>
  27. WENNBORG, T. SELGRAN, A. a WHITLOCK, L. *PREDICTING THE PERFORMANCE OF CENTRIFUGAL PUMPS WHEN* [online]. Saint Petersburg: 14th International Conference on Transport & Sedimentation of Solids particles, 25. Červen. 2008 [cit. 2022-Listopad].

28. HEYWOOD, N. a SLATTER, P. DERATION OF CENTRIFUGAL PUMPS FOR NON-NEWTONIAN [Dokument]. Cape Town: 2019.
29. WALKER, C. I. a GOULAS, A. *Performance characteristics of centrifugal pumps when handling non-Newtonian homogeneous slurries*. Bedford: Cranfield Institute of Technology, 1984.

## Seznam obrázků

Obr. 1 a) Závislost smykového napětí na rychlosti deformace dané tekutiny pro vybrané reologické modely, b) Závislost zdánlivé viskozity na rychlosti deformace dané tekutiny pro vybrané reologické modely [8] .....	19
Obr. 2 Schematické zobrazení křivek matematických reologických modelů popisující závislost smykového napětí na rychlostním gradientu deformace kapaliny [11] .....	20
Obr. 3 Grafické znázornění závislosti zdánlivé viskozity na rychlostním gradientu pro typický rozsah využití [12] .....	21
Obr. 4 Herschel-Bulkleyho model znázorněn v závislosti smykového napětí na rychlostním gradientu deformace kapaliny. a) Ideálně plastický b) Skutečně plastický [13] .....	22
Obr. 5 Příklad teplotní závislosti dynamické viskozity pro případ cukrového sirupu. [8] .....	23
Obr. 6 Schematické znázornění základní struktury čištění OV. Překlad: Mechanical treatment (mechanické předčištění), Biological treatment (biologické čištění), Chemical treatment (chemické čištění), Screen (síto), Grit chamber (rozměňovací komora), Primary sedimentation (primární sedimentace), Activated sludge (aktivovaný kal), Bio sludge (biologický kal), Return sludge (vratný kal), Post-precipitation (předsrážení), Chemical sludge (chemický kal), Preliminary treatment (předúprava), Screening (deponace částic sítím), Grit removal (odebrání rozmělněných pevných částí), Primary treatment (primární čištění), Sedimentation (sedimentace), Secondary treatment (sekundární čištění), BOD – biological oxygen demand (organická hmota jako potrava pro bakterie), BOD removal sludge (vyjmutí BOD), Tertiary treatment (terciální čištění), N – removal (vyjmutí dusíku), P – removal (vyjmutí fosforu), Primary sludge (primární kal), Waste/surplus activated sludge (odpadní aktivovaný kal), Chemical sludge (chemický kal) [8] .....	24
Obr. 7 Grafické znázornění vázání vody na částice kalu [8] .....	27
Obr. 8 Vliv režimu proudění na průběh charakteristiky potrubí [20] .....	32
Obr. 9 Charakteristika potrubí [19] .....	33
Obr. 10 Graficky znázorněný rozdíl systémové charakteristiky potrubí při čerpání vody (modrá křivka) a 5 % kalu (červená křivka). [8] .....	34
Obr. 11 Změna charakteristiky hydrodynamického čerpadla při čerpání neneutonských kapalin, kde P představuje příkon onoho čerpadla, H dopravní výška čerpadla, $\eta$ celková účinnost čerpadla. [11] .....	36
Obr. 12 Dovolovaný a doporučený pracovní rozsah hydrodynamického čerpadla. Vysvětlení a překlad zkratk: BEP – best efficiency point (bod s nejvyšší účinností); AOR – allowable operating region (dovolovaný pracovní rozsah); POR – preferred operating region (doporučený pracovní rozsah) [23] .....	38
Obr. 13 Znázornění možného provozního bodu hydrodynamického čerpadla při čerpání 8% kalu ve srovnání s čerpáním čisté vody .....	39
Obr. 14 Typické rozdělení kalového hospodářství na tři hlavní kategorie [8] .....	41
Obr. 15 Hydrodynamické čerpadlo s nezapuštěným oběžným kolem [8] .....	43
Obr. 16 Hydrodynamické čerpadlo se zapuštěným vířivým kolem [8] .....	45
Obr. 17 Pohled na typický typ čerpadla s kanálovým oběžným kolem. Samotné oběžné kolo tvoří jeden nebo více seřazených kanálů, kterými musí procházet čerpaná kapalina. [8] .....	45
Obr. 18 Hydrodynamické čerpadlo s řezacím oběžným kolem a příslušným protikusem k oběžnému kolu. [8] .....	46
Obr. 19 Čerpadlo se šroubovým oběžným kolem. [8] .....	47
Obr. 20 Hydrodynamické čerpadlo s oběžným kolem typu „N“ .....	49



Obr. 21 Samonasávací čerpadlo (vyznačení komor). [8].....	51
Obr. 22 Samonasávací čerpadlo (režimy plnění a čerpání). [8] .....	52
Obr. 23 Pístové čerpadlo při (vlevo) sacím a (vpravo) výtlačném zdvihu [8].....	53
Obr. 24 Princip fungování membránového čerpadla. [8] .....	54
Obr. 25 Zubové čerpadlo s vnějším ozubením [8] .....	56
Obr. 26 Lobe rotorové čerpadlo [8] .....	57
Obr. 27 Hydrostatické čerpadlo s posuvnými (kluznými) lopatkami (lamelami) [8].....	59
Obr. 28 Hydrostatické peristaltické čerpadlo [8] .....	60
Obr. 29 HI diagram pro přepočítání Q – H charakteristiky hydrodynamického čerpadla pro newtonské látky. [26].....	63
Obr. 30 Upravený HI diagram. [26].....	64
Obr. 31 Dopad nelineární kapaliny na Q-H charakteristiku hydrodynamického čerpadla....	65
Obr. 32 Strojovna NMJ .....	71
Obr. 33 Zapojení přístroje pro měření elektrických veličin. Č. 2 označuje samotný přístroj (Fluke 438-II) a č. 3 instalovaný frekvenční měnič (FM), který slouží pro regulaci otáček instalovaného čerpadla.....	72
Obr. 34 Zapojení přístrojů pro měření diferenčního tlaku na čerpadle. Č. 4 je označen návarek na sání čerpadla, č. 5 označen diferenční snímač tlaku, č. 6 označen převodník absolutního tlaku, č. 7 hardwarová jednotka pro vyhodnocení měření tlaku a s ní propojený notebook s vyhodnocovacím softwarem, č. 8 označuje návarek na výtlačku čerpadla. ....	73
Obr. 35 Primární kal použitý pro vyhodnocení hustoty (měrné hmotnosti). ....	74
Obr. 36 Pohled na zkoumaný primární kal podléhající experimentálnímu měření. ....	75
Obr. 37 Porovnání experimentálně naměřených výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% kalu a čisté vody. ....	77
Obr. 38 Porovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu a čisté vody s experimentálně naměřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% primárního kalu .....	79
Obr. 39 Porovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu a čisté vody s experimentálně naměřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% primárního kalu s vyznačenými chybovými úsečkami znázorňující nepřesnost měřících přístrojů. ....	80
Obr. 40 Detailnější záběr porovnání výkonových charakteristik hydrodynamického kalového čerpadla při čerpání 5,2% primárního kalu a čisté vody s experimentálně naměřenými výkonovými parametry při čerpání 5,2% primárního kalu s vyznačenými chybovými úsečkami znázorňující nepřesnost měřících přístrojů.....	82

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Zobrazení nepřesností měřících přístrojů při měření daných veličin .....	76
--	----

## Seznam použitého softwaru

- Office 365 pro Plus
- Power Log 430-II

# Seznam příloh

## Seznam elektronických příloh

- Text práce (.pdf)
- Data z měření diferenčního tlaku (.zip)
- Data z měření elektrických veličin (.zip)
- Data z měření průtoku (.zip)