ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra zdravotního a ekologického inženýrství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VÝVOJ A OVĚŘENÍ PRVKŮ OPTIMALIZACE MÍSENÍ PRO PROCESY ODVODŇOVÁNÍ KALŮ A FLOTACE

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF MIXING OPTIMIZATION ELEMENTS FOR SLUDGE DEWATERING AND FLOTATION PROCESSES

Bc. Vadim Strogonov

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Pollert, Ph.D.

Praha 2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Strogonov Jméno: Vadim Osobní číslo: 501859

Zadávající katedra: K144 - Katedra zdravotního a ekologického inženýrství

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vývoj a ověření prvků optimalizace mísení pro procesy odvodňování kalů a flotace

Název diplomové práce anglicky: Development and verification of mixing optimization elements for sludge dewatering and flotation processes

Pokyny pro vypracování:
Zpracovat literární rešerši o zpracování, odvodňování, mísení a flotaci kalu,
Hlavním předmětem práce je pomocí výzkumu a experimentálního vývoje navrhnout a posoudit prototypy směšovací a chemické optimalizace, zejména v procesu odvodnění a flotace. V rámci práce se bude také studovat a vylepšovat systém flokulace/koagulace míchání obecně pomocí matematických simulačních metod a dalších analýz. Výstupem je komplexní produkt –prototyp, který zvýší účinnost čištění odpadních vod a procesu odvodnění kalu a sníží provozní náklady ve srovnání se stávajícími konvenčními postupy. Zařízení bude možné použít v současných nebo v nových čistírnách odpadních vod.

Seznam doporučené literatury:
Nařízení vlády č. 401/2015 Sb.Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění ...
Waste Water Treatment Plant DesignP.Aarne Vesilind (2003)
Water Treatment Handbook, Degrémont Vol.1,2 (2007)

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Jaroslav Pollert, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 20.9.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2. 1. 2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne: 2.1.2022 ……

Vadim Strogonov

Poděkování

Poděkovat chci především vedoucímu své diplomové práce panu prof. Ing. Jaroslavu Pollertovi, Ph.D. za vstřícné a odborné vedení práce a za nesčetné rady při konzultacích. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Švandovi za poskytnutí CFD modelů navrhovaných zařízení a trpělivé odpovídání na mé dotazy. V neposlední řadě děkuji paní Ing. Lucii Michálkové, panu Ing. Dominiku Kučerovi a panu Ing. Jonáši Gilíkovi ze společnosti „AMCON“ za spolupráci při realizaci sběru dat a testování prototypů.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na vývoj a ověření prototypů směšovací a chemické optimalizace v procesech odvodnění a flotace. Nejprve je zpracována literární rešerše týkající se vlastností a klasifikací kalů, konvenčních principů jeho zpracování a mísení s chemikáliemi v potrubních mísičích a také požadavků na upravený kal podle národní a evropské legislativy. Zároveň je nastíněna problematika mikrobublinné flotace. Následně jsou v praktické části pomocí výzkumu a experimentálního vývoje navrženy a ověřeny prototypy statického a dynamického mísiče a optimalizované flotační jednotky pro společnost „AMCON“. Práce popisuje průběh měřící kampaně, CFD simulací proudění v zařízeních a postupného vyvinutí konečných variant prototypů. Dále jsou v práci popsána pilotní testování navržených prototypu. V návaznosti na provedená testování jsou diskutovány a vyhodnoceny výsledky.

Klíčová slova: kalové hospodářství, odvodnění kalu, statický mísič, dynamický mísič, potrubní mísič, mísení chemikálií, mísení kalu, odvodňovací lis, flotace, DAF, matematické modelování, CFD

Abstract

The diploma thesis is focused on the development and verification of prototypes of mixing and chemical optimization in dewatering and flotation processes. Firstly, a literature review is compiled concerning the properties and classifications of sludge, conventional principles of its processing and mixing with chemicals in pipeline mixers, as well as the requirements for treated sludge according to national and European legislation. At the same time, the topic of microbubble flotation is outlined. Subsequently, in the practical part, prototypes of static and dynamic mixers and optimized flotation units for the company "AMCON" are designed and verified using research and experimental development. The work describes the course of the measurement campaign, CFD simulations of flow in the equipment and the gradual development of the final variants of prototypes. Furthermore, the pilot tests of the proposed prototypes are described. Following the performed tests, the results are discussed and evaluated.

Keywords: sludge management, sludge dewatering, static mixer, dynamic mixer, pipe mixer, chemical mixing, sludge mixing, dewatering screw press, flotation, DAF, mathematical modeling, CFD

Obsah

1 Úvod 9

2 Cíle práce 10

3 Teorie a současná praxe zpracování kalů 11

3.1 Druhy a vlastnosti kalu 12

3.1.1 Definice, charakteristika a složení kalu 12

3.1.2 Klasifikace kalů 15

3.2 Legislativa a trendy kolem likvidace zpracovaného kalu 19

3.2.1 Legislativa a trendy EU 19

3.2.2 Legislativa a trendy v České republice 26

3.3 Konvenční principy zpracování kalu 31

3.3.1 Zahušťování kalu 32

3.3.2 Stabilizace kalu 35

3.3.3 Odvodňování a sušení kalu 36

3.4 Mísení kalu s chemikáliemi v potrubních mísičích 38

3.5 Flotace rozpuštěným vzduchem 40

4 Vývoj prvků optimalizace mísení a flotace 42

4.1 Měřící kampaň 45

4.1.1 Měření viskozity 47

4.1.2 Měření hustoty 48

4.1.3 Měření koncentrace nerozpuštěných látek 49

4.1.4 Sedimentační zkouška 50

4.1.5 Výsledky měřící kampaně 51

4.2 Potrubní mísič 52

4.2.1 Vývoj statického potrubního mísiče pomocí CFD simulace 53

4.2.2 Vývoj dynamického potrubního mísiče pomocí CFD simulace 60

4.3 Flotační jednotka 65
4.3.1 Optimalizace flotační jednotky 66
5 Ověření prvků optimalizace mísení a flotace 72
5.1 Testování mísičů 72
5.1.1 Cíle testování 72
5.1.2 Metodika testování 72
5.1.3 Podmínky testování 76
5.1.4 Výsledky testování a jejich hodnocení 76
5.1.5 Závěry testování 79
5.2 Flotační jednotka 81
5.2.1 Cíle testování 81
5.2.2 Metodika a podmínky testování 82
5.2.3 Výsledky testování 84
5.2.4 Závěry testování 86
5.2.5 Přepočítávací škála pro flotační jednotku 87
6 Závěr 88
7 Seznam použitých zkratek 90
8 Seznam použité literatury 91
9 Přílohy 106
9.1 Příloha 1. Schéma experimentálního a vývojového střediska AMCON na ČOV Rudná 107
9.2 Příloha 2. Kompletní seznam odebraných vzorků 108
9.3 Příloha 3. Příklad informačního listu databáze kalů 109
9.4 Příloha 4. Tabulka provozních parametrů odvodňovacího lisu při testování potrubních mísičů 110
9.5 Příloha 5. Výsledky laboratorní analýzy vzorků z testování mísičů 111
9.6 Příloha 6. Procentuální změny výkonnostních parametrů odvodňovače . 112

9.7 Příloha 7. Změna parametrů ve srovnání se standardním výkonem jednotky VOLUTE™ a cílovými hodnotami.....113

1 Úvod

Problém nakládání s kaly je jedním z více přehlížených aspektů dnešní klimatické krize. Nejenom, že se jedná o kolosální množství odpadu, které je v přímé závislosti na počtu obyvatelstva, ale i o to, že tento odpad je příznivým prostředím pro nebezpečné víry, bakterie a další mikroorganismy. Navíc se používá jako hnojivo pro ovoce a zeleninu. Právě proto je zpracování kalu (snížení jeho objemu a nakažlivosti) i čištění odpadní vody věnována velká vědecká pozornost.

Jádrem této diplomové práce je vývoj a experimentální ověření potrubních mísičů pro dávkování chemikálií a optimalizace již existujícího prototypu flotační jednotky na zakázku společnosti AMCON Europe s.r.o. Tato zařízení vznikla v současné podobě spoluprací této společnosti a ČVUT v Praze jako součást většího rozvojového projektu „AMCO“ („*Advanced Mixing and Chemical Optimization for processes of sludge dewatering and flotation*“), jehož cílem je, jak již název napovídá, vývoj pokročilé metody optimalizace mísení a chemické dávky pro procesy odvodňování kalů a flotace.

Důvodem, který vedl uvedenou společnost k danému záměru, je stále rostoucí tlak ze strany legislativy — a to jak evropské, tak i tuzemské — jednak extrahovat, recyklovat a znovu pouštět do oběhu suroviny vyskytující se mj. v kalech z ČOV v rámci koncepce oběhového hospodářství (tvz. cirkulární ekonomiky) a jednak se přizpůsobit přísnějším podmínkám použití kalů na zemědělské půdě v souladu s novými předpisy Ministerstva životního prostředí (MŽP). Výsledným dopadem těchto rychle měnících se stimulů na provozovatele čistíren je zmenšení přípustného rozsahu hodnot parametrů, jež tyto kaly charakterizují, a následné zúžení spektra aplikovatelných technologií zpracování kalů. Zvýšení účinnosti odvodňování se tak stává buď možností se přizpůsobit k novým pravidlům nakládání s čistírenskými kaly, kde suchost hraje zásadní roli, anebo příležitostí ušetřit např. na dopravních nákladech v době měnících se přístupů k nakládání s odpady.

A právě odvodňování v současné době postrádá stabilizaci procesu mísení a homogenizaci směsí přitékajícího kalu a chemikálií, což vede k produkci různé kvality někdy i v průběhu dne. Správně navržený potrubní mixér zajišťuje uniformní rozdělení koncentrací činidla na výtoku a optimalizuje proces odvodnění.

2 Cíle práce

Tato práce je rozdělená do dvou hlavních částí. V první teoretické části (kapitola 3) jsou popsány dosavadní poznatky o čistírenském kalu, konvenčních způsobech jeho zpracování a nových legislativních požadavcích na použití zpracovaného kalu. Zároveň je nastíněna problematika flotace s mikrobublinnými generátory. V druhé praktické části se pozornost přenese do vývoje a ověření potrubních mixérů a flotační jednotky (kapitoly 4 až 6).

Literární rešerše tvořící první část práce se zabývá vlastnostmi kalu a novými legislativními trendy v oblasti jeho zpracování a použití na požádání společnosti AMCON, jelikož i tato zařízení, která jsou předmětem této práce, jsou snahou se novým podmínkám přizpůsobit. Kapitoly o konvenčních principech zpracování kalu a flotace jsou nezbytné pro zařazení vyvinutých a optimalizovaných prvků do kontextu kalového hospodářství, kde výsledné charakteristiky kalového koláče jsou ovlivněny řadou faktorů. V neposlední řadě je rešerše doplněna o úvod do problematiky mísení kalu s chemikáliemi v potrubních mísičích.

Praktická část zahrnuje popis rozvojového projektu „AMCO“, měřící kampaň a sběr dat pro matematické modelování proudění v potrubních mísičích a flotační jednotce, matematické modelování samotné, vývoj i optimalizace prototypů a jejich pilotní testování *in situ*.

Výstupem práce jsou zaprvé prototypy statického a dynamického potrubního mísiče, které zvyšují účinnost procesu odvodňování kalu a snižují provozní náklady, a zadruhé optimalizovaná flotační jednotka, která se bude především používat na odpadní vody v průmyslu. Všechna tato zařízení budou použita na současných nebo nových ČOV.

3 Teorie a současná praxe zpracování kalů

Nedílnou součástí ČOV je tzv. kalová koncovka, na níž probíhá zpracování kalu, který obsahuje látky zodpovědné za původní znečištění přitékajících odpadních vod. Jedná se takto o produkt čištění, jenž je i nadále schopný uvolňovat nebezpečné látky a vyžaduje další úpravu a následnou rozumnou likvidaci. Tím víc je důležitý nepřestávající výzkum problematiky nakládání z kaly, který v současné době zvyšujícího se povědomí o životním prostředí a nově se objevujících nebezpečí spojených s čistírenským kalem vede ke zpřísnění požadavků na výsledný zpracovaný kal předurčený k použití i mimo ČOV.

Ale zároveň kal představuje zdroj živin, energie a stavebního materiálu čekající na využití. Dokonce i jeho vyprodukované množství nutí k tomu, že by byl nějakým přínosným pro člověka způsobem využit. Jenom v České republice za loňský rok bylo vyprodukováno přes 192 000 tun kalů v přepočtu na sušinu [1]. Takže tato kapitola začíná vymezením pojetí předmětu diskuse a vypráví o jeho druzích a klíčových parametrech.

Je vhodné také podtrhnout, že se kalové hospodářství v Evropě řídí rychle se měnícími pokyny k zneškodnění kalů a využití jejich potenciálu, o čemž svědčí i hodně diskutovaná nařízení v oblasti podpory odpadového hospodářství a oběhového hospodářství. Tímto způsobem tato kapitola pokračuje dál rozborem možných využití zpracovaných kalů ve světle současné a nové legislativy.

Další podkapitoly obsahují popis konvenčních řešení kalové koncovky ČOV a jejich jednotlivých kroků: předúprava, zahuštění, stabilizace a odvodňování.

Potom následuje podkapitola zabývající se rolí potrubních mísičů na ČOV, kde se proberou principy mísení kalu s chemikáliemi v potrubních mísičích.

Jakožto součástí diplomové práce je i proces flotace, poslední subkapitola se věnuje problematice flotace na ČOV. Středem pozornosti jsou samostatná zařízení čili flotační jednotky, které se dají použít především na průmyslové odpadní vody.

3.1 Druhy a vlastnosti kalu

3.1.1 Definice, charakteristika a složení kalu

Čistírenský kal lze obecně definovat jako produkt čištění odpadních vod na čistírnách. Národní norma pak kal definuje jako *„směs vody a pevných látek oddělených z různých druhů odpadních vod přirozenými nebo umělými procesy“* [2, s. 7]. Přesnější definice se však obvykle neposkytují, jelikož složení, charakteristika a chování kalů jsou závislé na složení odpadní vody, procesech čištění odpadních vod, ale zároveň i na lokalitě a čase. Obecně se dá říct, že směsný surový kal se charakterizuje poměrně malým obsahem sušiny (obsah veškerých NL je pouze 0,5 až 5 %), pozůstatky chemikálií (flokulanty, sraženiny po neutralizaci pH apod.) a přítomností přebytečného biologického kalu z biologického stupně čištění, čili tzv. sekundárního kalu [3, s. 165].

Hlavní parametry charakterizující chování kalů na ČOV jsou sušina (též DM nebo TS), NL a VS (někdy VSS). Sušina je neodpařitelný zbytek látky po odpařování při teplotě 105 °C v procentech původní hmotnosti vzorku (v tom případě se tomu obvykle říká DSC) nebo vztažený k jednomu litru vzorku:

$$TS = \frac{M_{105\,°C} - M_{miska}}{V} \tag{1}$$

kde $M_{105\,°C}$ je hmotnost vzorku a misky po odpařování [mg], M_{miska} je hmotnost misky [mg], V je objem vzorku [l].

NL (někdy též TSS) se stanovují buďto filtrováním nebo odstředěním a následným zahříváním a vysušením vzorku při teplotě 105 °C, uvádí se v miligramech na litr:

$$NL = \frac{M^{f}_{105\,°C} - M_{miska\ a\ filtr}}{V} \tag{2}$$

kde $M^{f}_{105\,°C}$ je hmotnost filtrovaného (příp. odstředěného) vzorku, misky a papírového filtru po odpařování [mg], $M_{miska\ a\ filtr}$ je hmotnost misky a papírového filtru [mg].

VSS jsou látky, jež zůstávají ve vysušeném vzorku pro stanovení NL — v případě VS ve vzorku pro stanovení TS — po dvou hodinách zahřívání při 550 °C, často jsou vyjádřeny v procentech sušiny, ale také v miligramech na litr:

$$VS = \frac{(M_{105\,°C} - M_{miska}) - (M_{550\,°C} - M_{miska})}{V} \tag{3}$$

kde $M_{550\,°C}$ je hmotnost vzorku použitého pro stanovení TS po zahřátí na žíhací teplotu (550 °C) a misky.

$$VSS = \frac{(M^{f}_{105\,°C} - M_{miska\ a\ filtr}) - (M^{f}_{550\,°C} - M_{miska\ a\ filtr})}{V} \quad (4)$$

kde $M^{f}_{550\,°C}$ je hmotnost vzorku použitého pro stanovení TSS po zahřátí na žíhací teplotu (550 °C) a misky.

V praxi se to bere tak, že koncentrace VSS se přibližně rovná koncentraci organického podílu v sušině, ale ve skutečnosti se ty parametry často liší [3, s. 533].

Z koncentrace celkových NL

- 65 až 85 % jsou VSS,
- 5 až 12 % jsou tuky,
- 20 až 40 % jsou bílkoviny a
- 8 až 15 % je celulóza [4, s. 1455].

Podíl organické hmoty v sušině je v nepřímé závislosti k odvodnitelnosti kalu, a tak je ho vždycky třeba brát v potaz při řešení kalové koncovky. [5]

Samozřejmostí je, že surový kal je vhodným prostředím pro mikroorganismy, a to včetně patogenních. U kalů se běžně kontroluje přítomnost některých zvláštně nebezpečných druhů bakterií (*Salmonella spp., Escherichia coli,* termotolerantní koliformní bakterie a enterokoky), vírů (hepatitida), vajíčka helmintů a enteroviry [6, s. 27].

Koncentrace nutrientů v kalu jsou často relativně vysoké (Tab. 1), což naznačuje, že ho právem můžeme pokládat za částečnou, příp. dostatečnou náhradu hospodářských hnojiv.

Tab. 1 Porovnání koncentrací nutrientů v hospodářských hnojivech a zpracovaném kalu [4, s. 1455]

Výrobek	Živiny, %		
	Dusík	Fosfor	Draslík
Typická průmyslová hnojiva	5	10	10
Typické hodnoty pro zpracovaný kal*	3,3	2,3	0,3

* — Koncentrace nutrientů může se značně lišit v závislosti na požadavcích na odstranění dusíku a fosforu

Avšak je vždy zapotřebí kontrolovat, zda obsahuje patogenní zárodky, těžké kovy a ekotoxické látky. Ostrým problémem v současném procesu přijetí nové legislativy v oboru jsou právě látky ekotoxické, které představují „bezprostřední nebo pozdější rizika pro jednu

nebo více složek životního prostředí“ [7]. Mezi ně patří i tzv. POP: perzistentní organické látky (insekticidy, pesticidy, dioxiny atd.), jež se dostávají do potravního řetězce a tím pádem i do lidského organismu a údajně způsobují nesčíslné množství především chronických onemocnění: rakovinu, endokrinní poruchy, neurotoxicitu a poruchy reproduktivní funkce [8, s. 4]. Další hodně diskutovaným komponentem jsou hormony a léčiva, které se snadno koncentrují v čistírenském kalu, údajně často nejsou zachyceny na ČOV a tak skončí na zemědělské půdě [9]. Mezi mikroorganismy v kalech se může šířit i antibiotická rezistence, což představuje potenciální riziko pro lidské zdraví [10]. Mezi ostatní neopominutelné kontaminanty patří mikroplasty, chemické UV filtry, bromované zpomalovače hoření a některé nelegální drogy [11, s. 37]. Všechny tyto kontaminanty je nutné brát na zřetel, když se jedná o použití zpracovaného kalu na půdě nebo spalování.

Nicméně pro účely zpracování kalů je stejně důležité si uvědomit, že se voda v surovém kalu vyskytuje ve čtyř stavech podle toho, jak je na pevné částice vázaná, a to pak má značný vliv na výběr odvodňovacích zařízení (Tab. 2).

Tab. 2 Stavy vody obsažené v kalech [12, s. 7]

Stav vody v suspenzi (kalu)	Popis
Volná	Voda není nijak vázaná na pevné částice suspenze. Je relativně dobře odstranitelná gravitací.
Koloidně vázaná	Pevné částice suspenze mají relativně velkou kontaktní plochu a náboj, dokážou totiž na sebe vázat vodu. Taková voda je odstranitelná za vynaložení velké mechanické síly.
Kapilárně vázaná	Kapilární vázaná voda se nachází mezi suspendovanými částicemi. Čím jsou částice menší, tím větší jsou kapilární síly. Částečně se odstraňuje vynaložením velké mechanické síly. Úplné odstranění je možné pouze termickými způsoby.
Intracelulární voda	Tato voda je obsažena v buňkách organismů vyskytujících se v kalu. Takovou vodu se téměř nedá odstranit mechanicky, jelikož je třeba nejprve odstranit buněčnou stěnu (např. termicky)

Toto dělení nabírá důležitost při zahuštění a odvodňování kalu, protože jednoprocentní nárůst obsahu sušiny v suspenzi vede k změně objemu kapaliny o polovinu.

Co se týče reologických vlastností kalů, tak v tomto ohledu se parametry jedná o nenewtonskou kapalinu [4, s. 1477], což má vliv na výběr čerpadel a návrh potrubí čili na procesy, pro něž je důležitá viskozita. Viskozitou kalu se často rozumí viskozita zdánlivá, což je poměr smykového napětí τ [Pa] a rychlostního gradientu [s^{-1}], a nemusí být stejná v celém rozsahu gradientu rychlosti [13]:

$$\eta_{app} = \frac{\tau}{du/dy} \; [Pa \cdot s] \tag{5}$$

Důležitým parametrem pro návrh dávkování chemikálií a procesy sedimentace a flotace je kalový index, který vyjadřuje objem, který *„zaujímá 1 g sušiny aktivovaného kalu po usazování za pevně stanovených podmínek“* [2, s. 38], obvykle se počítá po 30 minutách sedimentace v Imhoffově kuželi. Matematicky se pak zapisuje jako:

$$KI = \frac{V_k}{X} \tag{6}$$

kde V_k je objem sekundárního kalu, který se usadí z 1 litru vzorku nátoku na dosazovací nádrž po půl hodině [$ml \cdot l^{-1}$], X je koncentrace sušiny vzorku [$g \cdot l^{-1}$]. Tento parametr charakterizuje sedimentační schopnost kalů.

3.1.2 Klasifikace kalů

Kal se dá klasifikovat několika způsoby: některé z uvedených klasifikací se v České republice často nepoužívají, nicméně přinášejí nové úhly pohledu na problematiku.

Nejpoužívanější klasifikace je podle místa vzniku na čistírně, jelikož se parametry primárního a sekundárního či aktivovaného kalu často významně liší. Dané klasifikace mohou být přesnější a rozdělovat kal do skupin podle zařízení, ale obecně se kaly rozdělují na tyto dva tipy (někdy bývá přidán i třetí — humusový kal z biologických filtrů, chemický kal nebo stabilizovaný kal apod.) a jejich kombinaci. Níže se uvádí příklad takové klasifikace u známého odborníka oboru Aarna Vesilinda s typickými hodnotami parametrů TS a VSS (Tab. 3).

Tab. 3 Klasifikace kalů podle místa vzniku na komunální ČOV [14]

<table>
<tr><th>Typ kalu</th><th>Charakteristika</th></tr>
<tr><td>Primární</td><td>Skládá se z organických látek, štěrku a anorganických jemných částic. Je odstraňován z mechanického stupně čištění v usazovací nádrži.
<table>
<tr><th>Parametr</th><th>Koncentrace, %</th></tr>
<tr><td>TS</td><td>2–8</td></tr>
<tr><td>z toho VS</td><td>60–80</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Sekundární</td><td>Sekundární kaly vznikají z aerobního (biologického) stupně čištění odpadních vod. „Aktivovaný kal se dobře stabilizuje aerobně, ale ne anaerobně“ [4, s. 1454] Zároveň se špatně odvodňuje.
<table>
<tr><th>Parametr</th><th>Koncentrace, %</th></tr>
<tr><td>TS</td><td>0,4–1,2</td></tr>
<tr><td>z toho VS</td><td>60–85</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Směsný</td><td>Obecně řečeno, směs kalů vykazuje vlastnosti blíže ke kalu sekundárnímu. Z hlediska odvodňování kalů platí, že směs kalů se odvodňuje tak, jak by se odvodňoval ten z nich, který se odvodňuje nejhůř. Z toho důvodu jsou často upraveny zvlášť.</td></tr>
<tr><td>Chemický</td><td>Vznikají dávkováním solí hliníku nebo železa a vápna za účelem zlepšení odstranění NL nebo srážení fosforu. Charakterizují se často zvýšeným obsahem těžkých kovů a vyšší odvodnitelností.</td></tr>
</table>

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, složení kalu je závislé i na lokalitě a času. Ale nejvýraznější rozdíly jsou vidět na čistírnách různých typů průmyslů, které vyžadují individuální přístup k řešení kalové koncovky (Tab. 4).

Tab. 4 Příklad klasifikace kalu podle typu průmyslu s typickými charakteristikami a reprezentativními hodnotami TS a VS (příp. organického podílu)

<table>
<tr><th>Odvětví průmyslu</th><th>Charakteristika vyprodukovaného kalu před úpravou</th></tr>
<tr><td>Papírenství</td><td>Papírenský kal obsahuje vlákna celulózy (10 až 75 %), hemicelulózu, lignin, xylán, anorganickou hmotu (čili popel), různorodé přísady a minoritní množství těžkých kovů a solí. V poslední době roste zájem o využití energetického potenciálu tohoto typu kalů, ukázalo se totiž, že jeho použití v zemědělství není bezvadné. Tento typ kalů je rozložitelný do ethanolu. [15], [16], [17]
<table>
<tr><th>Parametr</th><th>Koncentrace, %</th></tr>
<tr><td>TS</td><td>32–51</td></tr>
<tr><td>z toho VS</td><td>33–48</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Mlékárenství</td><td>Mlékárenský kal se produkuje v relativně velkém množství (0.6 kg na 1 kg odstraněného BSK_5). Je mnohem vhodnější k použití na půdě než kal z komunálních ČOV díky vysokému obsahu fosforu, ale stejně panuje obecná nedůvěra k tomuto druhu kalu vzhledem k možnému obsahu POP a krátké době skladovaní. Složení je velice závislé na způsobu úpravy odpadních vod, níže jsou uvedeny hodnoty pro směsný kal po DAF a biologickém stupni čištění. [18] [19] V některých případech se tento kal dá využít na výrobu cihel [20], ale existují obavy z možného výskytu v nich dioxinů [21].
<table>
<tr><th>Parametr</th><th>Koncentrace, %</th></tr>
<tr><td>TS</td><td>12,6–22,6</td></tr>
<tr><td>z toho org. podíl</td><td>36,1–81,3</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Zemědělsko-potravinářský průmysl</td><td>Kal se skládá především z organické hmoty rostlinného původu a obsahuje vysoké koncentrace nutrientů. Výhodou tohoto typu kalu je téměř úplná nepřítomnost těžkých kovů nebo dalších toxických látek. Parametry kalů z různých průmyslů se velice liší, a tak se dají použít k různým účelům při kompostování. [22] Níže jsou uvedený parametry kalu po zpracování rajčat, citrusů a jahod ve Španělsku [23]
<table>
<tr><th>Parametr</th><th>Koncentrace (rajčata), %</th><th>Koncentrace (citrusy), %</th><th>Koncentrace (jahody), %</th></tr>
<tr><td>TS</td><td>10,9–28,9</td><td>4,8–56,8</td><td>7,3–11,9</td></tr>
<tr><td>z toho org. podíl</td><td>63,4–91,8</td><td>78,5–95,6</td><td>90,9–93,7</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Chemický průmysl</td><td>Produkuje zpravidla nejnebezpečnější druhy kalu, které vyžadují speciální úpravu na místě, než budou odváděny ven. Často se spalují, jelikož nejsou vhodné k použití na půdě.</td></tr>
</table>

Kromě uvedených odvětví průmyslů existuje spousta dalších jiných zdrojů velmi specifických druhů kalů, které se od kalu z komunálních ČOV ostře liší a jsou zkoumány samostatně. V současné době se odborníci v oboru průmyslových kalů po světě zaměřují častěji na co největší výrobu elektrické a tepelné energie, někdy přímo na výrobu paliva, a na co největší zpětné získávání užitečných látek než na použití těchto kalů na půdě, je totiž velmi problematické. Například lipidy, které obsahují kaly z jatek, se používají na výrobu bionafty v Novém Zélandu [24], a zpracované peletované pozůstatky vnitřností zvířat z nich slouží k výrobě tuhého paliva v Austrálii [25]. Další příklad je kal z papíren: dobrá

rozložitelnost papírenského kalu na etanol, glukózu a xylózu přispívá k efektivní výrobě kyseliny octové [17]. Dohromady jde o velmi přínosnou klasifikaci, která umožňuje sbírat znalosti v úzkých směrech a využívat specifický potenciál vyprodukovaného odpadu na místě, což podporuje současný trend decentralizace zpracování odpadů.

Existuje však i opačný přístup. Jako jedna z nejznámějších a největších světových společností v oboru, Degrémont (součást Suez Group) používá vlastní klasifikaci čistírenského kalu podle toho, jestli organický podíl v sušině převažuje minerální, a jestli kal se chová hydrofobně nebo naopak hydrofilně. Navíc vláknité a mastné (olejové) kaly se považují za samostatné vedlejší kategorie. Takové členění umožňuje na rozdíl od předchozí klasifikace podle průmyslů naopak standardizaci návrhu ČOV [3, s. 168].

Kromě toho technologie úpravy kalů se dělí na ty, které se dají efektivně použít na malých čistírnách a ty, které jsou nejčastěji uplatněny na velkých. Jinými slovy, množství vyprodukovaného kalu ovlivňuje další úpravu, a tak to můžeme považovat za vlastnost kalu samotného, kterou je nutno zohlednit při návrhu ČOV. Například oddělené zpracování primárního a sekundárního kalu se doporučuje na čistírnách pro více než 100 000 EO, zahušťovací nádrže slouží k dočasnému uskladnění kalu na ČOV do 500 EO a k zahušťování samotnému na ČOV nad 500 EO, a anaerobní stabilizace připadá do úvahy u čistíren nad 10 000 EO [26]. Tento parametr se dá ovlivnit v případě ekonomické nebo technické potřeby. Tak v roce 2020 ve východním Vestfálsku vytvořením společnosti *Klärschlammverwertung OWL GmbH* se sjednotilo velké množství provozovatelů ČOV z 78 obcí, aby mohli efektivněji spalovat kal a uplatnit technologie extrakce fosforu na společných spalovnách po zákazu použití kalů na půdě [27] [28] [29]. Podle analýzy společnosti Ernst&Young, s.r.o., pro MŽP prostor pro podobná řešení v České republice je [6, s. 31].

Následující kapitola se zabývá legislativou kolem použití zpracovaného kalu z ČOV, a tak jako poslední v této kapitole se uvádí klasifikace kalu podle vyhlášky č. 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, která stanovuje mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na půdě a bude platit v uvedené podobě do konce roku 2022. Vyhláška kaly rozděluje do I. a II. kategorií podle přítomnosti indikátorových mikroorganismů (*Salmonella spp.,* termotolerantní koliformní bakterie a enterokoky). Kaly II. kategorie mohou být použitý pouze pro pěstování technických plodin nebo v podzimním období pro pěstování běžných plodin, zatímco kalů I. kategorie se taková omezení netýká [30].

3.2 Legislativa a trendy kolem likvidace zpracovaného kalu

3.2.1 Legislativa a trendy EU

Technologie, které se dají použít na zpracování kalů, se vybírají v závislosti na požadavcích na výsledný produkt, jež jsou stanoveny právními předpisy státu nebo nadstátní entity (v případě České republiky se jedná o EU). Ty se pak definují péčí o životní prostředí a zdraví obyvatelstva a stanoviskem veřejnosti.

Boj proti znečišťování životního prostředí odpadky a snaha o udržitelnější systém přivedly světovou společnost k rozhodnutí, že skládkování recyklovatelného odpadu se má do roku 2025 eliminovat [31], a tak v oblasti odpadového hospodářství EU čím dál tím víc prosazuje následující hierarchii způsobů nakládání s odpady uvedené v základní směrnici 2008/98/ES o odpadech:

1) předcházení vzniku;
2) příprava k opětovnému použití;
3) recyklace;
4) jiné využití, například energetické využití, a
5) odstranění [32].

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2018/851, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech, nařizuje členským státům znovu uvést na přetřes cíle odpadového hospodářství a rozšiřuje původní směrnici o odpadech o systém rozšířené odpovědnosti výrobce a seznam možných pobídek k jeho propagaci [33]. Jinými slovy, uvedená hierarchie poslední dobou velice rychle nabírá na významu.

Je dobře vidět, že se tato hierarchie promítá i do legislativy v oblasti nakládání z kaly, každý z těchto způsobu se totiž v současné době uplatňuje pomocí ekonomických nástrojů nebo národní legislativy. Kupříkladu prevence vzniku kalů většinou není proveditelná, ale je možné předcházet shromáždění v něm nežádoucích látek: mikroplastů, těžkých kovů apod. Mikroplasty jsou z kalu sotva odstranitelné a mohou se i po aplikaci kalu na půdu takřka nekontrolovatelně rozšiřovat v okolí [34] [35], a tak jedinou možností, jak zabránit kontaminaci orné půdy, se stává prevence vzniku mikroplastů u zdroje. Významné množství mikroplastů se dostává do odpadních vod z praček, a právě proto francouzské MŽP (*Le ministère de la Transition écologique)* jako první nařídilo výrobcům domácích praček ve Francii instalovat speciální filtry na mikroplasty od roku 2025 [36]. Navíc dodavatelům ovoce a zeleniny zakázalo používat plastové obaly již od roku 2022 [37].

Podle směrnice Evropského parlamentu a Rady o odpadech se příprava k opětovnému použití liší od recyklace tím, že recyklací z odpadů vzniká výrobek použitelný buď pro původní anebo jiné účely, zatímco opětovným použitím se rozumí výhradně použití pro původní účely. Tak příprava k opětovnému použití pro čistírenský kal znamená úpravu do stavu, ve kterém vyhovuje platné legislativě v oblasti hnojiv, a následné použití kalu na půdě pro předávání živin rostlinám a pěstování potravin. V případě, kdyby se fosfor odstraňoval zvlášť pokročilejšími metodami nebo kdyby se kal používal na výrobu biocharu, jednalo by se teda o recyklaci.

Opětovné využití a recyklace materiálů obsažených v kalech z ČOV již byly částečně nastíněny v kapitole 3.1.2 v souvislosti s tříděním kalů za účelem zdokonalení jeho úpravy. Co se tyče použití na půdě, což je v České republice zdaleka nejpreferovanější způsob likvidace kalů [6, s. 6], tak politika EU v oblasti půdy jasně stanovuje následující priority: zabránění škodlivému účinku na životní prostředí, sledovatelnost použitých materiálů a podpora opětovného využití odpadů na půdě (tzv. uzavření kruhu potravinového hospodářství) [38] [39]. Na to jsou zaměřeny i cíle „strategie EU pro čestný, zdravý a příznivý k životnímu prostředí potravinářský systém“ („*A Farm to Fork Strategy”*), mezi něž patří mj. 50% snížení ztrát nutrientů, což by mělo nahradit 20 % současně používaných hnojiv [40].

Hlavními nástroji této politiky na úrovni EU jsou

- směrnice Rady 86/278/EHS o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství,
- nařízení Evropského parlamentu 2019/1010 o sladění povinností podávání zpráv v oblasti právních předpisů souvisejících s politikou životního prostředí,
- nařízení Evropského parlamentu a Rady 2019/1009, kterým se stanoví pravidla pro dodávání hnojivých výrobků EU na trh.
- směrnice Rady 91/676/EHS ze dne 12. prosince 1991 o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů

Směrnice Rady 86/278/EHS se zaměřuje na zajištění nepřekročení mezních hodnot koncentrací některých těžkých kovů v kalu a půdě (čl. 4 a přílohy I A, I B, I C), nařizuje členským státům ohraničit množství kalu, které se smí použít na jednotku plochy za rok, zakazuje použití kalů na půdy určené k pastvě po určitou dobu před pastvou, k pěstování ovoce a zeleniny ve vegetačním období (výjimkou jsou ovocné stromy) a k pěstování ovoce

nebo zeleniny, která je určená ke konzumaci v surovém stavu a je v bezprostředním kontaktu s půdou, na dobu 10 měsíců před pěstováním samotným (čl. 7). Směrnice pak vyžaduje zohledňovat skutečné výživné potřeby rostlin, chránit podzemní vody před znečištěním a omezovat použití kalů z pH menším než 6, příp. snížit mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů (čl. 8). V dokumentu se taky uvádí postupy a četnost rozborů kalů a obsah záznamů o produkovaném a dodaném kalu, jež členské státy musí vést (čl. 9 a 10). [39] Tato směrnice byla zavedena v roce 1986 a je tím pádem zastaralá. V současné době mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů jsou mnohdy přísnější, zatímco se mikrobiální parametry a koncentrace mikropolutantů začínají řešit v legislativě většiny států i v rozpracované dokumentaci EU o kalech. Drtivá většina členských států používat neupravený kal zakázala [41].

Nařízení Evropského parlamentu 2019/1010 modernizuje správu informací v oblasti ochrany životního prostředí a upřesňuje požadavky na záznamy zmíněné ve směrnici 86/278/EHS. Podle nařízení je nutno zveřejňovat a zasílat potřebné údaje (včetně prostorových dat) o použitém zpracovaném kalu do osmi měsíců od konce příslušného kalendářního roku. [42]

Nařízení Evropského parlamentu a Rady 2019/1009 stanovuje podmínky pro hnojiva, dodávaná na trh EU a jasně vyřazuje kaly z ČOV a průmyslové kaly z možných kategorií složkových materiálů hnojivých výrobků (Příloha II, č. 2) [43]. Nařízení umožňuje jenom použití některých materiálů vyloučených z kalů, a to především jsou struvit, agrouhlí (též biouhlí nebo biochar) a produkty na bázi popela (této kategorii materiálů se občas říká *STRUBIAS*). Přestože to značně ovlivňuje budoucnost nakládání s kaly z ČOV, zatím se to netýká použití zpracovaného kalu v zemi původu [6, s. 22].

Směrnice Rady 91/676/EHS předepisuje členským státům vymezovat ohrožené zemědělské plochy, které mohou přispívat k znečištění podzemních i povrchových vod, provádět potřebné akční programy pro taková území a nařizuje farmářům používajícím hnojiva řídit zásady správné zemědělské praxe za účelem snížení znečištění vod dusíkatými látkami [44].

Jak již bylo zmíněné v kapitole 3.1.1, odpadní vody obsahují spoustu různých mikropolutantů, které většinou zůstanou i v upraveném kalu, takže v poslední době vhodnost použití čistírenského kalu na půdě pro pěstování zeleniny a ovoce, ve kterých se pak potenciálně vyskytují rezidua těchto závadných látek, se hojně diskutuje. Problematika

mikropolutantů se komplikuje na jedné straně i tím, že čím víc odpadní vody čistíme, tím znečištěnějším se stává kal. Na straně druhé moderní nástroje jejich výzkumu a odhalení umožňují mít podrobnější přehled o možných důsledcích zachování současného stavu úpravy nebo používání kalů a bránit před nimi veřejné zdraví. Výsledkem těchto dvou trendů, které se vyvíjí mnohem rychleji než technologická změna nebo uvědomění její nutnosti, je zpřísnění podmínek použití kalů na půdě, vzrůstající nedůvěra vůči hnojivům kal obsahujícím a hledání přijatelnějších technologií, které by umožnily naplno využít veškerého potenciálu kalu a vyhnout se zmíněným dlouhodobým negativním účinkům na životní prostředí a lidské zdraví. Mezi takové technologie patří např. recyklace fosforu, výroba biocharu nebo organického paliva.

Fosfor je strategicky velmi důležitou surovinou, který se dá recyklovat z kalů komunálních ČOV, jenž je spolu s fosforitem zařazen na seznam kriticky ohrožených nerostných surovin v Evropě [40], zatímco se nejjednodušší cesta využití fosforu a dalších nutrientů aplikací čistírenských kalů na půdu ukázala jako potenciálně závadná. Právě proto extrakce fosforu na ČOV v Německu bude v blízké budoucnosti povinná v rámci „vyhlášky o čistírenském kalu“ (*AbfKlärV*) [45], a už vznikají nekonvenční pilotní projekty, jež v budoucnu umožní mnohem výhodnější recyklaci kalů. Na městské ČOV v Hamburku společnostmi *Die Hamburger Phosphorrecyclinggesellschaft mbH, Hamburg Wasser* a *REMONDIS Aqua GmbH* se právě prodlužuje kalová koncovka, která umožní extrakci fosforu v podobě kyseliny fosforečné, sádrovce jako stavebního materiálu a solí železa a hliníku, které se následně dají využit na srážení fosforu v odpadní vodě [46]. To uzavírá hned několik materiálových cyklů, což je cílem nově zavedeného v EU oběhového hospodářství, a minimalizuje negativní dopad na životní prostředí.

Další možností recyklace kalů je výroba biocharu např. pomocí pyrolýzy, který se dá pak použít buď jako příznivý k životnímu prostředí adsorbent, nestandardní hnojivo nebo taky někdy tuhé palivo. Výhodou biocharu je stabilizace organického uhlíku obsaženého v kalu a potenciálně široké pole použití jako adsorbent [47]. Existují však určité pochybnosti ohledně účinnosti biocharu jako hnojiva [6, s. 39].

Energetické využití kalů je možné provádět několika způsoby: často jsou používány jímání bioplynu z anaerobní stabilizace a spoluspalování.

Bioplyn z kalů ČOV činil v roce 2014 téměř desetinu celkového množství vyprodukovaného bioplynu v EU [48]. Nynější data jsou těžko dostupná, ale informace od

jednotlivých evropských států k dispozici jsou. Jako vstupnou surovinu kal používají přibližně 24 % bioplynových stanic v Rakousku, 75 % ve Švýcarsku, 30 % v Nizozemsku, 12 % v Německu. 17 % ve Finsku a 17 % v České republice [49] [50]. Existuje pohled, který říká, že by bylo pro některé případy vhodnější jímat bioplyn přímo z odpadních vod. Tak nezisková organice *European Biogas Association* (EBA), která se skládá z evropských národních bioplynových asociací, společností a institutů, prosazuje zařazení stupně anaerobního předčištění před aktivační nádrž v případě odpadních vod s vysokým organickým podílem, což údajně umožní získání většího množství bioplynu, zmenší výstupnou vlhkost kalu a sníží stopu skleníkových plynů [51]. Výhodou jímání bioplynu z kalů je souběžné provádění procesů hygienizace a vzniku bioplynů v jednom zařízení s tím, že možnosti recyklace fosforu anebo dalšího použití v zemědělství není zamezená. Neznamená to však, že je to vždycky definitivně úspornější varianta energetického využití kalu, jelikož bezprostřední spalování kalů po odvodňování a sušení vykazuje z hlediska deficitu energie menší energetickou ztrátu než kalové koncovky s anaerobní digescí (příp. s termickou hydrolýzou před tím) a následným spalováním [52].

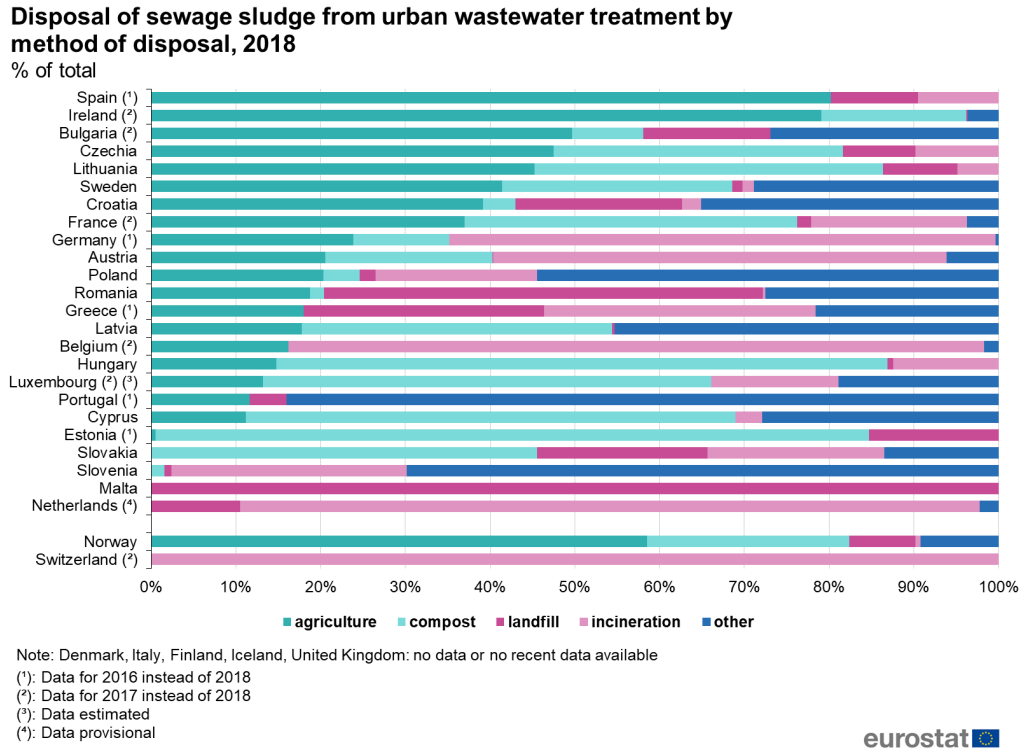
Spoluspalování je možné provádět v ZEVO, cementárnách a teplárnách. V případě ZEVO to umožňuje celoroční efektivní získání energie a regulování hodnoty spalného tepla odpadů [6, s. 67]. Společnou výhodou tohoto způsobu likvidace je samotné energetické využití, nízké náklady a snižování uhlíkové stopy. Zatím je těžko říct, jestli se ten způsob spalování zachová do budoucnosti, jelikož kapacity jednotlivých zařízení jsou často nedostatečné, a fosfor se z výsledného popelu nedá recyklovat [53].

Jinak termické způsoby zpracování kalů, které recyklaci fosforu připouštějí, rychle nabírají na popularitě v EU, často umožňují totiž využití energetického potenciálu upraveného kalu a současně energeticky efektivně ho zneškodňují. Nizozemsko v dnešní době zpracovává 100 % vyprodukovaného čistírenského kalu termicky, Belgie — kolem 89 %, Německo — přibližně 70 %, přičemž 45 % veškerého termického zpracování evropských kalů probíhá v Německu [53].

Možným konečným využitím kalu mimo ČOV slouží kompostování, jehož výstupným produktem je už jiný upravený odpad. Vzhledem k tomu, že zemědělské využití je pořád velice populárním způsobem likvidace kalů, zpřísnění podmínek jeho použití na půdě buďto na úrovni EU anebo jednotlivých členských států má za následek zvýšenou poptávku po kompostárnách. Kompostování kalů z komunálních ČOV totiž může značně snížit obsah

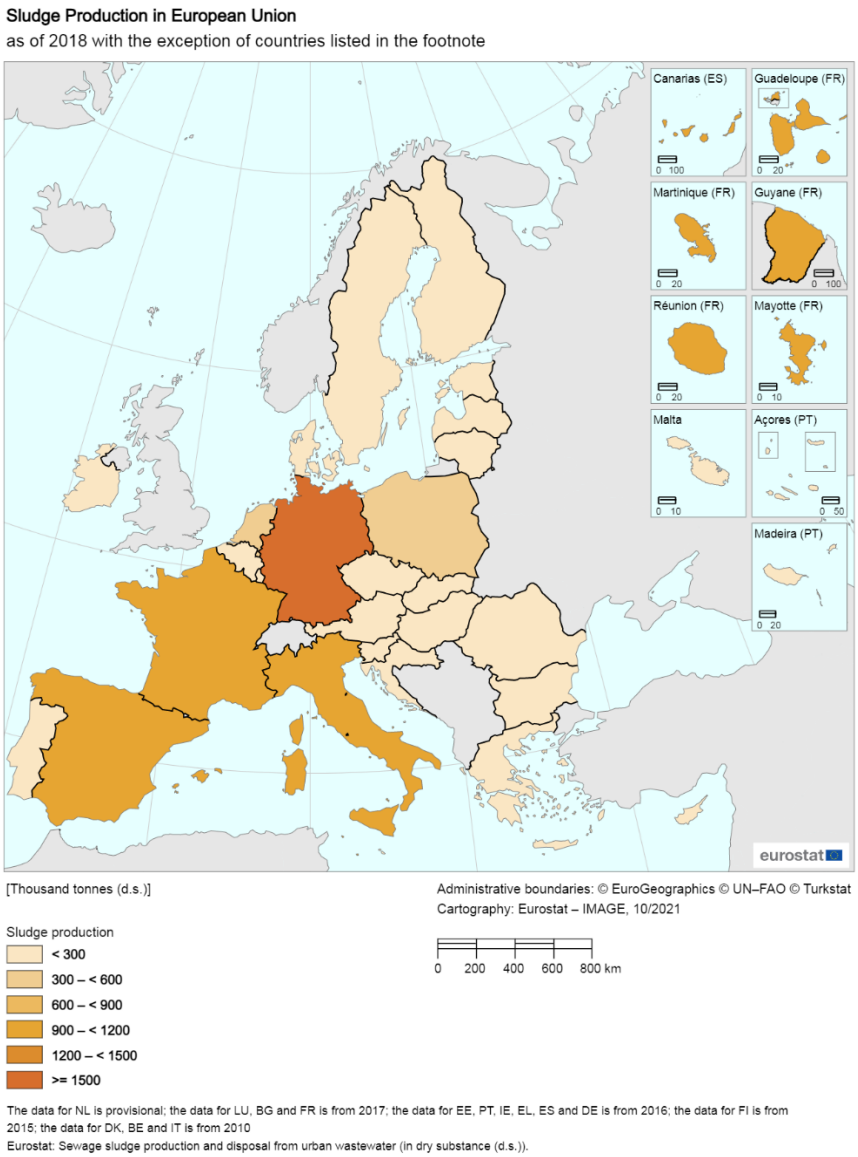
širokého spektra mikropolutantů včetně hormonů [54] [55] a tak umožňuje je používat v zemědělství.

Přehled o stávající situaci využití čistírenských kalů v jednotlivých členských státech EU, v Švýcarsku a Norsku poskytuje statistika Eurostatu z roku 2018 (Obr. 1).



Obr. 1 Likvidace čistírenského kalu z komunálních ČOV podle způsobu likvidace v jednotlivých zemích [56]

Hledě na současné trendy legislativy na úrovni EU se dá předpokládat zvýšení procenta spálených kalů a kalů odvážených na kompostárny (viz. příklad České republiky v následující kapitole). Politika EU v oblasti čistírenského kalu se bude pravděpodobně pohybovat dál ve směru extrakce použitelných materiálů (např. *STRUBIAS,* fosfor). Právě z tohoto důvodu se pozoruje vzrůstající počet projektů obdobných zmíněnému prodloužení kalové koncovky v Hamburské ČOV [57]. Ale vzhledem k nedostatečnosti dostupných údajů o škodách, jež organické a anorganické mikropolutanty přinášejí, a různým postojům k problematice používání kalů v zemědělství jednotlivými členskými státy, není možné říct jednoznačně, jak se popsaná legislativa bude vyvíjet. Níže se uvádí mapa produkce kalů v EU pro porovnání s grafem rozdělení způsobů jejich likvidace a hodnocení popsaných trendů s přihlédnutím k váze stanovisek jednotlivých členských států (Obr. 2).



Obr. 2 Produkce kalů v jednotlivých členských státech EU podle Eurostatu [58]

Přestože se v Německu chystá zavedení nových mimořádně striktních kritérií pro kal vhodný k použití na půdě [59], a v Nizozemsku všechny kaly z ČOV už dlouhou dobu spalují, země produkující dohromady zhruba 40 % kalů v EU (Itálie, Francie a Španělsko) se zatím vůči rozhodnutím značně omezit použití kalů v zemědělství vyjádřily pochybně [57], takže použití na půdě určitě budoucnost má i v případě zpřísnění podmínek v jednotlivých státech a popularizace termického zpracování.

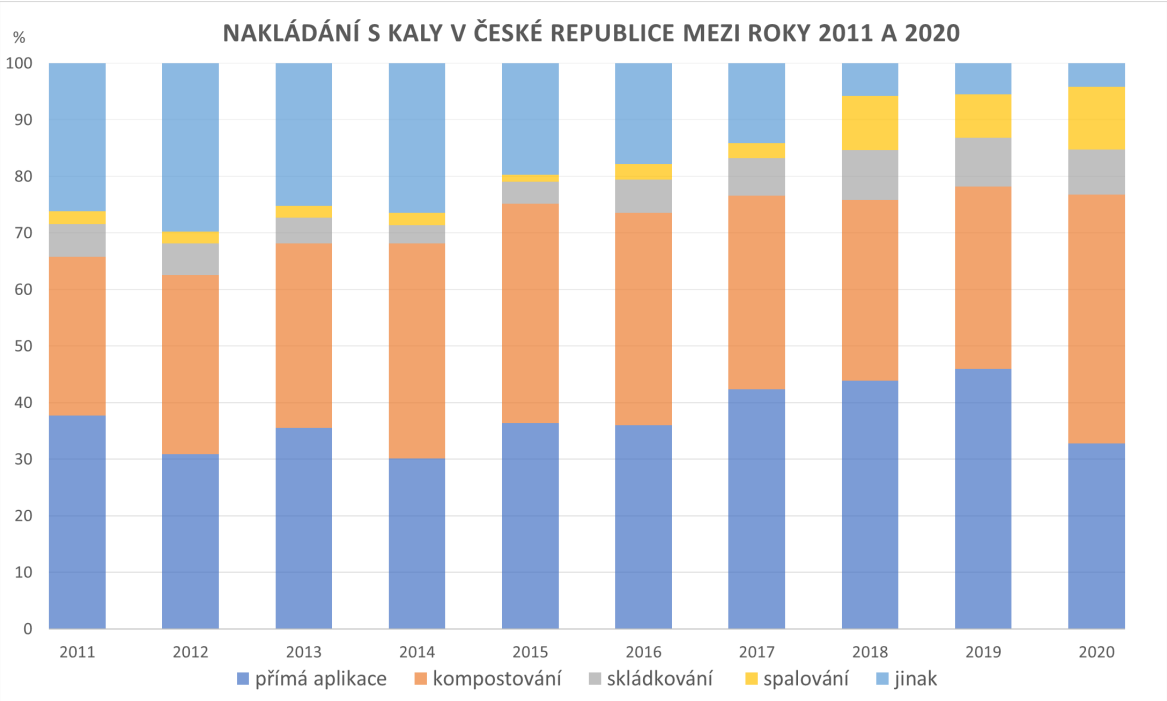
Snížení vlhkosti kalu způsobuje značné snížení výstupného objemu, což následně snižuje především transportní náklady, ale také i náklady na zvolenou likvidaci, a šetří cenný prostor pro dočasné skladování. Dá se s odvodněnými kaly mnohem jednodušeji nakládat. Energie vyžadovaná na spalování, sušení nebo pyrolýzu odvodněného kalu je výrazně menší než pro neodvodněné kaly, které mají obvykle příliš nízkou hodnotu spalného tepla.

Odvodňování je vítané i při kompostování, jelikož základka s odvodněným kalem vyžaduje menší množství dodatečných přísad [4, s. 1567]. Jinými slovy, zlepšení odvodňování přispěje k jakémukoliv z dvou možných směrů, kterými se vývoj v této oblasti bude ubírat: zvýšení podílu kompostování nebo termického zpracování.

3.2.2 Legislativa a trendy v České republice

V současné době se kalové hospodářství v České republice nachází na mezníku dvou období: tradičně se jasný příklon stále vykazuje k tzv. materiálovému použití kalů (zjednodušeně řečeno, jedná se o použití v zemědělství, kompostování, skládkování a rekultivaci skládek), zatímco do budoucna stát čelí výzvám souvisejícím s transparentnějším nakládáním s upravenými kaly, kontrolou mikrobiálního znečištění a připraveností zvýšit podíl termického zpracování a recyklace fosforu. A to se odráží v legislativě. Nově jsou zavedeny předpisy, které se soustřeďují na některých z výše uvedených priorit: jsou to především nový zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech a prováděcí vyhláška č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady.

Současný stav nakládání s kaly a vznikající trendy je možné pozorovat na grafu níže (Obr. 3). Je pozoruhodné, že přímá aplikace na půdu v časovém úseku 10 let neklesla pod hodnotu 30 % ani jednou, což svědčí o vytrvalosti a vhodnosti tohoto způsobu nakládání pro Českou republiku. Kromě toho je vidět, že se od roku 2017 relativně hodně zvýšil podíl spalovaných kalů a od roku 2019 kalů odvážených na kompostárny, zatímco se jiné způsoby využití nebo likvidace kalů, kromě přímé aplikace, odsunuly do pozadí. Stojí za povšimnutí i nepodstatný nárůst kalů skládkovaných od roku 2016, i když je to v České republice zakázáno. Ve srovnání s předchozím obdobím mezi roky 2011 a 2016 je patrné, že se jedná o zlom trendů způsobený právě nově zavedenými předpisy. Účelem této podkapitoly je toto prokázat.



Obr. 3 Nakládání s kaly v České republice mezi roky 2011 a 2020 [60]

Česká legislativa v oboru odpadového, příp. kalového hospodářství se postupně vyvíjela nejdříve aktualizacemi již zrušeného zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech, který byl doplněn nejdříve vyhláškou č. 382/2001 Sb., pak velmi diskutovanou vyhláškou č. 437/2016 Sb., která ji nahradila, o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Posledně uvedená vyhláška přinesla mnohem striktnější pravidla pro nakládání s kaly, jmenovitě podrobnější evidenci použití kalů a přísnější požadavky na zemědělskou půdu i kal z hlediska mikrobiálních parametrů a koncentrací těžkých kovů [61]. Vyhláška mj. stanovovala přechodné období, pro které platila stará kritéria zmíněna na konci podkapitoly 3.1.2 této práce, a které by mělo původně skončit v roce 2019, ale vzhledem k neúspěšnosti splnění konstatovaných cílů bylo toto období prodlouženo vyhláškou č. 305/2019 Sb. do konce roku 2022 [30] [62]. Nový zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech všechny v tomto odstavci dosud uvedené vyhlášky a starý odpadový zákon zrušil a byl vydán s prováděcí vyhláškou č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady, která zahrnuje téměř všechna dosud vydaná zákonná ustanovení ohledně nakládání s různými druhy odpadů včetně kalů [63] [64]. Rozdíly mezi vyhláškou č. 437/2016 Sb. a vyhláškou č. 273/2021 Sb. nicméně jsou (je např. umožněno mísení kalů za určitých podmínek, nařizuje se brát v potaz preventivní hodnoty obsahů rizikových prvků v zemědělské půdě), ale dotčeným osobám se dovoluje pokračovat v provozu podle vyhlášky č. 437/2016 Sb. do konce roku 2022.

Legislativa EU týkající se zpracování kalů z ČOV je do českého právního řádu plně implementována. Tak nový zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech je reakcí na aktualizaci směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES, který uvádí výše popsanou hierarchii nakládání s odpady společně s vedlejšími úkony k její realizaci, jakožto např. zákaz skládkování energeticky využitelných odpadů včetně kalů (s výhřevností nad 6,5 MJ/kg) nebo jinak využitelných odpadů do roku 2030 či zákaz používat na půdu neupravené kaly. Neupravený kal se zařazuje do kategorie „Ostatní odpad“ a nakládat s ním tudíž je třeba v souladu s pravidly pro tuto kategorii. Naopak se upraveným kalem rozumí kal, „*který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě nebo jakémukoliv jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalu, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací na základě ověření účinnosti technologie úpravy kalů, pro který byl vypracován program použití kalů, nebo kal, který splňuje mikrobiologická kritéria stanovená vyhláškou*“ č. 273/2021 Sb. Dlouhodobé skládkování tak bylo konečně vyřazeno z předchozí definice upraveného kalu podle zákonu č. 185/2001 Sb. o odpadech. Navíc podmínky předávání upravených kalů k zapracování do půdy byly tímto zákonem razně zpřísněny, a to tak, že se kaly smí předávat od provozovatele zařízení na úpravu kalů pouze právnické nebo podnikající fyzické osobě, která půdu užívá, na základě programu použití schváleného ÚKZÚZ. Mísení kalů se v takovém případě nově dovoluje, ale výhradně osobě kal upravující, a to pouze s jinými kaly příp. s některými látkami vymezenými ve vyhlášce č. 273/2021 Sb., pokud je to pro půdu nebo rostliny přínosné. Při samotném použití kalů na půdu je třeba zohledňovat její kvalitu a dbát na jakost podzemních i povrchových vod [63].

Prováděcí vyhláška č. 273/2001 Sb. má pro kalové hospodářství větší význam, jelikož klade důraz na ta ohraničení, se kterými mají provozovatelé ČOV potíže od doby zavedení vyhlášky č. 437/2016 Sb. Ta posledně uvedená s sebou přinesla přísnější mikrobiologická kritéria pro upravené kaly vhodné k zemědělskému použití (Tab. 5) a rozšířila seznam sledovaných rizikových látek o požadavek na sledování obsahu PAU v kalech (Tab. 6) a půdě. Stejná mikrobiologická kritéria se uplatňují při posuzování vhodnosti upravených kalů a ověření technologie úpravy kalů z hlediska účinnosti hygienizace i podle vyhlášky č. 273/2001 Sb.

Tab. 5 Limitní hodnoty indikátorových mikroorganismů podle přílohy č. 28 k vyhlášce č. 273/2021 Sb. [64]

Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Počet zkoušených vzorků při každé kontrole výstupu		Limitní hodnota (nález/KTJ)
Salmonella spp.	nález v 50 g	5		negativní
Escherichia coli nebo Enterokoky	KTJ v 1 gramu	5	4 1	$< 10^3$ $< 5.10^3$

Tab. 6 Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (ukazatele pro hodnocení kalů) [64]

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech ($mg.kg^{-1}$ sušiny)
As – arzén	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb – olovo	200
Zn – zinek	2500
AOX	500
PCB	0,6
PAU	10

Vyhláška dál stanovuje pravidla pro nakládání s takhle upravenými kaly velice obdobná těm zavedeným dříve vyhláškou č. 437/2016. Shromažďování kalů bez speciálních nádob, kontejnerů, obalů atd. je dovoleno pouze pro kaly obsahující přinejmenším 18 % sušiny, ačkoli v speciálních nádobách se dovoluje shromažďovat kaly s obsahem sušiny 4 %. V každém případě kaly musejí být soustředěny odděleně, označeny podle zařízení na úpravu kalů a programu použití kalů a zabráněny před srážkovými nebo povrchovými vodami. Také je třeba zohledňovat skutečnost, že se některé půdní bloky nacházejí ve zranitelné oblasti vymezené vyhláškou č. 262/2012 Sb. o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu, která ve svojí řadě implementuje uvedenou v předchozí podkapitole směrnici Rady 91/676/EHS, a že místo pro skladování kalů na těchto pozemcích je nutno schválit havarijním plánem podle vodního zákona. Doba dočasného uložení se omezuje na 8 měsíců, po čemž by měly být kaly odváženy na půdní blok stanovený programem použití nejvýše 30 dnů před použitím. [64] [65]

Vyhláška zachovává ohraničení množství kalů, které se smí použít na 1 ha za rok, — 5 t sušiny na 1 ha — v souladu se směrnicí Rady 86/278/EHS, ale dovoluje uživatelům půdy použít dvojnásobek toho množství za podmínky, že použité kaly budou obsahovat „*méně*

než polovinu limitního množství každé ze sledovaných rizikových látek a prvků“ [64]. Legislativní předpis pak stanovuje omezení pro ochranu půdy samotné. Omezuje se množství dusíku vneseného do půdy, nařizuje se každých 10 let stanovovat na zemědělských půdách, na kterých se používaly kaly, celkový vnos vybraných rizikových látek a zakazuje se aplikace kalů na půdu, v níž již jsou překročeny preventivní hodnoty rizikových prvků včetně organických mikropolutantů (PCB, DDT, PAU atd.) podle vyhlášky č. 153/2016 Sb. o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy [66].

Všechna popsaná nově zavedená opatření jsou zjevně kontroverzní a tíhnou k principu předběžné opatrnosti, kterého se drží např. Německo, Nizozemsko a Rakousko. Ale pro Českou republiku se jedná o takovou drastickou změnu v nakládání s kaly, která v podstatě znemožňuje provozovatelům ČOV nejenom pokračovat v doposud nastaveném směru přímého použití na půdu, ale i včas se přizpůsobit novým požadavkům. K tomuto závěru přišlo např. Sdružení oboru vodovodů a kanalizací České republiky (SOVAK) a Česká asociace odpadového hospodářství (ČAOH) [67] [68], které ještě po vydání vyhlášky č. 437/2016 Sb. usilovaly o posunutí její účinnosti.

Postupně se objevily dva názory na další vývoj kalového hospodářství. Zvyšující se poplatky na skladování kalů a vysoké ceny za spalování např. v ZEVO vedou k názoru, že nejvýhodnější cestou je tyto náklady snížit tím, že se na sušárnách zmenší objem kalů. I když ekonomicky výhodným řešením v současné době to není, do budoucna se to jeví jako nezbytné, jelikož stávající kalové koncovky často potřebovaných parametrů nedosáhnou [68]. Připraví se tak ČOV na přechod na cestu termického zpracování. Dalším důvodem vydat se touto cestou je skutečnost, že z evropských trendů a legislativy vyplývá, že se v nejbližší budoucnosti může být zaveden požadavek na recyklaci fosforu, jehož koncentrace v kalu roste s obsahem sušiny [69], přičemž největší zisk recyklovaného fosforu se očekává právě z popelu po spalování [53]. Příkladem v České republice ČOV, která se tímto směrem vydala, je ČOV v Karlových Varech, která své kaly suší až do 90 % sušiny [70].

Je však i jiný pohled na věc: většinu z nově nedostatečně upravených kalů se dá předat do kompostu. Kompostování by mělo výrazně zlepšit mikrobiologické parametry kalů a umožnit využití pro zemědělské účely. Tak v již zmíněných podkladech pro MŽP zpracovaných společností Ernst&Young, s.r.o., se uvádí prognóza materiálového využití kalů, ve které dochází k přesunu větší části kalů do jiného způsobu využití, tj. do

kompostování [6, s. 95]. Autoři však upozorňují, že, stávající kapacita kompostáren v České republice, i když je teď postačující, v uvedeném scénáři pravděpodobně postačovat nebude. Navíc někteří provozovatelé kompostáren zřejmě nejsou ochotní *„zajišťovat dodatečné podmínky a požadavky vztahující se právě na provoz při využívání kalů z ČOV“* [6, s. 91]. Podle autorů podkladů je třeba českou síť kompostáren dál optimalizovat. Zatím ale není jasné, jak se bude vyvíjet potravinářský trh po přijetí nařízení Evropského parlamentu a Rady 2019/1009 o dodávání hnojivých výrobků na trh. V každém případě to sníží zájem pěstovatelů o kaly a zvýší poptávku po hnojivech obsahujících STRUBIAS.

Z výše uvedených předpokladů je vidět, že, i když se provozovatelům ČOV, pro které nová kritéria obsahu nebezpečných látek v kalech znamená částečné nebo úplné znemožnění přímé aplikace, podaří zpracovat veškerý kal na kompostárnách, stejně bude zapotřebí snížit objemy vyprodukovaného kalů z hlediska dostupné kapacity kompostáren a zpřísnění požadavků na dočasné uložení. Zvětšuje se tak význam odvodňování a sušení. Ale v případě přesunu větší části zpracovaných kalů do termického zpracování (např. spalování), bude to nutné i z hlediska snížení poplatků za zpracování.

3.3 Konvenční principy zpracování kalu

Odvodnění kalu, které je předmětem této diplomové práce, je zpravidla poslední stupeň zpracování kalu před jeho likvidací nebo použitím. Zpracováním kalu se nejčastěji rozumí zneškodnění kalu a výrazné zmenšení jeho objemu čili převedení tohoto druhu odpadu do podoby podléhající legislativním a provozním požadavkům pro přijetí do zařízení na likvidaci kalu nebo směsného odpadu. Cílem kalové koncovky je zvýšení DSC ve výsledném produktu. Slovy profesora M. Scholza: Cílem je *„převést problém znečištěné vody na problém nakládání s pevným odpadem“* [71, s. 157].

Typická kalová koncovka na komunálních ČOV se může, ale nemusí dělit na tři stupně:

- zahušťování,
- stabilizace a hygienizace,
- odvodnění a sušení.

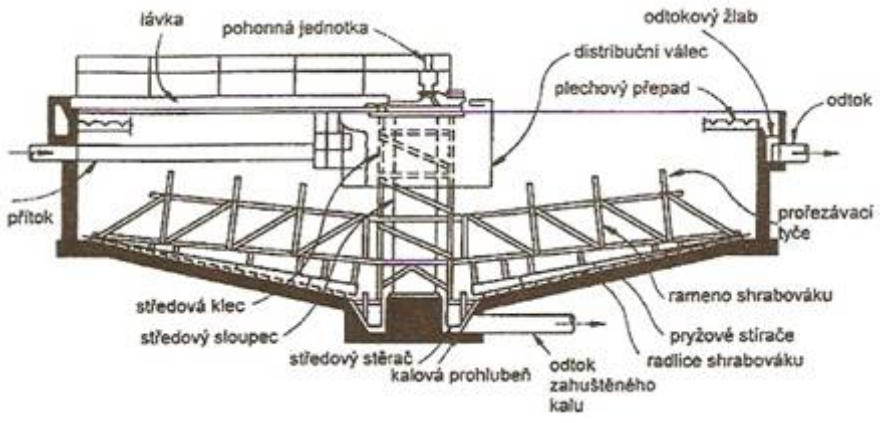
3.3.1 Zahušťování kalu

Proces zahušťování kalu je založen na odstranění volné vody ze suspenze (viz. Tab. 2) nejčastěji pomocí gravitace, což výrazně zmenší objem odtékajícího kalu. Umístění zahušťovací jednotky na ČOV má následující výhody: podstatně zmenšuje potřebnou velikost zařízení na další úpravu kalu, snižuje spotřebu chemikálií vyžadovaných dalšími procesy a snižuje množství tepla, které je potřebné k ohřátí kalu např. ve vyhnívacích nádržích [4]. Zahušťovací zařízení běžně upravují 1% kal na 2 až 3% v závislosti na druhu kalu [14], přičemž i jednoprocentní zvýšení obsahu nerozpuštěných látek v kalech ve skutečnosti znamená dvakrát nížší objem kapaliny.

Zahušťování kalu může probíhat ve samostatných zařízeních i usazovacích nádržích. Mezi nejčastěji volená samostatná zařízení patří gravitační zahušťovací nádrž, DAF jednotka a gravitační pásový zahušťovač.

Zahušťovací nádrž

Gravitační zahušťovací nádrž funguje na stejném principu jako usazovací nádrže. Zpravidla se jedná o kruhovou železobetonovou nebo ocelovou nádrž s pomalu otáčejícím se shrabovákem (Obr. 4), která slouží k homogenizaci natékajícího kalu a vypouštění plynů obsažených ve hmotě. Zahušťovací nádrže jsou vhodné pro všechny druhy kalu, především pro primární a sekundární kaly [14]. Klíčovými parametry jsou kalový index a podíl organické hmoty v sušině, které jsou v nepřímé závislosti na DSC zahuštěného kalu [72].



Obr. 4 Gravitační zahušťovací nádrž [73]

Zahušťovací nádrže se navrhují na určité povrchové hydraulické zatížení v_{ds} a dobu zdržení SRT.

$$v_{ds} = \frac{Q_s \cdot x_{sl}}{A} \; [kgDS/(m^2 \cdot d)] \tag{7}$$

kde Q_s je průtok kalu [m^3/d], x_{sl} je koncentrace kalu [kg/m^3], A je plocha nádrže.

$$SRT = 1 = \frac{objem\ kalu\ v\ nádrži}{denní\ odtok\ z\ nádrže} \; [d] \tag{8}$$

Povrchové hydraulikcé zatížení se volí podle druhu kalu (100 až 150 kgDS/(m^2·d) pro primární a 20 až 30 kgDS/(m^2·d) pro aktivovaný kal). Doba zdržení je obvykle nastavována na jeden den z důvodů vyhnívání kalu a současného vzniku bublin plynu ve hmotě.

Spotřeba elektřiny na provoz těchto zařízení je zpravidla mnohem menší ve srovnání s ostatními stupni zpracování kalu a činí přibližně 5 až 10 kWh·t_{DS}^{-1} [3].

V České republice je možné se setkat s akumulačními provzdušovanými nádržemi, ve kterých se kal homogenizuje pomocí aeračního systému. Taková kalová akumulační nádrž je postavena na komunální ČOV v Rudné pod Prahou a slouží k obdobným účelům jako zahušťovací nádrž [74].

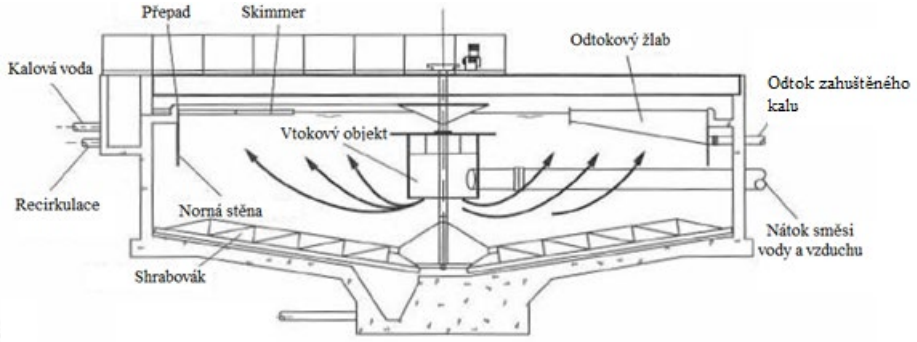
Statické zahušťování v zahušťovacích nadržích má však určité zápory. Společnost Degrémont ve své učebnici uvádí, že gravitační zahušťování přebytečného aktivovaného kalu „*zůstává spíše zklamáním*“ [3]. Další nevýhodou je nepřehlédnutelné uvolňování nutrientů z kalu v případných anaerobních podmínkách [75].

Flotační zahušťovač

Za nejrozšířenější způsob zahušťování ve světě se někdy pokládala flotace rozpuštěným vzduchem (čili DAF) [3]. Používá se zejména pro zahušťování přebytečného aktivovaného kalu [76], i když její vhodnost coby metoda zahušťování pro primární kaly a kaly z biofiltrů je některými autory zpochybněna [14]. Dynamické zahušťování na flotační jednotkách, jak se tomu na rozdíl od gravitačních zahušťovacích zařízení říká, funguje na stejném principu oddělení kapalné fáze od tuhé jako flotační jednotky určené k čištění odpadních vod (viz. kapitolu 3.4 Flotace rozpuštěným vzduchem) a je vhodné pro lehké, hydrofilní kaly [3]. Rozdíly v kostrukčním řešení však jsou.

Podle příručky Suez flotační jednotky určené k zahušťování kalů by měly být hlubší než jednotky na čištění odpadních vod, mít kruhový půdorys a speciální kryt proti zápachu. Saturace v plném proudu je preferována, což umožňuje se vyhnout dávkování chemikálií při úpravě biologického kalu bez ohledu na jeho kalový index i VS [3] [77]. Dalším rozdílem je

speciální konstrukce shrabováku, který by měl zachytit velké množství kalu [77]. Obecně se flotační zahušťovač podobá běžné flotační jednotce (Obr. 13).



Obr. 5 Obecná schéma flotační jednotky (přeloženo a upraveno) [4]

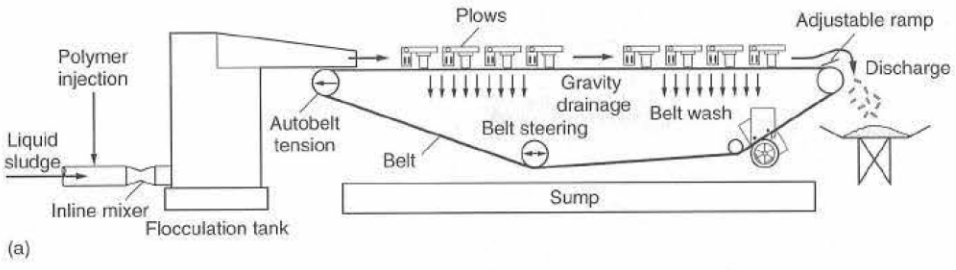
Účinnost flotace je závislá na charakteristice kalu, hydraulickém povrchovým zatížení flotační jednotky, použití flokulantu a na poměru vzduchu ve směsi [4]. Hmotnostní poměr vzduchu a pevných částic je považován za nejdůležitější faktor ovlivňující provoz DAF zahušťovačů. Optimální hodnoty tohoto parametry jsou uváděny v rozsahu 2 až 6 % [4] [14], což umožňuje zahustit kal na 4 až 5 % sušiny [76].

Energeticky se jedná o poměrně náročné zařízení vyžadující 60 až 120 $kWh \cdot t^{-1}$ [3].

Pasový zahušťovač

Gravitační pásový zahušťovač spoléhá na koagulaci a flokulaci a odděluje volnou vodu ze flokulované suspenze pomocí pohyblivého filtračního pásu. Výhodami jsou vysoká míra zachycení pevných částic ve filtrátu (až 95 %), což je jeden z nejdůležitějších parametrů pro zařízení na zpracování kalu, a vysoká účinnost. Pásový zahušťovač obecně zajišťuje převedený 0,4% kalu na 4 až 8% kal. Tento způsob zahušťování kalu se stal populární v 80. letech. [14]

Důležitou součástí systému s pásovým zahušťovačem je potrubní mísič nebo flokulační nádrž (Obr. 6).



Obr. 6 Schéma pásového gravitačního zahušťovače [4]

Spotřeba elektřiny u pásových zahušťovačů je nižší než u DAF jednotek a činí přibližně 25 až 50 $kWh \cdot t_{DS}^{-1}$ [3].

Mezi další populární zařízení na zahušťování kalu patří odstředivky, rotační bubny, síta atd. [4].

3.3.2 Stabilizace kalu

Na tomto stupni se kal zneškodňuje tím, že prochází stabilizací organické hmoty. Stabilizací se rozumí taková úprava, po které se většina biologický rozložitelných látek v kalu převedou na minerální nebo těžce rozložitelné látky [76]. Výsledný stabilizovaný kal nepáchne a hodí se více na další úpravu, protože obsah organické hmoty — a následně i objem kalu — je výrazně nižší [72]. Mezi nejrozšířenější možné způsoby stabilizace patří anaerobní, aerobní a zásaditá stabilizace [4].

Anaerobní stabilizace se provádí ve speciálních zařízeních za dodávaní kyslíku, který je v tomto případě akceptor elektronů. Veškerý uhlík se přemění na oxid uhličitý (viz. rovnice (*9)*) [72]. Je to poměrně náročný proces z hlediska spotřeby elektřiny.

$$OM + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + NH_4^+ + PO_4^{3-} + \cdots \quad (9)$$

Nákladově nejefektivnější způsob stabilizace organického podílu v sušině je anaerobní vyhnívání v anaerobních podmínkách. Nejen, že nevyžaduje provzdušňovací systém, ale produkuje bioplyn, který lze využít k výrobě elektrické i tepelné energie (viz. rovnice *(10)* [72]).

$$OM \rightarrow CO_2 + H_2O + CH_4 + NH_4^+ + PO_4^{3-} + \cdots \quad (10)$$

Uhlík zde vystupuje jako donor i akceptor elektronů. Oxid uhličitý je nejoxidovanější forma uhlíku, zatímco metán je nejredukovanější. Metán, oxid uhličitý a další plyny tvoří bioplyn, který je následně spalován v kogeneračních jednotkách. [72]

Kalové vyhnívací nádrže jsou kontinuálně plněny a promíchávány. Někdy mají kupoli nebo tvar vejce. Stabilizace ve vyhnívacích nádržích zajišťuje alespoň 50% snížení organického podílu v sušině. Výsledný kal dosahuje 4 až 6% obsahu sušiny a je vhodný k použití na zemědělskou půdu [72].

Na rozdíl od způsobů anaerobního i aerobního vyhnívání chemická stabilizace nevyžaduje velké jednotky a umožňuje úspornější řešení stabilizace kalu. Je založená na bakteriostatickém účinku zásaditých chemikálií (oxid vápenatý, hydroxid vápenatý).

Zásaditá stabilizace se nejčastěji provádí dávkováním hašeného vápna. Je to osvědčený a nenáročný proces, který probíhá podle rovnice *(11)* [4].

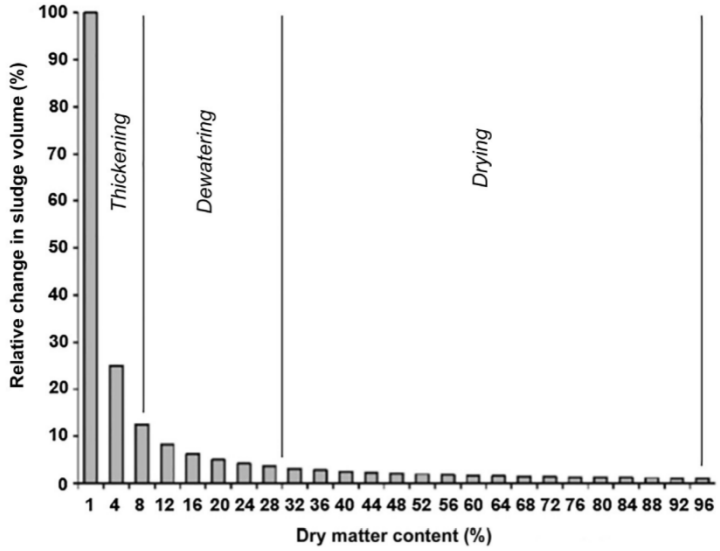
$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- + CaO \rightarrow 2CaCO_3 + H_2O \qquad (11)$$

Vápno se může dávkovat buď před zahušťovacím zařízením, aby se vyhnulo nežádoucímu nekontrolovatelnému vyhnívání kalu, anebo do kalového koláče.

Nevýhodami tohoto způsobu stabilizace je nevhodnost použití na zemědělské půdě a o 15 až 50 % větší objem ve srovnání s anaerobní i aerobní digescí. V neposlední řadě všechny druhy stabilizace zvyšují odvodnitelnost čistírenského kalu [4].

3.3.3 Odvodňování a sušení kalu

Zatímco stabilizace a hygienizace slouží ke zneškodnění kalu, zahušťování, odvodňování a sušení značně snižuje obsah volné i koloidně vázané vody a tím má pozitivní ekonomický dopad na navazující likvidaci či použití kalu, především je to úspora nákladu na transportní logistiku [78].



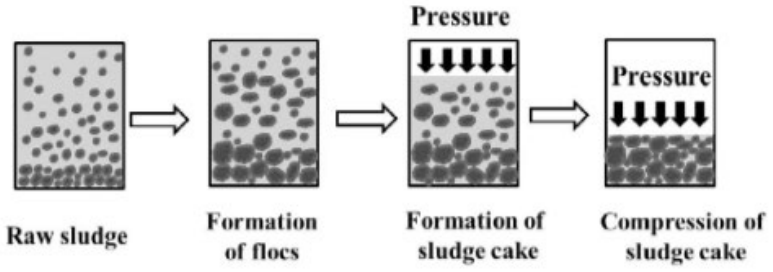
Obr. 7 Graf závislosti relativní změny objemu na obsahu sušině v kalu [78] — „thickening" je zahušťování, „dewatering" je odvodňování a „drying" je sušení

Výběr technologií odvodňování, stejně jako u předchozích stupňů úpravy kalu, závisí mj. na vlastnostech kalu, finančních možnostech investora a konečném použití kalů. Většinou se provozovatelé ČOV snaží dosáhnout hodnoty DSC ve výsledném kalovém koláči kolem 20 až 30 procent, na což je zapotřebí ošetření kalu [72]. Ošetření je většinou chemické, ale může být termické i ultrazvukové.

Chemickou předúpravou kalu před mechanickým odvodňováním se obvykle rozumí přidání polyelektrolitů nebo jiných polymeru, které zlepšují elektrochemické interakce mezi částicemi kalu, aby se vytvořilo více volné vody. Nejčastěji se jedná o kationové polymerové flokulanty na vodní bázi. Dávka flokulantu se nachází v rozmezí 3 až 8 g na kg sušiny [72]. Levnější možností však je vápno, chlorid železitý, další železité a hlinité soli, což vyžaduje mnohem větší množství přípravku, aby bylo účinné: zpravidla 300 g na kg sušiny [72] [79]. Chemické ošetření kalu ovlivňuje především velikost kalových vloček, jejich pevnost a povrchový náboj [79]. Chemikálie se promíchávají s kalem ve flokulačních nádržích, statických a dynamických mixérech.

Termický způsob ošetření kalu spočívá v zahřátí stabilizovaného anebo nestabilizovaného kalu na teplotu 175 °C za účelem ničení stěn mikrobiálních buněk a uvolňování intracelulární vody [80]. Ultrasonické ošetření využívá ultrazvuku k deaglomerování biologických vloček a rozrušení velkých organických částic na částice menší velikosti [81].

Po předúpravě kalu následuje odvodnění. Konvenčními odvodňovacími zařízeními jsou odstředivky, pásové a komorové kalolisy [72]. Na ČOV Rudná se používá šroubový kalolis VOLUTE™, který je podrobněji popsán na začátku kapitoly 4 „Vývoj prvků optimalizace mísení a flotace“. Většina způsobů odvodňování kalu je založena na mechanickém principu, když na zflokulovaný kal je vynaložen tlak, v důsledku čehož se vytěsňuje voda (Obr. 8).



Obr. 8 Obecné znázornění principu odvodňování kalu (surový kal, tvorba vloček, tvorba kalového koláče a stlačení kalového koláče)

Další stupeň sušení kalu umožňuje dosáhnout hodnoty sušiny v kalu kolem 95 % [72]. Princip sušení kalu je velice jednoduchý a spočívá v aplikaci tepla k odpaření veškeré vody, což vede k dalším úsporám nákladů na skládkování, transportování a dočasné uložení kalu [14].

3.4 Mísení kalu s chemikáliemi v potrubních mísičích

Jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, surový kal často vyžaduje chemické ošetření před odvodňováním, aby se dosáhlo největší sušiny ve výsledném kalovém koláči. Efektivita takového ošetření je závislá na dokonalosti mísení kalu s chemikáliemi a kvalitě vytvořených vloček. Na to může být použita řada zařízení: flokulační nádrže s míchadlem, zařízení využívající vodního skoku, pneumatické mixéry používající stlačený vzduch a potrubní mísiče [14]. Ale, přestože mísení tekutin v potrubních zařízeních byla věnována velká akademická i komerční pozornost, je to jeden z nejméně pochopených míchacích mechanismů [82].

Statické potrubní mixéry jsou geometricky specifické trubky, které ovlivňují strukturu proudění takovým způsobem, aby podporovala sekundární příčné toky, které vyvolávají přenos hmoty v průřezu (Obr. 9). Často se jedná o trubku s opakujícími se vestavnými konstrukcemi, jimž se říká „míchací elementy“ (Obr. 24). Účelem míchacích elementů je redistribuovat tekutinu ve směrech příčných k hlavnímu toku. Statické mísiče rozdělují a přerozdělují proudnice pouze za použití energie proudící tekutiny, která je jí dodána čerpadlem. [83]

Výhodami potrubních mixérů jsou vysoká účinnost mísení, téměř neexistující doba zdržení, úspora místa a materiálů, nenáročná údržba, minimum mrtvých zón a — v případě statického potrubního mísiče — nižší spotřeba elektřiny [84]. Známými nevýhodami však jsou velké tlakové ztráty (zpravidla kolem 8,8 kPa) a pevná závislost rychlostního gradientu na průtoku v systému [14]. Distribuce rychlostního gradientu je důležitá pro agregaci kalových vloček.

Agregace vloček v míchacích zařízeních je složitý proces tvorby kalových vloček, jež se charakterizují především svojí velikostí a hutností. Kdežto velikost vloček je dnes vnímána spíše jako ukazatel efektivity separace vloček, hutnost vloček je mnohem důležitější vlastnost z technologického hlediska [85]. Tyto vlastnosti vloček závisí na distribuci rychlostního gradientu v příčném a podélném profilu, který popisuje vířivost proudění v mísiči. Nižší hodnoty rychlostního gradientu způsobují velké křehké vločky, zatímco vyšší hodnoty toho parametru způsobují agregaci pevných vloček. [85] Jednotlivé vločky mají určitou pevnost v tahu, takže rychlostní gradient by zároveň neměl být příliš velký, aby se vločky neroztrhly. Najít rovnováhu mezi nízkou tlakovou ztrátou a optimální

distribucí rychlostního gradientu se tak stává úkolem návrhů nových řešení statických i dynamických mísičů.

Velmi málo bylo uděláno proto, aby se potrubní statické mixéry standardizovaly [86], třebaže první patenty pocházejí z roku 1878 [84]. Současně není vždycky jasné, jak jejich efektivitu hodnotit [87]. Právě proto například potrubní mísiče, které byly navrženy v rámci této diplomové práce, se hodnotily podle výkonnostních parametrů odvodňovacího zařízení, nikoliv podle laboratorně stanovené rovnoměrnosti promíchávání, i když se takové experimenty ve světě prováděly [88] a jsou v plánu na ČVUT. Nicméně existuje konsensus, jak statické mísiče roztřídit do kategorií podle tvaru míchacích elementů. Jsou to především šroubovicové mísiče, mísiče s usměrňovači proudu nebo lopatkami (viz. kapitola 4.2), mísiče se vlnitými míchacími elementy, mísiče s vícevrstvými míchacími elementy, mixéry s kanály a mísiče využívající síťové clony [83] [84] [89].

Obr. 9 Komerčně dostupné varianty statických potrubních mísičů — první řada zleva: PRIMIX, Statiflo, AxFlow, Komax, Sulzer.

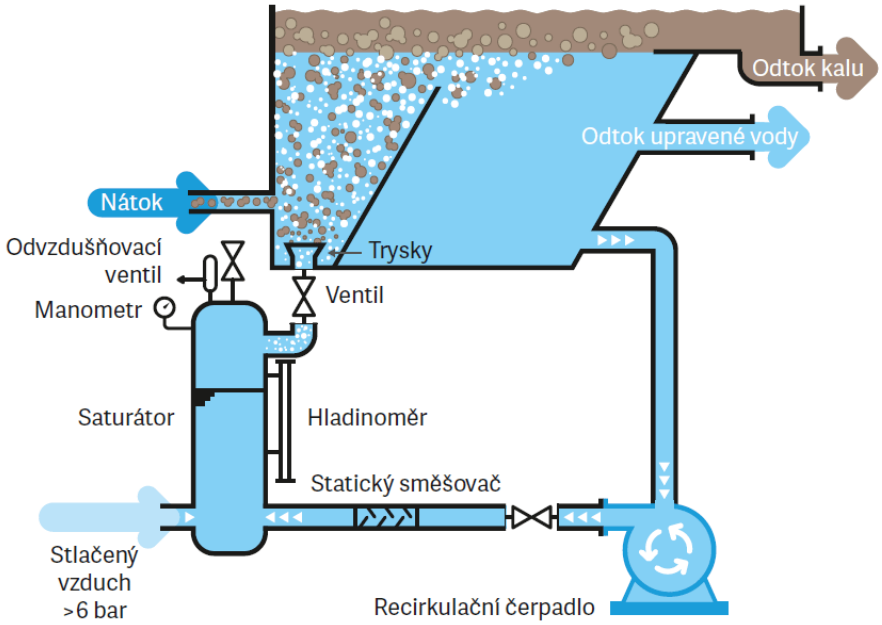
V současné době matematická simulace proudění tekutin v statických mixérech a výpočet tlakové ztráty v nich pomocí CFD simulačních nástrojů poskytují důvěryhodné výsledky. CFD simulace je vhodná na návrh prototypů potrubních mísičů [84].

Potrubní dynamické mísiče jsou oproti statickým daleko méně prozkoumané. Jeden z důvodů takového nedostatku pozornosti vědců je to, že dynamické mixéry jsou dražší, ale zároveň jsou jednodušší a spolehlivější z hlediska kvality promíchávání.

Dynamické mixéry se obvykle skládají z rotoru, který se otáčí vysokou rychlostí uvnitř trubky. Kalové vločky uvnitř trubky vystaveny extrémně vysokým smykovým napětím [86], proto mohou být malé a křehké. Příkladem dynamického mísiče je mixér značky *MPT Meß- und Prozeßtechnik GmbH*, který se používal při testování na ČOV v Rudné (Obr. 33).

3.5 Flotace rozpuštěným vzduchem

Flotace je proces oddělení pevných částic obsažených v suspenzi pomocí jemných bublinek plynu (nejčastěji vzduchu). Při konvenční flotaci rozpuštěným vzduchem (v anglickém názvosloví se používá zkratka DAF — *dissolved air flotation*) se vzduch zavádí do suspenze, která se udržuje pod zvýšeným tlakem v saturátoru. Po přečerpávání suspenze do flokulační komory se tlak přirozeně sníží, čímž uvolní rozpuštěný vzduch v podobě jemných bublinek vynášejících kal nahoru, který je následně odstraněn z hladiny skimmerem (Obr. 10). [4] Upravená voda odtéká přepadem.

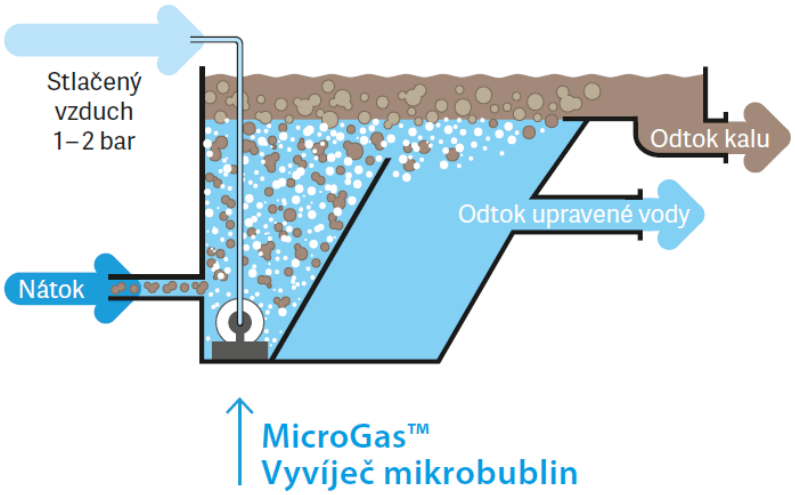


Obr. 10 Schéma tradiční flotace [90]

Bubliny vzduchu vážou na sebe pevné částice pomocí adheze, zachycování, adsorpce a dalšími mechanismy. Při správném nastavení systému se průměr bublin vzduchu nachází v rozmezí 10 až 100 µm. Nejdůležitějším faktorem účinnosti separace rozpuštěným vzduchem je hmotnostní podíl vzduchu a pevných částic (viz. kapitola 3.3.1 — *flotační zahušťovač*) [14].

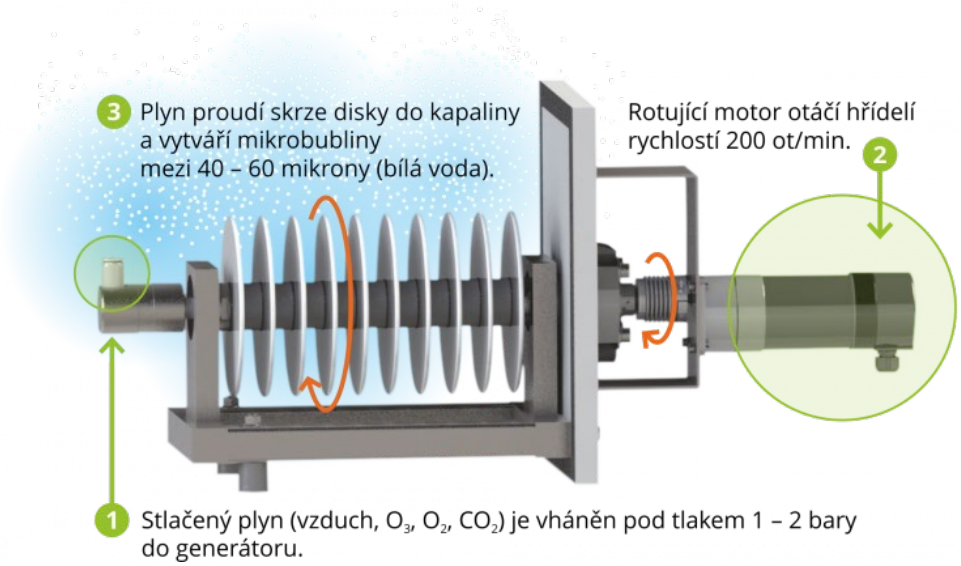
Způsob optimalizace DAF, který v poslední době nabírá na popularitě, je DAF s mikrobublinným generátorem (průměr bublin se nachází v rozmezí 10 až 15 µm) [91].

V takovém případě mikrobubliny se generují přímo ve flotační nádrži v kontaktní zóně. Separace probíhá v další separační zóně (Obr. 11).



Obr. 11 Schéma optimalizovaného řešení DAF AMCON [90]

Mikrobublinný generátor se skládá ze speciálního rotoru, který otáčí keramickými disky generátoru, který vhání do vody vzduch (Obr. 12). Právě toto řešení s předřazeným dávkováním flokulantu se optimalizovalo v rámci této diplomové práce.

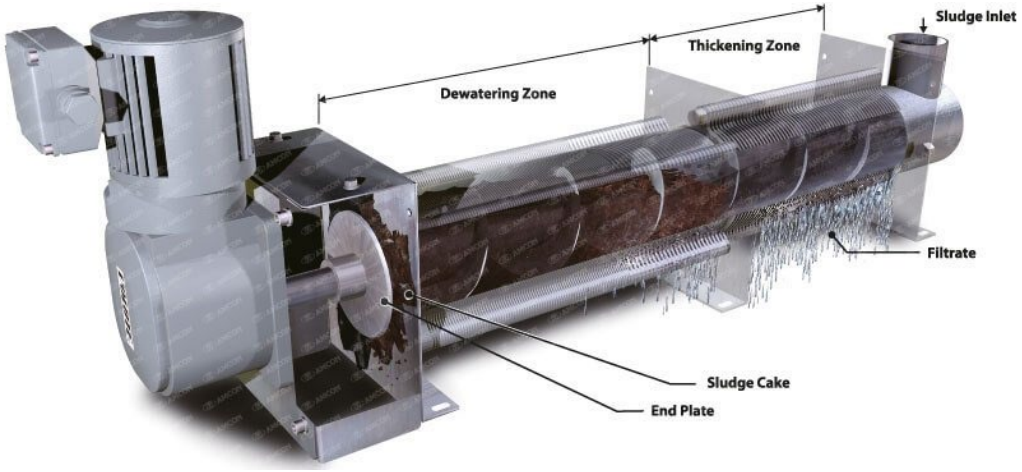


Obr. 12 Princip fungování mikrobublinného generátoru

4 Vývoj prvků optimalizace mísení a flotace

Vývoj a ověření potrubního mísiče a samostatné flotační jednotky probíhal v rámci projektu „AMCO“ evropské centrály společnosti AMCON Europe s.r.o. (dále jen „AMCON“) se sídlem v okresu Praha-západ. Projekt byl podpořen z Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost (Evropský fond pro regionální rozvoj). Podle interních dokumentů se jedná o inovační projekt, jehož cílem je dosazení optimálního mísení chemikálií s kalem a automatizace dávkování chemikálií za využitím kamerového zařízení hodnotícího kvalitu zflokulovaných vloček pro účely odvodňování kalů. Partnerem ve výzkumu pro tento projekt se stal Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB). [92]

Společnost AMCON byla založena v Japonsku v roce 1974 a z poloviny devadesátých let se soustřeďuje na vyvinutí, prodeje a provozu vlastních zařízení na odvodňování kalů po světě. Jedna z nejúspěšnějších technologií firmy je odvodňovací lis VOLUTE™ (Obr. 13), který zahušťuje a odvodňuje kal. Tento lis se skládá z filtrační vložky tvořené pevnými a pohyblivými lamelami, do které se vkládá šroubovice tlačící kal ven přes lamely. Tlak se zvyšuje po délce cylindru díky uspořádání lamel a rozteči závitu, a tak natékající kal se rozděluje na dva produkty odvodňování: kalová voda odtékající zpátky na čistírnu a odvodněný kal (kalový koláč). Výhodami jsou samočištění filtrační složky, snadná obsluha a údržba a použitelnost pro různé druhy odpadních vod. [93]



Obr. 13 Odvodňovací lis VOLUTE™ [93]

Projekt „AMCO“ se skládá ze 6 částí: potrubní mísič chemikálií s kalem, kamerové zařízení pro hodnocení kvality kalových vloček, pokročilý systém monitoringu a ovládání,

zahušťovací jednotka, soubor jednotlivých technologií na monitoring procesu odvodňování ve formě balíčku (např. v kontejneru) i flotační jednotka. Potrubní mísič (nebo též směšovač, mixér) by měl optimalizovat dávkování chemikálií pro proces odvodňování na odvodňovacím lisu VOLUTE™ i čištění odpadní vody na flotační jednotce. Prototyp flotační jednotky (Obr. 14) se vyvíjel s podporou Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky již před zahájením projektu „AMCO“ [94], takže cílem společného projektu AMCON a UCEEB byla optimalizace tohoto zařízení.

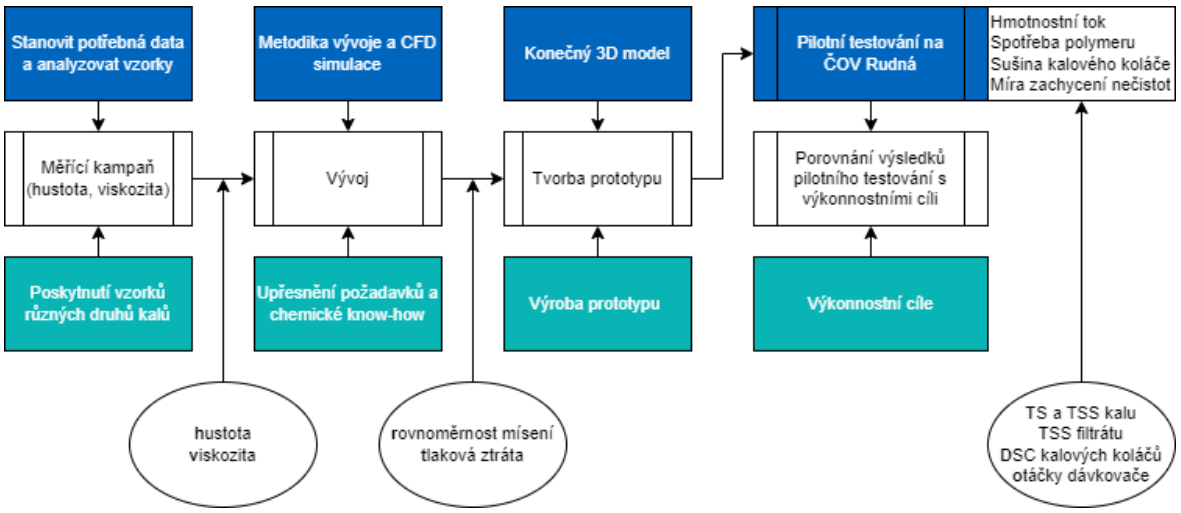
Obr. 14 Prototyp flotační jednotky od AMCON [92]

Flotační jednotka AMCON s produktovým názvem „Eco-Float“ (nebo též „EC-5“) již používala zjednodušenou technologii generování mikrobublin přímo v jednotce, což umožňuje výraznou úsporu ve srovnání s tradičním schématem zapojení flotační jednotky s použitím vnějšího saturátoru [90].

Tak úkoly pracovního týmu UCEEB v souvislosti se směšovačem a flotační jednotkou zahrnovaly

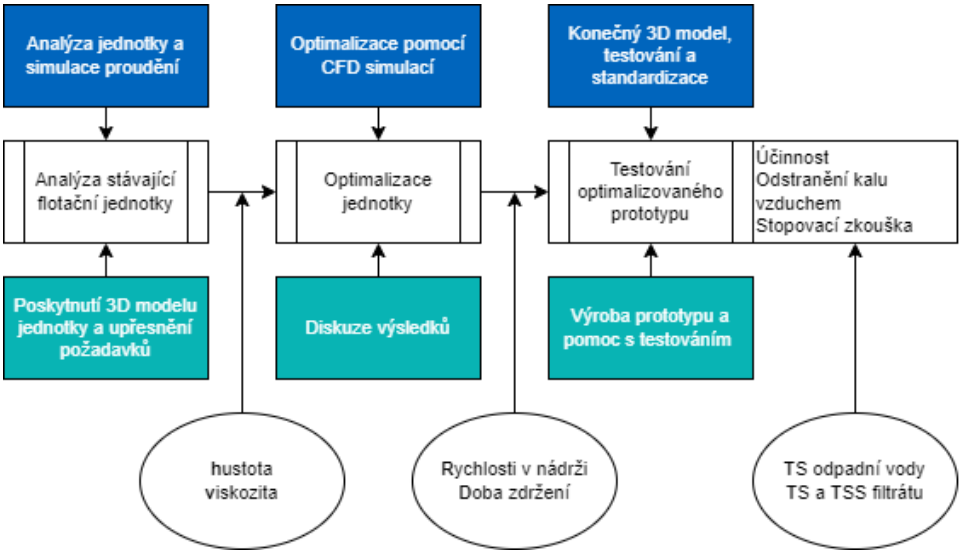
- sběr dat a analýza vzorků různých typů kalů,
- vývoj prototypu statického i dynamického potrubního mísiče a zdokonalení DAF jednotky pomocí CFD simulace
- ověření těchto zařízení ve spoluprací s pracovníky AMCON *in situ* a v laboratoři Fakulty stavební ČVUT.

Metodika vývoje potrubních mísičů je znázorněna na diagramu dole (Obr. 15). Jednotlivé úkoly jsou barevně rozděleny podle toho, jestli to měl na starosti pracovní tým ČVUT (modré obdélníky) nebo AMCON (tyrkysové obdélníky). V oválech jsou uvedeny chemicko-fyzikální parametry, které byly stanoveny v předchozím kroku plánu a využity v následujícím.



Obr. 15 Vývojový diagram vývoje a ověření potrubních mísičů

Obdobný diagram optimalizace flotační jednotky je uveden dole .



Obr. 16 Vývojový diagram vývoje a ověření potrubních mísičů

4.1 Měřící kampaň

Měřící kampaň začala 3.2.2021 na ČOV v okrese Rudná. Je to malá čistírna s kapacitou 9200 EO, která poskytuje část území společnosti AMCON pro umístění vývojového a experimentálního střediska na své kalové koncovce (viz. Příloha 1. Schéma experimentálního a vývojového střediska AMCON na ČOV Rudná). V budově experimentálního střediska se nachází zařízení na odvodňování kalů (Obr. 17) používající odvodňovací lis a zahušťovač VOLUTE™ napojený na výtlačné kalové potrubí. Zařízení je vybaveno automatickým sprchovým systémem s tryskami na čištění cylindru čistou vodou, a kalová voda (nebo též filtrát) je odváděna zpátky na čistírnu zvláštním potrubím.

Obr. 17 Zařízení na odvodňování kalu na ČOV Rudná

Cílem kampaně bylo získat a databázově zpracovat co nejvíce kvantitativních znalostí o chování různých druhů kalů, odpadních vod a používaných chemikálií, aby se tato data zadala do simulačního nástroje pro fluidní dynamiku anebo se použila při dalších úkolech v rámci projektu. Kal z ČOV v Rudné byl reprezentativním vzorkem komunálního čistírenského kalu. Během prvních dvou dnů se odebralo několik vzorků odpadní vody, surového kalu a flokulantu ředěného vodou na 0.1 % (tehdy se používal polymer YESfloc® CP50 v práškové formě vyráběný společností CHEM.ENGI s.r.o.).

Po odebírání vzorků se provádělo testování sedimentačních vlastností zflokulovaného kalu v sedimentační koloně. K tomuto účelu bylo zapotřebí stanovit optimální dávku flokulantu s pomocí tzv. *jar* testu, což je kvalitativní odhad dávky flokulantu pro zvolené

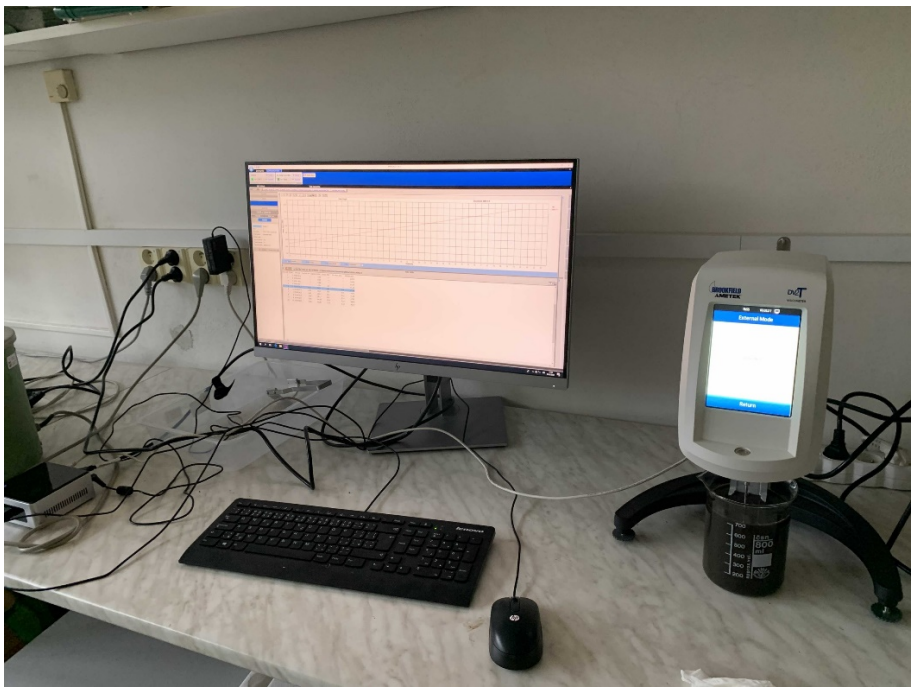
množství kalu v kádince, při níž se pozorují nejpevnější vločky a čistý filtrát. Optimální dávka činila 21 ml naředěného flokulantu na 200 ml kalu. Tímto způsobem zflokulovaný kal byl načerpán do sedimentační kolony s označením hloubky tekutiny v koloně (pro sledování rozdělení vloček a úrovně hladiny) a LED páskou (Obr. 18). Usazovací rychlost je důležitým parametrem, který se dá zadat do simulací proudění suspenzí, ale v případě kalů se často stává, že je roven nule.

Obr. 18 Přečerpávání zflokulovaného kalu do sedimentační kolony

Následně byly odebrané vzorky převezeny do laboratoře Fakulty stavební ČVUT, kde se změřily jejich viskozity, hustoty a koncentrace nerozpuštěných látek. Kromě vzorků čistírenského kalu, odpadní vody a flokulantu z ČOV Rudná se do laboratoře převezly vzorky papírenského kalu, odpadní vody a flokulantu z papírny společnosti KRPA PAPER, a.s., potravinářský kal, odpadní voda a flokulant z výroby uzenin LE & CO – Ing. Jiří Lenc, s.r.o., a odpadní voda a flokulant z Mlékárny Klatovy, a.s. Celkem během měřící kampaně bylo zpracováno 27 vzorků (viz. Příloha 2. Kompletní seznam odebraných vzorků). Kromě měření jejich hustoty, viskozity a koncentrací nerozpuštěných látek se prováděly další pokusy v sedimentační koloně za účelem zjištění usazovací rychlosti pevných částic a sedimentačních křivek. Tyto čtyři získané parametry se pak zadávaly do databáze kalů a některé z nich následně do simulačního nástroje.

4.1.1 Měření viskozity

Viskozita byla změřena pomocí rotačního viskozimetru DV2T značky Brookfield Ametek® (Obr. 19). Daný typ viskozimetrů využívá toho, že při otáčení vřetena ponořeného do kapaliny je toto vřeteno brzděno sílou, která je přímo úměrná viskozitě kapaliny. Tato síla se přenáší na hřídel viskozimetru a následně deformuje připevněnou na něho speciální pružinu. Měření viskozity odebraných vzorku probíhalo tak, že vybrané vřeteno, jež se točí v kádince se vzorkem, se každých 30 sekund zrychlovalo, a pro každou rychlost otáčení se přístroj zaznamenával vychýlení kalibrované pružiny způsobené viskózním tahem kapaliny v podobě procentního podílu točivého momentu pružiny, z čehož se pak vypočítává viskozita.



Obr. 19 Rotační viskozimetr DV2T napojený na PC v procesu měření

Vzhledem k tomu, že se kal chová jako nenewtonská kapalina, výsledkem měření je graf nelineární závislosti smykového napětí na smykové rychlosti, nikoli jediná hodnota.

Smyková rychlost $\ddot{\Upsilon}$ [s^{-1}] a smykové napětí τ [Pa] se pak vypočítávají podle vzorců (12) a (13).

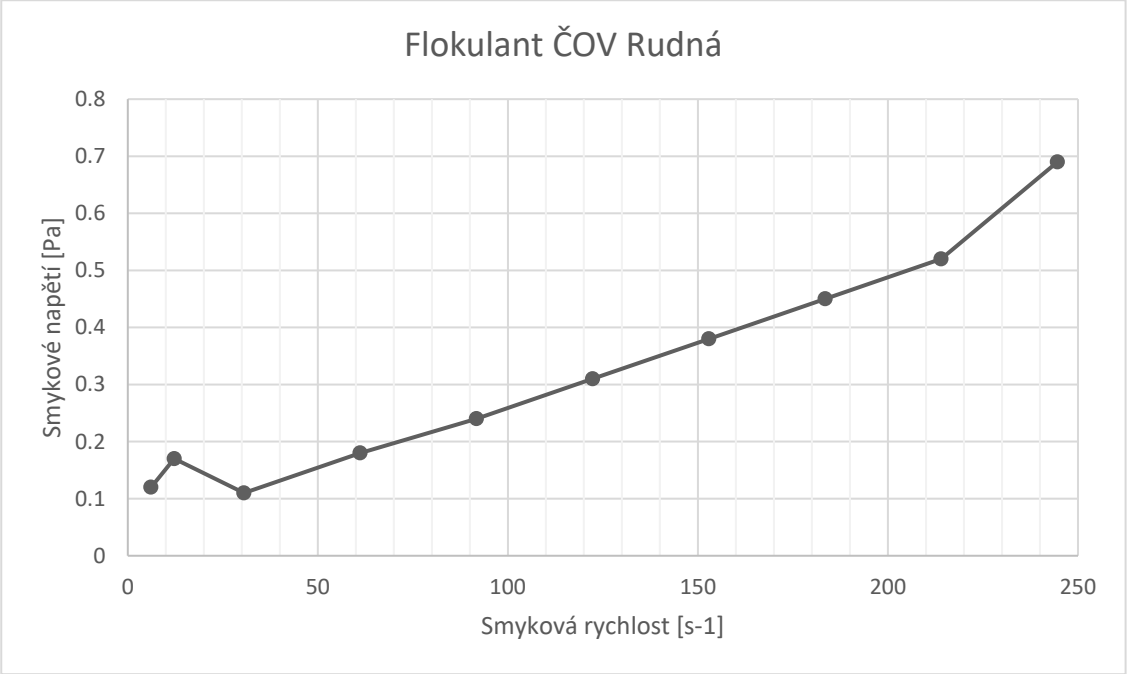
$$\ddot{\Upsilon} = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2(R_c^2 - R_b^2)} \tag{12}$$

kde ω je úhlová rychlost [rad/s], R_c je poloměr kádinky se vzorkem [m], R_b je poloměr použitého vřetena [m], x je poloměr, pro který se smyková rychlost vypočítává [m].

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^{2L}} \tag{13}$$

kde M je točivý moment [Nm], L je délka použitého vřetena [m].

Viskozita pro každý naměřený bod η_{app} se pak rovná poměru těchto dvou veličin (viz. vzorec (5)). Výsledná závislost smykového napětí na rychlostním gradientu může být znázorněna v podobě grafu, a jednotlivé body zdánlivé rychlosti se pak mohou být zanášeny do výpočetního simulačního softwaru dle potřeby.



Obr. 20 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti pro flokulant z ČOV Rudná

4.1.2 Měření hustoty

Hustota u vzorků se stanovovala pyknometrickou metodou. Pyknometrem se rozumí malá laboratorní nádobka se zábrusovou zátkou s kapilárou, do níž vejde vždycky stejný objem kapaliny. Hmotnosti správně naplněných zkoumanou látkou pyknometrů se poté porovnávají s hmotností stejné nádobky naplněné tekutinou o známé hustotě, nejčastěji vodou při pokojové teplotě. Vztah pro výpočet hledané hustoty kapaliny ρ je:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1}\rho_v \tag{14}$$

kde m_1 je hmotnost pyknometru [g], m_2 je hmotnost pyknometru naplněného zkoumanou kapalinou [g], m_3 je hmotnost pyknometru naplněného vodou, ρ_v je hustota vody

při 20 °C činící 998,2002 kg·m^{-3}. K vážení bylo využito digitální nekalibrované váhy KERN ARJ 220-4M s citlivostí 0,0001 g (Obr. 21).

Obr. 21 Vážení pyknometru se vzorkem

Výsledky měření byly zaneseny do databáze kalu.

4.1.3 Měření koncentrace nerozpuštěných látek

Koncentrace nerozpuštěných látek se stanoví s využitím odsávací baňky a filtračního nástavce pro papírové filtry, do kterého se nalévá určité množství vzorku pro odsávání filtrátu za sníženého tlaku (Obr. 22). Tímto způsobem odvodněné kalové koláče se dávají v misce do pece, kde se vysuší při teplotě 105 °C a zváží se na analytických váhách.

Obr. 22 Odstranění kalového koláče z filtračního nástavce

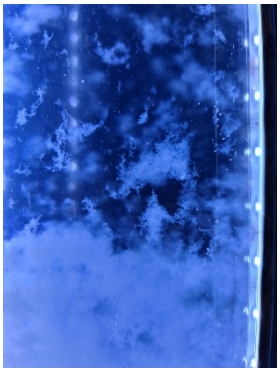
Koncentrace nerozpuštěných látek se vypočítává podle vzorce (2).

4.1.4 Sedimentační zkouška

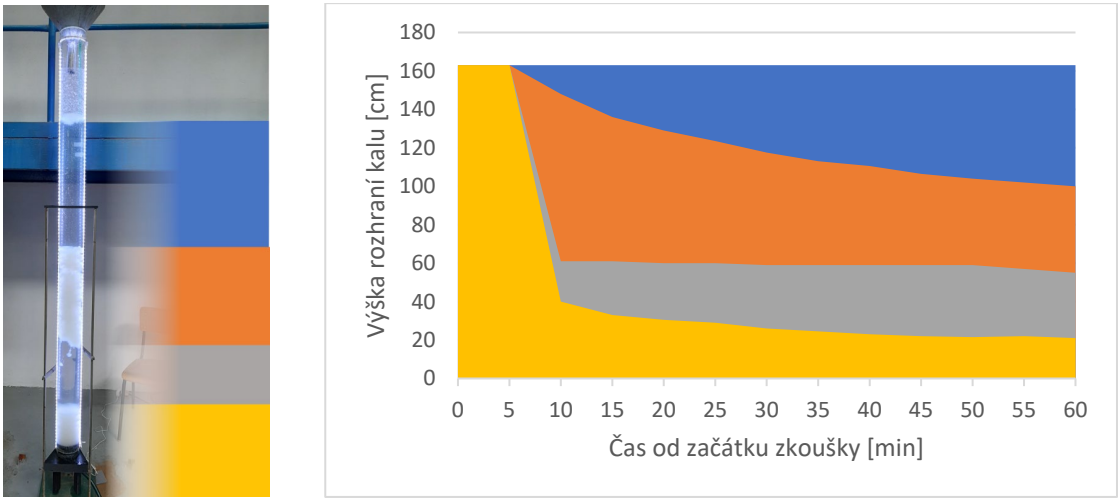
Sedimentační zkoušky byly prováděny za účelem posuzování sedimentačních vlastností různých typů kalů i odpadních vod. Zkouška přispívá porozumění složení zkoumaných kapalin. Sedimentační kolona pro sedimentační zkoušky byla udělána z dvou držáků, které byly vytištěny na 3D tiskárně na univerzitě, a průhledného válce napojeného na spodní výpust.

Během testování byly posouzeny všechny druhy kalů, u kterých se předtím naměřily výše popsané veličiny. Některé kaly, jak se očekávalo, nesedimentovaly vůbec, kdežto ostatní druhy kalů i odpadních vod sedimentovaly mírně nebo dobře (Tab. 7).

Tab. 7 Sedimentační zkoušky (Prof. Ing. Jaroslav Pollert, Ph.D., 2021)

			
Nesedimentující kal	Mírně sedimentující kal	Normálně sedimentující odpadní voda	Silně sedimentující odpadní voda

Výšky rozhraní kalu v kolonách byly odečítány po 5 minutách po dobu 60 minut. Výsledkem měření byly sedimentační křivky (Obr. 23) a zónové usazovací rychlosti.



Obr. 23 Sedimentační křivka papírenské odpadní vody

Je nutno zmínit, že sedimentační válce mají malý průměr vůči vločkám, takže se ve skutečnosti vločky kalu chovají jinak.

4.1.5 Výsledky měřící kampaně

Výsledkem měřící kampaně byla databáze kalů uvedených v seznamu v příloze 2 k této práce, která byla upravena do podoby informačních listů (příklad takového listu je k nalezení v příloze — Příloha 3. Příklad informačního listu databáze kalů). Propojením sedimentačních křivek s ostatními zjištěnými údaji v takové databázi se dá dostat komplexní a užitečný přehled chování kalu, který se hodí nejenom na simulace proudění v mixérech a jiných zařízeních, ale i na další úlohy v rámci projektu „AMCO“ (např. laboratorní pokusy, vyřešení nepředvídaných problémů a ověřování hypotéz chování kalů). Databáze kalů zároveň umožňuje porovnání vlastností různých druhů kalů dle potřeby. [95]

U zkoumaných odpadních vod se hodnoty hustot pochybovaly v rozmezí 1000 až 1005 kg/m^3 a hodnoty nerozpuštěných látek byly v rozmezí 0,54 až 2,11 mg/l. Pro kaly tyto hodnoty byly 983 až 1007 kg/m^3 a 5,31 až 21,25 mg/l.

4.2 Potrubní mísič

Podle interní dokumentace AMCON cílem vývoje je na základě CFD simulací vyvíjet vlastní řadu statických i dynamických potrubních mísičů, které by zlepšily výkon odvodňovače a umožnily snížení nákladů na jeho výrobu tím, že již nebude zapotřebí flokulační nádrže, příp. stávající velké flokulační nádrže. Mezi vlastnostmi takového potrubního mísiče patří měnitelná rychlost mísení, odolnost vůči ucpávání, nenáročná údržba a možnost použití v jakémkoliv systému na odvodnění kalu a čištění odpadní vody.

Za úspěšný se považuje takový mísič, který dosáhne následující výkonnostní cíle:

- menší spotřeba energie než standardní řešení s flokulační nádrží,
- náklady na výrobu jsou dvakrát menší než cena u dodavatelů,
- průtok v odvodňovacím systému — 0,1 až 34,7 m^3/h,
- průtok v systému s jednotkou DAF — 2 až 133,5 m^3/h,
- dávkování flokulantu — 8 g/kg-DS,
- ve srovnání se standardním výkonem odvodňovacího zařízení (seřazené podle priority):
    1) přinejmenším 10% zvýšení hmotnostního toku,
    1) 20 až 30% snížení spotřeby polymeru,
    2) 2% zvýšení sušiny ve výsledném kalovém koláči,
    3) 2% zvýšení míry zachycení nečistot s minimální hodnotou nad 90 % a
    4) snížení spotřeby vody na ředění flokulantu.

Hrubý hmotnostní tok (anglicky [*Gross*] *Throughput*) [kg-DS/h] je jeden z nejvýznamnějších parametrů charakterizujících odvodňovací lis VOLUTE™, který se vypočítává podle vzorce:

$$Hmotnostní\ tok = Q \cdot \frac{TS_{\%}}{100} \cdot \rho \approx Q \cdot TS_{\%} \cdot 10 \tag{15}$$

kde Q je průtok protékající odvodňovacím lisem [m^3/h], $TS_{\%}$ je procentuální obsah sušiny [%], ρ je hustota vody [kg/m^3].

Spotřeba polymeru D_p [g/kg-DS] se počítá podle vzorce

$$D_p = \frac{1000 \cdot V_{floc} \cdot w}{TS_{\%} \cdot V_k} \cdot \frac{a}{100} \tag{16}$$

kde V_{floc} je objem použitého flokulantu [ml], w je ředící poměr [%], V_k je odpovídající objem kalu [ml], a je podíl aktivní složky flokulantu v přípravku [%].

Míra zachycení (anglicky *Capture rate*) charakterizuje kvalitu filtrátu:

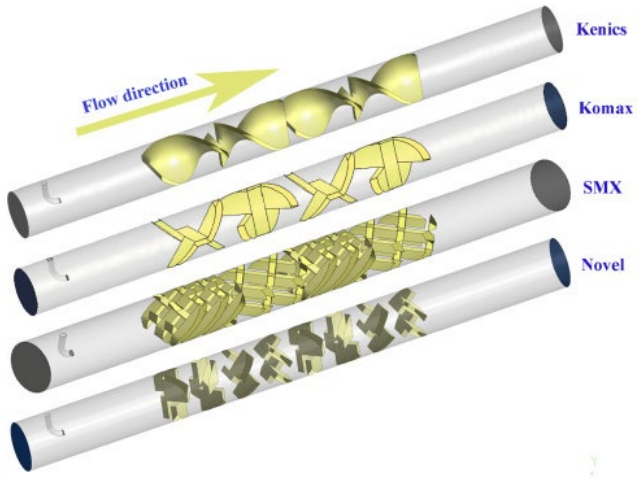
$$Míra\ zachycení = \frac{100 \cdot (TS_{kalu} - NL_{filtrátu})}{NL_{kalu}} \tag{17}$$

kde TS_{kalu} je koncentrace sušiny kalu [mg/l], $NL_{filtrátu}$ je koncentrace nerozpuštěných látek filtrátu [mg/l], NL_{kalu} je koncentrace nerozpuštěných látek kalu [mg/l].

Vynásobením hrubého hmotnostního toku mírou zachycení se získá čistý hmotnostní tok lépe vystihující výkonnost odvodňovacího zařízení. Dále se hmotnostním tokem bude rozumět právě ten čistý hmotnostní tok.

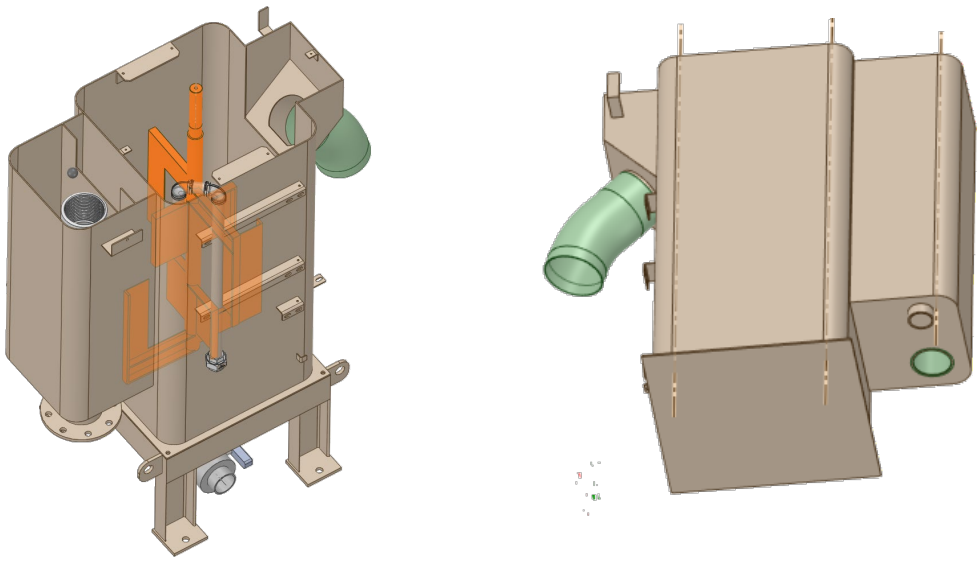
4.2.1 Vývoj statického potrubního mísiče pomocí CFD simulace

Pro vytvoření modelu a simulaci proudění v něm byl zvolen nástroj pro modelování proudění Ansys Fluent. Měnitelnými parametry byly geometrické parametry mísiče: průměr, délka, množství vnitřních překážek nebo tvar míchacích elementů — u některých variant bylo celkem 18 geometrických proměnných (Obr. 24). Optimalizačními kritérii pak byly zvoleny rovnoměrnost koncentrace za míchadlem (příp. na výtoku z mísiče) a tlaková ztráta.



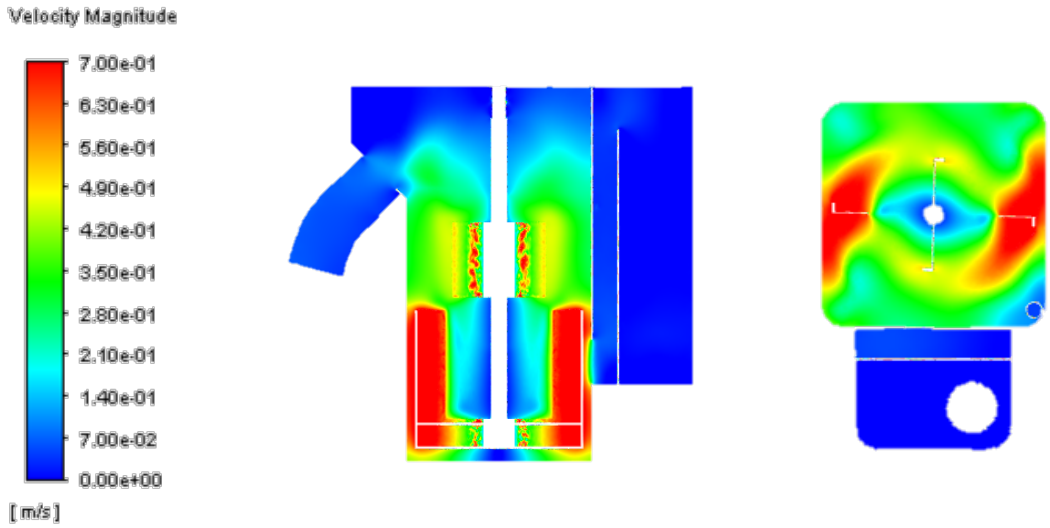
Obr. 24 Znázornění míchacích elementů existujících statických mísičů

Vedlejším úkolem simulace bylo posouzení stávající flokulační nádrže (Obr. 25), u které se v rozích předpokládaly tzv. mrtvé zóny, kde se kal po delší dobu shromažďoval. Další potenciální nevýhodou flokulační nádrže, kterou by se v případě potřeby dálo odstranit je nepostačitelnost míchadla v nádrži při velkých průtocích a velkých vločkách.



Obr. 25 Flokulační nádrž se zvýrazněným míchadlem

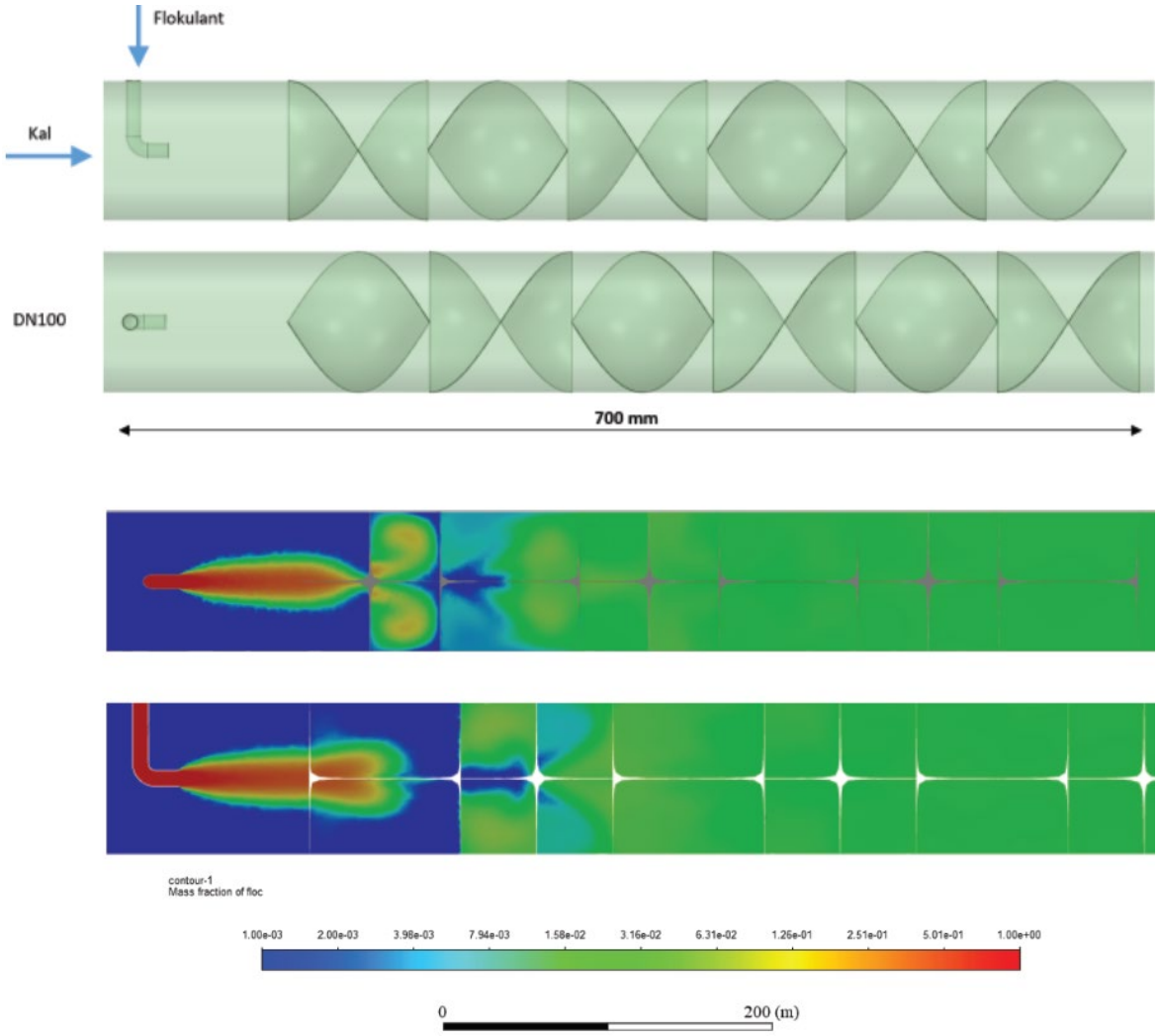
Výsledky simulace mísení ve flokulační nádrži ukázaly, že, přestože v rozích skutečně dochází k nežádoucímu shromažďování kalu (Obr. 26), obě kapaliny se dostatečně promíchávají. Pracovní tým ČVUT rekomandoval použití lopatkového rotoru místo stávajícího míchadla.



Obr. 26 Znázornění rychlostí proudění ve flokulační nádrži podle CFD simulace

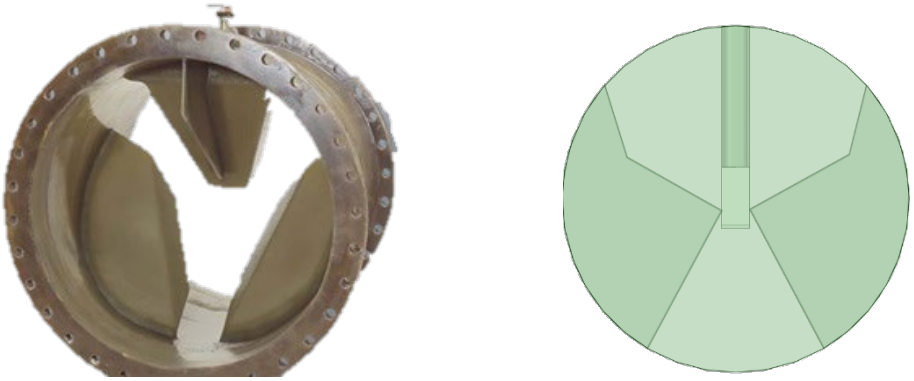
Simulace proudění směsi kalu a flokulantu ve flotační nádrži a mísičích byla založena na modelu přenosu látek (*species transport*), kde kal a flokulant byly definovány zvlášť hustotou a viskozitou. Při simulaci byl použit stacionární 3D model turbulence RKE — *Realized K-Epsilon* (nebo též k-ε model). Rovnoměrnost koncentrace flokulantu za míchadlem se posuzovala na základě hmotnostního podílu flokulantu ve směsi. Tímto způsobem byla zvolena i délka mixérů.

Pro porovnání výsledků simulací nových variant statického mísiče s osvědčenými konkurenčními mixéry se simulovalo proudění v mixérech s míchacími elementy typu „helix“, které připomínají kousky nasekané dvoušroubovice. Podle výsledků simulace je optimální promíchávání dosaženo ve vzdálenosti 450 mm od nátoku do potrubí, a tlaková ztráta činí 1860 Pa při rychlosti proudění 0,25 m/s. Další velkou nevýhodou obdobných mixérů je velká pravděpodobnost ucpávání, nehodí se totiž tak složité uspořádání míchacích elementů na všechny druhy kalu (Obr. 27).



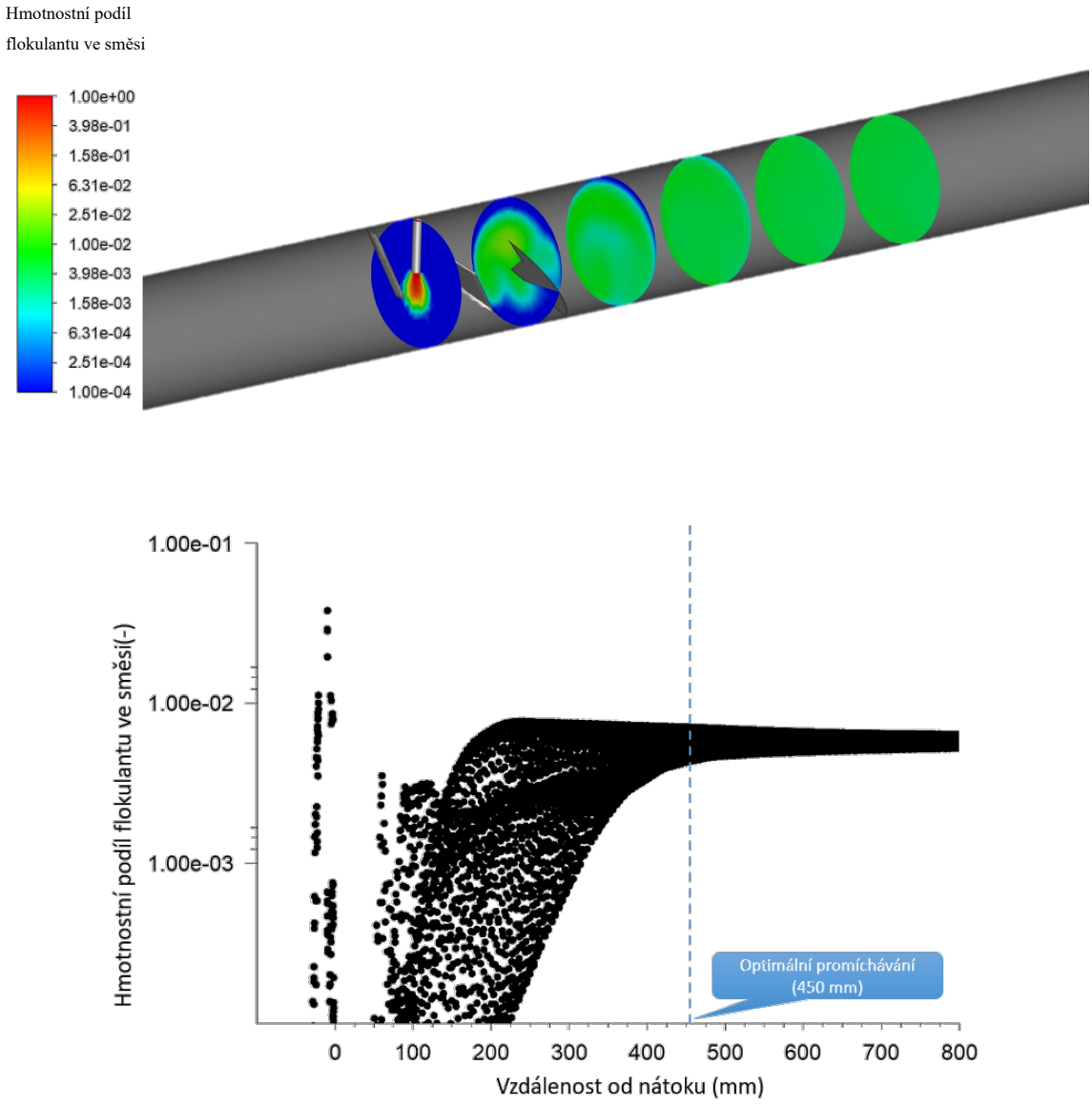
Obr. 27 Výsledky CFD simulace mísení flokulantu ve statickém mísiči s míchacími elementy typu „helix“

Vzhledem k tomu, že navrhovaný mísič měl být univerzální a odolný vůči ucpávání, bylo rozhodnuto zvolit tvar míchacích elementů prvních designů, který by svou jednoduchostí více napodoboval konkurenční mísič značky Sulzer a tím pádem by byl mnohem vyrobitelnější (Obr. 28).



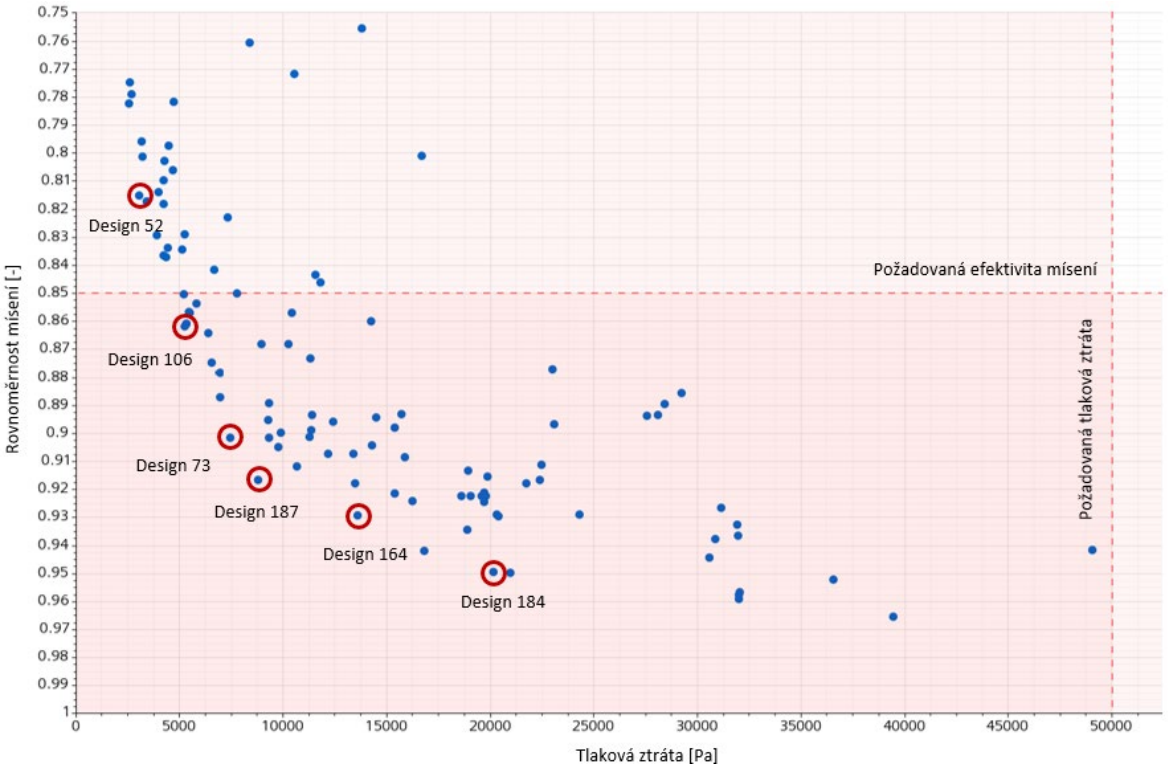
Obr. 28 Statický mísič Sulzer CompaX™ FRP [96] a první navržený design statického mísiče od ČVUT

První vyvinutý model vykazoval uspokojivé výsledky. Tlaková ztráta byla téměř dvacetkrát menší a to 100 Pa při rychlosti proudění 0,25 m/s. Dostatečné promíchávání bylo zajištěno již ve vzdálenosti menší než 400 mm od nátoku (Obr. 29).



Obr. 29 Vizualizace mísení prvním vyvínutým mísičem

Po jednání se společností AMCON bylo rozhodnuto zmenšit průměry celé řady daného mixéru, v důsledku čehož se zvýšila tlaková ztráta. Nový zmenšený design se následně optimalizoval pomocí DesignXploreru, což je nástroj pro tvarovou optimalizaci v prostředí Ansys, který v tomto případě vyhledával nejlepší možné kombinace hodnot geometrických parametrů mísiče a seřazoval je podle optimalizačních kritérií — místní tlakové ztráty a uniformity rozdělení koncentrace flokulantu za míchacími elementy. Ve výsledku vznikl graf zobrazující hodnoty parametrů rovnoměrnosti mísení a tlakové ztráty u jednotlivých designů (Obr. 30).



Obr. 30 Graf charakteristiky jednotlivých designů mísičů

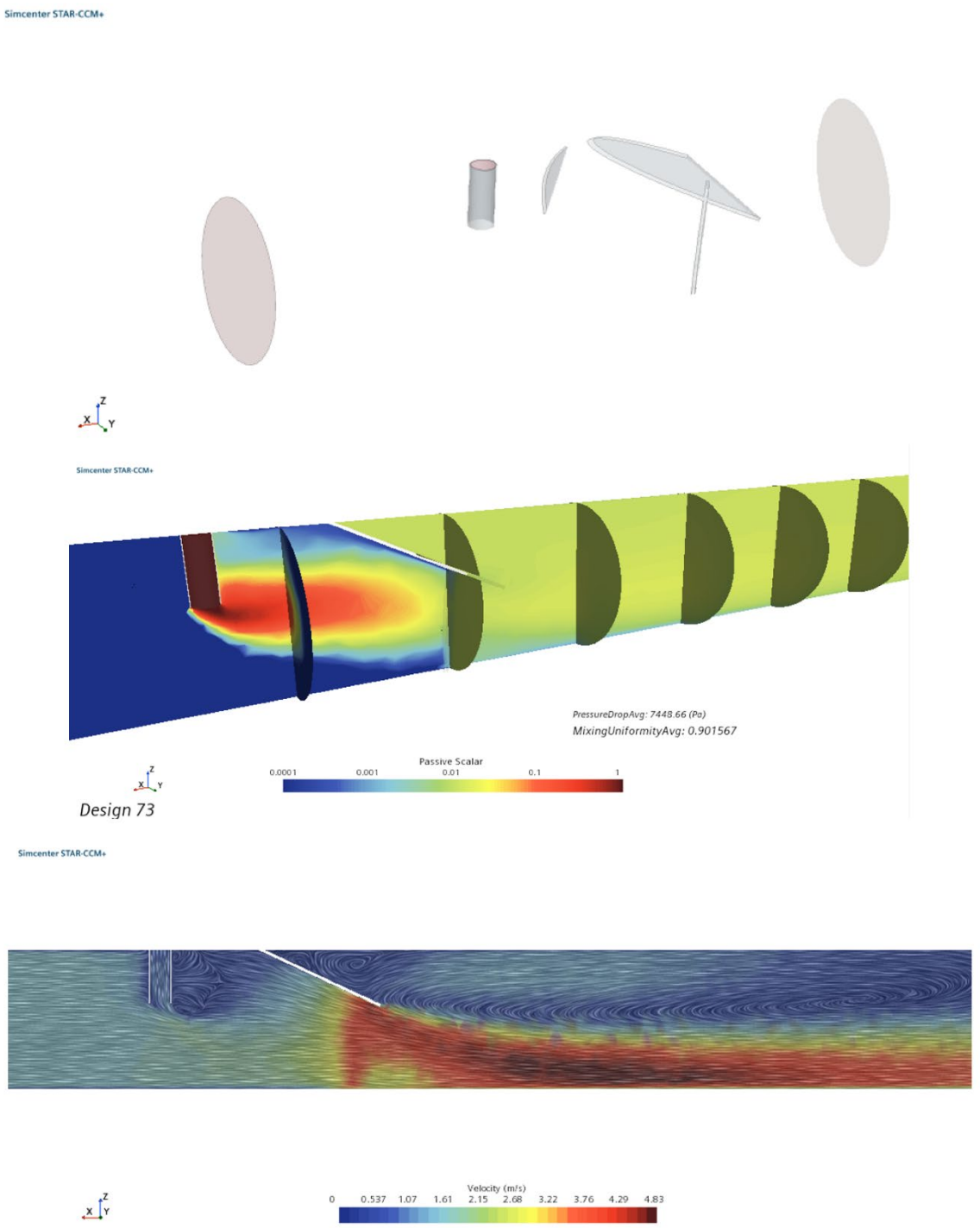
Podle teoretické příručky k Ansysu se rovnoměrností mísení ve Fluentu rozumí plošně vážený index uniformity, který vystihuje homogenitu koncentračního rozložení příměsi po průřezu a který se vypočítává podle vzorce:

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[(|\phi_i - \overline{\phi_a}|)A_i]}{2|\overline{\phi_a}|\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{18}$$

kde ϕ je zvolená proměnná (například koncentrace polymeru), i je index prvku plochy sestavené z *n* prvků, $\overline{\Phi_a}$ je plošně vážený průměr zvolené proměnné po celé ploše [97].

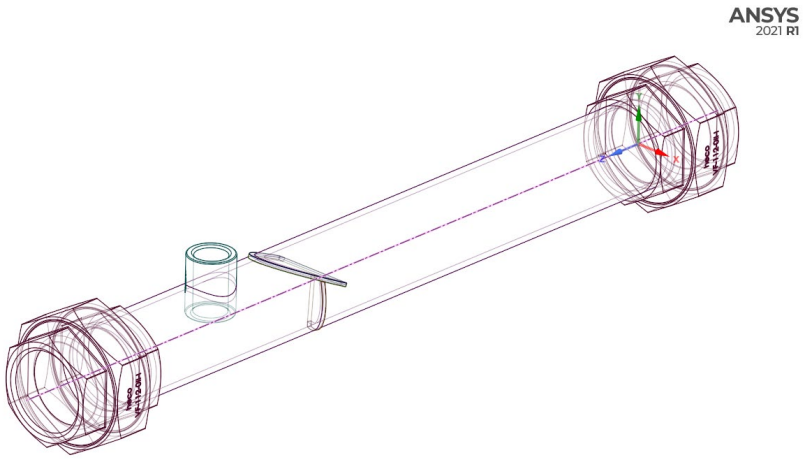
Index uniformity nabírá hodnot od 0 do 1, kde 1 indikuje plnou homogenitu.

Z výsledné množiny designů byly zvoleny 5 nejlepších modelů z hlediska poměru klíčových parametrů, a z těch následně ten, který vyhovoval nejlépe — design číslo 73 (Obr. 31). Přestože tlaková ztráta již nebyla tak zanedbatelná, průměry mísičů se podařilo značně zmenšit.



Obr. 31 Vizualizace výsledků CFD simulace proudění v mísiči podle designu č. 73. Odshora: uspořádání míchacích elementů, hmotnostní podíl flokulantu ve směsi ve směru proudění a proudnice znázorňující rychlosti proudění

Konečnou podobu statický mísič získal po odstranění z designu menšího usměrňovače, který, jak se ukázalo, ovlivňuje efektivitu směšování a tlakovou ztrátu jen málo. Exemplář, který se pak testoval ve vývojovém středisku AMCON na ČOV Rudná, měl vnitřní průměr 50 mm (Obr. 32).



Obr. 32 Konečná podoba statického mísiče DN50

Následně se porovnaly skutečně dosažené hodnoty klíčových parametrů pro hustší a řidší kaly s odstraněným usměrňovačem i bez něho, tzv. NB design — *no baffle* (Tab. 8).

Tab. 8 Porovnání statických potrubních mixérů podle hustoty kalu a klíčových parametrů

Design	Průtok [m^3/h]	Tlaková ztráta [kPa]	Rovnoměrnost mísení [%]
č. 73 DN50	10,88 (stř.)	8,4	92,1 %
č. 73 NB DN50	10,88 (stř.)	8,1	91,9 %
č. 73 NB DN50	1,76 (min.)	0,22	89,9 %
č. 73 NB DN50	20 (max.)	27,2	92,1 %
č. 73 NB DN50 (hustší kal)	10,88 (stř.)	10,0	84 %
č. 73 NB DN100 (hustší kal)	76,35 (stř.)	27,2	78,4 %
č. 73 NB DN100	76,35 (str.)	24,5	81 %

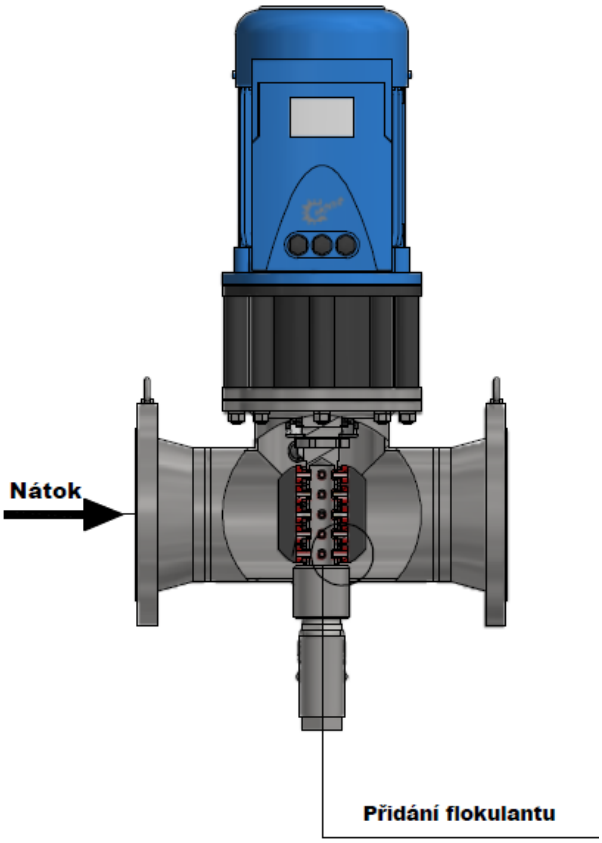
Výsledkem vývoje statického mísiče byla řada jednotek schopná pokrýt požadovaný rozsah průtoků až do 133,5 m^3/h (Tab. 9).

Tab. 9 Řada statických potrubních mixérů pokrývající požadovaný rozsah průtoků

Rozsah průtoků [m^3/h]	Průměr mísiče [mm]	Průměr přívodu flokulantu [mm]	Rychlost nátoku kalu (min./stř./max.) [m/s]	Rychlost nátoku flokulantu (min./stř./max.) [m/s]
0,1-4,5	32/40	15	0.035/0,51/1	0,007/0,17/0,34
1,76-20	50	15	0,25/1,54/2,83	0,13/0,82/1,51
8-66,5	80	20	0,44/2,06/3,67	0,34/1,58/2,82
19,2-133,5	100	20	0,68/2,7/4,72	0,82/3,29/5,67

4.2.2 Vývoj dynamického potrubního mísiče pomocí CFD simulace

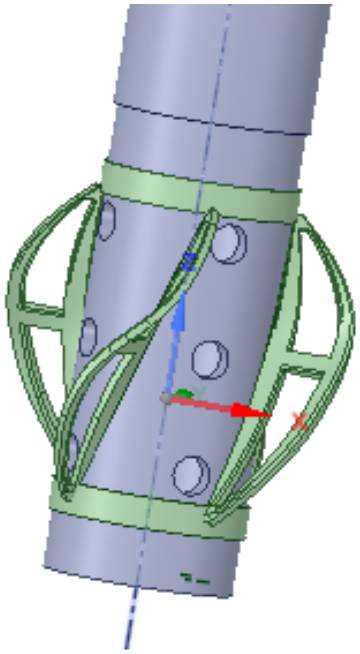
Na rozdíl od statického mísiče se konkurenční dynamický mísič již používal v experimentálním a vývojovém středisku AMCON na ČOV Rudná. Konkrétně se tam dříve používal mixér značky *MPT Meß- und Prozeßtechnik GmbH*, který vykazoval postačující výsledky, ale byl poměrně drahý na použití (Obr. 33). Záměrem vývoje vlastního dynamického mísiče bylo dosažení výkonnostních cílů uvedených na začátku kapitoly, přičemž důraz byl kladen na odolnost vůči ucpávání, snížení spotřeby energie a lehká vyrobitelnost ve srovnání s konkurenčním zařízením.



Obr. 33 Dynamický mísič značky MPT [98]

Simulace proudění v dynamickém mixéru se prováděla obdobně jako u statického. Specifikum mísiče od MPT je přidávání flokulantu přímo do míchacího elementu, odkud se pak roznáší v kalu speciálními tryskami. Při simulaci se míchací elementy na hřídeli otáčely spolu se samostatnou pohyblivou soustavou souřadnic. Otáčky na hřídeli se pohybovaly kolem 900 rpm. Po provedení CFD analýzy se zjistilo, že celková tlaková ztráta při vnitřním průměru potrubí 50 mm, průtoku 10 m^3/h a 0,6% kalu činí 46,9 kPa. Další výsledky rovněž nasvědčují, že rovnoměrnost mísení dosahuje hodnoty 98,3 %.

Účelem vyvinutí vlastního mísiče bylo mj. snížení množství spotřebovávané energie, která je přímo úměrná tlakové ztrátě způsobené míchacím elementem. Proto se nové míchadlo na začátku vyvíjelo bez vyčnívajících trysek a s otvory v lopatkách (Obr. 34).



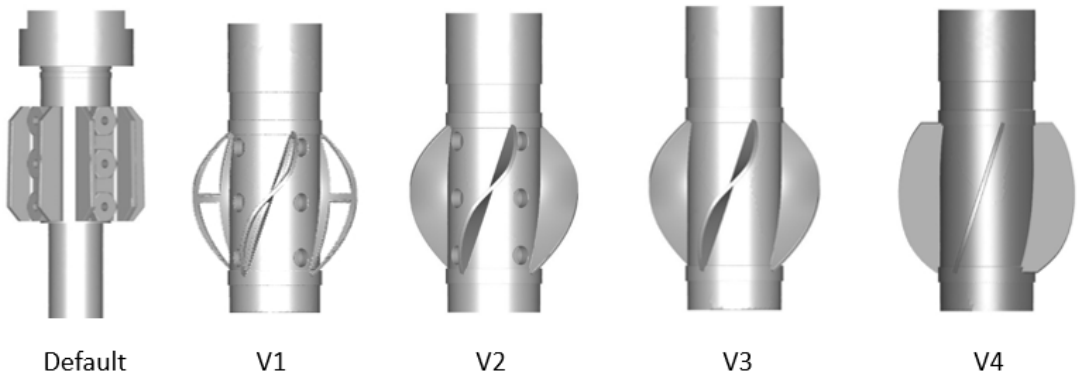
Obr. 34 Původní model nového míchadla dynamického mísiče

Dosažená hodnota rovnoměrnosti promíchávání činila 83,4 %, ale celková tlaková ztráta se zmenšila na pouhých 5,6 kPa. Nehledě na to, že nový design by teoreticky měl tak výrazně snížit celkovou tlakovou ztrátu a usnadnit dodání flokulantu do směsi, návrh byl zrušen z důvodu špatné vyrobitelnosti a obav o ucpávání v případě vláknitého kalu.

Další nové designy míchadel se postupně zjednodušovaly ve snaze dosáhnout lepší nákladové efektivity. Celkem bylo navrženo 4 designy (Obr. 35), ze kterých přednost byla dána nejjednodušší variantě s rovinnými lopatkami a přidáním flokulantu samostatným vtokem před míchadlem (V4). Hodnoty klíčových parametrů podle CFD simulací jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 10).

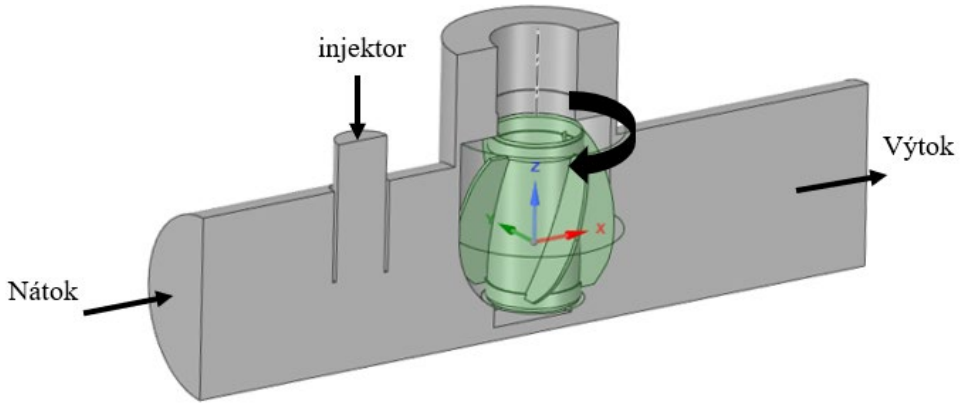
Tab. 10 Porovnání účinností navržených míchadel dynamického mísiče

Design [-]	Tlaková ztráta [kPa]	Hmotnostní podíl flokulantu za míchadlem [-]	Rovnoměrnost mísení [%]
Původní	46,9	0,0416	98,3 %
V1	5,6	0,0531	83,4 %
V2	7,8	0,0522	87,9 %
V3	7,9	0,0504	89,7 %
V4	11,6	0,0519	90,7 %



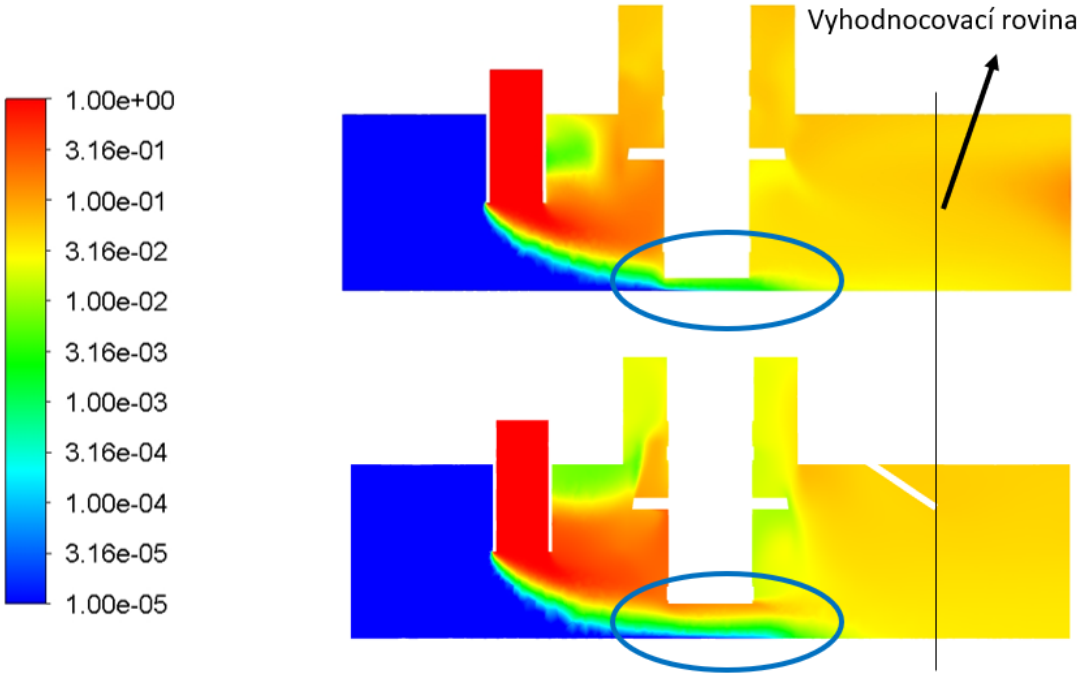
Obr. 35 Navržené designy míchadel dynamického mísiče

Čtvrtá varianta vykazovala nejlepší výsledky: čtyřkrát menší tlakovou ztrátu a více než 90% rovnoměrnost mísení. Hlavní výhodou varianty bylo to, že je dobře vyrobitelná a nenákladná. Samostatný injektor pro flokulant byl přemístěn před míchadlo (Obr. 36).



Obr. 36 Model dynamického mísiče (V4)

Existovaly však obavy, že by se ucpával prostor pod míchadlem. Proto bylo navrženo, aby se tato mezera zvětšila na 10 mm, v důsledku čehož se kvalita mísení snížila o 3 %. Dalším zásahem do designu bylo parametrická optimalizace umístění injektoru a jeho délky pomocí již zmíněného DesignXploreru, ukázalo se totiž, že to má poměrně velký vliv na hodnoty klíčových parametrů. Poslední modifikací bylo umístění pevného usměrňovače za míchadlem, což zlepšilo rovnoměrnost promíchávání o 2 %. Celkové změny jsou znázorněny i graficky v podobě znázornění hmotnostního podílu flokulantu ve směsi (Obr. 37).



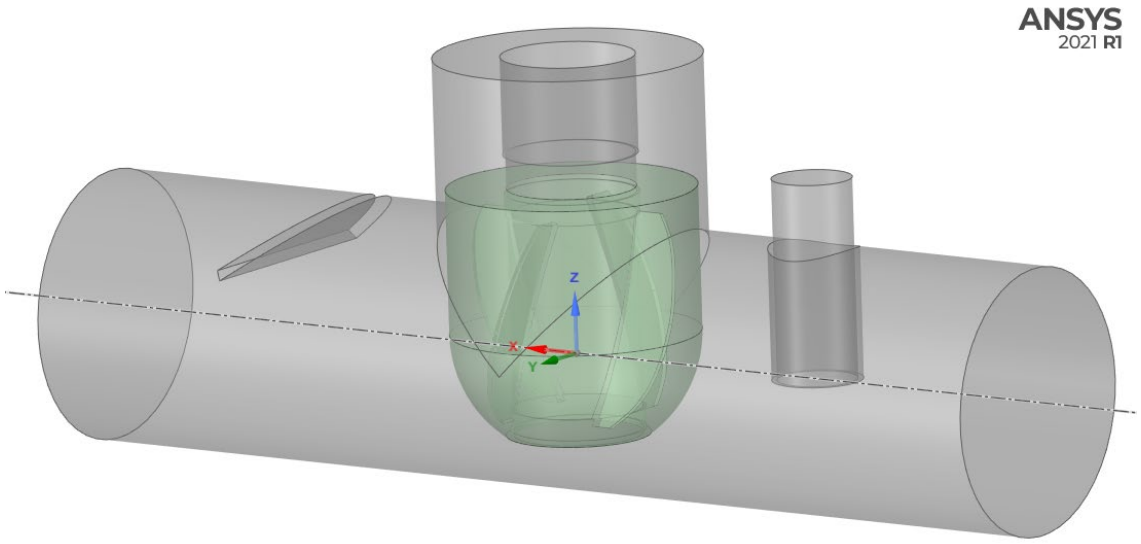
Obr. 37 Znázornění hmotnostního podílu flokulantu ve směsi před a po změnách designu

Výsledkem vývoje jsou tři dynamické mísiče, které byly počítačově ověřeny pro různé průtoky, a jejich nemodifikované varianty.

Tab. 11 Tab. 8 Porovnání designů dynamického potrubního mixéru podle hustoty kalu a klíčových parametrů

Design	Průtok [m^3/h]	Tlaková ztráta [kPa]	Rovnoměrnost mísení [%]
V4 DN50	10,2	11,6	90,7 %
V4 DN50 (usměrňovač)	10,2	9,3	92,5 %
V4 DN50 (větší mezera)	10,2	8,4	87,7 %
	1,76	0,45	90,2 %
	20	27,3	86,4 %
V4 DN50 (vetší mezera, hustší kal)	10,2	10,3	84,8 %
V4 DN100 (větší mezera)	76,4	32,7	87,2 %
V4 DN40	2,3	0,5	97,7 %
	4,5	4,09	90,6 %
	0,1	0,04	99,0 %
V4 DN40 (hustší kal)	2,3	1,73	91,8 %

Verze mísiče DN50 s 10mm mezerou a pevným usměrňovačem byla zvolena pro testování na ČOV Rudná (Obr. 38).

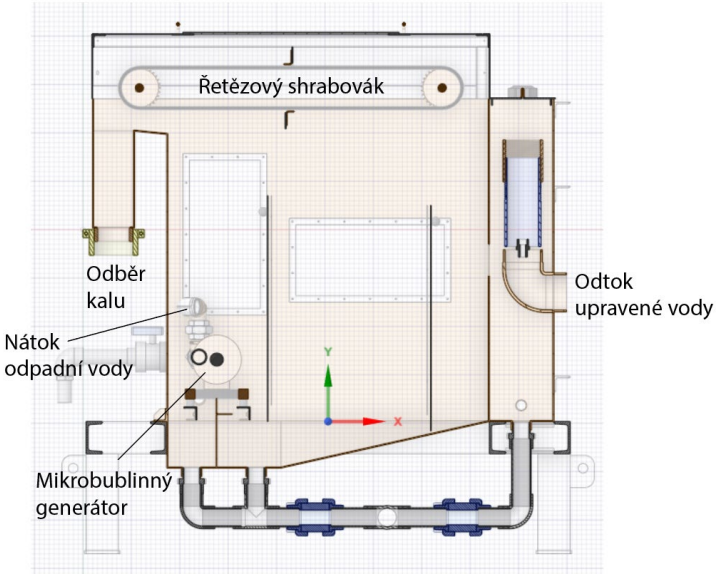


Obr. 38 Model dynamického mísiče DN50 s větší mezerou pod míchadlem a pevným usměrňovačem

4.3 Flotační jednotka

Součástí projektu AMCO byla optimalizace flotační jednotky vlastní výroby společnosti AMCON určené k čištění odpadních vod ECO-Float EC-5 pro systémy s maximálním průtokem 5 m^3/h. Kromě toho bylo požadováno vytvořit přepočítávací škálu, podle které by měly být vyráběny další jednotky pro jiné průtoky v rozsahu 2 až 80 m^3/h.

Flotační jednotka EC-5 (Obr. 39) funguje na principu mikrobublinné flotace, při kterém mikrobubliny jsou vytvořeny v nádrži kompaktním generátorem v tzv. kontaktní zóně. Natékající voda protéká flotační jednotkou přes separační zónu a odtéká přes přepad dál, zatímco se zflokulovaný kal vznáší bublinami na hladinu a odstraňuje se pomocí řetězového shrabováku. Vnitřní přepážky usměrňují proud vody tak, aby se vločky kalu obklopily co největším množstvím mikrobublin.



Obr. 39 Původní flotační jednotka EC-5

Požadavky na zlepšenou jednotku byly stanoveny následně:

- snížení výrobních nákladů (výroba jednotky pro průtok 5 m^3/h by neměla stát více než 100 000 Kč),
- zvýšení doby zdržení,
- snadná údržba,
- rozdělení prostoru nádrže pro dosažení nejlepší účinnosti,
- jakost filtrátu měla odpovídat emisním standardům dle nařízení vlády č. 401/2015 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod.

Účinnost čištění byla stanovena pro parametry CHSK, BSK, NL a tuky v upravené vodě (Tab. 12).

Tab. 12 Účinnostní cíle optimalizace flotační jednotky

Parametry	Účinnost odstranění (s použitím flokulantu)
CHSK	55-65 %
BSK	55-65 %
NL	80-90 %
Tuky	80-90 %

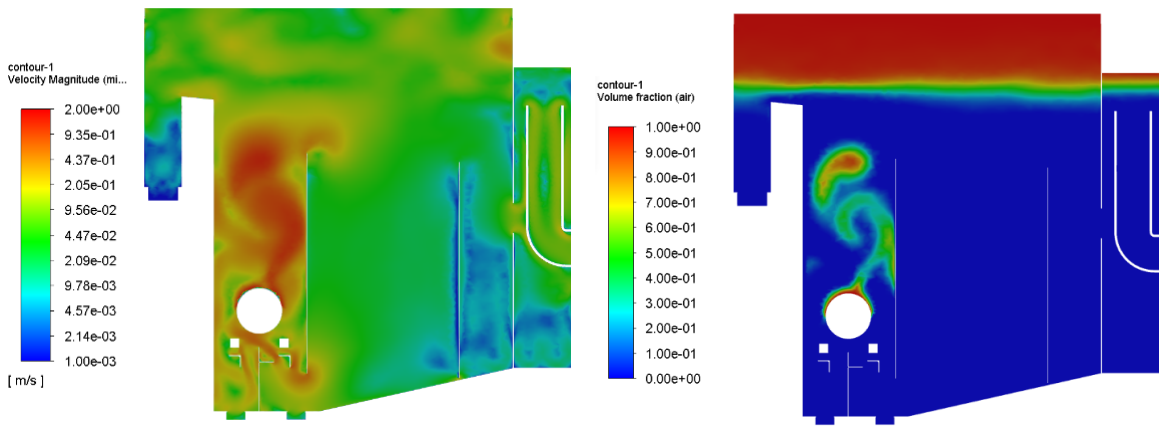
4.3.1 Optimalizace flotační jednotky

Optimalizace původní flotační jednotky a nových optimalizačních návrhů byla prováděna stejnými nástroji a metodami, jaké byly použity u simulace flokulační nádrže a potrubního mixéru. Jediný rozdíl byl v tom, že příčky ve vnitřním objemu nádrže byly umístěné na základě zkušeností a odhadu, místo toho, aby se použil již osvědčený nástroj pro tvarovou optimalizaci DesignXplorer.

Úkolem optimalizace bylo dosažení nižší rychlosti a větší doby zdržení a tím zvýšení hmotnostního poměru vzduchu a pevných částic, aby se zlepšila účinnost odstranění kalu. Vysoké rychlosti v nádrži způsobují nežádoucí strhávání vzduchu dolů a snižují efektivitu mikrobublin. Z hlediska flokulace je důležité, aby smykové rychlosti nebyly příliš vysoké z důvodu větší pravděpodobnosti roztrhání vloček. Účelem simulace bylo dobře rozložit rychlosti v nádrži, předejít velké vířivosti proudu a zajistit využití celého objemu nádrže bez mrtvých zón. Průtočná plocha celým zařízením musí být rovnoměrná bez vratných proudů.

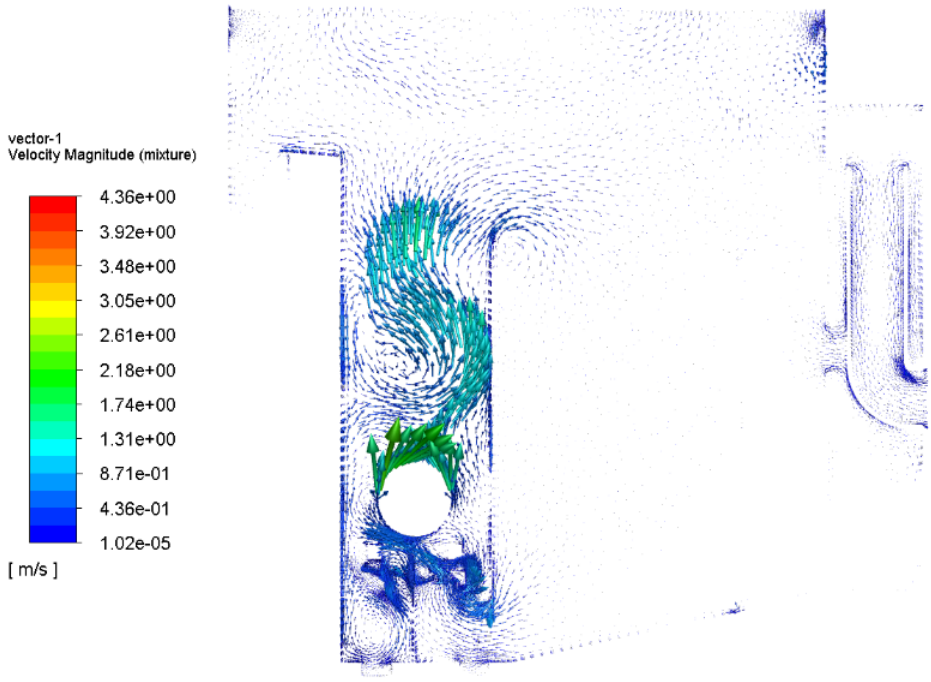
Původní flotační jednotka

Při CFD simulacích proudění v původní jednotce se ukázalo, že se prostor jednotky nevyužívá naplno. Je to vidět na obrázku znázorňujícím rychlosti proudění v řezu nádrže a z rozložení objemu rozpouštěného vzduchu (Obr. 40).



Obr. 40 Znázornění rychlostí proudění a podílu vzduchu v objemu nádrže

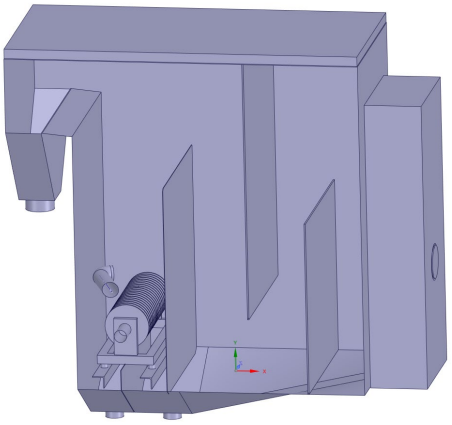
Odpadní voda protéká nad a pod překážkou. Kal uniká do separační komory a shromažďuje se ve spodní části nádrže. Kromě toho v kontaktní zóně dochází ke zpětným proudům, které strhávají mikrobubliny a vločky kalu dolů (Obr. 41). Kal je následně vynášen spolu s upravenou vodou do odtoku.



Obr. 41 Vektory rychlostí proudění v nádrži

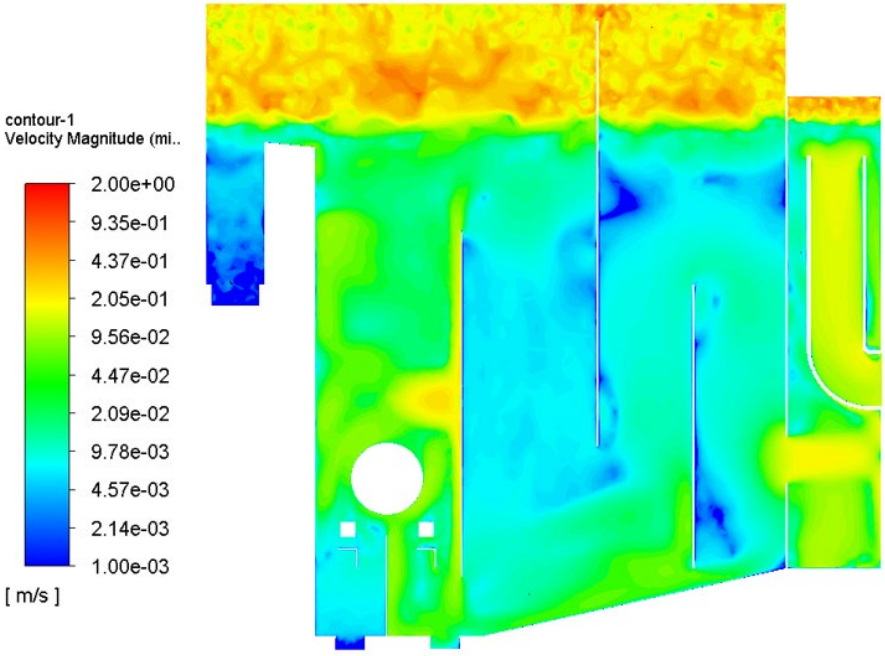
Verze 1

Za účelem využití celého objemu nádrže bylo umístěna nová rozdělující příčka uprostřed separační zóny (Obr. 42). Navíc se přemístil otvor vtoku v poslední komoru, a pro další částečně vyvážení spodních rychlostí jedna ze příček byla zvednuta výše.



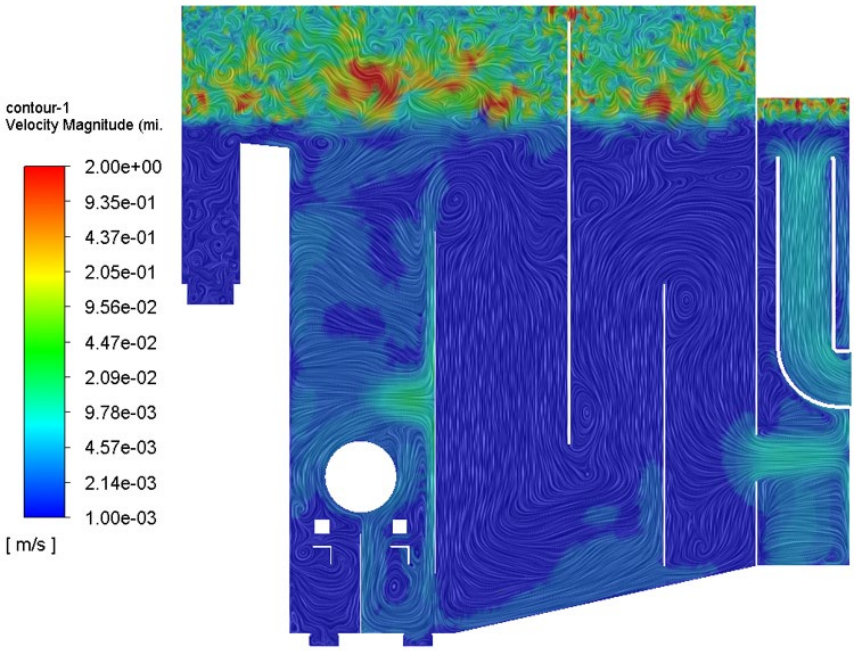
Obr. 42 První verze optimalizované flotační jednotky

Podle výsledků simulace se tato verze výrazně zlepšila oproti původnímu uspořádání rozdělovacích příček. Usměrněný proud odpadní vody nyní prochází celou separační zónou. Nestabilita v kontaktní komoře se projevuje mnohem slaběji (Obr. 43).



Obr. 43 Znázornění rychlostí v optimalizované flotační jednotce (1. verze)

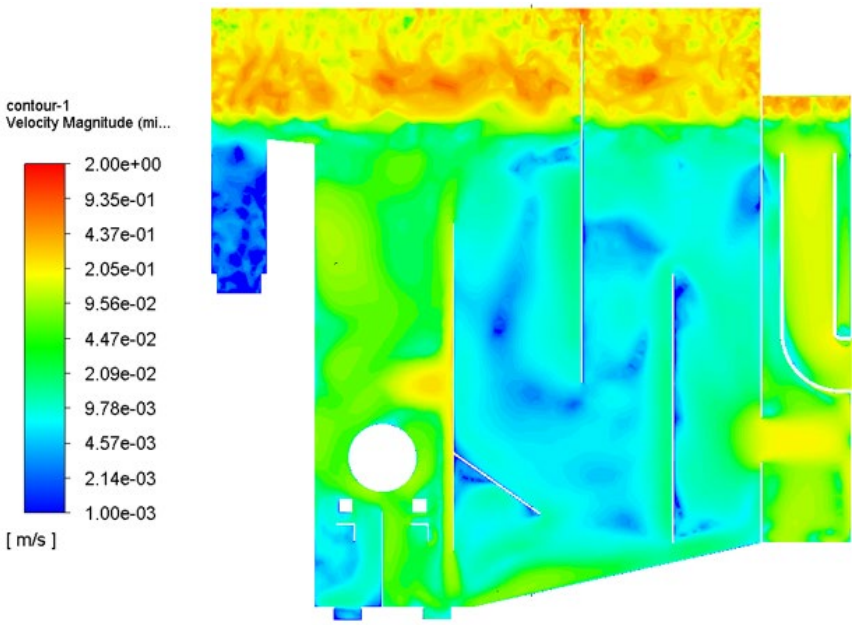
Přestože se rychlosti výrazně snížily, pořád vznikají mrtvé zóny, a vznáší se sedimentovaný kal ze dna. Proudnice ukazují vratné proudy a další nestability (Obr. 53).



Obr. 44 Zobrazení proudnic v objemu nádrže (1. verze)

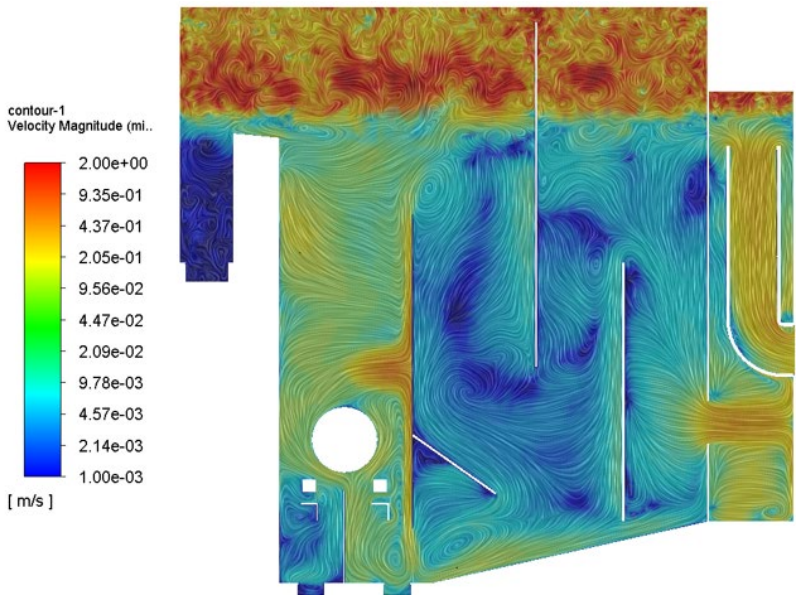
Verze 2

Odstranění záporů první verze jednotky vyžadovalo omezení strhávání kalu dolů zpětnými proudy a vznášení kalu ze dna vzhůru. U druhé verze se tak upravila délka střední přepážky, a byla přidána šikmá příčka proti vynášení kalu. Navrženy změny zajišťují plynulejší průtok a ještě větší využití prostoru jednotky.



Obr. 45 Znázornění rychlostí v optimalizované flotační jednotce (2. verze)

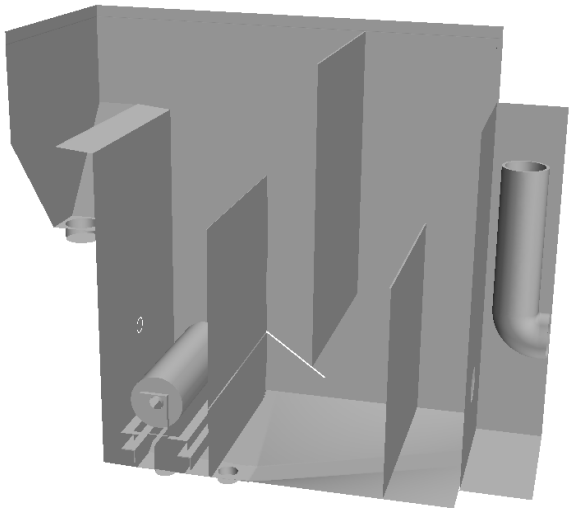
Významně se omezilo vynášení kalu nahoru, což je poznat i podle rozložení rychlostí podél dna (Obr. 45). Vratné proudy mají menší negativní dopad na proudění (Obr. 46).



Obr. 46 Zobrazení proudnic v objemu nádrže (2. verze) — logaritmická škála

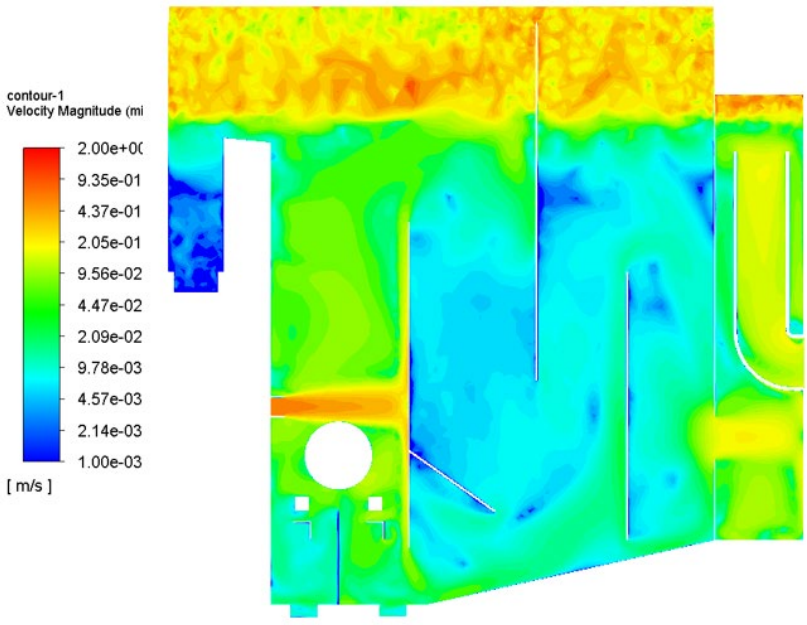
Verze 3

Přemístěním nátoku vznikla finální třetí verze jednotky (Obr. 47). Tím se měla zvětšit doba protékání kontaktní zónou, což má za následek zlepšení účinnosti odstranění kalu.

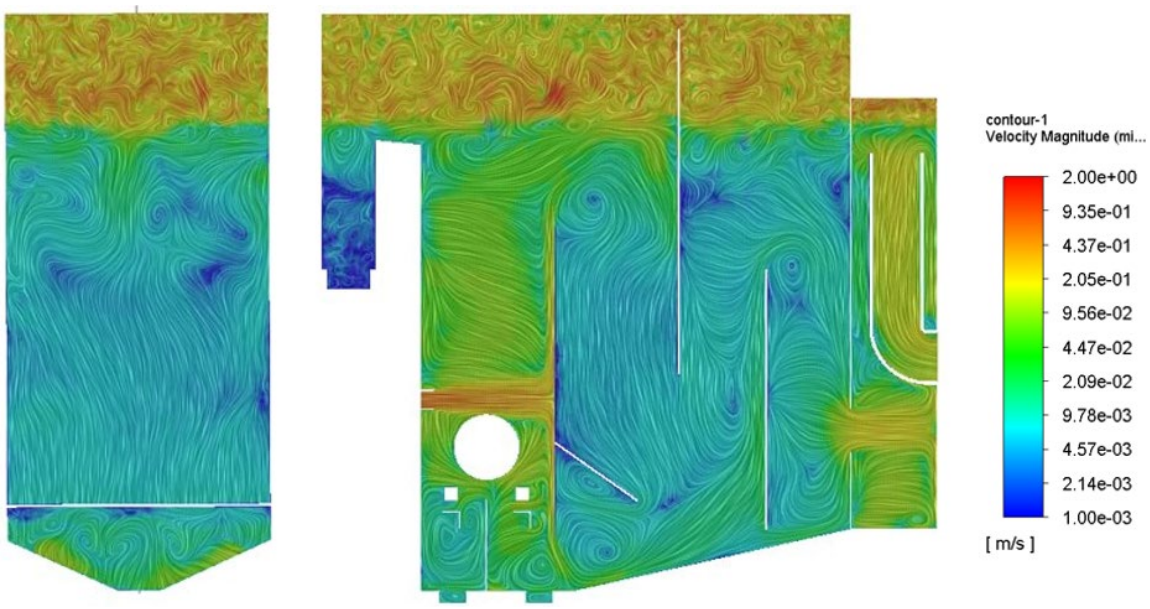


Obr. 47 Třetí verze optimalizované flotační jednotky (šikmá příčka je naznačena bílými čárami)

Koneční verze vykazovala nejhomogennější a nejplynulejší proud odpadní vody v nádrži (Obr. 48).

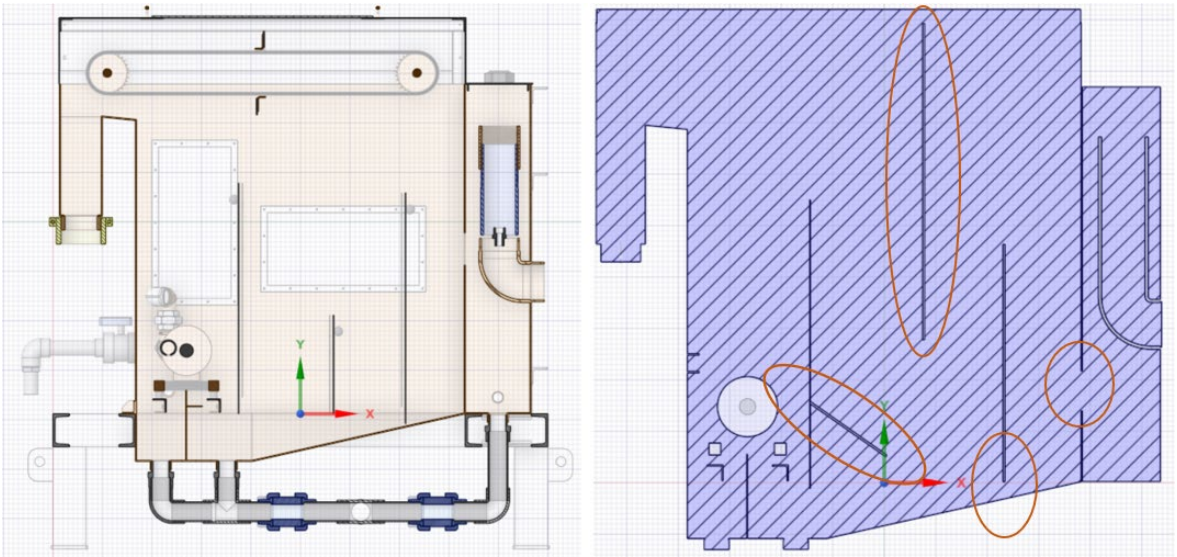


Obr. 48 Znázornění rychlostí v optimalizované flotační jednotce (3. verze)



Obr. 49 Zobrazení proudnic v objemu nádrže (3. verze) — logaritmická škála

Třetí verze byla přijata, a finální výkresy byly předány k dalšímu zpracování. Testování se však provádělo se stejným umístěním nátoku jako u druhé verze. Všechny provedené změny v konstrukci jednotky před testováním jsou znázorněny na obrázku dole (Obr. 50).



Obr. 50 Změny implementované po simulaci toku CFD (změny jsou zvýrazněny oranžovou barvou) — verze pro pilotní testování

5 Ověření prvků optimalizace mísení a flotace

Testování vyvinutých mísičů i flotační jednotky probíhalo v areálu ČOV v Rudné, příp. v budově vývojového a experimentálního střediska AMCON (viz. Příloha 1. Schéma experimentálního a vývojového střediska AMCON na ČOV Rudná), který byl popsán na začátku kapitoly 4.1. Během psaní této práce bylo provedeno celkem tři testování:

- testování mísičů (16.7.2021 – 20.7.2021),
- testování flotační jednotky (19.8.2021 – 25.8.2021),
- dodatečné testování mísičů (3.11.2021 – 9.11.2021).

Podrobné laboratorní testování prototypů bylo zrušeno z důvodu ušetření času a nákladů. Jediným laboratorním testem, který by se měl uskutečnit v roce 2022, je testování mísících schopností potrubních mixérů s pomocí měření vodivosti. Vzhledem však k tomu, že prioritou bylo zvýšení výkonnostních parametrů odvodňovacího lisu, se zástupci společnosti AMCON rozhodli provést pilotní testy zařízení ihned v praxi.

5.1 Testování mísičů

5.1.1 Cíle testování

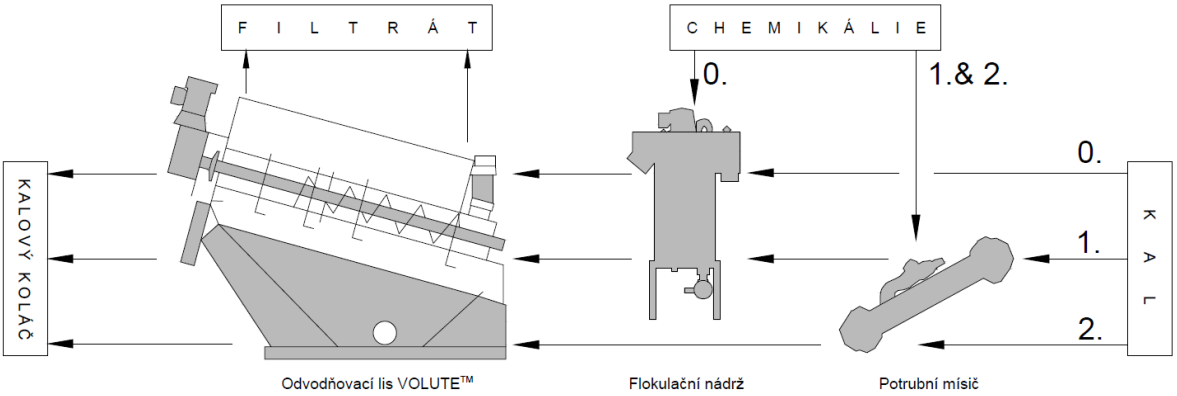
Cílem pilotního testování mísičů bylo ohodnotit účinnost nově navržených zařízení a jejich dopad na výkonnost odvodňovacího lisu VOLUTE™ a porovnat to s výkonem zařízení se zapojeným konkurenčním dynamickým mixérem MPT. Vedlejším úkolem bylo posoudit možnost náhrady flokulační nádrže potrubním statickým nebo dynamickým mísičem, pokud to přinese uspokojivější výsledky.

Klíčové parametry a cílové hodnoty, podle kterých se posuzovalo, jestli potrubní mísič zlepšuje kvalitu odvodnění nebo nikoliv, jsou vyjmenovány v kapitole 4.2.

5.1.2 Metodika testování

Mísiče se testovaly na odvodňovací jednotce od AMCONu tak, že byly jeden po druhém zapojeny do kalového oběhu, a to přes flokulační nádrž (tzv. 1. nastavení) nebo mimo ni čili rovnou do lisu (2. nastavení). Výsledky se porovnávaly se standardní výkonností zařízení bez mísičů (0. nastavení). U 1. a 2. nastavení se flokulant dávkoval přímo do mixéru, zatímco u standardního 0. nastavení se flokulant přidával ve flokulační nádrži (Obr. 51). Každé nastavení se zkoumalo ve dvou režimech: maximální sušina

v kalovém koláči a maximální hmotnostní tok přes zařízení. Rozdíl mezi těmi režimy se redukuje na odlišné hodnoty provozních parametrů odvodňovacího lisu.



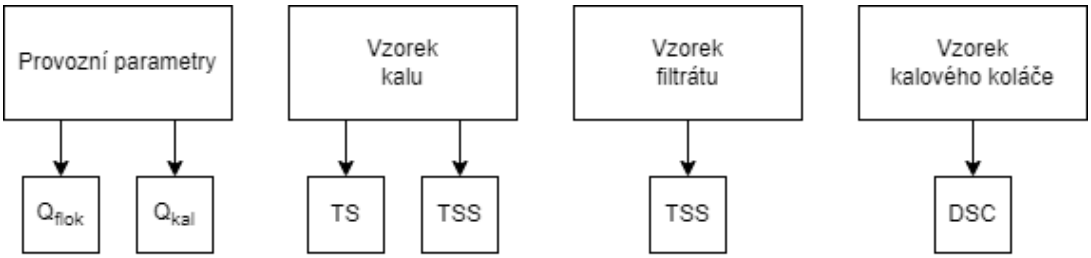
Obr. 51 Schéma testování mísičů na ČOV Rudná

Proces odvodnění kalu na lisu VOLUTE™ se nastavuje následujícími parametry:

- průtok kalového čerpadla,
- průtok dávkovače flokulantu,
- otáčky šroubovice za minutu,
- otáčky míchadla ve flokulační nádrži,
- mezera přítlačné desky.

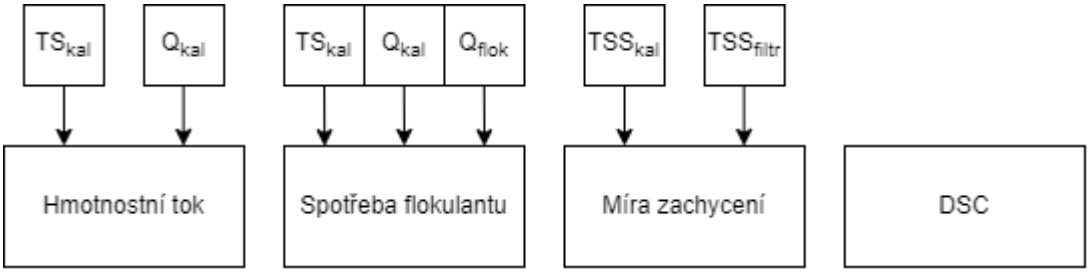
Režim maximální sušiny znamená maximální snížení frekvence otáček šnekového válce, zmenšení mezery mezi válcem a přítlačnou deskou a přizpůsobení kalového čerpadla i dávkovače flokulantu na nejoptimálnější provoz. Režim maximálního hmotnostního toku naopak znamená maximální zvýšení frekvence otáček šnekového válce a zvětšení mezery přítlačné desky.

Na schématu výše (Obr. 51) jsou obdélníky vyznačeny tři vzorky, které se odebíraly během testování, a podle kterých se posuzovala efektivita odvodnění: natékající kal, filtrát z odvodňovacího lisu a výsledný kalový koláč. Vzorky se odebíraly pro každé nastavení po 40 až 60 minut nepřetrženého provozu, přičemž hodnoty všech provozních parametrů byly po každé předem zapsané (viz. Příloha 4. Tabulka provozních parametrů odvodňovacího lisu při testování potrubních mísičů). Následně se v laboratoři společnosti AMCON změřily TS a TSS kalu (čili sušina a veškeré nerozpuštěné látky), TSS filtrátu a DSC (čili sušina) kalových koláčů (Obr. 52). Vzhledem k tomu, že angličtina je pracovní jazyk společnosti AMCON, dále se někde používá anglické názvosloví.



Obr. 52 Získávané parametry ze vzorků odebraných při testování mísičů (Q_{flok} — průtok dávkovače flokulantu, Q_{kal} — průtok kalového čerpadla)

Z tak získaných parametrů se pak vypočítávaly výkonnostní parametry odvodňovacího lisu VOLUTE™: hmotnostní tok, spotřeba flokulantu a míra zachycení nečistot (podle vzorků (*15)*, (*16)*, (*17)*). Dalším klíčovým výkonnostním parametrem je sušina kalového koláče (Obr. 53).



Obr. 53 Znázornění závislosti mezi získanými daty a výkonnostními parametry

Samotné testování se provádělo dvakrát: původně byl zvolen přístup, který neumožňoval jednoznačnou interpretaci dat. Otáčky šnekového válce při zapojení různých mixérů si neodpovídaly, a tak vliv jednotlivých mísičů byl těžko rozlišitelný. U dodatečného testování byly zvoleny pevně stanovené počty otáček při obou režimech, čímž bylo umožněno porovnání výsledků.

V průběhu testování byly prováděny vedlejší testy za účelem stanovení optimální dávky flokulantu (již zmíněný *jar test* — viz. Obr. 54) a odhadnutí maximální efektivity odvodnění, které lze dosáhnout pro tento typ kalu (tzv. *Squeeze test* čili zkouška vymačkáváním).

Obr. 54 Zflokulovaný kal po jar testu

Zkouška vymačkáváním spočívá ve filtrování zflokulovaného vzorku přes obyčejnou látku nad kádinkou a následném vyždímáním vody ze zbylé pevné části vzorku (Obr. 55). Výsledný kalový koláč by se neměl lišit od odvodněného strojem, stejně jako filtrát ze stroje by měl být stejně čistý jako filtrát z tohoto testu (Obr. 56). Testy se dělaly po každém přenastavení odvodňovacího systému kvůli optimalizace provozních parametrů jednotky.

Obr. 55 Výsledek squeeze testu

Obr. 56 Porovnání výsledku squeeze testu s výsledným kalovým koláčem ze stroje

Dále se většinou popisuje dodatečné testování mixéru, pokud není stanoveno jinak, z důvodu větší přehlednosti dat.

5.1.3 Podmínky testování

Všechna zařízení umístěné ve vývojovém středisku AMCON byla zapojena do řídícího systému s programovatelným automatem a digitálním uživatelským rozhraním, s jehož pomocí se přepínalo mezi nastaveními a režimy.

Předzahušťovač byl po celou dobu experimentu vypnutý. Míchadlo ve flokulační nádrži bylo nastaveno na 40 otáček za minutu.

Z časových důvodů se neodebraly vzorky natékajícího kalu pro vzorky č. 24-25 za předpokladu, že budou mít relativně podobné hodnoty TS a TSS.

Jeden ze vzorků se nazývá „endpl“ (z anglického *endplate*), protože to je jenom dodatečný vzorek s přiotevřenou přítlačnou deskou, který byl udělán za účelem posouzení vlivu přítlačné desky na protékání kalu mezi lamelami válce odvodňovacího zařízení.

5.1.4 Výsledky testování a jejich hodnocení

Z výsledků laboratorní analýzy vzorků (viz. Příloha 5. Výsledky laboratorní analýzy vzorků z testování mísičů) se pro každé nastavení odebraly nejlepší dosažené hodnoty klíčových výkonnostních parametrů odvodňovače. Modrou jsou označeny odhadnuté hodnoty parametrů, během testování totiž nebyly odebrány dva odpovídající vzorky kalu. Při výpočtech parametru pro 2. nastavení se hodnoty TS a TSS kalu nahradily hodnotami vzorků č. 22-23. Odhad je však oprávněný, jelikož dálo se předpokládat, že se tyto vzorky nebudou významně lišit od vzorků odebraných půl hodiny před tím.

Za účelem porovnání byla sestavena tabulka, ve které se všechny rozdíly vyjádřily procentuálně. U hmotnostního toku a spotřeby polymeru se tyto rozdíly vypočítávaly podle vzorce:

$$R_x = \frac{P_0 - P_i}{P_0} \cdot 100\ [\%] \tag{19}$$

kde R_x je procentuální změna ve srovnání s 0. nastavením. P_0 je hodnota parametru pro 0. nastavení v odpovídajícím režimu (maximální sušina nebo maximální hmotnostní tok), P_i je hodnota parametru pro 1. nebo 2. nastavení ve stejném režimu.

U sušiny v kalovém koláči a míry zachycení byl použit vzorec:

$$P_x = P_0 - P_i\ [\%] \tag{20}$$

Výsledky testování jsou představeny v příloze k této práci (viz. Příloha 6. Procentuální změny výkonnostních parametrů odvodňovače). Červená čísla označují celkový pokles parametru výkonu ve srovnání s hodnotami pro 0. nastavení. Zelená čísla označují celkové zvýšení výkonnostních parametrů ve srovnání s hodnotami pro 0. nastavení.

1. Hmotnostní tok

Pokud jde o hmotnostní tok, je snadné vidět, že ve srovnání s nastavením bez flokulační nádrže je jakékoli nastavení využívající potrubní mixéry v průměru o 24 % lepší než nastavení bez něj po většinu času, pokud se bere průměrné zvýšení po celou dobu každého nastavení s každým mixérem.

Kromě toho první nastavení (s flokulační nádrží) vykazuje v průměru 18,5% zlepšení, zatímco 2. nastavení (bez ní) vykazuje — opět v průměru — 29,4% zlepšení ve srovnání s nastavením č. 0 (bez dynamického nebo statického mísiče).

Na základě údajů o vlivu dynamických mísičů na hmotnostní tok lze dospět k ještě jednomu závěru, a to že nastavení s flokulační nádrží a jakýmkoliv dynamickým mísičem je nejhorší možná varianta. Kombinace obou způsobuje zdvojnásobení odporu vůči proudění kalu a obecně zpomaluje proces odvodňování. Je to zřejmé, vezmou-li se průměry obou režimů pro každý potrubní mixér a porovnají se mezi sebou (Tab. 13). Nastavení s dynamickými směšovači a flokulační nádrží v tomto smyslu vykazují podprůměrný výsledek.

Tab. 13 Porovnání hmotnostního toku při různých nastaveních

Mixér	-			Dynamický mísič				Konkurenční dynamický mísič MPT3				Statický mísič			
Nastavení	0			1		2		1		2		1		2	
Režim	Max. sušina	Max. hmot. tok		Max. sušina	Max. hmot. tok	Max. sušina	Max. hmot. tok	Max. sušina	Max. hmot. tok	Max. sušina	Max. hmot. tok	Max. sušina	Max. hmot. tok	Max. sušina	Max. hmot. tok
Hmotnostní tok [kg-DS/h]	26.70	52.50	Procentuální změna	1.12 %	33.14 %	29.59 %	23.62 %	2.25 %	12.95 %	25.47 %	36.38 %	23.60 %	38.10 %	29.21 %	32.38%
Aritm. průměr	39.6			17.13		26.61		7.6		30.93		30.85		30.8	

Závěry: Mixéry výrazně a dostatečně zlepšují výkon jednotky. Nejlepší možností se zdá být nastavení se statickým mixérem (v průměru 31% zlepšení ve srovnání s 0. nastavením, zatímco ostatní dynamické mixéry dosáhly vrcholu na 21,8 % — viz. Příloha 7. Změna parametrů ve srovnání se standardním výkonem jednotky VOLUTE™ a cílovými hodnotami). 2. nastavení mělo obecně lepší výkon než 1. nastavení. Nejhorší zapojení jsou s dynamickým mixérem a flokulační nádrží.

2. Spotřeba polymeru

Dávkování polymeru se značně snížilo. Průměrný rozdíl nyní činí 23,7 %. Výjimkou je 2. nastavení s použitím dynamického mísiče od ČVUT v režimu maximálního hmotnostního toku, kde bylo zapotřebí více polymeru k úspěšnému odvodnění kalu. Statický mixér přináší nejlepší možné výsledky se snížením dávky o 74,2 % při vysoké sušině a více než 27,6% snížením při vysokém výkonu.

Výsledky se však nezdají důvěryhodné kvůli náhlému nárůstu použitého polymeru ve 2. nastavení při maximálním hmotnostním toku s dynamickým mísičem od ČVUT. 1. nastavení s flokulační nádrží a jakýmkoli dynamickým mixérem funguje hůře nebo stejně, kromě zmíněného hrotu.

Závěry: Mísiče aktivně snižují množství flokulantu potřebného k odvodnění kalu. Statický mixér zřejmě poskytuje nejlepší výkon ze všech, s MPT3 a dynamickým mísičem od ČVUT za ním. Varianty bez flokulační nádrže obvykle vykazují lepší výkon než ty s ní, nicméně u tohoto parametru nelze dosáhnout přesného závěru.

3. Sušina v kalovém koláči

Průměrný nárůst sušiny je 1,04 %. Je pozoruhodné, že nejhorší výsledek byl dosažen s 1. nastavením s dynamickým mixérem od ČVUT a flokulační nádrží v režimu maximálního hmotnostního toku. Kromě toho existují dva poklesy v 1. nastavení u MPT3 pro oba režimy. K velmi pozitivnímu závěru lze dospět ohledně 2. nastavení: nastavení bez flokulační nádrže vede k průměrnému 1,77% zvýšení sušiny v kalovém koláči bez ohledu na použitý mixér. 1. nastavení mělo průměrný nárůst 0,32 %.

Závěry: Mísiče mají obecně pozitivní vliv na obsah sušiny v kalovém koláči. Nejlepší výkon podává dynamický mísič od ČVUT v režimu maximální sušiny. Druhou nejlepší možností je statický mixér. V režimu vysokého hmotnostního toku se nejlepších výsledků dosahuje se statickým mixérem. Účinek flokulační nádrže je opět škodlivý pro celkový výkon jednotky VOLUTE.

4. Míra zachycení

Míra zachycení zaznamenala v průměru mírný nárůst o 0,31 %. Avšak 2. nastavení bez flokulační nádrže funguje mnohem lépe s 1% nárůstem ve srovnání s 0. možností. 1. nastavení mělo 0,38% snížení hodnoty parametru. Nejhoršími možnostmi se zdají být možnosti, které využívají současně jakýkoli dynamický mixér a flokulační nádrž.

Závěry: Mixéry mají nejednoznačný vliv na provoz jednotky VOLUTE™, pokud jde o rychlost zachycení. Flokulační nádrž pokračovala ve vzoru nejhorších výsledků s dynamickými mixéry, ale zdá se, že má pozitivní vliv na nastavení se statickým mixérem.

5.1.5 Závěry testování

Tabulka srovnání výsledků a cílů je uvedena v příloze (viz. Příloha 7. Změna parametrů ve srovnání se standardním výkonem jednotky VOLUTE™ a cílovými hodnotami). Každý mixér a průměr každého parametru jsou porovnávány s výkonem standardní jednotky VOLUTE™. Zeleně zbarvené buňky cílové hodnoty znamenají úspěch, červená tak znamená neúspěch.

Vzhledem k tomu, že první nastavení s flokulační nádrží se nezdá být optimální, na vyžádání společnosti AMCON pouze hodnoty druhého nastavení byly považovány za ukazatele úspěchu nebo selhání mísičů. Ve zmíněné tabulce je snadné vidět jednotlivé nevýhody každého mixéru a každého nastavení.

Většina cílových hodnot byla překonána s dynamickým mixérem od ČVUT. Podařilo se vytvořit potřebné zvýšení hmotnostního toku, sušiny v kalovém koláči a míry zachycení. Statický mixér a MPT3 dosáhly dvou cílů: snížení spotřeby polymeru a vyšší hmotnostní tok. Nutno však říct, že kombinace statického mixéru s flokulační nádrží nedělala takové problémy jako u dynamických potrubních mixérů a pokud by se porovnala všechna nastavení (a nejen to druhé), dosáhla by tří cílů ze čtyř taky. I když se nezvýšila míra zachycení, statický mixér vykazoval lepší hodnoty sušiny v kalovém koláči než MPT3.

Flokulační nádrž zpravidla poškozovala výkon jednotky VOLUTE™: v případě statického mísiče však měla opačný vliv na míru zachycení a v případě dynamického napomáhala ke snížení spotřeby polymeru. Stále však platí, že většinou přinášelo nastavení s flokulační nádrží výrazně horší výsledky než odpovídající nastavení bez ní.

5.2 Flotační jednotka

Jednotka byla optimalizována pro lepší výkon při zpracování odpadních vod z průmyslových odvětví s vysokým obsahem tuků a vlákniny, nicméně testování bylo provedeno s aktivovaným kalem z ČOV Rudná. Testování probíhalo na území čistírny před budovou vývojového a experimentálního střediska AMCON (Obr. 57).

Obr. 57 Flotační jednotka na testovacím místě na ČOV Rudná

Jednotka byla vybavena dávkovačem flokulantu, dynamickým mixérem a mikrobublinným generátorem.

5.2.1 Cíle testování

Cílem testování flotační jednotky bylo vyhodnocení optimalizované jednotky. Mezi vedlejší cíle patřilo

- posouzení míry, do které CFD model odpovídal skutečnosti s pomocí stopovače,
- porovnání potrubního elektromagnetického a příložného ultrazvukového průtokoměru za účelem validace posledně uvedeného,
- tzv. bublinkový test, podle něhož se posuzuje kvalita rozpuštění vzduchu.

Klíčovými parametry, podle kterých se posuzovala jednotka, byly míry zachycení škodlivin podle CHSK, BSK, NL a obsahu tuků.

5.2.2 Metodika a podmínky testování

1. Stopovací zkouška

Stopovací zkouška byla použita k ověření matematického modelu použitého pro simulaci proudění přepracované flotační jednotky. Za tímto účelem byla jednotka nastavena na provoz s čistou vodou a stopovač (manganistan draselný) byl vstřikován u místa nátoku. Injektor sestával ze silikonové hadičky v plastovém pouzdře s připojenou injekční stříkačkou (Obr. 58).

Obr. 58 Improvizovaný injektor stopovače

Průhledné panely ve stěně jednotky umožnily zaznamenat chování sledovače uvnitř jednotky a porovnat jej s obrysy a vektory původního matematického modelu. Srovnání bylo usnadněno holografickými brýlemi *Microsoft Hololens*, které byly doplněny o data ze simulací.

Obr. 59 Znázornění proudnic uvnitř jednotky skrz brýle Microsoft Hololens

Jedná se o vizuální informativní test. Test je považován za úspěšný, pokud proudění stopovače odpovídá simulovaným drahám. Je však třeba poznamenat, že model měl mírně odlišnou polohu přítoku a jedna z dělicích příček byla uvolněná. Mohlo to způsobit určité nesrovnalosti mezi modelem a prototypem.

2. Vyhodnocení účinnosti jednotky

Do flotační jednotky se přečerpával aktivovaný kal z nitrifikační zóny aktivační nádrže. Průtok kalu měl být neměnný po celou dobu testování, ale ve skutečnosti se pohyboval mezi 3,09 až 4,85 m^3/h z důvodu měnících se vlastností odpadní vody. Kalová pěna a plovoucí kal byl odstraňován řetězovým shrabovákem. Odebíraly se vzorky natékající odpadní vody a upravená voda. Testovala se jenom účinnost odstranění nerozpuštěných látek (čili TSS), která se vypočítává podle vzorce:

$$\text{Účinnost} = \frac{TSS_{inlet} - TSS_{outlet}}{TSS_{inlet}} \cdot 100\ [\%] \qquad (21)$$

kde TSS_{inlet} jsou nerozpuštěné látky na nátoku [mg/l], TSS_{outlet} jsou nerozpuštěné látky v upravené vodě [mg/l].

Dalším parametrem pro vyhodnocení účinnosti flotace je účinnost odstranění nerozpuštěných látek rozpuštěným vzduchem:

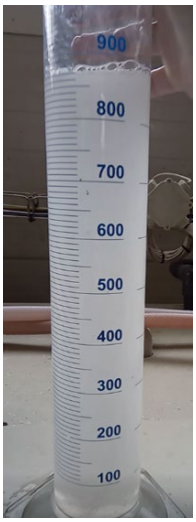
$$\text{Účinnost odstranění vzduchem} = \frac{TSS_{inlet} - TSS_{outlet}}{Q_{inlet}} \cdot Q_{vzduch}\ [\%] \qquad (22)$$

kde Q_{inlet} je průtok kalu [l/h], Q_{vzduch} je průtok vzduchu do mikrobublinného generátoru [Nl/h]. Průtok vzduchu do jednotky se měřil pomocí měřiče průtoku vzduchu a byl konstantně 3,5 Nl/h. Provozní tlak generátoru mikrobublin byl 1,5 baru.

Vzorky č. 4 až 9 byly odebírány postupně po 30 minutách nepřetržitého provozu.

3. Bublinkový test

Test přispívá k hodnocení účinnosti flotace a je svérázným doplňkem k parametru účinnosti odstranění TSS vzduchem. Do odměrného válce se naleje přibližně 900 ml vody z kontaktní komory při provozu s čistou vodou (Obr. 60).



Obr. 60 Odměrný válec s tzv. "bílou" vodou obsahující mikrobubliny

Dále se změří doba, za kterou se nejpomalejší bublina dosáhne hladiny. Z toho se vypočítá rychlost bubliny, podle které se pak vypočítá čas, za který bublina urazí vzdálenost mezi generátorem mikrobublin a hladinou. Následně se tato hodnota porovná s dobou zdržení. Doba zdržení by měla být delší než čas, za který nejpomalejší bublina dosáhne hladiny. Doba zdržení se vypočítává podle vzorce:

$$Doba\ zdržení = \frac{V_{jednotky}}{Q_{inlet}}\ [min] \tag{23}$$

kde $V_{jednotky}$ je objem testovací jednotky (530 l).

Nejpomalejší rychlost vzduchových bublin se rovnala 2,8 mm/s, což se očekávalo. To znamená, že nejpomalejší bublina překoná výšku vody nad generátorem mikrobublin přibližně za 6 minut. Doba zdržení jednotky se pohybuje mezi 6,6 až 10,3 minutami.

5.2.3 Výsledky testování

1. Stopovací zkouška

Voda vynášela stopovač vzhůru k hladině v kontaktní komoře s málo znatelnými rotačními příčnými pohyby (Obr. 61), což odpovídá simulovaným drahám (Obr. 62). Celkově se flotační jednotka chovala podobně jako model a chovala se tak i v další fázi testování s odpadní vodou. Lze tedy dospět k závěru, že model dobře odpovídá chování prototypu.

Obr. 61 Vstříknutí manganistanu draselného nad mikrobublinným generátorem

Obr. 62 Znázornění proudnic uvnitř jednotky skrz brýle Microsoft Hololens

2. Vyhodnocení účinnosti jednotky

Výsledky testování jsou shrnuty do tabulky (Tab. 14). Jednotka běžela nepřetržitě čtyři hodiny v kuse bez znatelného kolísání kvality filtrátu a vykazovala téměř bezvadné výsledky. Vyžadovalo to však poněkud neustálé ladění úrovně přepadu, aby se zabránilo přetečení jednotky.

Tab. 14 Odstranění TSS rozpuštěným vzduchem, účinnost a další provozní parametry jednotky

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Průtok odpadní vody [m^3/h]	2,71	4,90	5,00	4, 85	4,40	4,94	3,80	3,60	3,09
TS_{inlet} [%]	0,36	0,34	0,32	0,34	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34
TSS_{inlet} [mg/l]	2850	2710	2580	2770	2570	2460	2650	2580	2590
TSS_{outlet} [mg/l]	30	0*	0*	10	0*	0*	0*	0*	0*
Účinnost [%]	98,95	100,00	100,00	99,64	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
TSS odstraněného kalu [mg/l]	2,55	1,34	1,53	2,18	2,07	1,80	1,62	1,54	1,40
Odstranění kalu vzduchem [mg/Nl_{vzduch}]	36391	34972	33294	35617	33165	31746	34198	33294	33423
Hmotnostní tok [kg/h]	9,76	16,67	16	16,49	14,52	16,3	12,92	12,24	10,51

* hodnota je tak nízká, že se jí nedalo změřit

Hodnocení míry zachycení podle CHSK, BSK a tuků nebylo pro tento test nutné z důvodu vlastností testovaného substrátu, který byl snadno oddělitelný a účinnost by byla nadhodnocena oproti standardnímu substrátu (odpadní vody z výroby potravin). Odstraňování TSS bylo z tohoto důvodu také nadhodnoceno a standardní odstraňování TSS v odpadních vodách potravinářského průmyslu se očekává v rozmezí 80-90 %.

5.2.4 Závěry testování

Test přinesl skvělé výsledky a užitečné poznatky pro budoucí testování. Flotační jednotka se ukázala jako účinná při čištění aktivovaného kalu, a proto se očekává, že bude dobře fungovat s každým dalším deklarovaným typem odpadní vody. Její účinnost odstranění TSS po 4 hodinách nepřetržitého provozu při průtoku 3,1 – 4,8 m3/h je prakticky 100 % [Tabulka 2]. To znamená, že hodnota TSS většiny vzorků je tak nízká, že je ve skutečnosti nedetekovatelná. Ani v nejhorším případě kvalita filtrátu neklesla pod 98 %. Vzhledem k tomu, že se vločky aktivovaného kalu snadno oddělují, tento druh výsledku se dal očekávat.

Stopovací zkouška sloužila jako předběžné empirické potvrzení, že simulované proudění odpovídá pozorovanému chování flotační jednotky. Bublinkový test byl proveden, aby doplnil parametr „odstranění kalu vzduchem“ při hodnocení výkonu generátoru mikrobublin. Ukázalo se, že je dostačující, ale zároveň těžko ovladatelný, protože postrádá automatický kalibrační systém.

5.2.5 Přepočítávací škála pro flotační jednotku

Po úspěchu testování byla vypočítána přepočítávací škála, podle které by se měly vyrábět jednotky pro celé požadované rozmezí průtoků. Vzhledem k tomu, že uvnitř flotační jednotky na tekutinu působí převážně síly tíže, bylo rozhodnuto použít Froudova kritéria modelové podobnosti. Tím pádem průtoková a rychlostní měřítka vypadají následujícím způsobem:

$$M_v = \sqrt{M_L} \tag{24}$$

$$M_Q = M_L^{5/2} \tag{25}$$

kde M_v je rychlostní měřítko, M_Q je průtokové měřítko a M_L je geometrické měřítko [99]. Co se týče objemu, tak platí

$$M_V = M_L^3 \tag{26}$$

Podle rovnic *(24)* až *(26)* byla vypočítána objemová měřítka pro požadované průtoky (Tab. 15).

Tab. 15 Objemová měřítka pro požadované průtoky

Průtok [m^3/h]	M_Q	M_V
5 7	1.40	1.50
10	1.43	1.53
12	1.20	1.24
30	2.50	3.00
50	1.67	1.85

Postupným sečtením hodnot objemového měřítka dostaneme objemové koeficienty, podle kterých se přepočítává potřebný objem jednotky pro určitý průtok z původního objemu jednotky, který činí 530 l (Tab. 16).

Tab. 16 Přepočítávací škála pro flotační jednotku

Průtok [m^3/h]	Objemový koeficient	Objem [m^3]
5	1	0.53
7	1.50	0.80
10	2.30	1.22
12	2.86	1.52
30	8.60	4.56
50	15.88	8.41

6 Závěr

Kalové hospodářství v Evropské unii, a tedy i konkrétně v České republice, tak čelí řadě výzev, které jsou stejně naléhavé jako jakýkoliv jiný ekologický problém současnosti. Zákonodárci na tyto výzvy reagují tím, že přehodnocují a vylepšují dobře zavedenou legislativu v tomto oboru. Již nebude možné většinu vyprodukovaného kalu materiálově využívat přímo na půdě. Jak bylo ukázáno v teoretické části práce, vývoj kalového hospodářství se může v následujících letech ubírat dvěma směry: zvýšení podílu kompostování nebo podílu termického zpracování. V obojích případech odvodňování a sušení kalu budou nabírat na významu, buď to z důvodů nepostačující kapacity kompostáren a zpřísnění požadavků na dočasné uložení, anebo z důvodu vysokých poplatků za termické zpracování kalů.

V této práci byly probrány vlastnosti a druhy kalu včetně nebezpečí, která mohou vzniknout při nedostatečné úpravě tohoto druhu odpadu. Mikropolutanty jako například AOX, PCB a PAU, rezidua léčiv, těžké kovy a nežádoucí mikroorganismy obsažené v čistírenských kalech mají ekotoxické účinky na životní prostředí. Vzhledem k tomu, že se kal používá pro hnojení a pěstování ovoce a zeleniny, je to hrozba i pro člověka.

Hlavním úkolem práce bylo optimalizace flotační jednotky a vývoj nových potrubních mísičů, které zlepšují efektivitu odvodnění kalu a umožňují výrazně ušetřit náklady na velké flokulační nádrže. V praktické části je popsána měřící kampaň, která byla provedena za účelem získání potřebných dat k CFD modelování proudění kalu v těchto zařízeních a vytvoření databáze kalů pro příští projekty. Celkem bylo změřeno 27 vzorků ze čtyř průmyslových podniků. Měřily se sedimentační vlastnosti, viskozita, hustota a koncentrace nerozpuštěných látek.

Potrubní mísiče byly navrhovány tak, aby měly co nejrovnoměrnější koncentrace flokulantu za míchadlem a co nejmenší tlakovou ztrátu při CFD simulacích. Výsledkem vývoje statického mísiče byla řada jednotek schopná pokrýt rozsah průtoků 0,1 až 133,5 m3/h s rozsahem rovnoměrnosti mísení 81 až 92,1 % a tlakovou ztrátou v rozmezí 0,22 až 27,2 kPa. Dynamické mixéry byly navrženy na průtok 0,1 až 76,4 m3/h s rozsahem rovnoměrností mísení 86,4 % až 99 % a tlakovou ztrátou v rozmezí 0,04 až 32,7 kPa.

Flotační jednotka se optimalizovala tak, aby se zvýšila doba zdržení a aby průtočná plocha celým zařízením byla co nejvíc podobná. Pro flotační jednotku byla vytvořena přepočítávací škála pro průtoky 5 až 50 m3/h.

V poslední kapitole praktické části této práce byla popsána testování vyvinutých zařízení ve vývojovém a experimentálním středisku AMCON na ČOV Rudná v okrese Praha-západ. Potrubní mísiče se testovaly s odvodňovacím lisem VOLUTE™ a hodnotily se podle jeho výkonnostních parametrů: hmotnostní průtok, spotřeba flokulantu, sušina v kalovém koláči a míra zachycení nečistot. Pilotní testování ukázalo, že navržený dynamický i statický mísič v porovnání se zvoleným konkurenčním zařízením poskytuje uspokojivější výsledky. Dynamický mísič zvýšil hmotnostní tok o 26,6 %, sušinu o 2,55 % a míru zachycení o 2 %, ale vyžadoval o 6,1 % více flokulantu. Statický mísič zvýšil hmotnostní tok o 30,8 %, snížil spotřebu polymeru o polovinu a zvýšil sušinu o 1,85 %.

Testování optimalizované flotační jednotky je také považováno za úspěšné, jelikož účinnost odstranění nerozpuštěných látek (TSS) z odpadní vody činila téměř 100 %.

Všechna otestovaná zařízení tak mohou být považována za úspěšná a budou se v současné nebo v modifikované podobě používat na stávajících, příp. nových ČOV. Vzhledem k důležitosti problematiky čištění odpadních vod a odvodnění kalu do budoucna daný společný projekt “AMCON” a ČVUT v Praze skromně přispívá k bádání řešení otázek pojících se k současné klimatické krizi.

7 Seznam použitých zkratek

ČOV	čistírna odpadních vod
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NL	nerozpuštěné látky
TS	*total solids*
TSS	*total suspended solids*
VS	*volatile solids*
VSS	*volatile suspended solids*
DM	*dry matter*
POP	perzistentní organické polutanty
DAF	*dissolved air flotation*
EO	ekvivalentní obyvatel
STRUBIAS	*struvite, biochars and ashes*
EU	Evropská unie
ZEVO	zařízení pro energetické využití odpadů
ÚKZÚZ	Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský
PAU	Polycyklické aromatické uhlovodíky
KTJ	Kolonie tvořící jednotky
AOX	Halogenované organické sloučeniny
PCB	Polychlorované bifenyly
DDT	Dichlordifenyltrichlorethan
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze
DAF	*Dissolved air flotation*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
DS	*Dry solids*
DN	Jmenovitá světlost
OM	*Organic matter*

8 Seznam použité literatury

[1] Vodovody, kanalizace a vodní toky: 1.4 Kaly v roce 2020. In: *ČSÚ [Český statistický úřad]* [online]. 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/142098607/2800212111.pdf/64ed79f4-07f3-43cc-be85-a2bec7609c35?version=1.3

[2] *ČSN EN 1085. Čištění odpadních vod – Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. Třídící znak 75 0160.

[3] DEGRÉMONT, ed. *Water treatment handbook*. 7th [English] ed. Rueil-Malmaison, France: Degrémont, 2007. ISBN 9782743009700.

[4] METCALF & EDDY, Inc.,, George TCHOBANOGLOUS, H. STENSEL, Ryujiro TSUCHIHASHI a Franklin BURTON. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-340118-8.

[5] WANG, Hou-Feng, Hao HU, Hua-Jie WANG, Ya-Nan BAI, Xiao-Fei SHEN, Wei ZHANG a Raymond ZENG. Comprehensive investigation of the relationship between organic content and waste activated sludge dewaterability. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2020, **394** [cit. 2021-10-07]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122547

[6] Podklady pro oblast podpory odpadového a oběhového hospodářství OPŽP 2021 – 2027: Zařízení na zpracování kalů z ČOV. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_obehove_hospodarstvi/$FILE/OODP-5_Kaly%20z%20%C4%8COV_20200529.pdf

[7] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1357/2014 ze dne 18. prosince 2014, kterým se nahrazuje příloha III směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic*. In: . Úřední věstník, 2014, L 365/89.

Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1357&from=SK

[8] MORTIMER, D.N. Persistent organic pollutants in foods: science, policy and regulation. *Persistent Organic Pollutants and Toxic Metals in Foods* [online]. Elsevier, 2013, s. 3-19 [cit. 2021-10-08]. ISBN 9780857092458. Dostupné z: doi:10.1533/9780857098917.1.3

[9] YANG, Yun-Ya, James GRAY, Edward FURLONG, Jessica DAVIS, Rhiannon REVELLO a Thomas BORCH. Steroid Hormone Runoff from Agricultural Test Plots Applied with Municipal Biosolids. *Environmental Science & Technology* [online]. 2012, **46**(5), 2746-2754 [cit. 2021-10-08]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es203896t

[10] CHEN, Zhou, Yanzeng LI, Chengsong YE, Xin HE a Shenghua ZHANG. Fate of antibiotics and antibiotic resistance genes during aerobic co-composting of food waste with sewage sludge. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, **784** [cit. 2021-10-18]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146950

[11] VICENT, Teresa, Glòria CAMINAL, Ethel ELJARRAT a Damià BARCELÓ, ed. *Emerging Organic Contaminants in Sludges* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013 [cit. 2021-10-08]. The Handbook of Environmental Chemistry. ISBN 978-3-642-35608-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-35609-4

[12] DE JONG, P., M.R. EEKHOF, J.R.A.G. SCHEPMAN a Raadgevend WITTEVEEN + BOS. *Handboek slibontwatering*. 1st. Zoetermeer: Utrecht : STOWA, 1998. ISBN 90-5773-047-2.

[13] MATOUŠEK, Václav. *Hydraulika (Přednáška): Základy proudění nenewtonských kapalin*. ČVUT v Praze, 2020.

[14] AARNE VESILIND, P., ed. *Wastewater Treatment Plant Design*. 1st ed. London: IWA Publishing, 2003. ISBN 1-57278-177-7.

[15] BAJPAI, Pratima. Composition of Waste. BAJPAI, Pratima. *Management of Pulp and Paper Mill Waste* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 19-29 [cit. 2021-10-10]. ISBN 978-3-319-11787-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-11788-1_3

[16] DONKOR, Kwame, Lalitha GOTTUMUKKALA, Danie DIEDERICKS a Johann GÖRGENS. An advanced approach towards sustainable paper industries through simultaneous recovery of energy and trapped water from paper sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [online]. 2021, **9**(4) [cit. 2021-10-10]. ISSN 22133437. Dostupné z: doi:10.1016/j.jece.2021.105471

[17] RABEMANOLONTSOA, Harifara, Eka TRIWAHYUNI a Masatsugu TAKADA. Consolidated bioprocessing of paper sludge to acetic acid by clostridial co-culture. *Bioresource Technology Reports* [online]. 2021, **16** [cit. 2021-10-10]. ISSN 2589014X. Dostupné z: doi:10.1016/j.biteb.2021.100842

[18] SHI, W., M.G. HEALY, S.M. ASHEKUZZAMAN, K. DALY, J.J. LEAHY a O. FENTON. Dairy processing sludge and co-products: A review of present and future re-use pathways in agriculture. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **314** [cit. 2021-10-10]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.128035

[19] ASHEKUZZAMAN, S.M., Patrick FORRESTAL, Karl RICHARDS a Owen FENTON. Dairy industry derived wastewater treatment sludge: Generation, type and characterization of nutrients and metals for agricultural reuse. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **230**, 1266-1275 [cit. 2021-10-10]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.025

[20] SIMÓN, Daiana, Cintia PEREZ BATTISTESSA, Diego CAZZANIGA ARDUZZO, Sebastián GASS a Adrián CRISTÓBAL. Valorization of sludge from the effluent treatment of the dairy industry as clay substitutes in building bricks. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **307** [cit. 2021-10-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124955

[21] Feedback from: Arnika Association. *European Commission* [online]. Bruxelles, 2020 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12411-Hazardous-waste-updated-concentration-limits-for-chemical-pollutants/F541624_en

[22] PÉREZ-MURCIA, M.D., E. MARTÍNEZ-SABATER, M.A. DOMENE et al. Role of proteins and soluble peptides as limiting components during the co-composting of agro-industrial wastes. *Journal of Environmental Management* [online]. 2021, **300** [cit. 2021-10-10]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2021.113701

[23] PASCUAL, Jose, Ana MORALES, Luis AYUSO, Pedro SEGURA a Margarita ROS. Characterisation of sludge produced by the agri-food industry and recycling options for its agricultural uses in a typical Mediterranean area, the Segura River basin (Spain). *Waste Management* [online]. 2018, **82**, 118-128 [cit. 2021-10-10]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2018.10.020

[24] OKORO, Oseweuba, Zhifa SUN a John BIRCH. Meat processing dissolved air flotation sludge as a potential biodiesel feedstock in New Zealand: A predictive analysis of the biodiesel product properties. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **168**, 1436-1447 [cit. 2021-10-11]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.128

[25] HAMAWAND, Ihsan, Pam PITTAWAY, Larry LEWIS, Sayan CHAKRABARTY, Justin CALDWELL, Jochen EBERHARD a Arpita CHAKRABORTY. Waste management in the meat processing industry: Conversion of paunch and DAF sludge into solid fuel. *Waste Management* [online]. 2017, **60**, 340-350 [cit. 2021-10-11]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2016.11.034

[26] POLLERT, Jaroslav. *Přednášky*.

[27] Klärschlamm in OWL: Kooperationsvertrag unterzeichnet. *Euwid — Recycling und Entsorgung* [online]. Dietfurt-Töging, 2020 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://www.euwid-

recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/klaerschlamm-in-owl-kooperationsvertrag-unterzeichnet.html

[28] Dossier: Neuordnung der Klärschlammentsorgung - Was kommt jetzt auf Abwasserentsorger zu?. *Euwid — Wasser und Abwasser* [online]. Dietfurt-Töging, 2021 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://www.euwid-wasser.de/news/politik/einzelansicht/Artikel/neuordnung-der-klaerschlammentsorgung-was-kommt-jetzt-auf-abwasserentsorger-zu.html

[29] Klärschlammkooperation OWL schreitet voran. *Kreis Lippe* [online]. Detmold, 2020 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: https://www.kreis-lippe.de/kreis-lippe/aktuelles/meldungen/fachbereich-umwelt-energie/klaerschlammkooperation-owl-schreitet-voran.php

[30] *Vyhláška č. 437/2016 Sb.: Vyhláška o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady)*. In: .

[31] *SDĚLENÍ KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU, RADĚ, EVROPSKÉMU HOSPODÁŘSKÉMU A SOCIÁLNÍMU VÝBORU A VÝBORU REGIONŮ: Směrem k oběhovému hospodářství: program nulového odpadu pro Evropu*. In: . 2014. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0017.01/DOC_1&format=PDF

[32] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2008/98/ES ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic*. In: . Úřední věstník, 2018, L 312.

[33] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/851 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech*. In: . Úřední

věstník, 2018, L 150/109. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=CS

[34] CORRADINI, Fabio, Pablo MEZA, Raúl EGUILUZ, Francisco CASADO, Esperanza HUERTA-LWANGA a Violette GEISSEN. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment* [online]. 2019, **671**, 411-420 [cit. 2021-10-15]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.368

[35] TAGG, Alexander, Elke BRANDES, Franziska FISCHER, Dieter FISCHER, Josef BRANDT a Matthias LABRENZ, Jay GAN, ed. Agricultural application of microplastic-rich sewage sludge leads to further uncontrolled contamination. *Science of the Total Environment*. 2021, , 1-21, 21 s. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150611

[36] Lutte contre la pollution plastique : Brune Poirson reçoit les fabricants de machines à laver. *Le ministère de la Transition écologique* [online]. La Défense, 2020 [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: https://www.ecologie.gouv.fr/lutte-contre-pollution-plastique-brune-poirson-recoit-fabricants-machines-laver

[37] Lutte contre la pollution plastique. *Le ministère de la Transition écologique* [online]. La Défense [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: https://www.ecologie.gouv.fr/lutte-contre-pollution-plastique

[38] *SDĚLENÍ KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU, RADĚ, EVROPSKÉMU HOSPODÁŘSKÉMU A SOCIÁLNÍMU VÝBORU A VÝBORU REGIONŮ: Uzavření cyklu – akční plán EU pro oběhové hospodářství*. In: . Bruxelles, 2015. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0005.02/DOC_1&format=PDF

[39] *SMĚRNICE RADY ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství*. In: . Úřední věstník, 2018, L 181. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:01986L0278-20180704&from=EN

[40] *SDĚLENÍ KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU, RADĚ, EVROPSKÉMU HOSPODÁŘSKÉMU A SOCIÁLNÍMU VÝBORU A VÝBORU REGIONŮ: Odolnost proti nedostatku kritických surovin: zmapování cesty k lepšímu zabezpečení a udržitelnosti*. In: . Úřední věstník, 2020, COM(2020) 474. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN

[41] HUDCOVÁ, Hana, Jan VYMAZAL a Miloš ROZKOŠNÝ. Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union. *Soil and Water Research* [online]. 2019, **14**(2), 104-120 [cit. 2021-10-21]. ISSN 18015395. Dostupné z: doi:10.17221/36/2018-SWR

[42] *Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1010 ze dne 5. června 2019 o sladění povinností podávání zpráv v oblasti právních předpisů souvisejících s politikou životního prostředí a o změně nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 166/2006 a (EU) č. 995/2010, směrnic Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES, 2004/35/ES, 2007/2/ES, 2009/147/ES a 2010/63/EU, nařízení Rady (ES) č. 338/97 a (ES) č. 2173/2005 a směrnice Rady 86/278/EHS*. In: . Úřední věstník, 2019, L 170/115. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1010&from=CS

[43] *NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2019/1009 ze dne 5. června 2019, kterým se stanoví pravidla pro dodávání hnojivých výrobků EU na trh a kterým se mění nařízení (ES) č. 1069/2009 a (ES) č. 1107/2009 a zrušuje nařízení (ES) č. 2003/2003*. In: . Úřední věstník, 2019, L 170. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R1009-20190625&from=EN

[44] *SMĚRNICE RADY 91/676/EHS ze dne 12. prosince 1991 o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů*. In: . Úřední věstník, 1991, L 375. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:01991L0676-20081211&from=EN

[45] ROSKOSCH, Andrea a Patric HEIDECKE. GERMAN ENVIRONMENT AGENCY. SEWAGE SLUDGE DISPOSAL in the Federal Republic of

Germany. In: *Umwelt Bundesamt* [online]. [cit. 2021-10-17]. ISSN 2363-832X]. Dostupné z: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190116_uba_fb_klaerschlamm_engl_bf.pdf

[46] PHOSPHOR-RECYCLING AUF DEM KLÄRWERK HAMBURG. *PHOSPHOR-RECYCLING HAMBURG* [online]. Hamburg, 2018 [cit. 2021-10-05]. Dostupné z: http://www.phosphorrecycling-hh.de/recycling/recycling.html

[47] XIANG, Wei, Xueyang ZHANG, Jianjun CHEN et al. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere* [online]. 2020, **252** [cit. 2021-10-21]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126539

[48] Optimal use of biogas from waste streams: An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020. In: *An official website of the European Union* [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce_delft_3g84_biogas_beyond_2020_final_report.pdf

[49] EBA STATISTICAL REPORT 2020. In: *European Biogas Association* [online]. Bruxelles [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/01/EBA_StatisticalReport2020_abridged.pdf

[50] IEA Bioenergy Task 37: Country Report Summaries 2019. In: *Task 37: Energy from Biogas* [online]. Cork [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/Summary/IEA%20Task%2037%20Country%20Report%20Summaries%202019.pdf

[51] The role of biogas production from industrial wastewaters in reaching climate neutrality by 2050. *European Biogas Association* [online]. Bruxelles [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://www.europeanbiogas.eu/wp-

content/uploads/2021/04/Paper-The-role-of-biogas-production-from-wastewater-in-reaching-climate-neutrality-by-2050.pdf

[52] HAO, Xiaodi, Qi CHEN, Mark VAN LOOSDRECHT, Ji LI a Han JIANG. Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion. *Water Research* [online]. 2020, **170** [cit. 2021-10-24]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2019.115298

[53] SCHNELL, Matthias, Thomas HORST a Peter QUICKER. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *Journal of Environmental Management* [online]. 2020, **263** [cit. 2021-10-22]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2020.110367

[54] CONGILOSI, Jena a Diana AGA. Review on the fate of antimicrobials, antimicrobial resistance genes, and other micropollutants in manure during enhanced anaerobic digestion and composting. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2021, **405** [cit. 2021-10-25]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123634

[55] BUTKOVSKYI, A., G. NI, L. HERNANDEZ LEAL, H.H.M. RIJNAARTS a G. ZEEMAN. Mitigation of micropollutants for black water application in agriculture via composting of anaerobic sludge. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2016, **303**, 41-47 [cit. 2021-10-25]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2015.10.016

[56] *Eurostat: Water statistics* [online]. 2018 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics

[57] GIANICO, Andrea, Camilla BRAGUGLIA, Agata GALLIPOLI, Daniele MONTECCHIO a Giuseppe MININNI. Land Application of Biosolids in Europe: Possibilities, Con-Straints and Future Perspectives. *Water* [online]. 2021, **13**(1) [cit. 2021-10-16]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w13010103

[58] *Eurostat: Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s.))* [online]. [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00030/default/table?lang=en

[59] *National Ordinances | AbfKlärV Sewage Sludge Ordinance: New Sewage Sludge Ordinance in force* [online]. [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: https://www.bmu.de/en/law/sewage-sludge-ordinance/

[60] *Český statistický úřad: Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2020* [online]. 2020 [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2020

[61] Vyhláška 382/2001 Sb.: Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. In: *Sbírka zákonů*. 2001, ročník 2001, částka 145, číslo 382. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541/zneni-20210101#Sum

[62] *Vyhláška č. 305/2019 Sb.: Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady)*. In: . ročník 2019, číslo 305. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2019-305

[63] *Nový zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech: účinnost - 1. ledna 2021*. Praha: Verlag Dashöfer, 2021. Edice AZ - aktuální úplná znění. ISBN 978-80-7635-056-4.

[64] *Vyhláška č. 273/2021 Sb.: Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady*. In: . Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273

[65] *Nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu: s komentářem*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2012. ISBN 978-80-7434-061-1.

[66] *Vyhláška č. 153/2016 Sb.: Vyhláška o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy a o změně vyhlášky č. 13/1994 Sb., kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu*. In: . Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-153/zneni-20191115

[67] *SOVAK ČR k nakládání s čistírenskými kaly* [online]. In: . [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: https://www.sovak.cz/cs/clanek/sovak-cr-k-nakladani-s-cistirenskymi-kaly

[68] *Změny v nakládání s kaly z čistíren odpadních vod* [online]. [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: https://www.caoh.cz/aktuality/zmeny-v-nakladani-s-kaly-z-cistiren-odpadnich-vod.html#_ftn2

[69] CIEŚLIK, Bartłomiej a Piotr KONIECZKA. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of "no solid waste generation" and analytical methods. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **142**, 1728-1740 [cit. 2021-11-02]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.116

[70] *Kaly z čističky vysušené unikátní metodou najdou využití v průmyslu* [online]. [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/karlovy-vary/zpravy/vodarny-a-kanalizace-karlovy-vary-zkousi-novou-technologii.A160905_2270962_vary-zpravy_ba

[71] SCHOLZ, Miklas. Sludge Treatment and Disposal. *Wetlands for Water Pollution Control* [online]. Elsevier, 2016, s. 157-168 [cit. 2021-12-23]. ISBN 9780444636072. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63607-2.00021-6

[72] PROF.DR.IR. JULES VAN LIER a DR. IR. MERLE DE KREUK, ed. *Wastewater Treatment* [online]. Delft University of Technology (Delft), 2017 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://d37djvu3ytnwxt.cloudfront.net/assets/courseware/v1/4dbe5eb1846ca64

3dc8393c8b806b285/asset-v1:DelftX+CTB3365STx+3T2016+type@asset+block/Wastewater_Lecture_Note.pdf

[73] LYČKOVÁ, Barbora, Peter FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. *Zpracování kalů: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/info.html

[74] KRŇÁVEK, Ondřej a Ondřej DOLEŽAL. *ČOV Rudná: Studie*. Brno, 2021.

[75] KROISS, H. a M. NEGM. The effect of nitrate and treatment process on phosphate release in batch gravity thickener. *Water Research* [online]. 1994, **28**(10), 2209-2217 [cit. 2021-10-03]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1354(94)90033-7

[76] SLAVÍČKOVÁ, Kateřina, Marek SLAVÍČEK a České vysoké učení technické v Praze. Stavební FAKULTA. *Vodní hospodářství obcí 1: úprava a čištění vody: úprava a čištění vody*. 2., přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013, . Dostupné také z: https://go.exlibris.link/2H9rkxsC

[77] *Degremont® water handbook: flotation units used in sludge thickening* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/flocculators-settling-tanks-flotation-units/flotation-units/flotation-units-used-in-sludge-thickening

[78] KAMIZELA, Tomasz a Mariusz KOWALCZYK. Sludge dewatering: Processes for enhanced performance. *Industrial and Municipal Sludge* [online]. Elsevier, 2019, s. 399-423 [cit. 2021-12-24]. ISBN 9780128159071. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815907-1.00018-0

[79] CAO, Bingdi, Tao ZHANG, Weijun ZHANG a Dongsheng WANG. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review. *Water Research* [online]. 2021, **189** [cit. 2021-12-28]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2020.116650

[80] NEYENS, E a J BAEYENS. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2003, **98**(1-3), 51-67 [cit. 2021-12-28]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-3894(02)00320-5

[81] PILLI, Sridhar, Puspendu BHUNIA, Song YAN, R.J. LEBLANC, R.D. TYAGI a R.Y. SURAMPALLI. Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2011, **18**(1), 1-18 [cit. 2021-12-28]. ISSN 13504177. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultsonch.2010.02.014

[82] AFSHAR GHOTLI, Reza, Abdul A. A. RAMAN, Shaliza IBRAHIM a Saeid BAROUTIAN. LIQUID-LIQUID MIXING IN STIRRED VESSELS: A REVIEW. *Chemical Engineering Communications* [online]. 2013, **200**(5), 595-627 [cit. 2021-12-29]. ISSN 0098-6445. Dostupné z: doi:10.1080/00986445.2012.717313

[83] GHANEM, Akram, Thierry LEMENAND, Dominique DELLA VALLE a Hassan PEERHOSSAINI. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2014, **92**(2), 205-228 [cit. 2021-12-30]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2013.07.013

[84] THAKUR, R.K., Ch. VIAL, K.D.P. NIGAM, E.B. NAUMAN a G. DJELVEH. Static Mixers in the Process Industries—A Review. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2003, **81**(7), 787-826 [cit. 2021-12-29]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1205/026387603322302968

[85] RNDR HALÁMEK, Bohumír. *DISTRIBUCE RYCHLOSTNÍHO GRADIENTU – DŮLEŽITÉ KRITERIUM PODMÍNEK PŘÍPRAVY VLOČKOVITÝCH SUSPENZÍ*. Brno, , 119-124. Dostupné také z: https://www.smv.cz/index.php?cmd=document&id=984

[86] EDWARDS, M F a M R BAKER. A review of liquid mixing equipment. *Mixing in the Process Industries* [online]. Elsevier, 1992, s. 118-136 [cit. 2021-12-29]. ISBN 9780750637602. Dostupné z: doi:10.1016/B978-075063760-2/50028-7

[87] NIENOW, A W, N HARNBY a M F EDWARDS. Introduction to mixing problems. *Mixing in the Process Industries* [online]. Elsevier, 1992, s. 1-24 [cit. 2021-12-29]. ISBN 9780750637602. Dostupné z: doi:10.1016/B978-075063760-2/50022-6

[88] ALBERINI, F., M.J.H. SIMMONS, A. INGRAM a E.H. STITT. Assessment of different methods of analysis to characterise the mixing of shear-thinning fluids in a Kenics KM static mixer using PLIF. *Chemical Engineering Science* [online]. 2014, **112**, 152-169 [cit. 2021-12-29]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2014.03.022

[89] VALDÉS, Juan P., Lyes KAHOUADJI a Omar K. MATAR. Current advances in liquid–liquid mixing in static mixers: A review. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2022, **177**, 694-731 [cit. 2021-12-30]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2021.11.016

[90] *AMCON Europe s.r.o.: AMCON Řešení pro optimalizaci flotačních jednotek* [online]. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: https://www.amcon-eu.com/cs/amcon-reseni-pro-optimalizaci-flotacnich-jednotek/

[91] SAKR, Marwa, Mohamed M. MOHAMED, Munjed A. MARAQA, Mohamed A. HAMOUDA, Ashraf ALY HASSAN, Jafar ALI a Jinho JUNG. A critical review of the recent developments in micro–nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2021 [cit. 2021-12-31]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2021.11.041

[92] MICHÁLKOVÁ, Lucie. AMCON EUROPE S.R.O. *TECHNICAL SPECIFICATION: "Advanced Mixing and Chemical Optimization for processes of sludge dewatering and flotation"*. Project number CZ.01.1.02/0.0/0.0/19_262/0020152.

[93] AMCON Europe s.r.o.: Odvodňovací lis VOLUTE™. In: *AMCON Europe* [online]. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: https://www.amcon-eu.com/cs/odvodnovaci-lis-volute/

[94] Kompaktní systém úpravy odpadních vod metodou intenzivní flotace: EG17_106/0012265. *TA ČR Starfos* [online]. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: https://starfos.tacr.cz/cs/project/EG17_106%2F0012265#project-main

[95] POLLERT, Jaroslav a Jiří WANNER. *ÚČOV HYDRAULICKÁ A KALOVÁ BEZPEČNOST DN: 1.6.2016 - 31.12.2018*. Praha, 2019.

[96] *Sulzer* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.sulzer.com/en/shared/products/static-mixer-compax

[97] *ANSYS Fluent Theory Guide* [online]. Canonsburg, PA, 2013 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf

[98] *Datenblatt DYNAMISCHER INLINE-MISCHER DIM DN50-DN200: Katalogový list*. Rodgau.

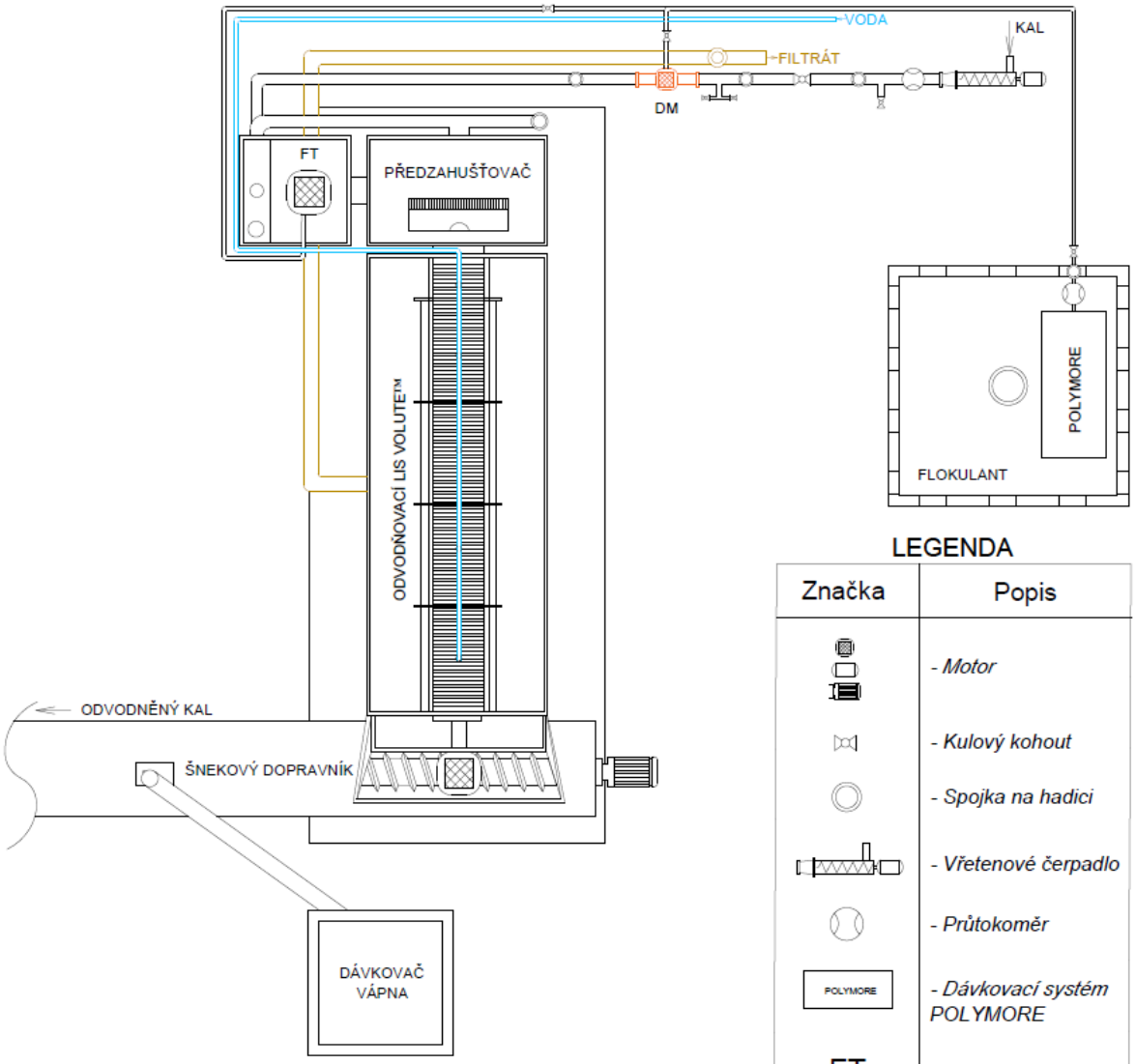
[99] HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ. *Hydraulika: příklady*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01384-7.

9 Přílohy

Seznam příloh

- Příloha 1. Schéma experimentálního a vývojového střediska AMCON na ČOV Rudná
- Příloha 2. Kompletní seznam odebraných vzorků
- Příloha 3. Příklad informačního listu databáze kalů
- Příloha 4. Tabulka provozních parametrů odvodňovacího lisu při testování potrubních mísičů
- Příloha 5. Výsledky laboratorní analýzy vzorků z testování mísičů
- Příloha 6. Procentuální změny výkonnostních parametrů odvodňovače¨
- Příloha 7. Změna parametrů ve srovnání se standardním výkonem jednotky VOLUTE™ a cílovými hodnotami

9.1 Příloha 1. Schéma experimentálního a vývojového střediska AMCON na ČOV Rudná



9.2 Příloha 2. Kompletní seznam odebraných vzorků

Číslo	Vzorek	Místo odběru	Odvětví průmyslu	Datum
1	Odpadní voda	Krpa	Papírenství	6.2.2021
2	Odpadní voda			7.2.2021
3	Odpadní voda			8.2.2021
4	Kal			6.2.2021
5	Kal			7.2.2021
6	Kal			8.2.2021
7	Flokulant na ČOV			7.2.2021
8	Flokulant na odvodnění papírenského kalu			7.2.2021
9	Koagulant 50% Al2(SO4)3			7.2.2021
10	Kal	Rudná	Komunální ČOV	3.2.2021
11	Kal — 1			8.2.2021
12	Kal — 2			8.2.2021
13	Kal			5.2.2021
14	Flokulant			3.2.2021
15	Odpadní voda 1.den	Le&Co	Výroba uzenin	6.2.2021
16	Odpadní voda 2.den			7.2.2021
17	Odpadní voda 3.den			8.2.2021
18	Kal 1.den			6.2.2021
19	Kal 2.den			7.2.2021
20	Kal 3.den			8.2.2021
21	Flokulant na OV			6.2.2021
22	Flokulant na Kal			6.2.2021
23	Koagulant na OV			6.2.2021
24	Klatovy OV	Klatovy	Mlékárna	26.2.2021
25	Klatovy OV			1.3.2021
26	Klatovy OV			2.3.2021
27	Flokulant			1.3.2021

9.3 Příloha 3. Příklad informačního listu databáze kalů

Pořadové číslo	Označení vzorku	Zdroj	Datum
1	**Odpadní voda**	**Krpa**	**6.2.2021**

Výsledky měření

Nerozpuštěné látky

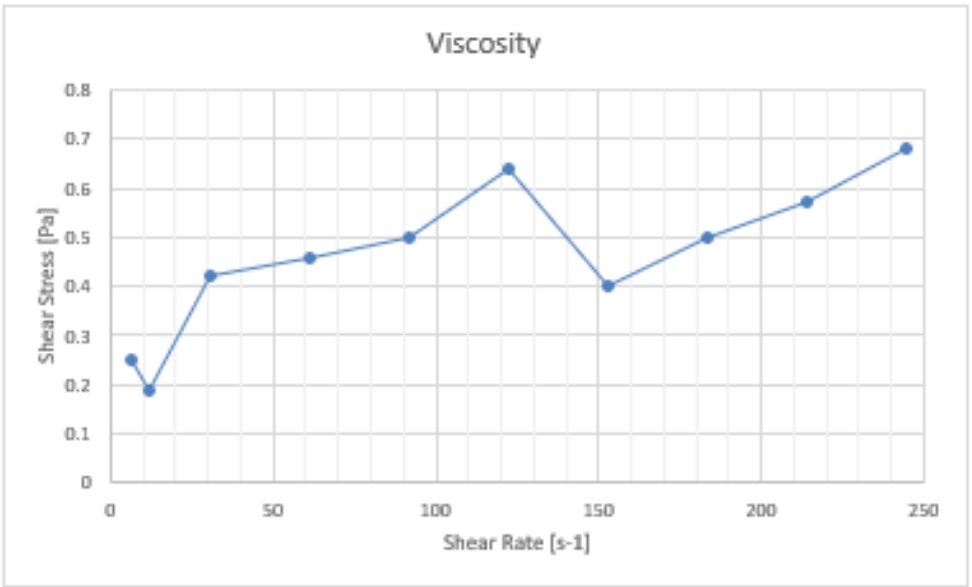
Hmotnost filtru	Hmotnost vzorku s filtrem	Objem	NL
[mg]	[mg]	[ml]	[mg/l]
0.1067	0.3175	100	2.11

Hustota

Pyknometr		p16	p247
prázdný	[g]	58.495	42.8
s vodou	[g]	156.98	143.37
s kalem	[g]	157.28	143.86
Hustota	[kg/m^3]	1001.2	1003.1
Průměr	[kg/m^3]	**1002.136**	

Viskozita Použité vřeteno: ULA

Step	Point	Time	Viscosity	Speed	Torque	hear Stre	hear Rate
(#)	(#)	hh:mm:ss	(Pa·s)	(RPM)	(%)	(Pa)	(1/s)
1	1	0:00:20,2	0.0409	5	34.6	0.25	6.115
2	2	0:00:40,1	0.0155	10	25.9	0.19	12.23
3	3	0:01:00,4	0.0137	25	57.2	0.42	30.58
4	4	0:01:20,4	0.0075	50	63.3	0.46	61.15
5	5	0:01:40,5	0.0055	75	EEEE	0.5	91.73
6	6	0:02:00,5	0.0052	100	87.4	0.64	122.3
7	7	0:02:20,7	0.0026	125	54.6	0.4	152.9
8	8	0:02:40,8	0.0027	150	67.6	0.5	183.5
9	9	0:03:00,9	0.0027	175	77.8	0.57	214
10	10	0:03:20,9	0.0028	200	93.2	0.68	244.6



9.4 Příloha 4. Tabulka provozních parametrů odvodňovacího lisu při testování potrubních mísičů

Vzorek №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0A	10	11	12	13
Datum	3.11	3.11	8.11	8.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	5.11	5.11	5.11	5.11
Čas	15:17	15:40	10:37	10:57	10:20	14:51	15:11	15:45	16:06	16:30	14:00	11:20	12:48	13.1
Nastavení	2	2	2	2	endpl	1	1	1	1	0	2	2	2	2
Mixér	Dynamický mísič					Konkurenční dyn. mísič		Dynamický mísič		-	Konkurenční dyn. mísič			
Režim (Max.…)	Sušina	Sušina	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Sušina	Sušina	Sušina	Sušina	Sušina	Sušina	Sušina	Sušina	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok
Kalové čerpadlo [Hz]	13	14	25	25	13	13	13	13	13	13	10	10	25	25
Průtok [m3/h]	1.8	1.78	3.52	3.51	1.8	1.78	1.78	1.78	1.78	1.79	1.35	1.35	3.45	3.44
Flokulant (poměr ředění)	450	450	390	390	450	125	125	125	125	125	180	180	400	400
Průtok flokulantu [l/min]	5.65	5.45	5.88	5.64	5.5	5.12	5.16	5.76	6.16	5.8	5.42	5.2	5.18	3.94
Flokulant	COEX 88													
Aktivní složka	48%													
Otáčky šroubovice [Hz]	32	32	88	88	32	32	32	32	32	32	32	32	88	88

Vzorek №	14	15	0B	0C	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Datum	5.11	5.11	5.11	5.11	8.11	8.11	9.11	9.11	9.11	9.11	9.11	9.11	9.11	9.11
Čas	13:58	14:18	14:43	15:06	12:00	12:22	11:03	11:25	11:52	12:13	12:40	13:20	13:55	14:17
Nastavení	1	1	0	0	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
Mixér	Konkurenční dyn. mísič		-		Dynamický mísič		Statický mísič							
Režim (Max.…)	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Hmotnostní tok	Sušina	Sušina	Sušina	Sušina
Kalové čerpadlo [Hz]	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	13	13	13	13
Průtok [m3/h]	3.42	3.43	3.42	3.43	3.51	3.51	3.5	3.5	3.53	3.52	1.83	1.83	1.84	1.82
Flokulant (poměr ředění)	400	400	400	400	250	250	375	375	375	375	375	150	350	350
Průtok flokulantu [l/min]	5.2	5.4	5.82	6.02	6	5.4	5.6	5.6	5.66	5.64	6.5	6.57	5.44	5.2
Flokulant	COEX 88													
Aktivní složka	48%													
Otáčky šroubovice [Hz]	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	32	32	32	32

9.5 Příloha 5. Výsledky laboratorní analýzy vzorků z testování mísičů

Parametry	Mixér	-		Dynamický mísič				Konkurenční dynamický mísič MPT3				Statický mísič			
	Nastavení	0		1		2		1		2		1		2	
	Režim	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok
	Hmotnostní tok [kg-DS/h]	26.7	52.5	27	69.9	34.6	64.9	27.3	59.3	33.5	71.6	33	72.5	34.5	69.5
	Spotřeba polymeru [g/kg-DS]	17.65	5.61	17.34	4.23	13.92	7.48	15.02	4.93	13.38	4.6	4.55	4.1	4.55	4.14
	Sušina v kalovém koláči [%]	14	13.1	14.5	10.1	18.7	13.5	13.7	12.7	15.5	13.4	17.7	14.5	18	12.8
	Míra zachycení [%]	94	99.3	94.1	97.7	98.8	98.5	92.8	98.9	97.1	98.2	95.7	98.4	96.4	96.9

9.6 Příloha 6. Procentuální změny výkonnostních parametrů odvodňovače

	Mixér	-			Dynamický mísič				Konkurenční dynamický mísič MPT3				Statický mísič			
	Nastavení	0			1		2		1		2		1		2	
	Režim	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok		Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok	Maximální sušina	Maximální hmotnostní tok
Parametry	Hmotnostní tok [kg-DS/h]	26.7	52.5	Procentuální změna	1.12 %	33.14 %	29.59 %	23.62 %	2.25 %	12.95 %	25.47 %	36.38 %	23.60 %	38.10 %	29.21 %	32.38 %
	Spotřeba polymeru [g/kg-DS]	17.65	5.61		-1.76 %	-24.60 %	-21.13 %	33.33 %	-14.90 %	-12.12 %	-24.19 %	-18.00%	-74.22 %	-26.92 %	-74.22 %	-26.20 %
	Sušina v kalovém koláči [%]	14	13.1	Rozdíl	0.5	-3	4.7	0.4	-0.3	-0.4	1.5	0.3	3.7	1.4	4	-0.3
	Míra zachycení [%]	94	99.3		0.1	-1.6	4.8	-0.8	-1.2	-0.4	3.1	-1.1	1.7	-0.9	2.4	-2.4

9.7 Příloha 7. Změna parametrů ve srovnání se standardním výkonem jednotky VOLUTE™ a cílovými hodnotami

Mixér	Dynamický mísič				Konkurenční dynamický mísič MPT3				Statický mísič			
Parametr	Hmot. tok	Spotřeba polymeru	Sušina v kalovém koláči	Míra zachycení	Hmot. tok	Spotřeba polymeru	Sušina v kalovém koláči	Míra zachycení	Hmot. tok	Spotřeba polymeru	Sušina v kalovém koláči	Míra zachycení
Aritm. Průměr	21.87 %	-3.54 %	0.65	0.63	19.26 %	-17.30 %	0.28	0.1	30.82 %	-50.39 %	2.2	0.2
Průměr zapojení s flotační jednotkou	17.13 %	-13.18 %	-1.25	-0.75	7.60 %	-13.51 %	-0.35	-0.8	30.85 %	-50.57 %	2.55	0.4
Průměr zapojení bez flotační jednotky	26.60 %	6.10 %	2.55	2	30.92 %	-21.10 %	0.9	1	30.80 %	-50.21 %	1.85	0
Cílová hodnota	10 %	20-30 %	2.00%	>90 % & 2% zvýšení	10%	20-30%	2.00%	>90 % & 2% zvýšení	10%	20-30%	2.00%	>90 % & 2% zvýšení