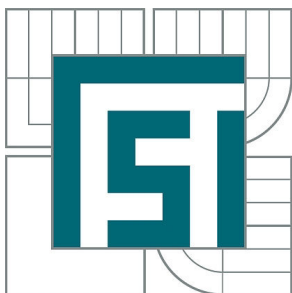


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VYUŽITÍ TLAKOVZDUŠNÉ FLOTACE PRO TERCIÁRNÍ STUPEŇ ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

THE USE OF A DISSOLVED AIR FLOTATION FOR TERTIARY STAGE OF WASTEWATER
TREATMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MIROSLAVA ČMARADOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUCIE HOUDKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Miroslava Čmaradová

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

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

Využití tlakovzdušné flotace pro terciární stupeň čištění odpadních vod

v anglickém jazyce:

The use of a dissolved air flotation for tertiary stage of wastewater treatment

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Flotační jednotky se používají na čistírnách odpadních vod k zahuštění kalu před jeho dalším zpracováním. V rámci projektu intenzifikace ČOV Svitavy je uvažováno s využitím flotace na terciární dočištění (odstranění vysráženého fosforu). Tato technologie není zcela běžná, a proto je stěžejní částí diplomové práce odzkoušení technologie na poloprovozní flotační jednotce na ČOV Hranice.

Cíle diplomové práce:

Popis ČOV Svitavy.

Seznámení se s procesem srážení fosforu a tlakovzdušnou flotací (využití v oblasti čištění odpadních vod).

Návrh experimentálního zařízení pro ověření využití DAF k odstraňování fosforu na ČOV Svitavy.

Poloprovozní zkoušky a vyhodnocení jejich výsledků.

Seznam odborné literatury:

Projektová dokumentace ČOV Svitavy (interní materiál)

Medek, J., Hydraulické pochody. VUT Brno 2004. ISBN 80-214-2640-3.

Wang, L. K., Shammas N. K. Selke, W.A. and Aulenbach, D.B. 2010. Handbook of Environmental Engineering, Volume 12: Flotation Technology. 1st ed. The Humana Press Inc., USA. ISBN 978-1-58829-494-4.

Pytl, V. a kol., Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. 1. vydání, Praha, 2004. ISBN 80-239-2528-8

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lucie Houdková, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 21.11.2012

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena do oblasti čištění odpadních vod. Je zde řešena možnost využití flotace k odstraňování sraženiny fosforu vznikající při terciárním čištění odpadní vody. První část práce je věnována obecnému popisu čištění odpadních vod, dále je zde popsána flotace jako separační technologie a srážení fosforu. Druhá část práce je zaměřena prakticky. Popisuje experimentální zařízení použité pro srážení fosforu a následné odstraňování sraženiny flotací, průběh experimentů a získané výsledky.

Klíčová slova

Čistírna odpadních vod (ČOV), flotace, tlakovzdušná flotace, odstraňování fosforu, srážení síranem železitým.

Abstract

The thesis is focused on the area of wastewater treatment. There is a solution possibility of using flotation for the removal of phosphorus precipitates formed during the tertiary treatment of wastewater. The first part is devoted to a general description of wastewater treatment, there is also described as a flotation separation technology and precipitation of phosphorus. The second part is practically oriented. It describes the experimental equipment used for the precipitation of phosphorus and subsequent removal of the precipitate flotation, during the experiment and the results obtained.

Key words

Wastewater treatment plant (WWTP), flotation, compressed air flotation, removal of phosphorus, precipitation with ferric sulfate.

Bibliografická citace

ČMARADOVÁ, M. *Využití tlakovzdušné flotace pro terciární stupeň čištění odpadních vod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala.

V Brně dne 22. 5. 2013

.....

Bc Miroslava Čmaradová

Poděkování

Tímto děkuji své vedoucí diplomové práce paní Ing. Lucii Houdkové, Ph.D. za věnovaný čas, pomoc a odborné vedení diplomové práce, dále panu Ing. Jaroslavu Boráňovi, PhD. za možnost podílet se na projektu „Inovativní přístupy v čištění odpadních vod - Flotační jednotka KUNST“. Za pomoc a podklady děkuji panu Petrovi Strnadelovi a firmě Kunst, s.r.o. V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům a blízkým za jejich trpělivost a podporu, kterou mi věnovali v průběhu vypracování této práce.

Obsah

1	Úvod	12
2	Čištění odpadních vod	13
2.1	Odpadní voda	13
2.2	Technologická skladba ČOV	14
2.2.1	Ochranná část a hrubé předčištění	15
2.2.2	Mechanický stupeň čištění	16
2.2.3	Biologický stupeň čištění	16
2.2.4	Chemický stupeň čištění	16
2.2.5	Kalové hospodářství	17
3	Flotace a její využití v čistírenství	20
3.1	Princip flotace	20
3.1.1	Tvorba bublinek	20
3.1.2	Kontakt mezi bublinkou a částicí	24
3.1.3	Spojení bublinek a částic	24
3.1.4	Vzestup aglomerátů k hladině	24
3.1.5	Parametry ovlivňující účinnost FJ	26
4	Odstraňování fosforu z odpadních vod	27
4.1	Koagulace	28
5	Praktická část	33
5.1	Popis ČOV Svitavy	33
5.1.1	Čerpání odpadních vod	33
5.1.2	Hrubé předčištění	34
5.1.3	Mechanické čištění	35
5.1.4	Biologické čištění	35
5.1.5	Dmychárna	37
5.1.6	Chemické hospodářství	37
5.1.7	Třetí stupeň čištění	38
5.1.8	Kalové hospodářství	38
5.1.9	Plynové hospodářství	40
5.2	Popis poloprovozní jednotky	40
5.2.1	Jednotka srážení fosforu	42

5.2.2	Flotační jednotka	43
5.2.3	Výpočty	45
5.3	Popis experimentu.....	46
5.4	Popis použitých zařízení pro měření sledovaných veličin.....	48
5.5	Výsledky měření	49
5.5.1	Ověření provozních parametrů ČOV Svitavy	50
5.5.2	Vliv různé dávky roztoku $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ na účinnost odstraňování fosforu.....	51
5.5.3	Závislost η na různém vnosu vzduchu.....	51
5.5.4	Závislost η na různé DZ v pomalomísení.....	52
5.5.5	Vliv tlaku na spotřebu energie při stejném vnosu vzduchu.....	53
5.6	Diskuse výsledků	53
6	Závěr.....	55
	Seznam použité literatury	56
	Seznam obrázků.....	58
	Seznam tabulek.....	58
	Seznam grafů	59

Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
$A_{\check{c}}$	Plocha největšího příčného průřezu částice	$[m^2]$
A/S	Poměr vneseného vzduchu ke hmotě $[ml(vzduchu)/mg(pevné\ látky)]$	
BSK_5	Pětidenní biochemická spotřeba kyslíku	$[g\ O_2/den]$
c	Koncentrace roztoku síranu železitého	$[%]$
C	Koncentrace rozpuštěného plynu	$[mol/m^3]$
d	Průměr částice	$[m]$
D	Průměr nádoby	$[m]$
DN	Světlost potrubí	$[mm]$
DZ	Doba zdržení v nádobě pomalomísení	$[min]$
E	Spotřeba elektrické energie	$[kWh]$
Fe/P	Množství g železa na 1 g fosforu	$[g/g]$
F_G	Gravitační síla	$[N]$
F_R	Odporová síla	$[N]$
F_{VZ}	Vztlková síla	$[N]$
g	Tíhové zrychlení	$[m.s^{-2}]$
h	Výška hladiny v nádobě pomalomísení	$[m]$
H	Výška nádoby	$[m]$
$CHSK$	Chemická spotřeba kyslíku	$[mg/l]$
k	Henryho konstanta	$[mol/(m^3.Pa)]$
$M(x)$	Molární hmotnost prvku x	$[g/mol]$
N_{celk}	Koncentrace dusíku	$[mg/l]$
NL	Nerozpuštěné látky	$[mg/l]$
p	Tlak v sytící nádobě	$[atm],[bar]$
p_i	Parciální tlak plynu i	$[Pa]$
P_{celk}	Koncentrace celkového fosforu	$[mg/l]$
$P-PO_4$	Koncentrace fosforečnanových forem fosforu	$[mg/l]$
$P-PO_4/P_{celk}$	Zastoupení fosforečnanových forem P z celkového P	$[%]$
P_{max}	Maximální tlak u čerpadla	$[bar]$
Q	Nátok vyčištěné odpadní vody	$[l/s], [m^3/d]$
R	Sycený recykl	$[l/s], [m^3/d]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
s_a	Rozpustnost vzduchu	$[ml/l]$
S_a	Množství pevné látky kalu ve vodě	$[mg/l]$
RL	Rozpuštěné látky	$[mg/l]$
u_g	Usazovací rychlost částice	$[m.s^{-1}]$
$V_{\check{c}}$	Objem částice	$[m^3]$
V_{pm}	Objem nádoby pomalomísení	$[m^3]$
V_{rm}	Objem nádoby rychlomísení	$[m^3]$
$\Delta\rho$	Rozdíl hustot ρ_k a ρ_t	$[kg.m^{-3}]$
Δp	Tlaková ztráta	$[kPa]$

ξ	Celkový odporový součinitel	[-]
η_P	Účinnost odstraňování celkového fosforu	[%]
η_{P-PO_4}	Účinnost odstraňování fosforečnanových forem fosforu	[%]
ρ_k	Hustota kapaliny	[kg.m ⁻³]
ρ_t	Hustota tuhé látky	[kg.m ⁻³]

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ČOV	Čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
DAF	Dissolved air flotation – flotace rozpuštěným vzduchem
DN	Dosazovací nádrž
EO	Počet ekvivalentních obyvatel
EU	Evropská unie
FJ	Flotační jednotka
OV	Odpadní voda
UN	Usazovací nádrž

1 Úvod

Diplomová práce se obsahem řadí k pracím o čistírnách odpadních vod. Konkrétně je zaměřena na oblast odstraňování fosforu z odpadních vod. Fosfor je prvek, který výrazně přispívá k eutrofizaci povrchových vod, kam jsou zpravidla vypouštěny i vody z čistíren odpadních vod (ČOV). To je důvodem, proč jsou pro něj stanoveny poměrně přísné limity (dané nařízením vlády č. 61/2003 Sb.).

V současné době se nejčastěji využívají k odstraňování fosforu biologické procesy, v případě potřeby jsou podpořeny nejčastěji simultánním srážením různými chemickými činidly. V rámci přípravy rekonstrukce ČOV Svitavy bylo projektem navrženo poměrně netypické řešení odstraňování fosforu, a to vřazení terciárního stupně čištění, který spočívá ve srážení fosforu a následném odstraňování sraženiny flotací. Tato technologie není v České republice zatím aplikována. Pro ověření funkčnosti projektovaného řešení bylo navrženo experimentální měření na poloprovozní flotační jednotce Kunst-i-flot. Tato jednotka byla realizována v rámci projektu FR-TI3/552 „Inovativní přístupy v čištění odpadních vod - Flotační jednotka KUNST“. Pro potřeby odstraňování fosforu byla tato jednotka rozšířena o koagulační stupeň. Experimentální činnost probíhala na ČOV Hranice, kde je poloprovozní jednotka umístěna.

2 Čištění odpadních vod

2.1 Odpadní voda

Důležitým krokem je upřesnění co odpadní voda (OV) je, z jakého důvodu je nevyhnutné ji čistit a jakých směrnic a zákonů se třeba při práci s odpadní vodou držet.

Odpadní voda je voda použitá mimo vodní zdroj, jejíž vlastnosti byly změněny lidskou činností a voda z atmosférických srážek. [1]

Směrnice Rady 91/271/EHS ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod se týká odvádění, čištění a vypouštění městských odpadních vod a čištění a vypouštění odpadních vod z určitých průmyslových odvětví. Cílem této směrnice je ochrana životního prostředí před nepříznivými účinky vypouštění výše uvedených odpadních vod. [2]

Směrnice rozděluje městské odpadní vody na:

- splašky (směs splašků),
- průmyslové odpadní vody,
- svedené dešťové vody.

Splašky jsou odpadní vody ze sídel a služeb, které vznikají převážně jako produkt lidského metabolismu a činností v domácnosti. Jakékoli odpadní vody vypouštěné z objektů používaných pro obchodní nebo průmyslovou činnost, které jsou jiné povahy než splašky a sváděné dešťové vody, jsou průmyslové odpadní vody. [1], [2]

V praktické části se bude pracovat s odpadní vodou, ze které bude potřeba dodatečně odstranit speciální znečištění a to fosfor. Proto je nutné definovat typy znečištění.

Znečištění odpadních vod rozdělujeme na [1] :

- nerozpuštěné látky - jedná se většinou o pevné látky, ale i o látky kapalné (emulze, povlaky na hladině). Nerozpuštěné látky tvoří jeden z nejzávažnějších druhů znečištění odpadních vod; při vypouštění s odpadní vodou do odtoku se jich část usazuje a tvoří kalové lavice. Větší nečistoty (zbytky potravin, ovoce, zeleniny apod.) způsobují estetické a hygienické závady a vzhledem k objemu se pomalu rozkládají a znečišťují dlouhé úseky toků. Syntetické hmoty (fólie, vlákna, textilie apod.) se prakticky nerozkládají, ukládají se v kalech, zachycují se na vodních rostlinách, březích a kromě estetických závad usnadňují zachytávání dalších nečistot a nepříznivě ovlivňují vodní živočichy. Velkou část nerozpuštěných látek je možno z odpadní vody odstranit poměrně jednoduše; jejich zachycení je proto první podmínkou při čištění odpadních vod.
- rozpuštěné látky - tvoří rozsáhlou skupinu nečistot, které nelze z vody odstranit usazením. Podle složení způsobují v povrchových vodách různé závady. Ovlivňují pach vody, látky kyselé nebo zásadité povahy mění kyselost vody, čímž nepříznivě působí na biologický život ve vodě a zvyšují korozní působení na stavby. Rozpuštěné toxické látky patří k nejzávažnějším ohrožením biologického života ve vodách; jejich úniky do vodního toku způsobují velmi vážné havárie.

- speciální znečištění - tvoří rozsáhlá skupina látek nacházejících se pouze v některých odpadních vodách (zejména z průmyslu a některých služeb), popř. v městských odpadních vodách. Jejich koncentrace je tak nízká, že prakticky neovlivňují běžný proces čištění.

Podrobnou skladnou ČOV se bude práce zabývat v následující kapitole, proto se zde orientačně uvádí stručně popsané možné způsoby čištění odpadních vod podle [3] :

Městské odpadní vody se čistí ve dvou technologických stupních a to mechanické a biologické čištění. První stupeň (mechanické čištění) slouží pro zachycení hrubých nečistot a pevných součástí pomocí česlí, lapačů písku a tuku a usazovací nádrže. Druhý stupeň (biologické čištění) odbourává a rozkládá nerozpuštěné, koloidní a rozpuštěné organické látky činností mikroorganismů (bakterie, prvoci, houby). Biologické čištění je zintenzivňování a urychlování přirozených rozkladných pochodů a procesů samočištění probíhající v půdním a vodním prostředí. Používají se závlahy, stabilizační nádrže, biofiltry, aktivace nebo kořenové čistírny.

ČOV se dělí na základě počtu ekvivalentních obyvatel. Podle Směrnice rady 91/271/EHS je počet ekvivalentních obyvatel (1 EO) zatížení vyjádřené jako produkce organického biologicky odbouratelného znečištění, která odpovídá pětidenní biochemické spotřebě kyslíku (BSK_5) 60 g O_2 /den. [2]

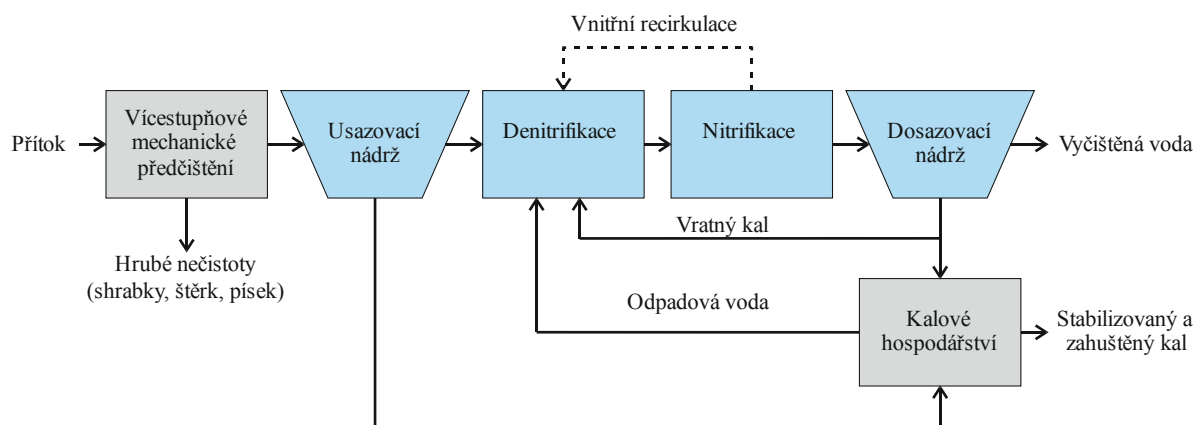
Rozdělení ČOV podle EO a nejlepší dostupná technologie podle Nařízení vlády 61/2003 Sb. se změnami, příloha 7:

- < 500 EO – nízko až středně zatěžovaná aktivace nebo biofilmové reaktory,
- 500 – 2000 EO – nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací,
- 2001 – 10 000 EO – nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací a se simultánním srážením fosforu + mikrosíta či jiná filtrace,
- 10 001 – 100 000 EO – nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutrientů + terciární stupeň včetně srážení fosforu eventuálně dávkování externího substrátu,
- > 100 000 EO – nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutrientů + terciární stupeň včetně srážení fosforu, dávkování externího substrátu.

2.2 Technologická skladba ČOV

Běžná technologická skladba čistírenské linky podle [3]:

- ochranná část čistírny a hrubé předčištění,
- mechanický stupeň čištění,
- biologický stupeň čištění,
- kalové hospodářství.



Obr. 1 Schéma ČOV

2.2.1 Ochranná část a hrubé předčištění

Nejdříve musí být odpadní voda přičerpána na ČOV. Splaškové, průmyslové a odpadní vody jsou přiváděny do odlehčovací a vypínací komory, kde v případě průtoku přesahujícího kapacitu ČOV dojde k oddělení zvýšeného dešťového průtoku. Odpadní voda z odlehčovací komory přitéká na hrubé česle, kde se odstraní nejhrubší nečistoty a předměty, které by mohly poškodit strojní zařízení. V závislosti na možnostech terénu voda protéká čistírnou gravitačně nebo je poháněna čerpadly. [3], [4]

Oleje a tuky v odpadních vodách působí potíže nejen ve stokách, ale i na čistírnách. Zachycují se na stěnách potrubí, zalepují čerpadla, v aktivačních nádržích brání pronikání kyslíku do vody atd. Nepříznivý vliv tuků působí na čisticí procesy ve všech čisticích jednotkách. K zachycování tuků a olejů z odpadních vod se používají lapáky tuků a olejů různých konstrukcí. Tato zařízení se mají umístit přímo u jednotlivých zdrojů (provozy závodů, restaurace, garáže apod.) tak, aby se tuky a oleje zachytily ještě před vtokem do stokové sítě. [3]

Ochranná část a hrubé předčištění slouží k odstranění hrubých nečistot (shrabků a písku) z přitékající vody, dále k ochraně strojního zařízení čistírny před mechanickým poškozením a v případě jednotné kanalizace se může využít i jako ochrana před hydraulickým přetížením srážkovými vodami. Používají se česle a lapáky písku. Hrubší pevné částice se odstraňují průtokem odpadní vody česlemi (rošty a síta), které mohou být stírány ručně nebo strojně. Podle účelu rozeznáváme česle hrubé, jemné a velmi jemné. Hrubé česle se používají ve velkých čistírnách při jednotné kanalizaci. Zachycují se na nich hrubé plovoucí splaveniny, jako kusy dřev, chuchvalce hadrů, cihly nebo větší kameny. Hrubé česle mají průliny 6 i více cm široké. Jemné česle se osazují za hrubými česlemi, zachycují hadry, vlasy, zbytky zeleniny a ovoce a mají průliny až 4 cm široké. Velmi jemné česle mají velikost průlin 3-6 mm a zásadně se konstruuje jako strojně stírané. U menších čistíren se osazují pouze jedny česle. Těžší částice (zrnka písku a šterk) se usazují v lapácích šterku a písku. Lapáky se často doplňují aerací, která udržuje aerobní prostředí a zároveň usnadní separaci tuků. Zbývající usaditelné látky se odstraní v usazovacích nádržích (UN). Použitím česlí a lapáků písku pro oddělení hrubších materiálů lze obsah organických látek v městských odpadních vodách snížit asi o 30%. [3], [4]

2.2.2 Mechanický stupeň čištění

Mechanický stupeň čištění zajišťuje separaci jemnějších podílů nerozpuštěného znečištění odpadní vody usazením ve formě kalů. Mechanické čištění probíhá v usazovacích nádržích a je označováno jako primární sedimentace. V usazovací nádrži, kde přitéká hrubě předčištěná splašková voda, dochází ke gravitačnímu usazování nečistot. Usazovací nádrž může být kruhová nebo obdélníková a na dně je instalováno stírací zařízení, které stírá usazený kal do kalových prohlubní. Stírací zařízení může sloužit i k odstraňování plovoucích látek z hladiny. Mechanicky předčištěná voda odtéká na biologický stupeň čištění. V závislosti na zvolené technologii čištění odpadních vod nemusí být primární sedimentace do čistírenské linky zařazena. [3], [4]

2.2.3 Biologický stupeň čištění

Biologický stupeň čištění zajišťuje odstranění převážně rozpuštěného organického znečištění, popřípadě i nutrientů biologickou cestou (tedy působením mikroorganismů, zejména bakterií) s následným oddělením biomasy od vyčištěné vody. Technologické návrhy biologického stupně čištění odpadních vod dříve vycházely pouze z požadavku odstranění organického znečištění. Změna nastala až zaváděním biologických procesů na odstranění nutrientů, dusíku a fosforu. Zavedením procesu nitrifikace a denitrifikace se zvýšily požadavky na aerační systém a zvýšila se složitost aktivačního systému. Dnes je linka biologického čištění běžně rozdělena na aktivační nádrže, nádrže regenerace kalu a dosazovací nádrže (DN). Mechanicky předčištěná voda se přivádí do denitrifikačního selektoru, kde je voda mechanicky míchaná. Míchadla v biologickém stupni se používají k homogenizaci obsahu anaerobních a anoxických zón. Zde se uplatňují ponorná horizontální míchadla ukotvená na vhodné konstrukci, která umožňuje nastavení jejich optimální polohy. Ze selektoru odtéká aktivační směs na aktivační linku. Zde je znečištění z odpadní vody odstraňováno pomocí mikroorganismů a tento kal je nazýván aktivovaný kal. Z odpadní vody je odstraněno značné množství organického znečištění a sloučenin dusíku a fosforu. Nádrže regenerace kalu jsou využívány jako oxická zásoba aktivovaného kalu a minimalizují reakční objem. Do dosazovacích nádrží přitéká aktivační směs spolu s biologicky vyčištěnou odpadní vodou z linky regenerace. V důsledku sedimentace dochází v dosazovacích nádržích k oddělení vyčištěné vody od aktivovaného kalu. Pomocí stíracího zařízení je usazený kal mechanicky stírán do kalových prohlubní. Četnější jsou kruhové dosazovací nádrže, ale můžeme se setkat i s hranatými. Část aktivovaného kalu se vrací zpět do linky biologického čištění a část je odváděna ke zpracování do kalového hospodářství. [3], [4]

2.2.4 Chemický stupeň čištění

Chemické čištění odpadních vod je čištění odpadních vod chemickou koagulací/chemickým srážením solemi kovů (včetně vápna) nebo organickými polymery za účelem odstraňování anorganických a organických sloučenin fosforu, suspendovaných látek a koloidů. Proces probíhá ve dvou fázích: reakční a separační. Při reakční fázi dochází ke srážení rozpuštěných fosforečnanů, k destabilizaci (rozpuštění) koloidů a k flokulaci. V separační fázi dochází k separaci vloček z vody. Reaktory a odlučovače vloček (usazovací nádrže nebo flotační zařízení) mohou být spojeny s jinou částí čistírny (např. s předsrážením) nebo mohou být

odděleným stupněm čistírny. [5] Tento stupeň čištění se vyskytuje jen na čistírnách, kde je ve vodě vyšší množství fosforu.

2.2.5 Kalové hospodářství

Do kalového hospodářství přichází kal primární (z usazovacích nádrží), biologický (z aktivačního systému) a popřípadě chemický (chemické srážení fosforu). Primární kal je odtahován z kalových prohlubní usazovací nádrže do jímky zahuštěného směsného kalu. Tam je odtahován i přebytečný aktivovaný kal z aktivačního systému. Tento kal je čerpán na zahušťovací zařízení. Zahušťování kalu má mimořádnou důležitost. Limituje totiž investiční a provozní náklady na zpracování kalu i náklady na jeho likvidaci. Kal může být zahušťován gravitačně nebo strojně. [3]

U čistíren s primární sedimentací se kal gravitačně zahušťuje v kalových prohlubních usazovacích nádrží. Konečné zahuštění kalu je ovlivněno hydraulickými poměry, základními fyzikálními vlastnostmi kalu a řadou provozních faktorů (momentální poměr sušin primárního a přebytečného aktivovaného kalu, časovým režimem odkalení, hydrostatickým přetlakem při odkalování apod.). Automatické systémy se používají ojediněle, protože nezajistí nejvyšší sušinu odkalovaného kalu. Dobře nastavený a provozně ověřený časový režim je dobře nahradí. Gravitační zahuštění kalu v usazovacích může výrazně ovlivnit sám provozovatel. Zahuštění přebytečného aktivovaného kalu probíhá rozdílně podle zvoleného způsobu stabilizace. Při anaerobní stabilizaci je nezbytné kal předzahustit v zahušťovacích jímkách s odběrem odsazené vody. Při aerobní stabilizaci probíhá uskladnění v zahušťovacích nádržích souběžně v časovém průběhu stabilizace. [3], [4]

Strojní zahušťování kalu je vhodné před anaerobním uskladněním kalu. Gravitačně zahuštěný kal se následně zahušťuje na strojním zařízení pomocí přídavku polymerního flokulantu. Vyvločovaný aktivovaný kal se přivádí buď na horizontální síto s posuvem, nebo do středu nakloněného rotujícího válce opatřeného sítím. Filtrát protéká sítím a odvádí se do čistícího procesu. Zahuštěný kal se odebírá na konci zařízení a dopravuje se do uskladňovací nádrže. Uskladňovací nádrž je vybavena účinným mechanickým míchadlem pro homogenizaci kalu. [3]

Následně musí být provedena stabilizace kalu. Stabilizovaný kal je kal, který nezpůsobuje škody na životním prostředí a nevyvolává obtíže při manipulaci s ním. V praxi se stabilizace kalu provádí s ohledem na další nakládání s kalem. Při anaerobní stabilizaci kalu v čistírnách do 10 000 EO se většinou používá nevyhřívána anaerobní stabilizace. V závislosti zda se stabilizuje surový směsný kal nebo přebytečný aktivovaný kal se volí technologické parametry procesu. Při stabilizaci surového směsného kalu se kal odkaluje z primární sedimentace do uskladňovacích nádrží o co nejvyšší koncentraci. Doba zdržení je 100 dní. Při anaerobní stabilizaci aktivovaného kalu se kal odebírá z aktivačních systémů. Část organických látek v kalu byla odstraněna již v aerobních podmínkách a při anaerobní stabilizaci se proces odstraňování organických látek dokončuje a jejich koncentrace klesá. Doba zdržení je 150 dní. V souvislosti s používáním pneumatické aerace se rozšířila stabilizace kalu uskladňováním v aerobních podmínkách. Přebytečný aktivovaný kal se čerpá z recyklu vratného kalu přímo do uskladňovací nádrže. Ta má zahušťovací i uskladňovací funkci. Doba zdržení je obvykle 25 - 30 dní. [3], [4]

Po stabilizaci se kal odvodňuje. Vlivem přísnějších podmínek nakládání s kalem se rozšířilo používání strojního odvodňování kalu i na menších čistírnách. Produkovaný filtrát (fugát) se vrací zpět do čistícího procesu. Před odvodňováním je kaly nutné předupravit. V současnosti se používá předúprava s použitím polymerních flokulantů. [3]

Z legislativních důvodů se kal hygienizuje, tedy omezují se jeho nebezpečné vlastnosti. Hygienizace se provádí vápněním nebo termofilní aerobní stabilizací.

Vápnění je provozně nejdostupnější, technicky relativně jednoduchá a ekonomicky výhodná metoda hygienizace kalu na menších čistírnách. Výhodou jsou především nízké náklady, zvýšení sušiny a jednoduchá dodatečná aplikace ve stávajících provozech. Většinou se dávkuje pálené vápno do odvodněného kalu. V závislosti na jakosti kalu a vápna se počítá s dávkou 10 – 30 % přídatku vápna v přepočtu na sušinu kalu. Dochází k exotermické reakci a vzniku amoniaku, proto je nezbytné výkonné větrání. [3], [4]

Další použitelnou metodou pro hygienizaci kalu je termofilní aerobní stabilizace při teplotách 50 °C a více. Proces je založen na tom, že při biologické oxidaci uhlíku se uvolňuje tepelná energie. K oxidaci se používá převážně vzduch. Doba zdržení je 5 až 8 dní. Výhodou metody je výrazné odstranění zápachu a malé reakční objemy. Nevýhodou jsou vyšší provozní náklady a zvýšené nároky na řízení provozu. [3], [4]

Zatím stále nejrozšířenější způsob následného využití, resp. odstranění, kalu z čistíren je jeho řízená aplikace na zemědělské pozemky. Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb., (k zákonu č. 185/2001 Sb., o odpadech) o podmínkách využití upravených kalů z čistíren na zemědělské půdě, stanovuje relativně přísná kritéria pro aplikaci kalů (mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v půdě (těžké kovy apod.), mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v kalu, mezní hodnoty dávek těžkých kovů, které mohou být přidány do zemědělské půdy za 10 let, mikrobiologická kritéria pro použití kalů, povinnost producenta kalu zpracovat program použití kalů, podmínky minimálního obsahu sušiny v tekutém i odvodněném kalu).

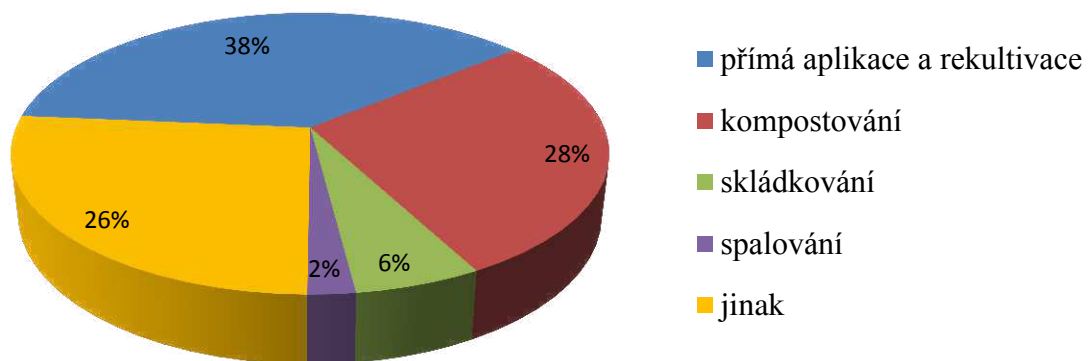
Dodržení všech podmínek je pro malé čistírenské lokality obtížné. [3], [4]

Kal je pro účely vyhlášky rozdělen:

- kal kategorie I – kal, který je možné obecně aplikovat na zemědělské půdy při dodržení zásad uvedených ve vyhlášce,
- kal kategorie II – kal, který je možné aplikovat na zemědělské půdy určené k pěstování technických plodin, na půdy na kterých se nebude minimálně 3 roky po aplikaci kalů pěstovat zelenina a intenzivně plodící ovocná výsadba, při dodržení zásad ochrany zdraví při práci a ostatních ustanoveních vyhlášky.

Pokud kal nesplní limity alespoň pro kal II. kategorie, je nezbytná jeho dodatečná hygienizace, např. vápnem. Tam, kde jsou k tomu podmínky, lze kaly výhodně využívat pro komposty. V některých regionech existuje specifická možnost využití kalu na rekultivace. Skládání kalu je v EU metodou zcela neperspektivní a podmínky pro uložení kalu na skládku jsou přísné. Možnosti nakládání s kalem a jejich využití v roce 2011 je patrné z grafu 1. [3]

Způsoby zneškodňování kalu v ČR za rok 2011



Graf 1 Způsoby zneškodňování kalu v ČR za rok 2011[6]

3 Flotace a její využití v čistírenství

Flotace je fyzikálně-chemický způsob odstraňování lehkých pevných částic a oleje z kapaliny, nejčastěji z vody. Původně byla flotace využívána při úpravě a zpracování kovových rud. Přibližně od poloviny 20. století se flotace využívá na čištění odpadních vod a úpravu pitné vody. Separace částic flotací se řídí stejným zákonem jako sedimentace, ale v reverzním směru. Principem flotace je, že suspendované látky (vločky, částice, organismy) se vznášejí tím, že mají menší měrnou hmotnost než kapalina, v které jsou rozptýlené nebo se v kontaktní zóně spojují s mikrobublínkami vzduchu a jsou pak v separační zóně vynášeny k hladině, kde vytvoří plovoucí vrstvu kalové pěny, která je odstraňována hydraulicky nebo mechanicky. Vzestupné rychlosti takto vzniklých agregátů jsou o jeden až dva řády vyšší než byly původní sedimentační rychlosti těchto vloček, což umožňuje pracovat při vysokém povrchovém zatížení flotace ve srovnání se sedimentací. Flotace rozpuštěným vzduchem (DAF - Dissolved Air Flotation) je separační proces, který se zařazuje jako první stupeň při úpravě pitné vody, při čištění různých typů odpadních vod anebo zahušťování. [7], [8], [9]

3.1 Princip flotace

Proces flotace probíhá ve čtyřech základních krocích [8]:

1. tvorba bublinek v odpadní vodě,
2. kontakt mezi plynnou bublinkou a rozptýlenými částicemi nebo olejovými kapkami suspendovaných v kapalině,
3. připojení částic nebo olejových kapiček k plynným bublinkám (vznik aglomerátů),
4. vzestup aglomerátů k hladině, odkud je vznášející se materiál odebírán.

3.1.1 Tvorba bublinek

Velikost bublin je velmi důležitým parametrem. Množství a velikost bublinek vytvořených v daném objemu jsou funkcemi geometrického tvaru a pracovních podmínek dekompresní trysky, chemického složení odpadní vody a tlaku. Flotace plynem využívá vztlakovosti plynu ke zvednutí tuhé fáze v kapalině k povrchu. Použit se může kterýkoliv plyn, který není vysoce rozpustný v kapalině, nejčastěji se uplatňuje vzduch. Plyn se z kapaliny uvolní jako proud malých bublinek. Bublínky mají flotační efekt pouze v rozsahu, ve kterém jsou schopny držet částičky nebo kapky oleje. Tato podmínka znamená, že rozměr bublinek je menší než rozměr rozptýlených částiček nebo vloček v suspenzi. [8], [9]

Podle metody produkce bublin flotaci rozdělujeme [5], [9]:

- aeroflotace (plynová flotace),
 - flotace dispergovaným plynem,
 - tlaková flotace rozpuštěným plynem,
 - vakuová flotace rozpuštěným plynem,
- elektroflotace,
- biologická flotace,
- chemická flotace.

U flotace dispergovaným vzduchem jsou bubliny tvořeny intenzivním mechanickým mícháním, difuzorem nebo probubláváním vzduchu porézním médiem za atmosférického tlaku. Dochází k tvorbě poměrně velkých vzduchových bublin o průměru přibližně 1 mm. Aerace trvá pouze krátkou dobu a není účinná na vynášení pevných částic. [4], [9]

Na tvorbu menších bublin je vhodnější flotace rozpuštěným vzduchem. Bubliny vznikají v důsledku uvolnění vzduchu z vody přesycené vzduchem. Průměrná velikost bublin je v rozmezí 7-9 μm . Sycení vody vzduchem probíhá vakuově nebo tlakově. [9]

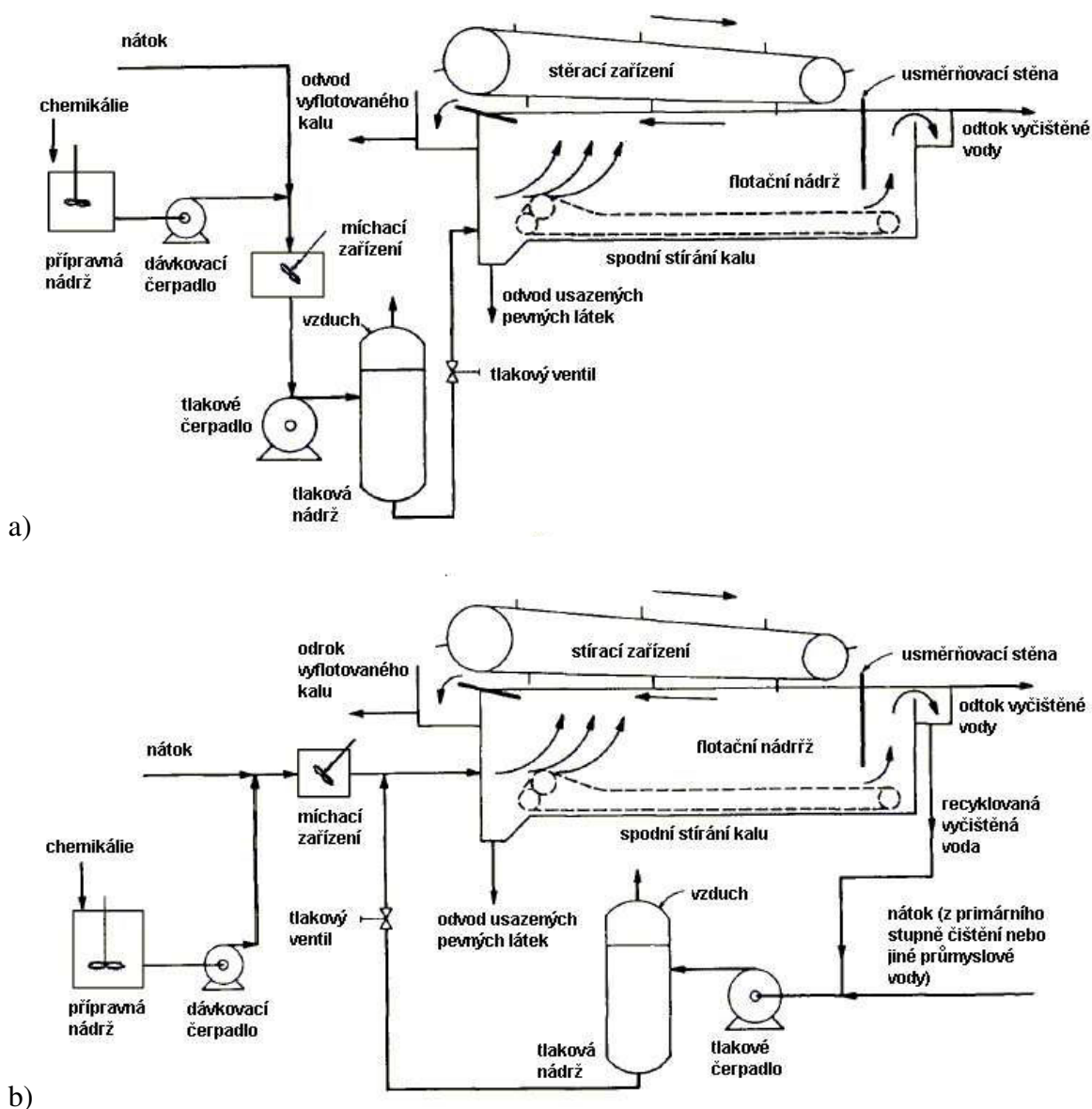
Při tlakovzdušné flotaci je vzduch rozpuštěný v odpadní vodě pod tlakem několika atmosfér (2,8 – 5,5 atm). Proud kapaliny a vzduchu je držení několik minut pod tlakem v tlakové nádrži, aby měl vzduch čas rozpustit se ve vodě. Prostřednictvím redukčního ventilu je proud pod tlakem vpuštěný do flotační nádrže. Tlak se uvolní na jednu atmosféru (tlak okolí) a v celém objemu kapaliny vznikají mikrobublínky. Podle způsobu sycení vody vzduchem rozeznáváme tlakovou flotaci s úplným sycením, částečným sycením a s recirkulací (viz obr. 2). Běžně se využívá tlaková flotace s úplným sycením. Tento typ je však energeticky náročný. Když není potřeba sytit celý objem natékající odpadní vody, sytí se pouze část nátoky na flotační jednotku – tlaková flotace s částečným sycením. V případě, že natékající odpadní voda je příliš znečištěná a ucpávala by sytící trysky, používá se tlaková flotace s recirkulací, kdy je sycena vyčištěná voda z odtoku flotační jednotky. [4], [10]

Při vakuové flotaci se vzduch rozpuštěný ve vodě pod atmosférickým tlakem uvolňuje při zmenšeném vnějším tlaku. Částečné vakuum způsobí, že rozpuštěný vzduch vytvoří nepatrné bublinky. Vakuová flotace se hlavně využívá v průmyslu papíru a celulózy pro zachycování vláken. [4], [10]

Elektroflotace využívá na tvorbu bublin elektrolýzu. Zařízení se skládá ze systému elektrod a napájení elektrod stejnosměrným proudem o nízkém napětí. Produkované bubliny jsou velmi jemné, o velikosti 0,5-0,7 μm a tvoří je molekuly vodíku a kyslíku (elektrolýza vody). [9]

Biologická flotace využívá k separaci plyn vznikající činností mikroorganismů. Využívá se pro zahušťování kalu z primárních usazovacích nádrží. Kal se parou ohřívá po dobu několika dní na teplotu 35 – 55 °C a činností mikroorganismů vznikají bublinky plynu, které vynášejí částice kalu na hladinu. Biologická flotace má malý rozsah použitelnosti. [10]

Chemická flotace je fyzikálně chemický proces separace látek, ve kterém vynášení způsobují bublinky plynu, vznikající reakcí přidaných chemikálií nebo jiných látek. Tato flotace je vhodná jen pro některé druhy průmyslových odpadních vod. Před vlastní flotační nádrží je nutné zařadit reaktor s minimální dobou zdržení 3 – 5 minut. [10]



Obr. 2 Tlakovzdušná flotace a) s recyklací, b) bez recyklace [11]

Důležitým faktorem ovlivňující flotaci je rozpustnost plynu. Principem je rozpuštění plynu pod tlakem a následné snížení tlaku za vzniku bublinek. Množství rozpuštěného plynu se řídí Henryho zákonem [12]:

$$p_i = k \cdot C, \quad (1)$$

kde: p_i je parciální tlak plynu i [Pa],

C je koncentrace rozpuštěného plynu [mol/m^3],

k je Henryho konstanta [$\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})$] – hodnoty pro vybrané plyny jsou uvedeny v tabulce 2.

T [°C]	k [mol/(m ³ .Pa)]									
	CO ₂	CO	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	He	H ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	O ₂
0	0,0728	3,52	1,26	0,552	12,9	5,79	0,0268	2,24	5,29	2,55
10	0,104	4,42	1,89	0,768	12,6	6,36	0,0367	2,97	6,68	3,27
20	0,142	5,36	2,63	1,02	12,5	6,83	0,0483	3,76	8,04	4,01
30	0,186	6,20	3,42	1,27	12,4	7,29	0,0609	4,49	9,24	4,75
40	0,233	6,96	4,23	-	12,1	7,51	0,0745	5,20	10,4	5,35

Tab. 1 Vybrané hodnoty Henryho konstant [12]

Henryho zákon je použitelný do koncentrace $C \leq 0,05$. Množství plynu, které se rozpustí v kapalině, je funkcí počátečního tlaku. Rozpustnost plynu je taky závislá na teplotě a koncentraci rozpuštěných pevných látek. Se zvyšující se teplotou klesá hodnota Henryho konstanty, tedy klesá množství rozpuštěného plynu. Nasycená voda jde do nádrže, kde probíhá nukleace (vznik zárodků) bublin na všech nízkoenergetických místech na pevných částicích (životaschopné zárodky vznikají v centru volných kapalných vířů). Pokud nejsou taková místa dostupná, bubliny nukleují homogenně v kapalně fázi. Po nukleaci bubliny rostou, až je jejich růst difuzně omezen. Velikost bubliny závisí na sytícím tlaku a průtoku nasycené kapaliny tryskou. [8]

Výkon systému tlakovzdušné flotace závisí primárně na poměru objemu vneseného vzduchu na množství pevné látky (A/S) potřebného k dosažení daného stupně vyčištění. Tento poměr se liší s každým typem suspenze a musí být experimentálně určen pomocí laboratorních zkoušek. Typický A/S poměr doporučovaný při zahušťování kalů na ČOV se mění od 0,005 do 0,060. [8]

Vztah mezi A/S poměrem a rozpustností vzduchu, pracovním tlakem a koncentrací pevných látek v kalu, při sycení celého nátoku je [4]:

$$\frac{A}{S} = 1,3 \cdot s_a \cdot \frac{(f \cdot p - 1)}{s_a}, \quad (2)$$

kde: A/S je poměr vneseného vzduchu ke hmotě [ml(vzduchu)/mg(pevné látky)],
 s_a je rozpustnost vzduchu [ml/l] – hodnoty pro různé teploty uvedeny v tabulce 2,
 f je frakce rozpuštěného vzduchu při tlaku P [-],
 p je tlak [atm],
 S_a je množství pevné látky kalu ve vodě [mg/l].

Odpovídající rovnice pro systém se sycením recyklu je [4]:

$$\frac{A}{S} = 1,3 \cdot s_a \cdot (f \cdot p - 1) \cdot \frac{R}{s_a} \cdot Q, \quad (3)$$

kde: R je sycený recykl [m³/d],
 Q je nátok čištěné vody [m³/d].

Teplota [°C]	0	10	20	30
s_a [ml/l]	29,2	22,8	18,7	15,7

Tab. 2 Hodnoty rozpustnosti vzduchu při různých teplotách [4]

V obou rovnicích číselník reprezentuje množství vneseného vzduchu a jmenovatel množství pevné látky. Koeficient 1,3 je hmotnost v miligramech na mililitr vzduchu. Číslo -1 v závorce uvádí skutečnost, že systém je provozován za atmosférického tlaku.

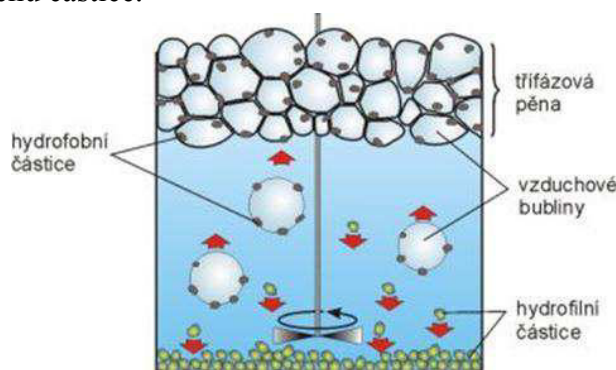
3.1.2 Kontakt mezi bublinkou a částicí

V kontaktní zóně se musí bubliny vzduchu potkat s vločkami. Čím vyšší koncentrace bublin, tím větší pravděpodobnost srážky. Je však třeba brát v úvahu, že ne všechny bubliny, které se s vločkou setkají, se na ni naváží, obzvláště když jsou na vločce již přichycené bubliny. Bubliny se kvůli svému zápornému náboji odpuzují, pokud se tedy sloučí ve větší bubliny, musí překonat odpudivou sílu. Větší bublinky jsou rychlejší při vzestupu, proto nedochází k tak častým kontaktům mezi bublinkami a částicemi, jako u menších bublinek [8]. Z tohoto důvodu jsou lepší menší bublinky.

3.1.3 Spojení bublinek a částic

Dispergované částice nebo olejové kapičky se adsorpcí spojí s bublinkou. Materiál je selektivně adsorbován na povrch bublinek, vytvoří se aglomerát bublinky + částice, který pak stoupá k hladině. Efektivita separačního procesu závisí částečně na povrchové aktivitě a hlavně na množství a velikosti vzduchových bublinek. [8]

Spojení částic s bublinkami se děje na základě různé smáčivosti povrchu částic (viz obr. 3). Pevné částice se smáčitelným povrchem jsou označovány jako hydrofilní a částice s nesmáčitelným povrchem jako hydrofobní. V případě, že kontaktní úhel mezi bublinkou a částicí je menší než 90° , částice je nazývána hydrofilní. Neutrální částice má kontaktní úhel 90° a hydrofobní větší než 90° . Kontaktním úhlem rozumíme úhel, který je svírán tečnou k povrchu kapky na povrchu pevné plochy, vedenou v bodě styku kapky s pevnou plochou. Když je povrch částice hydrofobní, tak je přirozeně vzduchofilní. V tomto případě vzduchová bublinka přilne k povrchu částice.



Obr. 3 Hydrofobní a hydrofilní částice [13]

Zabudování koloidů do vloček pomocí chemikálií pomáhá k jejich odstranění. Některé nerozpustné látky mohou být taktéž navázané na chemikálie a tak odstraněny. [8]

3.1.4 Vzestup aglomerátů k hladině

Každá částice nebo olejová kapička potřebuje určitý počet bublinek, aby aglomerát měl nižší měrnou hmotnost než kapalina. Když částice nemá dostatek bublinek, klesá ke dnu. Proto, jak už bylo zmíněno, je důležitým faktorem počet vytvořených bublinek na vstupu do flotační nádrže.

Síly působící na částici (viz obr. 4):

- gravitační: $F_G = V_{\xi} \cdot \rho_t \cdot g$,
- vztlačková: $F_{VZ} = V_{\xi} \cdot \rho_k \cdot g$,
- odporová: $F_R = \xi \cdot A_{\xi} \cdot \frac{u_g^2}{2} \cdot \rho_k$,

kde d je průměr kulové částice [m],

V_{ξ} je objem částice [m^3], ($V_{\xi} = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$),

g je tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$], ($g = 9,80665 m \cdot s^{-2}$),

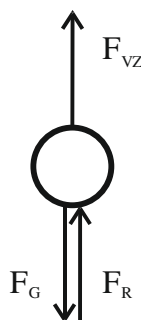
ρ_t je hustota tuhé látky (hustota částice) [$kg \cdot m^{-3}$],

ρ_k je hustota kapaliny (hustota okolí) [$kg \cdot m^{-3}$],

ξ je celkový odporový součinitel [-], ($\xi = f(Re)$),

A_{ξ} je plocha největšího příčného průřezu částice [m^2], $A_{\xi} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$,

u_g je usazovací rychlost částice [$m \cdot s^{-1}$].



Obr. 4 Síly působící na sedimentující částici [14]

Rovnice rychlosti usazování kulové částice:

$$u_g = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot \Delta\rho \cdot g}{\xi \cdot \rho_k}}, \tag{4}$$

kde: $\Delta\rho = \rho_t - \rho_k$.

Celkový odporový součinitel je závislý na Reynoldsovém čísle. Pro různé rozsahy Re jsou v tab. 3 uvedeny doporučené rovnice.

Oblast	Rozsah Re	Doporučená rovnice
I – laminární (Stokesova)	$Re < 0,5$	$\xi = \frac{24}{Re}$
II – přechodová	$Re < 0,5 ; 500 >$	$\xi = \frac{24}{Re} (1 + 0,125 Re^{0,7})$
III – turbulentní (Newtonova)	$Re < 500 ; 3 \cdot 10^5 >$	$\xi = 0,44$

Tab. 3 Doporučené rovnice pro výpočet odporového součinitele pro různé oblasti proudění [14]

Může nastat dvojitý pohyb částice [14]:

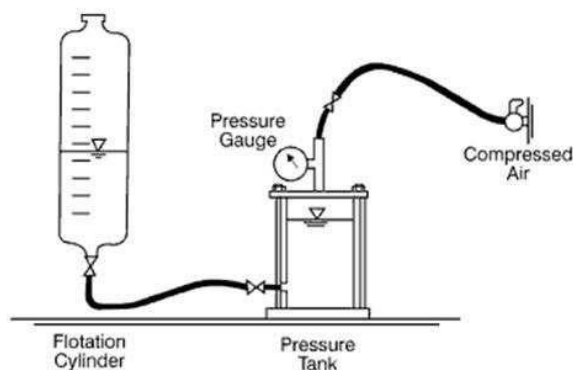
- ve směru gravitační síly, když $\rho_t > \rho_k$ – případ usazování,
- proti směru gravitační síly, když $\rho_t < \rho_k$ – případ flotace.

3.1.5 Parametry ovlivňující účinnost FJ

Hlavní proměnné v systému kontroly účinnosti flotační jednotky [8]:

- vstupní plyn a objem nerozpuštěného plynu na jednotku objemu kapaliny,
- velikost bublin a stupeň rozptýlení,
- povrchové vlastnosti suspendovaných (nerozpuštěných) částic,
- hydraulický návrh flotační komory,
- koncentrace a typ rozpuštěných látek,
- koncentrace a typ nerozpuštěných částic a olejových kapiček,
- přidané chemikálie,
- teplota,
- doba zdržení,
- recyklační poměr,
- pH.

Mnoho těchto parametrů je neznámých, proto je doporučeno provádět laboratorní zkoušky (vhodné zařízení je znázorněno na obr. 5) a poté testy na poloproduční jednotce.



Obr. 5 Zařízení pro laboratorní flotaci [15]

4 Odstraňování fosforu z odpadních vod

Celkový fosfor ve vodě je součet rozpuštěného a nerozpuštěného fosforu. Rozpuštěný a nerozpuštěný fosfor se dále dělí na anorganicky a organicky vázaný. Rozpuštěný anorganicky vázaný fosfor se dále dělí na ortofosforečnanový a polyfosforečnanový. Fytoplankton a bakterie jsou schopné využívat rozpuštěný ortofosforečnanový fosfor, ortofosforečnany adsorbované na povrchu nerozpuštěných látek i některé málo rozpustné fosforečnany, které označujeme jako biologicky dostupný fosfor. Z hlediska čištění odpadních vod je však rozhodující koncentrace celkového fosforu, který se stanovuje ve vodách po rozkladu. [3]

Fosfor se do odpadních vod dostává močí, výkaly a z pracích a čisticích prostředků. Podle zákona č. 254/2001 Sb. § 38, příloha 1 jsou organofosforové sloučeniny považovány za zvláště nebezpečné látky. Hygienický význam sloučenin fosforu je malý, avšak mají klíčový význam při eutrofizaci vod. Eutrofizace vod je obohacování vod o živiny zejména dusíku a fosforu. Vlivem eutrofizace dochází k přemnožení sinic a bakterií, které uvolňují ze svého těla toxiny způsobující podráždění kůže nebo kvetení rybníků, proto je nevyhnutné snižovat jejich množství pod požadovanou hodnotu. Množství fosforu lze snížit používáním pracích a čisticích prostředků bez fosforu. Bohužel tento způsob je těžko ovlivnitelný. Proto se při modernizaci ČOV přidává proces na zvýšené odstranění fosforu. [3], [16]

Fosfor může být z odpadní vody odstraňován [3], [16]:

- biologické odstranění (aktivační část ČOV),
- mechanické odstranění (membránové separační technologie),
- fyzikálně chemické odstranění (koagulace a následná flotace).

Metody spočívají v navázání fosforu do pevných látek a následném odstranění těchto látek. Fosfor může být navázán biologickými nebo chemickými látkami a odstranit lze pouze fosforečnanové formy fosforu.

Biologické odstraňování je založeno na buzení mikroorganismů, tak aby byli schopni navázat více fosforu než je normálně potřebné pro jejich růst. Vhodným uspořádáním aktivačního procesu lze dosáhnout zvýšenou akumulaci fosforu v produkovaném aktivovaném kalu a tím snížit jeho koncentraci v odtoku z ČOV. Bakterie schopné zvýšené akumulace fosforu do buněk aktivovaného kalu jsou označovány jako poly-P (polyfosfát akumulující nebo polyfosforečné) a pocházejí převážně z rodu *Acinobakter*. Zvýšená akumulace fosforu představuje pro tyto mikroorganismy selektivní výhodu při střídání anaerobních a oxických kultivačních podmínek, které jsou základním předpokladem pro zvýšenou akumulaci fosforu v buňkách aktivovaného kalu. Fosfor ale není vázán příliš pevně a snadno se uvolňuje při vystavení anaerobním podmínkám. Z tohoto důvodu musíme zabránit příliš dlouhému pobytu zahuštěného kalu v dosazovací nádrži, kde by mohlo dojít k uvolnění fosforečnanů do odvodu do recipientu. Taktéž se nedoporučuje vystavení kalu anaerobním podmínkám v důsledku nežádoucího návratu fosforu kalovou vodou do hlavní technologické linky. [3], [4]

Membránové separační procesy zahrnují rozsáhlou skupinu procesů a produktem jsou dva kvalitativně odlišné proudy. Vstupní proud je pod tlakem veden na separační membrány, přes kterou projdou pouze částice menší než je velikost pórů membrány. [16]

Chemické srážení využívá soli železa a hliníku nebo vápno. Filtrace je používána v kombinaci s biologickým nebo chemickým odstraňováním, když je zůstatkový fosfor méně než 1 mg/l. Ostatní fyzikální metody, jako ultrafiltrace nebo reverzní osmóza, jsou v odstraňování fosforu efektivní a jsou primárně používány na snížení celkového množství rozpuštěných látek. [4]

U většiny odpadních vod je přibližně 10 % fosforu v nerozpustné formě a toto množství je odstraněno v primárním usazováku. Protože po primární sedimentaci se v odpadní vodě nachází kromě fosforu navázaného v buněčné tkáni, pouze fosfor rozpuštěný, je další odstraňování konvenčním biologickým způsobem málo účinné. [4] Účinnost různých způsobů odstraňování fosforu je v Tab. 4.

Způsob odstraňování	Odstraněný fosfor [%]
Konvenční odstraňování:	
-primární sedimentace	10-20
-aktivovaný kal	10-25
-skrápěné filtry	8-12
-rotační biologický filtr	8-12
Biologické odstraňování:	
-odstraňování v hlavním proudu	70-90
-odstraňování ve vedlejším proudu	70-90
Kombinované biologické odstraňování N a P	70-90
Chemické odstraňování:	
-srážení solemi kovů	70-90
-srážení vápnem	70-90
Fyzikální odstraňování:	
-filtrace	20-50
-reverzní osmóza	90-100
-adsorpce aktivním uhlím	10-30

Tab. 4 Efektivnost různých způsobů odstraňování fosforu [4]

Z důvodu využití chemické metody na ČOV Svitavy se práce nebude podrobněji zabývat zbývajícími metodami. Proces srážení fosforu solemi železa je podrobně vysvětlený v následující kapitole.

4.1 Koagulace

Koagulace je fyzikálně chemický proces pro odstranění koloidních a jemně suspendovaných částic z vody. Principem je shlukování částic do větších celků. Tyto látky jsou proti samovolné koagulaci chráněny stabilizujícími mechanismy, proto cílem koagulace je destabilizace koloidních částic a následné shlukování. Přidáním činidel (koagulantů), které mají koloidní charakter a shlukují se s koloidními částicemi v odpadních vodách, vzniká

hrubá disperze. S koloidními částicemi se shlukují přímo koagulanty nebo produkty jejich reakce s vodou. Na destabilizaci se používá přídavek koloidu s opačným povrchovým nábojem (destabilizace molekulárními koloidy a adsorpce iontů na povrchu sraženiny) nebo změna pH vody. [16], [17]

Proces koagulace probíhá ve 4 krocích [17]:

1. nadávkování chemikálií,
2. fáze rychlého míchání,
 - trvá max. několik minut,
 - rozmíchání činidel ve vodě,
 - destabilizace koloidů,
 - tvorba mikrovloček,
3. fáze pomalého míchání,
 - trvá desítky minut (10 – 30),
 - agregace mikrovloček na makrovločky,
 - míchání méně intenzivní – brání rozbití vloček,
4. oddělení vloček (sedimentace, flotace).

Vhodný koagulant se volí podle typu znečištění. Nejmenší vhodná dávka je úměrná míře znečištění. Optimální dávka a pH se určí koagulačním pokusem.

Přidáním určitého množství chemikálií do odpadní vody se v kombinaci s fosforem vytvoří nerozpustné nebo málo rozpustné soli. Nejvíce používané chemikálie pro tento účel jsou sulfát hliníku, hlinitan sodný, chlorid železitý a sůl kyseliny sírové nebo vápno. Používaný je i síran železnatý a chlorid železitý, jako vedlejší produkty výroby ocele. Polymery jsou využívány efektivně v spojení se sulfátem hliníku a vápnem jako pomocník pro flokulaci. Vápno je však využíváno méně často, protože dochází k podstatnému zvýšení množství kalu v porovnání se solemi kovů a vyskytující se problémy so zásobováním, manipulací a skladováním. [4]

Nejpoužívanější srážedla [5]:

- Soli hliníku

Vhodný pro chemické srážení fosforu je síran hlinitý $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14$ až $18H_2O$ a polyaluminiumchlorid $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$. Síran hlinitý je granulovaný, korozivní a optimální hodnota pH je od 5,7 do 6,5. Polyaluminiumchlorid je v kapalně formě, je kyselý, korozivní a optimální hodnota pH je od 5,7 do 8 v závislosti na zásaditosti chemikálie a tvrdosti vody.

- Soli železa (železnaté a železité soli)

Ze železnatých solí je používán monohydrát nebo heptahydrát síranu železnatého. Monohydrát síranu železnatého je ve formě granulátu, není korozivní a heptahydrát síranu železnatého má strukturu sněhových krystalů světle zelené barvy a je kyselý a korozivní. Pro oba je optimální pH větší než 6,5.

Používanou železitou solí je chlorid železitý jako roztok $FeCl_3$. Je kyselý, korozivní a optimální hodnota pH je od 4,5 do 6,5 nebo větší než 8,5.

- Soli vápníku

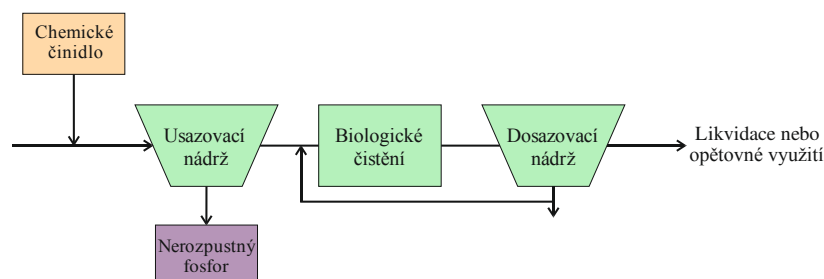
Přímé nebo následné chemické srážení lze provádět oxidem vápenatým CaO nebo hydroxidem vápenatým Ca(OH)_2 . Oxid vápenatý se používá obvykle granulovaný a je velmi agresivní. Při smíchání s vodou vzniká alkalický hydroxid vápenatý a uvolňuje se teplo. Hydroxid vápenatý se vyrábí z oxidu vápenatého přidáním vody podle stechiometrického výpočtu. Je to jemný prášek a je agresivní.

Srážedlo můžeme přidávat v různých místech procesu čištění odpadních vod [4]:

- a) Přidání srážedla před primární sedimentací (usazovací nádrž). Odstranění fosforu v primárním čištění.

Tento způsob je též označován jako přímé srážení a používá se v čistírnách bez biologického stupně. Srážedlo se přidává po předčištění (česle, lapáky písku), jak je patrné z obr. 6, tak aby bylo zajištěno jeho rychlé a úplné promíchání. Vločky vznikají ve flokulační nádrži a následně se chemické vločky separují v usazovací nádrži nebo jiném zařízení pro separaci vloček. [5]

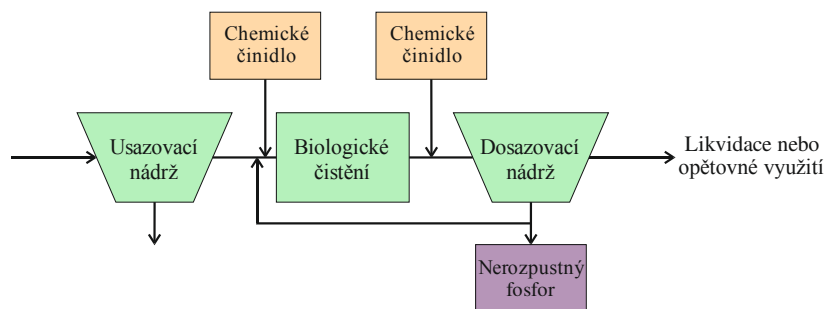
Další variantou je přidání srážedla před biologický stupeň, často i před provzdušňovaným lapákem písku, před primárními provzdušňovacími nádržemi nebo před flokulačními nádržemi. Tento způsob se označuje chemické předsrážení a používá se na čistírnách s mechanickým i biologickým čištěním odpadních vod. Chemické vločky se separují společně s primárním kalem a ty, které nejsou odstraněny v primární usazovací nádrži, se dostávají s odpadními vodami do dosazovací nádrže, kde se separují s biologickým kalem. [5]



Obr. 6 Přidání srážedla před usazovací nádrž [4]

- b) Přidání srážedla před a/nebo za biologické čištění. Odstranění fosforu v sekundárním čištění.

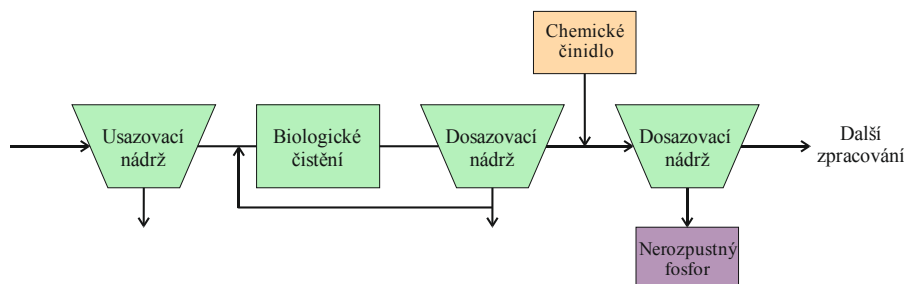
Simultánní chemické srážení se používá v čistírnách s biologickým stupněm v závislosti na použitém aktivačním procesu. Srážedlo se přidává u výtoku z aktivační nádrže nebo společně s vráceným aktivovaným kalem (obr. 7), takže probíhá chemický i biologický proces čištění. Smíšený chemický a biologický kal se sedimentací odděluje v dosazovací nádrži nebo ve flotačním stupni. [5]



Obr. 7 Přidání srážedla před a/nebo za biologické čištění [4]

- c) Přidání srážedla za sekundární sedimentaci (dosazovací nádrž). Odstranění fosforu v přídavném, terciárním čištění.

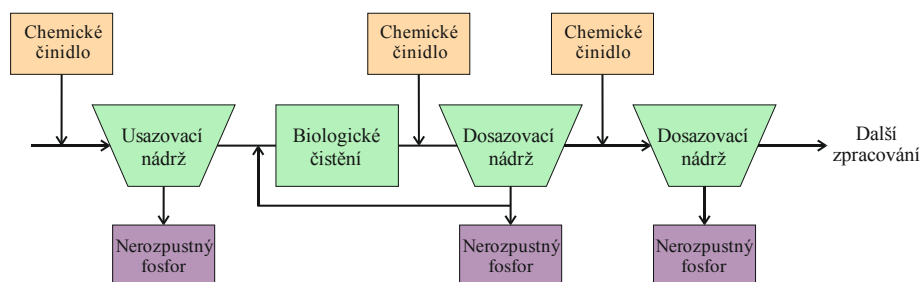
V čistírnách s biologickým stupněm (čištění aktivovaným kalem, čištění s využitím přisedlé kultury, apod.) se používá následné chemické srážení. Srážedlo se přidává do směšovací reakční nádrže za dosazovací nádrží (obr. 8). Tvorba vloček probíhá ve flokulační nádrži, za kterou je zařazena poslední dosazovací nádrž kde se sedimentací odlučuje chemický kal. [5]



Obr. 8 Přidání srážedla za dosazovací nádrž [4]

- d) Přidání srážedla na víc místech v procesu.

Chemické srážení na dvou nebo třech různých místech čistícího procesu (viz obr. 9) se používá pro zvýšení účinnosti srážení. Například se srážedlo přidává v lapáku písku, aktivační nádrži a posledním pískovém filtru. [5]



Obr. 9 Přidání srážedla na víc místech v procesu [4]

Chemické srážení na filtrech se obvykle používá pro doplnění biologického odstraňování fosforu, chemického předsrážení nebo simultánního srážení. Srážedlo se přidává do přítokového potrubí nebo přítokového žlabu k filtru a musí být zajištěno účinné promíchání. [5]

Protože polyfosforečnany a organický fosfor se odstraňují hůř než ortofosforečnany, k dosažení nejlepšího výsledku se soli hliníku nebo železa přidávají po sekundárním čištění, kde jsou polyfosforečnany a organický fosfor přetransformovány na ortofosforečnany. V důsledku přidávání chemikálií můžeme ve vyčištěné vodě očekávat zvýšené množství rozpuštěných látek. [4]

Po nadávkování nebo vytvoření koloidů s opačným povrchovým nábojem dojde k vyrovnání nábojů a začnou vznikat malé elektroneutrální agregáty, které se nadále spojují až do separovatelné velikosti. Shlukující se koloidní částice tvoří vločky, tedy flokulují. Flokulaci lze urychlit pomocí flokulantů. Pro tento způsob koagulace je důležité sledovat pH vody. I pouhá změna pH může vyvolat koagulaci koloidů. Na pH je závislá rozpustnost sraženiny Fe nebo Al koagulantu a její složení. [4]

Podle koagulantu a jeho funkčního rozmezí pH lze koagulaci rozdělit na koagulaci v kyselém a v zásaditém prostředí. Typickými koagulanty pro kyselé prostředí jsou soli kovů Fe^{3+} a Al^{3+} . Pro odstranění těžkých kovů je účinnější koagulace v zásaditém prostředí, avšak odstranění organických látek je méně účinné než koagulace v kyselém prostředí. [4]

Při koagulaci solemi železa vznikají vločky fosfátu železa (reakce hydroxidu železa a fosforu). Na doporučení pana Ing. Pavla Novotného se soli železa dávkuje s přebytkem cca 1,5, proto ve vodě zůstávají i částice hydroxidu železa. Vyčištěná voda z usazovacích nádrží sebou strhává i malinké množství kalu. Ve flotační jednotce pak musíme počítat se třemi druhy částic, každá s jinou velikostí. [18]

5 Praktická část

Praktická část řeší experimentální odstraňování fosforu z vyčištěné odpadní vody. Cílem tohoto experimentu je ověřit návrhové parametry terciárního stupně čištění odpadních vod na ČOV Svitavy, který byl navržen pro plánovanou rekonstrukci.

5.1 Popis ČOV Svitavy

Čistírna odpadních vod Svitavy (viz obr. 10) se nachází v Hradci nad Svitavou, přitéká zde odpadní voda z okolí Svitav. Technologické schéma je v příloze č. 3. V současné době probíhá rekonstrukce čistírny na plánovanou kapacitu 20 000 EO. Rekonstrukci provádí firma Kunst, s.r.o. na základě projektu [19] firmy EKOEKO, s.r.o. Z důvodu probíhajících prací jsou některé objekty již po rekonstrukci.



Obr. 10 ČOV Svitavy před rekonstrukcí [21] doplněno popisky

5.1.1 Čerpání odpadních vod

Do odlehčovací a vypínací komory mimo areálu ČOV jsou kmenovou stokou přiváděné komunální splaškové a dešťové vody z území města Svitavy. V případě špičkových dešťových průtoků, přesahujících hydraulickou kapacitu, zde dojde k jejich oddělení. Odpadní voda pokračuje na hrubé ručně stírané česle. Zachycené shrabky jsou vyhrnovány do sběrné nádoby. [19]

Z důvodu výškového vyústění přivodního kanalizačního sběrače, který neumožňuje gravitační průtok čistírnou, byla vybudována vstupní čerpací stanice. Odpadní voda je přečerpávána

na další objekty a zařízení ČOV dvěma šnekovými čerpadly (přečerpávání zvýšených dešťových průtoků) o jmenovitém výkonu 250 l/s a dvěma ponornými kalovými čerpadly (splašková voda) o jmenovitém výkonu 100 l/s. Jedno ponorné čerpadlo je provozováno na plný výkon a výkon druhého je regulován pomocí frekvenčního měniče, v závislosti na aktuální výšce hladiny v čerpací jínce. Toto opatření způsobuje, že čerpání odpadních vod je rovnoměrné, brání hydraulickým rázům a omezuje časté spínání ponorných čerpadel, čím působí pozitivně na jejich životnost. [19]

5.1.2 Hrubé předčištění

Hrubé předčištění je rozděleno na dešťovou a splaškovou linku.

5.1.2.1 Dešťová linka

Dešťové průtoky jsou čerpány šnekovým čerpadlem na jemně strojně stírané česle s průlinami 6 mm (viz obr. 11) a vírový lapák písku. Shrabky zachycené na dvojici strojních česlí vypadávají do šnekového dopravníku o celkové délce 7,5 m a jsou přiváděny do lisu na shrabky. Lapák písku (viz obr. 11) je trvale provzdušňován tlakovým vzduchem za účelem vypírání usazeného materiálu. Dmychadlový agregát má výkon 101,4 m³/h a $\Delta p = 60\text{kPa}$. Sediment z lapáku písku je těžen mamutkou, poháněnou kompresorovou stanicí o výkonu 50 m³/h a je veden do separátoru písku s kapacitou 20 l/s, společného pro lapák písku splaškové vody. Vyčištěná dešťová voda jde do nádrže dešťové zdrže. [19]

5.1.2.2 Splašková linka

Splašková voda pokračuje na dvojici jemně strojně stíraných česlí s průlinami 6 mm a vírový lapák písku. Shrabky zachycené na česlích vypadávají do šnekového dopravníku, který je společný i pro dvojici česlí dešťové linky, a jsou dopravovány do lisu na shrabky, kde jsou shrabky odvodněny. Ze žlabu česlí odtéká odpadní voda na vírový lapák písku, který je provzdušňován za účelem vypírání usazeného materiálu. Sediment je těžen pomocí mamutky a je přiváděn do separátoru písku, kde dojde odloučení organických částic od písku. Hrubě předčištěná odpadní voda odtéká do usazovací nádrže. [19]



Obr. 11 Strojně stírané česle s průlinami 6mm (vlevo) a lapák písku (vpravo) po rekonstrukci

5.1.3 Mechanické čištění

V dešťové zdrži o využitelném objemu 300 m³ dochází k akumulaci prvního podílu nejvíce znečištěných srážkových vod, což přispívá k zvýšené ochraně recipientu. Po naplnění kapacity dešťové zdrže při déle trvající srážkové činnosti odtéká dešťová voda přelivem do recipientu. Po odeznění srážek je akumulovaná voda vypouštěna do čerpací stanice a na hrubé předčištění. Dešťová zdrž je vybavena vyplachovací vanou pro možnost vyklizení usazených nečistot. [19]

V obdélníkové usazovací nádrži (viz obr. 12) o rozměrech 30 x 6 m, kam přitékají hrubě předčištěné splaškové vody, dochází ke gravitačnímu usazování nečistot. Vzniká primární kal, který je stírán ze dna nádrže do kalových prohlubní pomocí stíracího zařízení. Stírací zařízení je zavěšeno na pojezdovém mostu, který zajišťuje i stírání plovoucích látek z hladiny do náklonného žlabu, odkud nečistoty odtékají do samostatné jímky a pak jsou odpouštěny s primárním kalem. Z kalových prohlubní je primární kal gravitačně odpouštěn do jímky zahuštěného směsného kalu, kde se mísí se strojně zahuštěným přebytečným aktivovaným kalem. Mechanicky předčištěná voda odtéká žlabem do denitrifikačních selektorů. Alternativně ji lze přivádět do rozdělovacího objektu před linkami biologického čištění pro případ odstávky denitrifikačních selektorů. Část mechanicky předčištěné vody je z odtokového žlabu usazovací nádrže čerpána kalovým čerpadlem do nádrže regenerace kalu pro tzv. zlepšování regenerace. Poblíž usazovací nádrže je osazena stanice pro příjem dovezených kalů. Gravitační odtok ze stanice je zaveden do nátoky usazovací nádrže. [19]



Obr. 12 Obdélníková usazovací nádrž před rekonstrukcí

5.1.4 Biologické čištění

Biologické čištění se skládá z aktivační nádrže, nádrže regenerace kalu a dosazovací nádrže.

5.1.4.1 Aktivační nádrže

Biologická linka je navržena jako nízko zatěžovaná aktivace s oddělenou regenerací vratného kalu (viz obr. 13), předřazenou denitrifikací rozdělenou na dva funkční objemy s následnou nitrifikací. Mechanicky předčištěná odpadní voda je přiváděna do denitrifikačního selektoru, kam je zaústěno i potrubí vratného kalu z regenerace. Denitrifikační selektor je rozdělen na čtyři mechanicky míchané sekce a je vybaven osmi komplety ponorných axiálních míchadel. Ze selektoru odtéká aktivační směs do rozdělovacího objektu, kde dochází k rovnoměrnému

rozdělení nátoků aktivační směsi na dvě paralelní aktivační linky (viz obr. 13). Pro vnitřní recirkulaci aktivační směsi slouží ponorná vrtulová čerpadla. Vnitřní recirkulaci je z koncové části nitrifikace přiváděna aktivační směs do denitrifikačních nádrží. Odsud aktivační směs odtéká do anoxicko-oxické sekce, která je vybavena jemnobublinovým aeračním systémem a ponorným axiálním vrtulovým míchadlem. Nádrž je možno operativně provozovat v oxickém nebo anoxickém režimu. Režim provozu je možno měnit v závislosti na teplotě odpadní vody a s tím spojeným nitrifikačním efektem. Zbývající část aktivační nádrže je provozována jako čistě oxická. Nádrže jsou vybaveny jemnobublinovým aeračním systémem. [19]



Obr. 13 Aktivační nádrže (vlevo) a nádrže regenerace kalu (vpravo) před rekonstrukcí

5.1.4.2 Regenerace kalu

Nádrž regenerace kalu je využívána jako oxická zásoba aktivovaného kalu a zároveň minimalizuje reakční objem. Do regenerace vratného aktivovaného kalu, čerpaného z dosazovacích nádrží, je čerpáno i definované množství mechanicky předčištěné odpadní vody z odtoku usazovací nádrže a v časovém režimu i fugát (procesní voda, fugát je tekutý produkt vyhnívacího procesu a má charakter odpadní vody) z odvodněného kalu, akumulovaný v čerpací jímce fugátu. V regenerační nádrži je kal provzdušňován jemnobublinovým aeračním systémem. Koncová část nádrže je mechanicky promíchávána osazeným axiálním vrtulovým míchadlem. Odtokový žlab, instalovaný na stěnu v koncové části nádrže, zajišťuje gravitační odtok regenerovaného kalu do biologického čištění. [19]

5.1.4.3 Dosazovací nádrže

Do rozdělovacího objektu před dosazovacími nádržemi (viz obr. 14) přitéká aktivační směs spolu s biologicky vyčištěnou odpadní vodou z obou linek regenerace. Rozdělovací objekt umožňuje odstávku jedné nebo druhé dosazovací nádrže. Aktivační směs je přiváděna do středového válce dosazovací nádrže, který usměrní proud aktivační směsi ke dnu nádrže. Pomocí stíracího zařízení na pojezdovém mostě je usazený kal mechanicky stírán do kalové prohlubně uprostřed nádrže. Pojezdový most je osazen i mechanismem pro stírání plovoucích nečistot z hladiny nádrže. Zachycené nečistoty jsou odváděny pomocí sběrného zařízení do sběrných jímek, odkud jsou odváděny zpět do čistícího procesu spolu s vratným kalem. Kal ze dna dosazovacích nádrží je přiváděn do čerpací stanice vratného kalu, kde jsou osazena celkem čtyři kalová čerpadla. Vratný kal je výtlakem čerpadel přiváděn do nádrže regenerace kalu nebo do odtoku z usazovací nádrže. Vyčištěná odpadní voda odtéká betonovými žlaby

do spojné šachty, za kterou je šachta měření, kde se indukčním průtokoměrem měří množství vyčištěné odpadní vody na odtoku z ČOV. [19]



Obr. 14 Dosazovací nádrž před rekonstrukcí

5.1.5 Dmychárna

5.1.5.1 Zdroj vzduchu pro nitrifikaci

Tři komplety rotačních dmychadel o výkonu $420 \div 1008 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta p = 45 \text{ kPa}$ slouží jako zdroj stlačeného vzduchu, nezbytného pro provoz aeračního systému v nitrifikačních nádržích. Pro každou aktivační linku je instalováno samostatné dmychadlo a jedno dmychadlo slouží jako provozní rezerva. [19]

5.1.5.2 Zdroj vzduchu pro regeneraci kalu

Pro provoz aeračního systému v nádrži regenerace kalu jsou zdrojem stlačeného vzduchu dvě dmychadlová soustrojí o výkonu $194 \div 557 \text{ m}^3/\text{h}$ a $\Delta p = 60 \text{ kPa}$, přičemž jedno z nich slouží jako provozní rezerva. [19]

5.1.6 Chemické hospodářství

5.1.6.1 Dávkování externího substrátu

Nepříznivé složení odpadních vod vyžaduje dávkování externího substrátu pro zajištění trvalého a stabilního průběhu denitrifikačního procesu. Substrát je dávkován do rozdělovacího objektu před aktivačními linkami. Jako externí substrát je používán metanol, který zaručuje dostatečný přísun lehce rozložitelného organického substrátu. Zařízení pro dávkování externího substrátu se skládá ze zásobní nádrže substrátu o objemu 12 m^3 , s úkapovou jímkou o objemu 5 m^3 , dávkovací stanice a stáčecího boxu. Substrát je dávkován do rozdělovacího objektu před aktivačními linkami. Dávkování je automaticky řízeno v závislosti na koncentraci dusičnanového dusíku na odtoku z denitrifikace. [19]

5.1.6.2 Dávkování síranu železitého

Zařízení pro chemické srážení fosforu solemi železa je osazeno za účelem snížení koncentrace celkového fosforu. Na stabilizaci kalových indexů a zlepšení separace aktivovaného kalu od vyčištěné vody v dosazovacích nádržích je dávkován roztok síranu železitého do odtoku aktivační směsi z nádrží biologického čištění. Zařízení sestává ze zásobní nádrže roztoku

síranu železitého o objemu 15 m^3 a dávkovací stanice, která je vybavena dvěma samostatnými dávkovacími čerpadly. Ze zásobní nádrže je dávkován koagulant i na třetí stupeň čištění. Dávka koagulantu na simultánní srážení (přídavek koagulantů přímo do aktivačního procesu) je fixní a na terciální stupeň je dávka úměrná průtoku do flotace. [19]

5.1.7 Třetí stupeň čištění

Pro zvýšené odstranění fosforu je do procesu zařazen třetí stupeň čištění, který je založen na fyzikálně chemickém principu koagulace solemi železa a separaci vzniklé suspenze flotací. Celkové množství vyčištěných odpadních vod z biologického stupně se pohybuje v rozsahu cca $57,6 - 200 \text{ l/s}$. Část vyčištěných odpadních vod z odtoku z dosazovacích nádrží je přiváděna pomocí ponorných kalových čerpadel na jednotku terciálního čištění o kapacitě 80 l/s . Část vod, přesahujících kapacitu flotační jednotky odtéká do recipientu. Podíl vyčištěné odpadní vody, dočišťované na terciálním stupni ČOV je nastaven tak, aby ve výsledné směsi byla dodržena požadovaná odtoková koncentrace celkového fosforu a to $0,75 \text{ mg/l}$. podle projektu je teoretické množství fosforu na odtoku z DN 4 kg/d , což při průměrném bezdeštném denním přítoku na ČOV $4974 \text{ m}^3/\text{d}$ představuje koncentraci cca $0,80 \text{ mg/l}$. Pro návrh flotace však je vhodné uvažovat s dostatečnou rezervou a tedy se vstupní koncentrací fosforu v rozsahu $0,8 - 2,0 \text{ mg/l}$. Koagulant se bude dávkovat do prvního reaktoru koagulace. Dávkovat se bude 40%-ní roztok síranu železitého. K tomuto účelu slouží dávkovací membránové čerpadlo. Při molárním poměru $\text{Fe}^{3+}/\text{P} = 1,5$ činí dávka Fe^{3+} $2,709677 \text{ g Fe}^{3+}/\text{g P}$. Tzn., že potřebná dávka 40%-ního $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ se při vstupní koncentraci $\text{P } 0,8 \text{ mg/l}$ pohybuje v rozsahu cca $0,3 - 0,7 \text{ l/h}$ a při vstupní koncentraci $\text{P } 2,0 \text{ mg/l}$ v rozsahu cca $4 - 8 \text{ l/h}$. Průtok na třetí stupeň čištění je proměnný a je řízen tak, aby byla dosažena požadovaná hodnota koncentrace P na odtoku ČOV. [19], [20]

Směs koagulantu a vody přitéká do vstupní části jednotky a proces koagulace probíhá ve dvou komorách s rozdílnou intenzitou míchání, zajištěného vertikálními lopatkovými míchadly. Vzniklá suspenze přitéká do flotační jednotky, kde dochází k separaci vzniklého chemického kalu. Zároveň je do flotační jednotky čerpána vyčištěná voda z odtoku flotační jednotky, nasycená vzduchem. Sycení probíhá v saturátoru, kam je kompresorovou stanicí přiváděn tlakový vzduch. Čerpání zajišťuje dvojice vertikálních vysokotlakých čerpadel, z toho jedno čerpadlo je provozní rezerva. Po přivedení vody nasycené vzduchem do nádrže s volnou hladinou dojde k desorpci plynů v důsledku snížení tlaku a vznikající bublinky vynesou vločky chemického kalu směrem k hladině. Vznikající flotační pěna je z hladiny mechanicky stírána stíracím zařízením a odváděna do jímky flotačního kalu. Odtud je kal čerpán ponorným kalovým čerpadlem na začátek biologického čištění. Vyčištěná odpadní voda gravitačně odtéká ze třetího stupně do spojné šachty, kde se mísí s vyčištěnou vodou z dosazovacích nádrží, odtékající do recipientu. Celková koncentrace fosforu je na odtoku měřena přenosnou vzorkovací stanicí. [19]

5.1.8 Kalové hospodářství

Primární kal je odtahován z kalových prohlubní usazovací nádrže do jímky zahuštěného směsného kalu. Z aktivačního systému je odtahován z nádrže regenerace kalu přebytečný aktivovaný kal. Tento kal je čerpán na strojní zahušťovací zařízení. Zahuštěný kal je odváděn do vyrovnávací nádrže, odkud je čerpán do jímky zahuštěného směsného kalu, kde se smísí s primárním kalem. Směsný surový kal je před anaerobní stabilizací tepelně hygienizován

pasterizací. Hygienizovaný kal je čerpán do vyhnívací nádrže (viz obr. 15) prvního stupně, odkud je gravitačně přepouštěn do vyhnívací nádrže druhého stupně. Trubní propojení umožňuje odstávku jedné nebo druhé nádrže. Anaerobně stabilizovaný kal je odebírán z vyhnívací nádrže a gravitačně přepouštěn do jímky vyhnílého kalu, která je vystrojena ponorným míchadlem a slouží jako homogenizační nádrž pro vyrovnání kvality vyhnílého kalu před odvodněním. [19]

5.1.8.1 Zahušťování a odvodňování kalu

Z nádrže regenerace kalu je přebytečný aktivovaný kal odebírán horizontálním jednovřetenovým čerpadlem a čerpán do rotačního síťového zahušťovače. Součástí zahušťovače je dávkovací stanice kapalného organického flokulantu. Zahuštěný kal odtéká do akumulární vyrovnávací nádrže o objemu $1,5\text{m}^3$, odkud je kal přečerpáván kalovými čerpadly do jímky zahuštěného směsného kalu. Jedno kalové čerpadlo slouží jako provozní rezerva. Kalová voda odtéká areálovou kanalizací do vstupní čerpací stanice, odkud je čerpána zpět do čistícího procesu. [19]

K odvodňování je využívána odvodňovací linka. Do odvodňovacího zařízení (horizontální dekantační odstředivka) o výkonu $5 \div 10 \text{ m}^3/\text{h}$ je čerpán homogenizovaný kal z jímky vyhnílého kalu. Roztok organického flokulantu je do odstředivky čerpán vřetenovým dávkovacím čerpadlem. Pomocí dvojice šnekových dopravníků je odvodněný kal ukládán do kontejneru nebo na manipulační skládku odvodněného kalu. Produkce odvodněného kalu je přibližně $2,5 \text{ t}/\text{den}$. [19]

Fugát z odvodněného kalu, použitá proplachová voda a ostřiková voda jsou gravitačně přiváděny do čerpací jímky fugátu. Zde dochází k akumulaci a vyrovnání kvality těchto vod, které jsou následně čerpány ponornými kalovými čerpadly do nádrže regenerace kalu. [19]

5.1.8.2 Tepelná hygienizace kalu (pasterizace)

Princip pasterizace spočívá v ohřátí kalu v pasterizačním reaktoru na teplotu cca 70°C při současném míchání kalu. Prodleva na této teplotě cca 1 hodinu zajistí spolehlivou hygienizaci kalu. Teplá voda, potřebná pro termický proces, je přiváděna z plynové kotelny. Kal je do pastérů čerpán kalovým čerpadlem z jímky zahuštěného směsného kalu. Tepelně hygienizovaný kal je následně kalovým čerpadlem přečerpán do vyhnívací nádrže prvního stupně. [19]



Obr. 15 Vyhnivací nádrž před rekonstrukcí

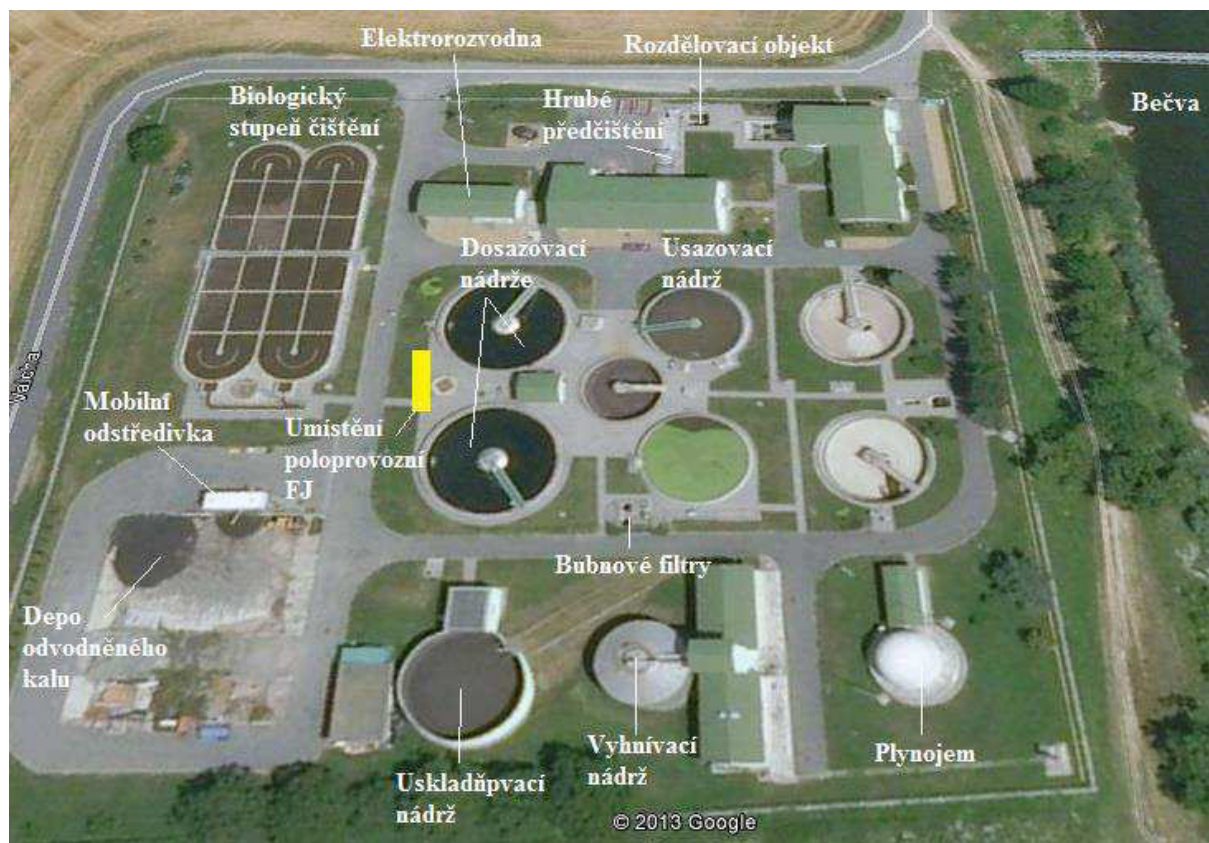
5.1.9 Plynové hospodářství

Produkt anaerobní stabilizace kalu, bioplyn, je z vyhnivacích nádrží jímán ve vrchní části nádrží a odváděn do membránového plynoměru o objemu 200 m³. Část bioplynu je využívána pro míchání obsahu nádrže a část spalována v plynové kotelně pro přípravu teplé vody. V celém plynovém systému je provozní tlak přibližně 2,5 ÷ 3 kPa. Pro míchání vyhnivacích nádrží je část bioplynu přiváděna do plynové kompresorovny, kde je instalována dvojice rotačních plynových kompresorů o jmenovitém výkonu 100 m³/h, které zajistí potřebný tlak bioplynu. Stlačený plyn je přiváděn ke dnu vyhnivacích nádrží. Část bioplynu je přiváděna do plynové kotelny, kde jsou instalovány dva plynové teplovodní kotle, jeden na bioplyn a druhý na zemní plyn. Kotel na bioplyn je využíván na pokrytí technologického tepla anaerobního procesu. Kotel na zemní plyn je pro vytápění celého objektu. V případě potřeby je možno oba tepelné zdroje kombinovat. Přebytek bioplynu je spalován v hořáku zbytkového plynu o výkonu 77 m³/h. [19]

5.2 Popis poloprovozní jednotky

Experiment poloprovozního charakteru byl realizován na jednotce, která sestává z poloprovozní flotační jednotky Kunst-i-flot a koagulační jednotky. Celé zařízení je instalováno na ČOV Hranice, což je městská ČOV o kapacitě 30 000 EO. Jsou zde přiváděny vody z města Hranice a z částí obcí Drahotuše a Teplice nad Bečvou. [22]

Čistírna (viz obr. 16) se skládá z mechanického předčištění, usazovací nádrže, biologického čištění, terciálního odstraňování NL a kalového hospodářství. Odpadní voda přitéká do odlehčovací nádrže s dešťovou a povodňovou čerpací stanicí. OV pokračuje na strojně stírané hrubé česle a lapák písku. Předčištěná voda pokračuje do primární usazovací nádrže. Odsazená voda pokračuje na biologické čištění a primární kal pokračuje do jímky smíšeného kalu. Biologické čištění se skládá z oběhové aktivace s jemnobublinným provzdušňováním, anaerobním reaktorem a dosazovacích nádrží. Vyčištěná voda z dosazovacích nádrží pokračuje na bubnové filtry (terciální čištění). Kal z dosazovacích nádrží je čerpán do jímky smíšeného kalu. ČOV je vybavena kalovým a plynovým hospodářstvím, kde je kal mezofilně vyhníván a následně odvodňován.



Obr. 16 Technologická skladba ČOV Hranice [21] doplněno popisky

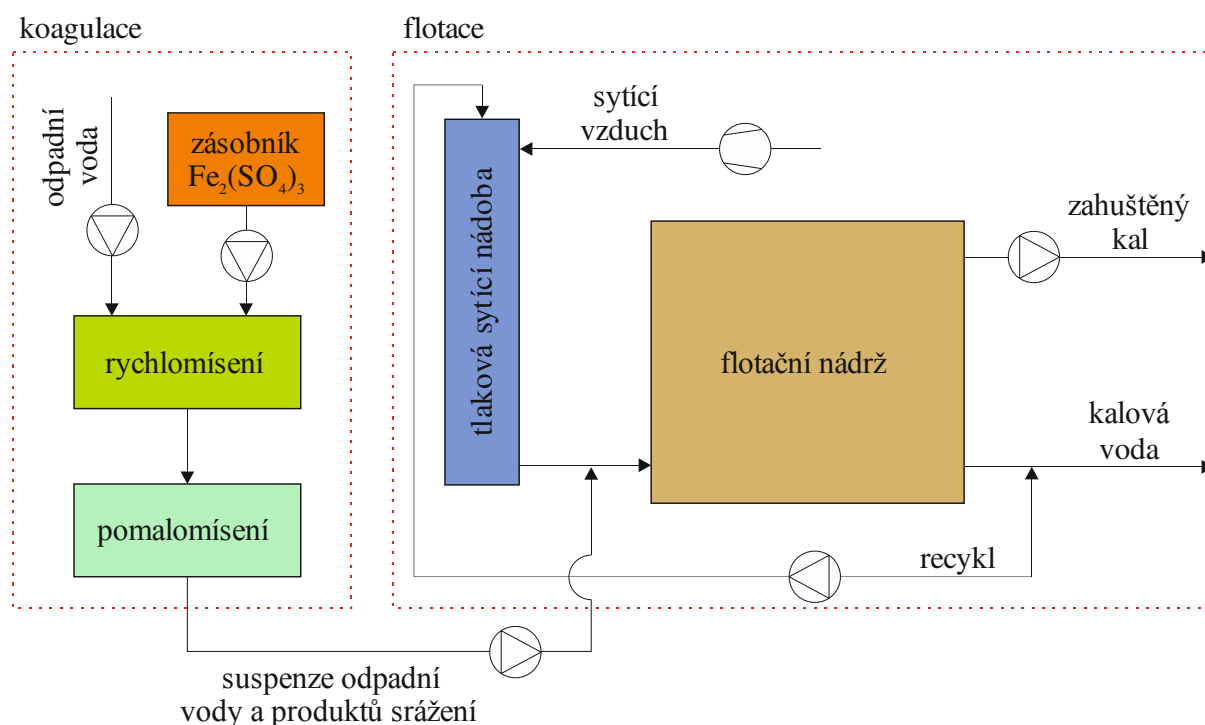
Průměrné hodnoty ukazatelů na ČOV Hranice jsou viditelné v tabulce 5.

Ukazatel	Jednotka	r. 2012*	Emisní standard NV 61/2003 Sb.	Požad. EHS (91/271/EHS)	Povolení vodoh. úřadu
množství OV	m ³ /rok	2 259 535	-	-	3 500 000
BSK ₅	mg/l	2,2	20	25	20
CHSK	mg/l	17,6	90	125	90
NL	mg/l	0,0	25	35	25
N _{celk}	mg/l	8,2	15*	15*	15*
P _{celk}	mg/l	0,8	2*	2*	2*

* - roční průměr

Tab. 5 Průměrné hodnoty sledovaných ukazatelů na ČOV Hranice [22]

Jak již bylo zmíněno, poloprovozní jednotka sestává se dvou částí, které jsou znázorněny na obr. 17.



Obr. 17 Technologické schéma poloprovozní jednotky

5.2.1 Jednotka srážení fosforu

Jednotka na srážení fosforu sestává ze dvou válcových nádob (rychlomísniče a pomalomísniče), čerpadla odpadní vody a čerpadla roztoku síranu železitého se zásobníkem.

Při návrhu koagulačního stupně, o který byla rozšířena původní flotační jednotka, bylo nutné zvolit vhodnou velikost rychlomísniče a pomalomísniče. Velikosti nádob byly vypočteny podle rovnice (5) a (6), na základě doby zdržení, se kterou je uvažováno v projektu [23], a průtoku, který je limitován nátokovým čerpadlem flotační jednotky.

Nádoba rychlomísniče:

- maximální průtok na poloprovozní jednotce $Q = 1,4 \text{ l/s}$,
- doporučená doba zdržení (DZ) pro rychlomísniče $DZ = 100 \text{ s}$,

$$V_{rm} = \frac{Q \cdot DZ}{1000} = \frac{1,4 \cdot 100}{1000} = 0,14 \text{ m}^3 . \quad (5)$$

Zvolena byla válcová nádoba o rozměrech: průměr $D = 0,6 \text{ m}$ a výška $H = 0,55 \text{ m}$.

Nádoba pomalomísniče:

- doporučená doba zdržení pro pomalomísniče $DZ = 12 \text{ min} = 720 \text{ s}$,

$$V_{pm} = \frac{Q \cdot DZ}{1000} = \frac{1,4 \cdot 720}{1000} = 1,01 \text{ m}^3 . \quad (6)$$

Rozměry nádoby byly zvoleny: průměr $D = 1,2 \text{ m}$ a výška $H = 0,9 \text{ m}$.

Z konstrukčního hlediska je nádoba na rychlomísniče spojena s nátokovým objektem, který tvoří vnější prstenec o hloubce 200 mm. Do tohoto prstence je přiváděna vyčištěná odpadní voda z odtoku z dosazovací nádrže, odkud je čerpána ponorným čerpadlem HCP AL-01N. V rychlomísniči je k odpadní vodě přidáváno srážedlo (40 % roztok síranu železitého), které je dávkováno čerpadlem ProMiment BT4b 1000 (viz obr. 18).



Obr. 18 Zásobník s dávkovacím čerpadlem roztoku síranu železitého a nádoba rychlomísení s nátokovým prstencem

Nádoby rychlomísení a pomalomísení pracují jako spojené nádoby (propojeny hadicí DN50). Po rychlém zamíchání se odpadní voda gravitačně převede do nádoby pomalomísení, kde dochází ke tvorbě vloček.

Nádoby jsou osazeny míchadly s rovnými skloněnými lopatkami o průměru 250 mm v rychlomísení a 400 mm v pomalomísení. Vrtule má 6 lopatek s úhlem sklonu 45° a výška lopatky je 50 mm (rychlomísení) a 80 mm (pomalomísení). Obě míchadla jsou poháněna stejným motorem s převodovkou SIEMENS MRT28-10-FF-R/V1-63/75-0,09/6p-230/400V.

5.2.2 Flotační jednotka

Flotační jednotka (viz obr. 19) je navržena pro zahušťování aktivovaného kalu, čemuž odpovídají i její parametr. Nicméně bylo možné navrhnout takový provoz jednotky, který umožňoval ověření projektu ČOV Svitavy. Flotační jednotka (FJ) využívá proces flotace rozpuštěným vzduchem se sycením recyklu.



Obr. 19 Kontejner s flotační jednotkou

Parametry poloprovozní flotační jednotky [23]:

- hydraulický výkon FJ: $0,5 \div 4 \text{ m}^3/\text{h}$,
- rozměry flotační nádrže:

délka	2,5 m,
šířka	1,5 m,
hloubka	1,5 m,
- plnicí čerpadlo: $0,3 \div 5 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta p = 5 \text{ bar}$, s maximální průchodností,
- cirkulační čerpadlo: $0,3 \div 5 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta p = 5 \text{ bar}$,
- čerpadlo zahuštěného kalu: $0,2 \div 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta p = 3 \text{ bar}$, s maximální průchodností, koncentrace sušiny v zahuštěném kalu $2 \div 6 \%$
- objem jímky zahuštěného kalu max. $0,4 \text{ m}^3$.

Možnosti nastavení FJ [23]:

- minimální nátok na FJ $0,2 \text{ l/s}$,
- maximální nátok na FJ $1,5 \text{ l/s}$ – z důvodu menší kapacity odtoku vyčištěné odpadní vody je reálné možné nastavit pouze $1,4 \text{ l/s}$,
- minimální průtok recyklu $0,22 \text{ l/s}$,
- maximální průtok recyklu $1,5 \text{ l/s}$,
- tlak 0 do $5,6 \text{ barů}$.

Pro sání odpadní vody do flotační jednotky slouží dvoustupňové vřetenové čerpadlo Seepex BN 5-12 / A1-C1-C6-F0-GA ovládané frekvenčním měničem. Vyčištěná odpadní voda s vločkami sraženiny přitéká na flotační jednotku z nádrže pomalomísení. Výtlač plnicího čerpadla DN50 je připojen na vstup do FJ přes zpětnou klapku a ruční uzávěr. Množství čerpané odpadní vody je měřeno indukčním průtokoměrem. Na vstupu je měřena i teplota a množství nerozpuštěných látek (NL). [23]

K cirkulaci recyklu slouží cirkulační vřetenové čerpadlo Seepex BN 5-12 / A1-C1-C6-F0-GA ovládané frekvenčním měničem. Čerpadlo vede vyčištěnou odpadní vodu z odtoku flotační nádrže do sytící nádoby. Na výtlačném potrubí DN 50 do sytící nádoby je osazena zpětná klapka a ruční uzávěr. Množství cirkulační kalové vody je měřeno indukčním průtokoměrem a na výtlačku čerpadla je měřen tlak a teplota média. [23]

Tlaková sytící nádrž má průměr 200 mm a výšku 2100 mm. Vevnitř tlakové sytící nádoby dochází ke smíchání recyklu se vzduchem při nastaveném tlaku. Nasycený recykl je přiváděn přes regulační ventil do vstupního potrubí s vyčištěnou odpadní vodou. Tlaková sytící nádrž je vybavena stavoznakem pro měření hladiny a na výstupu je měřen tlak. [23]

Zdrojem stlačeného vzduchu je kompresorová stanice UniMaster UNM 260-10-50 W s plnicím množstvím 160 l/min a maximálním tlakem 10 bar. Tlak vzduchu dodávaného do tlakové sytící nádoby je upraven regulačním ventilem Stasto a množství vzduchu je řízeno dle hladiny v tlakové sytící nádoby pomocí elektromagnetického ventilu. Vzduchové potrubí je dimenze DN15. [23]

Vyflotovaná vrstva sraženiny je shrabována shrabovákem do jímky zahuštěného kalu. Pohon shrabováku je řízen frekvenčním měničem. Provoz shrabováku je automatický

dle nastavených časových intervalů. Pro shrabování vyflotovaného kalu je shrabovák vybaven stíracími a hřebenovými lopatkami, které jsou osazeny na plastovém řetězu. Maximální rychlost shrabování je 5 cm/s a je snižována na minimální možnou hodnotu frekvenčním měničem. V případě potřeby nižší rychlosti než je minimální kontinuální rychlost je provoz shrabováku přerušovaný. [23]

Vyflotovaná sraženina je čerpána z jímky zahuštěného kalu vřetenovým čerpadlem Seepex BN 2-6L / A1-C1-C6-F0-GA ovládaným frekvenčním měničem. Na výtlaku čerpadla DN50 je osazena zpětná klapka a ruční uzávěr. Zahuštěný kal je čerpán hadicí DN 50 o délce 65 m do jímky směsného kalu v objektu strojního zahuštění kalu. [23]

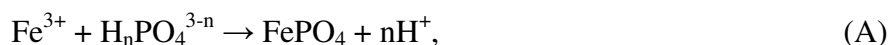
Vyčištěná voda z FJ gravitačně odtéká potrubím DN50 do vnitřní kanalizace ČOV. Množství kalové vody je měřeno indukčním průtokoměrem. Do odtoku kalové vody je také zaústěno odkalení dna flotační jednotky přes elektro uzávěr. Odkalení je prováděno automaticky dle časového režimu nebo podle nátoky na FJ. [23]

5.2.3 Výpočty

Pro nastavení flotační jednotky a koagulačního stupně bylo nutné vypočítat určité parametry, aby bylo možné co nejlépe simulovat projektovanou situaci na ČOV Svitavy. Tyto výpočty jsou popsány dále.

5.2.3.1 Výpočet dávky roztoku síranu železitého

Množství Fe potřebného na odstranění na 1 g P v přitékající vodě lze vypočítat z následující rovnice pro chemické strážení [4]:



a z následujících hodnot:

- $M(\text{Fe}) = 55,8 \text{ g/mol}$,
- $M(\text{P}) = 30,97 \text{ g/mol}$,
- $M(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3) = 399,78 \text{ g/mol}$ (z toho 111,6 g/mol Fe, což je 27,9 %),
- koncentrace roztoku síranu železitého $c = 40\% = 0,4$,
- hustota 40 % roztoku síranu železitého $\rho = 1,442 \text{ g/l}$ (experimentálně stanoveno).

Na 1 mol P je potřeba 1 mol Fe, jak vyplývá ze stechiometrické rovnice (A). Pro převedení na poměr v hmotnostních jednotkách lze využít následující výpočet:

$$\frac{Fe}{P} = \frac{M(Fe)}{M(P)} = \frac{55,8}{30,97} = 1,8 \text{ g/g} . \quad (7)$$

Literatura doporučuje použít přebytek 1 až 2,8 dle místa použití v procesu čištění odpadní vody. Vzhledem k tomu, že projekt uvažuje s přebytkem Fe $\alpha = 1,5$, je tento použit i v následujícím výpočtu. Pro výpočet dávky roztoku síranu železitého na základě změřené koncentrace fosforu v odpadní vodě a průtoku odpadní vody je odvozen následující vztah:

$$V_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = \frac{M(Fe)}{M(P)} \cdot \alpha \cdot \frac{M(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)}{2 \cdot M(Fe)} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{3600}{1000} \cdot P \cdot Q , \quad (8)$$

$$V_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = 60,44 \cdot P \cdot Q . \quad (9)$$

5.2.3.2 Výpočet výšky hladiny v pomalomísení

Od doby zdržení v pomalomísení se odvíjí výška hladiny v nádobě pomalomísení. Vychází se z objemu nádoby a doby zdržení:

- objem nádoby pomalomísení

$$V_{pm} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h, \quad (10)$$

- průtok OV

$$Q = V_{pm} \cdot DZ \cdot 60, \quad (11)$$

- výška hladiny v nádobě pomalomísení

$$h = \frac{4 \cdot Q \cdot 10^{-3}}{60 \cdot DZ \cdot \pi \cdot D^2}. \quad (12)$$

5.2.3.3 Výpočet vnosu vzduchu

Z teoretické části vyplývá, že vnos vzduchu by se vypočetl z rovnice (2) resp. (3). Vzhledem k tomu, že není znám podíl pevných částic v OV, byla použita modifikace tohoto vzorce.

Vnos vzduchu do FJ, při tlakovzdušné flotaci s recyklem:

$$V_{vzd} = 1,3 \cdot 22,8 \cdot (f \cdot p - 1) \cdot R, \quad (13)$$

kde 22,8 je rozpustnost vzduchu při 10 °C [ml/l],

f je účinnost sycení při tlaku p [-],

p je tlak sycení [atm],

R je sycený recykl [m³/d].

5.3 Popis experimentu

Měření probíhalo od 7.3.2013 do 3.4.2013. Byly stanoveny následující cíle měření:

- proměřit účinnost odstraňování P podle návrhu ČOV Svitavy,
- zjistit jaký vliv má:
 - různá dávka Fe na 1mg P,
 - různý vnos vzduchu do flotační nádrže (FN),
 - doba zdržení v pomalomísení,
 - tlak sycení na spotřebu elektrické energie při daném vnosu vzduchu.

Hlavním cílem měření bylo ověřit účinnost odstraňování fosforu podle návrhu režimu na ČOV Svitavy. Vzhledem k tomu, že na poloprovozní jednotce nebylo možné nastavit stejný poměr Q/R jaký je navržený na ČOV Svitavy, tak referenčním parametrem byl zvolený vnos vzduchu. Vycházelo se z možností ČOV Svitavy:

- návrhové parametry:
 - maximální průtok odpadní vody (Q) 80 l/s = 22,2 m³/h,
 - maximální průtok recyklu (R) 6,5 l/s = 1,8 m³/h,
 - tlak sycení 5 bar,
 - dávkování roztoku síranu v poměru 2,7 g Fe³⁺ / g P,
- dopočtené a odhadnuté parametry:
 - předpokládaná účinnost sycení 0,8 (hodnota doporučovaná [24] pro sycící nádoby s výplní, taková je uvažována i na ČOV Svitavy),
 - vnos vzduchu do FN vypočtený dle (13) činí 0,6 g/s ≈ 7,5 · 10⁻³ g/l odpadní vody (OV).

V tab. 6 jsou uvedeny hodnoty plánované při provozu technologie na ČOV Svitavy a hodnoty nastavené na poloprovozním zařízení pro ověření této technologie.

Projekt	Model
$Q = 80 \text{ l/s}$	$Q = 1,4 \text{ l/s}$
$R = 6,5 \text{ l/s}$	$R = 0,22 \text{ l/s}$
$p = 5 \text{ ba}$	$p = 5 \text{ bar}$
$Fe/P = 2,709677 \text{ g/g}$	$Fe/P = 2,7 \text{ g/g}$
$f = 0,8$	$f = 0,51$
$V_{\text{vzd}} = 0,6 \text{ g/s} \approx 7,5 \text{ mg/l OV}$	$V_{\text{vzd}} = 7,06 \text{ mg/l OV}$

Tab. 6 Porovnání plánovaných hodnot s možnostmi nastavení poloprovozní jednotky

Po odebrání vzorku OV a vyhodnocení koncentrace fosforu v OV byla podle (9) vypočtena dávka roztoku síranu železitého a podle grafu uvedeného v Příloze č. 1 nastaveno dávkovací čerpadlo.

Následně bylo množství roztoku ověřeno experimentálně, protože graf neodpovídal přesně. Na základě požadované doby zdržení se podle (12) vypočetla výška hladiny v nádrži pomalomísení, která se následně regulovala ručně. Na ovládacím panelu flotační jednotky byly nastaveny požadované parametry, jako tlak, přítok odpadní vody na flotační jednotku, množství recyklu a chod shrabováku. Režim běžel 3 až 4 hodiny, což byla dostatečná doba k ustálení režimu. Poté byly odebrány vzorky nátoku a odtoku, vzorek vyflotovaného kalu, změřeny teploty a pH v nádržích nátoku, rychlomísení a pomalomísení a zapsány spotřeby elektřiny, množství kalové vody na vstupu, vyčištěné vody na výstupu, množství recyklu a množství kalu.

Natékající kalová voda a vyčištěná voda z odtoku byla vzorkována do litrových plastových vzorkovnic a uskladněna v chladničce. Skladování trvalo jeden až čtyři dny, než byly vzorky převezeny pracovníkem VaK Přerov k analýze.

Důležitým krokem bylo stanovení účinnosti sycení při různých režimech. Měření probíhalo podle návodu skupiny, která vyvíjela tlakovou sytící nádobu. Všechny účinnosti sycení jsou sepsány do tab. 7.

Účinnost sycení [-]		Sytící tlak p [bar]					
		3	4	5	5	5	5
		R [l/s]					
	Q [l/s]	0,25	0,80	0,25	0,35	0,40	1,40
12mm tryska	1,20	x	x	x	0,30	x	x
	1,40	0,20	0,55	0,25	x	0,35	0,70
		3	4	4	4	4	5
		0,38	0,22	0,28	0,30	0,33	0,22
5mm tryska	0,80	x	x	x	x	x	0,46
	1,40	0,60	0,49	0,61	0,55	0,77	0,51

Tab. 7 Účinnosti sycení při různých režimech

5.4 Popis použitých zařízení pro měření sledovaných veličin

Během měření byly přímo na ČOV Hranice sledovány následující parametry:

- koncentrace celkového fosforu v přitékající odpadní vodě,
- pH a teplota vody na různých místech koagulace.
- sušina vyflotované sraženiny.

Pro stanovení koncentrace fosforu v nátoku byl používán spektrofotometr Spectroquant NOVA 60 od firmy MERCK s termoreaktorem Spectroquant TR 620 (viz obr. 20) a kyvetový test pro stanovení fosfátů 1.14543.0001. Postup stanovení byl proveden dle návodu na obr. 21 s tím rozdílem, že vzorek nebyl z důvodu práce v terénních podmínkách nijak upravován.



Obr. 20 Spektrofotometr NOVA 60 (vlevo) a termoreaktor TR 620 (vpravo)

0.05 – 5.00 mg/l P

Phosphate Cell Test
Determination of phosphorus (total)

14 543

5 ml sample	1 dose P-1K green dose- metering cap	thermoreactor 30 minutes at 120 °C	allow to cool to room temperature	5 drops P-2K
1 dose P-3K blue dose- metering cap	shake vigorously	5 minutes	measure	

Obr. 21 Návod ke kyvetovému testu

Kyvetovým testem byla změřena přibližná koncentrace P, která byla využita pro nastavení dávkovacího čerpadla. Pro přesné stanovení koncentrace P byly vzorky posílány do laboratoře společnosti Vodovody a kanalizace Přerov, a.s.

Další sledovanou veličinou bylo pH a teplota, které byly měřeny pH metrem MULTI 3420S od firmy WTW se sondou Electrode SenTix 940-3 (viz obr. 22).



Obr. 22 pH metr MULTI 3420S

Orientačně se sledovalo množství sušiny ve vyflotovaném kalu. Kal se odebíral z hladiny ve flotační nádrži. Kal byl vyhodnocován na halogenové sušící váze MLS 50-3 od firmy KERN při 105 °C (viz obr. 23).



Obr. 23 Halogenová sušící váha při stanovení sušiny

5.5 Výsledky měření

Pro splnění všech stanovených cílů měření bylo realizováno celkem 18 měření. Souhrn nastavovaných režimů je uveden v tab. 8. Kompletní tabulka všech měření a získaných hodnot je uvedena v příloze č. 2.

Veličina	Jednotka	Nastavené hodnoty												
		12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5
Průměr trysky	[mm]	12	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5	5	5
Průtok OV	[l/s]	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	0,8	1,4	1,4	1,4
Průtok recyklu	[l/s]	0,25	0,25	0,4	0,8	0,35	1,4	0,22	0,33	0,22	0,22	0,28	0,37	0,3
Tlak sycení	[bar]	3	5	5	4	5	5	5	4	4	5	4	3	4

Tab. 8 Režimy nastavované během experimentu (některé opakovaně)

5.5.1 Ověření provozních parametrů ČOV Svitavy

První měření bylo směřováno, tak aby co nejpřesněji simulovalo navržený režim na ČOV Svitavy.

- nastavení FJ:
 - průtok vyčištěné OV $1,4 \text{ l/s} = 0,39 \text{ m}^3/\text{h}$,
 - průtok recyklu $0,22 \text{ l/s} = 0,06 \text{ m}^3/\text{h}$,
 - tlak sycení 5 barů,
 - doba zdržení 10 min,
- naměřená a dopočtená data:
 - účinnost sycení 0,51,
 - vnos vzduchu 7,06 mg/l OV,
 - poměr Fe/P 3,45 g/g
- výsledky:
 - účinnost odstranění celkového fosforu **19%** (v nátoku 0,59 mg/l),
 - účinnost odstranění fosforečanů **86%** (v nátoku 0,36 mg/l),
- předpokládaná účinnost na ČOV Svitavy:
 - předpokládaná koncentrace P na vstupu do KJ 0,8 – 2,0 mg/l,
 - předpokládaná účinnost odstranění celkového fosforu 19%,
 - předpokládaná koncentrace P na výstupu z FJ 0,65 – 1,62 mg/l,
 - požadovaná koncentrace na odtoku ČOV je 0,75 mg/l.

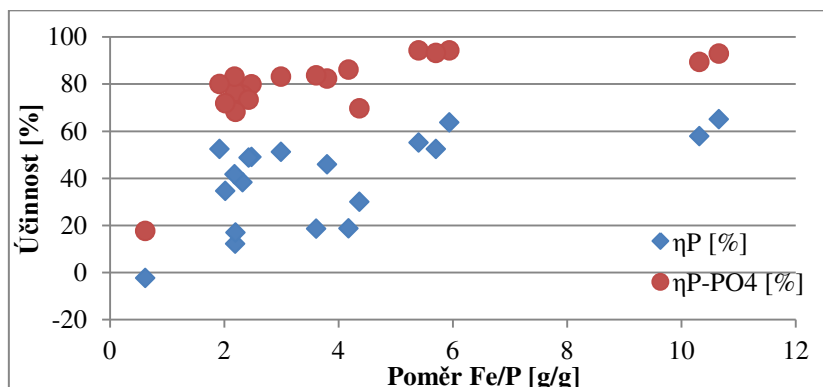
Vypočtená předpokládaná účinnost odstraňování celkového fosforu na ČOV Svitavy vychází z předpokladu, že zde bude stejný poměr $\text{P-PO}_4/\text{P}_{\text{celk}}$.

Jak bylo popsáno v kap. 5.1.7, v projektu ČOV Svitavy je uvažováno s terciárním čištěním pouze části odpadní vody odtékající z dosazovacích nádrží. Celkový obsah fosforu v odpadní vodě na odtoku z ČOV tedy bude výrazně závislý na provozovateli, jakým způsobem bude regulovat nátok na terciární čištění.

Dále bylo proměřeno pár režimů pro zjištění, zda je lepší účinnost při delší, resp. kratší době zdržení v nádobě pomalomísení, při vyšší, resp. nižší dávce množství železa na fosfor a jaký je vliv tlaku.

5.5.2 Vliv různé dávky roztoku $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ na účinnost odstraňování fosforu

Následující graf 2 znázorňuje vliv poměru Fe/P na účinnost odstranění fosforu. Graf je sestaven ze všech proměřených režimů. Je patrné, že vliv ostatních parametrů, jako je tlak, doba zdržení v pomalomísení, nátok OV, recykl atd. je nevýznamný. Z grafu je patrné, že celkový fosfor byl odstraňován s účinností 12 – 65 % a fosforečnany s účinností 68 – 94 %.



Graf 2 Závislost účinnosti na poměru Fe/P

Pro prokázání vlivu poměru Fe/P na účinnost odstraňování P byly dále nastaveny tři totožné režimy (viz tab. 9) s jedinou proměnnou, kterou byla hodnota Fe/P.

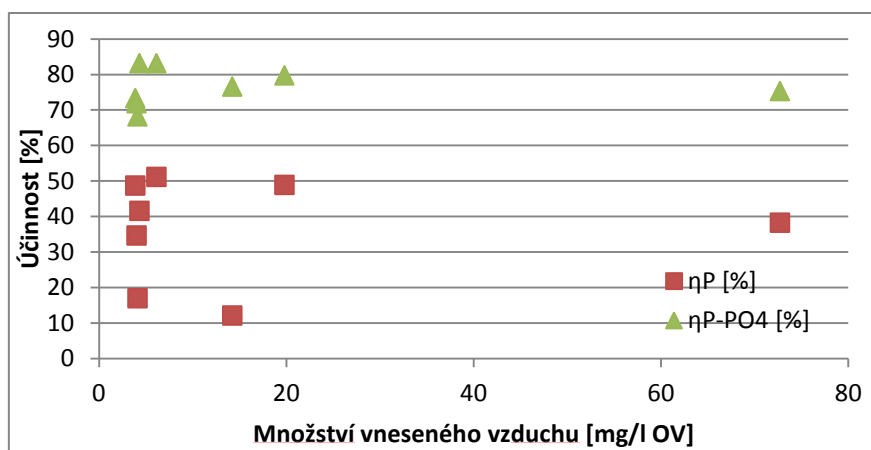
Fe/P [g/g]	Q [l/s]	R [l/s]	V_{vzd} [mg/l]	η_{P} [%]	$\eta_{\text{P-PO}_4}$ [%]
0,62	1,40	0,40	6,16	-2	18
2,99	1,40	0,40	6,16	51	83
5,71	1,40	0,40	6,16	52	93

Tab. 9 Vybrané režimy sledující vliv poměru Fe/P

Z již zmíněných důvodů není možné prohlásit tyto výsledky za dogmatické, ale pro posouzení jsou dostačující. Se zvyšující se dávkou Fe na 1 mg P se zvyšuje i účinnost. Avšak od určité hodnoty Fe/P se η nezvyšuje rapidně, z čeho vyplývá, že příliš vysoká dávka roztoku síranu železitého je zbytečná. Podle grafu 2 se jako nejlepší jeví poměr Fe/P těsně nad hodnotou 2 g/g. Experimentem se tedy dá potvrdit, že zvolený poměr Fe/P 2,7 g/g je vyhovující. V jednom případě vychází účinnost záporná, což je způsobeno již zmíněnými chybami měření.

5.5.3 Závislost η na různém vnosu vzduchu

Při použití flotace k jiným účelům (např. zahušťování čistírenských kalů), je jedním ze stěžejních parametrů poměr dodávaného vzduchu a natékající pevné hmoty. Proto byl dalším testovaným parametrem vnos vzduchu do FJ. Změřeny byly režimy s různým vnosem vzduchu. Z důvodu nepřesnosti měření vstupního množství fosforu a nepřesnosti nastavení dávkovacího čerpadla, nebyl u všech režimů dodržen stejný poměr Fe/P, který má prokazatelný vliv na účinnost. Pro přibližné vyhodnocení byly vybrány režimy s přibližně stejným poměrem Fe/P od 2 do 3 g/g. Z grafu 3 je patrné, že vliv množství vneseného vzduchu do FJ nemá vliv na účinnost odstranění P. Efektivnější se jeví režimy s menším vnosem vzduchu. Množství vneseného vzduchu ovlivňuje energetickou náročnost, proto z ekonomického hlediska je nevhodné zvyšovat množství vneseného vzduchu.



Graf 3 Závislost vnosu vzduchu do FJ při stejném poměru Fe/P = 2÷3 g/g

Na první pohled tab. 10 vykazuje klesající účinnost se vzestupem množství vneseného vzduchu. Při bližším ohledání je však evidentní, že snižující se účinnost odstraňování fosforu je dána spíše snižujícím se množstvím vneseného síranu železitého.

p [bar]	Q [l/s]	R [l/s]	V _{vzd} [mg/l]	Fe/P [g/g]	η _P [%]	η _{P-PO4} [%]
5	1,40	0,25	1,24	5,94	64	94
5	1,40	0,40	6,16	2,99	51	83
4	1,40	0,80	19,84	2,48	49	80
5	1,40	1,40	72,74	2,32	38	75

Tab. 10 Vliv množství vneseného vzduchu do FJ na účinnost odstranění P

5.5.4 Závislost η na různé DZ v pomalomísení

Velikost nádoby pomalomísení vycházela z doby zdržení stanovené projektem na ČOV Svitavy na 12 min. Z literární rešerše, však vyplynulo, že jedním z parametrů, který může ovlivnit účinnost srážení a tedy i odstraňování fosforu, je doba zdržení v nádobě pomalomísení. Vzhledem k možnostem byly zvoleny následující režimy s tlakem p = 5 bar, nátokem na FJ Q = 0,8 l/s a recyklem R = 0,22 l/s (doba zdržení byla nastavena pomocí výšky hladiny vypočtené dle vztahu 8):

DZ [min]	V _{vzd} [mg/l]	Fe/P [g/g]	η _P [%]	η _{P-PO4} [%]
10	10,35	2,43	49	73
15	10,35	1,92	52	80
20	10,35	4,37	30	70

Tab. 11 Vliv doby zdržení v pomalomísení na účinnost odstraňování P

Z naměřených hodnot v tab. 11 vyplývá nejlepší účinnost odstraňování P při době zdržení 15 minut a to překvapivě i přes to, že při tomto měření byla nižší dávka Fe/P než v ostatních režimech. Za předpokladu, že všechna měření jsou zatížena stejnou chybou, lze tedy doporučit 15 minut jako optimální dobu zdržení.

5.5.5 Vliv tlaku na spotřebu energie při stejném vnosu vzduchu

Cílem těchto měření bylo ověřit, zda je energeticky vhodnější nižší recykl při vyšším tlaku nebo vyšší recykl při nižším tlaku, při zachování stejného vnosu vzduchu. Z tab. 12 je patrné, že je výhodnější nižší recykl při vyšším tlaku.

p [bar]	Q [l/s]	R [l/s]	f[-]	V _{vzd} [mg/l]	E [kWh]
3	1,40	0,38	0,65	7,44	4,14
4	1,40	0,30	0,55	7,44	4,04
5	1,40	0,22	0,51	7,06	4,02

Tab. 12 Vliv tlaku na spotřebu energie při stejném vnosu vzduchu

5.6 Diskuse výsledků

Během všech měření byly naměřeny následující minima a maxima:

- vstupní koncentrace P_{celk} : 0,5 – 2,5 mg/l,
- vstupní koncentrace P-PO₄: 0,33 – 1,96 mg/l,
- poměr P-PO₄/ P_{celk} : 61 – 83 %,
- účinnost odstranění celkového P: 12 – 65%,
- účinnost odstranění fosforečnanů: 68 – 94 %,

Jak již bylo popsáno v teoretické části, srážením jsou odstraňovány pouze fosforečnanové formy fosforu. Tím, že tvoří většinu celkového množství fosforu, se dá předpokládat dostačující odstranění fosforu.

- teplota vyčištěné OV: 6,7 – 8,4 °C ; pH vyčištěné OV: 7,24 – 7,43,
- teplota v rychlomísení: 6,7 – 8,3 °C ; pH v rychlomísení: 6,80 – 7,31,
- teplota v pomalomísení: 6,9 – 8,4 °C ; pH v pomalomísení: 7,0 – 7,37,

Teplota v jednotlivých nádobách se měnila tím, že kontejner byl vytápěn a tím byla voda nepatrně ohřívána. Z důvodu dávkování chemikálie a chemické reakce se měnilo pH. Krátce po přidání roztoku síranu železitého pH kleslo, následně v nádobě pomalomísení pH stoupalo.

- koncentrace NL_{IN} = cca 5 mg/l ; NL_{OUT} = cca 5 – 15 mg/l,
- koncentrace RL_{IN} = 370 – 450 mg/l ; RL_{OUT} = 370 – 460 mg/l,

Koncentrace NL a RL nebyla použitou technologií téměř ovlivněna.

- sušina vyflotovaného kalu: 0,3 – 2,4 %,

Sušina byla sledovaná pouze orientačně. Vyflotovaný kal byl odebírán z hladiny, kde tvořil velmi tenkou vrstvu (i přes to, že shrabování probíhalo jednou za 2 hodiny), takže s velkou pravděpodobností byla nabrána i voda.

- hodinová spotřeba energie na flotaci: 3,8 – 5,1 kWh,

Výše uvedené hodnoty naměřené během prováděných experimentů jsou částečně zatíženy chybami, které je nutné vzít v úvahu, nicméně nevylučují platnost základních závěrů. Jedná se zejména o následující faktory:

- Při obvyklém chodu dosazovacích nádrží natékala od koagulačního stupně vyčištěná odpadní voda s poměrně nízkým obsahem nerozpuštěných látek. Obvykle se tato hodnota pohybovala pod 5 mg/l. Vzhledem k vlivům aktuálního počasí však občas

docházelo ke zhoršení činnosti dosazovacích nádrží, které se zaplnily kalem až k přelivové hraně, a v takovém okamžiku došlo k rapidnímu zhoršení kvality odpadní vody (pouhým okem byl patrný výrazný nárůst nerozpuštěných látek, byl pozorován i vliv na pH a obsah fosforu). Tento stav trval pouze krátkodobě (cca 30 min až 1 hod.). Protože každý režim byl ponechán k ustálení po dobu 4 hodin, jsou některé režimy (přibližně 3) ovlivněny tímto jevem, nicméně vzhledem k tomu, že tato situace nebyla přesněji monitorována, není zahrnuta do vyhodnocení výsledků.

- Odběr vzorků odpadní vody natékající do koagulačního stupně a odpadní vody odtékající z flotační nádrže probíhal ve stejnou dobu. Z obvykle nastaveného průtoku odpadní vody 1,4 l/s a známého objemu flotační nádrže a mísících nádob lze vypočítat, že doba zdržení v celé technologii byla přibližně jednu hodinu. Za tuto dobu se tedy mohla změnit kvalita natékající odpadní vody, což zatěžuje chybou zejména vypočtenou účinností odstraňování fosforu.
- Manuální regulace dávkovacího čerpadla roztoku síranu železitého mohla rovněž ovlivnit výsledky v tom smyslu, že pokud se změnila ve čtyřhodinovém sledovacím intervalu koncentrace fosforu, nereagovalo se na tuto skutečnost změnou dávky roztoku. Tento nedostatek by bylo možné eliminovat pouze automatickou vzorkovací stanicí a online měřením koncentrace fosforu v natékající odpadní vodě s následnou automatickou regulací dávkovacího čerpadla. Z ekonomického hlediska je toto rozšíření příliš drahé.
- S ohledem na výkyvy nátoky odpadní vody do koagulačního stupně nebylo možné udržet konstantní výšku hladiny v nádobě pomalomísení (a tedy konstantní DZ). Jak se ukázalo, doba zdržení může rovněž ovlivňovat účinnost odstraňování fosforu. Výkyvy nátoky OV by se dali regulovat přidáním frekvenčního měniče k čerpadlu nátoky.
- Pro ověření všech prezentovaných výsledků by bylo vhodné zmíněné režimy sledovat v dlouhodobém provozu, nikoliv pouze ve čtyřhodinových intervalech. Toto však z důvodu harmonogramu projektu FR-TI3/552 nebylo možné.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou terciárního čištění odpadní vody se zaměřením na snížení koncentrace fosforu srážením a následným odstraněním vznikající sraženiny flotací. Hlavním cílem diplomové práce bylo ověřit, zda je tato technologie vhodně naprojektována pro rekonstrukci ČOV Svitavy, kterou realizuje firma Kunst, s.r.o. Jak bylo výše zmíněno, jedná se o technologii, která v ČR není instalována, a proto nejsou k dispozici vhodné provozní poznatky. Navíc je obecně známo, že koagulace a flotace jsou poměrně složité fyzikálně-chemické procesy, které je vždy lepší nejlépe poloprovodně odzkoušet. Pro ověření byla využita poloprovodní flotační jednotka realizovaná v rámci projektu FR-TI3/552, které byla pro potřeby měření rozšířena o koagulační stupeň.

Časový harmonogram výše zmíněného projektu neumožnil dlouhodobé zkoušky, nicméně z naměřených údajů vyplývá, že navržená technologie bude plnit svůj účel. Při provedených experimentech bylo dosahováno účinnosti odstraňování celkového fosforu 12 až 65 %, přičemž režim, který simuloval projekt na ČOV Svitavy vykazoval účinnost pouze 19 %. Jak bylo ale diskutováno, účinnost odstraňování fosforu je ovlivňována mnoha faktory, a proto lze očekávat, že při vhodném nastavení reálné jednotky na ČOV Svitavy bude možné dosahovat běžně okolo 50 %.

Výsledky diplomové práce byly již během průběhu zkoušek předávány jako podklady pro úpravy projektu rekonstrukce ČOV Svitavy, resp. jako potvrzení funkčnosti navrženého projektu, projektantovi firmy Kunst, s.r.o.

Seznam použité literatury

- [1] Způsoby likvidace odpadních vod. In: [online]. [cit. 2012-11-08]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/uchop/velebudice/voda/COV/zpusoby_likvidace_odpad_vod_vse.pdf
- [2] ČR. Směrnice rady 91/271/EHS: o čištění městských odpadních vod. In: 1991. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/smernice_odpadni_vody/\\$FILE/OOV-91_271_EHS-19910530.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/smernice_odpadni_vody/$FILE/OOV-91_271_EHS-19910530.pdf)
- [3] PYTL, Vladimír. *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod*. 2. vyd. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, c2012, x, 209 s. ISBN 978-80-87140-26-0.
- [4] Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c1991, xvi, 1334 s. Series in water resources and environmental engineering (McGraw-Hill). ISBN 00-704-1690-7.
- [5] ČSN EN 12255-13. *Čistírny odpadních vod - Část 13: Čištění odpadních vod chemickým srážením*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [6] Vodovody, kanalizace a vodní toky 2011: Kaly. *Český statistický úřad* [online]. 2012, [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/csu/2012edicniplan.nsf/p/2003-12>
- [7] Úprava vody: Flotace (DAF). In: Envi-pur [online]. 2012 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.envi-pur.cz/?page=flotace-rozpustenym-vzduchem>
- [8] Flotation technology. New York: Humana, c2010, xxi, 680 s. Handbook of environmental engineering. ISBN 978-1-58829-494-4.
- [9] BIELA, Renata. Vodárenská flotace a její použití při úpravě pitné vody v ČR. In: TZB info [online]. 2012 [cit. 2013-01-12]. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/8900-vodarenska-flotace-a-jeji-pouziti-pri-uprave-pitne-vody-v-cr>
- [10] HUBÁČKOVÁ, Jana a Vladimír ERBEN. VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ. *Využití flotace při procesu úpravy vody*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1989.
- [11] INTEGROVANÁ PREVENCE A OMEZOVÁNÍ ZNEČIŠTĚNÍ. *Běžné čištění odpadních vod a odpadních plynů*. Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu, 2003. Dostupné z: <http://www.ippc.cz/obsah/CF0196>
- [12] GEANKOPLIS, Christie J. Transport processes and unit operations. 3 ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993, 921 s. ISBN 01-393-0439-8.
- [13] LYČKOVÁ, Barbora, Peter FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. Technologické postupy pro zpracování odpadních kalů. *Zpracování kalů: Multimediální učební texty zaměřené*

- na problematiku zpracování kalů* [online]. 2008 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: Technologické postupy pro zpracování odpadních kalů
- [14] MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. Vyd. 4., V Akademickém nakl. CERM 1. Brno: CERM, 2004, 339 s. ISBN 80-214-2640-3.
- [15] Sanin, F.D., Clarkson, W.W. and Vesilind, P.A. 2011. *Sludge Engineering : The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges*. Destech Pubns Inc., USA. ISBN 978-1932078879
- [16] VURM, Radek. ODSTRANĚNÍ KONTAMINANTŮ Z ODTOKU ČISTÍRNÝ ODPADNÍCH VOD. *Ekomonitor*. 200?, Dostupné z: http://www.ekomonitor.eu/sites/default/files/soubory/2011/29_vurm_ft.pdf.
- [17] Základy čištění odpadních vod. *Ústav technologie vody a prostředí* [online]. 2009 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/homepage/tvp/index/studenti/bc_tech_zp/zaklady_cistení_ov
- [18] Osobní konzultace s panem Ing. Pavlem Novotným, firma SIGMAINVEST s.r.o., 2012.
- [19] EKO EKO S.R.O. *Intenzifikace ČOV Svitavy: Projektová dokumentace*. 2010.
- [20] KUNDRÁTEK, Jan. KUNST SPOL. S R.O. *Inovativní přístupy v čištění odpadních vod: Flotační jednotka ČOV Svitavy*. 2012.
- [21] Google Mapy [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://maps.google.cz/maps?hl=sk&tab=wl>
- [22] VaK Přerov. *Odpadní voda - popis kanalizace* [online]. 2013 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.vakprerov.cz/odpadni-vody.html>
- [23] *Strnadel P., Rozšíření flotační jednotky o koagulační stupeň s dávkováním síranu železitého Fe₂(SO₄)₃ - projekt*, Hranice, 2012
- [24] Hendricks, D. 2006. *Water treatment unit processes : physical and chemical*. Taylor & Francis, UK. ISBN 0-8247-0695-1.

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma ČOV.....	15
Obr. 2 Tlakovzdušná flotace a) s recyklací, b) bez recyklace [11]	22
Obr. 3 Hydrofobní a hydrofilní částice [13].....	24
Obr. 4 Síly působící na sedimentující částici [14]	25
Obr. 5 Zařízení pro laboratorní flotaci [15].....	26
Obr. 6 Přidání srážedla před usazovací nádrž [4].....	30
Obr. 7 Přidání srážedla před a/nebo za biologické čištění [4].....	31
Obr. 8 Přidání srážedla za dosazovací nádrž [4]	31
Obr. 9 Přidání srážedla na víc místech v procesu [4].....	31
Obr. 10 ČOV Svitavy před rekonstrukcí [21] doplněno popisky.....	33
Obr. 11 Strojně stírané česle s průlinami 6mm (vlevo) a lapák písku (vpravo) po rekonstrukci	34
Obr. 12 Obdélníková usazovací nádrž před rekonstrukcí	35
Obr. 13 Aktivační nádrže (vlevo) a nádrže regenerace kalu (vpravo) před rekonstrukcí	36
Obr. 14 Dosazovací nádrž před rekonstrukcí	37
Obr. 15 Vyhnívací nádrž před rekonstrukcí	40
Obr. 16 Technologická skladba ČOV Hranice [20] doplněno popisky	41
Obr. 17 Technologické schéma poloprovozní jednotky.....	42
Obr. 18 Zásobník s dávkovacím čerpadlem roztoku síranu železitého a nádoba rychlomísení s nátokovým prstencem	43
Obr. 19 Kontejner s flotační jednotkou	43
Obr. 20 Spektrofotometr NOVA 60 (vlevo) a termoreaktor TR 620 (vpravo)	48
Obr. 21 Návod ke kyvetovému testu	48
Obr. 22 pH metr MULTI 3420S.....	49
Obr. 23 Halogenová sušící váha při stanovení sušiny.....	49

Seznam tabulek

Tab. 1 Vybrané hodnoty Henryho konstant [12].....	23
Tab. 2 Hodnoty rozpustnosti vzduchu při různých teplotách [4].....	23
Tab. 3 Doporučené rovnice pro výpočet odporového součinitele pro různé oblasti proudění [14]	25
Tab. 4 Efektivnost různých způsobů odstraňování fosforu [4]	28
Tab. 5 Průměrné hodnoty sledovaných ukazatelů na ČOV Hranice [22]	41
Tab. 6 Porovnání plánovaných hodnot s možnostmi nastavení poloprovozní jednotky	47
Tab. 7 Účinnosti sycení při různých režimech	47
Tab. 8 Režimy nastavované během experimentu (některé opakovaně)	50
Tab. 9 Vybrané režimy sledující vliv poměru Fe/P	51
Tab. 10 Vliv množství vneseného vzduchu do FJ na účinnost odstranění P.....	52
Tab. 11 Vliv doby zdržení v pomalomísení na účinnost odstraňování P.....	52
Tab. 12 Vliv tlaku na spotřebu energie při stejném vnosu vzduchu	53

Seznam grafů

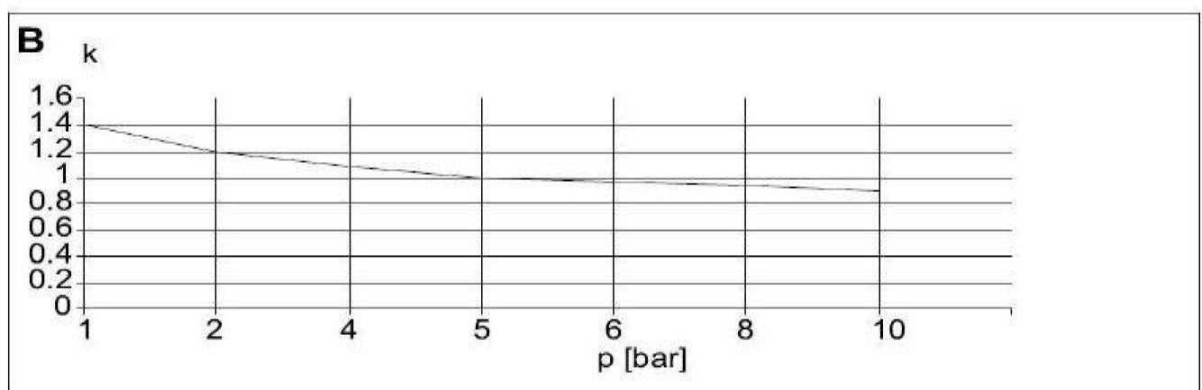
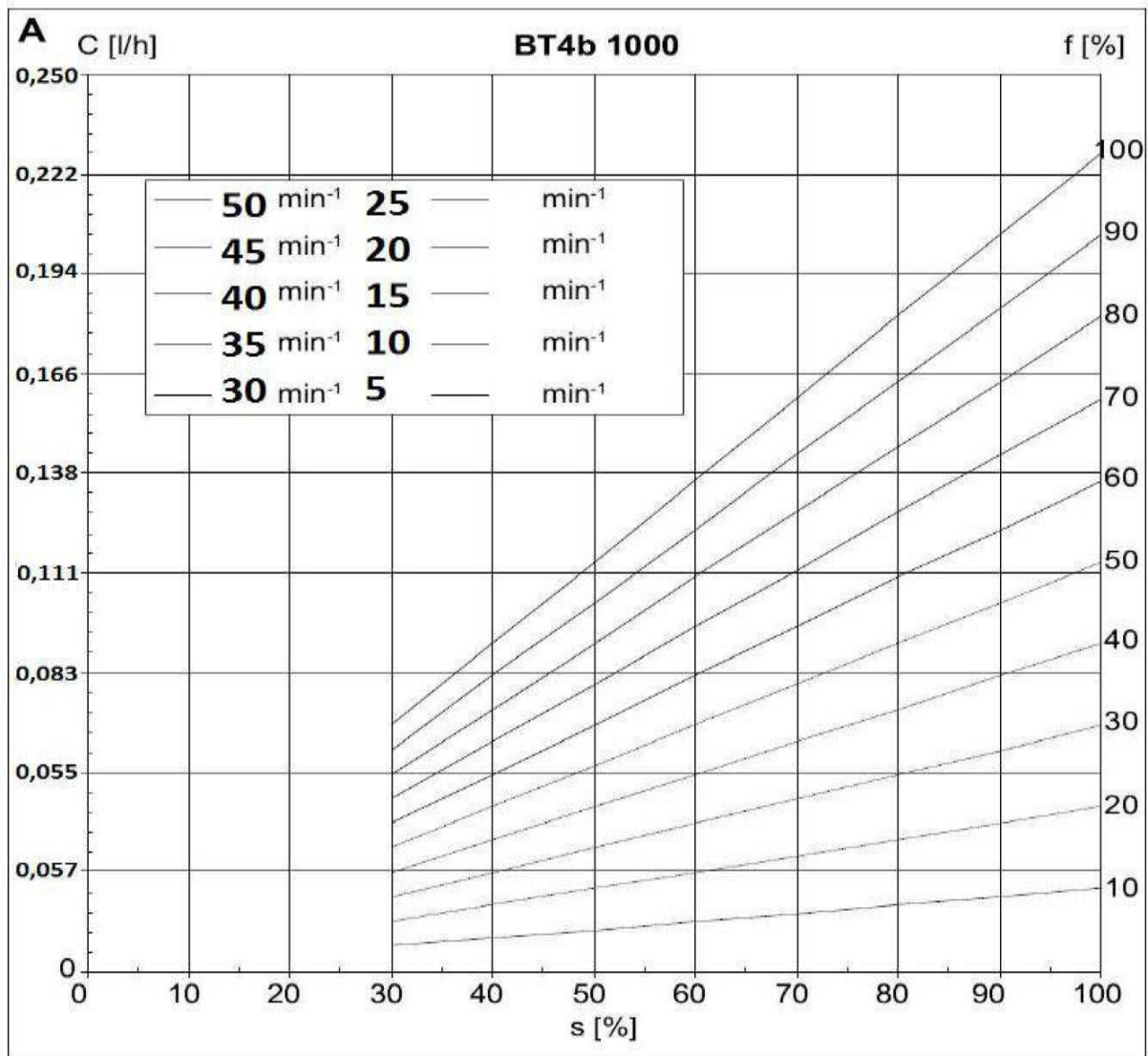
Graf 1 Způsoby zneškodňování kalu v ČR za rok 2011[6].....	19
Graf 2 Závislost účinnosti na poměru Fe/P	51
Graf 3 Závislost vnosu vzduchu do FJ při stejném poměru Fe/P = 2÷3 g/g.....	52

Seznam příloh

Příloha č. 1 - Charakteristika čerpadla roztoku síranu železitého
Příloha č. 2 - Tabulka všech měřených režimů na poloprovozní jednotce na ČOV Hranice
Příloha č. 3 - Technologické schéma ČOV Svitavy

Příloha č. 1

Charakteristika čerpadla roztoku síranu železitého



Příloha č. 2

Tabulka všech měřených režimů na poloprovozní jednotce na ČOV Hranice.

Legenda:
Nastaveno
Požadováno
Změřeno
Experiment
Vypočteno
Laboratoř

Měřená veličina	Jednotka	Naměřené a dopočtené hodnoty					
		11.3.2013	11.3.2013	14.3.2013	14.3.2013	16.3.2013	16.3.2013
Datum		11.3.2013	11.3.2013	14.3.2013	14.3.2013	16.3.2013	16.3.2013
Doba měření	[h]	4	3	4	4	3	4
Průměr trysky	[mm]	12	12	12	12	12	12
Experim. ověřená účinnost sycení	[-]	0,20	0,25	0,35	0,55	0,35	0,35
Průtok odpadní vody	[l/s]	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Průtok recyklu	[l/s]	0,25	0,25	0,40	0,80	0,40	0,40
Orientační koncentrace celkového P	[mg/l]	1,90	1,60	2,68	2,38	1,41	1,21
Množství železa k fosforu	[mg/mg]	2,7	2,7	2,7	2,7	1,8	5,0
Vypočtená dávka síranu Fe na P	[ml/h]	178,85	150,61	252,27	202,24	119,81	102,82
Nastavení čerpadla roztoku Fe ₂ (SO ₄) ₃	[-]	100/100	100/100	100/90	90/80	30/30	90/80
Dávka roztoku Fe ₂ (SO ₄) ₃ graf	[ml/h]				160	9	160
Dávka roztoku Fe ₂ (SO ₄) ₃ experim.	[ml/h]	264	264	252	198	26	198
Poměr Fe/P _{celk.}	[g/g]	5,41	5,94	2,99	2,48	0,62	5,71
Doba zdržení v pomalomísíči	[min]			10	10	10	10
Výška hladiny	[cm]			74	74	74	74
Výška hladiny podle čidla	[%]			84-93	74-89	81-89	82-89
Min. přibližná reálná výška hladiny	[cm]	77		70	65	72	73
Max. přibližná reálná výška hladiny	[cm]			80	80	78	78
Minimální reálná doba zdržení	[min]	10,36		9,42	8,75	9,69	9,82
Maximální reálná doba zdržení	[min]			10,77	10,77	10,50	10,50
Otáčky rychlomísení	[ot/min]	80	80	80	80	80	80
Otáčky pomalomísení	[ot/min]	30	30	30	30	30	30
Výška přelivové hrany	[cm]	9	9	9	9	9	9
Tlak na trysce	[bar]	3,0	5,0	5,0	4,2	5,0	5,0
Tlak sycení	[bar]	3	5	5	4	5	5
Vnos vzduchu na 1 l OV	[mg/l]	-2,16	1,24	6,16	19,84	6,16	6,16
Rychlost shrabováku	[Hz]	10	10	10	10	10	10
Doba chodu shrabováku	[min]	5	5	5	5	5	5
Doba klidu shrabováku	[min]	120	120	120	120	120	120
Teplota odpadní vody	[°C]	7,8	7,7	7,7	7,6	7,3	7,4
pH odpadní vody	[-]	7,30	7,30	7,36	7,42	7,33	7,38
Teplota rychlomísení	[°C]	7,8	7,7	7,7	7,5	7,3	7,4
pH rychlomísení	[-]	6,90	6,80	7,19	7,24	7,24	7,14
Teplota pomalomísení	[°C]	7,9	7,7	7,7	7,5	7,4	7,4
pH pomalomísení	[-]	7,00	7,10	7,18	7,25	7,28	7,17
Floušťka vrstvy sraženiny A1	[cm]	0,5	1,5	2,0	2,0	0,5	1,5
Floušťka vrstvy sraženiny A3	[cm]	0,5	1,5	2,5	3,0	1,0	1,8
Teplota kalu	[°C]	7,3	7,1	7,2	7,0	7,0	7,0
Teplota recyklu	[°C]	7,4	7,2	7,5	7,4	7,3	7,4
Spotřeba elektřiny flotace	[kWh]	16,24	12,57	18,88	18,29	12,76	16,94
Příkon (hodinová spotřeba)	[kW]	4,06	4,19	4,72	4,57	4,25	4,24
Zpracovaná odpadní voda	[m ₃]	20,32	15,18	20,23	20,25	15,19	20,25
Odtok kalové vody	[m ₃]	19,89	14,82	19,83	19,36	14,89	19,85
Produkce zahuštěného kalu	[m ₃]	0,43	0,36	0,40	0,40	0,30	0,40
Spotřeba recyklu	[m ₃]	3,68	2,76	5,80	11,57	4,35	5,84
Sušina zahuštěné sraženiny	[%]			1,68	2,04	1,86	1,98
Celkový fosfor na vstupu	[mg/l]	1,45	1,32	2,50	2,37	1,26	1,03
Celkový fosfor na výstupu	[mg/l]	0,65	0,48	1,22	1,21	1,29	0,49
Množství odstraněného P (η)	[%]	55	64	51	49	-2	52
Fosforečnany na vstupu	[mg/l]	1,05	1,05	1,96	1,78	0,85	0,73
Fosforečnany na výstupu	[mg/l]	0,06	0,06	0,33	0,36	0,70	0,05
Množství odstraněných P-PO ₄ (η)	[%]	94	94	83	80	18	93
Nerozpuštěné látky na vstupu	[mg/l]	5	5	<5	6	<5	<5
Nerozpuštěné látky na výstupu	[mg/l]	15	7	5	6	<5	<5
Rozpuštěné látky na vstupu	[mg/l]	382	402	444	442	372	394
Rozpuštěné látky na výstupu	[mg/l]	396	382	448	432	404	376
Poměr P-PO ₄ / P celk.	[%]	72	80	78	75	67	71
Odchylka	[%]	31	21		0		17

Měřená veličina	Jednotka	Naměřené a dopočtené hodnoty					
		18.3.2013	18.3.2012	21.3.2013	21.3.2013	25.3.2013	25.3.2013
Datum		18.3.2013	18.3.2012	21.3.2013	21.3.2013	25.3.2013	25.3.2013
Doba měření	[h]	4	4	4	4	3	4
Průměr trysky	[mm]	12	12	5	5	5	5
Odhadovaná účinnost sycení	[-]			0,60	0,60		
Experim. ověřená účinnost sycení	[-]	0,30	0,70	0,51	0,77	0,51	0,49
Průtok odpadní vody	[l/s]	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Průtok recyklu	[l/s]	0,35	1,4	0,22	0,33	0,22	0,22
Orientační koncentrace celkového P	[mg/l]	1,63	1,06	0,88	0,60	neměří se	0,85
Množství železa ku fosforu	[mg/mg]	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
Vypočtená dávka síranu Fe na P	[ml/h]	118,72	90,07	74,78	50,98		72,23
Nastavení čerpadla rozotku Fe ₂ (SO ₄) ₃	[-]	70/60	65/50	60/50	50/40	100/100	55/60
Dávka rozotku Fe ₂ (SO ₄) ₃ graf	[ml/h]	96	74	69	45	227	79
Dávka rozotku Fe ₂ (SO ₄) ₃ experim.	[ml/h]	120	90	83	55	264	83
Poměr Fe/P _{celk.}	[g/g]	3,80	2,32	4,18	2,19	10,32	2,18
Doba zdržení v pomalomísíči	[min]	12,5	10	10	10	10	10
Výška hladiny	[cm]	82	74	74	74	74	74
Výška hladiny podle čidla	[%]	83-93	80-93	72-92	74-94	70-90	
Min. přibližná reálná výška hladiny	[cm]	74	72	66	67	64	73
Max. přibližná reálná výška hladiny	[cm]	82	82	81	82	79	77
Minimální reálná doba zdržení	[min]	11,62	9,62	8,81	9,02	8,61	9,82
Maximální reálná doba zdržení	[min]	12,80	10,97	10,90	11,03	10,63	10,36
Otáčky rychlomísění	[ot/min]	80	80	80	80	80	80
Otáčky pomalomísění	[ot/min]	30	30	30	30	30	30
Výška přelivové hrany	[cm]	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
Tlak na trysce	[bar]	5,0	5,8	5,8	5,8	5,7	4,7
Tlak sycení	[bar]	5	5	5	4	5	4
Vnos vzduchu na 1 l OV	[mg/l]	4,15	72,74	7,06	14,25	7,06	4,35
Rychlost shrabováku	[Hz]	10	10	10	10	10	10
Doba chodu shrabováku	[min]	5	5	5	5	5	5
Doba klidu shrabováku	[min]	120	120	120	120	120	120
Teplota odpadní vody	[°C]	7,7	7,7	8,3	8,1	6,9	6,7
pH odpadní vody	[-]	7,33	7,34	7,34	7,35	7,33	7,33
Teplota rychlomísění	[°C]	7,7	7,7	8,3	8,1	6,9	6,7
pH rychlomísění	[-]	7,16	7,23	7,20	7,26	7,10	7,22
Teplota pomalomísění	[°C]	7,8	7,8	8,4	8,2	6,9	6,8
pH pomalomísění	[-]	7,24	7,29	7,25	7,31	7,20	7,27
Tloušťka vrstvy sraženiny A1	[cm]	1,0	1,5	1,0	0,5	2,0	0,5
Tloušťka vrstvy sraženiny A3	[cm]	1,3	5,0	1,5	1,3	2,0	1,0
Teplota kalu	[°C]	7,4	7,4	8,0	7,7	6,4	6,2
Teplota recyklu	[°C]	7,8	7,9	8,4	8,0	6,5	6,0
Spotřeba elektřiny flotace	[kWh]	16,13	20,53	16,09	16,37	12,43	16,18
Příkon (hodinová spotřeba)	[kW]	4,03	5,13	4,02	4,09	4,14	4,05
Zpracovaná odpadní voda	[m ₃]	17,37	20,24	19,87	20,24	15,17	20,24
Odtok kalové vody	[m ₃]	10,60	19,90	19,56	19,92	14,91	19,85
Produkce zahuštěného kalu	[m ₃]	0,31	0,37	0,32	0,33	0,26	0,39
Spotřeba recyklu	[m ₃]	5,09	20,24	3,19	4,83	2,40	3,22
Sušina zahuštěné sraženiny	[%]	1,76	0,34	1,71	0,33	1,80	1,59
Celkový fosfor na vstupu	[mg/l]	1,09	1,15	0,59	0,74	0,76	1,13
Celkový fosfor na výstupu	[mg/l]	0,59	0,71	0,48	0,65	0,32	0,66
Množství odstraněného p (η)	[%]	46	38	19	12	58	42
Fosforečnany na vstupu	[mg/l]	0,79	0,81	0,36	0,47	0,47	0,77
Fosforečnany na výstupu	[mg/l]	0,14	0,20	0,05	0,11	0,05	0,13
Množství odstraněných P-PO ₄ (η)	[%]	82	75	86	77	89	83
Poměr P-PO ₄ / P celk.	[%]	72	70	61	64	62	68
Odchylka	[%]		-8		-19		-25

Měřená veličina	Jednotka	Naměřené a dopočtené hodnoty					
		2.4.2013	2.4.2013	2.4.2013	3.4.2013	3.4.2013	3.4.2013
Datum		2.4.2013	2.4.2013	2.4.2013	3.4.2013	3.4.2013	3.4.2013
Doba měření	[h]	3	3	3	3	3	3
Průměr trysky	[mm]	5	5	5	5	5	5
Odhadovaná účinnost sycení	[-]				0,56	0,65	
Experim. ověřená účinnost sycení	[-]	0,46	0,46	0,46	0,61	0,65	0,55
Průtok odpadní vody	[l/s]	0,8	0,8	0,8	1,4	1,4	1,4
Průtok recyklu	[l/s]	0,22	0,22	0,22	0,28	0,38	0,30
Orientační koncentrace celkového P	[mg/l]	0,81	0,52	0,95	1,03	0,88	1,19
Množství železa ku fosforu	[mg/mg]	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
Vypočtená dávka siranu Fe na P	[ml/h]	39,33	25,25	46,13	87,52	74,78	101,12
Nastavení čerpadla roztoku Fe ₂ (SO ₄) ₃	[-]	40/40	40/30	50/40	60/60	60/50	70/60
Dávka roztoku Fe ₂ (SO ₄) ₃ graf	[ml/h]	36	27	45	82	69	96
Dávka roztoku Fe ₂ (SO ₄) ₃ experim.	[ml/h]	42	31	55	99	83	120
Poměr Fe/P _{celk.}	[g/g]	4,37	1,92	2,43	3,61	2,20	2,02
Doba zdržení v pomalomísíči	[min]	20	15	10	10	10	10
Výška hladiny	[cm]	85	64	43	74	74	74
Výška hladiny podle čidla	[%]	89-100	60-93	46-57	84-91		81-89
Min. přibližná reálná výška hladiny	[cm]	78	55	46	72		72
Max. přibližná reálná výška hladiny	[cm]	87	80	54	78		78
Minimální reálná doba zdržení	[min]	18,37	12,95	10,83	9,69		9,69
Maximální reálná doba zdržení	[min]	20,49	18,84	12,72	10,50		10,50
Otáčky rychlomisení	[ot/min]	80	80	80	80	80	80
Otáčky pomalomisení	[ot/min]	30	30	30	30	30	30
Výška přelivové hrany	[cm]	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
Tlak na trysce	[bar]	5,7	5,7	5,7	5,1	5,1	5,35
Tlak sycení	[bar]	5	5	5	4	3	4
Vnos vzduchu na 1 l OV	[mg/l]	10,35	10,35	10,35	8,35	7,44	7,44
Rychlost shrabováku	[Hz]	10	10	10	10	10	10
Doba chodu shrabováku	[min]	5	5	5	5	5	5
Doba klidu shrabováku	[min]	120	120	120	120	120	120
Teplota odpadní vody	[°C]	7,7	8,4	7,9	7,5	7,5	7,5
pH odpadní vody	[-]	7,24	7,32	7,34	7,27	7,43	7,41
Teplota rychlomisení	[°C]	7,7	8,1	7,9	7,5	7,5	7,6
pH rychlomisení	[-]	7,13	7,29	7,31	7,18	7,23	7,29
Teplota pomalomisení	[°C]	7,7	8,2	7,9	7,5	7,6	7,6
pH pomalomisení	[-]	7,17	7,29	7,37	7,24	7,32	7,33
Floušťka vrstvy sraženiny A1	[cm]	0,5	0	0,3	0	0,3	0,7
Floušťka vrstvy sraženiny A3	[cm]	1,0	0,5	0,5	1,0	0,8	1,3
Teplota kalu	[°C]	7,3	7,8	7,7	7,1	7,1	7,1
Teplota recyklu	[°C]	7,7	8,2	8,3	7,4	7,5	7,5
Spotřeba elektřiny flotace	[kWh]	11,37	11,88	11,70	12,13	12,42	12,11
Příkon (hodinová spotřeba)	[kW]	3,79	3,96	3,90	4,04	4,14	4,04
Zpracovaná odpadní voda	[m ₃]	8,73	8,72	8,65	15,18	15,18	15,19
Odtok kalové vody	[m ₃]	8,65	8,63	8,48	14,96	15,02	15,05
Produkce zahuštěného kalu	[m ₃]	0,09	0,08	0,18	0,22	0,16	14,00
Spotřeba recyklu	[m ₃]	2,42	2,40	2,41	3,0	3,96	3,28
Sušina zahuštěné sraženiny	[%]	1,12	1,98	2,40	1,40	1,36	1,48
Celkový fosfor na vstupu	[mg/l]	0,50	0,84	1,17	0,81	1,12	1,76
Celkový fosfor na výstupu	[mg/l]	0,35	0,40	0,60	0,66	0,93	1,15
Množství odstraněného p (η)	[%]	30	52	49	19	17	35
Fosforečnany na vstupu	[mg/l]	0,33	0,55	0,90	0,67	0,88	1,28
Fosforečnany na výstupu	[mg/l]	0,10	0,11	0,24	0,11	0,28	0,36
Množství odstraněných P-PO ₄ (η)	[%]	70	80	73	84	68	72
Poměr P-PO ₄ / P celk.	[%]	66	65	77	83	79	73
Odchylka	[%]		-38	-19		-21	-32

Příloha č. 3

Technologické schéma ČOV Svitavy

