

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2017

Bc. MICHAL ZIDEK



Posouzení budoucího vývoje zpracování kalu na ČOV
Modřice
Diplomová práce

Vedoucí práce:
doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.

Vypracoval:
Bc. Michal Zidek



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zpracovatel : **Bc. Michal Zidek**
Studijní program: Technologie odpadů
Obor: Technologie a management odpadů
Název tématu: **Posouzení budoucího vývoje zpracování kalu na ČOV Modřice**
Rozsah práce: 50 – 60 stran

Zásady pro vypracování:

1. Popište současný stav řešené problematiky.
2. Popište současný způsob nakládání s kalu na ČOV Modřice
3. Popište perspektivní technologie pro zpracování čistírenských kalů, aplikovatelné na ČOV Modřice.
4. Ze zjištěných údajů vyvodte závěry a doporučení pro ČOV Modřice

Seznam odborné literatury:

1. CHUDOBA, J. *Odpadní vody a jejich čištění*. Praha: b.n., 1991. 121 s. ISBN 80-85122-09-X.
2. HLAVÍNEK, P. *Čištění odpadních vod*. Noel 2000 s.r.o., 1996.
3. DOHÁNYOS, M. – STRNADOVÁ, N. – KOLLER, J. *Čištění odpadních vod*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1998. 177 s. ISBN 978-80-7080-316-52011.
4. SMITH, S. *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment*. Oxon: CAB International, 1996. 382 s. ISBN 0-85198-980-2.
5. GRADY, C P L. a kol. *Biological wastewater treatment*. 3. vyd. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. 991 s. ISBN 978-0-8493-9679-3.
6. SCOTT, C A. – FARUQUI, N I. *Wastewater use in irrigated agriculture : coordinating the livelihood and environmental realities*. Wallingford. 2004. ISBN 0-85199-823-2. URL: <http://dx.doi.org/10.1079/9780851998237.0000>.
7. DAVIS, M L. *Water and wastewater engineering : design principles and practice*. New York: McGraw-Hill, 2010. 1 s. ISBN 978-0-07-171384-9.

Datum zadání diplomové práce: říjen 2015

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2017



Bc. Michal Zidek
Autor práce



doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.
Vedoucí práce



prof. Ing. Jan Mareček, DrSc., dr. h. c.
Vedoucí ústavu



doc. Ing. Pavel Ryant, Ph.D.
Děkan AF MENDELU

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci:

.....Posouzení budoucího vývoje zpracování kalu na ČOV Modřice.....

vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Tomáši Vítězovi, Ph.D. za odborné rady, cenné podněty a připomínky při vedení této diplomové práce. Také chci poděkovat Ing. Vladimíru Habrovi, Ph.D. za poskytnutí měřených dat a výsledků z laboratoře na ČOV Brno Modřice.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá kalovou linkou na čistírně odpadních vod (ČOV) v Brně Modřicích. V teoretické části je stručně popsán všeobecný princip ČOV a detailněji popsány technologie používané při zpracování kalu na kalových linkách větších ČOV. Jsou zde zmíněny i nově se uplatňující technologie na předúpravu kalu, jako i některé nové perspektivní technologie na termické zpracování kalu. V další části je detailně popsána kalová linka na ČOV Modřice a jsou uvedena místa, ze kterých byla získána data pro praktickou část. V praktické části jsou srovnána získaná data z let 2015 a 2016. Tyto roky jsou srovnány mezi sebou, poté jsou srovnány s návrhovými parametry kalové linky při její rekonstrukci v roce 2004. V závěru jsou na základě vyhodnocení získaných dat uvedeny návrhy, které by měly vést ke zlepšení funkce kalové linky.

Klíčová slova: primární kal, sekundární kal, bioplyn, kalová linka, fermentor,

Abstract

This diploma thesis deals with the sludge line at the wastewater treatment plant (WWTP) in Modřice. In the theoretical part is briefly described the general principle of the wastewater treatment plant and more detailed description of technologies used in sludge treatment on sludge lines of larger WWTPs. There are also mentioned new technologies for sludge pretreatment as well as some new perspective technologies for thermal sludge treatment. In the next part the sludge line at the Modřice wastewater treatment plant is described in more details and there are presented places from which the data for the practical part were obtained. The practical part compares the acquired data from years 2015 and 2016. These years are compared with each other, then they are compared with the design parameters of the sludge line during its reconstruction in 2004. In conclusion, on the basis of the evaluation of the obtained data, there are presented proposals that should lead to the improvement of the sludge line function.

Key words: primary sludge, secondary sludge, biogas, sludge line, fermenter

Úvod.....	10
Cíl práce	12
1 Čistírny odpadních vod.....	13
2 Kal	14
2.1 Stručná charakteristika.....	14
2.2 Primární kal.....	14
2.3 Sekundární kal	15
2.4 Terciální kal	16
3 Zpracování kalů.....	16
3.1 Separace kalu	17
3.2 Zahuštění kalu.....	17
3.2.1 Gravitační zahušťovače	17
3.2.2 Stojní zahuštění	18
3.2.3 Tlakové flotace	18
3.3 Předúprava kalů	18
3.3.1 Mechanická předúprava.....	18
3.3.1.1 Mechanické mletí.....	19
3.3.1.2 Ultrazvuková předúprava.....	20
3.3.1.3 Tlaková předúprava	20
3.3.2 Tepelná předúprava	21
3.3.2.1 Mikrovlnná předúprava.....	22
3.3.3 Chemická předúprava	22
3.4 Stabilizace kalu	22
3.4.1 Aerobní stabilizace kalu	22
3.4.1.1 Aerobní termofilní stabilizace.....	23
3.4.2 Anaerobní stabilizace kalu.....	23
3.4.3 Odvodnění a hygienizace.....	24
3.4.4 Nakládání s čistírenskými kaly	25
3.4.4.1 Aplikace na zemědělskou půdu	25
3.4.4.2 Kompostování	26
3.4.5 Spalování	27
3.4.5.1 Fluidní spalování.....	27
3.4.5.2 Spalování v cementářské peci	27
3.4.5.3 Pyrolýza	27
3.4.6 Spalování mokrého kalu	28
3.4.6.1 Mokrý spalování	28
3.4.6.2 Vysokotlaké mokré spalování.....	28
3.4.6.3 Spalování v nadkritické oblasti.....	29
4 Praktická část.....	30
4.1 Čistírna odpadních vod v Modřicích.....	30
4.1.1 Primární usazování	30
4.1.2 Nové zahuštění	31

4.1.3	Zpracování biologického kalu	32
4.1.4	Směsná jímka.....	32
4.1.5	Stabilizace kalu v anaerobních fermentorech	33
4.1.6	Uskladňovací nádrže.....	33
4.1.7	Odvodnění kalu	34
4.1.8	Hygienizace	34
4.1.9	Sušení kalu.....	34
4.2	Materiál a metodika	36
4.2.1	Zdroje dat.....	36
4.2.2	Měřicí místa.....	36
4.2.3	Vzorky kalů	37
4.2.4	Stručná charakteristika rozborů kalu:	40
4.3	Vyhodnocení dat	40
4.3.1	Primární kal	40
4.3.2	Srovnání organických látek v kalu.....	41
4.3.3	Rok 2015	42
4.3.4	Rok 2016	46
4.3.5	Srovnání.....	49
4.4	Diskuse	52
5	Závěr.....	55
6	Použitá literatura:	56
7	Seznam obrázků	58
8	Seznam Grafů	59
9	Seznam tabulek.....	60

ÚVOD

Nakládání s odpadními vodami se řeší již několik století. První zmínky o odvodu odpadních vod na území ČR jsou z poloviny 12. století v Praze, kdy při stavbě kláštera byla vybudována odvodňovací štola pro odpadní vodu z tohoto komplexu. V dalších letech byly vybudovány u některých nemovitostí jednotlivé stoky, ale většinou docházelo k zachycování odpadních vod v jímkách a žumpách, ale případy z těchto nádrží, jako i odpadní vody z domácností byly vyvedeny na ulici. Komplexně se tato situace začala řešit až v roce 1787, kdy byla vybudována stavba podpovrchové kanalizace. Podobná situace byla i ve druhém největším městě Brně, kdy od 14. století se začaly dláždit ulice a díky tomu došlo k vybudování odtokových kanálků a rigolů, které kromě dešťové vody začaly odvádět i splašky vylévané na ulici. První záznamy o cihlových nebo kameninových stokách v Brně mluví o druhé polovině 17. století, ale až v roce 1882 se začalo projektovat a v roce 1892 budovat soustavná kanalizační síť. Při dalším rozvoji obou měst následně docházelo k vypracování studií odvodnění (GENEREL) a dalšímu systematickému rozvoji kanalizačních sítí.

Tento způsob ovšem řešil pouze odvedení odpadních vod z městské zástavby, ale neřešil, co se s touto vodou stane dále. Většinou byly vody vyvedeny do přilehlého vodního toku, což spolu s růstem počtu obyvatel ve městech a rozvojem zásobování domácností pitnou vodou způsobovalo vysokou ekologickou zátěž. Proto se v Praze a v Brně na počátku 20. století začaly připravovat plány na výstavbu čistíren odpadních vod. V Praze čistírna začala fungovat v roce 1906 jen jako mechanická, v roce 1966 pak byl její provoz ukončen a byla zprovozněna na císařském ostrově čistírna mechanicko-biologická. V Brně byly přípravy zahájeny počátkem 20. století, ale první čistírna odpadních vod byla zprovozněna až v roce 1962 také jako mechanicko-biologická.

Kal je jedním z odpadů vznikajícím na čistírně odpadních vod a je v něm obsaženo až 80 % znečištění přitékající na čistírnu. Při zvyšování požadavků na vyčištěnou odpadní vodu je logické, že bude docházet k navyšování produkce čistírenského kalu. Vzhledem ke zpřísnující se legislativě, kdy je požadavek na ekologičtější postupy zpracování a nakládání s kalem a důraz na recyklaci a snižování objemu vyprodukovaných odpadů, je nutné se zamýšlet nad jinými způsoby zpracování čistírenského kalu. Produkci čistírenského kalu nelze zabránit. Jde pouze omezit jeho produkované množství. Toho lze dosáhnout několika metodami. Jsou to snižování objemu nebo destrukce.

Dříve se kal zpracovával jednoduchými postupy hlavně na kompost, nebo se přímo aplikoval na půdu buď v zemědělství na rekultivaci, nebo byl ukládán na skládky. Díky zpřísnující se legislativě se upouští od některých typů nakládání s kalem, jako jsou kalová pole a skládkování kalů. Začíná být kladen vyšší důraz na jiné formy zpracování kalu. Je to strojní odvodnění, energetické využití (spalování přímo nebo v cementářské peci) nebo jen destrukce (spalování bez energetického využití) a skládkován je pouze popel. Přibyly také nové metody předúpravy kalů, které zlepšují následné procesy stabilizace kalu a produkce bioplynu.

Pro oblast čistírenských kalů existuje několik zákonných předpisů. Základním z nich je zákon č. 185/2001Sb., o odpadech - ve znění pozdějších předpisů. Nebezpečnost kalů je určována podle vyhlášky 94/2016 Sb. o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů. Zařazení kalů definuje vyhláška 93/2016 Sb. Katalogu odpadů. Při přepravě se vychází z vyhlášky 374/2008 Sb. o přepravě odpadů. Pokud by čistírenský kal byl určený na skládku tak se ho týká také vyhláška 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. V případě použití kalu pro rekultivaci tělesa skládky stanovuje podmínky i vyhláška 341/2008 Sb. o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. Aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu je upravena vyhláškou 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě.

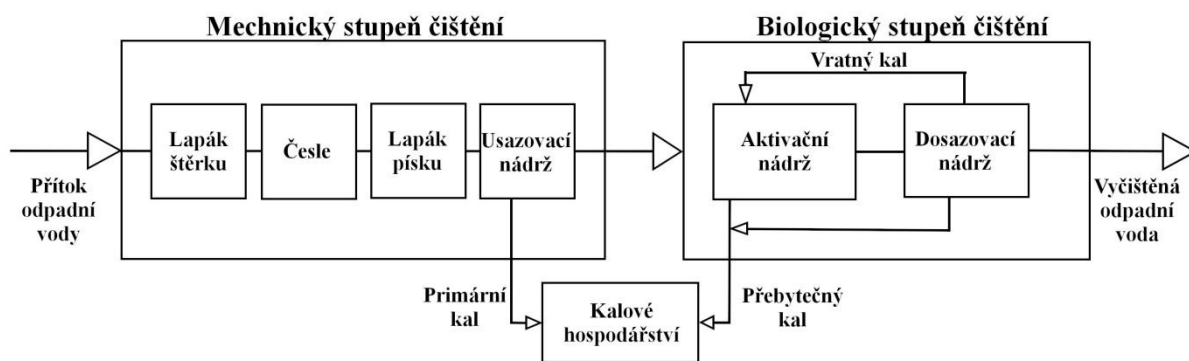
CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo zhodnotit kalovou linku na čistírně odpadních vod v Brně Modřicích a na základě poskytnutých dat z měření a rozborů prováděných na odebraných vzorcích z kalové linky posoudit kalovou linku a ze zjištěných výsledků posoudit a případně navrhnout řešení na posílení této linky.

1 ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD

Čistírna odpadních vod je koncové zařízení na stokové síti, které se projektuje podle charakteru napojené sítě. Jinak bude navržena čistírna napojená na jednotnou kanalizaci a jinak čistírna napojená na oddílný kanalizační systém. Rozdíl bude v mechanickém stupni čištění, kde bude důležité kolik odpadních vod bude při dešťových událostech procházet přes mechanické čištění dále do čistícího procesu a také zda budou dešťové vody překračující hydraulickou a čistící kapacitu biologického stupně před přepadem do recipientu mechanicky předčištěny. Biologický stupeň bude navrhován podobně.

Mechanický stupeň čištění odpadních vod se skládá z několika částí. V první části je lapák šterku, který zachycuje větší usazeniny do průměru 35mm. Pracuje na principu změny rychlosti proudění, kdy částice nad 20 mm vlivem snížení rychlosti proudění a vyšší měrné hmotnosti klesají ke dnu. Dále následují česle, které se liší velikostí průlin. Zde dochází k zachycení nečistot plovoucích na hladině. Dnes jsou na čistírny odpadních vod instalovány pouze strojně stírané česle. Za česle se osazují lapáky písku, které slouží k separaci nerozpuštěných částic o velikosti 0,2 mm až 50 mm. Hlavní funkcí těchto stupňů mechanického čištění je ochrana navazující technologické linky před poškozením a následným zvýšením nákladů na čištění odpadních vod. Odpad získaný ze všech těchto tří stupňů je propírán a v případě shrabků z česlí i lisován, aby došlo ke snížení organického podílu v tomto odpadu. Za těmito stupni čištění se na středních a velkých čistírnách odpadních vod instaluje poslední stupeň mechanického čištění, a to jsou usazovací nádrže. Tyto nádrže slouží k odstranění usaditelných organických a anorganických látek (kalu), které jsou menší než 0,2 mm. Také u těchto nádrží dochází ke stírání vysrážených tukových nečistot z hladiny. Zpracování kalu je popsáno dále. V biologickém stupni čištění probíhají oxidačně-redukční procesy pomocí mikroorganismů, které metabolizují znečištění z odpadní vody. V tomto stupni se odstraňují nutrienty uhlík, dusík a fosfor. Fosfor se může odstraňovat buď biologicky, nebo chemickým srážením. Dusík se odstraňuje v nitrifikačním a denitrifikačním procesu. Při procesech v sekundárním stupni, se tvoří aktivovaný kal, ve kterém je obsaženo zbytkové znečištění, proto je nutné tento kal z vyčištěné odpadní vody odstranit. Toto se děje v dosazovacích nádržích. Aktivovaný kal je poté zpracováván společně s primárním kalem v kalovém hospodářství.



Obrázek 1: Blokové schéma čistírny odpadních vod (Zdroj: autor, 2017)

2 KAL

2.1 Stručná charakteristika

Kal je v odpadní vodě přítomen ve formě suspenze, jeho množství v odpadní vodě je přibližně 1 – 2%, ale při tom je v něm deponováno 50 – 80 % původního znečištění. Sušina a složení kalů závisí na řadě faktorů. Je to struktura a typ napojené kanalizační sítě, zda je to síť jednotná nebo oddílná, jestli jsou v dané lokalitě průmyslové provozy a jakého charakteru, a také jaká je struktura a počet obyvatel. Na čistírně odpadních vod je důležité, jaké technologie jsou použité při zpracování odpadní vody.

Kaly z čistíren odpadních vod mají velký obsah organické hmoty a jsou velmi bohaté na živiny. Složení kalu ve srovnání mezi čistírnami je různorodé, ale v rámci jedné čistírny bývá stabilní.

Koncentrace kalu se vyjadřuje jako obsah sušiny, a to buď v $g \cdot l^{-1}$ nebo v %. Kaly se rozdělují na primární, sekundární a terciální.

(Vítěz T. a kol., 2008), (Hlavínek P. a kol., 1996), (Dohanyos M. a kol., 2000)

2.2 Primární kal

Primární kal je suspenze pevných látek, která vzniká gravitačním odsazením přímo z odpadní vody v usazovacích nádržích. Tento kal má sušinu v rozmezí 0,5 – 7 % a obsahuje 60 – 80 % organických a 30 – 40 % anorganických látek. (Vítěz T. a kol., 2008)

Tabulka 1: Složení primárního kalu

Parametr	Obsah v %
Tuky (extrahovatelné látky – EL)	5,7 – 44,0
Bílkoviny	19,0 – 28,0
Celulosa, hemicelulosa, lignin	12,8 – 25,4
Huminové kyseliny	Do 4,0
Ncelk.	2,0 – 4,5
Pcelk.	0,5 – 2,1
Fe	2,1 – 3,5
Al	1,3 – 2,5
Anorganická složka celkem	25,0 – 30,0

(Zdroj: Vítěz a kol., 2008)

2.3 Sekundární kal

Sekundární kal, taktéž nazývaný biologický, je získávaný z aktivačních nádrží. Tento kal má vločkovitou strukturu, nižší obsah organických látek a je tvořen společenstvem mikroorganismů. Tento kal má sušinu v rozmezí 0,5 – 1,5 % a obsahuje 60 – 70 % organických a 30 – 40 % anorganických látek. Množství kalu je přímo závislé na provozování aktivačního procesu čistírny a také na způsobu odstraňování fosforu z odpadní vody. Pokud je fosfor odstraňován srážením chemickým činidlem, narůstá objem sekundárního kalu až o 30 %. (Vítěz T. a kol., 2008)

Tabulka 2: Složení sekundárního kalu

Parametr	Obsah v %
Organické látky, jako ztráta žíháním	60 – 70
Obsah uhlíku v organické složce biomasy	47 – 52
Obsah kyslíku v organické složce biomasy	31 – 38
Obsah vodíku v organické složce biomasy	7 – 8
Obsah dusíku v organické složce biomasy	7 – 11
Obsah fosforu v organické složce biomasy	1,1 – 2,6
Obsah anorganických látek	30 – 40

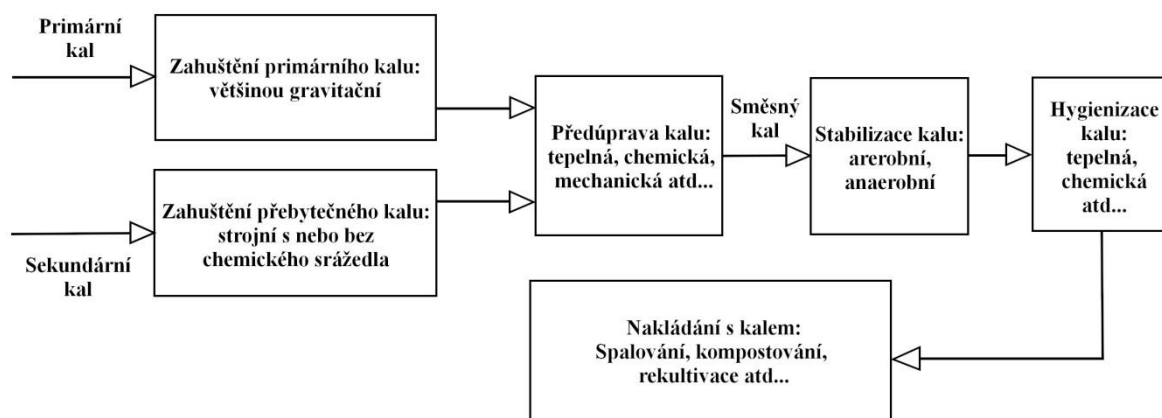
(Zdroj: Vítěz a kol., 2008)

2.4 Terciální kal

Pokud je chemické srážení fosforu aplikováno mimo aktivační nádrž vzniká takto terciální kal, v ostatních případech je terciální kal smíchán s kalem sekundárním.

3 ZPRACOVÁNÍ KALŮ

Zpracování kalů v zásadě dělíme na separaci kalů z odpadní vody, zahuštění kalů před jeho stabilizací, stabilizaci kalů, kde je významně snížen obsah patogenních mikroorganismů a organických látek a hygienizaci kalů, kde je kal zpracováván na finální produkt. Následně je s kalem nakládáno v souladu s platnou legislativou. V úvahu připadá energetické využití, aplikace na zemědělskou půdu (samostatně nebo smícháním s hnojivou či kompostem), využití jako rekultivační směsi při uzavírání skládek odpadů. (Vítěz T. a kol., 2008), (Lyčková B. a kol., 2009)



Obrázek 2: Blokové schéma kalového hospodářství
(Zdroj: autor, 2017)

3.1 Separace kalu

Separace kalu z odpadní vody se liší podle typu kalu. Separace primárního kalu probíhá v usazovacích nádržích, které pracují na principu gravitačního usazování. Kal je přiváděn středem do nádrže, kde klesá ke dnu ve tvaru kužele, na kterém sedimentuje. Usazovací nádrž je vybavená stíráním kalu, který pomáhá kal dopravovat ke středu kužele odkud je kal čerpán dále na zpracování. Usazovací nádrže jsou navrhovány podle typu odpadní vody, velikosti napojené kanalizační sítě a přepokládaného průtoku čistírnou.

Separace sekundárního kalu probíhá čerpáním biologického kalu z několika míst na čistírně. V podstatě lze kal čerpat přímo z aktivační nádrže, nebo ho lze čerpat ze samostatné jímky umístěné na lince, která vratný kal z dosazovacích nádrží vrací zpět do aktivačního procesu.

Primární a sekundární kal je dále zahušťován a může být i podroben různým způsobům předúpravy. (Vítěz T. a kol., 2008), (Lyčková B. a kol., 2009)

3.2 Zahuštění kalu

Hustota jak kalu odstraněného z odpadní vody (primárního), tak kalu z biologického stupně čištění (sekundárního) je ve většině případů nízká. Pro potřeby dalšího zpracování je třeba kal dále zahustit. Toto se ve většině případů řeší ještě před smísením kalu dohromady z důvodu rozdílných vlastností primárního a sekundárního kalu. Z technologického hlediska je vhodné mít sušinu kalu v rozmezí 4,5 – 6 %. Vyšší hustoty kalu lze dosáhnout, ale zvyšuje se náročnost na přepravu kalu pomocí čerpadel. Primární kal, pokud mají usazovací nádrže vysokou účinnost a obsah sušiny je nad 4,5 %, není třeba zahušťovat, jinak se používá ve většině případů gravitačních zahušťovačů. U aktivovaného kalu jsou gravitační zahušťovače vzhledem k jeho vlastnostem výrazně méně účinné, proto se používají mechanické způsoby zahuštění. (Vítěz T. a kol., 2008)

3.2.1 Gravitační zahušťovače

Jsou to kruhové nádrže se šikmým dnem, které je ve spádu směrem ke středu nádrže. Princip se podobá usazovací nádrži, rozdíl je v době zdržení a principu stíracího mostu. U zahušťovací nádrže je mechanismus mostu pod hladinou a nad stíráním kalu jsou upevněny prořezávací lamely, které slouží ke zlepšení usazení kalu. Zahušťovače jsou provozovány kontinuálně nebo semikontinuálně. Pokud je takto zahušťován biologický kal, používá se pro zvýšení účinnosti několik v sérii zapojených zahušťovačů. (Vítěz T. a kol., 2008)

3.2.2 Stojní zahuštění

Jako strojní zahušťovače se používá lisů a odstředivek. Lisy mohou být pásové, šnekové nebo bubnové. Pracují na principu vytlačení kalové vody přes síto. Odstředivky pracují na principu dvou shodně se otáčejících bubnů, kdy každý buben se otáčí při jiné rychlosti. U obou principů se přidává do kalu flokulant, který zvyšuje shlukovatelnost kalových částic do větších agregátů.

Speciálním typem je lyzační odstředivka, která pracuje na principu klasické odstředivky, ale je v ní zabudováno lyzační zařízení, které způsobuje mechanickou dezintegraci buněk, takže tato odstředivka působí i jako předúprava kalu. (Vítěz T. a kol., 2008), (Foladori P. a kol., 2010)

3.2.3 Tlakové flotace

Tento způsob pracuje na principu nasycení kalu tlakovým vzduchem a poté jeho vypuštění do nádrže při následném snížení tlaku. Tímto dojde navázání vzduchu na kalové částice a k flotaci kalu na hladinu, odkud je stírán do přilehlé jímky. Tímto způsobem se dosahuje efektivního zahuštění biologického kalu. (Vítěz T. a kol., 2008), (Ondeo Degremont, 2004)

3.3 Předúprava kalů

Předúpravou kalu se rozumí jeho zpracování nebo změna vlastností před samotnou stabilizací kalu. Pro předúpravu kalů existuje několik metod. Jedná se o mechanické, jako drcení nebo mletí, tepelné nebo chemické zpracování. U všech těchto metod předúpravy je hlavním cílem rozrušení buněčné stěny organické hmoty obsažené v kalu a rozrušení velkých kalových agregátů. Rozrušení kalových agregátů zvyšuje styčnou plochu kalových částic pro rozkladné mikroorganismy, rozrušení buněčných stěn zlepšuje degradační procesy, čímž dochází k lepší stabilizaci a vyšší produkci bioplynu.

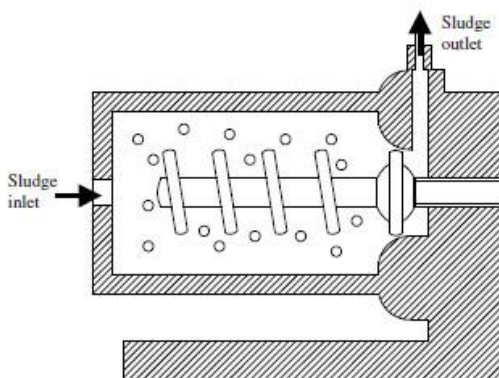
3.3.1 Mechanická předúprava

Tento způsob je jednou ze základních metod předúpravy kalu. Ať je to dodatečné zahuštění kalu, nebo mechanické drcení či mletí, které slouží k rozrušení kalových částic. Mezi tyto metody patří i ultrazvukové a tlakové předúpravy.

3.3.1.1 Mechanické mletí

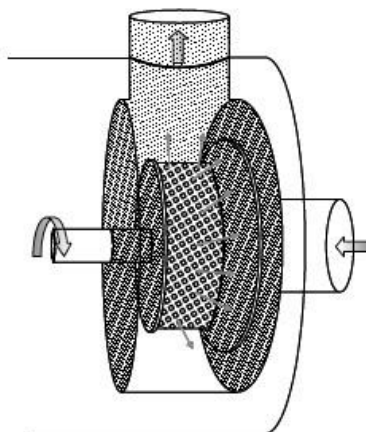
Tento způsob předúpravy je založen na mechanickém rozrušení a homogenizaci kalu. Některé mechanické typy zpracování kalu aplikují znalosti získané z oborů, ve kterých se zpracovávají tekutiny, které mají podobnou charakteristiku jako kal.

Předúprava metodou mletí pomocí kuliček je metoda, kdy kal prochází komorou, ve které jsou umístěny kuličky z odolného materiálu, které jsou v pohybu. Kal procházející přes tuto komoru je pomocí těchto kuliček mlet a homogenizován. Účinnost této metody závisí na kvalitě kuliček, délce komory, přes kterou prochází kal a rychlosti průtoku kalu přes komoru. (Foladori P. a kol., 2010)



Obrázek 3: Kulový mlýn
(Zdroj: Foladori P. a kol., 2010)

Další metoda je dezintegrace vloček kalu. Kal je do pracovní části přiveden přes rotor, prochází přes rotující čepele upevněné na rotoru a poté přes děrovaný stator ven. Tato metoda je převzatá z papírenského průmyslu, kde se používá na zpracování buničiny. (Foladori P. a kol., 2010)



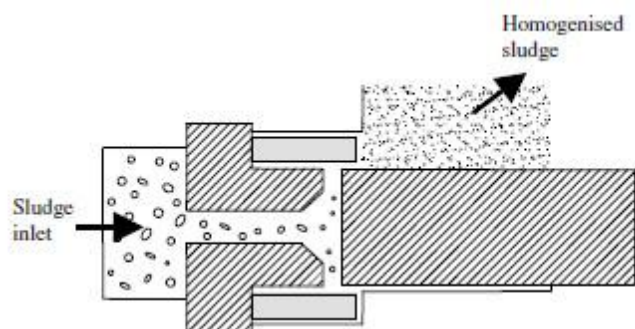
**Obrázek 4: Systém pro dezintegraci vloček kalu
(Zdroj: Foladori P. a kol., 2010)**

3.3.1.2 Ultrazvuková předúprava

Je to slibná metoda, která zlepšuje biologickou rozložitelnost kalu pomocí mechanického narušení struktur buňky a vločkové matrice. Ultrazvuk působí dvěma způsoby. Na nízkých frekvencích dochází pomocí vlivu tlakových vln a kavitace k uvedenému narušení struktur buňky, na vysokých frekvencích k chemickým reakcím v důsledku tvorby OH^* , HO_2^* , H^* . Díky tomu dochází ke změnám fyzických, biologických a chemických vlastností kalu. Výzkumy prokázaly, že ideální na předúpravu kalu jsou nízké frekvence kolem 20 kHz. Důležitou roli také hraje výkon ultrazvuku a doba expozice kalu. (Onyeche, T.I. a kol, 2002), (Foladori P. a kol., 2010), (Zhang H., 2010)

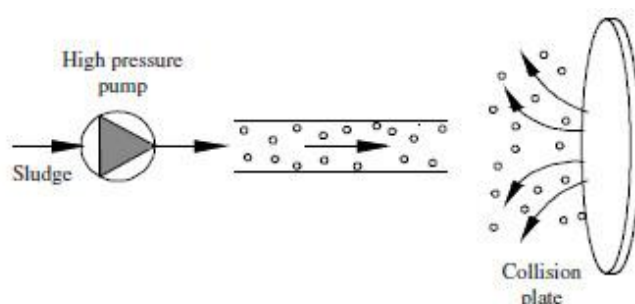
3.3.1.3 Tlaková předúprava

Je to jedna z dalších možností mechanické předúpravy. Tato metoda je převzatá z potravinářského, kosmetického a farmaceutického průmyslu, kde je běžně používána jako tlaková homogenizace. Tato metoda se nazývá vysokotlaková homogenizace, kdy je kal natlakován na vysoký tlak (30 – 90 MPa) a pak je přes homogenizační ventil podroben silné dekompresi. Kvalita předúpravy se liší v závislosti na aplikovaném tlaku, počtu přepážek, kterými kal přes homogenizační ventil prochází a teplotě kalu. (Foladori P. a kol., 2010), (Zhang H., 2010)



Obrázek 5: Homogenizační ventil
(Zdroj: Foladori P. a kol., 2010)

Další metodou je tlakový kolizní systém, kdy je kal stlačen na vyšší tlak (3 – 5 MPa) a poté je přes ventil vypuštěn při vysoké rychlosti a snížení tlaku proti překážce. Při tomto procesu dochází ke kavitaci, turbulenci a smykovému napětí a to vede k rozpadu buněk. (Foladori P. a kol., 2010), (Zhang H., 2010)



Obrázek 6: Kolizní tlakový systém
(Zdroj: Foladori P. a kol., 2010)

3.3.2 Tepelná předúprava

Tímto způsobem se rozumí přivedení tepla při nějaké době expozice. Teplota se pohybuje v rozmezí 60 – 270 °C, v praxi se jako ideální jevila teplota okolo 170 °C. Doba zdržení se pohybuje od několika minut po hodiny. Významnějším parametrem je teplota, doba zdržení má menší vliv. Pozorování ukazují, že v některých případech tepelné předúpravy lze kal s obsahem sušiny 12 % přepravovat jako kal s obsahem sušiny 5 – 6 %.

Tato metoda se aplikuje na směsný kal nebo jen na sekundární kal. Dle pozorování různých výzkumných týmů se výtěžnost metanu z kalu zvyšuje v průměru o 50 %.(Zhang H., 2010)

3.3.2.1 Mikrovlnná předúprava

Tento zajímavý způsob teplené předúpravy má v poslední době velkou pozornost. Mikrovlnný ohřev má na kal stejné účinky jako tepelná předúprava. Výhoda je rychlý ohřev a možnost okamžitého vypnutí. Použitá frekvence mikrovln u tepelného ohřevu se uvádí 2450 MHz, a to z důvodu zabránění rušení telekomunikací a mobilních telefonů. Důležitý je, stejně jako u konvenčního ohřevu, výkon mikrovlnného generátoru a doba zdržení. Dále byla tato metoda testována s chemickým přípravkem peroxidu vodíku (H_2O_2) nebo peroxidu vápna (CaO_2). (Carrère H. a kol., 2010), (Foladori P. a kol., 2010)

Tato metoda je slibná, zatím je však ve fázi laboratorních experimentů a nebyla ještě plně aplikována v praxi.

3.3.3 Chemická předúprava

Je to jedna z nákladnějších metod předúpravy kalů. V zásadě se tyto metody dají rozdělit na kyselé a zásadité hydrolýzy a oxidace. Hydrolýzy se většinou aplikují jako pomocná reakce u tepelné předúpravy.

Jednou z metod oxidace je oxidace pomocí ozonu. Při tomto procesu dochází k usmrcení mikroorganismů a biodegradaci organické hmoty. Ozon dokáže rozkládat i buňky, které jsou špatně rozložitelné anaerobními bakteriemi. Díky tomu dochází ke zvýšení vývinu bioplynu. Účinnost je přímo závislá na dávce ozonu. (Zhang H., 2010)

3.4 Stabilizace kalu

Při stabilizaci kalu dochází k odbourávání organické hmoty v kalu. Stabilizovaný kal nepodléhá dalším samovolným rozkladným procesům. Známe několik způsobů stabilizace kalu, je to aerobní anebo anaerobní stabilizace.

Aerobní stabilizace kalu se používá pro malé a střední čistírny, protože v těchto zařízeních nebývá separace primárního kalu a zpracovává se přebytečný kal z aktivačního procesu. Anaerobní stabilizace kalu se používá pro střední a velké čistírny odpadních vod, kde vzniká primární kal, pro který je tento způsob zpracování vhodnější. (Vítěz T. a kol., 2008)

3.4.1 Aerobní stabilizace kalu

Tento typ stabilizace kalu je vhodný pro malé čistírny odpadních vod. Princip této metody je udržení stabilizovaného kalu v oxickém prostředí. Kal je zpracováván v nádržích s aerací pomocí dmýchadel, které je vhodné navrhnout tak, aby vzduch sloužící k aeraci nádrže

ji zároveň i míchal a tím by odpadly náklady na mechanické míchání. Střední doba zdržení je 35 dní, využití je na čistírnách do 25 000 EO. (Vítěz T. a kol., 2008)

3.4.1.1 Aerobní termofilní stabilizace

Tato metoda využívá tepla vzniklého exotermním aerobním biologickým procesem. Aerace probíhá vzduchem, čistým kyslíkem nebo směsí vzduchu a čistého kyslíku. Při této metodě se využívá tepla, které vzniká biologickou oxidací organické hmoty v reaktoru. Stabilizovaný kal je touto reakcí zahříván do teploty 55 – 60 °C, při které se tento proces udržuje. Doba zdržení u tohoto procesu je 20 dní, kal je do nádrží dávkován v intervalech minimálně 20 hodin. Využití této metody je na čistírnách do 60 000 EO.

Dále je možné použít aerobní metody jako předúpravu před následnou anaerobní stabilizací kalu. Při využití těchto metod jako předúpravy, je doba zdržení kalu v nádržích několik hodin až maximálně 1 den. Touto předúpravou lze dosáhnout částečného snížení sušiny kalu a v následné mezofilní anaerobní fermentaci zvýšení produkce bioplynu o 3 – 7 %. Daleko významnější je však hygienizační efekt. (Vítěz T. a kol., 2008)

3.4.2 Anaerobní stabilizace kalu

Existují tři typy anaerobní stabilizace kalu rozdělené podle teploty. Je to psychofilní, mezofilní a termofilní. Současné době je nejpoužívanější technologie na velkých čistírnách odpadních vod anaerobní mezofilní a termofilní stabilizace kalu, při které dochází k produkci bioplynu.

Tato stabilizace je prováděná při teplotě 30 – 40 °C a době zdržení kalu 20 – 30 dní. Reaktor musí být promícháván, aby byl kal dostatečně homogenizován a snížilo se riziko pěnění a tvorba kalové krusty. Míchání lze provádět přítokem nového a odebíráním stabilizovaného kalu, cirkulací bioplynu, nebo mechanicky pomocí míchadel.

Pro anaerobní proces, ke kterému dochází při stabilizaci kalu, je důležitá rovnováha všech čtyř procesů probíhajících v reaktoru. První je hydrolýza rozpuštěných i nerozpuštěných látek jako jsou polysacharidy, lipidy, proteiny, poté následuje acidogeneze, po ní acetogeneze a nakonec dochází při methanogenezi k produkci metanu a oxidu uhličitého. Tato rovnováha je dosažena rovnoměrným zatížením reaktoru novým kalem, udržováním stabilní teploty a kvalitním mícháním.

Anaerobní termofilní stabilizace kalu se používá méně z důvodu potřeby vysoké teploty stabilizovaného kalu průměrně 55 °C. Výhodou tohoto procesu je kratší doba zdržení 15 – 18 dní, díky které je možné větší zatížení reaktoru při stejné velikosti reaktoru. Dále je

zde vyšší produkce bioplynu o přibližně 30 % a odstranění problému s produkcí pěny, vyšší snížení organické hmoty a zároveň při tomto typu stabilizace dochází i k hygienizaci kalu, to vše ve srovnání s mezofilní stabilizací. Přes všechny výhody, které tato metoda má, je její využití z důvodů vysoké energetické náročnosti při ohřevu kalu a udržení teploty reaktoru zvláště v našich klimatických podmínkách (zimní období) problematické a ekonomicky náročné.

V současné době u nově budovaných fermentačních nádrží dochází ke změně tvaru fermentační nádrže. Nádrž je nízká s plochým dnem oproti původním vysokým nádržím s kuželovým dnem. Také ohřívání fermentovaného kalu prochází změnou, už se nepoužívá strojovna fermentační nádrže, kde ohřev probíhá pomocí teplených výměníků, ale uvnitř nádrže je instalováno topné potrubí, plastové, ocelové nebo z nerezavějící oceli, tvořící šnek. Tento šnek může být situován na vnitřní stěně nebo na dně reaktoru. Takto ohříváný kal je homogenizován mícháním, které zajišťují míchadla, samotný přitékající kal, nebo lze využít kombinaci obou metod. Také lze použít míchání pomocí vyvíjeného bioplynu. Díky těmto konstrukcím už by neměl být takový problém dosahovat termofilní stabilizace kalu, která byla dříve málo používána kvůli její energetické náročnosti. (Vítěz T. a kol., 2008), (Lyčková B. a kol., 2009), (Kutil V., a kol., 2016)

3.4.3 Odvodnění a hygienizace

Dalším stupněm zpracování kalu je jeho odvodnění a hygienizace. K odvodnění kalu dochází pomocí dekantační odstředivky většinou za pomoci flokulantu, který zvyšuje schopnost shlukování částic kalu do větších celků. Další způsob odvodnění kalu je pomocí kalolisů. Ty pracují na principu mechanického vytlačení vody z kalu. Existují různé typy kalolisů, například síťové, komorové nebo pásové.

Další možností je odvodnění pomocí odvodňovacích lagun nebo polí, ale dnes je tento způsob kvůli legislativním požadavkům nepoužitelný.

Výsledný odvodněný kal by měl být pevný a kyprý, obsah sušiny se pohybuje kolem 18%. Odvodněný kal by se měl dále hygienizovat. K tomu nejčastěji dochází pomocí vápna nebo vápenného mléka.

Dalším způsobem odvodnění a hygienizace kalu je jeho sušení, kdy dochází k vysušení kalu na sušinu 90 %. Výsledkem je kalový prach, který se dá dále zpracovávat. (Vítěz T. a kol., 2008)

3.4.4 Nakládání s čistírenskými kaly

Statistika nakládání s čistírenskými kaly eviduje několik způsobů použití. Jsou to přímá aplikace a rekultivace, kompostování, spalování, skládkování a jinak.

3.4.4.1 Aplikace na zemědělskou půdu

Díky velkému zastoupení organických složek je jednou z možností nakládání skalem jeho aplikace na zemědělskou půdu. Tato aplikace se ovšem musí řídit zákonnými předpisy, které dříve upravovala vyhláška 382/2001 sb. o podmínkách aplikace kalu na zemědělskou půdu, která byla k prvnímu lednu 2017 nahrazena vyhláškou 437/2016 provádějící transpozici směrnice rady Evropy o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalu z čistíren odpadních vod v zemědělství 86/278/EHS.

Toto vyhláška nově zavádí lhůtu, do které je povinnost aplikovat kal na půdu od jeho výstupu ze zpracovatelské technologie. Pokud je tato lhůta překročena, zavádí povinnost mikrobiologického testování. Přidává povinnost nejen dbát na maximální hodnoty dusíku v kalu aplikovaného do půdy dle požadavku rostlin na živiny, ale i nutnost řídit se nařízením vlády o stanovení zranitelných oblastí a akčním programem 262/2012 Sb.

Dále přidává podmínku, pokud je kal aplikován na půdu a není do ní ihned zapraven, minimální vzdálenosti od povrchových vod, zdrojů pitné vody, léčivých vod a přírodních minerálních vod při zohlednění místní hydrologické situace. Stanovuje vzdálenost umístění kalu od obytné zástavby a další zpříšňující podmínky, které zakazují uložení kalu na meliorovaných půdách a trvale zamokřených půdách, povinnost zabezpečení kalu proti úniku tekutého podílu, maximální sklon svahu a v případě vícero kalu z různých čistíren odpadních vod povinnost jejich značení.

Vyhláška kromě specifikace odbornosti osoby a laboratoře upřesňuje při mikrobiologické analýze počet vzorků odebraných během jednoho dne, plnění vzorkovnice, teplotu uchovávání vzorku při přepravě a dobu, do které je třeba po odebrání provést analýzu vzorku.

Při zpracování programu na použití kalu nová vyhláška rozšiřuje tento program o popis technologie úpravy kalu včetně ověření účinnosti technologie, popis způsobu zabezpečení dočasného uložení a skladování upravených kalů před použitím na zemědělskou půdu a evidenční listy využití kalu zemědělství podle přílohy 1. této vyhlášky.

Zavádí požadavky na ověření účinnosti technologie úpravy kalu, kdy specifikuje, jakým způsobem se provádí ověření účinnosti kalu, jakým způsobem se vzorkuje, kolik

vzorků během jaké doby je nutno odebrat a stanovuje rozdíly v KTJ, které musí být na vstupu a výstupu, aby to bylo v souladu se stanovenými hodnotami této vyhlášky.

Při vzorkování půd dle nové vyhlášky přibýlo stanovení obsahu PCB (polychlorované bifenyly) a PAU (polycyklické aromatické uhlovodíky). U vzorků z kalu v položce PCB přibyl jeden kongener (příbuzná látka), a přibyla položka PAU (polycyklické aromatické uhlovodíky).

Je zřejmé, že trend aplikace kalu na zemědělskou půdu jde ve směru stálého zpřísňování mikrobiologických a chemických podmínek a tím se klade vyšší nárok na zpracovatelské technologie, které tento způsob odstranění kalu budou dále prodražovat a znesnadňovat.

(Lyčková B. a kol., 2009), (Vyhláška 347/2016 Sb.), (Zákon 185/2001 Sb.)

3.4.4.2 Kompostování

Další možností využití čistírenských kalů je jejich kompostování. Před samotným procesem kompostování je třeba promyslet vliv flokulantů dávkovaných při odvodňování stabilizovaného kalu a také brát v úvahu případnou hygienizaci kalu, hlavně hygienizaci vápnem. Tyto přísady mohou mít na mikrobiologický proces kompostování zásadní negativní vliv. Dále je třeba mít správný poměr kompostovaného substrátu, proto je třeba přimíchat do kalu další substrát typu piliny, kůra, papír, sláma a jiné. Při procesu kompostování dochází všeobecně ke snížení patogenních organismů, ale stejně je nutné, jako při přímé aplikaci kalů, dbát na mikrobiologický obsah patogenních organismů a přítomnost těžkých kovů ve výsledném substrátu.

Takto upravený substrát se dá využít na zemědělské půdě nebo jako rekultivační prvek při terénních úpravách a při uzavírání skládek.

Při tomto druhu využití čistírenských kalů je třeba se řídit zákonem č. 156/1998 Sb. o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech), který odkazuje i na výše uvedenou vyhlášku, zákonem o odpadech a zákonem o ochraně zemědělského půdního fondu. (Vítěz T. a kol., 2008), (Zákon 156/1998 Sb.)

3.4.5 Spalování

Spalování kalu se dělí na několik možností. Jsou to fluidní spalování, spalování v cementářské peci a spalování mokrého kalu. Zvláštním způsobem tepelné úpravy je poté pyrolýza.

3.4.5.1 Fluidní spalování

Toto spalování probíhá při vysokých teplotách na křemičitém loži a vyznačuje se vysokou účinností díky výbornému styku paliva s kyslíkem. Fluidní pec většinou tvoří keramické lože, nad kterým je uložena vrstva křemičitého písku, do kterého se přivádí vzduch a ten poté vytvoří nad roštem mrak, do kterého je rozprašován vysušený kal, který navíc musí mít vhodnou strukturu. Ke spalování dochází v celém objemu topeniště, spálené palivo poté jako popelové částice opouští proces spolu se spalinami.

3.4.5.2 Spalování v cementářské peci

Pro tento typ spalování je nutné, aby byl kal vysušen na vysokou hodnotu sušiny, přibližně 95 %. Poté je kal přidáván do paliva, maximálně je však nahrazeno 5 % paliva, a to z důvodu zachování vysoké kvality cementu. Výhodou při tomto spalování je, že díky vysokým teplotám v cementářské peci ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vysokým teplotám spalin (přibližně $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) a dostatečné době zdržení (přibližně 7s) dochází k rozpadu nebezpečných látek jako PCB, PCDD a PCDF. Těžké kovy jsou ve většině případů vázány v cementářském slínku, jiné tekavé těžké kovy, jako například rtuť, je třeba sledovat ve spalinách a zde je také odstraňovat. Obecně je tato možnost jedním z lepších způsobů nakládání s čistírenskými kaly, protože většina kalu je využita energeticky, nebezpečné prvky obsažené v kalu jsou vázány v nevyluhovatelých zbytcích, nebo odstraněny čištěním spalin a organické znečištění, popřípadě nějaké zbytky léčiv nebo nebezpečné hormonální látky, které může kal obsahovat, jsou destruovány vysokou teplotou. (Kutil J. a kol., 2005)

3.4.5.3 Pyrolýza

Metoda rozkladu materiálu při dané teplotě za nepřítomnosti vzduchu a za vzniku tří složek, kterými jsou pyrolýzní plyn, pyrolýzní olej a pevný zbytek, takzvaný biouhel.

U pyrolýzy čistírenských kalů se pracuje s částečně nebo úplně vysušeným kalem a rozlišujeme v podstatě dva procesy. Je to rychlá a pomalá pyrolýza. Rychlá pyrolýza pracuje při rychlém nárůstu teploty a dosahuje až $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, jejím výstupem je vyšší podíl pyrolytického oleje nižší podíl biouhlu a pyrolytického plynu. Při pomalé pyrolýze pracujeme

s nižší teplotou do 800 °C, nárůst teploty je pozvolný, vzniká méně pyrolytického plynu, méně pyrolytického oleje, ale větší množství biouhlu.

Důležitým produktem při zpracování čistírenského kalu je právě biouhel, je to z důvodu obsahu fosforu v čistírenských kalech. Fosfor, který je jedním z ukazatelů vyčištěné odpadní vody, je při odstraňování v procesech čistíren odpadních vod deponován právě v čistírenském kalu. Právě díky pyrolýzním procesům je možné znovu tento fosfor použít jako hnojivo. Díky porézní struktuře biouhlu a postupnému uvolňování fosforu je vhodný pro hnojení a zlepšování podmínek zemědělských půd. Jeho využití se zdá vyšší a efektivnější než standardní aplikace upraveného čistírenského kalu na zemědělskou půdu, nevýhodou může být vyšší energetická náročnost u tohoto typu zpracování. (Kos M., 2015), (Kos M., 2016)

3.4.6 Spalování mokrého kalu

Toto spalování lze rozdělit do několika způsobů. Je to standardní spalování s přimícháním nějakého paliva, dále to může být spalování oxidací, vysokotlaké spalování a spalování v nadkritické oblasti. Všechny tyto metody se orientují na zpracování surového nestabilizovaného kalu.

3.4.6.1 Mokrý spalování

Touto metodou se rozumí oxidace tekutého kalu pomocí vzduchu nebo kyslíku. Oxidační teplota je 200 – 300 °C a tlak je 50 – 60 kPa. Doba zdržení je 60 minut. Veškerý kal je mineralizován a 70 – 90 % organických látek je převedeno jako tekutina ve formě nižších mastných kyselin. Kapalina, která vzniká při tomto procesu je bohatá na dusík a amoniak a lze ji použít jako pomocný substrát pro denitrifikaci. (Dohányos M., 2006)

3.4.6.2 Vysokotlaké mokré spalování

Princip byl a vyvinutý a odzkoušený v srpnu 1994 v Nizozemí ve městě Apeldoorn. Používá se zkratka APO (aqueous phase oxidation). Tento speciální způsob spalování probíhá ve třech soustředných rourách, kdy kal, který musí mít kalové částice o velikosti maximálně 5mm, je čerpán s kyslíkem do středové roury, odkud je veden do prostřední, kde dochází k vlastnímu spalování. Vnější roura je určena ke chlazení. Při spalování dochází k exotermní reakci (stav, kdy se tepelná energie uvolňuje). Teplota u dna dosahuje 275 °C a díky vysokému tlaku u dna, který udržuje sloupec vodní páry při hodnotě 8,5 – 11 MPa, nedochází k varu reakční směsi. V kalu, který je zpracován tímto procesem, jsou veškeré organické látky oxidovány na oxid uhličitý a část je přeměněna na biologicky rozložitelné látky, především

mastné kyseliny. Vzniklý popel se separuje standardními technikami, není zde potřeba dalších chemických látek (fakulantů). Vznikající plyny se čistí katalytickou oxidací při teplotě 500 °C a tekutá fáze se čistí biologickými technikami.

Redukce při této metodě je až 80 % sušiny a 100 % odstranění organické složky. (Dohányos M., 2006)

3.4.6.3 Spalování v nadkritické oblasti

Rozumí se tím spalování čistírenského kalu při podmínkách, které charakterizují nadkritickou oblast pro vodu. Pro vodu je to teplota vyšší než 374 °C a tlak vyšší než 22 MPa. Při tomto stavu se voda stává tzv. superkritickou a zásadně se mění její vodíkové vazby. Tato vlastnost pomáhá při zplynování biomasy.

Pokusy provedlo švýcarsko-americké konsorcium výzkumníků, kteří zkoušeli spalování čistírenského kalu o obsahu sušiny 10 % při teplotě 500 – 600 °C a tlaku 25 MPa. Při těchto podmínkách dochází ke konverzi všech organických látek a většiny anorganických. (Dohányos M., 2006)

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Čistírna odpadních vod v Modřicích

Na čistírně odpadních vod v Modřicích se pro separaci a zpracování kalu používá všeobecně rozšířené technologie. Jediné, co tvoří výjimku, je sušení kalu v sušárně, kdy je stabilizovaný a odvodněný kal sušen při teplotě 110 °C a jako topné médium je používán minerální olej. Tato metoda zpracování kalu není v české republice moc rozšířená. V roce 2015 bylo kompletně rekonstruováno zahuštění primárního kalu a intenzifikováno zpracování biologického kalu. Výstupní produkt z kalové linky je tedy buď sušený kal, nebo vápněný kal.

4.1.1 Primární usazování

Kalová voda z mechanického čištění natéká do dvou rozdělovacích objektů. Oba jsou kruhového tvaru, díky kterému je kalová voda rovnoměrně distribuována do usazovacích nádrží. První objekt obsluhuje usazovací nádrže 1 až 4, druhý objekt nádrže 5 a 6. Každý rozdělovací objekt je osazen stavidly, aby bylo možné regulovat nátok do jednotlivých usazovacích nádrží.

Usazovací nádrže jsou kruhového tvaru s radiálním průtokem odpadní vody. Voda z rozdělovacích objektů je přiváděna do potrubí ve dně nádrže, potom stoupá středem, kde je kruhovou tryskou rovnoměrně rozdělována do nádrže. Po usazení kal klouže pomocí shrabovacího zařízení po dně, které je ve tvaru kónusu ke středu, odkud je v pravidelných intervalech odváděn/čerpán/odtahován do jímky primárního kalu. Odtah je prováděn v intervalech, které jsou spočítány tak, aby nedocházelo ke zbytečné akumulaci kalu v usazovací nádrži a k jeho fermentaci, při které vzniká značný zápach. Shrabovací zařízení je umístěno na mostě, který je upevněn na axiálním ložisku na středovém sloupu uprostřed nádrže. Most je poháněn elektromotorem s převodovkou, umístěným na konci mostu a nádrž objíždí po kruhové dráze na obvodové zdi. Na mostním zařízení je také připevněn shrabovák pěny, který stírá plovoucí pěnu z hladiny nádrže do externí jímky, odkud je čerpána a odvážena sacími vozy.

Nádrže 1 až 4 mají průměr 36 m, hloubku 4,22 m, plocha nádrže je 1017,88 m². Nádrže 5 a 6 jsou stejně hluboké, mají menší průměr 35 m a plocha nádrže je 962,11 m².

V bezdeštném období jsou v provozu čtyři nádrže, při dešťové události a předpokladu vysokého nátoků na čistírnu jsou do provozu uvedeny další dvě nádrže. Odsud je kal v pravidelných intervalech odtahován od jímky surového kalu o objemu přibližně 85 m³. Ta je

umístěna v podzemí čerpací stanice surového kalu. Odsud je kal kontinuálně čerpán do nového zahuštění, které bylo uvedeno do provozu na konci roku 2015.

4.1.2 Nové zahuštění

Kal z jímky čerpací stanice surového kalu je čerpán do dvou zahušťovacích nádrží, které mají objem $2 \times 201,06 \text{ m}^3$, kde dochází k jeho zahuštění, na koncentraci které je dle projektu $60 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Ze zahušťovacích nádrží je kal čerpán vřetenovými čerpadly přes kalová síta do jímek v suterénu objektu. Jímky jsou stále míchány ponornými míchadly a mají objem $32,8 \text{ m}^3$ každá. Z jímek je kal čerpán soustavou vřetenových čerpadel s řezacím ústrojím do směsné jímky, která vznikla z původní zahušťovací nádrže. V této jímce je kal smíchán se sekundárním kalem z flotační jednotky a čerpán do anaerobních reaktorů. Nové zahuštění má dvě linky, značené A a B, které se dají díky nachystanému potrubí a soustavě ventilů provozovat v jakékoli kombinaci, což zajišťuje vysokou flexibilitu tohoto zařízení i při případných poruchách. V současnosti je při bezdešti v provozu jen jedna linka, za deště se uvádí do provozu i druhá linka. Při současném provozu obou linek probíhá střídání po jedné hodině, kdy jedna linka je plněná a druhá je odtahovaná. Na zahuštění je umístěno několik měření kontrolujících celou linku. Ke standardnímu měření průtoku kalu, frekvence kalových čerpadel (důležité na vyhodnocení výkonu a opotřebení čerpadla) je nově přidáno i měření rozhraní kal/voda, díky kterému je monitorována velikost kalového polštáře v nádržích.



Obrázek 7: Mechanické mletí zahuštěného kalu
(Zdroj: Autor, 2017)

4.1.3 Zpracování biologického kalu

Na čistírně odpadních vod je biologický kal z aktivačních nádrží zpracováván dvěma způsoby. První možnost je původní zpracování pomocí flotace s rozpuštěným vzduchem. Tento způsob odděluje biologický kal od kapaliny pomocí vstřikování tlakového vzduchu o tlaku 500 kPa (5 barů). Kalová voda z biologie je přivedena do vyrovnávací nádrže o objemu 60 m³, odkud je čerpána do saturační jednotky. Čerpání zajišťují 3 čerpadla o jednotlivém výkonu 150 m³·h⁻¹, pokud čerpají dvě čerpadla, je výkon snížen na 260 m³·h⁻¹ a je možné ho regulovat pomocí ventilů na potrubí. Toto snížení je způsobeno tlakovým poklesem v potrubí. V saturační jednotce dochází k vstřikování tlakového vzduchu o tlaku 500 kPa. Ze saturační jednotky je tlaková kalová voda přivedena do flotační jednotky, kde dochází k její rychlé expanzi na atmosférický tlak. Díky rychlé expanzi tlakové vody dojde k vytvoření jemných vzduchových bublinek. Na těchto vzduchových bublinách dojde k navázání kalových částic, které poté vystoupají k hladině, kde dojde k jejich setření stěrkou do dvou přilehlých jímek. Z jedné jímký je kal gravitačně a z druhé čerpadly odváděn do směsné jímký, kde dochází ke smíchání s primárním kalem ze zahuštění. Množství zpracovávaného kalu je podle návrhových parametrů 160 m³ za hodinu.

Druhá možnost zpracování biologického kalu je pomocí odstředivky Andritz, která byla uvedena do provozu po posílení kalové linky v roce 2015. Do této odstředivky je kal čerpán pomocí kalových čerpadel z vyrovnávací nádrže pro flotaci, poté se smíchá s roztokem flokulantu, který způsobí lepší odvodnění biologického kalu. Zařízení je standardní dekantační odstředivka a pracuje na principu odstředivé síly a relativní rychlosti mezi šnekem a nádobou, upravené na vlastnosti biologického kalu. Nastavení relativní rychlosti má vliv na výslednou sušinu odvodněného kalu a díky tomu je třeba dbát na správné nastavení, aby výsledná sušina odpovídala potřebám technologie.

Flotace i odstředivka mohou pracovat každá samostatně, nebo mohou být použity souběžně. Kal z obou zařízení je čerpán do jímký biologického kalu, která vznikla z původní směsné jímký, ve které je umístěno míchadlo zajišťující jednak homogenizaci a také zabraňující usazování kalu na dně jímký. Kal je z této jímký čerpán čerpadlem do nové směsné jímký, kde dochází k jeho promíchání z primárním kalem.

4.1.4 Směsná jímka

Směsná jímka, která vznikla z původního zahuštění, zvýšila flexibilitu kalové linky. Původní směsná jímka měla objem 35 m³, nová má objem přibližně 700 m³. Tato jímka má nainstalováno měření výšky hladiny, které také řídí čerpadla čerpající kal do této jímký.

Nastavení je takové, že prioritu má čerpání zahuštěného primárního kalu, takže když dojde k překročení první provozní hladiny, zastaví se čerpání biologického kalu. Pokud je překročena druhá provozní hladina, odstaví se čerpání veškerého kalu do směsné jímky. Obnovení čerpání nastane po poklesu hladiny pod stanovenou úroveň.

4.1.5 Stabilizace kalu v anaerobních fermentorech

Stabilizace kalu probíhá ve čtyřech anaerobních fermentorech, každý o objemu 3740 m³. Kal, který je nepřetržitě čerpán ze směsné jímky do anaerobních fermentorů, prochází přes soustavu tří výměníků, kde je jeho teplota zvyšována již stabilizovaným kalem odtékajícím z přeřadových kolon. Ideální hustota přitékajícího kalu je 55 g·l⁻¹, pokud hodnota překročí 60 g·l⁻¹ dochází ke zvýšení tlaku ve výměnících a je proto nutné odstavit výměníky a plnit anaerobní fermentory přímo. Soustava čtyř fermentorů pracuje ve dvojicích, kdy u jedné dvojice probíhá plnění jednoho fermentoru a míchání druhého a u druhého páru je jeden fermentor ohříván přes výměník kal-voda, a druhý je míchán. Zároveň u plněného fermentoru dochází k přeřadání stabilizovaného kalu do kolony, odkud je přes výměníky (pokud jsou v provozu) čerpán do uskladňovací nádrže. Celý interval střídání má cyklus čtyři hodiny, kdy v průběhu cyklu je každá nádrž hodinu plněna, hodinu ohřívána přes výměník kal-voda a dvě hodiny míchána. Projektovaná doba zdržení kalu v anaerobních fermentorech je dvacet dní. Střední objem načerpaného kalu je 800 m³ za den.

4.1.6 Uskladňovací nádrže

Tyto nádrže o objemu přibližně 3740 m³ slouží k vyrovnání cyklů fermentačních nádrží tak, aby následující technologie pro zpracování kalu mohly pracovat kontinuálně. Stabilizovaný kal čerpáný z fermentorů je zde uskladněn na nezbytně dlouhou dobu a pak je čerpán dále na odvodnění kalu. Uskladňovací nádrže jsou dvě. Každá je vybavena párem malých elektrických míchadel umístěných u dna nádrže, které slouží k zabránění vzniku usazenin u dna nádrže. Obě nádrže jsou napojeny na plynové hospodářství, ale protože kal vstupující do těchto nádrží by už neměl být aktivní, a protože tento kal také prošel systémem tepelných výměníků, kde bylo použito jeho teploty k ohřátí kalu vstupujícího do fermentačního procesu, a také vzhledem k faktu, že kal je zde uskladněn jen v řádech jednotek dní, vývin bioplynu je zde zanedbatelný.

V současnosti je jedna nádrž provozována kontinuálně a druhá je vyprázdněná z důvodu rezervy pro případy technického problému na kalové lince.

4.1.7 Odvodnění kalu

Na odvodnění kalu je na čistírně odpadních vod použito odstředivek od firmy Guinard. Odvodnění probíhá pomocí odstředivé síly a relativní rychlosti mezi šnekem a nádobou. Nastavení relativní rychlosti je důležité, protože určuje jak výsledný poměr sušiny, tak opotřebení odstředivky. Pro dosažení lepší odvodnitelnosti je do kalu dávkován polymer. Polymer je míchán v jednotce na přípravu polymeru, kde je naředěn pitnou vodou na hodnotu $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, a poté vstříkován pomocí čerpadel do vstupu do odstředivky.

Odstředivky jsou dvě, jedna je v provozu, druhá je záložní. Jsou navrženy na nepřetržitý provoz, objem kalu 749 m^3 za den, sušinu v kalu 24% a objem odvodněného kalu 109 m^3 za den.

Z odstředivek je kal dopravován pomocí soustavy šnekových dopravníků buď na hygienizaci vápnem, nebo do sušárny kalu.

4.1.8 Hygienizace

Hygienizace kalu na čistírně v Modřicích probíhá dvěma způsoby. První z nich je vápnicí linka, kdy je kal pomocí soustavy tří šnekových dopravníků dopravován do kontejnerů. Na konci druhého dopravníku je přívod práškového nehašeného vápna. Tuto směs třetí dopravník homogenizuje a dopraví do přistaveného kontejneru.

4.1.9 Sušení kalu

Výhoda sušení kalu je jednak ve velké redukci objemu likvidovaného kalu, za druhé při sušení dochází zároveň k pasterizaci a hygienizaci kalu.

Na čistírně odpadních vod v Modřicích probíhá sušení kalu pomocí lopatkové sušičky NARA. Tato sušárna se skládá z opláštěného žlabu, ve kterém jsou vedeny dvě duté hřídele, které zajišťují promíchání kalu. Teplo pro sušení kalu je přenášeno minerálním olejem a protéká dutým pláštěm, hřídelemi a lopatkami. Výhoda takovéto sušárny je, že kal nepřichází do kontaktu se sušícím médiem. Lopatková hřídel zajišťuje dobré promísení kalu a vysoký poměr přenosu tepla. Termální olej byl vybrán místo páry z důvodu omezenosti materiálů v případě použití páry jako teplonosného média a vyšší jednoduchosti instalace včetně regulační smyčky.

Kal do sušárny je přiváděn pomocí šnekového dopravníku do přechodného zásobníku kalu. Odsud je kal čerpán do sušičky kalu, kde se gravitačně posouvá ke konci. Lopatky na hřídeli slouží pouze k přenosu tepla a promísení směsi. V sušárně kalu dochází ke zdržení

kalu (více než 3 hodiny), takže dochází k výše uvedené hygienizaci a pasteraci kalu. Vysušený kal je ze sušárny kalu dopravován pomocí chladících šneků, kdy první šnek zchladí kal ze 110 °C na cca 50 °C a druhý dopravník zchladí kal na 30 °C. Důležité je, aby teplota kalu byla menší než 40 °C. Dále je pak vysušený kal dopravován pomocí korečkového dopravníku do dvou kontejnerů, které jsou vně budovy. Po zkušenosti s vyšší prašností při přepravě kalu do kontejneru a výměně kontejneru byla na konec dopravních cest instalována technologie snižující prašnost a zároveň zvyšující rovnoměrné rozvrstvení kalu v kontejneru.

Při sušení kalu v tělese sušárny vznikají vodní páry, které jsou odtahovány z tělesa sušárny a chlazeny pomocí pračky par. Pomocí pračky jsou z páry odstraňovány i prachové částice, které se do par dostali. Pračka par také splňuje funkci na dodržení emisních limitů.

Tepelným médiem je v této sušárně kalu minerální olej. Tento olej je předehříván ze spalin kogeneračních jednotek, ale protože tato energie nestačí k ohřátí na požadovanou teplotu (pokrývá asi 1/8 potřeby), je olej dohříván na požadovanou teplotu spalováním zemního plynu. Požadovaná teplota oleje pro sušení je přibližně 220 °C.

Další důležitou hodnotou sledovanou v tělese sušárny je obsah kyslíku. A to z důvodu nebezpečí jak hoření tak výbuchu. Tato hodnota musí být menší než 8 %. Proto je do tělesa sušárny připojen systém automatické injektáže dusíku pomocí připojených lahví.

4.2 Materiál a metodika

4.2.1 Zdroje dat

Pro potřeby zhodnocení kalové linky jsem si k porovnání zvolil několik měřících míst instalovaných v kalové lince, dále jsem použil rozbory vzorků kalů pravidelně odebíraných z kalové linky.

4.2.2 Měřící místa

Seznam použitých měřících míst:

- Měření množství přečerpaného kalu ze zahušťovací nádrže do směsné jímky kalu. Toto měření je instalováno na potrubí vedoucím ze strojovny zahuštění do směsné jímky. K měření je použit indukční průtokoměr firmy Endress Hauser.
- Měření množství čerpaného kalu ze směsné jímky do fermentačních nádrží. K tomuto měření je použit taktéž indukční průtokoměr od firmy Endress Hauser.
- Měření množství stabilizovaného kalu z fermentačních nádrží do uskladňovacích nádrží. Také měření pomocí průtokoměru Endress Hauser.

Průtokoměry pro měření průtoku kalu od firmy Endress Hauser jsou typu Proline Promag 50L a Proline Promag 55S. Tyto průtokoměry mají měřicí rozsah $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} - 162\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a chybu měření je $\pm 5 \%$ (Promag 50L) a $0,06 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} - 600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ s chybou měření také $\pm 5 \%$ (Promag 55S). Měřicí zařízení je osazeno zobrazovací jednotkou, data z měření jsou online znamenávána v databázi zobrazovacího systému SCADA. Měřidla nejsou stanovená ve smyslu zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ale i tak podléhají pravidelným kontrolám a kalibracím dle interního metrologického předpisu.

Indukční průtokoměry pracují na principu Faradayova zákona o elektromagnetické indukcii. Na měřené potrubí se umístí elektromagnety, které vytváří konstantní magnetické pole. Kolmo na toto magnetické pole se umístí elektrody, které jsou připojeny k přístroji měřícímu elektrické napětí. Při průtoku kapaliny tímto magnetickým polem se v kapalině vytvoří nabitě částice, které jsou nabitě pozitivně nebo negativně a jsou odpuzovány k opačným stěnám potrubí. Tyto částice vyvářejí měřitelné napětí, které je snímáno elektrodami. Pro zvýšení přesnosti měření se polarita magnetů střídá a tím dochází k eliminaci vlivu externích elektromagnetických polí nebo elektrochemických vlivů kapaliny.

Měření vyprodukovaného bioplynu je zajištěno ultrazvukovým průtokoměrem Proline Prosonic Flow B200, také od firmy Endress Hauser. Průtokoměr měří objemový průtok vyprodukovaného bioplynu a také procentuelní obsah metanu v tomto bioplynu. Měřidlo má interní paměť a je plánováno jeho zapojení do řídicího systému čistírny. Toto měřidlo není stanovené a slouží jako orientační zjištění množství vyprodukovaného bioplynu. Podléhá však také kontrole a kalibraci dle interního metrologického předpisu.



Obrázek 8: Měření průtoku primárního kalu
(Zdroj Autor, 2017)

4.2.3 Vzorky kalů

Vzorky kalů jsou odebírány z několika míst kalové linky. Primární kal se odebírá z potrubí, které prochází přes strojovnu fermentačních nádrží do zahuštění. Na potrubí je navařený náustek s kohoutem umožňujícím odběr čerpaného primárního kalu.

Zahuštěný kal se odebírá z potrubí za čerpadly, které čerpají kal ze zahuštění do směsné jímky, zde je také navařený náustek s kulovým ventilem pro odběr zahuštěného kalu. Biologický kal, zahušťovaný pomocí flotace, je odebírán z potrubí, kterým se čerpá kal ze jímek přepadu flotace do jímky biologického kalu. Odběr opět probíhá pomocí navařeného náustku s kulovým ventilem ve strojovně flotace.

Vzorky směsného kalu se odebírají z potrubí za čerpadly, která čerpají kal ze směsné jímky do systému tepelných výměníků. Odběrné místo je ve strojovně flotace pomocí náustku s kulovým ventilem.

Stabilizovaný kal je odebírán bočním vývodem z potrubí, které přivádí kal do odstředivky. Toto potrubí je svedeno do přízemí sušárny kalu, kde je zakončeno kulovým ventilem na odběr vzorku.

Odběr vzorků probíhá ve stanovených intervalech, které jsou pro primární kal 1x denně každý pracovní den, zahuštěný kal 1x týdně, flotovaný kal 1x týdně, výstup kalu ze směsné jímky 2x týdně a stabilizovaný kal 3x týdně.

Všechny uvedené vzorky, s výjimkou stabilizovaného kalu, se odebírají jako směsný vzorek. Primární kal je odbírán automatickým odběrákem každou hodinu, směsný vzorek je za 24 hodin. Zahuštěný, flotovaný a směsný kal je také směsný vzorek, pouze frekvence odběru je jednou za dvě hodiny. Stabilizovaný kal je odbírán jako vzorek prostý.



Obrázek 9: Vzorkovací místo směsného kalu
(Zdroj Autor, 2017)



Obrázek 10: Vzorkovací místo primárního kalu
(Zdroj Autor, 2017)

Pro všechny odběry kalu platí postup vypracovaný a schválený akreditací. Vzorek se odebírá do plastové vzorkovnice o objemu 0,5 dm³. Přeprava vzorků probíhá v chladicím boxu při teplotě 2 – 6 °C. Pokud je u vzorku kalu požadováno měření teploty, je měřena na místě stanoveným měřidlem.

Vzorky jsou podrobeny rozborům v laboratoři, která je situovaná v areálu čistírny. Tato laboratoř, včetně pracovní skupiny pro odběr vzorků, je akreditována podle ČSN EN ISO 7025 z roku 2010 českým institutem pro akreditaci. Z tohoto důvodu interpretují výsledky rozborů zpracovaných v této laboratoři.



- 1 - Měření průtoku na vstupu do fermentorů, měření průtoku na vstupu do fermentorů, odběr vzorků primárního kalu
- 2 - Odběr vzorků sekundárního kalu, odběr vzorků směsného kalu
- 3 - Měření průtoku zahuštěného primárního kalu, odběr vzorků zahuštěného primárního kalu
- 4 - Odběr vzorků stabilizovaného kalu

**Obrázek 11: ČOV Modřice ČOV Modřice
(Zdroj ČÚZK a Autor, 2017)**

4.2.4 Stručná charakteristika rozborů kalu:

VL - stanovení veškerých látek

Stanovení probíhá na známém homogenním množství vzorku v porcelánovém kelímku a jeho vysušení při teplotě (105 ± 5) °C do konstantní hmotnosti a zváží se.

VLZZ - stanovení veškerých látek ztrátou žiháním

Stanovení probíhá po stanovení VL, sušina se vyžihá při teplotě (550 ± 10) °C do konstantní hmotnosti a zváží se. Ztráta se zjistí výpočtem.

Obsah těžkých kovů

Vzorek kalu se homogenizuje pomocí ultrazvuku a poté se rozpustí ve směsi silných oxidujících kyselin. Samotný rozbor se poté provádí při tepelném rozkladu vzorku v mikrovlnné peci pomocí atomového emisního spektrofotometru.

4.3 Vyhodnocení dat

4.3.1 Primární kal

Na primárním kalu se provádí několik rozborů. Všechny tyto rozborů jsou orientační a slouží pro nastavování parametrů kalové linky. Z důvodu připravenosti jsou u primárního kalu dělány i rozborů těžkých kovů. V případě překročení limitů těžkých kovů dochází ke změně vzorkování na výstupu kalové linky. Vzorky jsou odebírány denně, a jsou podrobeny rozborům na těžké kovy. V případě zjištění zvýšeného/nadlimitního obsahu těžkých kovů v odebraném vzorku kalu bude na tento kal pohlíženo jako na nebezpečný odpad.

V tabulce jsou minimální a maximální hodnoty těžkých kovů a jejich průměr.

Tabulka 3: Minimální, maximální a průměrné hodnoty těžkých kovů v primárním kalu (2015)

2015	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Mo
	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹
Min	0,93	0,15	14,6	84,3	0,72	10,8	6,18	422	0,29
Max	4,41	1,11	83,6	214	2,47	49	55,1	945	4,33
Průměr	2,23	0,66	38,78	127,48	1,46	23,42	18,23	608,61	2,18

Tabulka 4: Minimální, maximální a průměrné hodnoty těžkých kovů v primárním kalu (2016)

2016	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Mo
	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹
Min	0,40	0,07	17,70	67,30	0,43	9,37	4,85	403,00	1,06
Max	3,70	1,25	74,90	183,00	5,15	45,60	54,30	612,13	5,92
Průměr	0,90	0,60	35,32	129,82	1,44	22,94	16,60	1120,00	3,21

Z výsledků vyplývá, že primární kal nemá vysoké hodnoty těžkých kovů a nebezpečných látek. Toto bude způsobeno charakterem kanalizační sítě, protože z města Brna prakticky až na lokální výjimky vymizel těžký průmysl. Průměrná koncentrace naměřených prvků je nízká i ve srovnání s vyhláškou o aplikaci kalu na zemědělskou půdu a lze předpokládat, že koncentrace ve stabilizovaném kalu se nebudou zvyšovat.

Vzhledem k charakteru kalové linky a faktu, že většinu produkce kalu na ČOV odebírá ve formě sušeného kalu cementárna, se u výsledného produktu bude hodnotit koncentrace tekavých těžkých kovů (Rtuť 3,5 mg·kg⁻¹, Thalium 4 mg·kg⁻¹ a Kadmium 4 mg·kg⁻¹) a suma těžkých kovů (Antimon, Olovo, Arzen, Chrom, Kobalt, Měď, Mangan, Nikl, Vanad), která nesmí přesáhnout hodnotu 1200 mg·kg⁻¹.

Kromě těžkých kovů se v primárním kalu určuje také obsah písku. Podle provedených rozborů se obsah písku stabilně pohybuje kolem 10 %_{hm} (Tab 5).

Tabulka 5: Obsah písku v primárním kalu

Obsah písku	2015	2016
	%	%
Min	9,8	9
Max	28,2	25,2
Průměr	13,8	14,3

4.3.2 Srovnání organických látek v kalu

Dalším rozbohem prováděným na primárním kalu je množství organického materiálu, které se v laboratoři stanovuje jako veškeré látky ztráta žiháním (VLZŽ). V tabulce srovnávám kvalitu primárního kalu, sekundárního kalu a směsného kalu právě z hlediska VLZŽ, abych zjistil, zda nedochází k větším odchylkám organického podílu v průběhu sledovaných let. Detailnější rozbor organických látek se neprovádí, ale lze předpokládat, že jejich zastoupení v kalu bude stejné a bude odpovídat charakteru napojené kanalizační sítě.

Tabulka 6: Podíl organické složky v kalu na ČOV (2015)

2015	Primární kal	Sekundární kal	Zahuštěný kal	Směsný kal
	%	%	%	%
Min	54,1	61,3	61,5	58,2
Max	75,6	72,6	86	78,4
Průměr	70,0	67,7	73,9	71,4

Tabulka 7: Podíl organické složky v kalu na ČOV (2016)

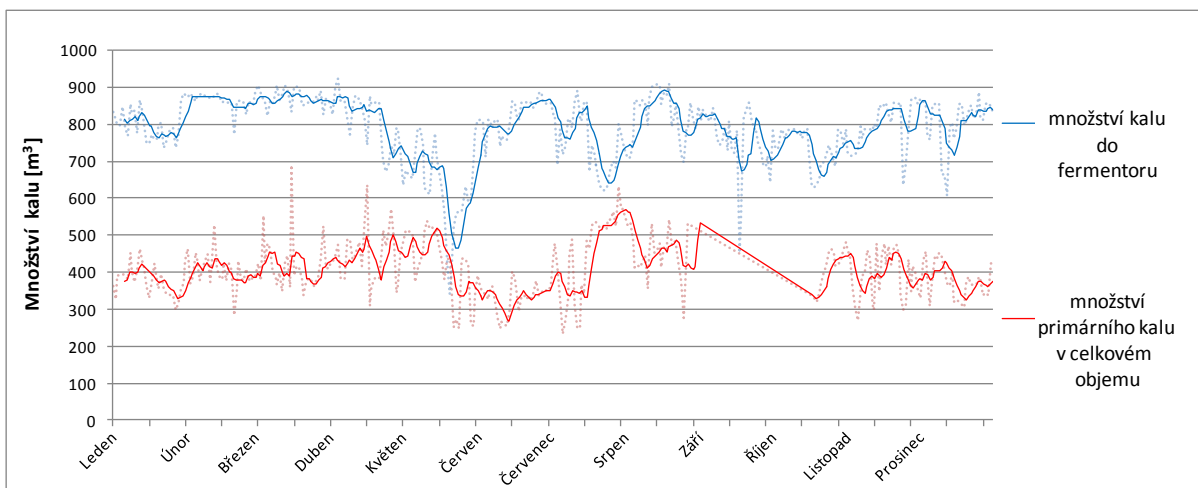
2016	Primární kal	Sekundární kal	Zahuštěný kal	Směsný kal
	%	%	%	%
Min	49,1	61,7	45,5	36,1
Max	76,9	75,2	81,3	81,8
Průměr	68,6	67,7	73,8	70,8

Podle srovnání je zřejmé, že minimální, maximální a průměrné hodnoty se v průběhu sledovaných dvou let neměnily. Proto lze předpokládat, že vliv na fermentační proces a produkci bioplynu z pohledu zastoupení organické složky v kalu bude stejný.

4.3.3 Rok 2015

Po zjištění, že organický podíl v primárním a sekundárním kalu je v průběhu sledované doby stejný, jsem srovnal další faktory ovlivňující stabilizaci kalu a produkci bioplynu. Provedl jsem srovnání celkového množství směsného kalu a množství primárního kalu čerpaného do fermentorů (Graf 1).

Množství kalu čerpaného do fermentorů jsem zjistil na základě měření instalovaného na potrubí vedoucím ze směsné jímky do fermentorů. V grafu jsou zobrazeny denní sumy množství směsného kalu. Sumu denního množství primárního kalu jsem získal z měření instalovaném na potrubí vedoucím ze zahuštění do jímky směsného kalu.



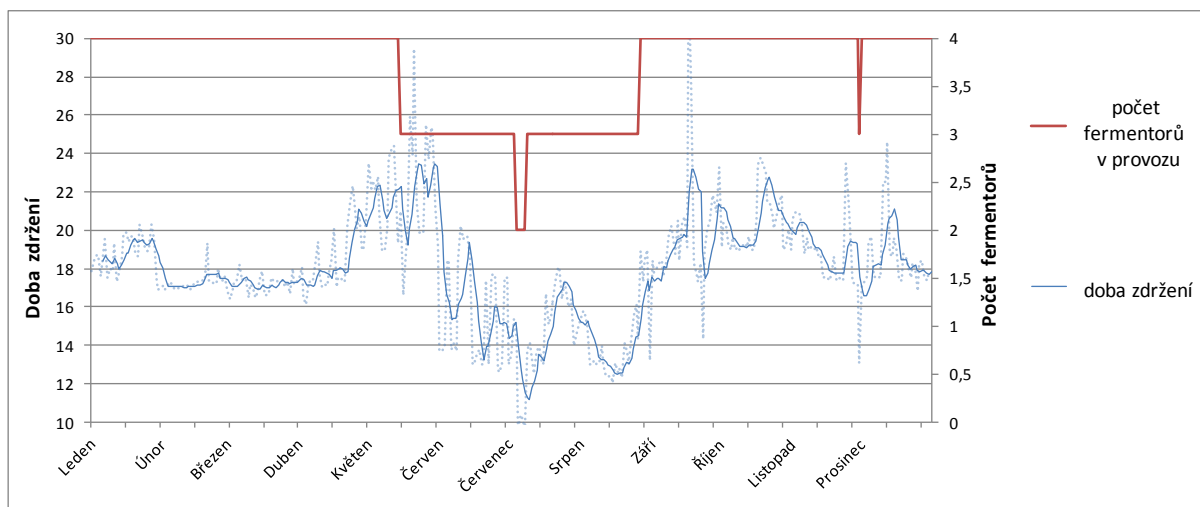
Graf 1: Denní množství kalu čerpaného do fermentorů (2015)

Na grafu je vidět, že množství kalu natékající do fermentorů, je po většinu roku stejné. Průměrná hodnota denního nátoky se pohybuje v rozmezí 800 – 850 m³. Odchylky mimo průměr jsou ve většině případů způsobeny výpadky ve zpracování biologického kalu. Tyto výpadky mohou být provozního charakteru (např. poruchy, plánované servisní zásahy), nebo technologického (např. nucené odstavení zpracování z důvodu nízké koncentrace sekundárního kalu v aktivačním procesu).

Větší obsah primárního kalu ve směsném kalu je přímo ovlivněn jednotnou kanalizační sítí napojenou na ČOV. Z grafu je patrné, že odchylky v objemu primárního kalu se objevují po celý rok. Z toho je patrné, že množství primárního kalu je ovlivněno dešťovými událostmi a táním sněhu.

Výpadek měření množství čerpaného zahuštěného primárního kalu do směsné jímky v měsících září a říjen byl způsoben uváděním do provozu nového zahuštění, a proto nejsou k dispozici data pro výpočet.

Dále jsem srovnal doby zdržení kalu ve fermentorech a počet fermentorů, které byly v chodu (Graf 2).



Graf 2: Srovnání doby zdržení a počtu fermentorů v provozu (2015)

Z tohoto grafu je patrné, že v okamžiku, kdy denní množství čerpaného kalu přesáhne hodnotu 800 m^3 , začíná se snižovat doba zdržení kalu ve fermentorech.

V období měsíců června až srpna byly v provozu jen tři fermentory, a to z důvodu pravidelné roční kontroly a revize stropu, stěn a výstroje fermentoru. Další fermentor byl odstaven pouze na několik dnů, a to z důvodu technické závady.

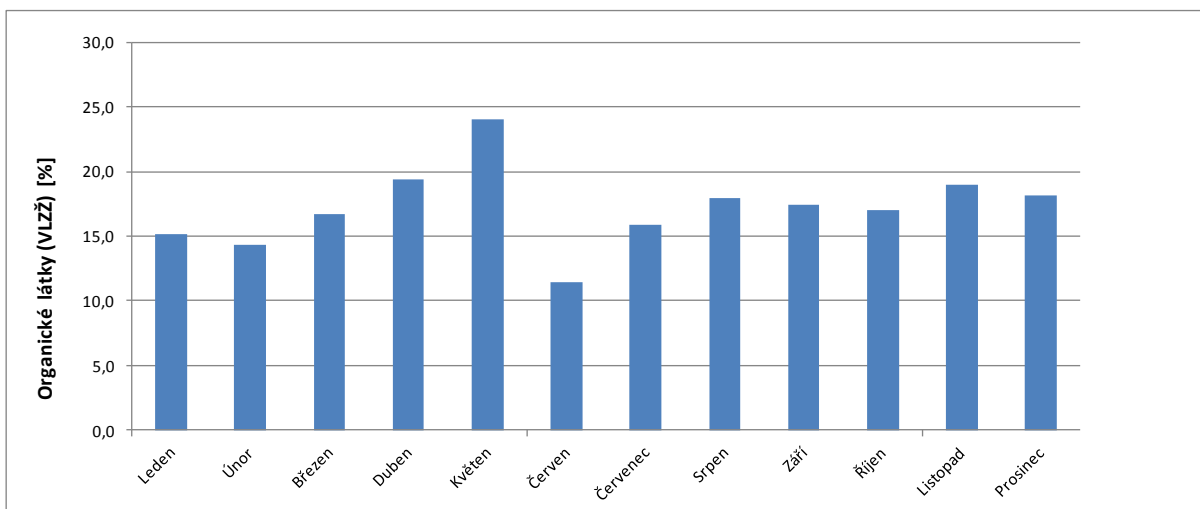
Doba zdržení je získána prostým výpočtem, kdy se podělí celkový objem fermentorů objemem kalu načerpaným do fermentačního procesu.

Je patrné, že počet fermentorů má přímý dopad na dobu zdržení ve fermentorech. Z grafů je znát, že pokles doby zdržení několik dní po odstavení fermentoru, je z důvodu menšího objemu denního množství čerpaného směsného kalu.

Dalším ukazatelem, který jsem použil, je množství odbourané organické hmoty zjištěné v laboratoři jako obsah VLZŽ (Graf 3).

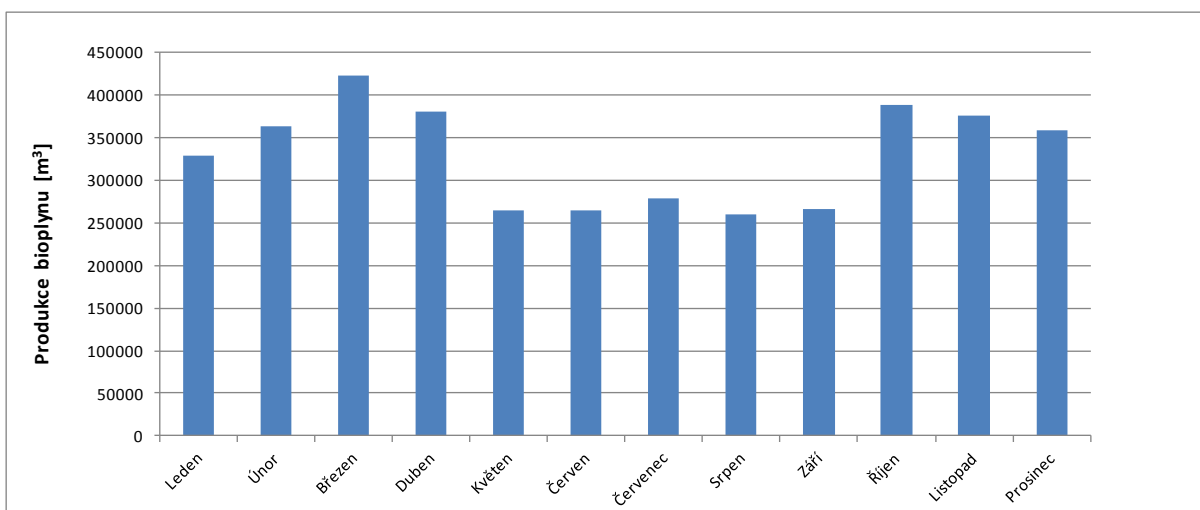
Srovnání tohoto ukazatele jsem provedl pomocí výpočtu měsíčních průměrů rozborů kalu, kterým se zjišťoval obsah organické hmoty. Tyto výsledky jsem porovnal na vstupu do fermentorů a výstupu z fermentorů. Popis odběru vzorků je v předchozí kapitole. Z grafu jsem je znatelné, že lze vysledovat závislost procentuelního množství odbourané organické hmoty na počtu fermentorů, přičemž méně fermentorů v procesu znamená nižší úbytek organické hmoty. Doba zdržení kalu ve fermentorech má naopak pozitivní vliv na úbytek organické

hmoty. Množství primárního kalu v kalu smíšeném má také kladný vliv na úbytek organické hmoty.



Graf 3: Úbytek organických látek ve fermentačním procesu (2015)

V grafu 4 je uvedeno srovnání množství vyprodukovaného bioplynu ve fermentačním procesu na ČOV. Toto množství je získáno z průtokoměru, který slouží k orientačnímu zjištění množství vyprodukovaného bioplynu.



Graf 4: Měsíční sumy produkovaného bioplynu (2015)

Je patrné, že produkce bioplynu je přímo závislá na počtu aktivních fermentorů. Obsah metanu v bioplynu je měřený pomocí stejného přístroje, kterým je měřen objem vyprodukovaného bioplynu. Jeho obsah je poměrně stabilní a kolísá pouze minimálně v rozmezí 62 – 68 %_{obj.} Průměrná hodnota je 64 %_{obj.}

Protože odběr kalu pro laboratorní rozbory je prováděn jen několikrát do týdne a hmotnostní koncentrace kalu se v závislosti na technologickém nastavení linky a srážkovým událostem mění, jsou tyto hodnoty uvedeny jen jako statistická data pro srovnání (Tab. 8).

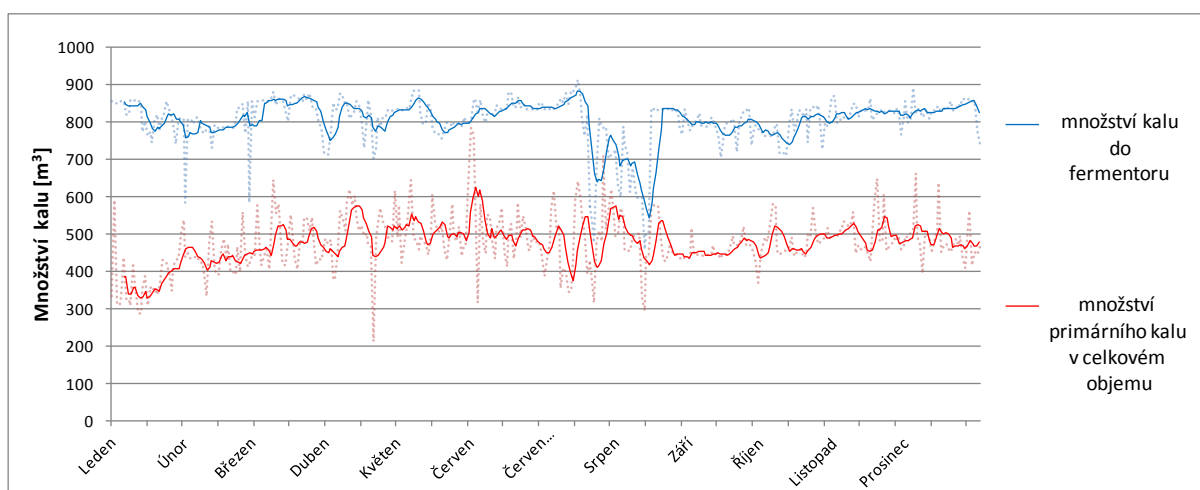
Tabulka 8: Hmotnostní koncentrace kalů (2015)

2015	Primární kal	Sekundární kal	Zahuštěný kal	Směsný kal
	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$
Min	0,8	25,8	30,2	32,8
Max	64,4	44,0	80,4	71,4
Průměr	25	34,7	53,0	43,4

4.3.4 Rok 2016

V tomto roce bylo na kalové lince instalováno nové zahuštění, ve kterém je na čerpání kalu do směsné jímky nainstalováno mechanické mletí zahuštěného primárního kalu. Lze předpokládat, že tato technologie by mohla mít vliv na kalovou linku, konkrétně na fermentační proces. Zlepšení kapacity zahuštění by mělo také stabilizovat objem načerpaného primárního kalu do fermentačních nádrží tak, že nebude docházet k výrazným změnám v objemu při dešťových událostí.

Opět jsem provedl srovnání kalu čerpaného do fermentorů (Graf 5).

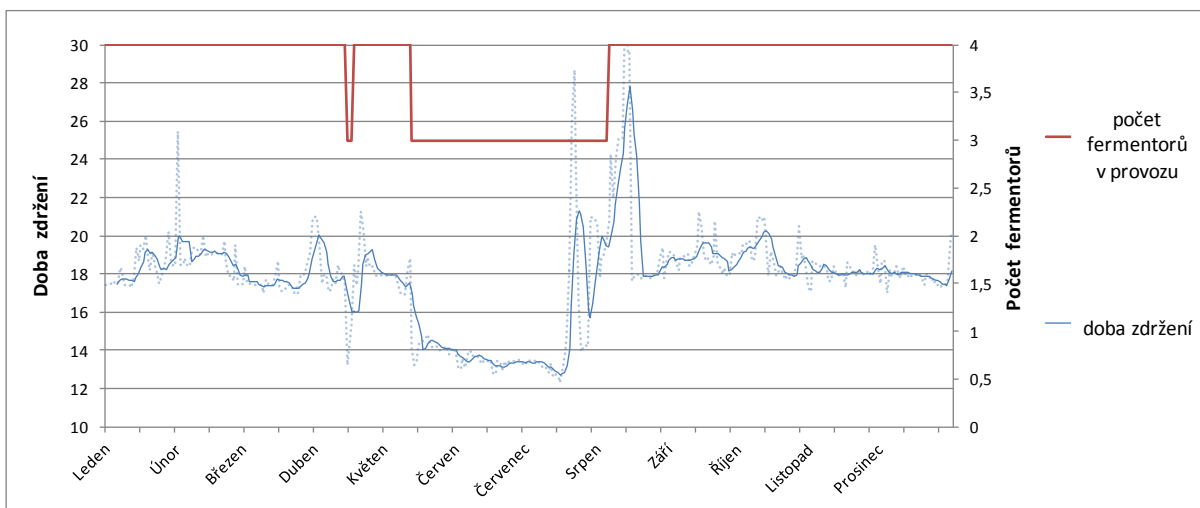


Graf 5: Denní množství kalu čerpaného do fermentorů (2016)

Stejně jako v předchozím roce jsou menší hodnoty celkového denního množství kalu způsobeny linkou na zpracování sekundárního kalu, jak je znatelné z hodnot primárního kalu.

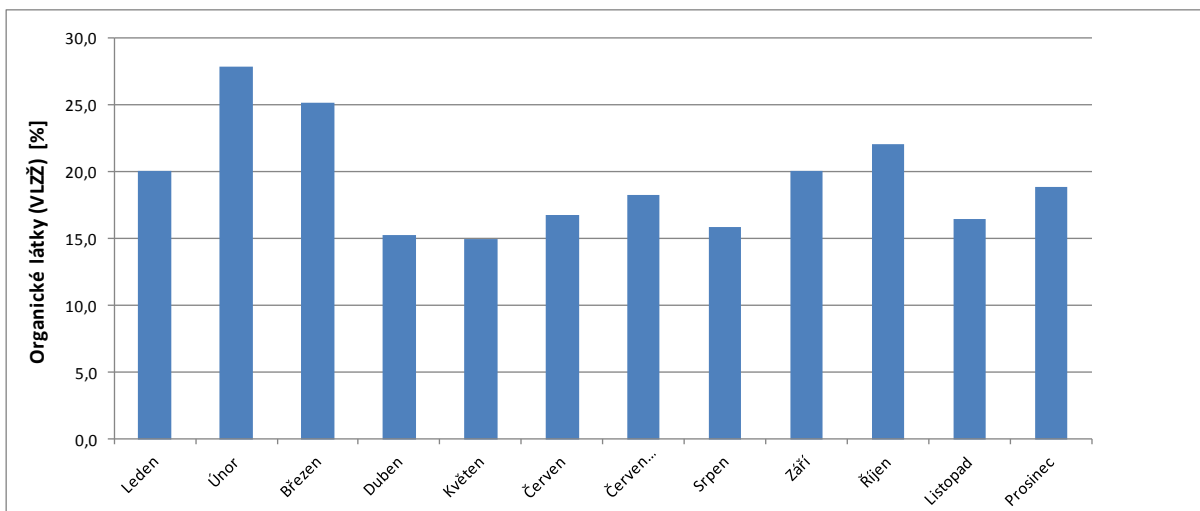
U primárního kalu je znát účinek nového zahuštění, kdy nedochází k odchylkám v množství čerpaného kalu. Je to dáno systémem provozování nového zahuštění, kdy při bezdeštném provozu je v činnosti pouze jedna nádrž, a při dešti a následném zvýšení množství primárního kalu, je do činnosti uvedena i druhá nádrž. Obě nádrže pak cyklují v pravidelných intervalech a pracují v systému jedna nádrž plněná, druhá prázdněná.

Doba zdržení a počet fermentorů (Graf 6) má stejné závislosti jako v předchozím roce. Doba zdržení ovlivňuje počet fermentorů a množství načerpaného kalu. Stejně jako v předchozím roce i v tomto došlo k odstavení jednoho z fermentorů z důvodu kompletní revize. I to se projevilo negativně na době zdržení kalu ve fermentačním procesu.



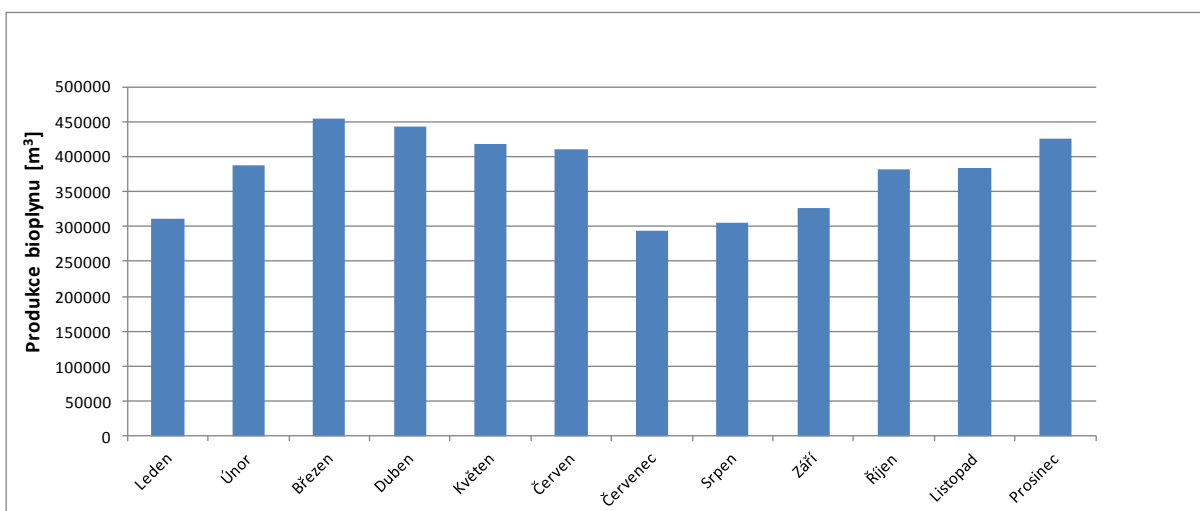
Graf 6: Srovnání doby zdržení a počtu fermentorů v provozu (2016)

Množství odstraněné organické hmoty (Graf 7) má stejné závislosti jako v předchozím roce. Menší úbytek organické hmoty v letních měsících je způsoben odstávkou jednoho z fermentorů.



Graf 7: Úbytek organických látek ve fermentačním procesu (2016)

Měsíční suma vyprodukovaného bioplynu (Graf 8) ukazuje, že vyprodukované množství je opět významně závislé jak na počtu aktivních fermentorů, tak na době zdržení kalu ve fermentačním procesu. Obsah methanu v bioplynu byl v tomto roce podobný jako v roce 2015, což ukazuje na stabilní složení organických látek v natékajícím kalu.



Graf 8: Měsíční sumy produkovaného bioplynu (2016)

Následující tabulka (Tab. 9) opět vyjadřuje statistické hodnoty hmotností koncentrace kalů. Hodnoty pro tyto statistiky jsou taktéž z rozborů.

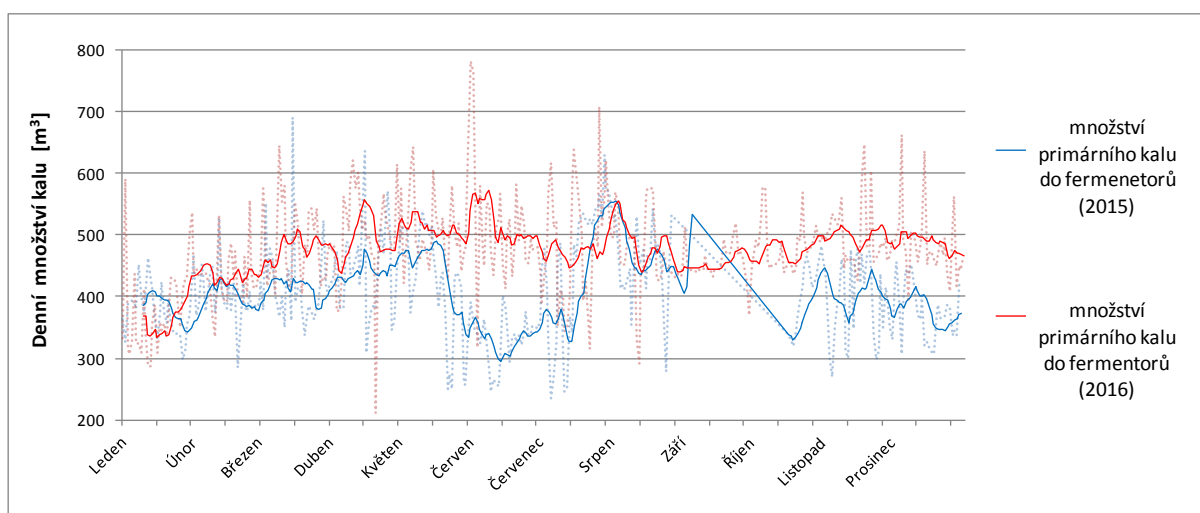
Tabulka 9: Hmotnostní koncentrace kalů (2016)

2016	Primární kal	Sekundární kal	Zahuštěný kal	Směsný kal
	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$
Min	4,4	19,6	22,2	32,4
Max	31,2	53,2	96,6	76,4
Průměr	14,1	33,5	52,7	46,4

4.3.5 Srovnání

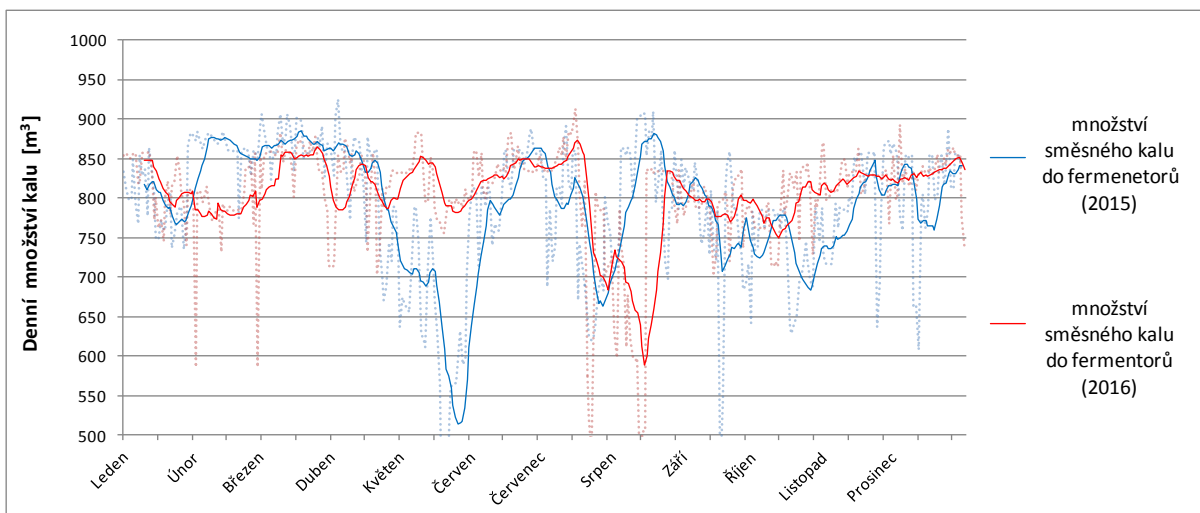
Dva roky, které ve své práci srovnávám, jsem si vybral proto, že na konci roku 2015 bylo na ČOV Modřice zprovozněno nové zahuštění. V další části své práce budu srovnávat oba roky, porovnáám je s návrhovými parametry kalové linky a zkusím odvodit, jaký vliv měla změna technologie na mnou sledované parametry na kalové lince.

Jako první je uvedeno srovnání množství zahuštěného primárního kalu (Graf 9). Jak je patrné, tak množství zpracovaného primárního kalu se v posledních dvou letech zvýšilo. V roce 2015 dosahovaly průměrné denní hodnoty čerpaného množství 400 m^3 , v roce 2016 už tyto hodnoty dosahovaly 470 m^3 . Je pravděpodobné, že toto zvýšení bude souviset s dostavbou kanalizační sítě ve městě Brně a napojováním nově postavených obytných bloků.



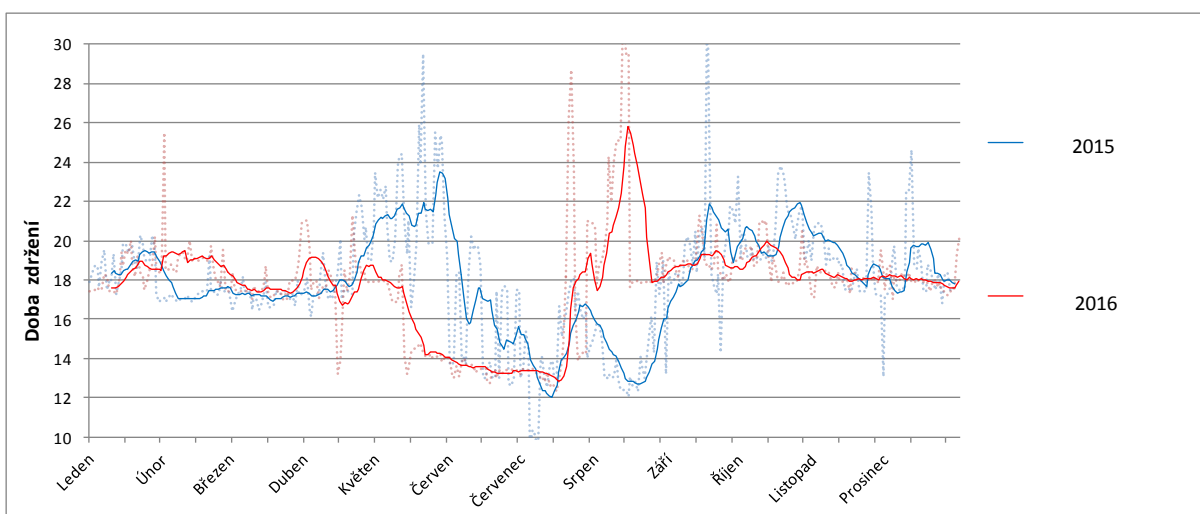
Graf 9: Srovnání množství zpracovaného primárního kalu

Srovnání množství směsného kalu čerpaného do fermentorů (Graf 10) vychází podobně. Při srovnání obou hodnot lze pozorovat zvýšení čerpaného množství v roce 2016. U obou grafů jsou znatelné velké výkyvy u čerpaného množství. Tyto výkyvy společně s odstavením fermentorů z jakýchkoliv důvodů, mohou mít výrazný vliv na celkovou bilanci kalové linky. Tyto výkyvy jsou znatelné v době zdržení kalu ve fermentačním procesu.



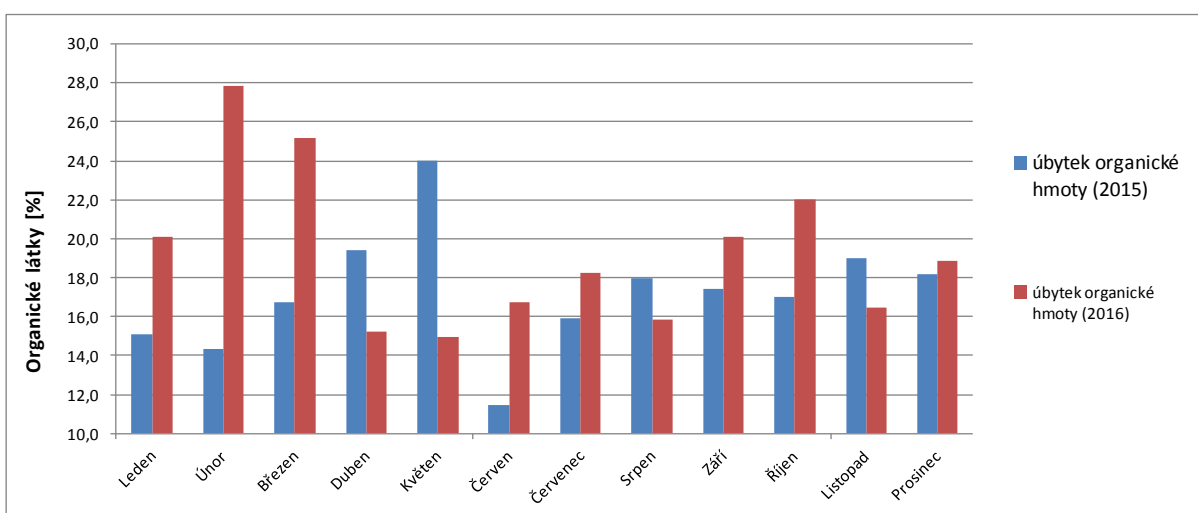
Graf 10: Srovnání množství směsného kalu čerpaného do fermentačního procesu

Ze srovnání doby zdržení kalu ve fermentorech (Graf 11) je znatelné, že k největším rozptylům dochází v letních měsících. V těchto měsících dochází k pravidelným revizím jednoho fermentoru. Zároveň také v těchto měsících dochází k největším rozptylům v množství čerpaného směsného kalu. V ostatních měsících je doba zdržení v obou srovnávaných letech přibližně stejná.



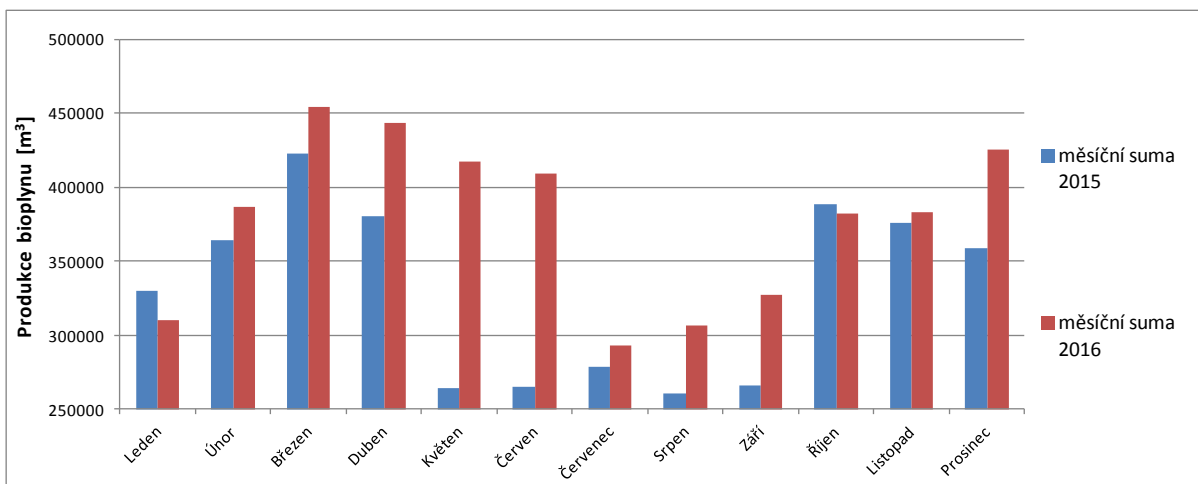
Graf 11: Srovnání průběhu doby zdržení kalu ve fermentorech

Z grafu průběhu množství odbouraných organických látek (Graf 12) je znát, že doba zdržení i kolísající množství kalu vstupujícího do fermentorů, mají vliv na množství odstraněné organické hmoty. Při srovnání množství odbourané organické hmoty jsou lepší výsledky v roce 2016. Toto může být vlivem nového zahuštění, které má nainstalovanou mechanickou dezintegraci kalu na výstupu z technologie. Také to může být i větším množstvím primárního kalu, kdy rozdíl v ročním množství zpracovávaného primárního kalu je přibližně 25 000 m³. Ustálení hodnot, ke kterému došlo na konci roku 2015 (Graf 11), je možné přičíst účinkům nového zahuštění, které bylo zprovozněno v posledním čtvrtletí roku 2015.



Graf 12: Srovnání úbytku organické hmoty ve fermentorech v letech 2015 a 2016

Srovnání průběhů vyprodukovaného bioplynu (Graf 13) je podobné jako u odstraněné organické hmoty. Pokles v letních měsících je způsoben nižší dobou zdržení a odstavením fermentorů. Také zde vychází lépe rok 2016, ve kterém byla produkce bioplynu výrazně vyšší. Je otázkou, zda to souvisí s mechanickou dezintegrací kalu, nebo zda je to způsobeno vyšším podílem primárního kalu.



Graf 13: Srovnání množství vyprodukovaného bioplynu v letech 2015 a 2016

4.4 Diskuse

Alarmujícím zjištěním při hodnocení kalového hospodářství na ČOV je obsah písku v primárním kalu. Podle tabulky 5 se průměrné hodnoty písku obsaženého v primárním kalu za sledované dva roky pohybují okolo 14 % a v některých případech dosahují až 25 %. K určitému průniku písku bude docházet vždy, ale tyto hodnoty jsou dost vysoké a to znamená, že může docházet k významnému opotřebením všech součástí kalové linky.

Při hodnocení byl zjištěn výrazný denní rozptyl v obou letech v hodnotách načerpaného směsného kalu do fermentorů. Kolísání primárního kalu je pochopitelné, protože je výrazně ovlivněno stokovou sítí. Ale toto kolísání by mělo být možné vyrovnat zpracováním sekundárního kalu. Krátkodobé změny mohou být způsobeny technologickými problémy, ale tolik změn v krátkém časovém období není žádoucí. Denní kolísání dosahuje i 80 m³, a to v průběhu dvou dní a nejedná se o ojedinělý jev. Toto může mít výrazný vliv na množství předaného tepla pro ohřev kalu i na fermentační proces.

Dále byly zjištěny rozdíly v množství odbouraných organických látek po fermentaci. Srovnávat lze však jen období, kdy byly v provozu všechny čtyři fermentory. V tomto období sice vychází, že v roce 2016 bylo ve fermentačním procesu odbouráno více organických látek než v roce předchozím, ale také je znát, že byla vyšší doba zdržení ve fermentorech, která souvisela s množstvím zpracovaného směsného kalu. Letní období nelze rozumně srovnat, protože probíhaly provozní odstávky fermentorů a také čerpání kalu bylo velice nepravidelné.

Produkce bioplynu vykazuje podobné charakteristiky jako organická hmota a je na tomto srovnání vidět, jak produkce bioplynu klesá po odstavení fermentoru. Dále je znát, že i

když v roce 2016 došlo k odstavení fermentoru, ale množství zpracovaného primárního kalu bylo stejné, u produkce bioplynu nedošlo k tak výraznému snížení jako v roce 2015, kdy zároveň s odstavením fermentoru v květnu došlo i k výraznému poklesu zpracovaného primárního kalu cca o 100 m³ za den. Celková suma vyprodukovaného bioplynu je tedy za rok 2016 vyšší, ale množství zpracovaného primárního kalu je také vyšší.

Dále tyto získané informace srovnám s návrhovými parametry plánovanými při rekonstrukci čistírny odpadních vod.

Návrhové parametry zpracování zahuštěného primárního kalu jsou průměrná koncentrace 75 g·l⁻¹ a denní množství 282 m³. Návrhové parametry biologického kalu jsou koncentrace 40 g·l⁻¹ a denní množství 467 m³, u směsného kalu je to koncentrace 52 g·l⁻¹ a denní množství 750 m³. Z těchto dat je zřejmé, že množství zpracovávaného primárního kalu je, při průměrné koncentraci 52 g·l⁻¹, proti návrhovým parametrům skoro dvojnásobné. U biologického kalu je také nižší koncentrace oproti návrhovým parametrům, cca 34 g·l⁻¹, u směsného kalu je to cca 45 g·l⁻¹. Denní množství zpracovávaného směsného kalu je přibližně 800 m³. Plánovaná doba zdržení při těchto parametrech je 20 dní.

Tyto hodnoty vypovídají, že kalová linka je přetěžována průměrně o 50 m³ směsného kalu denně a skoro o dvojnásobné množství primárního kalu. Toto vše při nižších koncentracích, než jsou navrhované parametry. Větší množství zpracovaného primárního kalu má také vliv na menší množství zpracovaného sekundárního kalu. Pro produkci bioplynu to nemusí být tak špatné, ale sekundární kal se poté může hromadit v biologickém čistění a ovlivňovat provozní charakteristiky aktivačních nádrží. Dosažení vyšších koncentrací zpracovávaného kalu je diskutabilní, protože z provozního hlediska je náročnější energeticky i ekonomicky (výkonnější čerpadla) uskutečnit transport takového kalu.

Navrhovaná doba zdržení je 20 dní. Podle návrhových parametrů bylo testováno, že při 18 dnech je ještě fermentační proces efektivní. Nižší doby zdržení nebyly testovány. Reálné doby zdržení ve výjimečných případech přesáhnou 20 dní a převážně jsou 18 dní. Při odstávkách fermentorů se doby snižují až ke hranici 14 – 16 dní. Tyto období jsou mimo návrhové parametry a jak je znatelné na produkci bioplynu, tak je znát výrazné snížení produkce.

Návrhové parametry denní produkce bioplynu jsou 11300 m³, skutečná produkce je v měsících, kdy jsou v provozu všechny fermentory vyšší, ale toto je pravděpodobně způsobeno vyšším množstvím zpracovávaného primárního kalu. V měsících kdy je jakýkoli fermentor odstaven, výrazně klesá vyprodukované množství bioplynu. Průměrné denní hodnoty jsou

přibližně 8600 m³ v roce 2015 a 9600 m³ v roce 2016. Vyšší množství bioplynu v roce 2016, v porovnání s předchozím rokem, je pravděpodobně dáno stabilním obsahem zpracovaného primárního kalu, kdy zrovna při odstavení jednoho fermentoru došlo také k poklesu zpracovaného množství primárního kalu.

Na řešení problému lze nahlížet z několika hledisek. Je možné zkusit aplikovat na kalové lince některou z forem předúpravy kalu. Na výběr je několik možností zmíněných v teoretické části. U všech možností předúprav je však nutné brát na vědomí kromě pořizovacích nákladů i energetickou bilanci této technologie. Také je nutné zohlednit, jaký bude pozitivní přínos jako je snížení obsahu organických látek (tzn. snížení objemu kalu) nebo vyšší produkce bioplynu. I když existují tvrzení, že díky některým typům předúprav lze pak za stejných podmínek přepravovat kal o vyšší koncentraci, je nutné toto tvrzení vyzkoušet přímo na dané kalové lince.

Například existují srovnání, které vyvrací jednoznačný pozitivní přínos lyzační odstředivky a dokládají, že zvýšení produkce bioplynu není tak výrazné a pravděpodobně nepokrývá i energetickou náročnost tohoto typu předúpravy. (Chudoba a kol. 2014)

Jedno z dalších možných řešení je zvýšit koncentraci zpracovávaného kalu. Toto řešení je ale krátkodobé, a to z důvodu výstavby bytů v Brně a napojování dalších lokalit v okolí Brna. Tato činnost bude mít vliv na množství primárního kalu zpracovávaného na ČOV. Také by tento způsob byl energeticky náročnější.

Další řešení je přejít z mezofilního fermentačního procesu na termofilní. Tímto řešením by se zvýšila produkce bioplynu a odstranily by se problémy s krátkou dobou zdržení kalu. I tento způsob řešení má několik úskalí. Nejprve je třeba zjistit, zda fermentory na ČOV jsou schopny pracovat v termofilním provozu. Dále by bylo třeba kompletně změnit způsob vyhřívání fermentorů a ohřevu kalu. Je však nutné si uvědomit vysokou energetickou náročnost a problém spojený provozem v zimních obdobích.

Posledním řešením je zvýšit počet fermentorů na zpracování kalu. Pokud by se zvýšil počet fermentorů o dva, které by měli stejný objem jako původní fermentory, při zpracovávaném denním množství 800 m³ by doba zdržení činila přibližně 28 dní. To by vedlo ke zvýšení produkce bioplynu a zvýšení množství odstraněných organických látek. Tato metoda je investičně náročná jen při stavbě fermentorů. Energetické náklady při provozu by byly podobné jako na nynější kalové lince. Spotřeba elektrické energie by se zvýšila pravděpodobně pouze o míchání nových fermentorů.

5 ZÁVĚR

Kalová linka na čistírně odpadních vod v Brně Modřicích je, podle údajů zjištěných v této práci, přetěžována oproti návrhovým parametrům. Podle dat srovnávaných v této práci, se množství zpracovávaného primárního kalu meziročně zvyšuje. Tento fakt souvisí s dostavbou kanalizační sítě a napojováním nových aglomerací na tuto čistírnu. Dále je třeba zohlednit plánovanou výstavbu, která ještě zvýší množství zpracovávaného primárního kalu. V diskusi je navrženo několik řešení, ale s přihlédnutím k uvedeným faktům je nejvhodnějším řešením, které by mělo dlouhodobější charakter, posílení kalové linky o další fermentační nádrže. Při poslední rekonstrukci kalové linky došlo ke snížení počtu fermentorů ze šesti na čtyři. Dva fermentory byly přestaveny na uskladňovací nádrže. Jako řešení posílení kalové linky navrhuji tyto dvě nádrže opět zprovoznit jako fermentory a uskladňovací nádrže vybudovat nové. S přihlédnutím ke stáří všech fermentorů (55 let) je vhodné před tímto zásahem provést kompletní stavební analýzu a rozhodnout, zda všechny fermentory, včetně fermentorů případně přebudovaných z uskladňovacích nádrží, mají perspektivu dlouhodobé výdrže. Pokud by závěr byl negativní, je třeba zbudovat nové fermentační nádrže, které budou mít dostatečnou kapacitu s dlouhodobým výhledem. Kapacitu fermentačních nádrží doporučuji zbudovat na zpracovávané denní množství 1000 m^3 a dobu držení 25 – 30 dní.

Pokud by mělo být uvažováno o nějakém způsobu předúpravy kalu, jako prostředek ke zvýšení produkce bioplynu a snížení množství odbouraných organických látek, doporučuji provést důkladnou analýzu všech dopadů a přínosů přímo na této kalové lince, hlavně energetickou bilanci celé předúpravy.

Dalším problémem je vysoký obsah písku v primárním kalu. Zjištěné množství písku v primárním kalu je příliš vysoké a představuje riziko pro technologickou linku pro zpracování kalu (abraze potrubí, svárů, mechanických částí čerpadel usazování ve fermentorech atd.). Takovéto množství písku může mít i nepříznivý ekonomický dopad, například: časté opravy mechanických částí čerpadel, čištění fermentorů. Je nutné provést revizi mechanického předčištění a zjistit důvod vysokého pronikání písku do primárního kalu. Snížení obsahu písku v primárním kalu sníží objem zpracovávaného primárního kalu a také sníží opotřebení technologické linky.

6 POUŽITÁ LITERATURA:

1. CHUDOBA J., 1991: *Odpadní vody a jejich čištění*. Praha b.n., 121 s. ISBN 80-85122-09-X.
2. HLAVÍNEK P., 1996: *Čištění odpadních vod*. Noel 2000 s.r.o., 196 s. ISBN 80-86020-0-2.
3. DOHÁNYOS M., STRNADOVÁ N., KOLLER, J., 1998: *Čištění odpadních vod*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1998. 177 s. ISBN 978-80-7080-316-52011.
4. VÍTĚZ T., GRODA B., 2008: *Čištění a čistírny odpadních vod*, Brno Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
5. SMITH S., 1996: *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment*. Oxon: CAB International, 382 s. ISBN 0-85198-980-2.
6. GRADY C P L. a kol., 2011: *Biological wastewater treatment*. 3. vyd. Boca Raton: Taylor & Francis, 991 s. ISBN 978-0-8493-9679-3.
7. SCOTT C A., FARUQUI N I., 2004: *Wastewater use in irrigated agriculture : coordinating the livelihood and environmental realities*. Wallingford. ISBN 0-85199-823-2. URL: <http://dx.doi.org/10.1079/9780851998237.0000>.
8. DAVIS M L., 2010: *Water and wastewater engineering: design principles and practice*. New York: McGraw-Hill, 1 s. ISBN 978-0-07-171384-9.
9. LYČKOVÁ B., FEČKO P., KUČEROVÁ R., 2009: *Zpracování kalů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava.
10. CARRÈRE H., DUMAS C., BATTIMELLI A., BATSTONE D.J., DELGELGENÈS J.P., STEYER J.P., FERRER I., 2010: *Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review*. <http://www.sciencedirect.com/>
11. FOLADORI P., ANDREOTTOLA G., ZIGLIO G., 2010: *Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants*. ISBN: 9781843392781. Published by IWA Publishing, London, UK.
12. ZHANG H., 2010: *Sludge treatment to increase biogas production TRITA-LWR Degree Project 10-20* ISRN: KTH/LWR-EX-10-20.
13. ONYECHE, T.I., SCHLÄFER, O., BORMANN, H., SCHRÖDER, C., SIEVERS, M., 2002: *Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion* ISSN: 0041624X Ultrasonics Volume 40, Pages 31-35.
14. ONDEO DEGRÉMONT, 2004: *Čistírna odpadních vod Brno Modřice - rekonstrukce a rozšíření*, Brno.

15. KOS M., 2015: *Termochemické zpracování čistírenských kalů* s. 20–23 In: SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací, číslo 12/2015.
16. KUTIL V., FIALKA P., 2016: *Zkušenosti a poznatky z projektování a provozování kalového a plynového hospodářství za posledních 25 let* s. 18–22 In: SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací, číslo 4/2016.
17. KUTIL, J., DOHÁNYOS, M., 2005: *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. [online]. CZ Biom - České sdružení pro biomasu [cit. 2017-04-24]. Dostupné z <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2> ISSN: 1801-2655.
18. KOS M., 2015: *Čistírenský kal – obnovitelný zdroj pro výrobu paliva a hnojiva* s. 16–20 In: SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací, číslo 1/2016
19. CHUDOBA J., ŠROM R., SÝKORA K., NOVÁK L., BENEŠ O., 2014: *Mýty, fakta a realita v kalovém hospodářství* s. 10 – 15 In: SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací, číslo 4/2014
20. DOHÁNYOS M., 2006: *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. Biom.cz [online]. CZ Biom - České sdružení pro biomasu [cit. 2017-03-27]. Dostupné z <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu> ISSN: 1801-2655.
21. Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech 2001: *Sbírka zákonů ČR*. Dostupné také z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
22. Vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě 2016: *Sbírka zákonů ČR*. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-437>

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Blokové schéma čistírny odpadních vod</i>	14
<i>Obrázek 2: Blokové schéma kalového hospodářství</i>	16
<i>Obrázek 3: Kulový mlýn</i>	19
<i>Obrázek 4: Systém pro dezintegraci vloček kalu</i>	20
<i>Obrázek 5: Homogenizační ventil</i>	21
<i>Obrázek 6: Kolizní tlakový systém</i>	21
<i>Obrázek 7: Mechanické mletí zahuštěného kalu</i>	31
<i>Obrázek 8: Měření průtoku primárního kalu</i>	37
<i>Obrázek 9: Vzorkovací místo směsného kalu</i>	38
<i>Obrázek 10: Vzorkovací místo primárního kalu</i>	38
<i>Obrázek 11: ČOV Modřice ČOV Modřice</i>	39

8 SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Denní množství kalu čerpaného do fermentorů (2015)</i>	43
<i>Graf 2: Srovnání doby zdržení a počtu fermentorů v provozu (2015)</i>	44
<i>Graf 3: Úbytek organických látek ve fermentačním procesu (2015)</i>	45
<i>Graf 4: Měsíční sumy produkovaného bioplynu (2015)</i>	45
<i>Graf 5: Denní množství kalu čerpaného do fermentorů (2016)</i>	46
<i>Graf 6: Srovnání doby zdržení a počtu fermentorů v provozu (2016)</i>	47
<i>Graf 7: Úbytek organických látek ve fermentačním procesu (2016)</i>	48
<i>Graf 8: Měsíční sumy produkovaného bioplynu (2016)</i>	48
<i>Graf 9: Srovnání množství zpracovaného primárního kalu</i>	49
<i>Graf 10: Srovnání množství směsného kalu čerpaného do fermentačního procesu</i>	50
<i>Graf 11: Srovnání průběhu doby zdržení kalu ve fermentorech</i>	50
<i>Graf 12: Srovnání úbytku organické hmoty ve fermentorech v letech 2015 a 2016</i>	51
<i>Graf 13: Srovnání množství vyprodukovaného bioplynu v letech 2015 a 2016</i>	52

9 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Složení primárního kalu</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 2: Složení sekundárního kalu.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 3: Minimální, maximální a průměrné hodnoty těžkých kovů v primárním kalu (2015).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 4: Minimální, maximální a průměrné hodnoty těžkých kovů v primárním kalu (2016).....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5: Obsah písku v primárním kalu</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 6: Podíl organické složky v kalu na ČOV (2015)</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 7: Podíl organické složky v kalu na ČOV (2016)</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 8: Hmotnostní koncentrace kalů (2015)</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 9: Hmotnostní koncentrace kalů (2016)</i>	<i>49</i>