



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

VLIV SPECIFICKÉ SPOTŘEBY FLOKULANTU NA
ODVODNITELNOST ČISTÍRENSKÉHO KALU
DEPENDENCE OF SLUDGE DEWATERING EFFICIENCY ON AMOUNT OF FLOCCULANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ VOLEJNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV BORÁŇ, Ph.D.

ABSTRAKT

První část této diplomové práce se věnuje problematice produkce kalů z komunálních čistíren odpadních vod a následným nakládáním s tímto kalem. Jsou zde uvedeny jednotlivé procesy z oblasti kalového hospodářství a popsána kompletní čistírenská linka. Zejména je podrobněji pojednáno o procesu odvodňování kalu. Jsou popsány jednotlivé způsoby odvodňování a materiálová bilance procesu.

Druhá část této práce popisuje experiment provedený na čistírně odpadních vod Tetčice a dále využívá jeho výsledků. Při tomto experimentu byl sledován vliv dávkování polymerního organického flokulantu na proces odvodňování kalu. Z výsledků experimentu bylo možno vyhodnotit závislost obsahu sušiny v odvodněném kalu a čistoty fugátu na specifické spotřebě flokulantu. Praktickým využitím materiálové bilance a výsledků experimentu bylo sestavení ekonomické bilance odvodňování, což umožnilo zvolit technologicky i ekonomicky nejvhodnější způsob odvodňování kalu na čistírně odpadních vod Tetčice.

KLÍČOVÁ SLOVA

kal, čistírna odpadních vod, odvodňování, polymerní organický flokulant, obsah sušiny, obsah nerozpuštěných látek, odstředivka, fugát

ABSTRACT

The target of the first part of this diploma thesis is focused on the problems relating to the sludge production from the wastewater treatment plant and subsequent sludge treatment. Wastewater treatment plant and individual processes from the sludge management are described. The process of the sludge dewatering is described more extensively. Various methods of the dewatering and materials balance are described, too.

The second part of this thesis is based on the experiment which took place on wastewater treatment plant Tetčice. The influence of the polymeric organic flocculant dosing on the sludge dewatering was monitored by this experiment. Dependence of the sludge dry matter and filtrate suspended solids content on the specific amount of flocculant was evaluated from experiment's outputs. Using materials balance and outputs of the experiment, economical balance was made. It made possible to choose the most economic and technologically optimal way of the sludge dewatering on wastewater treatment plant Tetčice.

KEYWORDS

sludge, wastewater treatment plant, dewatering, polymeric organic flocculant, sludge dry matter, suspended solids content, centrifuge, filtrate

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOLEJNÍK, T. *Vliv specifické spotřeby flokulantu na odvodnitelnost čistírenského kalu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto práci jsem vypracoval samostatně s použitím literatury, která je uvedena v seznamu.

.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce a všem ostatním konzultantům, kteří mi byli při tvorbě této práce nápomocni. Dále děkuji VAS, a.s. za umožnění provést experiment na ČOV Tetčice.

OBSAH

1	Úvod	8
2	Produkce kalu z procesu čištění odpadních vod	9
	2.1 Popis čistírenské linky	9
	2.2 Zpracování kalu	15
	2.2.1 Zahušťování kalu	15
	2.2.2 Stabilizace kalu	15
	2.2.3 Hygienizace kalu	18
	2.2.4 Odvodňování kalu	19
	2.3 Koagulanty a flokulanty	20
	2.4 Rozdíly v technologiích dle počtu napojených EO	20
3	Způsoby odvodňování kalu	23
	3.1 Odvodňování kalu na dekantačních odstředivkách	23
	3.2 Odvodňování kalu pomocí kalolisu	24
	3.3 Odvodňování kalu na sítopásových lisech	26
	3.4 Odvodňování kalu na vakuových bubnových filtrech	27
	3.5 Kalová pole a laguny	28
4	Nakládání s kalem	29
	4.1 Ukládání kalu na skládku	29
	4.2 Využití kalu v zemědělství	29
	4.3 Kompostování čistírenských kalů	30
	4.4 Sušení kalu	31
	4.5 Spalování kalu	32
5	Materiálová Bilance procesu odvodňování	34
	5.1 Ukázka materiálové bilance	34
6	Experiment na ČOV Tetčice	37
	6.1 Základní údaje o měření	37
	6.2 Průběh měření	37
	6.2.1 Přípravné práce a časový průběh	37
	6.2.2 Vlastní odběr vzorků	40
	6.2.3 Laboratorní analýzy	42
	6.3 Výsledky měření a jejich vyhodnocení	43

6.3.1	Obsah sušiny v zahuštěném stabilizovaném kalu.....	43
6.3.2	Obsah sušiny v odvodněném kalu	45
6.3.3	Obsah nerozpuštěných látek ve fugátu.....	47
6.3.4	Teploty kalů a fugátu	50
6.4	Doplňková měření	53
6.4.1	Hustota zahuštěného stabilizovaného kalu.....	53
6.4.2	Vyhodnocení obsahu nerozpuštěných látek ve vzorku fugátu ..	53
6.5	Zhodnocení experimentu.....	54
7	Využití výsledků experimentu v ekonomické bilanci	55
7.1	Výpočet ekonomické bilance	55
7.2	Výsledky ekonomické bilance	57
7.2.1	Volba nejvhodnějšího způsobu odvodňování	63
8	Závěr.....	66
	Seznam použitých zdrojů	67
	Seznam použitých zkratk.....	69
	Seznam použitých symbolů.....	70
	Seznam obrázků	72
	Seznam tabulek.....	74
	Seznam příloh	75

1 ÚVOD

S komunálními čistírnami odpadních vod (ČOV) se v poslední době setkáváme již velice často. Nutno podotknout, že je tomu tak i díky požadavkům a dotacím EU. V současné době jsou již na odpadní vodu kladeny velmi přísné legislativní požadavky. Vypouštění odpadních vod do recipientů je upravováno zákony České republiky, konkrétně zákonem č. 254/2001 Sb., o vodách a zákonem č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu. S výstavbou nových čistíren odpadních vod a rekonstrukcí těch stávajících vzniká také problém poznání a využití nových technologií, a to zejména v biologické části čistírny.

Kal vyprodukovaný čistírnou odpadních vod taktéž podléhá legislativě (zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech) ve smyslu maximálních povolených hodnot škodlivých chemických látek a nebezpečných bakterií. S tím souvisí nutnost vybudovat technologii zpracování kalu tak, aby došlo k maximálnímu možnému snížení, nebo nejlépe úplnému odstranění těchto látek. K odstraňování nebezpečných bakterií dochází na ČOV obvykle v procesu stabilizace či hygienizace kalu. Stabilizace může probíhat buď za přístupu kyslíku (v aerobních podmínkách), nebo bez přístupu kyslíku (v anaerobních podmínkách). Při anaerobních podmínkách dochází k vyhnívání kalu a produkci bioplynu, který je velice dobře energeticky využitelný. Vyhnívání s produkcí bioplynu se uplatňuje zejména na větších ČOV.

V poslední době se progresivně rozvíjejí nové technologie těchto procesů, které jsou efektivní jak z hlediska likvidace nebezpečných látek a bakterií, tak z energetického hlediska.

Dalším velice důležitým celkem kalového hospodářství je odvodnění kalu. Pro následné nakládání s kalem je potřeba dosahovat co největšího obsahu sušiny. Sušina se hodnotí jako hmotnostní podíl pevné fáze v kalu. Lze stanovit jako poměr zbytkové hmotnosti po odpaření vody a celkové původní hmotnosti kalu. Při strojním odvodňování kalu bývá dosahováno obsahu sušiny nejčastěji 20 – 30 %. Nejběžnějším způsobem nakládání s odvodněným kalem u nás je jeho využití v zemědělství a na rekultivaci půdy. Dalšími způsoby jsou termické zpracování, i když tento způsob není doposud v ČR uplatňován příliš ve velké míře, nebo pouhé skládkování.

2 PRODUKCE KALU Z PROCESU ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

Na čistírnách odpadních vod se z odpadní vody oddělují pevné částice, které následně tvoří čistírenský kal. Setkáváme se zde se třemi stupni čištění odpadní vody. Prvním stupněm je mechanické čištění, jehož produktem je mimo hrubých nečistot, štěrku a písku tzv. primární kal. Druhý stupeň je biologický s produkcí tzv. aktivovaného kalu. Při požadavcích na vysokou kvalitu vyčištěné vody se zavádí ještě terciární stupeň čištění. [1]

K hodnocení znečištění odpadní vody se zavádí charakteristiky jako chemická spotřeba kyslíku (CHSK), biochemická spotřeba kyslíku (BSK) a případně stanovení obsahu organického uhlíku. CHSK je definována jako množství kyslíku v gramech k oxidaci 1 g organických látek. BSK je definována jako množství kyslíku, které spotřebují mikroorganismy pro rozklad organických látek za aerobních podmínek. Nejčastěji se zavádí BSK₅, která charakterizuje tuto spotřebu za 5 dní. [2]

Čistírenský kal je suspenze pevných a koloidních částic organických a anorganických látek ve vodě. Obsahem těchto částic kalu jsou netoxické organické látky, mikroorganismy z čistírenského procesu, patogenní mikroorganismy, sloučeniny dusíku a fosforu, anorganické sloučeniny křemíku, vápníku, železa aj. a toxické látky jako těžké kovy nebo polychlorované bifenylly (PCB), dioxiny aj. [3]

2.1 POPIS ČISTÍRENSKÉ LINKY

Surová odpadní voda přitéká na ČOV přes přítokový objekt, který má zároveň i rozdělovací funkci. Při přítoku o vyšším průtoku, než je schopna ČOV zpracovat (např. za přívalového deště), je část odpadní vody odváděna nejprve do dešťové zdrže (obr. 1). Teprve při poklesu průtoku přitékající odpadní vody na ČOV je voda z dešťové zdrže čerpána do čistícího procesu.



Obr. 1 Dešťová zdrž

Při mechanickém čištění protéká odpadní voda nejprve přes lapáky štěrku a hrubé a jemné česle. Nejhrubší česle mají průřez široké několik centimetrů, velmi jemné česle jen okolo 3 – 6 mm. Česle mohou být ručně nebo strojně stírané. Strojně stírané se používají zejména na větších nebo rekonstruovaných ČOV a vyskytují se také jako rotační. Příklad hrubých česlí je uveden na obr. 2. Dále se používají lapáky písku a tuků. Neméně důležité je nakládání se shrabky z česlí či separovaným štěrskem apod. K těmto účelům se používají třídičky a pračky písku. V případě shrabků se nejčastěji používá jejich lisování s následným promýváním vodou.



Obr. 2 Hrubé česle

Po odstranění nejhrubších nečistot je odpadní voda obvykle čerpána do usazovacích nádrží (obr. 3). V těchto nádržích se nečistoty oddělují nejjednodušším způsobem – gravitační sedimentací. Usazovací nádrže jsou opatřeny pojezdy se shrabovacím zařízením kalu u dna a se stíráním plovoucích nečistot. Ze dna těchto nádrží jsou usazené nečistoty odčerpávány jako primární kal, který je posléze spolu s přebytečným kalem přiveden do objektů kalového hospodářství.



Obr. 3 Usazovací nádrže [4]

Po mechanické části čištění následuje biologická část ČOV. Odpadní voda se dostává do aktivačních nádrží (obr. 4). Nejčastěji se jedná o moderní způsob oběhové aktivity. Zde se odpadní voda provzdušňuje vzduchovými bublinami. Někdy bývá aktivace rozdělena na provzdušňovanou a neprovzdušňovanou zónu. Obsah nádrže se nazývá aktivovanou směsí, což je směs aktivovaného kalu spolu s čištěnou odpadní vodou. Aktivovaný kal, který se v aktivační nádrži vytváří ve formě vloček, je tvořen mikroorganismy, prvky a inertními nerozpustnými nebo nerozložitelnými látkami. Tyto mikroorganismy se živí koloidními částicemi způsobujícími znečištění vody. Koncentrace aktivační směsi se vyjadřuje obsahem nerozpuštěných látek (NL), její organický podíl se stanovuje ztrátou žíháním. Do procesu aktivace se taktéž zařazuje odstraňování dusíku (denitrifikace) a fosforu (defosfatace). Tyto procesy lze buď provádět čistě biologicky, nebo čistě chemicky, případně kombinací obou způsobů. U dusíku patří mezi chemické metody např. oxidace chlorem nebo intenzivní aerace, mezi biologické využití nitrifikačních bakterií. Chemické odstraňování fosforu je založeno na principu srážení a používají se k němu soli železa nebo hliníku, případně vápno (tzv. koagulanty – více v kap. 2.3). Biologické odbourávání fosforu probíhá v předřazené anaerobní nádrži v první části aktivace. Dochází zde k mísení s vratným kalem. Vratný kal se čerpá zpět do aktivace z důvodu oživení a zachování mikrobiální kultury.

Z aktivačních nádrží se aktivovaná směs čerpá do dosazovacích nádrží (obr. 4), kde se odděluje kal od biologicky vyčištěné vody. Tato voda je již vypouštěna do recipientu, případně ještě na další (terciární) čistící stupeň. Dosazovací nádrže bývají vybaveny čerpadly plovoucích nečistot. Součástí těchto nádrží je pojezdový most, který je spojen se shrabovacím zařízením na dně nádrže. Toto shrabovací zařízení slouží ke stírání usazeného kalu. Kal z této nádrže je dělen na kal vratný, který se čerpá zpět do aktivace a na přebytečný kal, který je čerpán spolu s primárním kalem do objektů kalového hospodářství. V některých případech je

přebytečný kal čerpán do kalového hospodářství přímo z aktivace. Přehled druhů kalů, které se vyskytují v čistírenském procesu, je uveden v tab. 1 a schéma větší ČOV uvádí obr. 5.

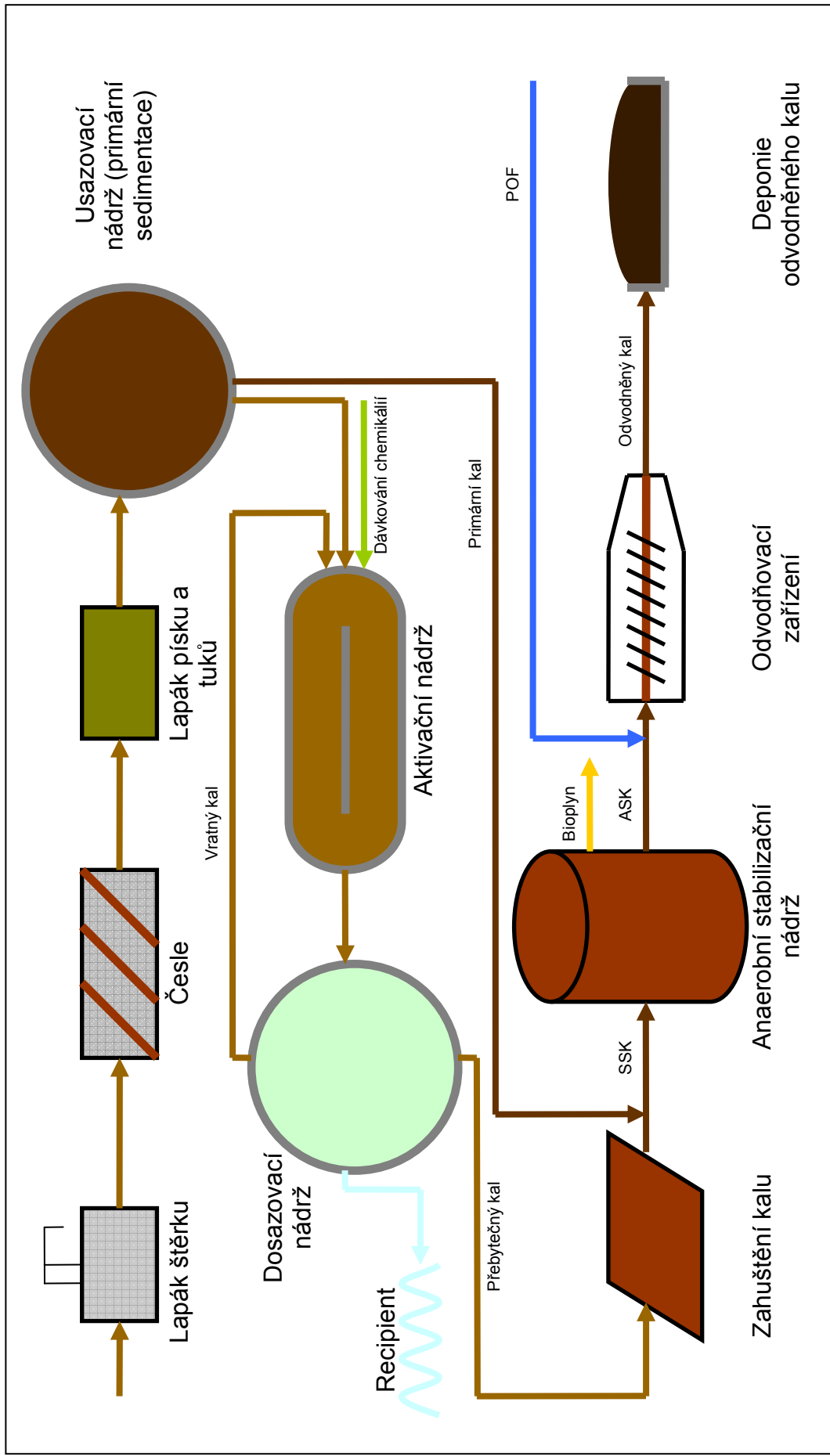


Obr. 4 Aktivační a kruhové dosazovací nádrže [4]

Primární kal	kal vzniklý primární sedimentací v usazovacích nádržích v mechanické části ČOV, tvoří jej usaditelný podíl nerozpuštěných látek v odpadní vodě
Aktivovaný kal	kal vzniklý v aktivační nádrži v biologické části ČOV, tvoří jej množící se mikroorganismy, které slouží k odstraňování koloidního znečištění, a nerozpuštěné látky
Vratný kal	kal čerpáný z dosazovacích nádrží zpět do aktivace, slouží k udržení funkční mikrobiální kultury v aktivaci
Přebytečný kal	kal odčerpávaný z dosazovací (případně aktivační) nádrže do objektů kalového hospodářství, směs nerozpuštěných inertních látek a v aktivaci vyprodukované biomasy
Směsný kal	směs primárního a přebytečného kalu
Surový kal	nestabilizovaný, nehygienizovaný kal, může obsahovat patogenní mikroorganismy, často se používá termín "směsný surový kal" (SSK)
Stabilizovaný kal	kal, který již není nebezpečný pro okolí a u kterého již nedochází k biologickému rozkladu, pro anaerobně stabilizovaný kal se používá označení ASK
Hygienizovaný kal	kal, který neobsahuje žádné patogenní mikroorganismy (nebo je obsahuje v minimálním množství stanoveným limity)
Zahuštěný kal	kal zahuštěný na 2 - 5 % sušiny
Odvodněný kal	kal odvodněný nejčastěji na strojním zařízení na 20 - 30 % sušiny

Tab. 1 Druhy kalů v čistírenském procesu

Terciární stupeň čištění bývá požadován vodoprávním orgánem obvykle v takových oblastech, kde je nutno vypouštět do recipientu čistější vodu, než dokáže zabezpečit obyčejná ČOV. Nejčastěji zde dochází k odbourávání zbytkových NL a někdy i fosforu. Jako zařízení používaná v terciárním stupni se vyskytují zemní filtry, mikrosítové filtry, pískové filtry, případně různé typy biologických dočišťovacích nádrží nebo vegetační kořenové čistírny. O nich je více uvedeno na konci kapitoly 2.4. Tato kapitola (2.1) byla zpracována s použitím literatury [1], [4], [5] a [6].



Obr. 5 Schéma velké čistírny odpadních vod

2.2 ZPRACOVÁNÍ KALU

Zpracování kalu začíná gravitačním nebo strojním zahušťováním přebytečného kalu, případně i primárního kalu s nízkým obsahem sušiny. Zahuštěný přebytečný kal je společně s primárním kalem jako SSK přiveden do procesů stabilizace a hygienizace. Stabilizace může probíhat buď v aerobním, nebo anaerobním prostředí. Anaerobní prostředí je spojeno s vyhníváním kalu a tvorbou bioplynu. Tyto procesy jsou nutné zejména z důvodu odstranění nebezpečných bakterií. Konečným procesem při zpracování kalu je jeho odvodňování za účelem získat co největší obsah sušiny. Kapitoly 2.2.1 a 2.2.4 byly zpracovány s použitím literatury [1], kapitola 2.2.2 s použitím [3], [7] a [9] a kapitola 2.2.3 s použitím [1] a [3].

2.2.1 ZAHUŠŤOVÁNÍ KALU

Zahušťování kalu vede především k úsporám na investičních a provozních nákladech. Zahušťovací operace se dělí na gravitační a strojní.

Gravitační zahušťování probíhá v kalových prohlubních usazovacích nádrží. Zahuštění kalu je ovlivňováno velkým množstvím faktorů (hydraulické poměry, vlastnosti kalu a další provozní faktory). K dosažení optimálních výsledků se nedoporučuje automatizace obsluhy, nýbrž daleko účinnější jsou zásahy pracovníků ČOV v závislosti na aktuálních vlastnostech kalu a dalších faktorech. Za průměrné hodnoty zahuštění se považují hodnoty obsahu sušiny okolo 4 %.

Strojní zahušťování se obvykle používá u středních a větších čistíren. Může následovat po gravitačním zahušťování kalu. Jako zahušťovací zařízení se nejčastěji používají horizontální pásové zahušťovače nebo zahušťovací odstředivky. Kalová voda se vrací zpět do čistícího procesu a kal je čerpán do stabilizačních nádrží. Zahuštění kalu se pohybuje okolo 5 – 6 % obsahu sušiny.

Jiný způsob strojního zahušťování je zahušťování na flotační jednotce. Jedná se o obrácený princip gravitačního zahušťování. Částice a vločky kalu jsou pomocí provzdušňovacího systému vynášeny na hladinu a odsud jsou strojně stírány a odčerpávány do dalších objektů kalového hospodářství. Odsazená kalová voda se nejčastěji vrací zpět do aktivace. Při tomto způsobu zahušťování bývá obvykle dosahováno obsahu sušiny okolo 4 – 5 %.

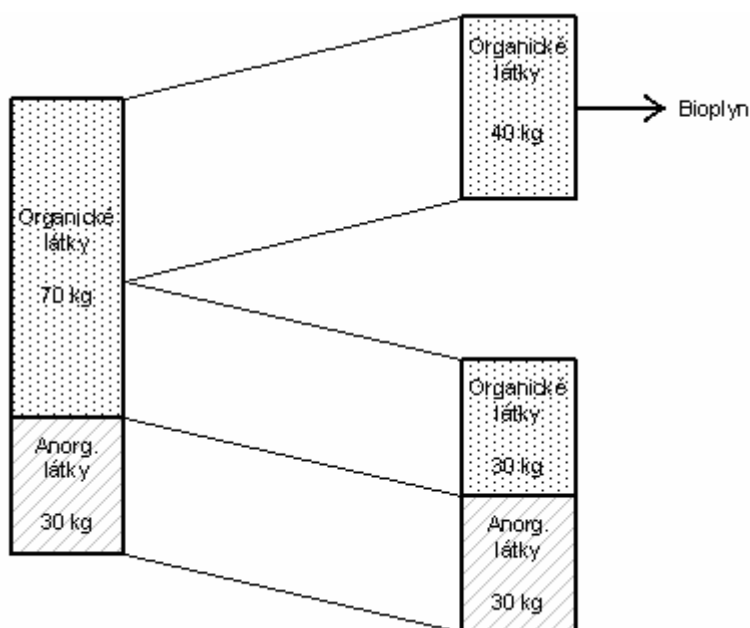
2.2.2 STABILIZACE KALU

Surový kal obsahuje okolo 70 % organických látek v sušině, v nichž mohou být obsaženy různé patogenní mikroorganismy. Z tohoto důvodu je nutné takový kal, který je klasifikován jako nebezpečný odpad, těchto patogenů zbavit. Děje se tak v procesu stabilizace a hygienizace, kdy se z nebezpečného surového kalu stává bezpečný stabilizovaný kal. Obecně bývá za stabilizovaný kal považován takový, který již nezpůsobuje žádné škody na životním prostředí a nepůsobí obtíže při zacházení s ním. Z technologického hlediska nedochází u stabilizovaného kalu k jeho dalšímu biologickému rozkladu, avšak z hygienického hlediska ještě nemusí jít o kal hygienizovaný. Naopak hygienizovaný kal zase nemusí být z technologického

hlediska stabilizovaný. Proces hygienizace a stabilizace je provázaný a může probíhat společně i zvlášť. O možnostech hygienizace kalu je pojednáno v kap. 2.2.3.

ANAEROBNÍ STABILIZACE KALU

Anaerobní stabilizací (metanizací, vyhníváním) se nazývá proces, kdy dochází k rozkladu mikroorganismů bez přístupu vzdušného kyslíku. Konečnými produkty jsou vzniklá biomasa (nerozložitelné a obtížně rozložitelné organické látky) a bioplyn obsahující CH_4 , CO_2 , H_2 , N_2 a H_2S . Při anaerobní stabilizaci dochází k úbytku organické sušiny, neboť právě ta se přeměňuje na bioplyn. Bilance anaerobní stabilizace je znázorněna na obr. 6. Zároveň dochází k potlačení výskytu patogenních mikroorganismů, dochází tedy k částečné hygienizaci kalu.



Obr. 6 Úbytek organické hmoty v sušině při anaerobní stabilizaci [3]

V současné době se provozují dva způsoby anaerobní stabilizace, mezofilní a termofilní.

V ČR je ve větší míře rozšířena mezofilní anaerobní stabilizace. Probíhá při teplotě 30 – 35 °C a doba zdržení se pohybuje mezi 20 – 30 dny. Mezofilní proces je obvykle rozdělen do dvou stupňů. Jako první stupeň se používá vyhřívána míchaná anaerobní nádrž, kde dochází k vlastnímu procesu stabilizace. Druhý stupeň je tvořen uskladňovací nádrží. Doznívají v ní stabilizační procesy a odděluje se v ní kal, který je čerpán na odvodnění, od kalové vody, která je čerpána zpět do aktivace.

Termofilní anaerobní stabilizace patří k modernějším metodám. Probíhá při teplotě 55 – 60 °C, a proto je možné zkrátit dobu zdržení na 10 – 15 dnů. Doba zdržení závisí na kinetice a zatížení procesu. Musí být tak dlouhá, aby došlo k požadovanému rozložení organických látek. Při termofilní anaerobní stabilizaci je dosahováno vyšší rychlosti rozkladu organických látek a jeho větší účinnosti. Tím

dochází i ke zvýšení produkce bioplynu. Vzhledem k vyšší procesní teplotě dochází také k účinnější hygienizaci.

V praxi se setkáváme s několika druhy anaerobních stabilizačních (vyhňovacích) nádrží. Nejstaršími typy nádrží jsou tzv. šterbinové nádrže. Jsou tvořeny dvěma částmi oddělenými šterbinami. V horní části kal sedimentuje a šterbinami propadá do spodní části, kde dochází k anaerobní stabilizaci. U moderních nádrží je kladen důraz na co možná nejmenší ztráty tepla do okolí. U velkých nádrží se proto volí vejčítý tvar, u menších se obvykle setkáváme s válcovými tvary s kuželovou střechou. Nádrže jsou míchány buď přímo pomocí míchadel, nebo recirkulací kalu či bioplynu. K vytápění nádrží se používá teplá voda nebo pára, topné kabely a plynové hořáky.

Bioplyn vznikající při anaerobní stabilizaci lze využít pro výrobu energie, neboť vzhledem k vysokému obsahu metanu (60 – 70 %) má vysokou výhřevnost až 23 MJ/m_N^3 . Bioplyn lze využít přímo na ČOV k ohřevu anaerobních stabilizačních nádrží a pro výrobu tepla v dalších provozech ČOV. V poslední době se využívá bioplynu na výrobu elektrické energie v kogeneračních jednotkách, které navíc produkují dále využitelné odpadní teplo. Pro uskladnění bioplynu se užívají kulové zásobníky. Na obr. 7 je zobrazena anaerobní stabilizační nádrž a zásobníky bioplynu.



Obr. 7 Anaerobní stabilizační nádrž (vlevo) a zásobníky bioplynu (vpravo)

AEROBNÍ STABILIZACE KALU

Aerobní stabilizace se uplatňuje především u menších ČOV. Stejně jako u anaerobní stabilizace dochází k likvidaci patogenů a úbytku organické hmoty. Mezi novodobé způsoby aerobní stabilizace patří tzv. autotermní aerobní stabilizace. Tento proces si udržuje sám termofilní podmínky díky exotermnímu metabolismu termofilních mikroorganismů, neboť při biologické oxidaci organického uhlíku dochází k uvolňování tepla. Proces aerobní stabilizace je schopen si udržet požadovanou stabilizační teplotu. Pro zintenzivnění procesu je možno využít aeraci čistým kyslíkem. Teplota, při které probíhá stabilizace, je závislá na typu aerace (vzduch / kyslík) a na zahuštění kalu vstupujícího do procesu. Čím větší je zahuštění

kalu, tím se daří dosahovat vyšších teplot. Při zahuštění kalu nad 6 % obsahu sušiny a aeraci kyslíkem je možno dosáhnout teploty až 80 °C. Naopak při zahuštění kalu kolem 3 % obsahu sušiny a aeraci vzduchem se daří dosahovat teplot pouze kolem 25 °C. Optimálními podmínkami jsou zahuštění kalu kolem 4 – 6 % obsahu sušiny a aerace kyslíkem při dosahování stabilizačních teplot 55 – 60 °C. Při těchto teplotách dochází k rozkladu patogenních mikroorganismů a také k potlačení zápachu. Doba zdržení kalu bývá 25 – 30 dní.

Podmínkami pro úspěšné provozování autotermní aerobní stabilizace jsou dostatečně zahuštěný vstupní kal, který obsahuje dostatečné množství rozložitelných organických látek, izolace stabilizační nádrže z důvodů minimalizace ztrát tepla, efektivní míchání a aerace. Obsahuje-li kal velké množství vody a nízký podíl rozložitelných organických látek, není tento proces funkční, tj. kal se samovolně nezahřívá.

2.2.3 HYGIENIZACE KALU

Nutnost hygienizace kalu pramení zejména z legislativních požadavků na omezení nebezpečných vlastností kalu z hlediska obsahu patogenních mikroorganismů. Hygienizace kalu může být uskutečňována pomocí chemikálií (vápno, ozón aj.) nebo fyzikálními procesy (teplota, ultrazvuk, radiace aj.).

Proces hygienizace může být zařazen přímo do procesu stabilizace kalu. Podmínkou je dosažení požadované hygienizační teploty po určitou dobu. S výhodou se toho využívá při autotermní aerobní stabilizaci nebo při termofilní anaerobní stabilizaci. Mimo stabilizaci může hygienizace probíhat jak před stabilizací (tzv. předúprava), tak po stabilizaci jako dodatečná úprava. Předúpravu lze realizovat několika rozdílnými způsoby. Mezi fyzikální zde můžeme zařadit úpravu pomocí ultrazvuku či radiace, mezi termické pasterizaci nebo termický rozklad. K chemickým procesům patří úprava pomocí ozónu. Jako dodatečná úprava se používá rovněž pasterizace, nebo lze na již stabilizovaný kal použít vápnění či jej vysušit.

Nejrozšířenější a nejekonomičtější metodou je vápnění kalu. Reakcí páleného vápna s vodou za vzniku hydroxidu vápenatého dochází ke zvýšení pH (i více než 12) a také ke krátkodobému zvýšení teploty (55 °C). Udržení vysokého pH se požaduje po dobu alespoň 24 hodin. Vysokou účinnost má tento způsob při likvidaci salmonel. Nevýhodou bývá produkce čpavku. Dávkování vápna se pohybuje okolo 300 – 400 kg/t_{sušiny}. Do stabilizovaného kalu před odvodněním je možné vápno dávkovat jako vápenné mléko nebo jako práškové pálené vápno. Práškové pálené vápno lze také dávkovat do již odvodněného kalu.

Při pasterizaci kalu dochází ke zvýšení teploty kalu na 70 °C po dobu nejméně 30 minut. Pasterizační jednotky jsou dimenzované na teplotu 60 – 70 °C při době zdržení 1 – 3 hodin. Teplo je kalu dodáváno pomocí systému rekuperačních výměníků.

2.2.4 ODVODŇOVÁNÍ KALU

Odvodňování kalu se provádí strojně na sítopásových lisech, dekantačních odstředivkách, kalolisech či bubnových filtrech. Dříve se používalo i ukládání kalu na kalových polích a lagunách. Jednotlivé způsoby odvodňování kalu jsou blíže popsány v kap. 3.

Produktem odvodňování je odvodněný kal a vedlejším produktem filtrát. Vzniklý filtrát (tzv. fugát) je opětovně čištěn v čistícím procesu; je čerpán zpět do aktivace. Složení a kvalita fugátu závisí mimo jiné i na způsobu stabilizace kalu. Při aerobní stabilizaci kalu mívá fugát velice nízký stupeň znečištění. Při anaerobní stabilizaci kalu obsahuje fugát velké množství organických látek a také sloučeniny fosforu a dusíku. Nevýhodou je, že se mohou vyskytovat nárazy tohoto zatížení. V důsledku navrácení fugátu zpět do čistícího procesu by toto mohlo vyústit až v kolaps celé ČOV. Proto je nutno při anaerobní stabilizaci kalu vybavit ČOV akumulární nádrží na fugát a jeho řízeným odvodem zpět do čištění.

K hodnocení kvality odvodnění se používá procentuální obsah sušiny v odvodněném kalu a obsah NL ve fugátu, který by neměl přesáhnout 1 000 mg/l. Nízký obsah sušiny se vyskytuje, pokud se odvodňuje aktivovaný kal. Čím větší je podíl organické hmoty v sušině, tím je kal hůře odvodnitelný. Nízké hodnoty obsahu sušiny způsobují problémy při další manipulaci s kalem, neboť tato hmota má pastovitou či kašovitou konzistenci. Tomuto lze čelit např. přidáváním práškového vápna v procesu hygienizace.

Velice důležitým faktorem při odvodňování kalu je dávkování polymerních organických flokulantů (POF). O nich je dále zmíněno v kap. 2.3. Běžně dosahované hodnoty sušiny v procesu zahušťování a odvodňování dle [1] uvádí tab. 2., v praxi se však lze setkat i s vyššími hodnotami obsahu sušiny po strojním odvodňování.

	Primární kal z usazovací nádrže	Přebytečný aktivovaný kal z dosazovací nádrže	Aerobně stabilizovaný kal	Anaerobně stabilizovaný kal
	% sušiny	% sušiny	% sušiny	% sušiny
Odběr kalu ze systému	3,5 - 5,5	0,6 - 1,0	2,5 - 3,5	2,5 - 3,5
Gravitační zahuštění	dle doby zdržení	1,5 - 2,5	2,5 - 3,5	-
Strojní zahuštění (zahušťovací síto, odstředivka)	5 - 7	4 - 7 ^{*)}	4 - 6 ^{*)}	4 - 6 ^{*)}
Strojní odvodnění	20 - 23 ^{*)}	15 - 18	15 - 18	19 - 23

^{*)} provozní použití je výjimečné

^{**)} při zahuštění nad 6 % se nárazově zvyšuje viskozita kalu

Tab. 2 Orientační hranice schopnosti zahuštění a odvodnění čistírenského kalu [1]

2.3 KOAGULANTY A FLOKULANTY

K efektivní tvorbě vloček kalu je třeba do procesu dodávat potřebné chemikálie. K těmto chemikáliím se řadí koagulační a flokulační činidla.

Koagulanty se na ČOV nejčastěji dávkuje do aktivačních nádrží. Jejich účinkem zde dochází k tvorbě zárodků vloček aktivovaného kalu vlivem elektrostatických sil. Tato fáze vločkování se nazývá perikinetická. Dochází k rychlé intenzivní tvorbě zárodků vloček. Napomáhá tomu promíchávání a proudění vody v aktivačních nádržích. Pomocí koagulantů se rovněž v aktivaci odstraňuje fosfor. Jako koagulanty se nejčastěji používají hlinité či železité soli, zejména sírany a chloridy.

Polymerní organický flokulant se nejčastěji dávkuje až před strojní odvodnění kalu. Slouží k vytvoření vloček z jejich zárodků. Dochází ke snížení hodnot specifických filtračních odporů, které jsou u surového i stabilizovaného kalu vysoké ($10^{12} - 10^{14}$ m/kg). Před procesem odvodňování je třeba tyto hodnoty zmenšit zhruba o dva řády. Volba typu a dávkování POF závisí na druhu kalu a obsahu organické sušiny. S vyšším obsahem organické sušiny je třeba zvolit POF s vyšší kationaktivitou (iontovou silou). Při volbě POF je třeba brát v úvahu požadovanou odolnost vůči smykovým silám, které působí na vločky kalu (flokule) během mechanického odvodňování. Flokulace bývá označována také jako fáze ortokinetická.

Svým chemickým složením jsou POF tvořeny nejméně jednou neionogenní a jednou ionogenní vinylovou sloučeninou. Mezi neionogenní patří např. akrylonitril, akrylamid, vinylacetát nebo vinylalkohol, mezi ionogenní pak soli kyseliny maleinové nebo akrylové. POF můžeme dělit na kationaktivní a anoinaktivní. Na ČOV nacházejí použití nejčastěji kationaktivní, případně širokospektrální flokulanty. POF bývají dodávány nejčastěji práškové formě. Na ČOV se z nich míchá flokulační roztok s určitou koncentrací, který se dávkuje do procesu odvodňování kalu. Ve všech případech volby POF a jeho dávkování je nutno provést provozní zkoušky, které by měly vyústit v optimalizaci procesu odvodňování. Je potřeba vzít v úvahu všechny výše uvedené vlivy a dále i vliv přípravy a zrání POF. Tato kapitola byla zpracována s použitím literatury [1], [9] a [10].

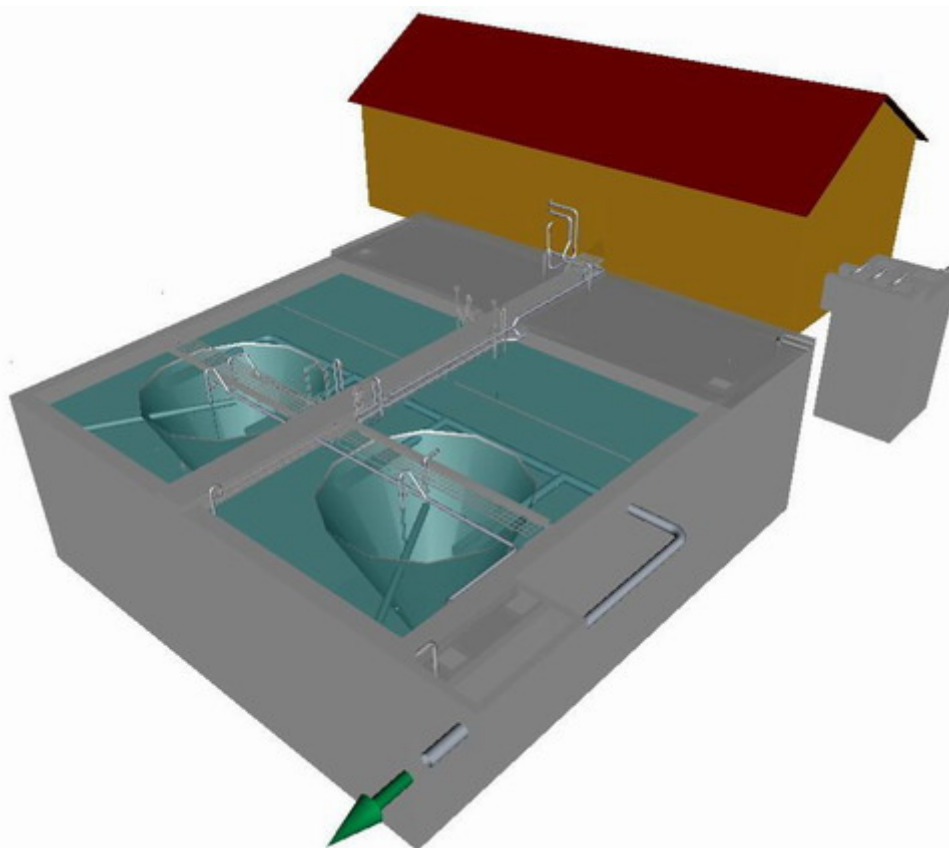
2.4 ROZDÍLY V TECHNOLOGIÍCH DLE POČTU NAPOJENÝCH EO

Velikost čistíren odpadních vod se hodnotí podle počtu napojených ekvivalentních obyvatel (EO). EO je definován jako produkce znečištění 60 g BSK₅ za den. V případě, že není známa skutečná produkce BSK₅, lze počet EO stanovit pomocným výpočtem. Ten vychází ze součtu stálých obyvatel, příležitostných obyvatel a zahrnutého průmyslového znečištění v oblasti napojené na ČOV. [11]

Za malé ČOV jsou dle [2] považovány čistírny s počtem připojených EO do 5 000. Nad touto hodnotou se jedná o menší a středně velké ČOV. Velké čistírny jako ÚČOV Praha nebo ČOV Brno – Modřice mají počet EO v řádech stovek tisíců. Nařízení vlády č. 61/2003 Sb. uděluje ČOV emisní limity na základě počtu EO. Zde

se uvádí rozdělení dle EO: do 500, 501 – 2000, 2001 – 10 000, 10 001 – 100 000 a nad 100 000 EO. [12]

U malých ČOV se používají typizované modely čistíren. Takové ČOV většinou disponují mechanickým předčištěním, provzdušňovanou aktivací s integrovanými dosazovacími nádržemi a uskladňovacími nádržemi na přebytečný kal, ve kterých probíhá aerobní stabilizace. Vyjma dosazovacích kruhových se používají nádrže obdélníkového nebo čtvercového půdorysu. Malé ČOV obvykle nedisponují žádným odvodňovacím zařízením, proto je přebytečný kal odvážen k odvodnění na větší ČOV. Model malé ČOV je uveden na obr. 8. [13]

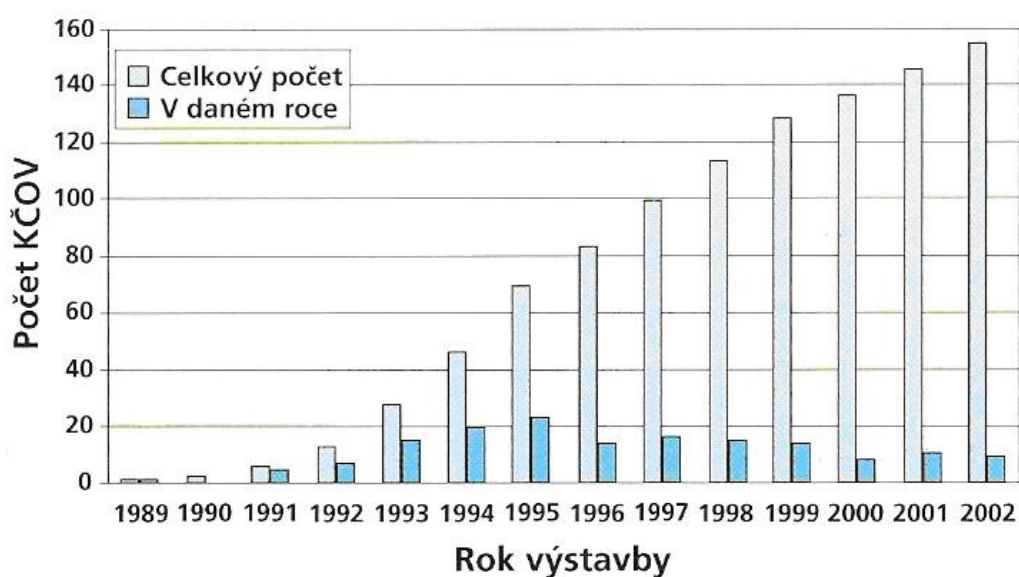


Obr. 8 Model typizované malé ČOV [13]

Technologie použitá u menších a středních ČOV (do 20 000 EO) je v některých ohledech odlišná od technologických linek, které se uplatňují u velkých čistíren. U menších ČOV se obvykle nepoužívá primární sedimentace a anaerobní stabilizace kalu. Z ekonomického hlediska zde není vhodné stavět anaerobní stabilizační nádrže. U velkých ČOV (schéma uvedeno na obr. 5) se anaerobní stabilizace a produkce bioplynu využívá v hojně míře. [2]

V poslední době se u obcí či osad s velmi malým počtem EO (v řádu desítek až stovek) nebo jako domovní čistírny začínají uplatňovat přírodní způsoby čištění, zejména model vegetační kořenové čistírny (KČOV). Ke KČOV s největším počtem EO patří KČOV Spálené Poříčí (dokonce 1500 EO), KČOV Velká Jesenice a KČOV

Prosenice (obě 800 EO). Největší podíl KČOV však tvoří domovní čistírny s počtem EO okolo 10. Počty KČOV v jednotlivých letech uvádí obr. 9. Tyto čistírny bývají tvořeny utěsněnou jámkou vyplněnou filtračním materiálem a osázenou vlhkomilnými a mokřadními rostlinami. Přívodní voda je rovnoměrně po nádrži rozdělována, prochází přes půdní filtr, kde dochází k odstraňování znečištění kombinací fyzikálních, chemických a biologických procesů. Vyčištěná voda je odváděna sběrnou drenáží. Jako filtrační materiál může být použit štěrkopisek nebo materiály s lépe definovatelnými sorpčními vlastnostmi. Nově se používají víceúrovňové kořenové čistírny, které kombinují horizontální i vertikální proudění. Dosahují tak lepších výsledků při odbourávání chemického znečištění, zejména při denitrifikaci. Příklad KČOV je zobrazen na obr. 10. [1] a [14]



Obr. 9 Počet KČOV v ČR [14]



Obr. 10 Příklad KČOV [14]

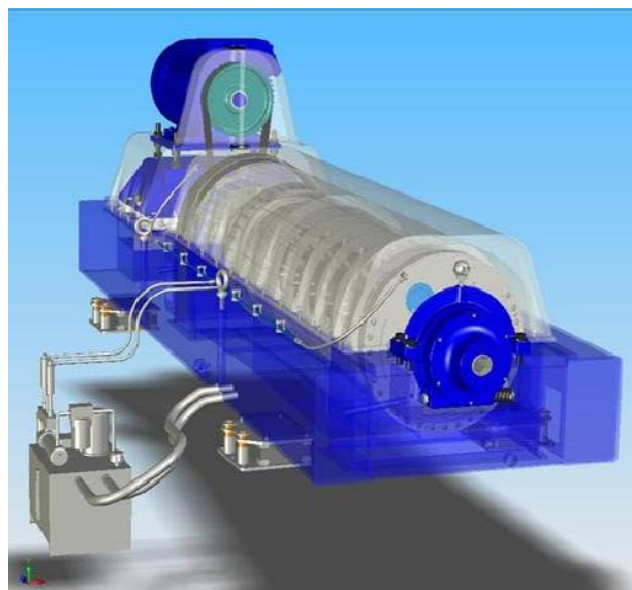
3 ZPŮSOBY ODVODŇOVÁNÍ KALU

V současnosti je nejrozšířenějším způsobem odvodňování kalu na nových nebo rekonstruovaných ČOV použití dekantační odstředivky. Před rekonstrukcí ČOV se nejvíce uplatňovaly sítopásové lisy. Mimo tato zařízení lze kal odvodňovat na kalolisech, vakuových bubnových filtrech nebo pouhým uskladněním na kalových polích a lagunách. Kapitoly 3.1, 3.3 a 3.4 byly zpracovány s použitím literatury [9], kapitola 3.2 s použitím [9] a [15] a kapitola 3.5 s použitím [16].

3.1 ODVODŇOVÁNÍ KALU NA DEKANTAČNÍCH ODSTŘEDIVKÁCH

Dekantační odstředivky fungují na principu sedimentace, kdy se vlivem odstředivé síly od kalu odděluje voda. Při odstředování se dosahuje hodnot přetížení v řádu několika tisíc násobků tíhového zrychlení. Účinnost tohoto procesu závisí také na rozdílu hustot pevných částic (kalu) a kapaliny (fugátu). Čím je tento rozdíl větší, tím je odstředování účinnější.

Odstředivky jsou konstruovány ve vertikálním a horizontálním provedení. K odvodňování čistírenských kalů se však výhradně používají v provedení horizontálním. Vnější strana odstředivek bývá kryta ocelovým pláštěm, pod kterým se nachází rotující buben ve tvaru komolého kužele v přední části a tvaru válce na opačné straně odstředivky. Uvnitř tohoto bubnu je umístěn šnek, který slouží k transportu kalu v odstředivce. Buben při odstředování rotuje v rozmezí 3 000 – 4 000 ot./min. Vyhrabování kalu se dosahuje tím, že se šnek otáčí pomaleji než vlastní buben. Diferenční otáčky se pohybují od 1 do 20 ot./min. Odstředivkou odvodněný kal obsahuje obvykle 20 – 30 % sušiny. Model dekantační odstředivky je zobrazen na obr. 11.

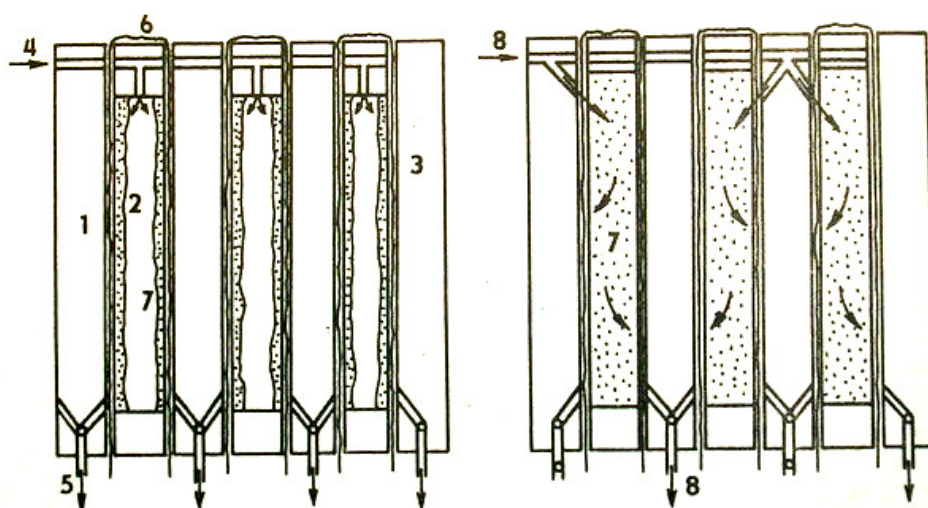


Obr. 11 Model dekantační odstředivky [15]

3.2 ODVODŇOVÁNÍ KALU POMOCÍ KALOLISU

Kalolis je strojní zařízení určeno především k odvodnění těžce odvodnitelných kalů. V základu rozlišujeme dva druhy kalolisů. První je staršího provedení – klasický rámový kalolis a druhý novější – komorový. V současné době se více realizuje komorové provedení mnohdy doplněné o přítlak membrán pro lepší konsolidaci koláče odvodněného kalu. Dosahovaný obsah sušiny bývá i více než 30 %. Ve srovnání s odstředivkami se kalolisy vyznačují diskontinuálním provozem, nutností přítomnosti obsluhy při vyprazdňování, ovšem také nižšími energetickými nároky.

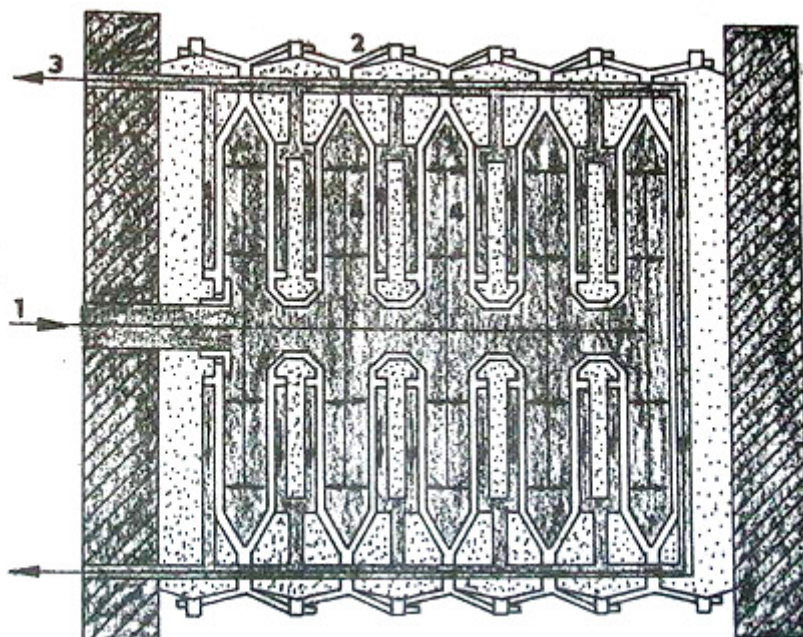
Rámový kalolis se sestává z desek a k nim přiléhajících ráků, které jsou sestavovány do celků čítajících desítky těchto kusů. Desky a ráky jsou většinou čtvercového tvaru o rozměrech 400 x 400 mm až 1 500 x 1 500 mm. Výjimkou nejsou ani jiné rozměry. Desky a ráky bývají vyrobeny z litiny nebo z polypropylenu. Ráky jsou obepnuty filtrační pláčetkou vyrobenou nejčastěji z umělých hmot. Desky mají pro lepší funkci rýhovaný povrch. Při činnosti kalolisu jsou ráky a desky sevřeny mezi svorníky uzavíracím tlakem (u automatizovaných i přes 30 MPa) a vytvářejí kanál pro přívod suspenze (kalu) v horní části. Odvod fugátu (v dolní části) je řešen buď z každého ráku zvlášť (otevřený odvod), nebo odvodovým kanálkem vytvořeným z na sebe natlačených desek a ráků (uzavřený odvod). Uzavírání kalolisu může být buď mechanické (zavírání šroubem), nebo pomocí hydraulického válce. Ten může být poháněn buď ručně hydraulickou pumpou, nebo u automatizovaného provedení hydraulickým agregátem. Do kalolisu je přiváděn kal pod tlakem nejčastěji 1,4 – 1,6 MPa. V prostoru ráků se vytváří koláč odvodněného kalu. Při zaplnění prostoru ráku kalem je pracovní fáze u konce. Následuje otevření kalolisu a vysypání koláčů na transportér. Provádí se taktéž regenerace pláchetek pomocí průtoku regenerační kapaliny (rozpouštěcího roztoku). Princip činnosti rámového kalolisu je vyjádřen na obr. 12.



1 – deska, 2 – rám, 3 – čelo, 4 – vtok suspenze, 5 – odtokový kanál, 6 – pláčetka,
7 – filtrační koláč, 8 – průplach pláchetky

Obr. 12 Rámový kalolis [9]

Komorový kalolis je složen pouze z tvarovaných desek vyrobených z plastických hmot. Tyto desky jsou potaženy plachetkami. Uspořádání i rozměry jsou obdobné jako u rámového kalolisu. Nátok se uskutečňuje nejčastěji pomocí středového nátokového kanálu, odvod fugátu je opět řešen jako otevřený nebo uzavřený. Schéma komorového kalolisu je uvedeno na obr. 13. Tlakové poměry, způsoby uzavírání i způsob tvorby koláče jsou stejné jako u rámového kalolisu. Výhodou komorového kalolisu oproti rámovému je jednodušší konstrukce a možnost automatického vyprazdňování. Při automatickém vyprazdňování se užívá rozřazení desek postupně nebo zároveň. Způsob rozřazení zároveň se používá zejména u rychlého zaplnění kalolisu, je ale nutno počítat s větší délkou hydraulického válce. Pro snadnější odpadnutí koláče se někdy používají různé způsoby oklepu desek. Při rozřazení desek zároveň je často používán oklep pomocí vačkového mechanismu. Pro dosažení ještě většího obsahu sušiny lze použít mechanického domáčknutí filtračního koláče pomocí přitlaku membrány. Ten může být vyvolán buď hydraulicky, nebo pneumaticky. K tomu je třeba použít speciální membránové desky. Nevýhodou je jejich vyšší cena, proto se při jejich použití obvykle kombinují s deskami komorovými. V případě odvodňování kalů s vyšším obsahem solí bývá vhodné do cyklu provozu kalolisu zařadit promývání koláče vodou. Pro regeneraci plachetek se používá zařízení ostříku plachetek umístěné na pojezdovém zařízení.



1 – deska, 2 – plachetka, 3 – odvodový kanálek, 4 – filtrační koláč

Obr. 13 Komorový kalolis [9]

U moderních komorových kalolisů se setkáváme s několika typy uspořádání. Nejčastější varianta provedení je „push to close“, kdy jsou desky tlačeny na jedné straně hydraulickým válcem a na straně druhé se opírají o rám kalolisu. Tato varianta může být s bočním, nebo horním svorníkem. Druhá varianta je „pull to close“. Spočívá v použití nejčastěji čtyř hydraulických válců, které přitahují poslední desku

kalolisu na druhé straně. Jednotlivá provedení komorových kalolisů jsou uvedena na obr. 14.

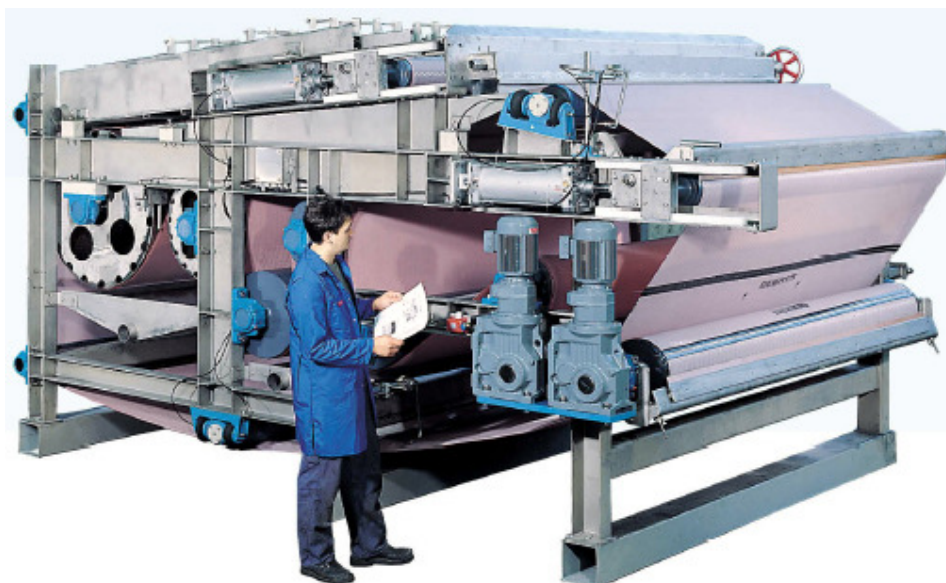


1 – provedení s bočním svorníkem, 2 – provedení s horním svorníkem, 3 – provedení „pull to close“

Obr. 14 Technická provedení komorových kalolisů [15]

3.3 ODVODŇOVÁNÍ KALU NA SÍTOPÁSOVÝCH LISECH

Nejpodstatnější součástí sítopásového lisu (obr. 15) jsou dva nekonečné pásy tvořené filtrační tkaninou šířky 0,75 – 2 m. Tato tkanina se používá nejčastěji silonová se 14 oky na cm^2 . Mezi pásy se přivádí vodnatý kal. Tyto pásy s kalem procházejí soustavou napínacích a lisovacích válců postupně čtyřmi pásmy. Homogenizačním, gravitačním, nízkotlakým a vysokotlakým. Rychlosti pohybu pásů se pohybují v rozmezí 50 – 300 m/h. V homogenizačním a gravitačním pásnu je využit pouze jeden pás a dochází zde ke ztrátě volné vody. V nízkotlakém pásnu je kal přitlačován druhým pásem. Poté se kal dostává do pásma lisovacích válců (vysokotlaké pásno). V tomto pásnu je dosahováno tlaku okolo 3 MPa. Změnou směru válců je voda z kalu „vyždímávána“. Po odpadnutí odvodněného kalu se oba pásy regenerují prostříkáním tlakovou vodou (0,5 MPa).



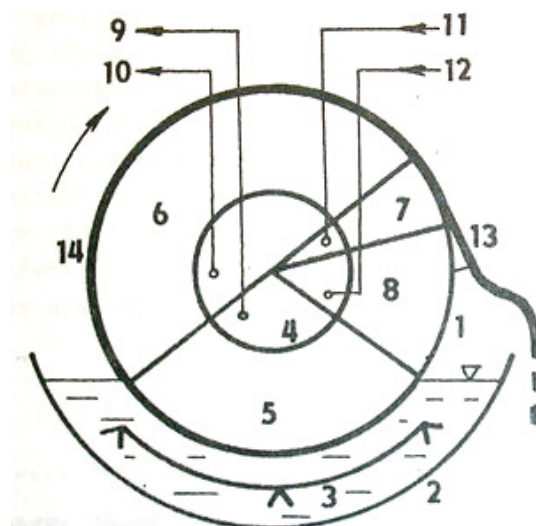
Obr. 15 Sítopásový lis [15]

Na sítopásových lisech se dosahuje nejčastěji podílu sušiny nad 20%. Kal přiváděný k lisu by neměl mít obsah sušiny menší než 3 %.

3.4 ODVODŇOVÁNÍ KALU NA VAKUOVÝCH BUBNOVÝCH FILTRECH

Nejběžnější provedení vakuových bubnových filtrů je komůrkové. Jejich základem je vodorovný otočný válcový buben s plnými čely. Povrch (plášť) bubnu je tvořen buď děrovaným plechem, nebo síťovým pletivem. Na něj je navinuta nekonečná filtrační plachetka. Buben je uvnitř rozdělen na řadu komůrek podél vodorovné osy. Tyto komůrky jsou navzájem tlakově izolovány a otvor z nich pro přívod přetlaku či podtlaku je proveden do dutého hřídele.

Celý buben se pomalu otáčí. Otáčky bývají voleny v rozsahu od 0,06 do 1,8 ot./min. Ve spodní části je buben ponořen ve vaně s neodvodněným kalem. Často zde bývá zabudováno míchadlo pro homogenizaci kalu. Z této vany se podtlakem vzduchu nasává kal. V horní části bubnu probíhá odvodnění kalu taktéž pomocí podtlaku. Toto vakuum se volí v rozmezí 40 - 70 kPa. Po odvodnění nastává odfuk koláče odvodněného kalu pomocí přetlaku a nejčastěji za pomoci odřezávacího nože. Poslední fází jedné otáčky bubnu bývá klidová fáze za atmosférického tlaku, která může být spojena s regenerací filtrační plachetky. Regenerace může probíhat např. ostřikem tlakovou vodou nejčastěji o tlaku 280 kPa. Princip funkce je znázorněn na obr. 16.



- 1 – buben, 2 – vana, 3 – míchadlo, 4 – rozvodná komora na čelní straně bubnu,
5 – pásmo tvorby koláče, 6 – pásmo odvodňování koláče, 7 – pásmo odfuku koláče,
8 – klidové pásmo, 9 a 10 – odvod filtrátu, 11 – zavedení tlakového vzduchu,
12 – zavedení atmosférického vzduchu, 13 – snímací zařízení, 14 – filtrační koláč

Obr. 16 Bubnový vakuový filtr s odběrem koláče pomocí tlakového vzduchu a nože [9]

Při odvodňování kalu na těchto filtrech se dosahuje tloušťky koláče v rozmezí 10 – 15 mm. Obsah sušiny se obvykle pohybuje od 15 do 25 % a závisí zejména na vlastnostech přiváděného kalu (obsah sušiny, teplota, struktura), na vlastnostech filtrační plachetky, ponoru bubnu, otáčkách atd. Při pomalejších otáčkách se dosahuje silnějšího a suššího koláče.

3.5 KALOVÁ POLE A LAGUNY

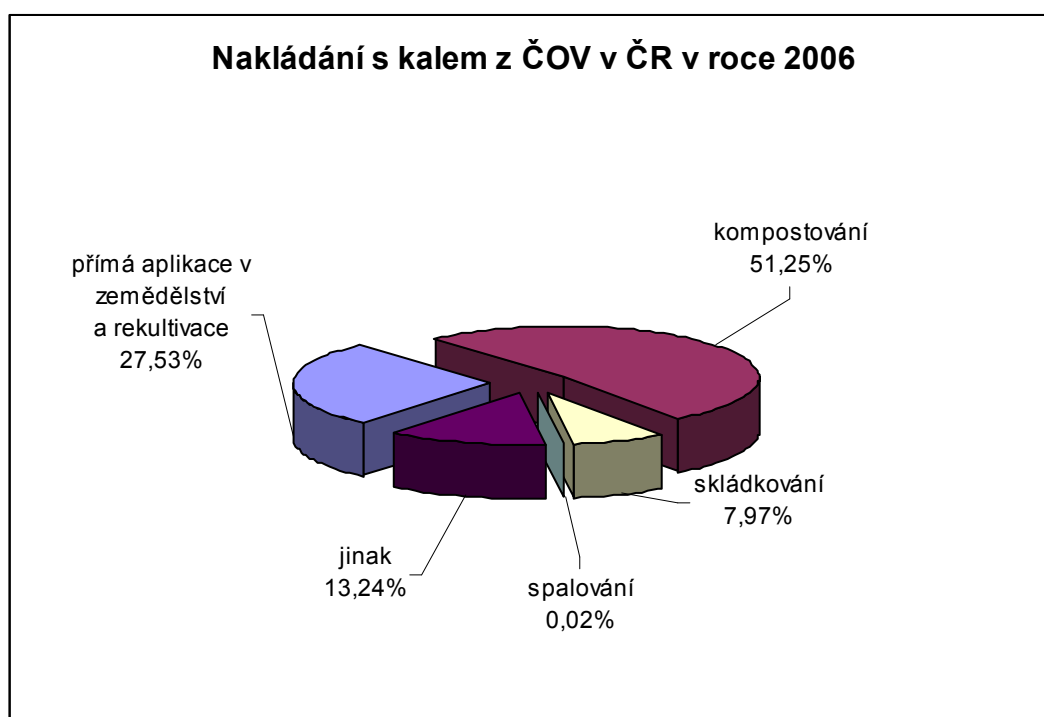
Odvodňování a skladování kalu na kalových polích a lagunách patří k jednoduchým, avšak již značně zastaralým a nevyhovujícím technologiím. V současné době je již na ústupu a při rekonstrukcích ČOV bývá nahrazováno strojním odvodněním kalu.

Kalová pole bývají tvořena vrstvou písku na drenážním betonovém dně. Na něm se nachází vrstva kalu o tloušťce 20 – 40 cm. Kalová pole jsou proto vhodná pouze pro malé produkce kalu, a to pouze stabilizovaného. Jejich účinnost z velké části závisí na klimatu.

Jako náhrada kalových polí se používají kalové laguny. Stejně jako kalová pole jsou ovšem nepoužitelná k odvodňování nestabilizovaných kalů. Nevýhodami jsou také značný požadavek na plochu, kterou laguny zabírají, a možnost kontaminace podzemních vod. Při jejich provozu hraje opět důležitou roli klima. Nápustná vrstva kalových lagun bývá 0,7 – 1,5 m. Odvodnění lze urychlit odváděním kalové vody z hladiny laguny. Cyklus odvodňování bývá asi 1 rok, avšak jeho konkrétní délka závisí na počasí. Po odvodnění se kal odtěžuje bagry a nakladači.

4 NAKLÁDÁNÍ S KALEM

Obvykle je kal po odvodnění po určitou dobu skladován přímo na ČOV na deponii. Odsud je nárazově odvážen k dalšímu zpracování. Nejrozšířenějším způsobem nakládání s kaly v ČR je aplikace v zemědělství. Používá se buď přímá aplikace, nebo kompostování. Naproti tomu termické metody zpracování kalu se u nás používají ve velice omezené míře. Přehled zastoupení jednotlivých způsobů nakládání s kalem v ČR v roce 2006 uvádí obr. 17. Kapitoly 4.1 – 4.3 a 4.5 byly zpracovány s použitím literatury [3], kapitola 4.4 s použitím [3] a [17].



Obr. 17 Nakládání s kalem z ČOV v ČR v roce 2006 [18]

4.1 UKLÁDÁNÍ KALU NA SKLÁDKU

Ukládání kalu na skládku stále patří v ČR mezi využívané způsoby likvidace kalu. V poslední době je ovšem podíl biodegradabilních odpadů na skládkách velice přísně regulován EU, neboť dochází k přímé zátěži životního prostředí. Přímě je zakázáno skládkovat nestabilizované kaly. Taktéž rostoucí poplatky za uložení na skládkách hovoří v neprospěch této likvidace kalu.

4.2 VYUŽITÍ KALU V ZEMĚDĚLSTVÍ

Stabilizované zahuštěné nebo odvodněné čistírenské kaly je vhodné přímo aplikovat na zemědělskou půdu. Kal lze využít přímo jako hnojivo nebo také k rekultivaci neplodné či devastované půdy. Kal je zdrojem organických látek, živin a v neposlední řadě také pro půdu příznivých prvků (N, P, K, Ca, Mg), v čemž spočívá

jeho hnojivý účinek. Při aplikaci kalu v zemědělství je nutno kontrolovat obsah cizorodých látek a patogenních mikroorganismů. Z tohoto důvodu je potřeba kal před použitím v zemědělství hygienizovat. Mezi nejvíce nebezpečné cizorodé látky patří chlorované látky (např. PCB, dioxiny), polyaromatické uhlovodíky, organická farmaceutika a další. Obsah těžkých kovů se v poslední době daří výrazně snižovat. V ČR je použití čistírenských kalů v zemědělství řízeno vyhláškou č. 382/2001 Sb., která je plně v souladu se směrnicemi EU.

4.3 KOMPOSTOVÁNÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Mimo přímé aplikace kalu se v zemědělství využívá také kompostování kalu. Kompostování je řízený proces, při kterém jsou za aerobních podmínek biologicky rozloženy organické látky z kalu na stabilizovaný materiál, který již není pro životní prostředí nebezpečný a může být použit ke kondicionaci půdy.

Při procesu kompostování se odvodněný kal míchá s doplňkovým organickým materiálem, který je nutný pro snížení obsahu vody a jako zdroj uhlíku. Doplňkovým materiálem bývají piliny, sláma, kůra, štěpky apod. V procesu kompostování se rozkládají organické látky ve větší míře pocházející z kalu, ale částečně také z přídavného materiálu. Hlavními destruenty jsou bakterie, které zpracují až 90 % organické hmoty. Produkty kompostování jsou H_2O , CO_2 , vzniklá biomasa a stabilizovaný kompost. Rovněž dochází k produkci tepla, a proto může teplota při nekontrolovaném procesu dosáhnout až 80 °C.

Kompostování se sestává ze tří fází. První fází je fáze rychlého rozkladu. Dochází k destrukci patogenního obsahu a úbytku hmoty. Důležitou roli zde hraje také provzdušňování kompostu, proto je třeba použít dostatečně porézní vsádku. Obsah vody v kompostu pro dobrý průběh mikrobiálních procesů by měl být 12 – 25 %. Teplota se pohybuje okolo 50 – 70 °C. Vzniká tzv. čerstvý kompost. Druhou fází je fáze stabilizace kompostu. Tato fáze je charakteristická poklesem teploty. Čerstvý kompost se stává tzv. aktivním kompostem. Poslední fází je zrání kompostu. Produktem této fáze je hotový kompost. Doba zdržení ve fázi provzdušňování je několik týdnů. Zrání probíhá i několik měsíců.

U kompostování je výhodné, že vzniká skladovatelný a prodejný produkt. Navíc ve srovnání např. se spalováním je kompostování spojeno s nízkými náklady. Jako nevýhody se jeví potřeba přídavného materiálu, potřeba velkých ploch pro skladování. Proces kompostování bývá také často spojován se zdrojem nepříjemného zápachu a v porovnání s přímou aplikací na pole je také finančně náročnější. Příklad kompostárny je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18 Kompostárna čistírenského kalu [19]

4.4 SUŠENÍ KALU

Při sušení kalu se z něj vlivem tepelné energie odstraňuje vypařováním vlhkost. Sušení je difúzní proces, při kterém přechází vlhkost z vnitřních vrstev na povrch kalu a mimo vysoušený kal. Sušení může probíhat konvekčně (přímo) a kontaktně (nepřímo). U konvekčního sušení dochází ke styku kalu se sušícím médiem. Nejčastěji je to ohřátý vzduch nebo kouřové plyny. U kontaktního sušení je teplo kalu dodáváno zprostředkovaně např. prostřednictvím termooleje. Sušení je velice energeticky náročný proces, proto je dobré kal před sušením co nejvíce odvodnit. Sušení kalu na 50 – 70 % sušiny je pouze částečné, ale obvykle již vyhovuje pro spalování nebo kompostování kalu. Obecně platí, že při snižování vlhkosti kalu se zvyšuje jeho výhřevnost a tudíž se zlepšují podmínky pro samostatné spalování kalu s produkcí tepelné energie. Pro dlouhodobé skladování kalu je nutno vysušit kal až na 90 – 95 % sušiny.

Proces sušení je potřeba provádět takovým způsobem, aby nedocházelo k lokálnímu přehřívání částic kalu. Odpařenou vodu je třeba co nejrychleji a nejúčinněji odvést z vnitřních vrstev částic a mimo vysoušený kal. Efektivita sušení je ovlivněna zejména množstvím procházejícího tepla, teplotou sušení, plochou přenosu tepla, jež by měla být co největší, a vrstvou sušeného kalu. Ta by měla být co nejtenčí. Při vysoušení kalu nastává při 50 – 60 % sušiny tzv. klišovitá fáze. Ta znamená tvorbu hrud kalu a napékání kalu na stěny sušárny. Tohoto efektu je možno se zbavit přimícháváním již vysoušeného kalu. V praxi existuje několik možných technických provedení sušáren.

U rotační bubnové sušárny je materiál vysoušen v rotujícím bubnu. Zde se materiál pomocí usměrňovacích elementů posouvá a promíchává. Jako vysoušecí médium je použit horký plyn, který proudí bubnem ve směru posouvání kalu.

Z důvodu zamezení připékání ke stěnám bubnu se odvodněný kal mísí s vratným vysušeným kalem. Příklad bubnové sušárny je uveden na obr. 19.

Pásová sušárna je tvořena děrovaným dopravním pásem, na kterém se pohybuje volně ložený kal. Vysoušecím médiem je opět horký plyn, který proudí šikmo k pásu. Mísení s vratným vysušeným kalem se u tohoto typu sušáren nepoužívá.

Ve fluidních sušárnách se kal udržuje trvale ve vznosu pomocí vzestupně proudícího horkého plynu. Vzniká fluidní vrstva, kde je velice dobrý kontakt mezi plynem a částicemi kalu. Z tohoto důvodu je také doba vysoušení kratší než u ostatních typů sušáren.

Disková sušárna patří mezi kontaktní. Sestává se z vytápěných disků upevněných na duté ose. Jejich otáčením dochází kromě lepšího přenosu tepla také k promíchávání kalu. Pro zamezení tvorby lepidivé fáze a napékání vysoušeného kalu na disky se používá mísení s vratným vysušeným kalem.



Obr. 19 Bubnová sušárna odvodněného kalu [15]

4.5 SPALOVÁNÍ KALU

Dalším způsobem nakládání s kalem je jeho spalování. V závislosti na složení a obsahu sušiny v odvodněném kalu může být spalování z energetického hlediska soběstačné. Legislativně upravuje spalování kalu zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. a zákon o ochraně ovzduší č. 86/2002 Sb. Kaly produkované ČOV je možné spalovat ve spalovnách tuhých odpadů, v teplárnách, elektrárnách, cementárnách nebo speciálních spalovnách odvodněného popř. vysušeného kalu.

Z energetického hlediska jsou u kalu určeném ke spalování důležitými faktory zejména obsah sušiny a složení kalu. U složení je nejdůležitější obsah hořlavých látek, což přímo ovlivňuje výhřevnost kalu. Vyhníly a vysušený kal mívá vlastnosti obdobné jako hnědé uhlí, a to jak svým chemickým složením, tak i výhřevností. Obvyklé hodnoty výhřevnosti pro různé druhy kalů jsou uvedeny v tab. 3.

Aktivovaný kal	20,7 – 24,4
Primární kal	23,3 – 27,9
Anaerobně stabilizovaný primární kal	22,1 – 24,4

Tab. 3 Typické hodnoty výhřevnosti kalů (MJ/kg organické sušiny) [3]

Mezi nejznámější zařízení ke spalování kalu patří etážové pece. Tyto pece mají svislý válcový reaktor o průměrech 2 – 8 m a počet etáží bývá 4 – 14. Při procesu prochází materiál postupně třemi zónami. V horní části pece je to zóna sušení, do které se přivádí odvodněný kal a zespodu proudícími spaliny se vysušuje. Teplota se v této zóně pohybuje okolo 400 °C. Ve střední a spodní části pece se nachází zóna spalování. Zde se teplota pohybuje mezi 850 – 900 °C. Nejnižší se nachází zóna popela, kde teplota obvykle nepřevyšuje 200 °C. Etážové pece jsou použitelné pro různě kvalitní spalovaný kal obvykle pouze s malým množstvím přídavného paliva. Nevýhodou je vyšší potřeba přebytku vzduchu (až 2,2násobek).

Jiným typem pece je rotační pec. Je tvořena mohutným ležatým válcem, který se pomalu otáčí. Rychlost otáčení bývá 0,25 – 1,5 ot/min. Podobně jako etážová pec potřebuje i rotační pec poměrně značné množství přebytku vzduchu (někdy až 2násobek). Dalšími nevýhodami jsou vysoké investiční a provozní náklady, prašnost a časté úniky plynu způsobené netěsnostmi.

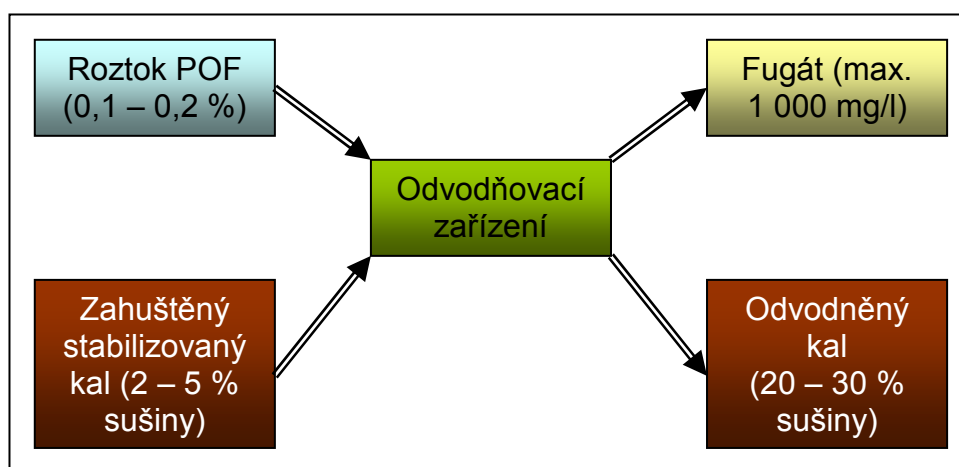
Moderní a efektivní způsob spalování kalu umožňuje fluidní pec. Ta je tvořena vertikální kolonou o výšce 6 – 10 m a průměru 3,5 – 7,0 m. V ní je umístěno fluidní pískové lože. Částice písku jsou udržovány ve vznosu vzduchem, který je vháněn do pece distributorem umístěným v její spodní části. Teplota v peci bývá 750 – 850 °C. Fluidní pec je vysoce adaptabilní vůči kvalitě spalovaného kalu a způsobu provozu. Dosahuje se vysoké účinnosti spalování, neboť fluidní lože disponuje velkou tepelnou kapacitou. Není potřeba téměř žádné přídavné palivo a stačí pouze 1,3 – 1,4násobek přebytku vzduchu.

5 MATERIÁLOVÁ BILANCE PROCESU ODVODŇOVÁNÍ

Bilance charakterizuje do procesu vstupující a z procesu vystupující proudy. Materiálová bilance popisuje průtoky a složení těchto proudů. Do procesu odvodňování vstupuje nejčastěji zahuštěný stabilizovaný kal (ZSK) a obvykle roztok POF. Z odvodňovacího zařízení vystupuje odvodněný kal a fugát.

V uvažovaném případě je kal přiváděný k odvodnění stabilizovaný a zahuštěný na obsah sušiny 2 – 5 %. Průtok kalu se nejčastěji udává v $[\text{kg}_{\text{sušiny}}/\text{h}]$ nebo $[\text{m}^3/\text{h}]$. Roztok POF bývá namíchan s vodou na koncentraci 0,1 – 0,2 %. Jeho dávkování se vztahuje na práškový POF a bývá udáváno v $[\text{g}/\text{kg}_{\text{sušiny}}]$. Měrná dávka (specifická spotřeba) POF se obvykle pohybuje v řádech jednotek $[\text{g}/\text{kg}_{\text{sušiny}}]$. Grafické znázornění materiálové bilance odvodňování je uvedeno na obr. 20.

Kal na výstupu z odvodňovacího zařízení bývá odvodněn nejčastěji na obsah sušiny 20 – 30 %. Obsah sušiny závisí na druhu a výkonu odvodňovacího zařízení, na dávkování POF a v neposlední řadě také na procesu stabilizace kalu. Dalším výstupem z odvodňovacího zařízení je fugát. Fugát je tvořen vodou vyseparovanou z kalu, která ovšem i nadále obsahuje určité množství pevných látek. Hodnotí se zde obvykle množství NL. Hodnoty obsahu NL se udávají v $[\text{mg}/\text{l}]$ a pohybují se nejčastěji v řádech stovek $[\text{mg}/\text{l}]$. Obdobně se zde setkáváme s výše popsányi závislostmi jako u obsahu sušiny v odvodněném kalu.



Obr. 20 Materiálová bilance odvodňování

5.1 UKÁZKA MATERIÁLOVÉ BILANCE

Za předpokladu, že podíl pevných látek ve fugátu představují pouze NL a hustota fugátu je $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$, byla sestavena ukázka materiálové bilance pro následující hodnoty:

- obsah sušiny v odvodněném kalu $D_{ok} = 25\%$
- obsah sušiny v ZSK $D_{sk} = 3\%$

- hmotnostní průtok sušiny ZSK $\dot{m}_{D,sk} = 100 \text{ kg}_{\text{sušiny}}/\text{h}$
- měrná dávka POF $m_F = 5 \text{ g}/\text{kg}_{\text{sušiny}}$
- obsah NL ve fugátu $m_{NL} = 500 \text{ mg}/\text{l}$
- hmotnostní koncentrace roztoku POF $x_F = 0,15 \%$

V příloze č. 2 je v programu MS Excel sestavena materiálová bilance, kde je možno tyto hodnoty měnit. Pro výpočet byly použity následující vztahy:

Vztah pro výpočet hmotnostního průtoku práškového POF je

$$\dot{m}_F = \frac{m_F \cdot \dot{m}_{D,sk}}{1000}, \quad (1)$$

kde \dot{m}_F hmotnostní průtok práškového POF [kg/h]

Vztahy pro výpočet procentuálních a hmotnostních podílů pevných látek a vody jsou

$$D_{sk} = \frac{\dot{m}_{D,sk}}{\dot{m}_{sk}} \cdot 100, \quad (2)$$

kde \dot{m}_{sk} hmotnostní průtok ZSK [kg/h]

$$\dot{m}_{sk} = \dot{m}_{D,sk} + \dot{m}_{V,sk}, \quad (3)$$

kde $\dot{m}_{V,sk}$ hmotnostní průtok vody obsažené v ZSK [kg/h]

$$D_{ok} = \frac{\dot{m}_{D,ok}}{\dot{m}_{ok}} \cdot 100, \quad (4)$$

kde $\dot{m}_{D,ok}$ hmotnostní průtok sušiny odvodněného kalu [$\text{kg}_{\text{sušiny}}/\text{h}$]

\dot{m}_{ok} hmotnostní průtok odvodněného kalu [kg/h]

$$\dot{m}_{ok} = \dot{m}_{D,ok} + \dot{m}_{V,ok}, \quad (5)$$

kde $\dot{m}_{V,ok}$ hmotnostní průtok vody obsažené v odvodněném kalu [kg/h]

$$x_F = \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_{rF}} \cdot 100, \quad (6)$$

kde \dot{m}_{rF} hmotnostní průtok roztoku POF [kg/h]

$$\dot{m}_{rF} = \dot{m}_F + \dot{m}_{VF}, \quad (7)$$

kde $\dot{m}_{V,F}$ hmotnostní průtok vody obsažené v roztoku POF [kg/h]

$$m_{NL} = \frac{\dot{m}_{NL}}{\dot{m}_{FG}} \cdot 10^6, \quad (8)$$

kde \dot{m}_{NL} hmotnostní průtok NL ve fugátu [kg/h]
 \dot{m}_{FG} hmotnostní průtok fugátu [kg/h]

$$\dot{m}_{FG} = \dot{m}_{NL} + \dot{m}_{V,FG}, \quad (9)$$

kde $\dot{m}_{V,FG}$ hmotnostní průtok vody obsažené ve fugátu [kg/h]

Vztahy pro výpočet bilance podílu pevných látek a celkové bilance jsou

$$\dot{m}_{D,sk} + \dot{m}_F - \dot{m}_{D,ok} - \dot{m}_{NL} = 0 \quad (10)$$

$$\dot{m}_{sk} + \dot{m}_{rF} - \dot{m}_{ok} - \dot{m}_{FG} = 0 \quad (11)$$

Výsledky této materiálové bilance jsou zobrazeny v tab. 4. Všechny průtoky jsou zde uvedeny jako hmotnostní. Pevnými látkami u ZSK a odvodněného kalu je myšlen obsah sušiny, u roztoku POF množství práškového POF a ve fugátu obsah NL (procentuální podíl 0,05 % odpovídá 500 mg/l).

	Vstupy				Výstupy			
	ZSK		Roztok POF		Odvodněný kal		Fugát	
	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]
Pevné látky	100,00	3,00	0,50	0,15	98,86	25,00	1,64	0,05
Voda	3233,33	97,00	332,83	99,85	296,59	75,00	3269,57	99,95
Celkem	3333,33	100,00	333,33	100,00	395,46	100,00	3271,21	100,00

Tab. 4 Materiálová bilance odvodňování v [kg/h]

Po sestavení materiálové bilance lze stanovit dělicí účinnost odvodňování, která je charakterizována poměrem průtoků sušiny odvodněného kalu a sušiny ZSK. Zbývá pevná fáze se ve fugátu vrací zpět do čistícího procesu. Pokud budeme uvažovat podíl pevné látky v roztoku POF za nepodstatný, je vztah pro výpočet dělicí účinnosti

$$\eta = \frac{\dot{m}_{D,ok}}{\dot{m}_{D,sk}} \cdot 100, \quad (12)$$

kde η dělicí účinnost odvodňování [%]

Pro výše uvedený příklad materiálové bilance je dělicí účinnost 98,86 %.

6 EXPERIMENT NA ČOV TETČICE

Experiment zkoumal odvodnitelnost kalu na ČOV Tetčice. Při tomto experimentu byl sledován vliv měrné dávky POF na obsah sušiny v odvodněném kalu. Vedle obsahu sušiny bylo sledováno i množství NL ve fugátu.

ČOV Tetčice je koncipována jako nízko zatížená mechanicko – biologická ČOV s maximálním zatížením 15 000 EO. Pro zpracování kalu se počítá s kapacitou až 18 000 EO z důvodu možného dovážení částečně upraveného kalu z okolních malých ČOV. Na přítoku na ČOV se nachází dešťová zdrž a nátokový objekt s rotačními česlemi a lapákem písku. Dále jsou zde dvě nádrže s oběhovou aktivací a dvě dosazovací nádrže. Do aktivace je dávkován roztok síranu železitého kvůli odstraňování fosforu. Přebytečný kal je čerpán k zahuštění na flotační jednotku přímo z aktivace. Zahuštěný kal je stabilizován a hygienizován ve dvou nádržích s autotermní termofilní stabilizací a aerací čistým kyslíkem. ZSK, do kterého se dává roztok POF, je odvodňován na dekantací odštědivce a ukládán na deponii. [7]

6.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE O MĚŘENÍ

Experiment byl uskutečněn na ČOV Tetčice, která je vlastněna i provozována VAS, a.s., a v laboratoři ÚPEI Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Jako odvodňovací zařízení na ČOV Tetčice je použita dekantací odštědivka DO 250, PBS Velká Bíteš, a.s. s hydraulickou kapacitou 1,5 – 3,0 m³/h a látkovou kapacitou 100 – 120 kg_{sušiny}/h. Jako POF byl použit flokulant SOKOFLOK 109SU firmy Sokoflok, s.r.o. K laboratorním analýzám byla použita tato zařízení: sušící váhy KERN MLS 50-3, s max. zatížením 50 g a přesností ±1 mg, přesné váhy SARTORIUS, s max. zatížením 555 g a přesností ±1 mg a horkovzdušná sušárna KCW-100.

6.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Měření a odběr vzorků na ČOV Tetčice probíhaly 5 dní v rozmezí od 22. do 29. ledna 2008. Byly odebírány vzorky ZSK (tj. neodvodněný kal před odštědivkou), odvodněného kalu a fugátu. Pomocí sušících vah byly průběžně vyhodnocovány sušiny jednotlivých vzorků odvodněného i neodvodněného kalu.

Z časových důvodů nebylo možné změřit obsah sušiny všech vzorků přímo na ČOV, proto byla většina vzorků spolu s fugátem převezena do laboratoře ÚPEI. Měření v laboratoři probíhalo od 29. ledna do 6. února. Byly stanoveny hodnoty NL ve fugátu a obsahy sušiny v odebraných vzorcích kalu.

6.2.1 PŘÍPRAVNÉ PRÁCE A ČASOVÝ PRŮBĚH

Před započítáním vlastního měření byli zaměstnanci ČOV obsluhující odštědivku seznámeni s požadavky, které se týkaly zejména přípravy roztoku POF. Na vyhrazeném místě byla vybudována provizorní laboratoř, kde bylo možno stanovit

obsah sušiny a teplotu kalu a fugátu. První den měření (22. ledna 2008) bylo odebráno zkušebně pouze několik vzorků.

Druhý den měření (23. ledna 2008) byl určen k monitorování běžného provozu bez jakýchkoli zásahů do průtoku ZSK či roztoku POF. V pravidelných intervalech byly odebírány vzorky ZSK, odvodněného kalu a fugátu.

Ve dnech 24., 25. a 29. ledna bylo úkolem postupně volit stavy pro koncentrace roztoku POF 0,16 %, 0,12 % a 0,20 % při různých kombinacích průtoku ZSK a roztoku POF. Tyto hodnoty koncentrací byly záměrně oddělovány jednotlivými dny proto, aby bylo zabráněno smíchání roztoků POF o různých koncentracích. Každý den byl veškerý roztok vyčerpán a k rozmíchání dalšího roztoku s jinou koncentrací došlo až následující den. ZSK byl dávkován s průtoky 70, 90 a 110 kg_{sušiny}/h. Měrná dávka práškového POF byla volena na hodnoty 3,5; 5,0; 6,5 a 8,0 g/kg_{sušiny}.

Jak ZSK, tak i roztok POF byly do procesu odvodnění dávkovány pomocí vřetenových čerpadel řízených frekvenčním měničem. Jejich průtoky byly měřeny indukčními průtokoměry v [l/s]. Z tohoto důvodu bylo před začátkem experimentu potřeba přepočítat objemové průtoky na hmotnostní průtoky sušiny kalu. K přepočtům byly použity následující vztahy:

Vztah pro přepočet průtoku ZSK je

$$\dot{V}_{sk} = \frac{\dot{m}_{D,sk} \cdot 100}{\rho_{sk}} \cdot \frac{1000}{3600}, \quad (13)$$

kde \dot{V}_{sk} průtok ZSK [l/s]
 ρ_{sk} hustota ZSK [kg/m³]

Vztah pro přepočet průtoku roztoku POF je

$$\dot{V}_{rF} = \dot{m}_{D,sk} \cdot m_F \cdot \frac{100}{x_F} \cdot \frac{1}{\rho_F} \cdot \frac{1}{3600}, \quad (14)$$

kde \dot{V}_{rF} průtok roztoku POF [l/s]
 ρ_F hustota roztoku POF [kg/m³]

Při uvažování průměrného naměřeného obsahu sušiny ZSK 2,78 % a při uvažování hustot ZSK a roztoku POF 1 000 kg/m³ se dosazením do rovnic (13) a (14) obdrží hodnoty uvedené v tab. 5 a tab. 6. Uvažovaný obsah sušiny ZSK je pouze ilustrační. Při každém změření obsahu sušiny v ZSK byly průtoky přepočítány pro tuto novou hodnotu. Jak se později ukázalo, rozptyl hodnot sušin nebyl nijak výrazný, a proto neměly tyto průběžné přepočty na výsledky měření žádný zásadnější vliv.

Hmotnostní průtok sušiny ZSK [kg _{sušiny} /h]	Průtok ZSK [l/s]
70	0,70
90	0,90
110	1,10

Tab. 5 Objemové průtoky ZSK při uvažovaném obsahu sušiny 2,78 %

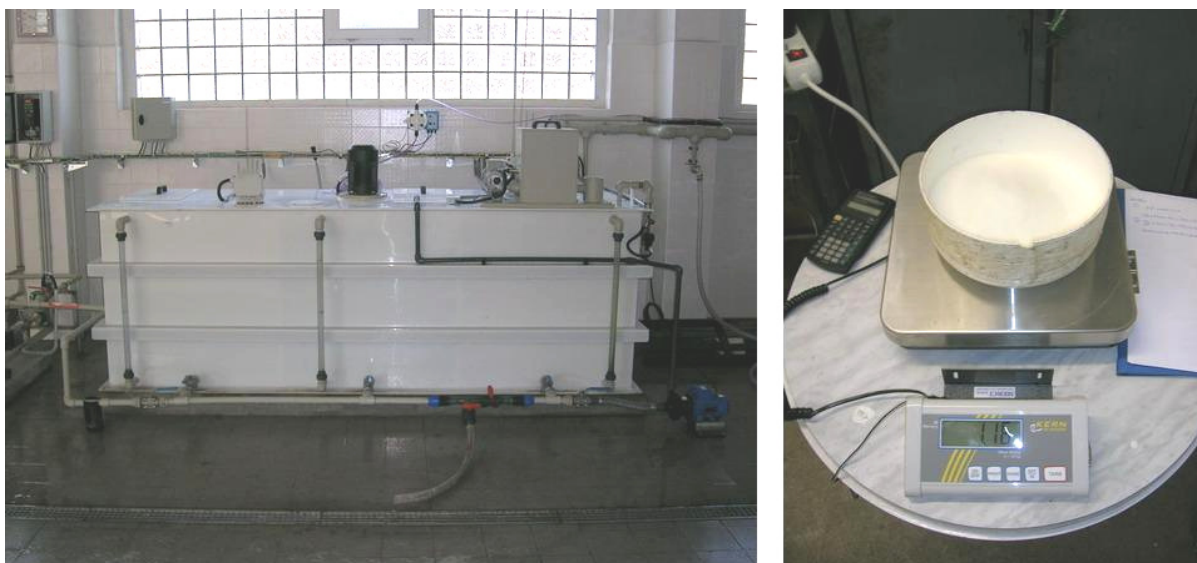
Měrná dávka POF [g/kg _{sušiny}]	Hmotnostní průtok sušiny ZSK [kg _{sušiny} /h]	Průtok roztoku POF [l/s]		
		Koncentrace roztoku POF [%]		
		0,12	0,16	0,20
3,5	70	0,057	0,043	0,034
5,0	70	0,081	0,061	0,049
6,5	70	0,105	0,079	0,063
8,0	70	0,130	0,097	0,078
3,5	90	0,073	0,055	0,044
5,0	90	0,104	0,078	0,063
6,5	90	0,135	0,102	0,081
8,0	90	0,167	0,125	0,100
3,5	110	0,089	0,067	0,053
5,0	110	0,127	0,095	0,076
6,5	110	0,166	0,124	0,099
8,0	110	0,204	0,153	0,122

Tab. 6 Objemové průtoky roztoku POF

Vzhledem k nutnosti namíchat roztok POF o určité koncentraci s co největší přesností bylo přikročeno k přeměření rozměrů nádrže pro přípravu roztoku POF. Vnitřní rozměry ($v \times š \times d$) byly stanoveny na 90 x 87,4 x 94 cm. Přičemž za rozměr v je považována výška hladiny ode dna nádrže. Po odečtení objemu míchadla a přepážek byl objem nádrže (resp. objem roztoku POF) stanoven na 755 l.

Pro koncentraci roztoku POF 0,16 % bylo tedy potřeba rozmíchat 1,210 kg práškového POF. Pro koncentraci 0,12 % 0,906 kg a pro koncentraci 0,20 % 1,510 kg práškového POF.

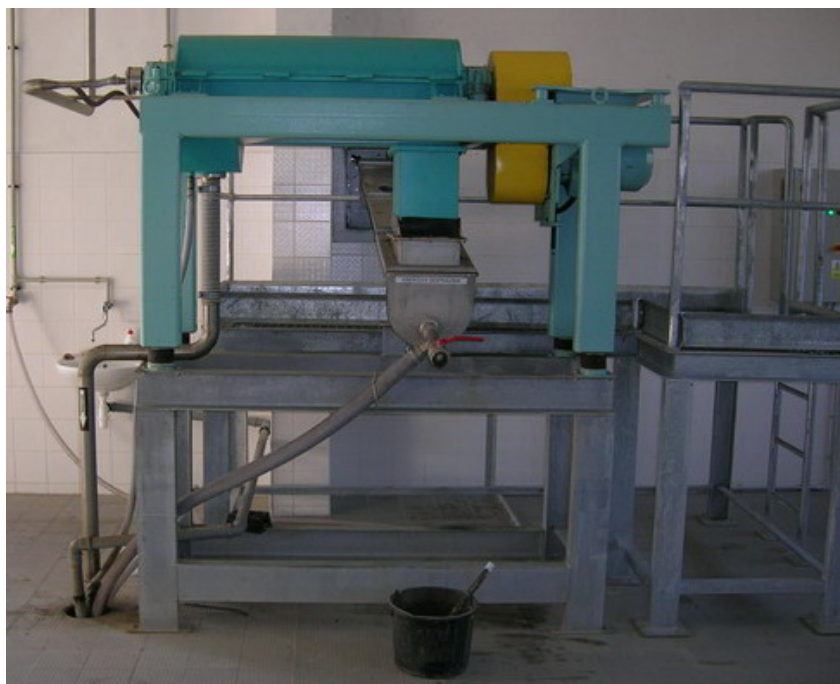
Roztok POF byl vždy ve výše uvedené nádrži míchán po dobu 1 hodiny. Poté byl roztok přečerpán do dvou akumulacních nádrží na roztok POF tvořících systém spojených nádob, které vytváří s nádrží pro přípravu roztoku POF jeden prostorový i funkční celek. Z těchto spojených nádob byl čerpán roztok POF do potrubí se ZSK a společně s ním tak přicházel na odstředivku. Nádrž na roztok POF je spolu s práškovým POF zobrazena na obr. 21.



Obr. 21 Nádrž na roztok POF (vlevo) a odvažování práškového POF (vpravo)

6.2.2 VLASTNÍ ODBĚR VZORKŮ

Při každém odběru vzorků byl odebírán vzorek ZSK, vzorek odvodněného kalu a vzorek fugátu. Odvodněný kal byl odebírán ze šnekového dopravníku těsně za odstředivkou (obr. 22). Mezi jednotlivými odběry byly voleny přestávky minimálně 20 min. z důvodu ustálení průtoku ZSK a roztoku POF po provedených změnách. Změny průtoků byly uskutečňovány pomocí frekvenčních měničů příslušných vřetenových čerpadel a průtok byl odečítán na indukčních průtokoměrech.



Obr. 22 Dekantační odstředivka se šnekovým dopravníkem

U každého odebraného vzorku byla nejprve změřena teplota rtuťovým teploměrem s přesností $\pm 0,1$ °C, poté se provedlo jeho slovní zhodnocení a pořídila se dokumentační fotografie. Vzorky ZSK a fugáty byly poté nality do uzavíratelných plastových nádob o objemu 100 až 1000 ml. Vzorky odvodněného kalu byly uloženy do uzavíratelných polyetylenových obalů. Před ukládáním vzorků do nádob či obalů bylo dbáno na jejich důkladnou homogenizaci. Po odvezení z ČOV Tetčice byly vzorky skladovány v chladničce v laboratoři ÚPEI. Odvoz vzorků do laboratoře probíhal každý den měření na ČOV.

Při každém odběru byly odečteny hodnoty na průtokoměrech ZSK i roztoku POF. Do ZSK se bohužel díky použité technologii dostává provozní voda nutná pro provoz macerátoru (obr. 23). Proto byl odečítán i stav vodoměru u macerátoru pro možnost dodatečného stanovení vlivu této provozní vody. Průběžně byla měřena i teplota roztoku POF. V mezích mezi jednotlivými odběry probíhalo sušení vzorků kalů na sušících vahách, nicméně vzhledem k časové náročnosti sušení byla přímo na místě vysušena pouze nepatrná část vzorků.



Obr. 23 Macerátor

Při měření se postupovalo následovně:

- 22. ledna 2008 – běžný provozní stav (koncentrace roztoku POF 0,16 %, průtok ZSK 0,92 l/s, průtok roztoku POF 0,09 l/s), chybně měřící digitální teploměr
- 23. ledna 2008 – běžný provozní stav, došlo však k přetečení nádrže pro přípravu roztoku POF, proto se dále pokračovalo s upravenými provozními hodnotami (koncentrace roztoku POF 0,15 %, průtok ZSK 0,87 l/s, průtok roztoku POF 0,09 l/s), při zpětném přepočtu průtoků ZSK a roztoku POF na hmotnostní průtok sušiny a měrnou dávku POF pomocí rovnic (13) a (14) se obdrží průměrné hodnoty běžného provozního stavu (průtok ZSK 95,4 kg_{sušiny}/h a měrná dávka POF 5,45 g/kg_{sušiny} při 0,16% roztoku POF)

- 24. ledna 2008 – koncentrace roztoku POF 0,16 %, měrná dávka POF vždy postupně 3,5; 5; 6,5 a 8 g/kg_{sušiny} při průtoku ZSK 70, 90 a 110 kg_{sušiny}/h
- 25. ledna 2008 – koncentrace roztoku POF 0,12 %, dávkování POF i množství ZSK obdobné jako předchozí den, pouze v případě kombinace 8 g/kg_{sušiny} POF a 110 kg_{sušiny}/h ZSK bylo z důvodu maximálního provozního výkonu čerpadla roztoku POF dosaženo hodnoty měrné dávky POF pouze 6,8 g/kg_{sušiny}
- 29. ledna 2008 – koncentrace roztoku POF 0,20 %, dávkování POF i množství ZSK opět obdobné jako předchozích 2 dnech, navíc byly ještě navoleny kombinace 10 g/kg_{sušiny} POF při 70 a 90 kg_{sušiny}/h ZSK

6.2.3 LABORATORNÍ ANALÝZY

Po ukončení odběru vzorků na ČOV se začaly ještě týž den (29. ledna) v laboratoři ÚPEI sušit vzorky kalů na sušících vahách (obr. 24) pro zjištění obsahu sušiny a začal se hledat přijatelný způsob filtrace pro stanovení NL ve fugátu.

Z každého vzorku kalu bylo k sušení odebráno asi 10 g. Před sušením odvodněného kalu bylo nutno vzorky nadělit na malé kousky z důvodu úplného vysušení kalu v celém objemu. V případech, kdy se tak nestalo, zůstal kal po odloupenutí z misky místy viditelně se stopami vlhkosti a sušící váhy neukázaly vypovídající hodnotu. ZSK byl na misku sušících vah po důkladném promíchání naléván skleněnou trubicí. Při vysoušení tohoto kalu žádné problémy nenastaly.



Obr. 24 Sušící váhy

Pro stanovení obsahu NL ve fugátu byla zvolena podtlakova filtrace na filtračním papíře ze skelných mikrovláken umístěném v Büchnerově nálevce o průměru 60 mm. Podtlak byl vyvoláván vodní vývěvou. Před filtrací byl na přesných vahách nejprve zvážen suchý filtrační papír položený na Petriho misku. Poté byla provedena vlastní filtrace. Množství filtrovaného fugátu se volilo v závislosti na čistotě fugátu

na hodnotách 10, 15 a 20 ml. Množství 10 ml bylo voleno pro fugáty s předpokládaným velkým množstvím NL, 15 ml se středním a 20 ml s malým obsahem NL. Při tomto množství nebylo možno stanovit obsah NL s přesností větší než 50 mg/l. V případě 15 ml fugátu to bylo pouze 70 mg/l a pro 10 ml fugátu jen 100 mg/l. Filtrovat větší množství fugátu se ukázalo jako nemožné, neboť docházelo k „zacpání“ filtru. Důkladně promíchaný fugát se do Büchnerovy nálevky dávkoval pomocí 10 ml pipety. Po ukončení filtrace byl filtrační papírek z Büchnerovy nálevky vyjmut a položen zpět na Petriho misku, na níž se umístil do horkovzdušné sušárny na dobu cca 30 minut. Po vyjmutí ze sušárny byl filtrační papír i s miskou opět zvážen a z rozdílu hmotností se přepočtem hned stanovil obsah NL. Postup při měření obsahu NL ve fugátu je znázorněn na obr. 25.



Obr. 25 Měření obsahu NL ve fugátu

6.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH VYHODNOCENÍ

Již v průběhu odběru vzorků na ČOV se dalo usuzovat na některé závislosti, jež se laboratorními zkouškami potvrdily. V tab. 8 jsou uvedeny kompletní výsledky měření.

6.3.1 OBSAH SUŠINY V ZAHUŠTĚNÉM STABILIZOVANÉM KALU

Měřením obsahu sušiny v ZSK bylo zjištěno, že tato hodnota je víceméně stabilní a pohybuje se v rozmezí 2,5 – 3 %, přičemž hodnoty pod 2,7 % a nad 2,9 % byly méně časté. Průměrná hodnota obsahu sušiny tohoto kalu před odvodněním byla 2,78 % se směrodatnou odchylkou 0,10 % sušiny.

Obsah sušiny v ZSK byl do jisté míry ovlivněn dodáváním malého množství provozní vody do macerátoru, která je k jeho provozu nutná. Jak již bylo uvedeno, při každém odběru se odečítal stav vodoměru této provozní vody. Díky tomu bylo možno vyhodnotit míru ovlivnění obsahu sušiny.

Vztah pro výpočet průtoku provozní vody macerátoru je

$$\dot{V}_m = 1000 \cdot \frac{V_{m,i} - V_{m,i-1}}{\Delta t}, \quad (15)$$

kde $V_{m,i}$ stav vodoměru u macerátoru při i-tém odběru vzorků daný den [m^3]
 \dot{V}_m průtok provozní vody macerátoru [l/s]
 Δt časový interval mezi odběry vzorků [s]

Vztah pro výpočet obsahu sušiny v ZSK bez ovlivnění provozní vodou macerátoru je

$$D_{sk,m} = \frac{D_{sk} \cdot \dot{V}_{sk}}{\dot{V}_{sk} - \dot{V}_m}, \quad (16)$$

kde $D_{sk,m}$ obsah sušiny v ZSK bez vlivu provozní vody macerátoru [%]

Sušina se snižuje v průměru o 0,08 %, což je hodnota menší než hodnota směrodatné odchylky. Použití provozní vody macerátoru není tedy nikterak závažné pro proces. Zkušebně byl při jednom odběru přívod vody do macerátoru uzavřen a byl naměřen obsah sušiny ZSK 2,99 % oproti sousedním hodnotám kolem 2,90 %, což potvrzuje výpočty.

Průtok provozní vody macerátoru nebyl po všechny dny stejný. V tab. 7 jsou uvedeny hodnoty obsahu sušiny a průtoky provozní vody macerátoru v jednotlivých dnech. Jak je patrné, obsah sušiny v ZSK (bez ovlivnění provozní vodou) se v průběhu měření na ČOV mírně snižoval, což bylo patrně ovlivněno procesem stabilizace kalu.

Den měření	23.1.	24.1.	25.1.	29.1.	Průměr
Průměrný obsah sušiny v ZSK (naměřený) [%]	2,85	2,87	2,70	2,71	2,78
Průměrný obsah sušiny v ZSK bez vlivu provozní vody macerátoru [%]	2,92	2,95	2,82	2,75	2,86
Rozdíl obsahu sušiny [%]	0,07	0,08	0,12	0,05	0,08
Průměrný průtok provozní vody macerátorem [l/s]	0,020	0,023	0,035	0,015	0,023

Tab. 7 Ovlivnění obsahu sušiny ZSK provozní vodou macerátoru

6.3.2 OBSAH SUŠINY V ODVODNĚNÉM KALU

Měřením obsahu sušiny v odvodněném kalu při běžném provozu byla zjištěna průměrná hodnota obsahu sušiny 24,26 %. Naměřené hodnoty se pohybovaly od 24,0 do 24,5 %. Tudíž lze považovat tyto hodnoty za stabilní a každou tuto hodnotu za reprezentativní.

Při proměnném dávkování POF byly zjištěny následující poznatky:

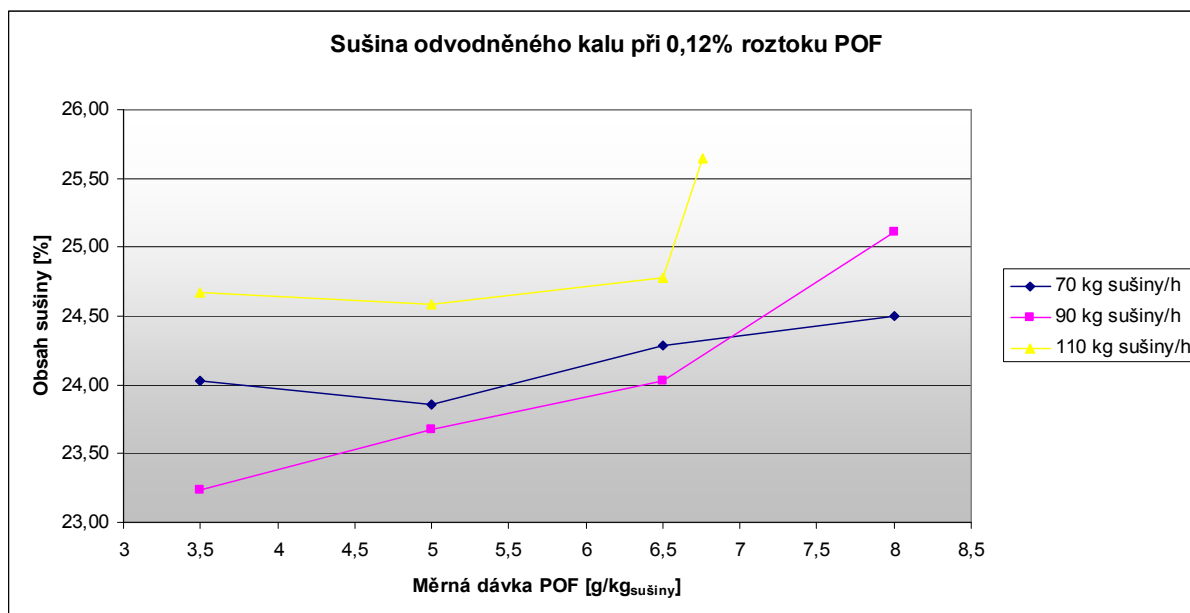
- Obsah sušiny roste se zvyšující se měrnou dávkou POF, tato závislost by se v některých případech dala dokonce přirovnat k závislosti lineární.
- Nejvyššího obsahu sušiny při dané měrné dávce POF bylo dosaženo při maximálním zatížení odstředivky 110 kg_{sušiny}/h. Křivky pro 70 a 90 kg_{sušiny}/h se většinou překrývají.
- Nejlépe projevující se závislost byla zjištěna pro 0,16% roztok POF.
- U 0,12% roztoku POF je rozdíl sušiny u dvou nejnižších měrných dávek POF a průtoku ZSK 70 a 110 kg_{sušiny}/h minimální, obsah sušiny při 3,5 g/kg_{sušiny} je dokonce vyšší než při 5 g/kg_{sušiny}.
- U 0,20% roztoku POF je dosažený obsah sušiny při dvou nejvyšších měrných dávkách POF 8 a 10 g/kg_{sušiny} téměř totožná. (Dávka 10 g/kg_{sušiny} byla provedena pouze u roztoku POF 0,20 % a průtoků ZSK 70 a 90 kg_{sušiny}/h).
- Nejvyšší dosažený obsah sušiny činil 26,04 % při měrné dávce POF 8 g/kg_{sušiny} a průtoku ZSK 110 kg_{sušiny}/h.
- Nejnižší dosažený obsah sušiny činil 22,32 % při měrné dávce POF 3,5 g/kg_{sušiny} a průtoku ZSK 70 kg_{sušiny}/h.

Závislosti jsou znázorněny na obr. 27, obr. 28 a obr. 29.

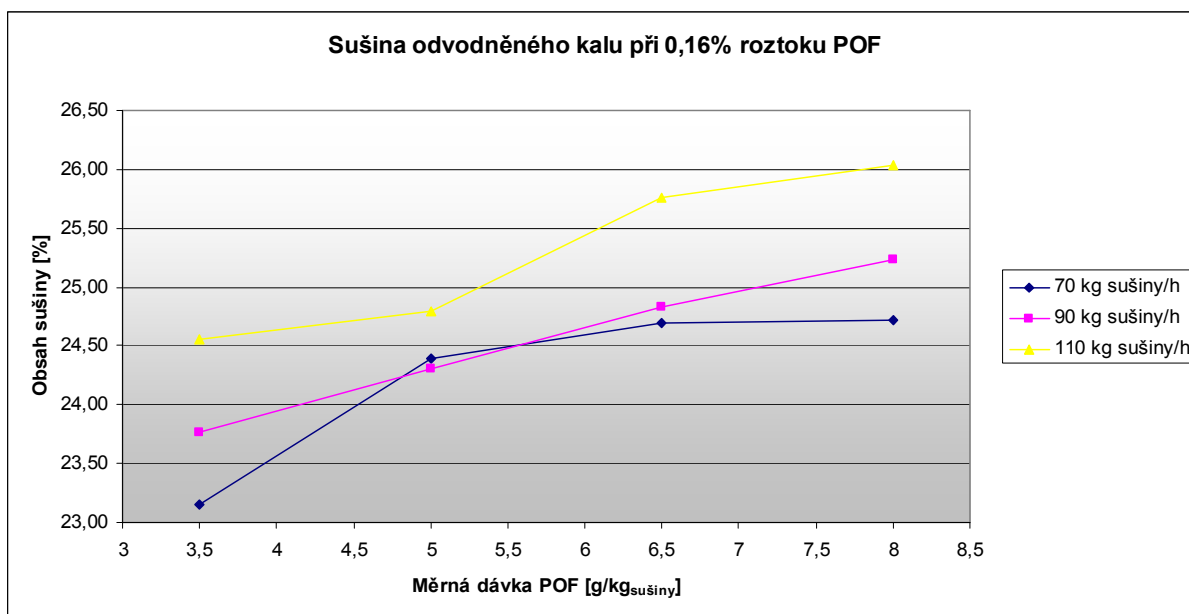
Obsah sušiny byl patrný i ze vzhledu kalu. Nižší obsah sušiny se projevoval lesklejším povrchem, lepivostí a větší tvárností. Při pohybu ve šnekovém dopravníku tvořil tento kal spojitější útvary. Naopak méně vodnatý kal se projevoval matnějším povrchem, menší lepivostí a ve šnekovém dopravníku vytvářel menší kompaktnější útvary. Vzhled kalu s nižším a vyšším obsahem sušiny je zdokumentován na obr. 26.



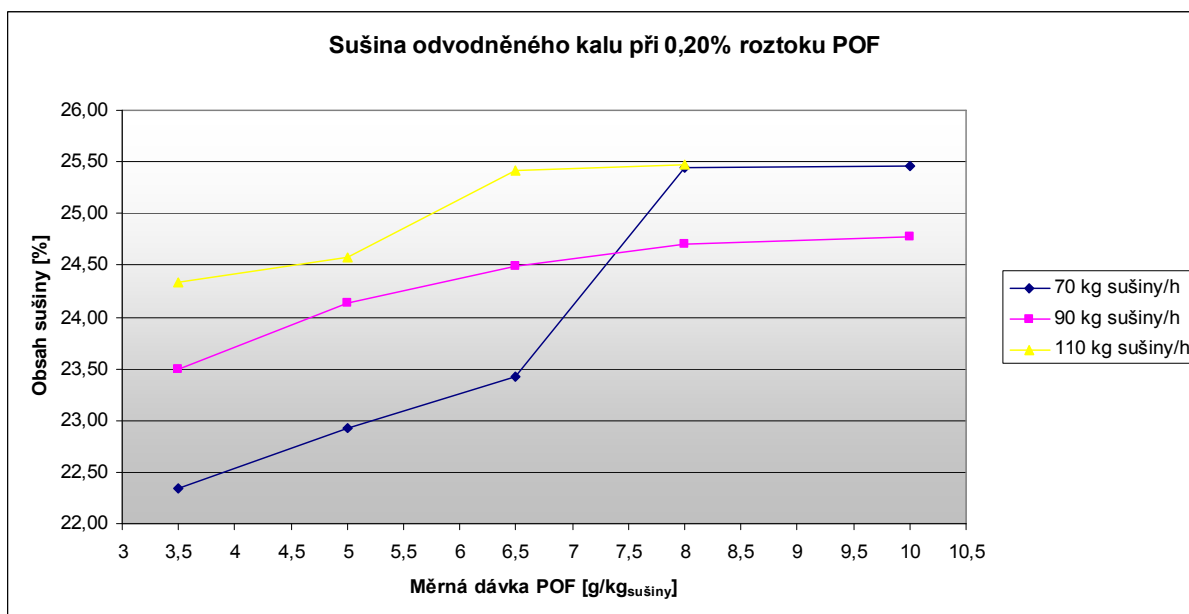
Obr. 26 Odvodněný kal s nižším (vlevo) a vyšším obsahem sušiny (vpravo)



Obr. 27 Závislost obsahu sušiny odvodněného kalu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,12% roztoku POF



Obr. 28 Závislost obsahu sušiny odvodněného kalu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,16% roztoku POF



Obr. 29 Závislost obsahu sušiny odvodněného kalu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,20% roztoku POF

6.3.3 OBSAH NEROZPUŠTĚNÝCH LÁTEK VE FUGÁTU

Měření obsahu NL ve fugátu bylo provedeno s menší přesností (důvody uvedeny v kap. 6.2.3). Poznatky jsou shrnuty do několika bodů. Výsledky analýz jsou uvedeny

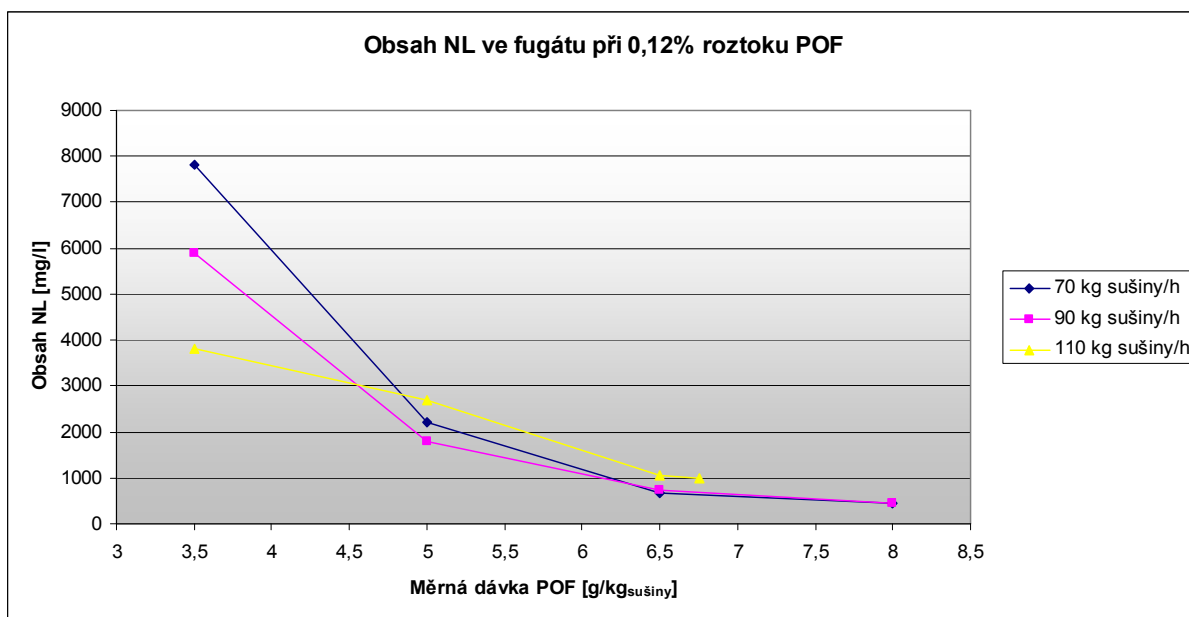
na obr. 31, obr. 32 a obr. 33 a v tab. 8. Při provozním stavu byla naměřena průměrná hodnota obsahu NL ve fugátu 1212 mg/l.

- S rostoucími měrnými dávkami POF obsah NL klesá, přičemž se rozhodně nejedná o lineární závislost. Zejména hodnoty při nejnižší měrné dávce POF 3,5 g/kg_{sušiny} se pohybují v řádu tisíců.
- Nejnižšího obsahu NL bylo dosaženo při měrné dávce POF 10 g/kg_{sušiny}.
- Obsahy NL při různých průtocích ZSK byly obdobné, pouze vždy v případě měrné dávky POF 3,5 g/kg_{sušiny} se značně lišily. Naprostou výjimku tvoří kombinace 110 kg_{sušiny}/h ZSK a 0,20% roztoku POF.

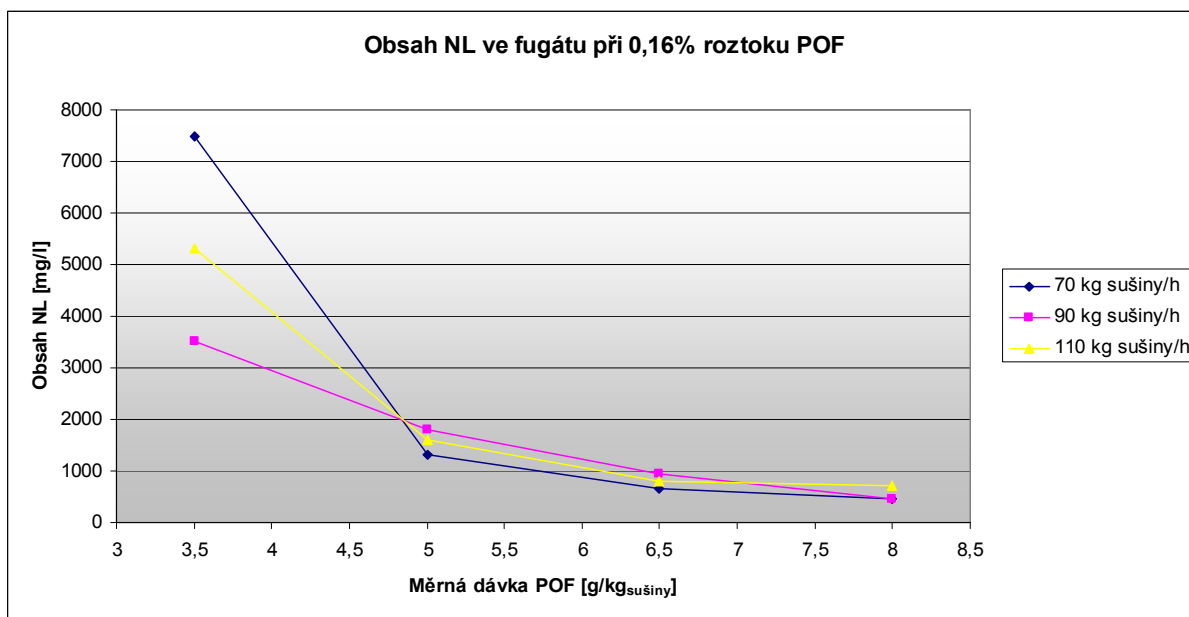
Stejně jako odvodněný kal, byl i fugát hodnocen vizuálně. Při nižším obsahu NL byl fugát méně kalný, měl světle hnědou až béžovou barvu s bílou pěnou. Naopak vyšší obsah NL se projevoval naprostou zakaleností, tmavě hnědou barvou, v případě vysokého obsahu NL dokonce téměř černou barvou. Pěna takového fugátu byla charakteristická velkými tmavými bublinami. Vzhled fugátu při nízkém a vysokém obsahu NL dokumentuje obr. 30.



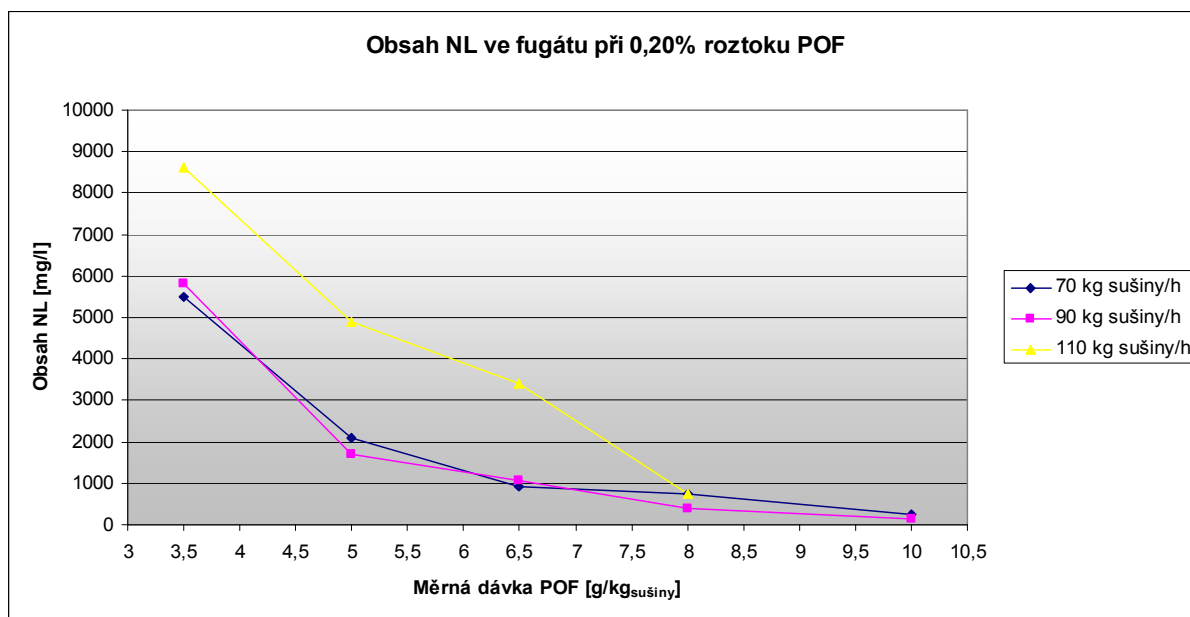
Obr. 30 Fugát s nízkým (vlevo) a vysokým obsahem NL (vpravo)



Obr. 31 Závislost obsahu NL ve fugátu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,12% roztoku POF



Obr. 32 Závislost obsahu NL ve fugátu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,16% roztoku POF



Obr. 33 Závislost obsahu NL ve fugátu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,20% roztoku POF

6.3.4 TEPLOTY KALŮ A FUGÁTU

Teplota ZSK se pohybovala mezi 23,5 – 24 °C ve dnech 23. a 24. ledna. Dne 25. ledna se teplota pohybovala okolo 22 °C a dne 29. ledna dosahovala hodnot pouze 19 – 19,5 °C. To bylo ovlivněno jak procesem stabilizace, tak i venkovní teplotou.

Teplota odvodněného kalu víceméně kopírovala průběh teploty ZSK před odvodněním. Byla ovšem téměř vždy o něco vyšší. U teplot ZSK kolem 24 °C byl tento rozdíl minimální, u teplot kolem 22 °C tento rozdíl činil v průměru 0,6 °C, avšak u teplot kolem 19 °C byl tento rozdíl již téměř 2 °C.

Teplota fugátu byla naopak vždy nižší než teplota ZSK. Stejně jako u odvodněného kalu nebyl tento rozdíl konstantní. U teplot kolem 19 °C byl rozdíl téměř nulový. U vyšších teplot činil tento rozdíl asi 1 °C.

Teplota roztoku POF se v závislosti na době zdržení v akumulární nádrži pohybovala okolo 8 – 9 °C. Čím déle byl roztok POF v této nádrži zdržen, tím byla jeho teplota vyšší.

Č. odběru	Čas (datum)	Kombinace průtoků	Stav vodoměru u macerátoru [m ³]	ZSK				Roztok POF				Odvodněný kal		Fugát	
				t [°C]	suš.[%]	průtok [l/s]	stav průtokoměru [m ³]	průtok [l/s]	stav průtokoměru [m ³]	koncentrace [%]	teplota [°C]	t [°C]	suš.[%]	t [°C]	NL[mg/l]
1	10:23 (22.1.)			31*	2,92	0,92		0,09		~0,16	~8	24*	25,28	28*	-
2	11:20			30*	2,89	0,92		0,09		~0,16	~8	28*	24,11	28*	-
3	12:59		156,8360	31*	2,86	0,93		0,089		~0,16	~8	31*	24,16	29*	900
4	13:40		156,8570	30*	2,99***	0,92	10870,07	0,089	1320,99	~0,16	~8	30*	24,21	29*	1000
5	8:49 (23.1.)		157,0590	22,5	2,77	0,93	10881,21	0,085	1322,03	0,16	8,1	21,5	24,28	21,8	800
6	9:25		157,0866	22,5	2,85	0,93	10881,36	0,084	1322,18	0,152**	~	22,5	24,25	21,5	1200
7	10:17		157,1644	24,4	2,94	0,91	10886,10	0,092	1322,49	0,152**	~	25,0	24,03	22,5	1900
8	10:55		157,2274	24,0	2,85	0,87	10888,04	0,091	1322,69	0,152**	9,9	24,8	24,35	22,5	1300
9	11:33		157,2662	24,3	2,87	0,87	10889,75	0,092	1322,88	0,152**	~	25,2	24,31	22,5	950
10	12:44		157,3714	24,6	2,84	0,87	10894,23	0,091	1323,35	0,152**	~	24,4	24,43	23,0	1260
11	13:09		157,3895	24,5	2,84	0,87	10895,01	0,092	1323,43	0,152**	~	24,2	24,50	22,9	1600
12	9:05 (24.1.)	110x8	157,5080	22,3	2,91	1,04	10899,88	0,153	1324,00	0,16	7,5	23,1	26,04	20,8	700
13	9:25	110x6,5	157,5362	24,2	2,90	1,07	10901,15	0,124	1324,15	0,16	~	24,1	25,76	23,0	800
14	9:50	110x5	157,5710	24,4	2,92	1,05	10902,70	0,095	1324,29	0,16	~	24,0	24,80	23,0	1600
15	10:10	110x3,5	157,6008	24,1	2,87	1,05	10904,01	0,067	1324,38	0,16	~	23,9	24,56	23,9	5300
16	10:30	90x8	157,6277	24,2	2,82	0,86	10905,04	0,125	1324,51	0,16	7,7	24,3	25,23	22,5	450
17	10:55	90x6,5	157,6608	23,6	2,88	0,86	10906,24	0,102	1324,66	0,16	~	23,9	24,83	22,5	950
18	11:15	90x5	157,6932	24,0	2,92	0,86	10907,49	0,078	1324,77	0,16	~	23,9	24,30	22,9	1800
19	11:40	90x3,5	157,7266	23,6	2,83	0,86	10908,69	0,055	1324,85	0,16	8,1	24,3	23,77	23,5	3500
20	12:05	70x8	157,7604	23,8	2,82	0,67	10909,70	0,097	1324,99	0,16	~	23,6	24,72	22,0	450
21	12:25	70x6,5	157,7900	23,6	2,73	0,69	10910,58	0,079	1325,10	0,16	~	22,8	24,69	22,5	800
22	12:50	70x5	157,8326	23,8	2,91	0,69	10911,58	0,061	1325,18	0,16	8,1	23,5	24,39	22,8	1300
23	13:15	70x3,5	157,8540	23,3	2,89	0,69	10912,57	0,043	1325,24	0,16	~	24,3	23,15	23,1	7500

* nefunkční digitální teploměr

** přetečení nádrže flokulantu

*** uzavřený přívod vody do macerátoru

Č. odběru	Čas (datum)	Kombinace průtoků	Stav vodoměru u macerátoru [m ³]	ZSK				Roztok POF				Odvodněný kal		Fugát	
				t [°C]	suš.[%]	průtok [l/s]	stav průtokoměru [m ³]	průtok [l/s]	stav průtokoměru [m ³]	Koncentrace [%]	teplota [°C]	t [°C]	suš.[%]	t [°C]	NL[mg/l]
24	9:10 (25.1.)	110x6,8	158,0182	22,0	2,78	1,08	10918,88	0,172	1326,02	0,12	8,7	21,7	25,65	20,5	1000
25	9:35	110x6,5	158,0690	22,6	2,84	1,08	10920,43	0,166	1326,24	0,12	~	22,5	24,78	20,8	1070
26	10:00	110x5	158,1268	22,1	2,79	1,07	10922,15	0,127	1326,46	0,12	~	22,9	24,59	21,1	2700
27	10:25	110x3,5	158,1555	22,6	2,77	1,07	10923,66	0,089	1326,59	0,12	~	23,2	24,67	21,6	3800
28	10:50	90x8	158,2312	21,1	2,68	0,87	10925,10	0,167	1326,85	0,12	~	23,4	25,11	20,0	450
29	11:20	90x6,5	158,2954	22,0	2,66	0,88	10926,70	0,134	1327,10	0,12	8,1	22,4	24,03	20,7	730
30	11:40	90x5	158,3353	21,7	2,52	0,87	10927,67	0,104	1327,21	0,12	~	22,3	23,67	21,0	1800
31	12:05	90x3,5	158,3882	21,5	2,71	0,88	10928,29	0,073	1327,32	0,12	~	22,1	23,24	21,5	5900
32	12:35	70x8	158,4655	22,0	2,71	0,69	10930,45	0,130	1327,57	0,12	8,0	22,0	24,50	20,0	450
33	13:00	70x6,5	158,5148	21,7	2,68	0,69	10931,40	0,105	1327,71	0,12	~	22,6	24,29	20,0	670
34	13:40	70x5	158,5948	22,0	2,64	0,69	10932,96	0,081	1327,94	0,12	~	22,5	23,86	20,6	2200
35	14:00	70x3,5	158,6341	22,0	2,66	0,69	10933,75	0,057	1328,00	0,12	~	23,0	24,03	21,2	7800
36	9:15 (29.1.)	110x8	158,9890	18,4	2,68	1,12	10942,05	0,122	1328,97	0,20	8,8	19,2	25,48	18,2	750
37	9:35	110x6,5	159,0130	19,5	2,75	1,13	10943,53	0,099	1329,09	0,20	~	20,5	25,41	19,5	3400
38	10:00	110x5	159,0310	19,3	2,72	1,12	10945,35	0,077	1329,21	0,20	9,1	21,7	24,57	19,5	4900
39	10:25	110x3,5	159,0470	19,3	2,71	1,12	10946,97	0,053	1329,31	0,20	~	21,8	24,34	19,6	8600
40	11:00	90x10	159,0770	19,0	2,71	0,92	10948,83	0,125	1329,53	0,20	9,3	21,0	24,77	18,5	150
41	11:20	90x8	159,0970	19,5	2,75	0,92	10949,96	0,100	1329,66	0,20	~	20,8	24,70	19,0	400
42	11:40	90x6,5	159,1170	19,5	2,74	0,92	10951,12	0,081	1329,77	0,20	~	21,5	24,49	19,1	1050
43	12:00	90x5	159,1360	19,3	2,70	0,92	10952,19	0,062	1329,85	0,20	~	21,5	24,14	19,5	1700
44	12:20	90x3,5	159,1541	19,3	2,63	0,92	10953,29	0,045	1329,90	0,20	8,7	21,2	23,49	19,5	5800
45	12:45	70x10	159,1781	19,4	2,62	0,71	10954,46	0,097	1330,02	0,20	~	21,2	25,46	18,8	250
46	13:15	70x8	159,2063	19,4	2,72	0,72	10955,70	0,078	1330,16	0,20	~	21,5	25,45	19,2	750
47	13:40	70x6,5	159,2315	19,3	2,70	0,71	10956,79	0,063	1330,26	0,20	8,9	21,5	23,42	19,2	930
48	14:05	70x5	159,2550	19,4	2,75	0,71	10957,88	0,049	1330,34	0,20	~	21,4	22,92	19,3	2100
49	14:30	70x3,5	159,2790	19,3	2,70	0,71	10958,96	0,035	1330,40	0,20	~	22,0	22,34	19,5	5500

Tab. 8 Souhrnné výsledky měření

6.4 DOPLŇKOVÁ MĚŘENÍ

Jako doplňkové měření bylo provedeno orientační změřeni hustoty ZSK a byl vyhodnocen obsah NL ve vzorku jednoho fugátu.

6.4.1 HUSTOTA ZAHUŠTĚNÉHO STABILIZOVANÉHO KALU

Pro změřeni hustoty ZSK byly vybrány vzorky č. 15, č. 18 a č. 49, tj. vzorky s rozdílným obsahem sušiny. Bylo použito nepřímé metody měření pomocí známého vzorce

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (17)$$

kde

- m hmotnost vzorku [kg]
 V objem vzorku [m³]
 ρ hustota vzorku [kg/m³]

Hmotnost vzorku byla zvážena na přesných vahách a jeho objem byl změřen v odměrném válci o objemu 100 ml s přesností $\pm 0,5$ ml. Měření probíhalo při teplotě 20 °C. Dle výsledků uvedených v tab. 9 lze považovat za správný původní předpoklad, že za hustotu ZSK je možno brát hodnotu 1 000 kg/m³.

Vzorek č.	Obsah sušiny [%]	Hustota [kg/m ³]
15	2,87	1010,56
18	2,93	1014,71
49	2,70	1005,61

Tab. 9 Hustota zahuštěného stabilizovaného kalu

6.4.2 VYHODNOCENÍ OBSAHU NEROZPUŠTĚNÝCH LÁTEK VE VZORKU FUGÁTU

Při tomto doplňkovém měření byl použit vzorek fugátu č. 17. Postup při měření byl totožný s postupem uvedeným v kap. 6.2.3, přičemž dávkované množství fugátu bylo 15 i 20 ml. Vznikl soubor hodnot uvedený v tab. 10. Průměrná hodnota obsahu NL byla zjištěna 1 088 mg/l a směrodatná odchylka 212 mg/l. Tato čísla ukazují na menší přesnost měření způsobenou zejména zvoleným postupem a dostupným laboratorním zařízením. Vzhledem k velkému rozpětí hodnot obsahu NL v jednotlivých vzorcích fugátu lze však pro stanovení závislostí považovat tuto přesnost za postačující.

č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NL[mg/l]	850	1400	1350	1330	1400	1070	950	1200	950	1000	800	1000	850

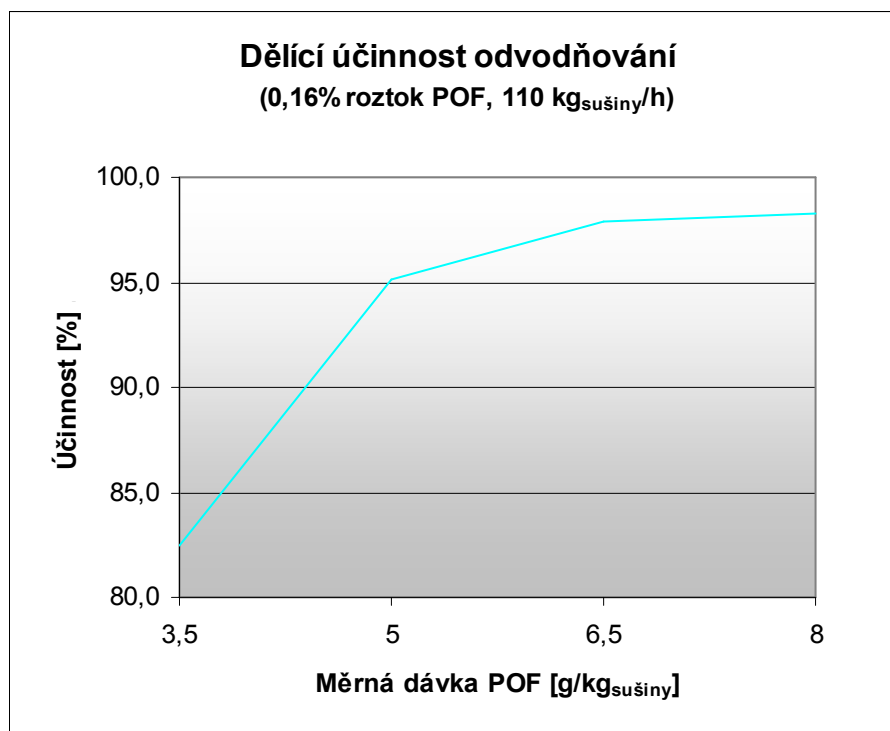
Tab. 10 Obsah NL ve fugátu č. 17

6.5 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Při měření se podařilo stanovit závislosti obsahu sušiny odvodněného kalu na množství dávkovaného POF. Potvrdil se původní předpoklad, že se zvyšující se měrnou dávkou POF obsah sušiny v odvodněném kalu poroste. Maximálního obsahu sušiny bylo dosaženo přes 26 %, přičemž to bylo s koncentrací roztoku POF 0,16 %, která se používá jako provozní, ovšem při vyšší měrné dávce POF (8,0 g/kg_{sušiny}) a vyšším průtoku ZSK (110 kg_{sušiny}/h). To je dáno i tím, že dekantáčnická odstředivka je konstruována na kapacitu 100 – 120 kg_{sušiny}/h.

Bylo zjištěno, že ZSK odchází ze stabilizační nádrže o stabilním obsahu sušiny mezi 2,5 – 3 %. Žádné větší výkyvy nebyly zaznamenány. Měření obsahu NL bylo provedeno s menší přesností. Ke stanovení závislosti obsahu NL na měrné dávce POF však bylo postačující.

Měrná dávka POF má více než na obsah sušiny v odvodněném kalu vliv na obsah NL ve fugátu. Z hlediska materiálové bilance přímo ovlivňuje dělicí účinnost odvodňování. Závislost dělicí účinnosti na měrné dávce POF při variantě 110 kg_{sušiny}/h ZSK a 0,16% roztoku POF je zobrazena na obr. 34. Dělicí účinnost byla počítána dle vztahu (12).



Obr. 34 Dělicí účinnost odvodňování

7 VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU V EKONOMICKÉ BILANCI

Na základě materiálové bilance popsané v kap. 5 a výsledků experimentu popsaného v kap. 6 bylo možno sestavit ekonomickou bilanci procesu odvodňování včetně vytvoření nákladových funkcí. Výstupem ekonomické bilance je určení nejméně nákladného, avšak technologicky přijatelného způsobu odvodňování kalu na ČOV Tetčice. Do této bilance byly započítány náklady na nákup a přípravu POF, elektrickou energii a odvoz kalu.

Při sestavování bilance byly uvažovány následující hodnoty s použitím [7], [20] a [21]:

- cena za odvoz odvodněného kalu $c_{odvoz} = 350$ Kč/t
- cena za práškový polymerní organický flokulant SOKOFLOK 109SU $c_F = 130$ Kč/kg
- cena za elektrickou energii $c_{el} = 4,76$ Kč/kWh
- cena vodného a stočného $c_{vs} = 58,76$ Kč/m³
- provozní příkon dekantační odstředivky $P = 6,1 - 6,7$ kW
- průměrná denní produkce sušiny ZSK $m_{D,sk,d} = 387,2$ kg_{sušiny}

V příloze č. 2 je v programu MS Excel sestavena ekonomická bilance, kde je možno měnit ceny za jednotlivé položky, denní produkci sušiny a výkon odstředivky.

7.1 VÝPOČET EKONOMICKÉ BILANCE

Při výpočtu ekonomické bilance byly veškeré náklady a množství vztahovány na 1 den. Byly provedeny bilance ke všem kombinacím průtoku ZSK a měrné dávky POF při koncentracích roztoku POF 0,12 %, 0,16 % a 0,20 %. Do výpočtu byly zahrnuty náklady na nákup práškového POF, přípravu roztoku POF, provoz odstředivky a odvoz odvodněného kalu. Pro zjednodušení výpočtu nákladů na elektrickou energii nebyly uvažovány náklady na provoz čerpadel, neboť rozdíly v jejich provozu při jednotlivých kombinacích průtoků by se na celkových nákladech projevíly pouze minimálně. Odstředivka má elektromotor s maximálním příkonem 12 kW. Dle sdělení výrobce se jeho provozní příkon pohybuje mezi 6,1 – 6,7 kW. Byly proto použity hodnoty 6,1; 6,4 a 6,7 kW dle průtoku sušiny ZSK. Pro 70 kg_{sušiny}/h to byla hodnota 6,1 kW, pro 90 kg_{sušiny}/h 6,4 kW a pro 110 kg_{sušiny}/h 6,7 kW.

Při experimentu na ČOV Tetčice obsahoval fugát při nižších měrných dávkách POF značné množství NL (i přes 8 000 mg/l). V takovém případě nízké dělicí účinnosti se nezanedbatelná část pevné fáze vrací ve fugátu zpět do aktivace (až 30 % pevné fáze). Proto bylo nutno sestavit materiálovou bilanci ke každé kombinaci průtoku ZSK a měrné dávky POF. Materiálová bilance byla sestavena dle

vztahů (1) až (11) uvedených v kap. 5.1. Mimo větší zatížení aktivace znamená vysoký obsah NL ve fugátu také nárůst produkce kalu v čistícím procesu, který se jako přebytečný čerpá k zahuštění a stabilizaci, a z toho plynoucí prodloužení doby odvodňování. Proto byla zavedena korigovaná denní produkce sušiny ZSK $m_{D,sk,d,korig}$ [kg_{sušiny}], která zohledňuje tento nárůst. Vztah pro její výpočet je

$$m_{D,sk,d,korig} = \frac{\dot{m}_{D,sk}}{\dot{m}_{D,ok}} \cdot m_{D,sk,d}, \quad (18)$$

Dále bylo pro výpočet ekonomické bilance použito následujících vztahů:

Vztah pro výpočet doby odvodňování denně je

$$t = \frac{m_{D,sk,d,korig}}{\dot{m}_{D,sk}}, \quad (19)$$

kde t doba odvodňování za den [h]

Vztahy pro výpočet denní spotřeby práškového POF a vody pro přípravu roztoku POF (při hustotě vody 1 000 kg/m³ a zanedbatelném množství práškového POF oproti množství vody) jsou

$$m_{F,d} = \dot{m}_F \cdot t, \quad (20)$$

kde $m_{F,d}$ spotřeba práškového POF za den [kg]

$$V_{V,d} = m_{F,d} \cdot \frac{100}{x_F} \cdot \frac{1}{1000}, \quad (21)$$

kde $V_{V,d}$ spotřeba vody pro přípravu roztoku POF za den [m³]

Vztah pro výpočet denní produkce odvodněného kalu je

$$m_{ok,d} = \dot{m}_{ok} \cdot t, \quad (22)$$

kde $m_{ok,d}$ produkce odvodněného kalu za den [kg]

Vztah pro výpočet denní spotřeby elektrické energie je

$$E_{el,d} = P \cdot t, \quad (23)$$

kde $E_{el,d}$ spotřeba elektrické energie za den [kWh]

Vztahy pro výpočet denních nákladů za jednotlivé položky jsou

$$N_{odvoz,d} = \frac{m_{ok,d}}{1000} \cdot c_{odvoz}, \quad (24)$$

kde $N_{odvoz,d}$ náklady na odvoz odvodněného kalu za den [Kč]

$$N_{F,d} = m_{F,d} \cdot c_F, \quad (25)$$

kde $N_{F,d}$ náklady na práškový POF za den [Kč]

$$N_{V,d} = V_{V,d} \cdot c_{vs}, \quad (26)$$

kde $N_{V,d}$ náklady na vodu pro přípravu roztoku POF za den [Kč]

$$N_{el,d} = E_{el,d} \cdot c_{el}, \quad (27)$$

kde $N_{el,d}$ náklady na elektrickou energii za den [Kč]

Celkové denní náklady jsou součtem denních nákladů na jednotlivé položky

$$N_{celk,d} = N_{odvoz,d} + N_{F,d} + N_{V,d} + N_{el,d}, \quad (28)$$

kde $N_{celk,d}$ celkové náklady na odvodnění kalu za den [Kč]

7.2 VÝSLEDKY EKONOMICKÉ BILANCE

Výsledky ekonomické bilance jsou prezentovány jako závislost celkových nákladů na měrné dávce POF při daných průtocích sušiny ZSK a koncentracích roztoku POF. Při zpracování výsledků byly zjištěny následující poznatky o chování jednotlivých závislostí a míře ovlivnění celkových nákladů na odvodňování kalu:

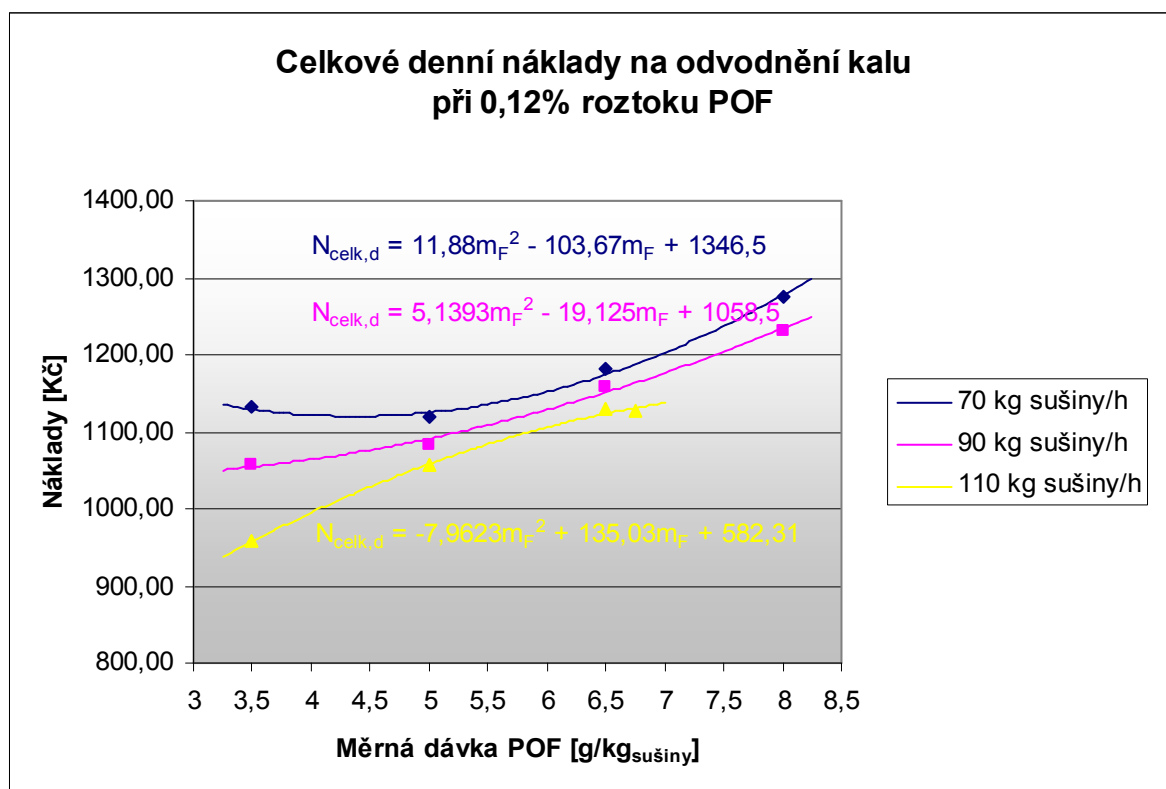
- S klesající měrnou dávkou POF a zvyšujícím se obsahem NL ve fugátu se zvyšuje korigovaná denní produkce sušiny ZSK a tím se prodlužuje doba odvodňování. Prodloužení doby odvodňování zvyšuje náklady na všechny položky vyjma nákladů na odvoz kalu. Ty nejsou na době odvodňování závislé, neboť produkce sušiny kalu je stále stejná, bez ohledu na její vnitřní recykl ve fugátu do aktivace.
- Spotřeba elektrické energie s rostoucí měrnou dávkou POF klesá, neboť je přímo úměrná době odvodňování. Dále je mírně ovlivněna zatížením odstředivky. Při vyšším zatížení je hodinová spotřeba elektrické energie vyšší, ale je dosaženo kratší doby odvodňování.
- Náklady na odvoz odvodněného kalu, které jsou nepřímo úměrné dosažené sušině, s rostoucí měrnou dávkou POF klesají, avšak jejich závislost není příliš výrazná.

- Náklady na vodu pro přípravu roztoku POF rostou se zvyšující se měrnou dávkou POF, klesající koncentrací roztoku POF a prodlužující se dobou odvodňování.
- Náklady na práškový POF jsou přímo úměrné jeho dávce a rostou také s dobou odvodňování. Spolu s náklady na vodu pro přípravu roztoku POF určují ve většině případů charakter závislosti celkových nákladů

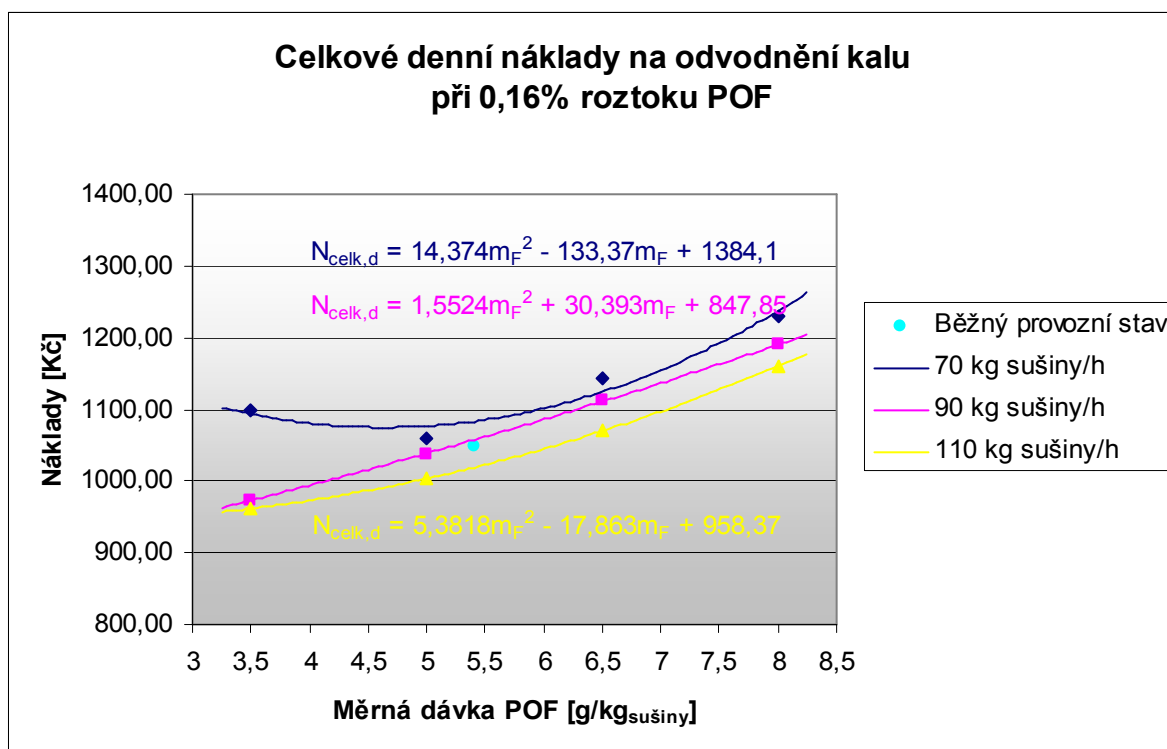
Pro všechny varianty byly pomocí regresní analýzy v softwaru MS Excel sestaveny nákladové funkce. Jako typ regrese byl zvolen polynomický tvar druhého řádu, neboť ten nejlépe vystihoval závislosti celkových nákladů na měrné dávce POF. Nákladové funkce jsou uvedeny v tab. 11 a vykresleny na obr. 35, obr. 36 a obr. 37. Výsledky nákladů u všech variant jsou uvedeny v tab. 12, tab. 13 a tab. 14. Výsledky nákladů běžného provozu jsou uvedeny v tab. 15. Grafy dílčích nákladů všech variant jsou zobrazeny v příloze č. 1.

Průtok ZSK [kg _{sušiny} /h]	Koncentrace roztoku POF		
	0,12%	0,16%	0,20%
70	$N_{\text{celk,d}} = 11,88m_F^2 - 103,67m_F + 1346,5$	$N_{\text{celk,d}} = 14,374m_F^2 - 133,37m_F + 1384,1$	$N_{\text{celk,d}} = 3,2275m_F^2 - 6,8642m_F + 1054,6$
90	$N_{\text{celk,d}} = 5,1393m_F^2 - 19,125m_F + 1058,5$	$N_{\text{celk,d}} = 1,5524m_F^2 + 30,393m_F + 847,85$	$N_{\text{celk,d}} = 4,1179m_F^2 - 11,227m_F + 996,37$
110	$N_{\text{celk,d}} = -7,9623m_F^2 + 135,03m_F + 582,31$	$N_{\text{celk,d}} = 5,3818m_F^2 - 17,863m_F + 958,37$	$N_{\text{celk,d}} = 0,6034m_F^2 + 21,075m_F + 945,23$

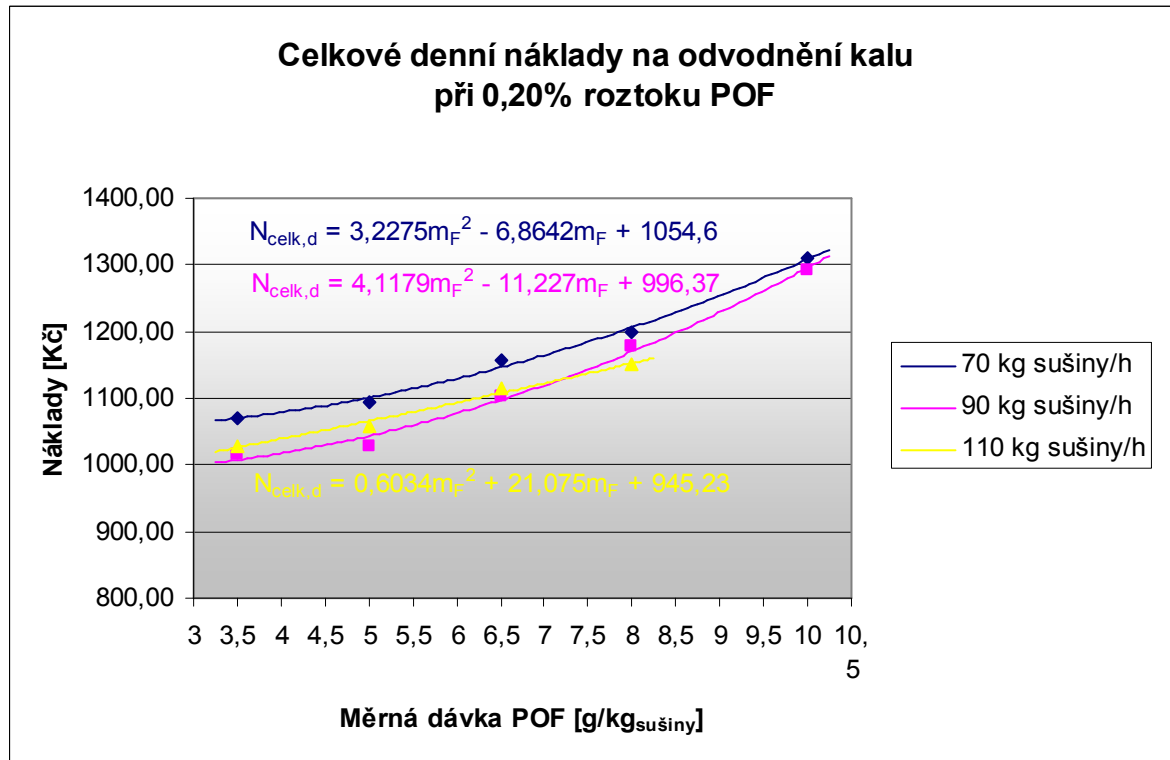
Tab. 11 Nákladové funkce



Obr. 35 Celkové denní náklady na odvodnění kalu při 0,12% roztoku POF



Obr. 36 Celkové denní náklady na odvodnění kalu při 0,16% roztoku POF



Obr. 37 Celkové denní náklady na odvodnění kalu při 0,20% roztoku POF

Měrná dávka POF (0,12% roztok)	Průtok ZSK [kg _{sušiny} /h]	Spotřeba práškového POF [kg/h]	Průtok odvodněného kalu [kg _{sušiny} /h]	Produkce odvodněného kalu [kg/h]	Korigovaná denní produkce sušiny ZSK [kg _{sušiny}]	Doba odvodňování denně [h]	Denní spotřeba práškového POF [kg]	Denní spotřeba vody na roztok POF [m ³]	Denní produkce odvodněného kalu [kg]	Denní spotřeba elektrické energie [kWh]	Denní náklady na odvoz kalu [Kč]	Denní náklady na vodu pro roztok POF [Kč]	Denní náklady na elektrickou energii [Kč]	Celkové denní náklady na odvodnění kalu [Kč]
3,5	70	0,245	49,7	207,0	544,9	7,8	1,907	1,59	1611,3	47,49	563,96	247,94	93,39	1131,32
5	70	0,350	64,5	270,2	420,4	6,0	2,102	1,75	1622,8	36,64	567,98	273,27	102,93	1118,57
6,5	70	0,455	68,6	282,6	394,9	5,6	2,567	2,14	1594,1	34,41	557,93	333,67	125,68	1181,07
8	70	0,560	69,3	282,9	391,1	5,6	3,128	2,61	1580,4	34,08	553,14	406,70	153,19	1275,24
3,5	90	0,315	71,0	305,4	491,0	5,5	1,719	1,43	1666,1	34,92	583,13	223,42	84,15	1056,91
5	90	0,450	84,0	354,8	414,9	4,6	2,075	1,73	1635,8	29,50	572,54	269,69	101,58	1084,25
6,5	90	0,585	88,0	366,3	395,9	4,4	2,573	2,14	1611,3	28,15	563,96	334,51	126,00	1158,46
8	90	0,720	89,1	354,8	391,1	4,3	3,129	2,61	1542,0	27,81	539,71	406,76	153,21	1232,06
3,5	110	0,385	95,6	387,3	445,8	4,1	1,560	1,30	1569,5	27,15	549,33	202,82	76,40	957,78
5	110	0,550	99,8	405,7	426,9	3,9	2,135	1,78	1574,6	26,00	551,12	277,51	104,53	1056,95
6,5	110	0,715	106,4	429,3	400,3	3,6	2,602	2,17	1562,6	24,38	546,89	338,29	127,42	1128,67
6,755	110	0,743	106,6	415,6	399,5	3,6	2,699	2,25	1509,6	24,33	528,34	350,83	132,15	1127,15

Tab. 12 Náklady na odvodnění kalu za den při 0,12% roztoku POF

Měrná dávka POF (0,16% roztok)	Průtok ZSK [kg _{sušiny} /h]	Spotřeba práškového POF [kg/h]	Průtok odvodněného kalu [kg _{sušiny} /h]	Produkce odvodněného kalu [kg/h]	Korigovaná denní produkce sušiny ZSK [kg _{sušiny}]	Doba odvodňování denně [h]	Denní spotřeba práškového POF [kg]	Denní spotřeba vody na roztok POF [m ³]	Denní produkce odvodněného kalu [kg]	Denní spotřeba elektrické energie [kW/h]	Denní náklady na odvoz kalu [Kč]	Denní náklady na práškový POF [Kč]	Denní náklady na vodu pro roztok POF [Kč]	Denní náklady na elektrickou energii [Kč]	Celkové denní náklady na odvodnění kalu [Kč]
3,5	70	0,245	52,6	227,4	514,9	7,4	1,802	1,13	1672,6	44,87	585,40	234,28	66,18	213,58	1099,44
5	70	0,350	67,3	275,9	402,7	5,8	2,014	1,26	1587,5	35,10	555,64	261,78	73,95	167,05	1058,42
6,5	70	0,455	68,4	277,0	396,3	5,7	2,576	1,61	1568,2	34,53	548,89	334,84	94,59	164,37	1142,68
8	70	0,560	69,4	280,8	390,5	5,6	3,124	1,95	1566,3	34,03	548,22	406,11	114,73	161,98	1231,03
3,5	90	0,315	79,7	335,2	437,4	4,9	1,531	0,96	1628,9	31,10	570,13	199,02	56,22	148,06	973,43
5	90	0,450	85,0	349,9	409,8	4,6	2,049	1,28	1593,4	29,14	557,70	266,39	75,26	138,72	1038,07
6,5	90	0,585	87,6	352,8	397,8	4,4	2,586	1,62	1559,4	28,29	545,79	336,15	94,96	134,65	1111,55
8	90	0,720	89,2	353,7	390,5	4,3	3,124	1,95	1534,7	27,77	537,14	406,12	114,73	132,18	1190,16
3,5	110	0,385	90,8	369,5	469,3	4,3	1,643	1,03	1576,5	28,59	551,79	213,55	60,33	136,07	961,74
5	110	0,550	104,7	422,0	407,0	3,7	2,035	1,27	1561,3	24,79	546,45	264,55	74,73	118,00	1003,73
6,5	110	0,715	107,7	417,9	395,6	3,6	2,572	1,61	1503,1	24,10	526,09	334,30	94,44	114,70	1069,52
8	110	0,880	108,1	415,3	393,9	3,6	3,151	1,97	1486,9	23,99	520,43	409,61	115,72	114,19	1159,95

Tab. 13 Náklady na odvodnění kalu za den při 0,16% roztoku POF

Měrná dávka POF (0,20% roztok)	Průtok ZSK [kg _{sušiny} /h]	Spotřeba práškového POF [kg/h]	Průtok odvodněného kalu [kg _{sušiny} /h]	Produkce odvodněného kalu [kg/h]	Korigovaná denní produkce sušiny ZSK [kg _{sušiny}]	Doba odvodňování denně [h]	Denní spotřeba práškového POF [kg]	Denní spotřeba vody na roztok POF [m ³]	Denní produkce odvodněného kalu [kg]	Denní spotřeba elektrické energie [kWh]	Denní náklady na odvoz kalu [Kč]	Denní náklady na práškový POF [Kč]	Denní náklady na vodu pro roztok POF [Kč]	Denní náklady na elektrickou energii [Kč]	Celkové denní náklady na odvodnění kalu [Kč]
3,5	70	0,245	56,7	253,8	477,9	6,8	1,673	0,84	1733,2	41,65	606,62	217,46	49,15	198,25	1071,48
5	70	0,350	65,2	284,6	415,5	5,9	2,078	1,04	1689,4	36,21	591,27	270,08	61,04	172,36	1094,75
6,5	70	0,455	68,1	290,8	398,0	5,7	2,587	1,29	1653,3	34,68	578,65	336,31	76,01	165,09	1156,06
8	70	0,560	68,6	269,6	395,0	5,6	3,160	1,58	1521,4	34,42	532,50	410,79	92,84	163,84	1199,96
10	70	0,700	70,0	275,0	387,1	5,5	3,871	1,94	1520,8	33,74	532,29	503,29	113,74	160,59	1309,90
3,5	90	0,315	71,3	303,6	488,7	5,4	1,710	0,86	1648,4	34,75	576,93	222,35	50,25	165,41	1014,94
5	90	0,450	85,0	352,1	410,0	4,6	2,050	1,02	1604,0	29,15	561,39	266,48	60,23	138,77	1026,87
6,5	90	0,585	87,2	356,1	399,6	4,4	2,598	1,30	1581,1	28,42	553,37	337,69	76,32	135,27	1102,65
8	90	0,720	89,4	362,0	389,8	4,3	3,118	1,56	1567,6	27,72	548,66	405,35	91,61	131,93	1177,55
10	90	0,900	90,4	364,9	385,5	4,3	3,855	1,93	1563,2	27,42	547,11	501,19	113,27	130,50	1292,07
3,5	110	0,385	76,5	314,4	556,5	5,1	1,948	0,97	1590,8	33,90	556,78	253,23	57,23	161,36	1028,59
5	110	0,550	91,2	371,2	467,0	4,2	2,335	1,17	1575,9	28,44	551,57	303,53	68,60	135,39	1059,08
6,5	110	0,715	97,2	382,5	438,2	4,0	2,848	1,42	1523,8	26,69	533,33	370,27	83,68	127,04	1114,33
8	110	0,880	107,8	423,0	395,1	3,6	3,161	1,58	1519,6	24,07	531,87	410,94	92,87	114,56	1150,25

Tab. 14 Náklady na odvodnění kalu za den při 0,20% roztoku POF

Měrná dávka POF (0,16% roztok)	Průtok ZSK [kg _{sušiny} /h]	Spotřeba práškového POF [kg/h]	Průtok odvodněného kalu [kg _{sušiny} /h]	Produkce odvodněného kalu [kg/h]	Korigovaná denní produkce sušiny ZSK [kg _{sušiny}]	Doba odvodňování denně [h]	Denní spotřeba práškového POF [kg]	Denní spotřeba vody na roztok POF [m ³]	Denní produkce odvodněného kalu [kg]	Denní spotřeba elektrické energie [kWh]	Denní náklady na odvoz kalu [Kč]	Denní náklady na práškový POF [Kč]	Denní náklady na vodu pro roztok POF [Kč]	Denní náklady na elektrickou energii [Kč]	Celkové denní náklady na odvodnění kalu [Kč]
5,45	95,4	0,520	92,0	379,0	401,7	4,2	2,187	1,37	1595,8	26,95	558,55	284,37	80,34	128,27	1051,52

Tab. 15 Náklady na odvodnění kalu za den při běžném provozním stavu

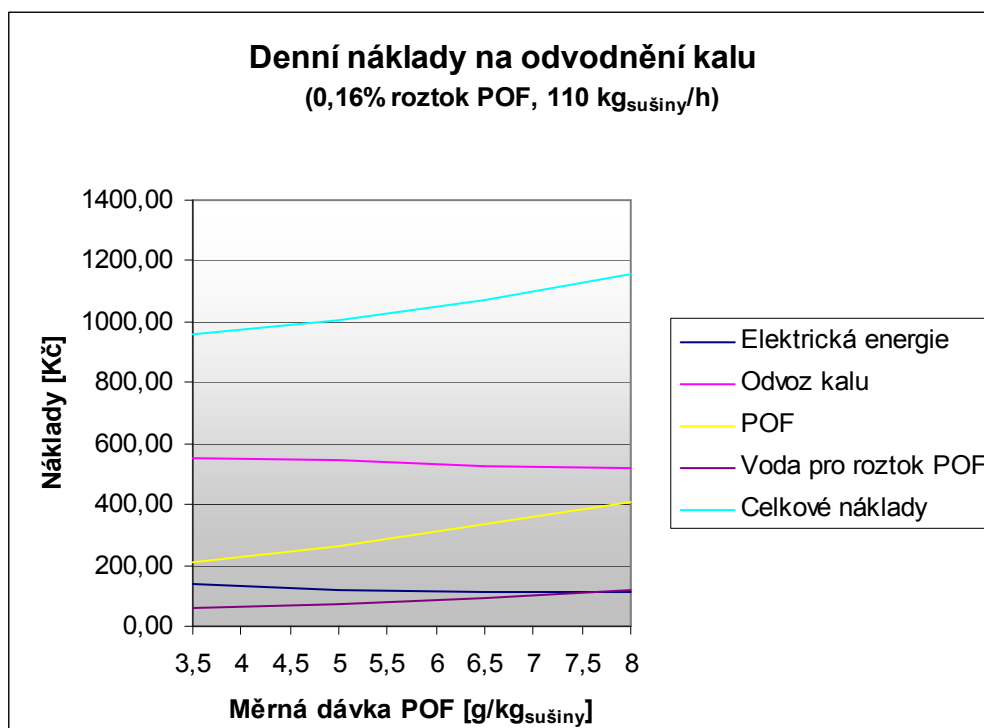
7.2.1 VOLBA NEJVHODNĚJŠÍHO ZPŮSOBU ODVODŇOVÁNÍ

Při volbě nevhodnější z posuzovaných variant je třeba mimo ekonomického hlediska posoudit danou variantu i z hlediska technologického. Zde se jedná zejména o obsah NL ve fugátu. Ten by neměl překročit hodnotu 1 000 mg/l. Proto nepřichází v úvahu žádná z variant s měrnou dávkou POF 3,5 a 5 g/kg_{sušiny}. Z ekonomického hlediska by byly nevhodnější varianty právě s měrnou dávkou POF 3,5 g/kg_{sušiny} (vyjma variant s průtokem ZSK 70 kg_{sušiny}/h při koncentracích roztoku POF 0,12 a 0,16 %). Varianty s měrnou dávkou POF 8 g/kg_{sušiny} a zejména 10 g/kg_{sušiny} by již vycházely jako ekonomicky nevhodné i při zohlednění technologického hlediska potřebné čistoty fugátu.

Bez ohledu na měrnou dávku POF a obsah NL ve fugátu lze vyhodnotit jako nejlepší možnou variantu s následujícími hodnotami:

- průtok ZSK 110 kg_{sušiny}/h (nejkratší doba odvodňování, nejvyšší dosahované sušiny, neboť právě na takové průtoky je použita dekantační odstředivka konstruována)
- koncentrace roztoku POF 0,16 % (u 0,20% roztoku POF bylo dosahováno při 110 kg_{sušiny}/h vyššího podílu NL ve fugátu, u 0,12% roztoku POF a 110 kg_{sušiny}/h naměřené obsahy sušiny v odvodněném kalu nevykazovaly příliš velkou závislost na měrné dávce POF)

Grafické znázornění dílčích nákladů u této varianty je uvedeno na obr. 38.



Obr. 38 Nejvhodnější způsob odvodňování

Nejméně výhodné by byly varianty s průtokem ZSK 70 kg_{sušiny}/h. Dále již je ve výpočtech uvažována pouze varianta s průtokem ZSK 110 kg_{sušiny}/h a koncentrací roztoku POF 0,16 %, není-li uvedeno jinak.

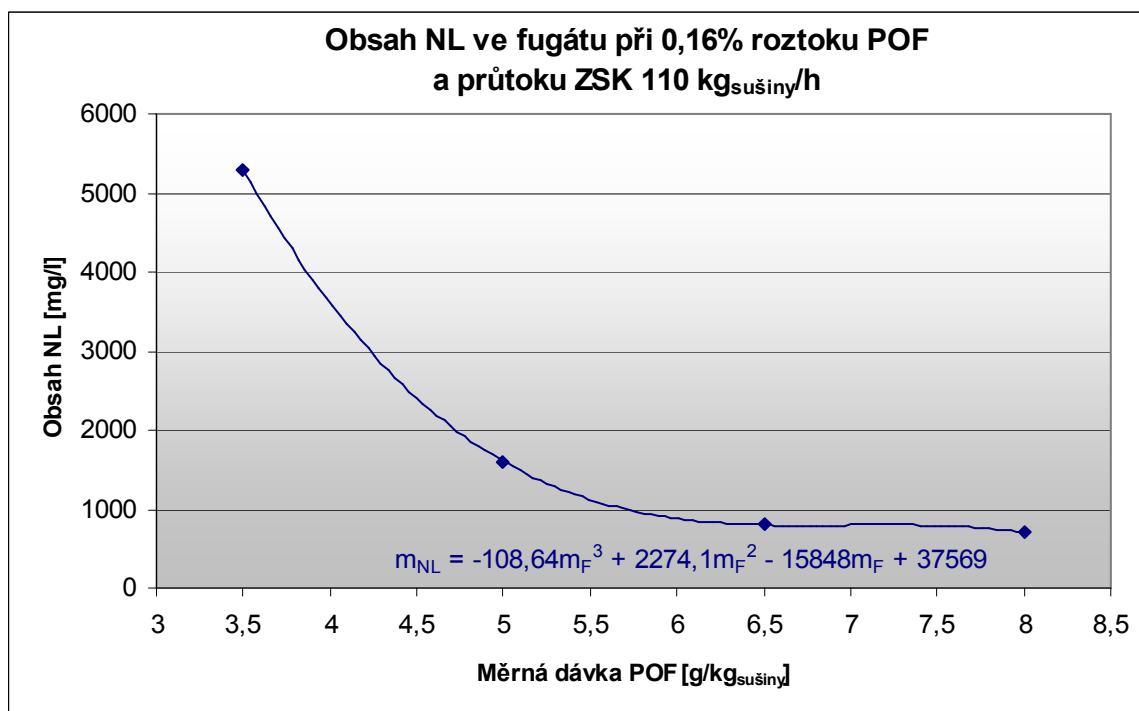
Pro odhad minimální měrné dávky POF k dosažení určitého množství NL ve fugátu byla v softwaru MS Excel sestavena regresní funkce závislosti obsahu NL na měrné dávce POF. Použitá regresní funkce má tvar

$$m_{NL} = -108,64m_F^3 + 2274,1m_F^2 - 15848m_F + 37569 \quad (29)$$

a nákladová funkce pro tuto kombinaci má tvar

$$N_{celk,d} = 5,3818m_F^2 - 17,863m_F + 958,37 \quad (30)$$

Graf funkce (29) je uveden na obr. 39.



Obr. 39 Regresní funkce závislosti obsahu NL ve fugátu na měrné dávce POF

Při stanovení obsahu NL ve fugátu na 1 000 mg/l se dosažením do rovnice (29) obdrží měrná dávka POF 5,7 g/kg_{sušiny}. K řešení této rovnice byla použita funkce „hledání řešení“ v softwaru MS Excel. Po dosažení do rovnice (30) se obdrží celkové denní náklady na odvodnění kalu ve výši 1 031,40 Kč. Oproti denním nákladům na běžný provoz, které jsou 1 051,50 Kč, je denní úspora pouze 20,10 Kč, což činí 7 336,50 Kč ročně.

Vzhledem k tomu, že průměrný obsah NL ve fugátu při běžném provozním stavu byl naměřen o něco více než 1 200 mg/l, lze uvažovat i variantu s maximálním

obsahem NL ve fugátu 1 200 mg/l. Pro ni vychází z rovnice (29) měrná dávka POF 5,4 g/kg_{sušiny} a z rovnice (30) se obdrží denní náklady na odvodnění ve výši 1 018,80 Kč, což činí denně úsporu 32,70 Kč oproti provoznímu stavu. Roční úspora by byla 11 935,50 Kč.

Pro ilustraci jsou zde uvedeny i úspory u dvou nejekonomičtějších, ovšem technologicky nevyhovujících variant s měrnou dávkou POF 3,5 g/kg_{sušiny} při koncentracích roztoku POF 0,12 % a 0,16 % a průtokem ZSK 110 kg_{sušiny}/h. Při 0,16% roztoku POF by činila roční úspora 32 777,00 Kč a při 0,12% roztoku POF 34 200,50 Kč.

8 ZÁVĚR

Dávkování polymerního organického flokulantu hraje při strojním odvodňování kalu důležitou roli. S jeho vyšší měrnou dávkou se zvyšuje obsah sušiny v odvodněném kalu. Při experimentu prováděném na ČOV Tetčice se obsah sušiny v odvodněném kalu v závislosti na měrné dávce POF a průtoku zahuštěného stabilizovaného kalu pohyboval od 22 do 26 %. Menšího podílu sušiny bylo dosahováno při nízké měrné dávce POF (3,5 g/kg_{sušiny}) a nižším průtoku ZSK (70, případně 90 kg_{sušiny}/h). Naopak vyššího podílu sušiny bylo dosahováno při vysoké měrné dávce POF (8, případně 10 g/kg_{sušiny}) a vyšším průtoku ZSK (110 kg_{sušiny}/h). Lepších výsledků při 110 kg_{sušiny}/h bylo dosahováno z toho důvodu, že právě na toto zatížení je odstředivka na ČOV Tetčice konstruována. Vzhledem k nepřilíživému rozpětí naměřených hodnot obsahu sušiny odvodněného kalu lze konstatovat, že měrná dávka POF obsah sušiny v odvodněném kalu neovlivňuje nijak zásadně.

Zásadnější vliv má měrná dávka POF na obsah NL ve fugátu. Na ČOV Tetčice se při nízké měrné dávce POF (3,5 g/kg_{sušiny}) pohyboval nejčastěji nad hodnotou 5 000 mg/l a výjimkou nebyly ani hodnoty okolo 8 000 mg/l. Takové hodnoty jsou z technologického hlediska nepřijatelné, neboť se ve fugátu vrací zpět do biologického procesu čištění až třetina produkce sušiny ZSK. Při vysoké měrné dávce POF (10 g/kg_{sušiny}) bylo dosahováno obsahu NL jen kolem 200 mg/l. Při optimálním provozu by měl být obsah NL ve fugátu do 1 000 mg/l. Toho se podařilo při experimentu dosáhnout až při měrných dávkách POF vyšších než 5 g/kg_{sušiny}. Dávkování POF tedy zásadním způsobem ovlivňuje obsah NL ve fugátu a z pohledu materiálové bilance dělicí účinnost odvodňování.

POF značnou měrou ovlivňuje také náklady na odvodňování kalu. Do ekonomické bilance je třeba započítat náklady na nákup práškového POF i náklady na přípravu roztoku POF. Právě tyto náklady přímo spojené s POF byly při sestavování ekonomické bilance dominantní a ve velké míře určovaly charakter závislosti celkových nákladů na odvodňování na měrné dávce POF. Nejnižších nákladů na odvodňování kalu by tedy bylo dosaženo při nejnižší měrné dávce POF (3,5 g/kg_{sušiny}), vyjma dvou případů s nižším průtokem ZSK (70 kg_{sušiny}/h), a to i při delší době odvodňování způsobené navracením velkého množství sušiny zpět do čistícího procesu. Nejvhodnější koncentrace roztoku POF je stávající provozní koncentrace 0,16 %. Jako nejvhodnější volba průtoku sušiny ZSK se i z ekonomického hlediska ukázala 110 kg_{sušiny}/h. Z hlediska spotřeby energie je zde rozhodující nejkratší doba odvodňování a z hlediska nákladů na odvoz odvodněného kalu nejvyšší dosažený obsah sušiny.

Jestliže bude omezen obsah NL ve fugátu na hodnotu 1 000 mg/l, bude třeba při nejméně nákladné variantě dávkovat minimálně 5,7 g/kg_{sušiny} POF při koncentraci 0,16 % a průtoku ZSK 110 kg_{sušiny}/h. Úspory oproti běžnému provoznímu stavu tak budou činit zhruba 7 300 Kč ročně. Pokud bude hodnocen jako přijatelný obsah NL ve fugátu 1 200 mg/l, neboť stávající provozní stav jej dokonce překračuje, tak by měrná dávka POF byla 5,4 g/kg_{sušiny} a roční úspory by při výše zmíněné konfiguraci činily asi 12 000 Kč. Výsledky této práce tak mohou sloužit k optimalizaci provozu kalové koncovky na ČOV Tetčice.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Vladimír Pytl a kolektiv: *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod*. 1. vydání, Praha, 2004. 209 s. ISBN 80-239-2528-8
- [2] Michal Dohányos, Jan Koller, Nina Strnadová: *Čištění odpadních vod*. 1. vydání. Praha, 1998. 177 s. ISBN 80-7080-207-3
- [3] *Kalové hospodářství čistíren odpadních vod*, [online]. Praha: VŠCHT Praha. Zveřejněno dne: 2. 10. 2007. [cit. 2008-03-24]. Dostupné z www: <http://web.vscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc>
- [4] *ČOV Brno – Modřice*, [online]. Brno: Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., 2005. [cit. 2008-01-13]. Dostupné z www: <<http://www.bvk.cz/page.jsp?lang=cz&firstLevel=29&secondLevel=43&thirdLevel=45>>
- [5] Říhová Ambrožová, J.: Aktivovaný kal. Z *Encyklopedie hydrobiologie : výkladový slovník* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2007. [cit. 2008-03-24]. Dostupné z www: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-006/ebook.html?p=A007>
- [6] *Uspořádání technologické linky ČOV*, [online]. Praha: VŠCHT Praha. Zveřejněno dne: 29. 2. 2007. [cit. 2008-03-24]. Dostupné z www: <<http://web.vscht.cz/starad/html/Uspořádání%20technologické%20linky%20ČOV.ppt>>.
- [7] Foller, J., Jelínek, J., Miklánková, J.: Hygienizace a stabilizace čistírenských kalů čistým kyslíkem – zkušenosti z ročního provozu ČOV Tetčice. In *7. mezinárodní konference ODPADNÍ VODY – WASTEWATER 2007, Brno, 18. – 20. 9. 2007*. s. 209 – 216. ISBN 978-80-239-9618-0
- [8] Dohányos, Michal: *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. Biom.cz [online]. 2006-05-09 [cit. 2007-12-20]. Dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=1888405>>. ISSN: 1801-2655
- [9] Lubomír Mazel, Miloš Pokorný: *Vodárny a čistírny*. 2. přepracované vydání, VUT, Brno 1992. 149 s. ISBN 80-214-0473-6
- [10] Medek, J.: *Hydraulické pochody*. 3. vyd. Brno: VUT Brno, 2000. 339 s. ISBN 80-214-0563-5
- [11] *Možné postupy výpočtu ekvivalentních obyvatel (EO)*, [online]. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, 2006. [cit. 2008-01-15]. Dostupné z www: <<http://www.ochranaprirody.cz/res/data/080/011447.doc>>.
- [12] *Nařízení vlády č. 61/2003 Sb.*, [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství. Zveřejněno dne: 29. 1. 2003. [cit. 2008-03-29]. Dostupné z www: <http://www.mze.cz/attachments/61_03.pdf>.

- [13] *Čistírny odpadních vod KUNST*, [online]. Hranice: KUNST, spol. s.r.o. 2007. [cit. 2008-03-29]. Dostupné z www: <<http://www.kunst.cz/typizovana-vyroba/cov-kunst/>>.
- [14] Kořenové čistírny odpadních vod (KČOV), [online]. 2007. [cit. 2008-03-29]. Dostupné z www: <<http://kcov.wz.cz/KCOV.php>>.
- [15] *Product Guide* [online]. Graz: Andritz Environment & Process Technologies, 2008. [cit. 2008-03-25]. Dostupné z www: <<http://www.andritz.com/ep/ep-products-main.htm>>.
- [16] *Kalové a plynové hospodářství čistíren odpadních vod*, [online]. Zveřejněno dne 3. 11. 2004. [cit. 2008-04-19]. Dostupné z www: <http://water.fce.vutbr.cz/zamestnanci/hlavinek/download/cisteni_OV/prednasky/COV_09.pdf>.
- [17] Hyžík, Jaroslav: *Technologické možnosti zpracování čistírenských kalů*. Odpady.ihned.cz [online]. Zveřejněno dne: 8. 12. 2006 [cit. 2008-03-25]. Dostupné z www: <http://odpady servis.ihned.cz/c4-10005080-19924430-E00000_d-technologicke-moznosti-zpracovani-cistirenskych-kalu>.
- [18] *Produkce kalů a způsob jejich zneškodnění v čistírnách odpadních vod podle krajů v roce 2006 (v t sušiny)*, [online]. *Statistická ročenka Hlavního města Prahy 2007*. Praha: Český statistický úřad. Zveřejněno dne: 1.7.2007. [cit. 2008-03-30]. Dostupné z www: <<http://www.czso.cz/xa/edicniplan.nsf/kapitola/13-1101-07-2007-02>>.
- [19] Vostal, Dalibor: *Konference o kompostování čistírenských kalů v Polsku*. Biom.cz [online]. 2004-10-27 [cit. 2008-03-30]. Dostupné z www: <<http://biom.cz/index.shtml?x=208109>>. ISSN: 1801-2655.
- [20] *Produkty a ceny elektřiny* [online]. E.ON StandartPower, 2008. [cit. 2008-03-30]. Dostupné z www: <http://www.eon.cz/cs/customers/companies/power_products/small_business/standardpower.shtml>.
- [21] *Vývoj vodného a stočného ve VODÁRENSKÉ AKCIOVÉ SPOLEČNOSTI, a.s. 2008* [online]. Vodárenská akciová společnost, a.s., 2008. [cit. 2008-03-30]. Dostupné z www: <<http://www.vodarenska.cz/3ceny2.htm>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
ASK	anaerobně stabilizovaný kal
BSK	biochemická spotřeba kyslíku
ČOV	čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
EO	ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
KČOV	kořenová čistírna odpadních vod
NL	nerozpuštěné látky
PCB	polychlorované bifenyly
POF	polymerní organický flokulant
SSK	směsný surový kal
ÚČOV	ústřední čistírna odpadních vod
ÚPEI	Ústav procesního a ekologického inženýrství
VAS	Vodárenská akciová společnost
ZSK	zahuštěný stabilizovaný kal

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
c_{el}	cena za elektrickou energii	Kč/kWh
c_F	cena za práškový POF SOKOFLOK 109SU	Kč/kg
c_{odvoz}	cena za odvoz odvodněného kalu	Kč/t
c_{vs}	cena vodného a stočného	Kč/m ³
D_{ok}	obsah sušiny v odvodněném kalu	%
D_{sk}	obsah sušiny v ZSK	%
$D_{sk,m}$	obsah sušiny v ZSK bez vlivu provozní vody macerátoru	%
$E_{el,d}$	spotřeba elektrické energie za den	kWh
m	hmotnost vzorku	kg
$m_{D,sk,d}$	průměrná denní produkce sušiny ZSK	kg _{sušiny}
$m_{D,sk,d,korig}$	korigovaná denní produkce sušiny ZSK	kg _{sušiny}
m_F	měrná dávka POF	g/kg _{sušiny}
$m_{F,d}$	spotřeba práškového POF za den	kg
m_{NL}	obsah NL ve fugátu	mg/l
$m_{ok,d}$	produkce odvodněného kalu za den	kg
$\dot{m}_{D,sk}$	hmotnostní průtok sušiny ZSK	kg _{sušiny} /h
$\dot{m}_{D,ok}$	hmotnostní průtok sušiny odvodněného kalu	kg _{sušiny} /h
\dot{m}_F	hmotnostní průtok práškového POF	kg/h
\dot{m}_{FG}	hmotnostní průtok fugátu	kg/h
\dot{m}_{NL}	hmotnostní průtok NL ve fugátu	kg/h
\dot{m}_{ok}	hmotnostní průtok odvodněného kalu	kg/h
\dot{m}_{rF}	hmotnostní průtok roztoku POF	kg/h
\dot{m}_{sk}	hmotnostní průtok ZSK	kg/h
$\dot{m}_{V,F}$	hmotnostní průtok vody obsažené v roztoku POF	kg/h
$\dot{m}_{V,FG}$	hmotnostní průtok vody obsažené ve fugátu	kg/h
$\dot{m}_{V,ok}$	hmotnostní průtok vody obsažené v odvodněném kalu	kg/h
$\dot{m}_{V,sk}$	hmotnostní průtok vody obsažené v ZSK	kg/h
$N_{celk,d}$	celkové náklady na odvodnění kalu za den	Kč
$N_{el,d}$	náklady na elektrickou energii za den	Kč

$N_{F,d}$	náklady na práškový POF za den	Kč
$N_{odvoz,d}$	náklady na odvoz odvodněného kalu za den	Kč
$N_{V,d}$	náklady na vodu pro přípravu roztoku POF za den	Kč
P	provozní příkon dekantační odstředivky	kW
t	doba odvodňování za den	h
V	objem vzorku	m ³
$V_{m,i}$	stav vodoměru u macerátoru při i-tém odběru vzorků	m ³
$V_{V,d}$	spotřeba vody pro přípravu roztoku POF za den	m ³
\dot{V}_m	průtok provozní vody macerátoru	l/s
\dot{V}_{rF}	průtok roztoku POF	l/s
\dot{V}_{sk}	průtok ZSK	l/s
x_F	hmotnostní koncentrace roztoku POF	%
Δt	časový interval mezi odběry vzorků	s
η	dělicí účinnost odvodňování	%
ρ	hustota vzorku	kg/m ³
ρ_F	hustota roztoku POF	kg/m ³
ρ_{sk}	hustota ZSK	kg/m ³

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dešťová zdrž	9
Obr. 2 Hrubé česle	10
Obr. 3 Usazovací nádrže [4].....	11
Obr. 4 Aktivační a kruhové dosazovací nádrže [4]	12
Obr. 5 Schéma velké čistírny odpadních vod	14
Obr. 6 Úbytek organické hmoty v sušině při anaerobní stabilizaci [3]	16
Obr. 7 Anaerobní stabilizační nádrž (vlevo) a zásobníky bioplynu (vpravo)	17
Obr. 8 Model typizované malé ČOV [13].....	21
Obr. 9 Počet KČOV v ČR [14]	22
Obr. 10 Příklad KČOV [14]	22
Obr. 11 Model dekantační odstředivky [15]	23
Obr. 12 Rámový kalolis [9]	24
Obr. 13 Komorový kalolis [9]	25
Obr. 14 Technická provedení komorových kalolisů [15].....	26
Obr. 15 Sítopásový lis [15]	26
Obr. 16 Bubnový vakuový filtr s odběrem koláče pomocí tlakového vzduchu a nože [9].....	27
Obr. 17 Nakládání s kalem z ČOV v ČR v roce 2006 [18].....	29
Obr. 18 Kompostárna čistírenského kalu [19].....	31
Obr. 19 Bubnová sušárna odvodněného kalu [15]	32
Obr. 20 Materiálová bilance odvodňování	34
Obr. 21 Nádrž na roztok POF (vlevo) a odvažování práškového POF (vpravo).....	40
Obr. 22 Dekantační odstředivka se šnekovým dopravníkem	40
Obr. 23 Macerátor	41
Obr. 24 Sušící váhy.....	42
Obr. 25 Měření obsahu NL ve fugátu	43
Obr. 26 Odvodněný kal s nižším (vlevo) a vyšším obsahem sušiny (vpravo).....	46
Obr. 27 Závislost obsahu sušiny odvodněného kalu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,12% roztoku POF	46
Obr. 28 Závislost obsahu sušiny odvodněného kalu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,16% roztoku POF	47

Obr. 29 Závislost obsahu sušiny odvodněného kalu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,20% roztoku POF	47
Obr. 30 Fugát s nízkým (vlevo) a vysokým obsahem NL (vpravo)	48
Obr. 31 Závislost obsahu NL ve fugátu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,12% roztoku POF	49
Obr. 32 Závislost obsahu NL ve fugátu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,16% roztoku POF	49
Obr. 33 Závislost obsahu NL ve fugátu na průtoku ZSK a měrné dávce POF při 0,20% roztoku POF	50
Obr. 34 Dělicí účinnost odvodňování	54
Obr. 35 Celkové denní náklady na odvodnění kalu při 0,12% roztoku POF	58
Obr. 36 Celkové denní náklady na odvodnění kalu při 0,16% roztoku POF	59
Obr. 37 Celkové denní náklady na odvodnění kalu při 0,20% roztoku POF	59
Obr. 38 Nejvhodnější způsob odvodňování	63
Obr. 39 Regresní funkce závislosti obsahu NL ve fugátu na měrné dávce POF	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Druhy kalů v čistírenském procesu	12
Tab. 2 Orientační hranice schopnosti zahuštění a odvodnění čistírenského kalu [1]	19
Tab. 3 Typické hodnoty výhřevnosti kalů (MJ/kg _{organické sušiny}) [3].....	33
Tab. 4 Materiálová bilance odvodňování v [kg/h]	36
Tab. 5 Objemové průtoky ZSK při uvažovaném obsahu sušiny 2,78 %	39
Tab. 6 Objemové průtoky roztoku POF	39
Tab. 7 Ovlivnění obsahu sušiny ZSK provozní vodou macerátoru	44
Tab. 8 Souhrnné výsledky měření.....	52
Tab. 9 Hustota zahuštěného stabilizovaného kalu	53
Tab. 10 Obsah NL ve fugátu č. 17.....	53
Tab. 11 Nákladové funkce.....	58
Tab. 12 Náklady na odvodnění kalu za den při 0,12% roztoku POF	60
Tab. 13 Náklady na odvodnění kalu za den při 0,16% roztoku POF	61
Tab. 14 Náklady na odvodnění kalu za den při 0,20% roztoku POF	62
Tab. 15 Náklady na odvodnění kalu za den při běžném provozním stavu	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Grafické znázornění dílčích nákladů na odvodnění kalu

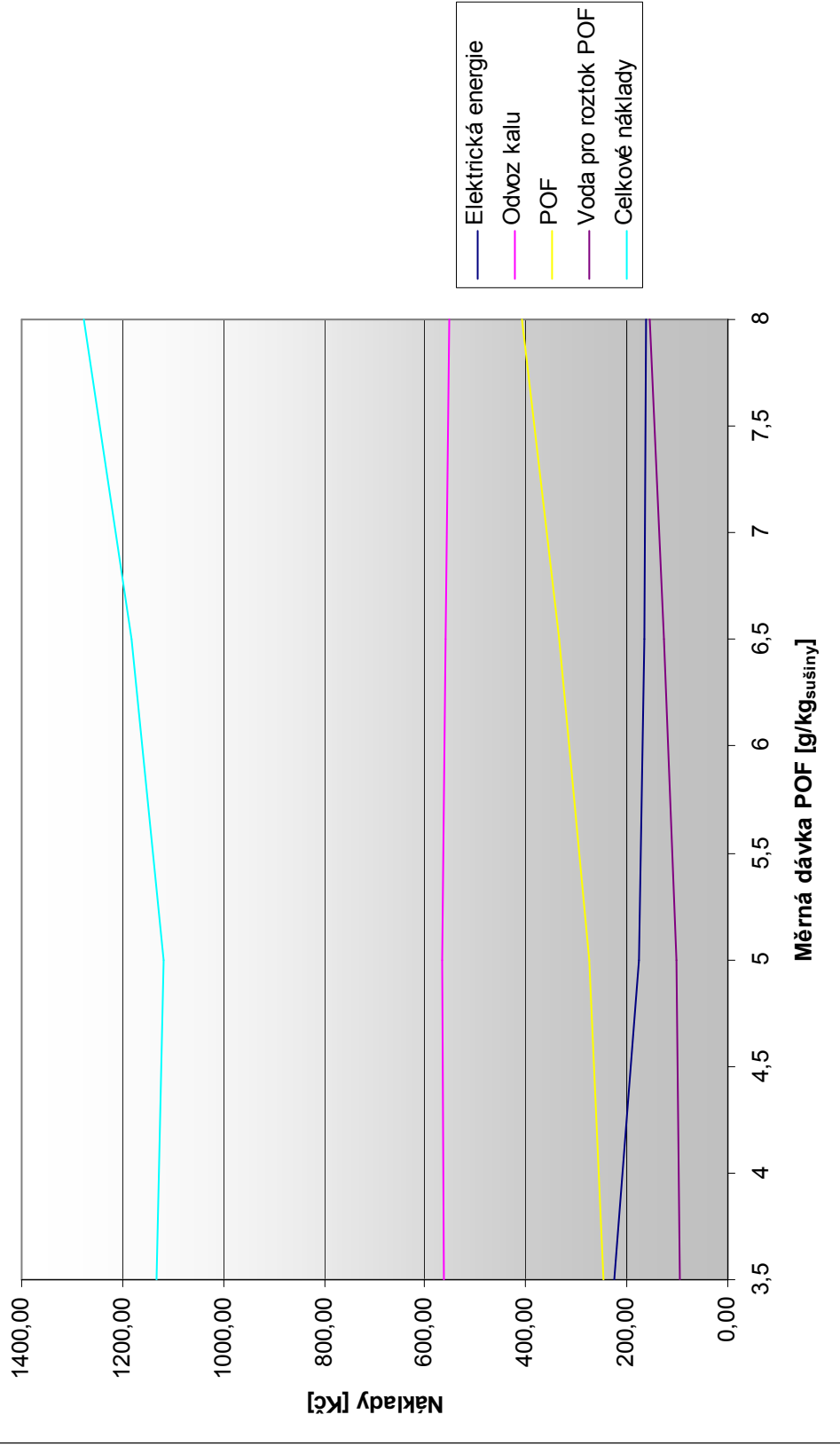
Příloha č. 2: CD obsahující:

- a) diplomovou práci v elektronické formě
- b) výsledky experimentu na ČOV Tetčice a výpočet materiálové a ekonomické bilance v programu MS Excel

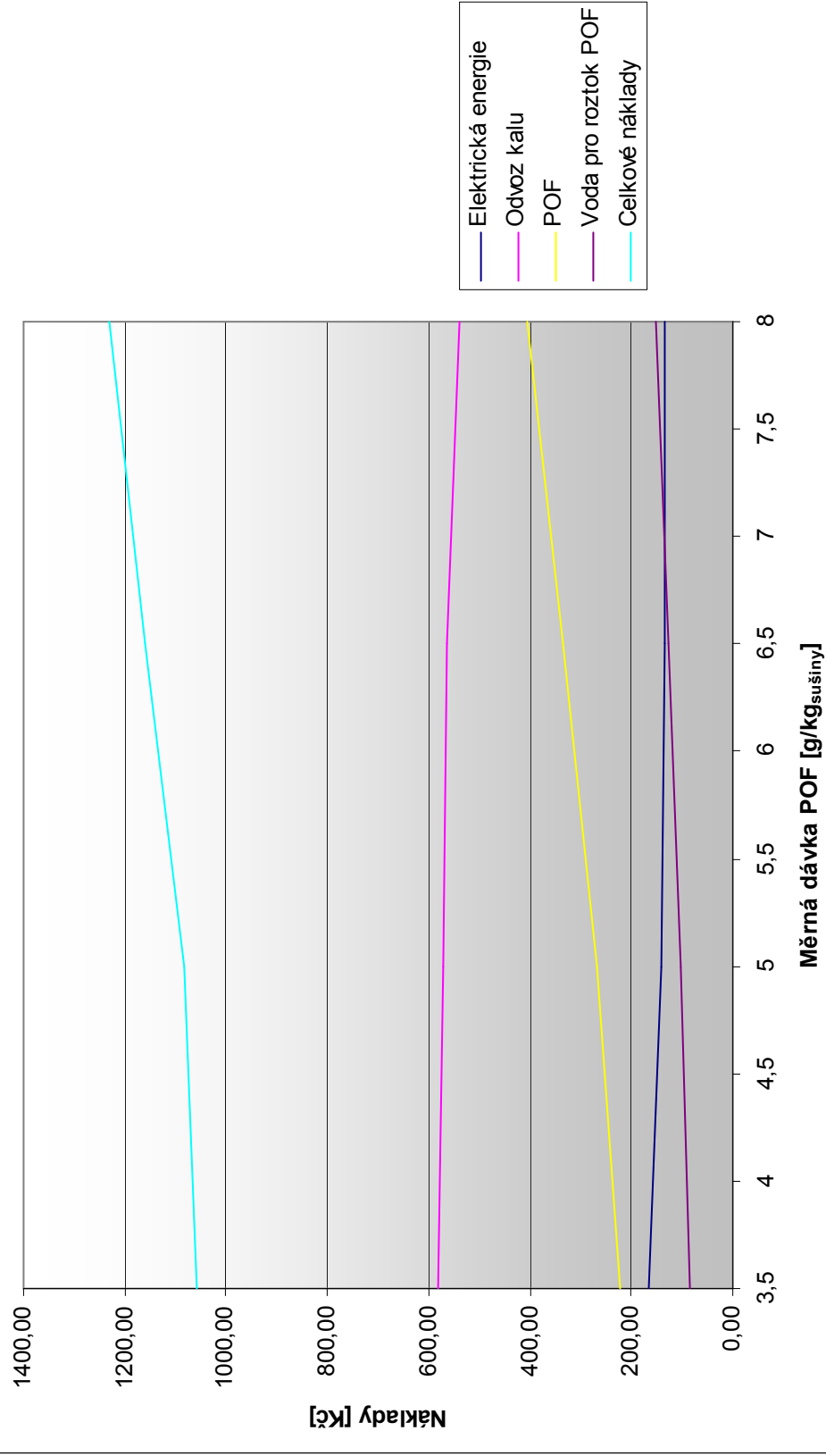
PŘÍLOHA Č. 1

GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DÍLČÍCH NÁKLADŮ NA
ODVODNĚNÍ KALU

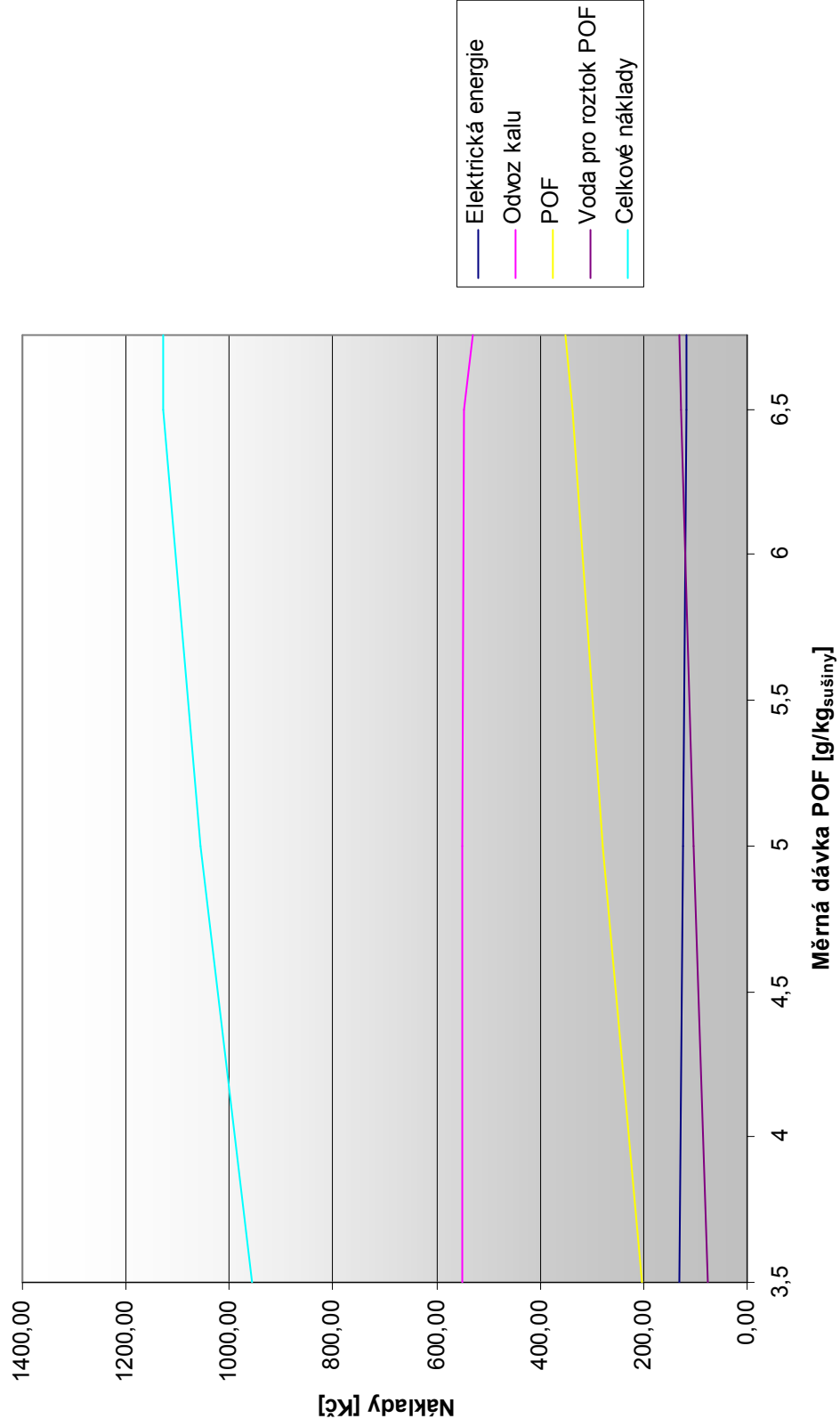
Denní náklady na odvodnění kalu
(0,12% roztok POF, 70 kg_{sušiny}/h)

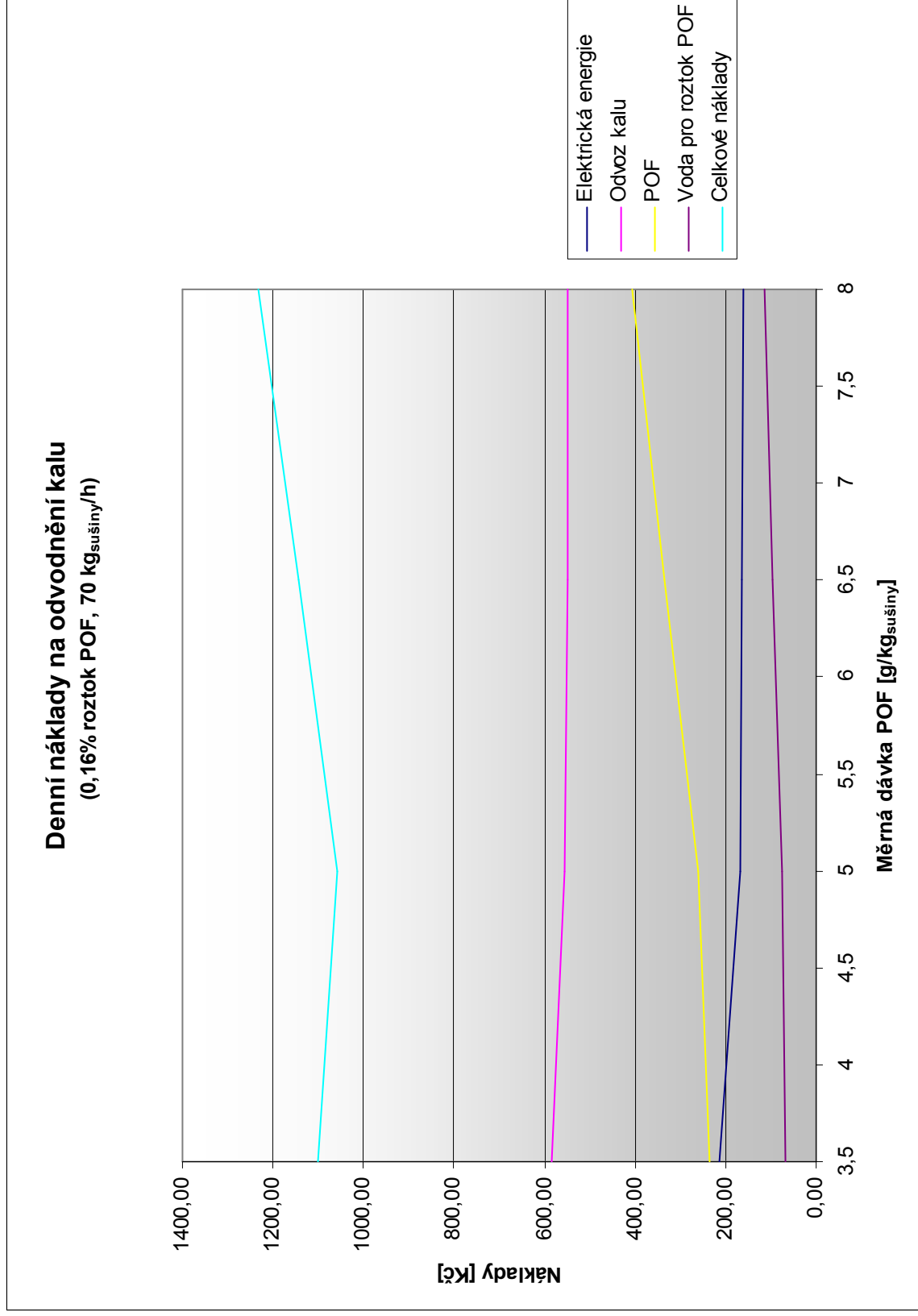


Denní náklady na odvodnění kalu
(0,12% roztok POF, 90 kg_{sušiny}/h)

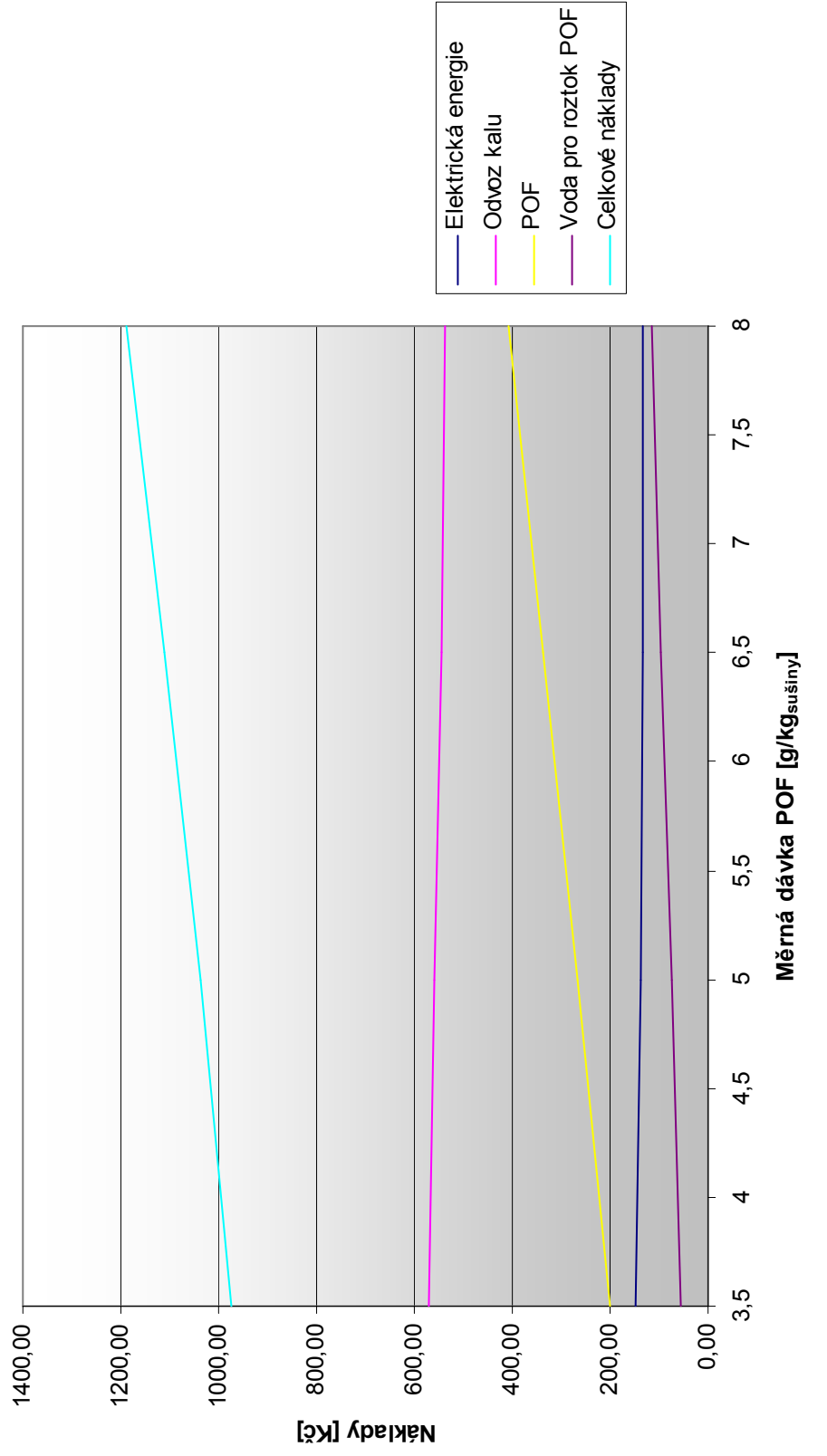


Denní náklady na odvodnění kalu
(0,12% roztok POF, 110 kg_{sušiny}/h)





Denní náklady na odvodnění kalu
(0,16% roztok POF, 90 kg_{sušiny}/h)



Denní náklady na odvodnění kalu
(0,16% roztok POF, 110 kg_{sušiny}/h)

