

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 TERMICKÉ DEZINTEGRACE KALU NA JEHO DALŠÍ ZPRACOVÁNÍ

DEPENDENCE OF SLUDGE THERMAL PRE-TREATMENT ON ITS DEWATERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. ZDENĚK ŽERAVA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV BORÁŇ, Ph.D.

## Zadání

## ABSTRAKT

První část diplomové práce je věnována problematice produkce kalů, přehledně hodnotí nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. Jsou zde uvedeny faktory ovlivňující výběr způsobů nakládání s kaly a porovnání nakládání s kaly v ČR a v ostatních zemích EU. Dále je popsána kompletní čistírenská linka a nastíněn popis zpracování kalu z oblasti kalového hospodářství. Podrobně je zpracována dezintegrace kalu a popsány nejúčinnější způsoby dezintegrace.

Druhá část popisuje experimentální část dezintegrace čistírenských kalů. Experiment byl proveden ve školní laboratoři způsobem termické dezintegrace v dvouplášťové tlakové nádobě. Dezintegrace byla prováděna za teploty 60, 90, 120, 150 a 180 °C. Byla sledována závislost obsahu sušiny na teplotě dezintegrace a obsah nerozpuštěných látek ve fugátu. Podle zpracovaných výsledků je možné zvolit optimální teplotu dezintegrace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

čistírna odpadních vod, nakládání s kaly, dezintegrace, obsah sušiny, filtrace, centrifuga, nerozpuštěné látky, fugát

## ABSTRACT

The first part of the thesis is focused on the problems related to sludge and evaluates sludge disposal from waste treatment plants. The thesis mentions factors influencing method selection of sludge disposal as well as it compares sludge disposal in the Czech Republic and in the other states of the EU. It describes a complete waste treatment line and sludge disposal in the area of sludge treatment and disposal. It deals with sludge disintegration and describes the most effective methods of disintegration.

The second part of the thesis describes an experimental part of disintegration of waste treatment sludge. An experiment was conducted in the school laboratory in a way of thermal disintegration in the double-surface pressure tank. The disintegration was conducted to temperatures of 60 °C, 90 °C, 120 °C, 150 °C, and 180 °C. We monitored dependence of the sludge dry residue content on disintegration temperature as well as content of suspended solids in liquid fraction (FUGAT). It was possible to choose optimal temperature of disintegration in accordance with processed results.

## KEYWORDS

Waste treatment plant, sludge disposal, disintegration, sludge dry residue content, filtration, suspended solids, liquid fraction.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Žerava, Z.: *Vliv termické dezintegrace kalu na jeho další zpracování*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

.....

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jaroslavu Boráňovi, Ph.D. a Ing. Thomasu Elsässerovi za odborné vedení a podporu při vypracování této diplomové práce.

## Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	9
Seznam grafů.....	9
Přehled zkratk a symbolů .....	10
1. Úvod .....	11
2. Zjednodušený popis ČOV.....	12
2.1. Mechanické čištění.....	12
2.1.1 Hlavní nátokový objekt .....	12
2.1.2 Hrubé předčištění .....	13
2.1.3 Usazovací nádrže .....	14
2.2 Biologické čištění .....	15
2.2.1 Aktivační nádrže.....	15
2.2.2 Dosazovací nádrže .....	16
2.3 Kalové a plynové hospodářství.....	16
2.3.1 Zahušťování kalu, flotační jednotka.....	17
2.3.2 Vyhnívací nádrže .....	17
2.3.3 Uskladňovací nádrž.....	18
2.3.4 Stabilizace kalu .....	18
2.3.5 Odvodnění kalu, sušení kalu .....	19
2.3.6 Hygienizace kalu.....	19
2.3.7 Plynojemy .....	20
2.3.8 Odsíření .....	20
2.3.9 Kogenerace.....	20
3. Legislativa nakládání s kaly.....	21
3.1 Zemědělství.....	22
3.2 Kompostování .....	23
4. Způsoby nakládání s kalem.....	24
4.1 Přímá aplikace do půdy v zemědělství .....	25
4.2 Kompostování .....	25
4.3 Rekultivace .....	26
4.4 Termické zpracování kalů.....	26
4.5 Sušení.....	28
4.6 Skládkování.....	28
4.7 Alternativní a méně používané způsoby nakládání s kalem.....	28
4.8 Způsoby nakládání s kalem v zemích EU.....	29
5. Materiálová bilance kalu .....	32

6.	Možnosti dezintegrace kalu .....	35
6.1	Termická dezintegrace .....	38
6.2	Dezintegrace ultrazvukem .....	39
7.	Experimentální část.....	41
7.1	Základní údaje o měření zahuštěného nestabilizovaného kalu .....	41
7.2	Popis měření dezintegrace kalu .....	43
7.3	Výsledky měření a jejich vyhodnocení u ZNK I a ZNK II .....	47
7.3.1	Obsah sušiny u ZNK .....	47
7.3.2	Hodnoty CST u ZNK .....	48
7.3.3	Hodnoty obsahu sušiny v kalu po centrifuze (odvoditelnost kalu).....	49
7.3.4	Hodnota obsahu nerozpuštěných látek ve fugátu.....	54
7.3.5	Hodnoty obsahu sušiny v kalu po filtraci .....	56
7.4	Teplota kalů.....	58
7.5	Doplňková měření .....	60
7.5.1	Obsah sušiny u ZNK .....	60
7.5.2	Hodnoty CST u ZNK .....	61
7.5.3	Hodnoty obsahu sušiny v kalu po centrifuze .....	61
7.5.4	Hodnoty kalu po filtraci .....	64
8.	Závěr.....	66
	Použitá literatura.....	67

## Seznam obrázků

Obr. 1	Zjednodušené technologické schéma ČOV .....	12
Obr. 2	Česle strojně stírané .....	14
Obr. 3	Usazovací nádrže .....	15
Obr. 4	Aktivační nádrž (ČOV Šumperk).....	16
Obr. 5	Dosazovací nádrž (ČOV Modřice) .....	16
Obr. 6	Plynojemy (ČOV Modřice) .....	20
Obr. 7	Kompostárna.....	25
Obr. 8	Rekultivace .....	26
Obr. 9	Cementárenská pec .....	27
Obr. 10	Materiálová bilance odvodnění .....	32
Obr. 11	Dekantační odstředivka (ČOV Šumperk) .....	33
Obr. 12	Možnosti uplatnění dezintegrace v čistírenském procesu [11].....	37
Obr. 13	Nádoba pro termickou dezintegraci.....	39
Obr. 14	Kal před dezintegrací: je patrná neporušená struktura buněk [19] .....	39
Obr. 15	Kal po dezintegraci: struktura vloček velmi otevřená, směs má nyní stejnoseměrnou kašovitou soudržnost [19].....	40
Obr. 16	Zařízení pro dezintegraci kalu.....	41
Obr. 17	Triton Electronics TYPE 304M CST .....	42
Obr. 18	Sušící váha KERN .....	42
Obr. 19	Centrifuga MPW-340 .....	43
Obr. 20	Tlaková nádoba a kontrolky teploty a tlaku .....	44
Obr. 21	Dezintegrace: termostat(vlevo) a tlaková nádoba(vpravo) .....	44
Obr. 22	Filtrace kalu .....	45
Obr. 23	Nedezintegrovaný (vlevo) a dezintegrovaný (vpravo) ZNK .....	45
Obr. 24	Filtrace NL u dezintegrovaného kalu a Petriho miska + filtrační papírky.....	46
Obr. 25	Zjednodušené schéma průběhu měření.....	47
Obr. 26	Varianty promíchávání kalu.....	59



## Seznam tabulek

Tab.1	Způsoby nakládání s čistírenskými kaly za rok 2004 až 2006 [11].....	24
Tab.2	Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech pro přímou aplikaci do zemědělské půdy[6] .....	22
Tab.3	Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě .....	23
Tab.4	Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech určených pro kompostování[6] .....	23
Tab.5	Celková produkce čistírenských kalů (v mil. kg) z komunálních ČOV ve vybraných zemích EU [6].....	29
Tab.6	Způsoby zpracování kalů v zemích EU [6].....	30
Tab.7	Limitní hodnoty rizikových prvků v kalech ve vybraných zemích EU [2].....	31
Tab.8	Hodnoty obsahu sušiny dle zvoleného odvodňovacího zařízení [8].....	33
Tab.9	Sazba základního poplatku za ukládání odpadů Kč/t [13].....	34
Tab.10	Ceny zpracování čistírenského kalu.....	34
Tab.11	Možnosti dezintegrace kalu [9].....	35
Tab.12	Účinnost anaerobní stabilizace kalů dezintegrací [8].....	35
Tab.13	Výsledky obsahu sušiny ZNK.....	47
Tab.14	Výsledky CST .....	48
Tab.15	Výsledky centrifugy první měření .....	52
Tab.16	Výsledky centrifugy druhé měření.....	53
Tab.17	Výsledky NL první měření.....	55
Tab.18	Výsledky NL druhé měření.....	55
Tab.19	Výsledky filtrace.....	57
Tab.20	Teploty dezintegrace ZNK .....	58
Tab.21	Hodnoty obsahu sušiny u ZNK.....	60
Tab.22	Hodnoty CST .....	61
Tab.23	Hodnoty kalu po centrifuze při teplotě 150 °C .....	63
Tab.24	Hodnoty kalu po filtraci.....	65

## Seznam grafů

Graf. 1	Způsoby nakládání s kalem v ČR za rok 2006 [13] .....	24
Graf. 2	Způsoby nakládání s kalem ve vybraných zemích EU za rok 2002 [7] .....	30
Graf. 3	Srovnání hodnot CST ZNK před a po dezintegraci .....	49
Graf. 4	Závislost obsahu sušiny ZNK I na teplotě dezintegrace .....	50

Graf. 5	Závislost obsahu sušiny ZNK II na teplotě dezintegrace .....	51
Graf. 6	Závislost obsahu NL ve fugátu ZNK II na teplotě dezintegrace .....	54
Graf. 7	Závislost obsahu sušiny v koláči na teplotě dezintegrace .....	56
Graf. 8	Závislost obsahu sušiny v koláči na době ohřevu.....	62
Graf. 9	Závislost obsahu sušiny v koláči na době ohřevu.....	64

## Přehled zkratk a symbolů

### Seznam zkratk

ČOV	Čistírna odpadních vod
EO	Ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
ČR	Česká republika
ZNK	Zahuštěný nestabilizovaný kal
NL	Nerozpuštěné látky
CST	Odvoditelnost kalu
NED	Nedezintegrováný kal
DEZ	Dezintegrováný kal

### Seznam symbolů

symbol	význam	jednotka
$D_{ZNK}$	obsah sušiny v kolači	%
$m_{VOK,M}$	hmotnost vysušeného odstředěného kalu + miska	g
$m_{OK,M}$	hmotnost odstředěného kalu + miska	g
$m_M$	hmotnost misky	g
$m_{VSK}$	hmotnost vysušeného odstředěného kalu	g
$m_{OK}$	hmotnost odstředěného kalu	g

## 1. Úvod

V dnešní době se závažným problémem stává otázka likvidace čistírenských kalů. Vzhledem ke členství ČR v EU se tato oblast stává čím dál častěji diskutovanou a tím si říká o co nejrychlejší řešení. Při pohledu na rychlost rozvoje lidské společnosti je jasné, že produkce kalů se bude neustále navyšovat a nebudou stačit metody na nakládání s kaly, které se do dnešních dnů používají. Nesmíme však opomenout, že vývoj dalších metod je do značné míry ovlivňován ekonomickými a legislativními faktory. Naším vstupem do EU došlo k zpřísnění podmínek používání kalů v zemědělství i při jejich skladování. Zásadní požadavky pro ČR plynou z implementované směrnice EU 91/71/EEC. Na jejímž základě by měly mít obce s více než 2000 ekvivalentních obyvatel (EO) mechanicko - biologickou (dvoustupňovou) čistírnu odpadních vod (ČOV). Tento požadavek měl být splněn do roku 2005. Při podrobnějším pohledu na počty vybudovaných ČOV zjistíme, že počet vybudovaných ČOV na základě směrnice EU do konce roku 2005, je přibližně 180. Směrnice se také zásadně staví proti ukládání kalů na skládkách. Požadavek zní tak, že množství biodegradabilních odpadů (do této skupiny odpadů řadíme i čistírenské kaly) uložených do roku 2010 má odpovídat 75% produkce těchto odpadů v roce 1995. Tímto vzniká prostor pro hledání nových alternativních možností využití čistírenských kalů. Příkladem by nám mohly být zkušenosti ze zahraničí, kde se jako možné ukazuje energetické využití kalů. V podmínkách ČR jsou tyto zkušenosti v dnešní době na velmi nízké úrovni. A to jak v oblasti spaloven čistírenských kalů, tak se spolu-spalováním. To vše poukazuje na důležitost vytvoření adekvátních studií, doplněných provozními zkouškami, které by se staly odrazovým můstkem pro další práci.

Vzhledem k různým typovým provedením čistíren odpadních vod je nutné individuálně řešit nejvhodnější způsob nakládání s kaly. Úkolem je při minimálních nákladech dodržet požadavky kladené na ochranu životního prostředí a zdraví osob nakládajících s kaly.

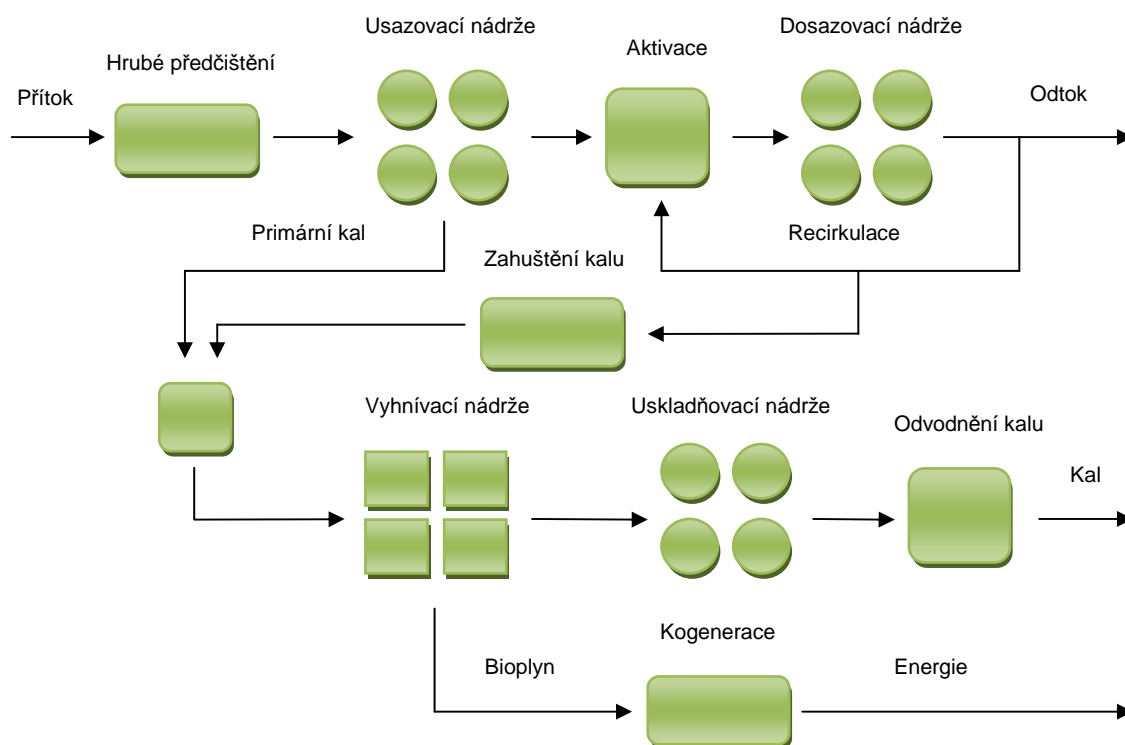
Pro využití čistírenských kalů v zemědělství byla přijata směrnice Rady EU (86/278/EEC), která určuje podmínky pro jejich využití, aplikaci, evidenci a kontrolu. To vše ve srozumitelné formě pro producenty i zpracovatele, v tomto případě zemědělce, kteří je aplikují do půdy.

Kaly, které mají požadované chemické složení, lze využít jako náhradu průmyslových a statkových hnojiv. Potom je přijímáme jako alternativní zdroj minerálních a organických látek. Tímto způsobem můžeme vyrovnat půdní deficit těchto látek v půdě.

Všechny tyto požadavky nutí provozovatele ČOV k nalezení lepších způsobů zpracování kalu. Různé alternativy zpracování kalu představuje kalové hospodářství, kde se nachází široké rozmezí využití nových metod. Zde požaduje dosažení vysokého obsahu sušiny v kalu, proto jsou hledány nové metody předúpravy kalu. Zde se nabízí metoda dezintegrace kalu, která má za úkol rozpad kalu a uvolnění buněčného obsahu mikroorganismů obsažených v kalech, prostřednictvím narušení jejich buněčných stěn. Nastíněným způsobem dosahujeme lepšího odvodnění kalu a dosažení obsahu sušiny v kalu až 40 %.

## 2. Zjednodušený popis ČOV

Čistírna odpadních vod je soubor zařízení, ve kterém dochází k čištění odpadních vod. Setkáváme se s nimi, jednak v blízkosti různých provozů, kde slouží k čištění průmyslových vod, odpadních vod ze zemědělské výroby, a dále u měst a obcí, kde čistí vody komunální a smíšené, tedy komunální s průmyslovými. Čistírny mohou být mnoha typů. Rozdělují se hlavně podle velikosti a typu čistírenského procesu. Nejčastěji používané procesy jsou mechanické, biologické a chemické procesy. Zjednodušené technologické schéma ČOV je znázorněno na obr. 1.



Obr. 1 Zjednodušené technologické schéma ČOV

### 2.1. Mechanické čištění

Mechanické čištění slouží pro odstranění nerozpuštěných látek, které tvoří podstatnou část znečištění odpadních vod. Mezi mechanické čištění se řadí usazování a zahušťování suspenzí. K usazování dochází při hrubém předčištění odpadních vod, v lapáku písku, v usazovacích, respektive dosazovacích nádržích, kde současně probíhá i zahušťování suspenzí.

#### 2.1.1 Hlavní nátokový objekt

Odpadní voda přitéká do hlavního nátokového objektu, který se skládá z hlavní stavidlové komory regulující přítok do ČOV, do dešťové zdrže a odlehčovací komory s hrubým předčištěním dešťových vod.

Dešťová zdrž je odlehčovací objekt sloužící k zachycení přívalových dešťů a tím zamezí velkému přítoku do ČOV. Nádrž je rozdělena podélně na sekce s proplachovacím zařízením. Odpadní voda je z čerpací jímky přečerpávána čerpadly do čistícího procesu. Dále je v bloku zařazen vypínací objekt, který slouží k zavření přítoku v případě odstávky nebo havárie ČOV.

Čerpací stanice slouží k přečerpání odpadní vody z dešťové zdrže na proces hrubého přečištění.

### 2.1.2 Hrubé předčištění

Cílem hrubého předčištění, které je též nazýváno ochrannou částí čistírny, je odstranění velkých plovoucích nebo vodou plavitelných předmětů. Tyto látky by mohly narušovat pracovní procesy vlastního čištění odpadních vod, ale zejména mohou způsobovat poruchy strojního zařízení.

Hrubé předčištění se skládá z lapáku štěrku, česlovny a lapáku písku.

#### Lapák štěrku

V lapáku štěrku dochází k zachycení velkých a těžkých předmětů, které se mohou dostat do ČOV zejména přívalovými dešti a poškodit čistírnu. Lapák štěrku je jímka, umístěná před čistírnu. Rozšířením průtočného průměru a snížením dna v lapáku štěrku dojde k zachycení těžkých předmětů, čistírna je tím chráněna od úlomků cihel, štěrku nebo kamenů. Předměty zachycené v lapáku štěrku se denně odstraňují, z důvodu možného zachycení hmoty organického původu, které by kontaminovaly čerstvé splašky hnilobnými produkty. Odstranění předmětů se provádí ručně nebo strojně pomocí drapáku.

#### Česlovna

Česle slouží k odseparování hrubých plovoucích nečistot. Je to mříž, která je tvořena rámem a pruty (česlicemi), skloněnými ve směru toku. Česle mají obvykle obdélníkový, kruhový i trojúhelníkový průřez. A jsou umístěny tak, aby protékající vodě kladly co nejmenší odpor.

Podle šířky průlin dělíme česle na hrubé, polohrubé a jemné:

**Hrubé česle** mají uplatnění u velkých ČOV při jednotné kanalizaci. Slouží k zachycení hrubých plovoucích nečistot v podobě kusů dřeva a hadrů. Mohou také sloužit k zachycení kamenů a cihel, pokud před česlemi není lapač štěrku. Hrubé česle mají šířku průlin 80 – 100 mm.

**Polohrubé česle** mají šířku průlin 10 – 25 mm.

**Jemné česle** mají velikost průlin do 10 mm.

Česle jsou obvykle stírány pomocí shrabováku, které svými zuby zasahují do průlin a stírají zachycené nečistoty (shrabky). Stírání může být prováděno ručně nebo strojně.

Nahoře shrabky přepadávají do žlabu, kde odkapávají a po odvodnění jsou transportovány do kontejneru.



Obr. 2 Česle strojně stírané

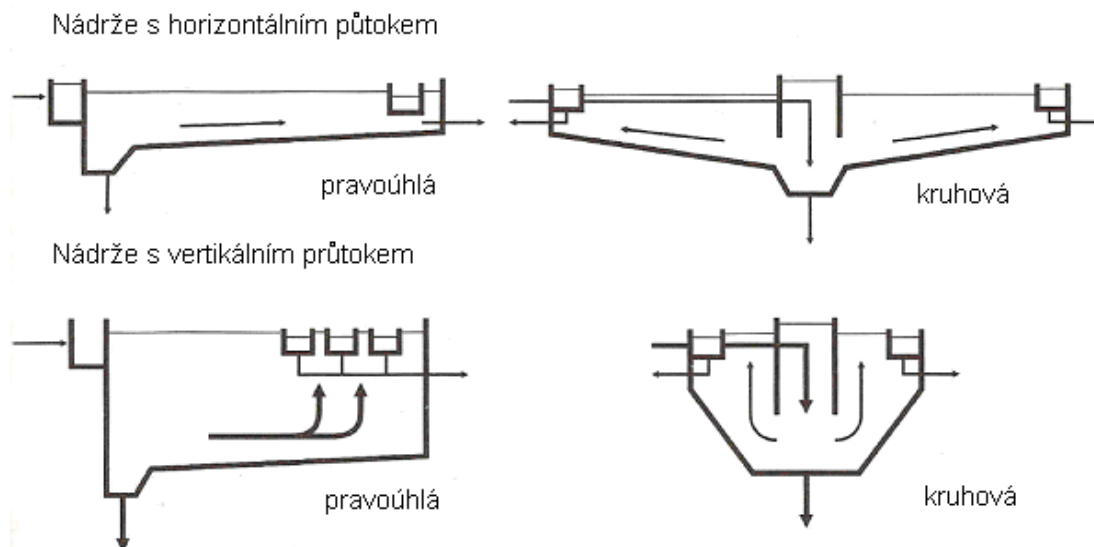
### Lapák písku

Lapák písku je často v kombinaci s lapákem tuků. Jeho úkolem je oddělení minerálních suspenzí od organických nerozpuštěných látek. Lapák písku využívá gravitační síly a rozdílů hustot, průtočná rychlost 0,3 m/s se uplatňuje u většiny lapáků a tím dosáhneme, že se písek usazuje do průměru zrn 0,2 mm. Odstraněním písku se zamezí jeho usazování na nežádoucích místech a sníží se abraze případných následujících zařízení.

Lapáky jsou většinou pravoúhlé nebo kruhové nádrže, vybaveny zařízením na stírání dna i hladiny.

#### 2.1.3 Usazovací nádrže

V usazovací nádrži probíhá usazování jemných nerozpuštěných látek a stírání plovoucích nečistot z povrchu nádrže. Vzniklý kal se nazývá primární a je energicky cennou surovinou. Usazovací nádrže jsou znázorněny na obr. 3 ve dvou variantách, pravoúhlé nebo kruhové s horizontálním nebo vertikálním průtokem.



Obr. 3 Usazovací nádrže

**Pravoúhlé usazovací nádrže** mají délku větší než šířku. Pravoúhlý vtokový žlab je navržen tak, aby se odpadní voda rovnoměrně rozprostřela po celé ploše profilu nádrže. U koncové stěny nádrže se nachází odtokový žlab, který je vybaven pilovitou přepadovou hranou, které je předřazena norná stěna sloužící k zachycení plovoucích nečistot na hladině. Usazený kal se shrnuje do prohlubní, odkud je dále čerpán k dalšímu zpracování.

**Kruhové usazovací nádrže** pracují na podobném principu jako pravoúhlé. Odpadní voda se přivádí středovým valem, ve kterém dochází k rozptýlení kinetické energie přitékající vody a tak dochází k rovnoměrnému rozložení po celém profilu nádrže. Odpadní voda protéká od středového válce k obvodové přepadové hraně, přes kterou přetéká do odtokového žlabu. Norná stěna zabraňující úniku plovoucích nečistot se nachází před přepadovou hranou.

## 2.2 Biologické čištění

Podstatou biologického čištění odpadních vod jsou biochemické procesy za působení aerobních mikroorganismů. Mikroorganismy umožňují rozklad organických látek ve vodě oxidačními procesy. Výsledný produkt biologického čištění je oxid uhličitý a voda. Biologický stupeň čištění probíhá v aktivačních a dosazovacích nádržích.

### 2.2.1 Aktivační nádrže

Aktivační proces je nejrozšířenější způsob čištění odpadních vod v aerobních podmínkách. Do aktivační nádrže přitéká aktivační směs, která vzniká smísením odpadní vody a vratného aktivovaného kalu. Aktivovaný kal je tvořen mikroorganismy a nižšími organismy. Aktivace se skládá z nitrifikace, denitrifikace a regenerace.

V aktivační nádrži se nachází mikroorganismy, pomocí kterých dochází k odstranění organických látek. Organismy potřebují k životu kyslík, a proto musí být aktivační nádrž dobře provzdušňována. Voda je zde zbavena organického znečištění. Odpadní voda z aktivační nádrže je čerpána do usazovací nádrže. Aktivační nádrž je na obr. 4.





Obr. 4 Aktivační nádrž (ČOV Šumperk)

### 2.2.2 Dosazovací nádrže

Cílem dosazování nádrže je separace aktivovaného kalu od vyčištěné vody a dosažení dobře vyčištěného a stabilizovaného odtoku z čistírny. Separace aktivovaného kalu je poslední stupeň biologického čištění.

Konstrukčně jsou podobné jako nádrže usazovací. Zpravidla se liší větší hloubkou, aby se dosáhlo většího zdržení. V procesu čištění mají místo za aktivačními nádržemi. Kal usazující se v dosazovacích nádržích dělí na vratný (který se čerpá zpět do aktivace) a přebytečný odcházející na zahuštění. Dosazovací nádrž je zobrazena na obr. 5.



Obr. 5 Dosazovací nádrž (ČOV Modřice)

## 2.3 Kalové a plynové hospodářství

Soubor kalového a plynového hospodářství obsahuje procesy, které jsou zaměřeny na zpracování primárního kalu z usazovacích nádrží mechanického stupně a přebytečného



biologického kalu. Tyto procesy je možné rozdělit na mechanické, biologické a proces zpracování vzniklého bioplynu (kogenerační jednotky s odsiřování). Mezi mechanické procesy patří operace zahušťování, odvodňování a odvoz kalu, biologické se týkají anaerobní, popř. aerobní stabilizace.

### 2.3.1 Zahušťování kalu, flotační jednotka

Zahušťování kalu má svou důležitost, protože eliminuje investiční a provozní náklady souboru zpracování kalu a náklady na jeho likvidaci. Zahušťování se dělí na gravitační a strojní.

#### Gravitační zahušťování kalu

Gravitační zahuštění se provádí v kalových prohlubních usazovacích nádrží. Konečné zahuštění kalu je ovlivněno mnoha faktory (hydraulické poměry, fyzikální vlastnosti, poměr sušiny primárního a přebytečného aktivovaného kalu apod). Gravitační zahuštění kalu je jednou z provozních operací, kterou může ovlivnit sám provozovatel. K dosažení optimálních výsledků se nedoporučuje automatizace obsluhy, ale zásahy konkrétní osoby obsluhy. Hodnoty zahuštění se považují za podprůměrné ( $< 3,5\%$ ), průměrné ( $3,5 - 4,5\%$ ) a nadprůměrné ( $> 4,5\%$ ) [1].

#### Strojní zahušťování kalu

Strojní zahuštění se obvykle používá pro čistírny od velikosti cca 2 000 - 3 000 EO. Vhodné je zejména před anaerobním uskladněním kalu. Gravitačně zahuštěný kal se následně zahušťuje na strojním zařízení, za pomoci přídatku flokulantu. To se provádí na jednoduchých a provozně nenáročných zařízeních, převážně na horizontálních pásových nebo rotačních zahušťovačích. Dosahuje se takto reálného zahuštění kalu na cca 5 - 6 % sušiny.

Prozatím provozně nerozšířené, ale vysoce efektivní, je i strojní zahuštění surového směsného kalu, kde lze dosáhnout obdobného zahuštění, ale spotřeba flokulantu je výrazně nižší.

Flokulanty jsou chemické látky, které svými vlastnostmi zlepšují separaci aktivovaného kalu [1].

### 2.3.2 Vyhnívací nádrže

Do vyhnívací nádrže přitéká směs primárního a přebytečného biologického kalu. Vyhnívací nádrže slouží zejména k anaerobní stabilizaci čistírenských kalů. Dochází zde k rozkladu organických látek obsažených v kalu za vzniku bioplynu. Ve vyhnívací nádrži se udržuje konstantní procesní teplota a obsah nádrže musí být dokonale míchán.

Vyhnívací nádrže jsou válcového tvaru s plochým nebo kuželovým dnem.

### 2.3.3 Uskladňovací nádrž

Uskladňovací nádrže slouží pro uskladnění vyhnílého kalu před odvodněním. Uskladňovací nádrže se dimenzují na dobu zdržení 150 dní. Překročení doby zdržení vede často k provozním obtížím (zápach, špatné zahuštění). Uskladňovací nádrže mohou a nemusí být zastřešeny. Obsah nádrží je promícháván míchadly.

### 2.3.4 Stabilizace kalu

Stabilizace kalu je nezbytný krok pro spolehlivé zpracování čistírenských kalů. Kal je stabilizován za účelem:

- Redukce odbouratelné organické hmoty (omezení zápachu)
- Zlepšení odvoditelnosti
- Redukce hmotnosti a množství kalu a získání využitelného produktu

V praxi by se stabilizace kalu měla provádět s ohledem na to, jak se bude dál s kalem nakládat.

### Anaerobní stabilizace kalu

Anaerobní stabilizací (vyhňíváním) 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<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>S. Při anaerobní stabilizaci dochází k úbytku organické sušiny, neboť právě ta se přeměňuje na bioplyn. Zároveň dochází k potlačení výskytu patogenních mikroorganismů, dochází tedy k částečné hygienizaci kalu.

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 [9].

### 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. Naopa k 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 [9].

### 2.3.5 Odvodnění kalu, sušení kalu

Odvodnění kalu je nedílnou součástí zpracování kalu. V dnešní době nachází uplatnění na stále menších čistírnách z důvodu přísnějších podmínek na následující nakládání. Nejrozšířenější způsob odvodnění kalu v současnosti je dekantační odstředivka nebo pásový lis, který je postupně stahován z provozů. Kal lze i odvodňovat mimo zmíněné způsoby např. na kalolisech, vakuových bubnových filtrech a je i možnost uskladnění na kalových polích. Tyto metody nejsou příliš využívány.

#### Dekantační odstředivka

Odstředivky jsou konstruovány ve vertikálním a horizontálním provedení. U čistírenských kalů se výhradně používají horizontální odstředivky. Princip je založen na sedimentaci, kdy odstředivou silou usměřňuje kal k plášti bubnu a odděluje kal od vody. Produkovaný fugát (odstředěná kapalina) se vrací zpět do čistírenského procesu. Účinnost odstředivky závisí na rozdílu hustot pevných částic obsažených v kalu a fugátu. Pokud je tento rozdíl větší, dosahujeme lepších hodnot účinnosti odstředivky.

Pokud je čistírna vybavena sušárnou kalu je použita pro sušení odvodněného kalu. V sušárnách je teplonosným médiem nejčastěji horký olej, který nepřímo ohřívá kal. Páry a stržený prach jsou vedeny do pračky plynů, kde jsou odtahované plyny odprašovány a zajištěna kondenzace par. Kal má výslednou sušinu 85 až 92 %.

### 2.3.6 Hygienizace kalu

Hygienizace je proces, kterým se snižuje bakteriální kontaminace kalu a jeho podstatou je vytvoření prostředí, ve kterém nejsou bakterie schopny přežít. Nutnost hygienizace určují zejména legislativní požadavky na omezení nebezpečných vlastností kalů. Nejrozšířenější a nejekonomičtější metodou hygienizace kalů je vápnění [1].

## Úprava kalu vápněním

Provozně nejdostupnější, technicky jednoduchá a ekonomicky výhodná metoda dodatečné hygienizace kalu na menších ČOV je úprava vápněním, tzv. kalcinace.

Výhodou této metody jsou především nízké náklady, zvýšení sušiny a zlepšení struktury kalu, atraktivnost vápněného kalu pro půdy s nižším pH a jednoduchá aplikace ve stávajících provozech. Nevýhodou bývá produkce amoniaku.

### 2.3.7 Plynojemy

Plynojemy slouží k akumulaci bioplynu vzniklého při procesu anaerobní stabilizace a k udržování tlaku. Bioplyn se do plynojemů přivádí z vyhnívajících nádrží. Bioplyn se může využívat v kogeneračních jednotkách nebo v plynových kotlích. Přebytný bioplyn je spalován hořáky zbytkového plynu. Plynojemy jsou zobrazeny na obr. 6.



Obr. 6 Plynojemy (ČOV Modřice)

### 2.3.8 Odsíření

Odsíření slouží k odstranění nežádoucích příměsí síry z bioplynu před přivedením na plynové motory.

### 2.3.9 Kogenerace

Kogenerace spočívá ve spalování bioplynu ve spalovacím motoru či turbíně za vzniku elektrické energie a tepla. Takto je možné dosáhnout přibližně 80%-ní účinnosti. Využitelné odpadní teplo se získává z chladicí vody, mazacího oleje a výfukových plynů. Díky této kombinované výrobě se dosahuje vysokého využití energie obsažené v bioplynu.

Vyprodukované teplo se převážně využívá pro ohřev kalů ve vyhnívacích nádržích a pro vytápění objektů čistírny. Pokud vyprodukovaná elektrická energie přesahuje množství, využitelné v čistírně, je možné ji prodat do elektrorozvodné sítě. Kapitola 2. byla zpracována s použitím literatury [1], [6], [8] a [9].

### 3. Legislativa nakládání s kaly

Nakládání s kaly je především řízeno zákonem o odpadech. Další zákonná ustanovení potřebná jak pro původce kalů, tak pro zpracování nebo odstranění kalů se vycházející ze zákonů o vodách, ovzduší a půdě.

Nakládání s odpady se řídí zákonem č. 185/2001 Sb., o odpadech, který vešel v platnost k 1. 1. 2002, ve znění pozdějších předpisů. Kaly z čištění komunálních odpadních vod jsou zařazeny podle vyhlášky č. 381/2001 Sb., katalog odpadů jako odpad ostatní, pod katalogovým číslem 190805. Kaly z čiření vody, vzniklé z výroby vody pro spotřebu lidí jsou odpad ostatní, pod katalogovým číslem 190902.

#### Pro účely tohoto zákona se rozumí

- a) kalem
  1. kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají odpadní vody stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností,
  2. kal ze septiků a jiných podobných zařízení,
  3. kal z čistíren odpadních vod výše neuvedených,
- b) upraveným kalem - kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě, dlouhodobému skladování nebo jakémukoliv jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalech, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací,
- c) použitím kalu - zpracování kalu do půdy,
- d) programem použití kalů - dokumentace zpracovaná v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem.

Surový kal obsahuje okolo 70 % organických látek v sušině a vzhledem k možné přítomnosti patogenních mikroorganismů je podle zákona o odpadech klasifikován jako nebezpečný odpad se všemi důsledky z toho plynoucími. S tohoto důvodu je ve většině případů již přímo na ČOV v lince zpracování kalu aplikovaná taková technologie úpravy a zpracování kalu, která promění „surový kal“ z nebezpečného odpadu v stabilizovaný materiál, který je díky svým vlastnostem přímo předurčen k využití v zemědělství, buď přímo k hnojení a kondicionaci půdy, nebo po předchozím kompostování.

Produkce odpadu má při své činnosti nebo v rozsahu své působnosti povinnost v mezích daných zákonem č.185/2001 Sb. zajistit přednostní využití odpadů před jejich odstraněním. Na prvním místě jsou recyklační technologie využití kalu (pokud to lze s ohledem na rizikové prvky), dále pak spalování kalu s využitím energie a nakonec spalování bez využití energie. Splnění této povinnosti se nevyžaduje, pokud v daném čase a místě neexistují technické nebo ekonomické předpoklady pro její splnění a postupuje-li se v souladu s plány odpadového hospodářství podle jiné části tohoto zákona.

Při posuzování vhodnosti způsobů odstranění odpadů má vždy přednost způsob, který zajistí vyšší ochranu lidského zdraví a je šetrnější k životnímu prostředí. Uložením na skládku mohou být odstraňovány pouze ty odpady, u nichž jiný způsob odstranění není dostupný nebo by přinášel vyšší riziko pro životní prostředí nebo riziko pro lidské zdraví [16].

### 3.1 Zemědělství

Podle současné legislativy zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech nařizuje majiteli použít pro přímou aplikaci do zemědělské půdy pouze kal stabilizovaný. A proto se stále zvyšuje produkce čistírenských kalů, která zároveň představuje i rostoucí požadavky na jejich likvidaci, se stává vážným ekologickým problémem.

Na kvalitu a nezávadnost kalů přímo aplikovaných do zemědělské půdy jsou kladeny stále větší nároky. Podle vyhlášky 382/2001 Sb. musí být při aplikaci upravených čistírenských kalů na zemědělskou půdu dodrženy mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech. Na zemědělskou půdu mohou být používány pouze kaly, které vyhovují mezním hodnotám koncentrací vybraných rizikových látek, stanovených vyhláškou.

Prvek	Přímá aplikace na půdu [mg/kg sušiny]	
	382/2001 Sb.	86/278/EEC
As	30	-
Cd	5	20-40
Cr	200	-
Cu	500	1000-1750
Hg	4	16-25
Ni	100	300-400
Pb	200	750-1200
Zn	2500	2500-4000

Tab.1 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech pro přímou aplikaci do zemědělské půdy[7]



Kategorie kalů	Přípustné množství mikroorganismů v 1 gramu sušiny kalů aplikovaných na zemědělskou půdu		
	Termotolerantní koliformní bakterie	Enterokoky	Salmonella sp.
I	< 10 <sup>3</sup>	< 10 <sup>3</sup>	negativní nález
II	10 <sup>3</sup> až 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> až 10 <sup>3</sup>	nestanovuje se

Tab.2 Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě [8]

Kategorii I je možno aplikovat na půdy využívané v zemědělství při dodržování ostatních ustanovení vyhlášky 382/2001 Sb. a kategorii II lze aplikovat na zemědělské půdy určené k pěstování plodin a na půdy, které se nejméně 3 roky po použití čistírenských kalů nebude pěstovat polní zelenina a intenzivně plodící ovocná výsadba.

### 3.2 Kompostování

Při využití čistírenských kalů jako přídatné suroviny pro výrobu kompostu, sledujeme obsah těžkých kovů, platí zde limitní podmínky, které jsou stanoveny normou ČSN 46 5735 Průmyslové komposty. Provoz kompostáren je řízen dvěma základními zákonnými normami.

- Zákon o hnojivech č. 156/1998 Sb. ve znění zákona 308/2001 Sb.
- Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb.

Prvek	Surovina pro výrobu kompostu [mg/kg sušiny]
	ČSN 46 5735
As	50
Cd	13
Cr	1000
Cu	1200
Hg	10
Ni	200
Pg	500
Zn	3000

Tab.3 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech určených pro kompostování[7]

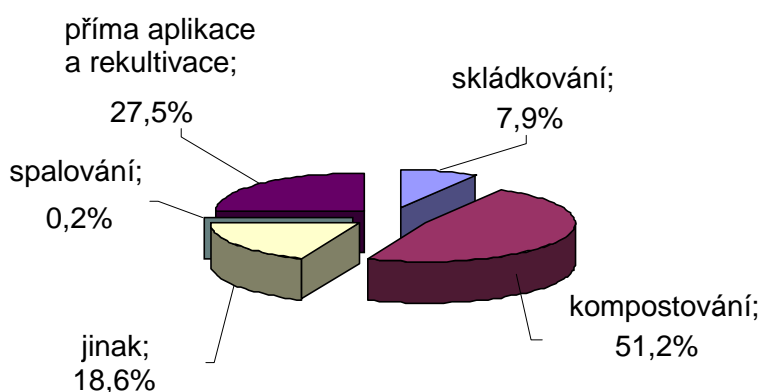
#### 4. Způsoby nakládání s kalem

Před tím, než je rozhodnuto jakou metodou kal z ČOV využít, je třeba provést chemický rozbor, aby byly stanoveny fyzikálně chemické vlastnosti a složení kalu a bylo možné posoudit, jak sním dál nakládat.

Nejrozšířenější způsob aplikace kalů v ČR je do zemědělství. Používá se buď přímá aplikace, rekultivace nebo kompostování. Naproti tomu, zpracování kalů termickými metodami je u nás jen velmi málo zastoupené. Přehled využití jednotlivých způsobů nakládání s kalem je znázorněno v následující tab.4 a graf. 1.

Způsoby nakládání s kaly v ČR	rok 2004 [tun sušiny]	rok 2005 [tun sušiny]	rok 2006 [tun sušiny]
produkce kalů celkem	178 749	171 888	175 471
přímá aplikace a rekultivace	29 119	34 467	48 304
kompostování	87 469	88 820	89 932
skládkování	25 447	12 027	13 979
spalování	39	20	27
jinak	36 675	36 554	23 229

Tab.4 Způsoby nakládání s čistírenskými kaly za rok 2004 až 2006 [14]



Graf. 1 Způsoby nakládání s kalem v ČR za rok 2006 [14]



#### 4.1 Přímá aplikace do půdy v zemědělství

Aplikace na zemědělskou půdu je jedním z nejrozumnějších způsobů využití čistírenských kalů. V zemědělství je potřeba alternativní zdroje minerálních a organických látek, což jsou právě čistírenské kaly. Jsou bohatým zdrojem organické hmoty, základních živin i stopových prvků a mohou zlepšit biologické vlastnosti půd. Z živin jsou v kálech významně zastoupeny především dusík a fosfor. Použití je značně omezeno přítomností nežádoucích toxických prvků (zejména koncentrací těžkých prvků Zn, Cu, Pb, Hg) a rizikových organických látek. Proto je potřeba kal před použitím hygienizovat a tím zbavit nebezpečných cizorodých látek (např. chlorované látky, polyaromatické uhlovodíky). Podle současné legislativy je značně omezen objem kalů přímo použitých k hnojení zemědělské půdy.

Přímá aplikace do půdy je v ČR nejrozšířenější způsob využití čistírenských kalů, je využíváno přibližně 27,5 % kalů z ČOV. Aplikace čistírenských kalů do zemědělské půdy se provádí buď rozvozem tekutého kalu, nebo po odvodnění kalu.

Naše zemědělství, vzhledem ke snížení statkových hnojiv a spotřeby průmyslových hnojiv, potřebuje alternativní zdroje minerálních a organických látek, což by mohly být právě čistírenské kaly.

#### 4.2 Kompostování

Kompostování je kontrolovaný biologický rozklad pevné organické hmoty za aerobních podmínek. Biologický rozložitelný odpad je při tomto procesu díky činnosti bakterií, hub a dalších organismů postupně transformován do půdních složek. Proces kompostování může mít na čistírenské kaly vliv nejen z hlediska hygienizace, ale také z hlediska rozkladu nežádoucích organických látek a redukce zápachu.



Obr. 7 Kompostárna

Kompostování je používáno k recyklaci kalů, umožňuje nám vrátit látky do přirozených potravních cyklů. Odvodněný kal je smíchán s doplňkovým organickým materiálem (např. štěpka, sláma, piliny), který je důležitý pro snížení obsahu vody a slouží jako zdroj uhlíku. Kompostování se skládá ze tří fází. První fází je fáze rychlého rozkladu. Dochází k destrukci patogenního obsahu a úbytku hmoty. Obsah vody při procesu by měl dosahovat hodnot

12 – 25 % a teplota 50 – 70 °C. Pro správné získání tzv. čerstvého kompostu je důležité provzdušňování. Provzdušňování se provádí přeházením, tím je rozklad rychlejší a silnější. Druhou fází je fáze stabilizace kompostu. Hlavní roli hraje pokles teploty kompostu, čímž získáme tzv. aktivní kompost. Poslední fází je zrání kompostu. Na zničení škodlivých látek nebo přeměnu na nové, musí kompostování probíhat při teplotách kolem 50 – 60 °C po dobu 20 dní. Produktem poslední fáze je hotový kompost. Čistírenských kalů se přidává do kompostu okolo 10 % z objemu všech surovin.

Kompostováním dosáhneme zmenšení objemu kalů až o 30 % a eliminujeme rozmnožování patogenních mikroorganismů. Navíc vzniká skladovatelný produkt.

### 4.3 Rekultivace

Rekultivace je obnova přírodního prostředí. Čistírenské kaly se používají k organickému hnojení zemitých substrátů jako tekuté nebo odvodněné. Při rekultivaci je potřeba velkého množství organické hmoty, aby bylo dosaženo správného půdního profilu. Dalšími rekultivačními substráty mohou být popeloviny, rašeliny, papírenské kaly a komposty. Dále se používají výkopová zemina, štěrk, písek, dřevo apod. Substráty se vyrábí přímo na místě rekultivace nebo na vybraných místech.



Obr. 8 Rekultivace

### 4.4 Termické zpracování kalů

Velmi výhodným zpracováním čistírenských kalů se ukazuje termické zpracování. Termickému rozložení kalů často předchází částečné sušení již stabilizovaného kalu. Sušení se provádí s cílem celkového zmenšení objemu. Tím se usnadní manipulace a rozšíří se možnosti další aplikace. Vzhledem k průběhu teplot během sušení a spalování nesmíme zapomínat na chování těkavých látek, které se mohou uvolňovat do odpadního vzduchu, do unikající vodní páry v sušárnách nebo do spalin ve spalovnách.

#### Spalování kalů

Tento způsob zpracování kalů je v České republice je nevyužíván. Spalovny musí dodržovat přísné emisní limity a další podmínky provozovatele, podle zákona o odpadech a zákona o ochraně ovzduší.

Z hlediska spotřeby energie může být proces spalování kalů soběstačný. Záleží na stupni odvodnění, popř. vysušení, složení kalů a výhřevnosti. Kaly z čistíren odpadních vod lze spalovat v různých spalovacích zařízeních.

### Hlavní možnosti spalování a spoluspalování kalů:

- spalovny tuhých komunálních odpadů
- teplárny a elektrárny
- cementárny
- speciální spalovny odvodněného kalu

Mezi energetické nejdůležitější faktory spalování kalů patří především obsah sušiny a složení kalu resp. výhřevnost. Vyhnílý, vysušený kal má obvykle výhřevnost podobnou hnědému uhlí. Surový kal má vyšší výhřevnost než kal vyhnílý. Hodnota výhřevnosti vysušeného surového kalu je mezi 14 až 20 MJ/kg, oproti vysušenému vyhnílému kalu, který se pohybuje v rozmezí 7 až 10 MJ/kg. Nevýhodou surového kalu je jeho nestabilita a nakládání s ním je více problematické.

Při spalování kalů v cementárnách dochází podobně jako u tepláren a elektráren k úspoře hlavního paliva. Další pozitivní stránkou zpracování kalů při výrobě cementu je ekologický přínos. Při zpracování kalu v rotační peci cementárny jsou kaly zpracovány bezodpadovou technologií, kdy dochází ke zpracování nebezpečného odpadu způsobem výhodným pro cementárnu i životní prostředí. Díky vysokým teplotám dochází nejen k rozkladu toxických sloučenin, ale také k zničení mikroorganismů obsažených v kalech, které mohou být silně patogenní. Nevýhodou této technologie může být systém čištění spalin, může docházet k odpaření toxických látek a jejich následnému úniku se spalinami. Kapitoly 4.1 – 4.4 byly zpracovány pomocí literatury [1], [2], [8] a [5].



Obr. 9 Cementárenská pec

## 4.5 Sušení

Sušením kalu odstraňujeme vlhkost pomocí tepelné energie. Sušení je difúzní proces, při kterém odchází vlhkost z kalu. Při sušení používáme dvě základní metody přímou (konvekční) a nepřímou (kontaktní). U přímé metody dochází ke styku kalu se sušicím médiem, nejpoužívanější je ohřátý vzduch nebo kouřové plyny. U nepřímé metody je teplo kalu dodáváno zprostředkovaně.

Při sušení se dosahuje 90 % až 95 % sušiny. Sušením se sníží celkový objem produkovaných kalů na třetinu. Zásadně se tím zlepší podmínky pro manipulaci, transport a vlastní konečnou likvidaci kalu. Sušený kal je možné dobře spalovat v každé spalovně, cementárně nebo elektrárně.

## 4.6 Skládkování

Skládkování představuje ukládání kalu na určených místech – zabezpečených skládkách. Výhodou této metody je finanční a technologická nenáročnost. V dnešní době tato metoda není již mnoho používána, z důvodů vstupu ČR do EU. Tím se zpřísnily kritéria pro ukládání kalů na skládky, podle zákona č. 185/2001 Sb. a vyhláškou č. 383/2001 Sb. a vysoce vzrostly náklady za uložení na skládky, které stále rostou s navyšující se produkcí kalu viz tab.9

Podle stávající legislativy je skládkování neperspektivní a ekologicky nevýhodné řešení. Do budoucna požaduje EU skládkování zcela zakázat, protože se tak pouze přesouvá problém s odpadem na pozdější dobu, proto je nutné uvažovat do budoucna s perspektivnějším řešením, které zohledňuje životní prostředí [8].

## 4.7 Alternativní a méně používané způsoby nakládání s kalem

Vedle způsobů nakládání s kaly, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách, se setkáváme v dnešní době i s méně rozšířenými metodami. Jako příklad jsou uvedeny následující čtyři metody.

### Solidifikace

Solidifikace je speciální případ fyzikálně - chemické metody zpracování kalů. Solidifikací se rozumí proces, při kterém dochází k stabilizaci odpadu na pevný produkt. Odpad, pojivo a další přísady se převedou na matici (tvárnici), čímž dochází k podstatnému snížení specifického povrchu, lepší se manipulace upraveného odpadu a ukládání na skládky.

### Pyrolýza

Pyrolýzou rozumíme zplyňování kalů. Pyrolýza je přeměna vysušeného kalu na plynné palivo. Proces probíhá prostřednictvím zplyňovacího média, kterým může být vzduch nebo kyslík.

### Výroba pelet

Pelety jsou perspektivní palivo s vysokou výhřevností, vyrobené z obnovitelných surovin. Pelety jsou zpravidla granule kruhového průřezu, které se vyrábějí na protlačovacích lisech pod vysokým tlakem. Nejčastěji jsou vyráběny smícháním dřeva, slámy a kalů, které zlepšují soudržnost pelet.

## Mokrá oxidace

Při mokré oxidaci dochází k oxidaci spalných látek z roztoku či emulze, za přítomnosti energie, která umožňuje intenzivní oxidaci. Oxidace se provádí za přítomnosti kyslíku rozpuštěného v suspenzi za vyšší teploty a vyššího tlaku.

## 4.8 Způsoby nakládání s kalem v zemích EU

Čistírenské kaly je možné využít nebo likvidovat mnoha způsoby. V následující tabulce je uvedena celková produkce čistírenských kalů z komunálních ČOV ve vybraných zemích EU.

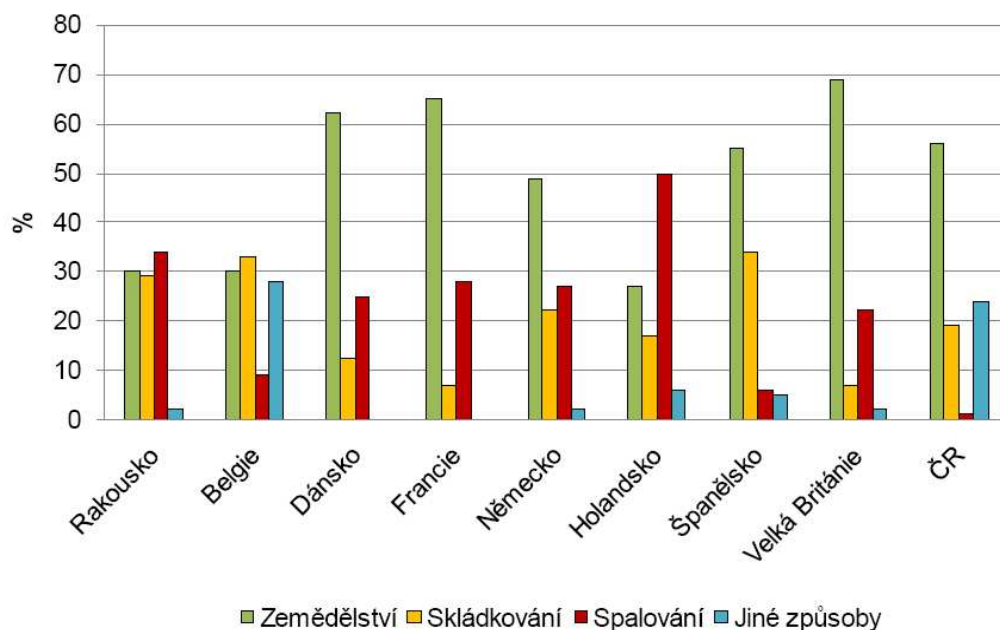
Rok	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Bulharsko	53	51	52	60	48	54,2	39,8
Česká republika	178	175,9	186,2	198,2	206,7	205,6	211,4
Dánsko	161,7	151	153,8				
Irsko		34,5		37,6	33,7	37,6	
Španělsko	686	689	716,2	784,9	853,5		
Francie		814	971,4			954	
Litva	400	485	486	535	257	242	
Maďarsko	80,6	81	87,4	86,5	102,1	114,6	116,9
Nizozemí	368	359	358	372	346	358	365
Rakousko		215,5	211,9		314,8		323,1
Polsko	327	363	340	354	359,8	397,2	435,7
Slovensko	82,5	88,9	116,8				97,7
Finsko	130	136	158	160	160		
Švédsko			231		230		242
Spojené království	1078	1004	1058			1527,5	1543,8

Tab.5 Celková produkce čistírenských kalů (v mil. kg) z komunálních ČOV ve vybraných zemích EU [7]

V zemích Evropské Unie je recyklováno 40 – 45 % čistírenských kalů, z nichž je většina využívána v zemědělství. Zbývající část kalů je ukládána na skládkách 30 – 35 %, spalována 15 - 20 % či jinak využívána 5 – 10 %, zejména ve stavebnictví. Stále rostoucí zájem o recyklaci kalů v některých evropských zemích v posledních letech je důsledkem zpřísnění limitů pro jejich skládkování a zákazu vypouštění kalů do moře od 31. 12. 1998.

Způsoby zpracování kalů ve vybraných zemích EU jsou znázorněny v graf. 2 a tab.6.





Graf. 2 Způsoby nakládání s kalem ve vybraných zemích EU za rok 2002 [7]

Stát	Zemědělství	Skládkování	Spalování	Ukládání do moře	Jiné způsoby
Belgie	29	55	15	0	1
Dánsko	54	20	24	0	2
Francie	60	20	20	0	0
Německo	27	54	14	0	5
Řecko	10	90	0	0	0
Irsko	12	45	0	35	8
Itálie	33	55	0	0	11
Lucembursko	12	88	0	0	0
Holandsko	26	50	3	0	20
Portugalsko	30	60	0	0	10
Španělsko	50	25	5	10	0
Velká Británie	44	8	7	30	11

Tab.6 Způsoby zpracování kalů v zemích EU [7]

Recyklace kalů v zemědělství se řídí Směrnicí Rady EU 86/278/EEC z 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zvláště půdy při používání čistírenských kalů v zemědělství, jejímž cílem je zabránit poškození půd, rostlin, zdraví zvířat i lidí. Současně podporuje správné využití kalů, které jsou bohatým zdrojem organické hmoty (i více než 50 %) základních živin (dusík, fosfor, draslík, vápník aj.) i stopových prvků a mohou

zlepšovat fyzikálně - chemické i biologické vlastnosti půd. Uvedená směrnice stanovuje maximální limitní hodnoty obsahů znečišťujících látek v kalech, které je možno aplikovat na půdu (viz tab.7).

Země (rok)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Směrnice EU (86/278/EEC)	-	20-40	-	-	1000-1750	16-25	300-400	750-1200	2500-4000
Belgie	10	10	20	500	500	10	100	300	2000
Dánsko (95)	-	0,8	-	100	1000	0,8	30	120	4000
Finsko (95)	-	1,5	-	300	600	1	100	100	1500
Francie (88)	-	20	-	1000	1000	10	200	800	3000
Holandsko	10	10	-	500	600	10	100	500	2000
Německo (92)	-	5	-	900	800	8	200	900	2000
Norsko (97)	-	2,5	-	100	650	3	50	80	800
Polsko (99)	-	10	-	500	800	5	100	500	2500
Slovensko (03)	20	10	-	1000	1000	10	300	750	2500
Švédsko (95)	-	2	50	100	600	2,5	50	100	800
Švýcarsko (92)	-	5	60	500	600	5	80	500	2000
Velká Británie	50	-	-	600	130-330	1,5	80-180	-	330-750
ČR (vyhláška 382/2001 Sb. )	30	5	-	200	500	4	100	200	2500

Tab.7 Limitní hodnoty rizikových prvků v kalech ve vybraných zemích EU [2]

Na kvalitu a hygienickou nezávadnost kalů aplikovaných na půdu jsou kladeny stále vyšší nároky, proto v řadě členských států EU je zemědělské využívání kalů regulováno novějšími státními předpisy, jež jsou mnohem přísnější než dosud platná Směrnice Rady EU 86/278/EEC. Příkladem důsledné recyklace kalů a jejich využití v zemědělství může být Norsko, kde je v současné době využíváno v zemědělství téměř 70 % celkové produkce kalů [2].

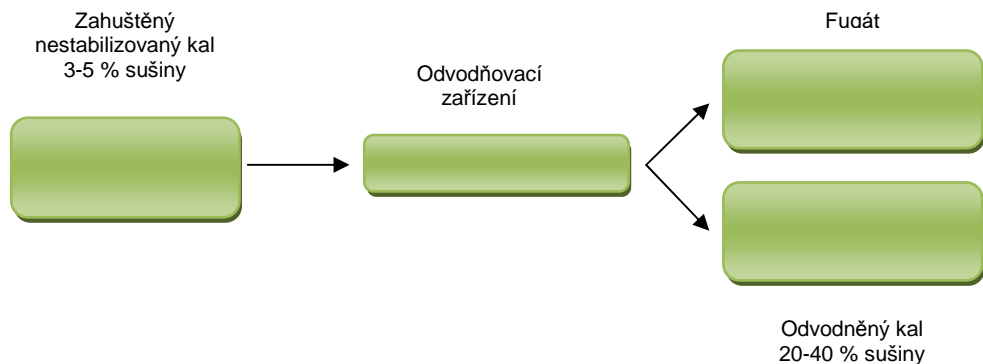
## 5. Materiálová bilance kalu

Materiálová bilance charakterizuje poměr vstupujících a vystupujících proudů procesu. Bilance popisuje průtoky a složení těchto proudů. Bilance obsah sušiny v kalu nám udává poměr množství sušiny k množství vody obsažené v kalu. Množství sušiny bývá 3 - 5 % a množství vody 95 - 97 %. Zvýšení obsahu sušiny dosáhneme pomocí odvodňovacího zařízení.

Kal je přiváděn do odvodňovacího zařízení stabilizovaný a zahuštěný. Z odvodňovacích zařízení vystupuje odvodněný kal a fugát. Obsah sušiny zahuštěného stabilizovaného kalu se pohybuje v rozmezí 3 - 5 % sušiny. Po odvodnění bývá nejčastěji obsah sušiny 20 - 40 %.

Druhým výstupem je filtrát. Vzniklý filtrát (tzv. fugát) je opětovně čištěn v čisticím 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.

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.



Obr. 10 Materiálová bilance odvodnění

Obsah sušiny závisí na zvoleném druhu odvodnění, výkonu odvodňovacího zařízení a na specifické spotřebě flokulantů.

### 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 aktivčních 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 koaguláty 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 polymerní organický flokulant závisí na druhu kalu a obsahu organické sušiny [9] a [4].

Následující tabulka poukazuje na různé obsahy sušiny dle zvoleného odvodňovacího zařízení.

Odvodňovací zařízení	obsah sušiny [%]
dekantační odstředivka	20 - 30
sitopasové lisy	20
kalolis rámový	30 a více
kalolis komorový	30 a více
vakuový bubnový filtr	15 - 25

Tab.8 Hodnoty obsahu sušiny dle zvoleného odvodňovacího zařízení [11]



Obr. 11 Dekantační odstředivka (ČOV Šumperk)

Obecně lze tedy předpokládat, že odvodněný kal dosahuje hodnot obsahu sušiny od 20 - 40 %. Odvodněný kal je následně použit na rekultivaci, kompostování, k přímé aplikaci na zemědělskou pudu nebo určen k uložení na skládku. Náklady jednotlivých druhů zpracování jsou odlišné, pohybují se v rozmezí od 100 - 600 Kč/t, dle zvoleného způsobu. Ceny na zpracování se liší z důvodu různé předúpravy kalu před konečným zpracováním nebo jsou řízeny zákonem. Zákonem č. 185/2001 Sb. se řídí skládkování, který určuje jednotnou cenu za uložení 1 t čistírenského odpadu na skládku. Následující tab.9 ukazuje

sazby základních poplatků za ukládání odpadů od roku 2002 až do současnosti. Zvyšující se cena je dána vstupem ČR do EU, která usiluje o eliminaci ukládání čistírenského kalu na skládky a upřednostňuje jiné alternativní způsoby.

Roky	2002 až 2004	2005 až 2006	2007 až 2008	2009
Cena [Kč/t]	200	300	400	500

Tab.9 Sazba základního poplatku za ukládání odpadů Kč/t [17]

Při rekultivaci, kompostování a uplatnění kalů v zemědělství se ceny liší z důvodu možné úpravy před konečným zpracováním. Úpravou kalu rozumíme sušení, odvodnění, rozklad, provzdušňování a další přípravné práce jako je tomu např. při kompostování či rekultivaci. Ceny vybraných způsobů zpracování čistírenského kalu jsou uvedeny v tab.10.

Způsob zpracování	zemědělství	kompostování	rekultivace	skládkování
Cena [Kč/t sušiny]	100 - 300	200 - 400	300 - 500	400 - 600

Tab.10 Ceny zpracování čistírenského kalu

## 6. Možnosti dezintegrace kalu

Vzhledem k rostoucí produkci kalu se zvyšují požadavky na čištění odpadních vod a následně na zpracování. Zneškodnění kalu, je stále obtížnější, neboť přijetím přísnějších kritérií pro nakládání v zemědělství, využití klesá. Proto v současné době většina kalů skončí na skládce. Proto minimalizace nadměrného kalu se stává stále více a více důležitým. Především dosáhnout významného snížení hmotnosti a objemu. Technologie, které kombinují efektivní hmotnosti kalu a snížení objemu produkce představují nejlepší řešení.

Dezintegrace je rozpad zahuštěného aktivovaného kalu a uvolnění buněčného obsahu mikroorganismů obsažených v kalech, prostřednictvím narušení jejich buněčných stěn. V důsledku rozpadu struktury kalu se podstatně urychlí anaerobní a aerobní biologický rozkladný proces. To má za následek zkrácení doby reakce a tím se sníží množství zbývajícího nerozloženého materiálu a zlepšení odvoditelnosti materiálu.

V podstatě rozpad kalu je dosaženo použitím fyzického nebo chemické metody rozčleňování buněčných stěn. Buněčné stěny jsou roztříštěné a sloučeniny se uvolňují. Tento produkt může být využit jako substrát v aerobním a anaerobním biologickém procesu.

Následující tabulky zobrazují různé metody dezintegrace a účinnost anaerobní stabilizace kalů dezintegrací.

Mechanické	Fyzikální	Chemické	Biologické
kulové mlýny	zmrazování- rozmrazování	kyselá hydrolýza	enzymová lyze
vysokotlaký homogenizátor	osmotické šoky	alkalická hydrolýza	
ultrazvuk	plazmové pulsy	mokrú oxidace	autolýza
lyzátovací zahušťovací centrifuga	termická dez.	ozonizace	

Tab. 11 Možnosti dezintegrace kalu [12]

Metoda dezintegrace	Účinnost dezintegrace[%]	Zvýšení stupně rozkladu[%]
Lyzátovací zahušťovací centrifuga	2,5 - 15	10 - 20
Homogenizátor	až 25	~30
Ultrazvuk	až 40	~30
Kulový mlýn	až 30	~20

Tab. 12 Účinnost anaerobní stabilizace kalů dezintegrací [11]

Všechny výše uvedené metody představují předúpravu kalu před biologickým rozkladem a vedou ke zvýšení rychlosti a stupně rozkladu. Cílem je uvolnění buněčné stěny a způsobit propuštění z organického materiálu buněk.

## Mechanické metody

Pro mechanické způsoby rozkladu buněk je zapotřebí energie a tlaku, translační nebo rotační energie. Nejpoužívanější jsou následující metody:

- *Vysoký tlak homogenizátoru:* rozpad od kavitačního účinku v důsledku náhlého uvolnění tlaku
- *Ultrazvukový homogenizátor:* zvukové tvoření kavitace, což vede k dezintegraci kalu  
*Kulový mlýn:* rozpad drcením částic
- *Mechanická proudová technologie:* obdobné zásady jako rozpuštěný vzduch (flotace), kal je přetlakován na 5 - 50 bar a následně propouštěn přes trysky kolmo na desku
- *Lyzátovací zahušťovací centrifuga:*

## Fyzikální metody

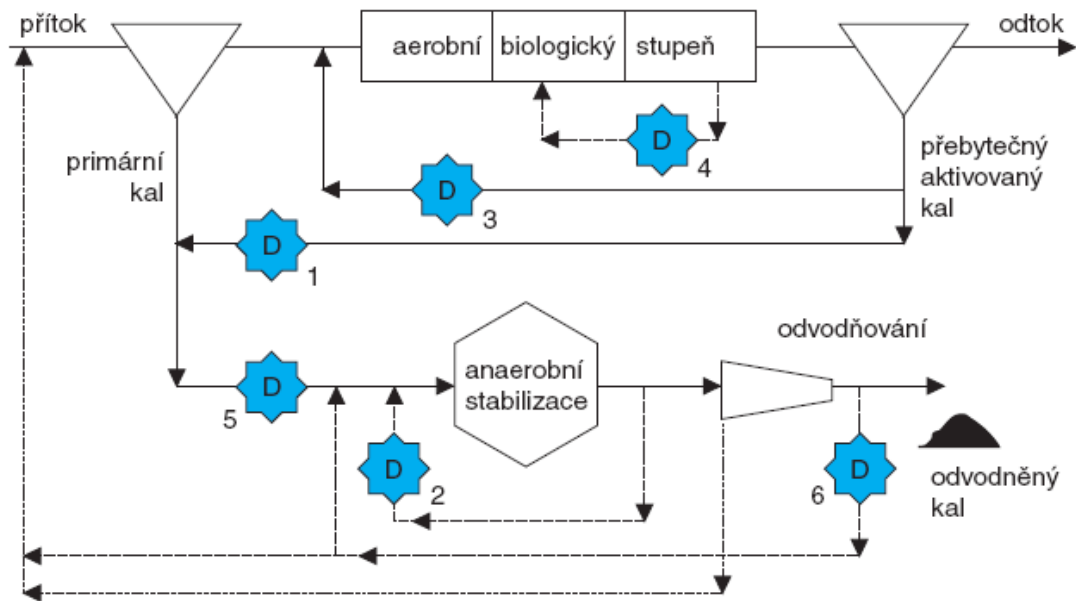
Tepelný rozpad kalu má vyšší nároky na spotřebu energie oproti mechanickým metodám, ale lze využít nízkonákladové tepelné energie oproti elektrické energii. Vstupní tepelná energie bývá většinou realizována výměníky tepla. Nadměrné teplo získané v rámci ČOV lze použít, čímž se výrazně sníží energetické náklady. Rozklad je obecně realizován prostřednictvím tepelné hydrolýzy, kde se kal zahřívá na 130 - 200 °C po dobu několika minut při vysokých tlacích.

## Chemické metody

Mezi chemické procesy patří zpracování pomocí ozonu. Zpracování je velmi lukrativní, protože při procesu nepotřebuje chemikálie a nedochází k žádnému zvýšení koncentrací solí. Cílem předběžné dezintegrace je částečná oxidace a hydrolýza z organické hmoty. Úplné oxidaci je zabráněno a místo toho větší narušené molekuly se dostávají do menších a těžko rozložitelné látky jsou přenášeny.

## Biologické procesy

Enzymatická dezintegrace a rozklad buněk sloučenin z buněčné stěny, při kterém enzym urychlí reakci. Enzymatická dezintegrace a rozklad buněk je zajímavá v kombinaci s mechanickým rozkladem, protože vnitrobuněčná tekutina obsahuje látku na rozklad enzymů, proto mohou způsobit další rozklad po mechanické úpravě. Nevýhodou tohoto procesu jsou vysoké náklady na enzymy.

**Možnosti uplatnění dezintegrace v čistírenském procesu:**


Obr. 12 Možnosti uplatnění dezintegrace v čistírenském procesu [11]

**Legenda:**
 = dezintegrace

- 1) dezintegrace přebytečného aktivovaného kalu před anaerobní stabilizací: provozně velmi využívána: lyzátovací centrifuga, ultrazvuk
- 2) dezintegrace anaerobně stabilizovaného kalu s vrácením do anaerobního reaktoru
- 3) dezintegrace vráceného aktivovaného kalu
- 4) dezintegrace části aktivační směsi: příprava substrátu pro denitrifikaci
- 5) dezintegrace směsného surového kalu před anaerobní stabilizací
- 6) dezintegrace odvodněného anaerobně stabilizovaného kalu a jeho recirkulace do anaerobního reaktoru nebo před primární sedimentací

## 6.1 Termická dezintegrace

Termickou dezintegrací rozumíme hydrolýzu, při které dochází k rozkladu tuhých buněčných komponentů. Při této metodě dochází k zahřátí kalu na požadovanou teplotu dezintegrace, čímž dosáhneme rozkladu tuků, uhlovodíků a dalších makromolekul vylučovaných z buněk kalu.

### Možné výhody termické dezintegrace:

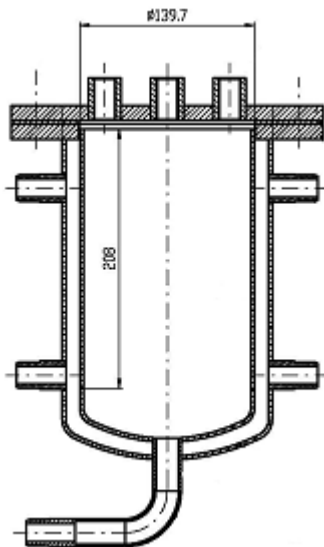
- zvýšení rychlosti rozkladu
- zvýšení produkce bioplynu
- snížení celkového množství stabilizovaného kalu
- zlepšení odvoditelnosti kalu
- zvýšení rozložitelnosti organických látek

### Průběh dezintegrace:

Kal určený k tepelné úpravě (přebytečný aktivovaný kal, anaerobně stabilizovaný kal, zahuštěný nestabilizovaný kal) se v tlakové nádobě zahřeje na požadovanou teplotu řádově v rozmezí 60 - 180 °C při tlaku 0,1 - 1,3 MPa. Následuje upuštění tlaku a poklesu teploty (samovolně nebo chlazením), což je příčinou rozkladu buněk mikroorganismů. Doba ohřevu je různá, dle navrženého zařízení. Při krátké době ohřevu (desítky sekund) nedochází k úplnému potlačení enzymů a stimulačních faktorů, i přes vysoký stupeň dezintegrace buněk.

### Popis dezintegrační jednotky použité pro experimentální část:

Pro měření dezintegrace kalu byla použita dvouplášťová tlaková nádoba vlastní konstrukce (Elsässer, Boráň) vyrobená firmou Vaněk s. r. o. s maximálním tlakem 10 bar, maximální teplotou proudícího media 180 °C a objemem 4,2 litrů. Nádoba byla vybavena tlakoměrem a teploměrem pro správné stanovení hodnot. Ohřev kalu je proveden mediem (termo olej) proudícím v meziprostoru nádoby, ohříváným pomocí lázněového termostatu HUBER bez chlazení. Nádoba a termostat jsou propojeny plastovou hadicí s max. tlakem 6 bar a teplotou 350 °C. Chlazení kalu probíhalo pomocí průtoku vody ve spirále poměřené do olejové lázně. Ohřev kalu včetně chlazení trval přibližně 3,5 hodiny. Na obr. 13 je znázorněna tlaková nádoba a na obr. 16 celé zařízení, používané při termické dezintegraci v laboratoři ÚPEI.

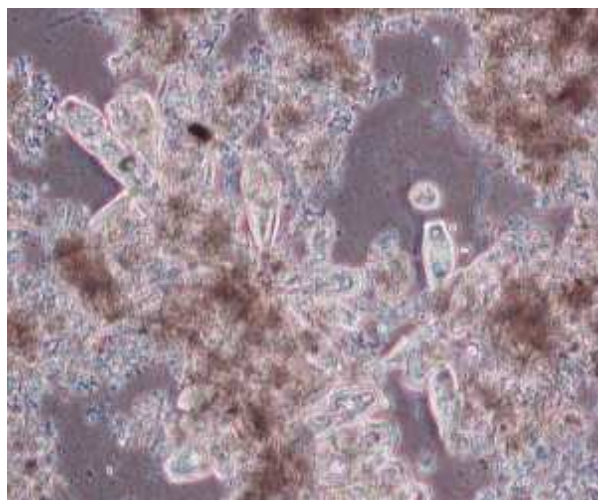


Obr. 13 Nádoba pro termickou dezintegraci

## 6.2 Dezintegrace ultrazvukem

Použití ultrazvuku pro dezintegraci je zcela běžné. Jedná se o provozně bezpečný a hospodářský proces a snadno realizovatelný v čistírenském procesu. Dezintegrační účinek ultrazvuku, tj. kavitace, spočívá v periodickém stlačování a uvolnění kalu. V milisekundách vznikají kavitační bubliny, které vedou při porušení k lokálnímu vytvoření extrémních podmínek (tlaku až 500 barů a teplotě až 230 °C). Podle množství dodané energie resp. požadovaného výsledku rozlišujeme dezintegraci kalů nízkoenergetickou (zničení struktury buněk) a vysokoenergetickou (rozklad buněk).

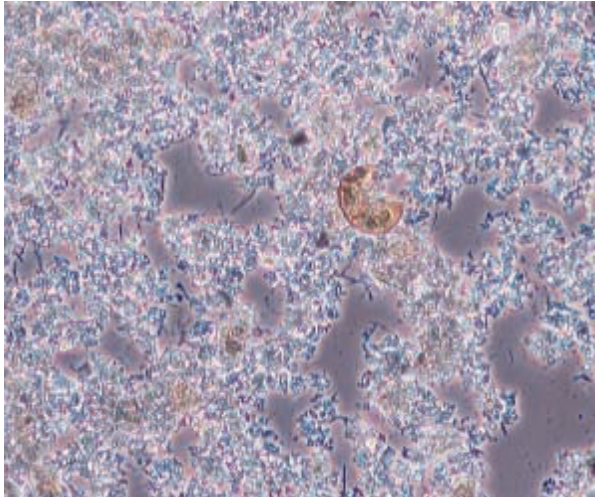
Pro porovnání je na obr. 14 a obr. 15 znázorněn kal před dezintegrací a po dezintegraci (metoda ultrazvukem).



100x

Obr. 14 Kal před dezintegrací: je patrná neporušená struktura buněk [19]





**100x**

*Obr. 15 Kal po dezintegraci: struktura vloček velmi otevřená, směs má nyní stejnosměrnou kašovitou soudržnost [19]*

Zmíněné popsané metody rozkladu buněk mikroorganismů nebo rozmletí kalů vyžadují speciální samostatné zařízení a jsou energeticky náročné. V dnešní době dosahují největšího uplatnění metody ultrazvukem, termická dezintegrace a dezintegrace lyzátovací centrifugou, která je ekonomicky i provozně nejefektivnější ze všech dnes známých dezintegračních metod.

**Nejdůležitější efekty dezintegrace jsou:**

Dezintegrace čistírenských kalů v různých uzlech technologické linky ČOV je velice perspektivní pro zlepšení funkce kalového hospodářství, tak i biologického čištění odpadních vod. Celkový přínos je zvýšení účinnosti všech biologických procesů s výsledným efektem snížení množství produkovaného kalu.

- Zvýšení rychlosti anaerobního rozkladu organických látek a tím zvýšení produkce bioplynu
- Snížení spotřeby fakulantu při odvodňování kalu
- Zlepšení obsahu sušiny při odvodňování
- Redukce přebytečného kalu a tím dosažení úspor na nákladech za likvidaci kalu
- Zlepšení celkové energetické bilance ČOV



## 7. Experimentální část

Tato kapitola diplomové práce je věnována podrobnému popisu měření dezintegrace kalu (v rozmezí 60 - 180°C). Dále je vybraný postup pro měření zhodnocen a navrhnuty nové možnosti pro zlepšení postupu měření a funkčnosti zařízení.

Měření bylo uskutečněno v laboratoři ÚPEI Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Dezintegrace kalu byla prováděna v tlakové nádobě ( $T_{\max}=180\text{ °C}$  a  $p_{\max}=10\text{ bar}$ ) konstruované Thomas Elsässerem, která byla propojena termostatem JEB MLW PRÜFGERATE - WERK pro ohřev olejové lázně s regulací teploty a výkonu 1,72 kW a lážňovým termostatem HUBER s chlazením. K laboratorním měření byla dále použita tato zařízení: sušící váha KERM s maximálním rozsahem 50 g a přesností 0,001 g, digitální váha DENVER INSTRUMENT SI - 603 s maximálním rozsahem 600 g a přesností 0,001 g, rtuťové teploměry s přesností  $\pm 0,1\text{ °C}$ , CENTRIFUGA MPW - 340 s maximálním výkonem 5000 ot./min, Triton Electronics TYPE 304M CST, sušárna KCW-100, kompresor Schneider Compaq master 212.10.2W, filtrační papíry ze skleněných mikrovláken  $\varnothing 55$  a 125 mm ISO 9001 QSC - 6250 a CST filtrační papír 200 APPROX.



Obr. 16 Zařízení pro dezintegraci kalu

### 7.1 Základní údaje o měření zahuštěného nestabilizovaného kalu

Odběr vzorků na ČOV Tetčice probíhal dne 8. 12. 2008 a 11. 2. 2009. Byly odebrány vzorky zahuštěného nestabilizovaného kalu (ZNK), při každé návštěvě ČOV Tetčice bylo odebráno pět kanistrů s objemem pět litrech. Poté byly vzorky ZNK převezeny do laboratoře ÚPEI. První fáze měření probíhala od 9 - 16. prosince 2008 a druhá od 11 - 23. 2. 2009. Celkem bylo provedeno deset měření dezintegrace ZNK s různou teplotou dezintegrace kalu. Postupně byly stanoveny parametry CST a obsahu sušiny v odebraných vzorcích. Dále byla prováděna filtrace, měření nerozpustitelných látek (NL) a odstředění dezintegrováného a nedezintegrováného ZNK.

#### Stanovení odvodňovacích vlastností kalu metodou měření času kapilárního sání CST

Pro měření hodnoty odvoditelnosti kalu byl použit přístroj Triton Electronics TYPE 304M CST a filtrační papír CST PAPERS 200 APPROX.. Stanovení CST spočívá v nahrazení tlakového spádu, potřebného k filtraci přepážkou, sací silou vhodného filtračního papíru, kterým je filtrát sorbován. Rychlost sorpce závisí hlavně na odvoditelnosti kalu, na sací síle

filtračního papíru a na teplotě. Teplota měření musí být konstantní. Přístroj Triton Electronics TYPE 304M CST se skládá ze dvou tlustostěnných dílů, mezi které se vkládá filtrační papír, kruhové zásobní nádobky na vzorek vnitřního průměru 10 nebo 18 mm ve tvaru dutého válce a tři pevné měřicí kontakty.



Obr. 17 Triton Electronics TYPE 304M CST

### Stanovení obsahu sušiny kalu

Pro měření obsahu sušiny v kalu byla použita sušící váha KERN s maximálním rozsahem do 50 g a přesností 0,001 g. Při měření obsahu sušiny byly vzorky sušeny při teplotě 105 °C na hliníkových miskách. Doba sušení kalu je závislá na obsahu vody obsažené v kalu a množství sušeného vzorku.



Obr. 18 Sušící váha KERN

### Centrifuga - odstředivka

Pro měření odvodňování kalu byla použita Centrifuga MPW - 340 s maximálním výkonem 5000 ot/min. Při odvodňování kalů centrifuga pracuje na principu odstředivé síly. Vzorek kalu je odstředivou silou vytlačován k plášti kádinky, ve které se nachází. Těžší část se usazuje ve spodní části kádinky a odstředěná kapalina se vytlačuje na povrch. Poměr fugátu a tekutého podílu je dán stanovenými otáčkami a dobou trvání odvodňování.



Obr. 19 Centrifuga MPW-340

## 7.2 Popis měření dezintegrace kalu

V této části je shrnut průběh měření dezintegrace ZNK, včetně všech použitých metod měření. Celkem bylo provedeno deset měření ZNK. Pro stanovení hledaných závislostí a vlastností je potřeba ohřátí kalu na potřebnou teplotu dezintegrace (60, 90, 120, 150 a 180 °C), tyto teploty byly zvoleny. Na obr. 16 znázorněná měřicí jednotka.

První měření probíhalo dne 9. 12. 2008 pro hodnotu dezintegrace 60 °C. Po příchodu do laboratoře byly vzorky vyndány z lednice, promíchány a změřena teplota ZNK rtuťovými teploměry.

Prvním krokem bylo zjištění obsahu sušiny daného vzorku na sušících vahách. Vzorky byly po důkladném promíchání nalévány na hliníkové misky. Před sušením ZNK bylo nutné vzorky rozprostřít po celé ploše misky, kdyby se tak neprovedlo, kal by mohl mít po odloupení z misky stopy vlhkosti. Poté byly misky vloženy do sušící váhy a vysoušeny při teplotě 105 °C. Hmotnost vzorků se pohybovala v rozmezí 15 – 20 g a doba sušení se pohybovala okolo 30 minut.

Pro stanovení odvoditelnosti kalu, byla zvolena metoda měření času kapilárního sání (CST). Před měřením hodnoty CST bylo provedeno promíchání a změření teploty kalu (9 - 15 °C). ZNK byl do kruhových zásobních nádobek naléván skleněnou trubicí. Hmotnost vzorků se pohybovala okolo 7 g, doba měření byla závislá na průměru kruhové zásobní nádoby. Byl zvolen průměr 18 mm a filtrační papír typ CST Papers 200 APPROX, pro všechna měření.

Měření hodnot obsahu sušiny a CST ZNK byly vždy provedeny na začátku každého experimentu. Následovala dezintegrace ZNK. Promíchaný kal byl pomocí trychtýře nalit do tlakové nádoby. Nádoba byla uzavřena a víko dotaženo pomocí osmi šrouby, po celém obvodu nádoby se nachází těsnění viz obr. 20.



Obr. 20 Tlaková nádoba a kontrolky teploty a tlaku

Poté byl napojen kompresor (kompresor byl napojen k horní části víka), pomocí regulačního ventilu byl nastaven v tlakové nádobě tlak 0,8 MPa (viz obr. 20) a na termostatu byla nastavena odpovídající teplota dezintegrace. Po důkladné kontrole těsnění tlakové nádoby a termostatu byl ZNK ohřán.

Doba dezintegrace kalu záležela na požadované teplotě. Při dosažení teploty o 20 °C méně než byla požadovaná teplota dezintegrace, se ohřival kal ještě 60 min. Po vypršení této doby byla dezintegrace ukončena.

V průběhu ohřívání kalu, byl tlak z nádoby odpuštěn (provedeno při dosáhnutí poloviny teploty dezintegrace). Následně byl kompresor přepojen z horní části do dolní části nádoby a byl znovu nastaven tlak v nádobě na 0,8 MPa. Bylo tak provedeno, aby při dopouštění tlaku z dolní části došlo k promíchání kalu. Tím bylo dosaženo zkrácení doby ohřevu v důsledku lepšího prostupu tepla.

Dezintegrace ZNK probíhala od 60 – 180 °C, pokud hodnota dezintegrace překročila 100 °C, bylo nutné po skončení dezintegrace kal chladit na hodnotu v rozmezí 80 – 90 °C, aby bylo možné s kalem provádět daná měření. Doba chlazení záležela na stupni dezintegrace, pohybovala se v rozmezí 30 – 60 min. Po ukončení dezintegrace kalu, byl tlak odpuštěn a odděláno víko nádoby. Dezintegrováný kal byl důkladně promíchán a vypuštěn do nerezové nádoby. Poté bylo provedeno změření teploty, hodnoty obsahu sušiny a CST kalu.



Obr. 21 Dezintegrace: termostát(vlevo) a tlaková nádoba(vpravo)



Pro stanovení obsahu sušiny v kalu byla zvolena metoda podtlakové filtrace. Filtrace probíhala zároveň pro nedezintegrovaný i dezintegrovaný ZNK. Filtrace byla prováděna na filtračním papíře ze skleněných vláken, který byl umístěn v Büchnerově nálevce o průměru 140 mm. Podtlak byl vyvolán vodní vývěvou. Před začátkem samostatné filtrace byla na digitální váze nejprve zvážena Petriho miska, Petriho miska + filtr o průměru 125 mm a Petriho miska + navlhčený filtr. Poté byla provedena filtrace kalů viz obr. 22. Množství filtrovaných vzorků bylo v první fázi měření 200 ml a druhé 80 g a doba filtrace byla stanovena na jednu hodinu, dle normy. Po ukončení filtrace byly vzorky i s filtračním papírem vyjmuty z Büchnerovi nálevky a vloženy zpět na Petriho misky. Vzorky byly zváženy a vloženy do horkovzdušné sušárny na dobu 8 - 10 hodin. Po vyndání ze sušárny byly vzorky opět zváženy i s filtračním papírem.



Obr. 22 Filtrace kalu

Dalším krokem při měření kalu bylo odvodnění na centrifuze. Odstředění kalu se provádělo při otáčkách 1500 ot/min po dobu 10 minut a probíhalo pro oba vzorky zároveň. Množství vzorků bylo v první fázi 80 ml a ve druhé 80 g a do kádinek bylo naléváno skleněnou trubicí. Před odstředěním kalu byla Petriho miska s prázdnou kádinkou zvážena. Po odstředění byl fugát slit do kádinek a použit při měření nerozpuštěných látek (NL). Odstředěný kal byl pomocí laboratorní lžice vybrán na Petriho misku a i s kádinkou zvážen a poté vložen do horkovzdušné sušárny na dobu 8 - 10 hodin. Po vyndání ze sušárny byly vzorky opět zváženy.



Obr. 23 Nedezintegrovaný (vlevo) a dezintegrovaný (vpravo) ZNK

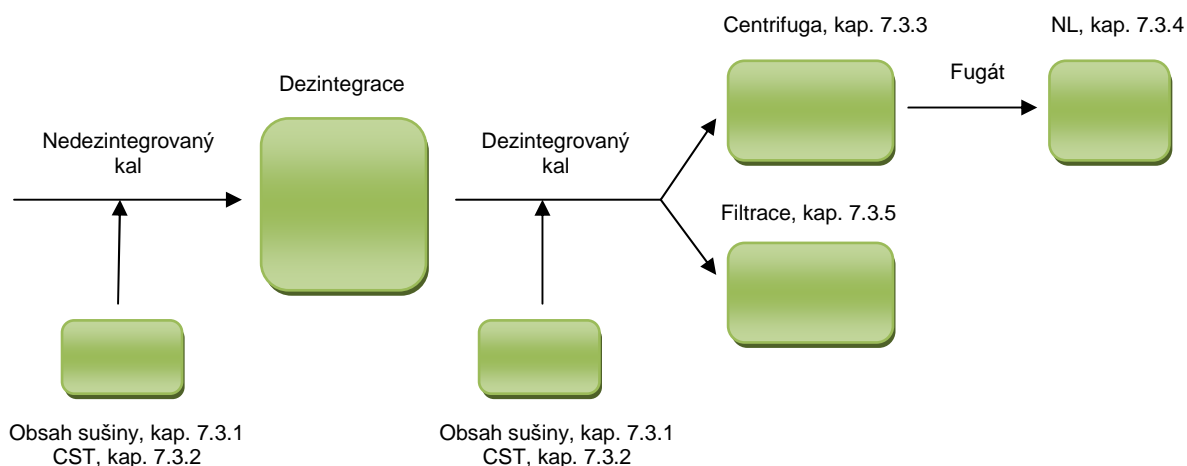
Poslední měření se týkalo NL, byla zvolena metoda podtlakové filtrace na filtračním papíře ze skelných mikrovláken a Büchnerově nálevce o průměru 60 nebo 140 mm. Podtlak byl vyvolán vodní vývěvou. Před filtrací byly zváženy Petriho misky s filtračními papíry s průměry 55 mm pro nedezintegrováný ZNK a průměrem 125 mm pro dezintegrováný kal. Množství filtrovaného fugátu bylo různé, bylo závislé na odstředění. Po skončení filtrace byly filtrační papírky vyjmuty z Büchnerovi nálevky a vloženy zpět na Petriho misky. Následně byly zváženy a vloženy do horkovzdušné sušárny na dobu 8 - 10 hodin. Po vyndání ze sušárny byly vzorky opět zváženy. Pro dezintegrováný kal se používala Büchnerova nálevka a filtrační papír s větším průměrem, protože docházelo k „zacpání“ filtru z důvodu většího obsahu NL.



Obr. 24 Filtrace NL u dezintegrováného kalu a Petriho miska + filtrační papírky

### 7.3 Výsledky měření a jejich vyhodnocení u ZNK I a ZNK II

Následující kapitola je věnována porovnání výsledku dezintegrace kalu při teplotách 60, 90, 120, 150 a 180 °C.



Obr. 25 Zjednodušené schéma průběhu měření

#### 7.3.1 Obsah sušiny u ZNK

Při měření obsahu sušiny ZNK bylo zjištěno, že hodnoty obsahu sušiny před a po dezintegraci kalu zůstávají až na nepatrné odchylky relativně stejné a pohybují se v rozmezí 2,773 - 4,810 % sušiny. Velké rozmezí obsahů sušin u ZNK, bylo způsobeno odběrem vzorků ve dvou odlišných obdobích.

Průměrná hodnota sušiny u ZNK I (odběr 8. 12. 2008) byla 3,6342 %, po dezintegraci byla 3,6346 %. U ZNK II (odběr 11. 2. 2009) byla 4,660 %, po dezintegraci 4,668 %. Následná tabulka ukazuje naměřené hodnoty obsahy sušin.

Složka	ZNK I odběr 8.12.2008					ZNK I Průměr	ZNK II odběr 11.2.2009					ZNK II Průměr
	9.12.	10.12.	11.12.	12.12.	15.12.		11.2.	12.2.	19.2.	16.2.	23.2.	
Datum	9.12.	10.12.	11.12.	12.12.	15.12.	Průměr	11.2.	12.2.	19.2.	16.2.	23.2.	Průměr
Teplota dezintegrace[°C]	60	90	120	150	180		60	90	120	150	180	
Obsah sušiny u ZNK [%]	4,229	3,534	3,305	4,330	2,773	3,6342	4,717	4,738	4,589	4,620	4,639	4,6606
Obsah sušiny u ZNK po dezintegraci [%]	4,275	3,598	3,339	4,240	2,721	3,6346	4,810	4,803	4,677	4,530	4,520	4,6680
Rozdíl obsahu sušiny [%]	0,046	0,064	0,034	- 0,090	- 0,052	0,0004	0,093	0,065	0,088	- 0,090	- 0,119	0,0074

Tab. 13 Výsledky obsahu sušiny ZNK



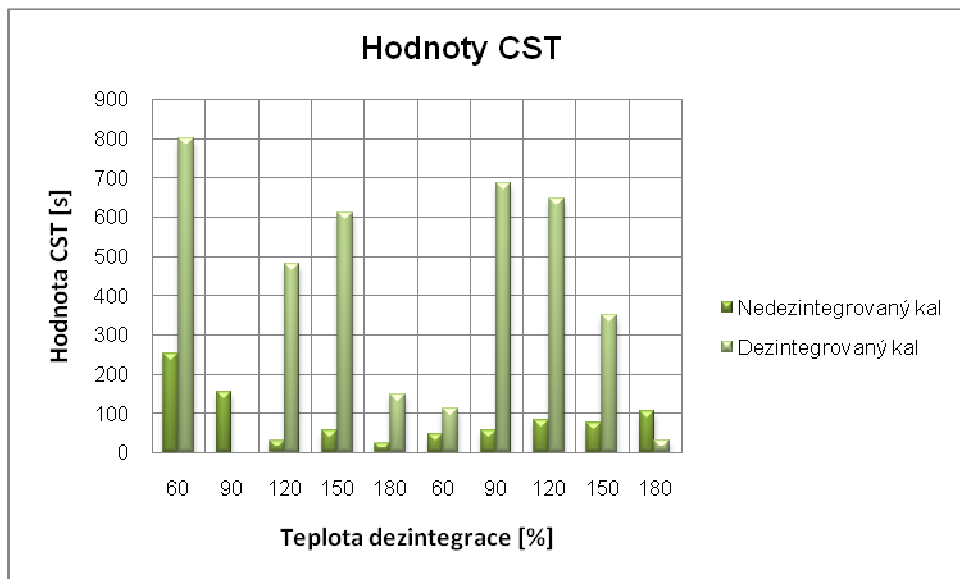
### 7.3.2 Hodnoty CST u ZNK

Při měření hodnoty CST bylo zjištěno, že ZNK po dezintegraci mění podstatně svou hodnotu odvoditelnosti. Se zvyšující se teplotou dezintegrace kalu se rychlost sorpce podstatně prodlužuje. Pro srovnání hodnot je odvoditelnost kalu měřena vždy před a po dezintegraci kalu. Hodnota CST u ZNK se pohybovala v rozmezí 20 – 100 s a pro dezintegrováný kal 100 – 700 s, pro průměr kruhového zásobníku 18 mm. Výjimkou byla dezintegrace ZNK (odběr 8. 12. 2009 při teplotě) 180 °C, kdy hodnota CST dosáhla hodnoty 30,7 s. Bylo to pravděpodobně způsobeno dosažením nejvyšší teploty dezintegrace, kdy kal změnil své specifické vlastnosti (silný zápach, hustotu, vlastnosti podobné vodě). Teplota naměřená v nádobě dosáhla hodnoty 170 °C. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tab.14 a vyhodnoceny v graf. 3.

Složka	ZNK I odběr 8.12.2008					ZNK II odběr 11.2.2009				
	9.12.	10.12.	11.12.	12.12.	15.12.	11.2.	12.2.	19.2.	16.2.	23.2.
Datum										
Teplota dezintegrace [°C]	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180
Průměr kruhového zásobníku [mm]	10	10	18	18	18	18	18	18	18	18
Teplota ZNK [°C]	11	11,3	11,3	14,6	14,9	12,1	14	10,3	10,6	11,5
Teplota ZNK po dez. při měření CST [°C]	47,3	47,3	75,5	73	64	47,6	78,5	82,8	85	94
Hodnota CST u ZNK [s]	251,2	153,5	29,7	55,6	23,7	47,8	56,5	83	76,4	105,7
Hodnota CST u ZNK po dezintegraci [s]	800,5	-	480,5	612,1	147,9	112,1	687,6	646,5	349,1	30,7
Nárůst hodnoty CST [%]	318,7	-	1618	1101	624,1	234,5	1217	778,9	456,9	29,04

Tab. 14 Výsledky CST

Dne 10. 12. 2008 při měření teploty dezintegrace 90 °C, chybí hodnota CST. Bylo to způsobeno nedostačujícím rozmezím měřicího přístroje. Při měření bylo použito kruhového zásobníku s průměrem 10 mm, proto pro všechny další měření byl zvolen kruhový zásobník s průměrem 18 mm.



Graf. 3 Srovnání hodnot CST ZNK před a po dezintegraci

### 7.3.3 Hodnoty obsahu sušiny v kalu po centrifuze (odvoditelnost kalu)

Pro měření hodnot na centrifuze byly vždy srovnávány dva vzorky ZNK před a po dezintegraci. Hodnoty odstředěného kalu pro ZNK dosahovaly hodnot v rozmezí 40 - 60 g, ZNK po dezintegraci hodnot v rozmezí 18 – 55 g.

Nejnižší hodnoty odstředěného kalu bylo dosaženo při teplotě dezintegrace 150 a 180 °C. Zbylé obsahy sušiny byly až na malé odchylky stejné při porovnání dezintegrováného a nedezintegrováného kalu. Výsledky odstředěného kalu jsou shrnuty v tab.15 a tab.16 a zobrazeny v graf. 4 a graf. 5.

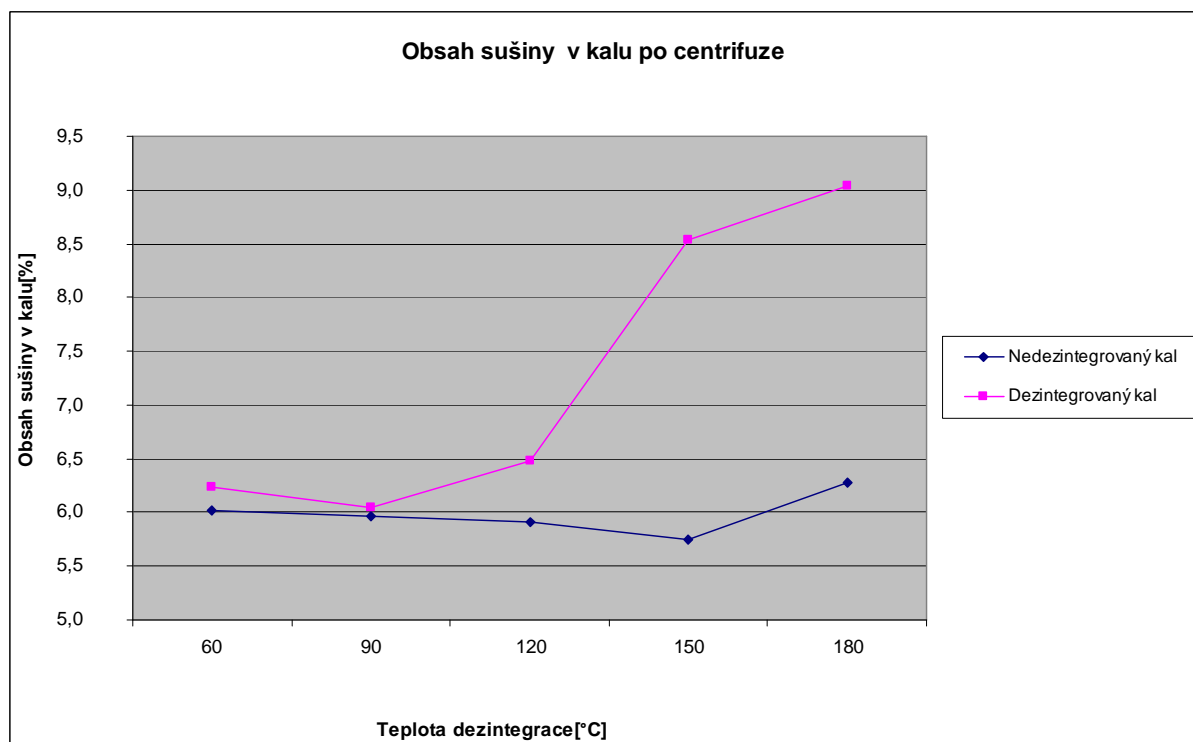
Vztah pro výpočet obsahu sušiny v koláči:

$$D_{ZNK} = \frac{m_{VOK,M} - m_M}{m_{OK,M} - m_M} \cdot 100 = \frac{m_{VSK}}{m_{OK}} \cdot 100$$

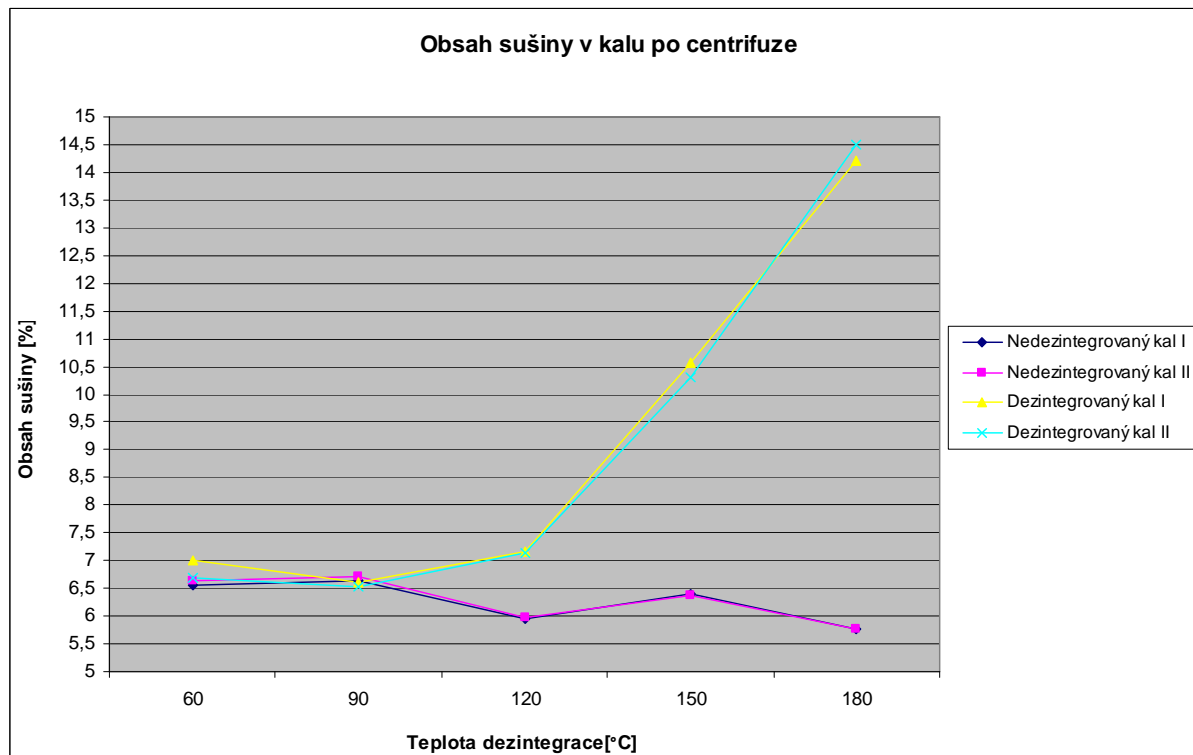
- $D_{ZNK}$  obsah sušiny v koláči
- $m_{VOK,M}$  hmotnost vysušeného odstředěného kalu + miska
- $m_{OK,M}$  hmotnost odstředěného kalu + miska
- $m_M$  hmotnost misky
- $m_{VSK}$  hmotnost vysušeného odstředěného kalu
- $m_{OK}$  hmotnost odstředěného kalu

Při změně teploty dezintegrace byly zjištěny následující poznatky:

- Obsah sušiny v kalu roste se zvyšující teplotou dezintegrace.
- Množství odstředěného kalu s rostoucí teplotou dezintegrace klesá.
- Nejvyššího obsahu sušiny u ZNK bylo dosaženo při teplotě dezintegrace 150 a 180 °C, kdy dosáhla hodnoty 14,2 a 14,5 %.
- Nejnižší hmotnosti odstředěného kalu bylo rovněž dosaženo při teplotě dezintegrace 150 a 180 °C, kdy dosáhla hodnoty 19,41 a 18,66 g, to bylo způsobeno větším obsahem NL obsažených ve fugátu.
- Zbylé obsahy sušin byly až na malé odchylky stejné při porovnání dezintegrováného a nedezintegrováného kalu.



Graf. 4 Závislost obsahu sušiny ZNK I na teplotě dezintegrace



Graf. 5 Závislost obsahu sušiny ZNK II na teplotě dezintegrace

## Hodnoty centrifugy

Složka	ZNK - odběr 8.12.2008									
Datum	9.12.		10.12.		11.12.		12.12.		15.12.	
Teplota dezintegrace [°C]	60		90		120		150		180	
Množství ZNK [ml]	80		80		80		80		80	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska+kádinka [g]	207,52	191,43	206,80	192,16	206,81	192,16	206,80	192,16	190,08	205,88
Miska+kádinka+odstředěný kal [g]	264,23	242,52	254,03	233,13	250,50	227,04	264,52	224,72	221,83	223,98
Vyšušný odstředěný kal [g]	210,94	194,61	209,62	194,64	209,39	194,42	210,12	194,94	192,07	207,51
Odstředěný kal [g]	56,71	51,09	47,23	40,97	43,69	34,88	57,72	32,57	31,75	18,10
Rozdíl odstředěného ned. a dez. kalu [g]	5,62		6,26		8,80		25,15		13,65	

Tab.15 Výsledky měření centrifugy ZNK I

Hodnoty centrifugy

Složka	ZNK - odběr 11.2.2009																			
Datum	11.2.				12.2.				19.2.				16.2.				23.2.			
Teplota dezintegrace [°C]	60				90				120				150				180			
Množství ZNK [g]	80				80				80				80				80			
Druh kalu	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II
Miska+kádinka [g]	193,59	193,03	192,65	192,22	193,58	193,02	192,64	192,21	193,58	193,02	192,64	192,21	193,59	193,03	192,64	192,22	193,57	193,02	192,63	192,21
Miska+kádinka+odstředěný kal [g]	251,43	249,29	245,01	247,06	251,84	250,46	248,00	247,86	255,13	254,54	240,61	241,00	252,69	252,15	222,04	222,81	258,48	258,33	212,04	210,87
Vyšušný odstředěný kal [g]	197,37	196,76	196,32	195,89	197,45	196,88	196,30	195,85	197,24	196,69	196,08	195,69	197,36	196,79	195,75	195,37	197,32	196,78	195,39	194,92
Odstředěný kal [g]	57,84	56,26	52,37	54,84	58,26	57,44	55,37	55,65	61,56	61,52	47,98	48,80	59,10	59,12	29,39	30,59	64,91	65,31	19,41	18,66
Rozdíl odstředěného ned. a dez. Kalu [g]	5,48		1,42		2,89		1,79		13,58		12,72		29,71		28,53		45,50		46,65	
Výška fugátu [mm]	24	22	26	23	24	23	25	24	23	22	30	29	23	22	49	47	18	17	56	55
Celková výška [mm]	81	81	81	80	81	82	82	81	82	82	82	82	81	81	81	81	81	81	81	79
Obsah sušiny[%]	6,6	6,6	7,0	6,7	6,6	6,7	6,6	6,5	6,0	6,0	7,2	7,1	6,4	6,4	10,6	10,3	5,8	5,8	14,2	14,5

Tab.16 Výsledky měření centrifugy ZNK II

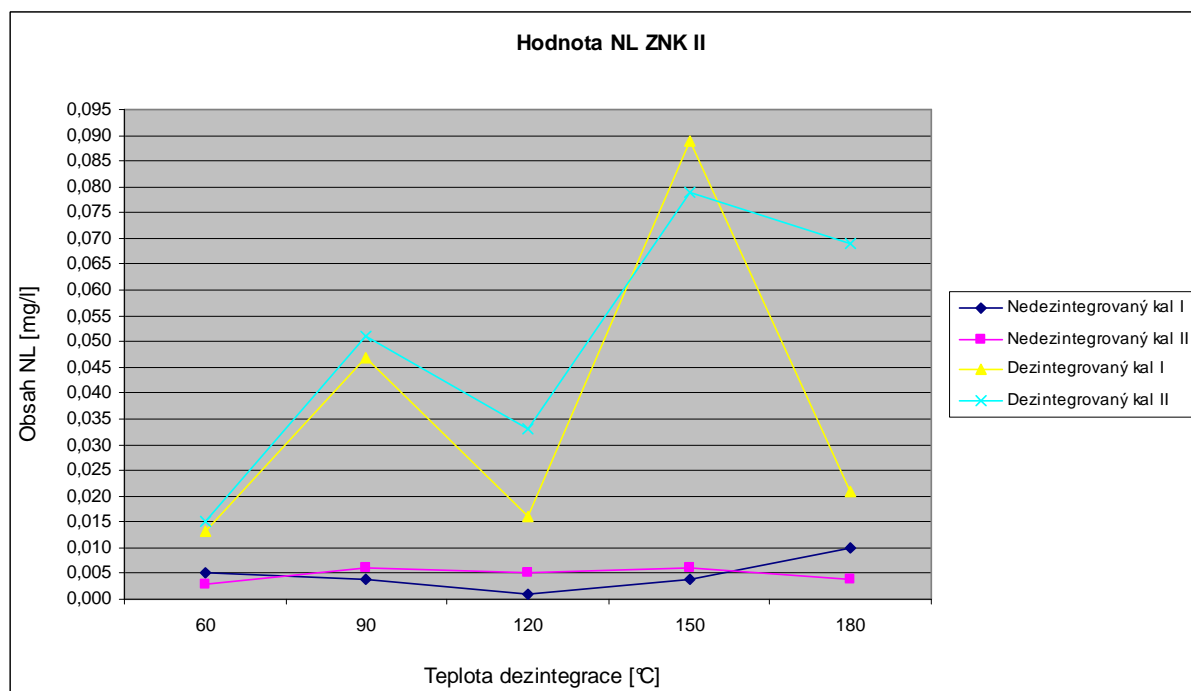
### 7.3.4 Hodnota obsahu nerozpuštěných látek ve fugátu

Při stanovení obsahu NL bylo zjištěno, že hodnoty vzorků ZNK před a po dezintegraci, byly rozlišné. Pro vzorky NL u ZNK byla naměřená průměrná hodnota 0,005 mg/l. U ZNK po dezintegraci byla stanovená průměrná hodnota 0,055 g. Výsledky NL jsou shrnuty v 0 a tab.18 a graf. 6.

#### Zjištěné poznatky NL:

- S rostoucí teplotou dezintegrace byly naměřeny vyšší hodnoty NL, bylo to způsobeno větším množstvím fugátu (získaného při odstředění kalu, kde množství rostlo se zvyšující teplotou dezintegrace viz. tab.16)
- Nejnižší hodnoty NL byly naměřeny 0,001 a 0,003 g
- Nejvyšší hodnoty 0,089 a 0,079 g NL byly dosaženy při teplotě dezintegrace 150 °C

Při nízkých hodnotách NL byl fugát (nedezintegrovaný) nepatrně zakalený (šedě zbarvený). Při vyšších teplotách dezintegrace bylo zbarvení fugátu viditelnější, měl světle hnědou až černou barvu s volně plovoucími částicemi viz obr. 23. Při filtraci fugátu (dezintegrovaného) docházelo k vytvoření pěny s velkými bublinami a filtrace trvala podstatně déle v porovnání s nedezintegrovaným kalem, protože docházelo k částečnému zacpání filtru.



Graf. 6 Závislost obsahu NL ve fugátu ZNK II na teplotě dezintegrace



Hodnoty NL

Složka	ZNK - odběr 8.12.2008					
	11.12.		12.12.		15.12.	
Datum						
Teplota dezintegrace [°C]	120		150		180	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska+filtr [g]	103,966	101,008	103,381	100,417	103,582	101,009
Fugát [g]	32,555	39,013	17,924	41,727	44,513	58,355
Miska+filtr po vysušení [g]	103,974	101,041	103,382	101,198	103,631	101,061
Rozdíl [g]	0,008	0,033	0,001	0,781	0,049	0,052
Hodnota NL [mg/l]	245,24651	844,18015	55,679536	18679,464	1098,6004	889,3154

Tab. 17 Výsledky NL ZNK I

Složka	ZNK - odběr 11.2.2009																			
	11.2.				12.2.				19.2.				16.2.				23.2.			
Datum																				
Teplota dezintegrace [°C]	60	60	60	60	90	90	90	90	120	120	120	120	150	150	150	150	180	180	180	180
Druh kalu	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II
Miska+filtr [g]	101,342	104,313	100,323	100,082	101,368	104,306	100,321	100,111	101,369	104,345	100,352	100,113	101,371	104,340	100,361	100,117	101,366	104,298	100,315	100,112
Fugát [g]	21,494	22,282	26,121	23,568	20,953	21,790	22,339	21,578	17,396	17,822	29,388	29,416	20,122	19,582	48,357	47,191	14,347	14,082	58,264	57,530
Miska+filtr po vysušení [g]	101,347	104,316	100,336	100,097	101,372	104,312	100,368	100,162	101,370	104,350	100,368	100,146	101,375	104,346	100,450	100,196	101,376	104,302	100,336	100,181
Rozdíl [g]	0,005	0,003	0,013	0,015	0,004	0,006	0,047	0,051	0,001	0,005	0,016	0,033	0,004	0,006	0,089	0,079	0,010	0,004	0,021	0,069
Hodnota NL [mg/l]	232,16	134,37	496,69	635,18	190,52	274,80	2099,74	2358,79	57,37	279,99	543,35	1119,59	198,39	305,79	1836,80	1670,70	695,62	283,48	359,71	1196,98

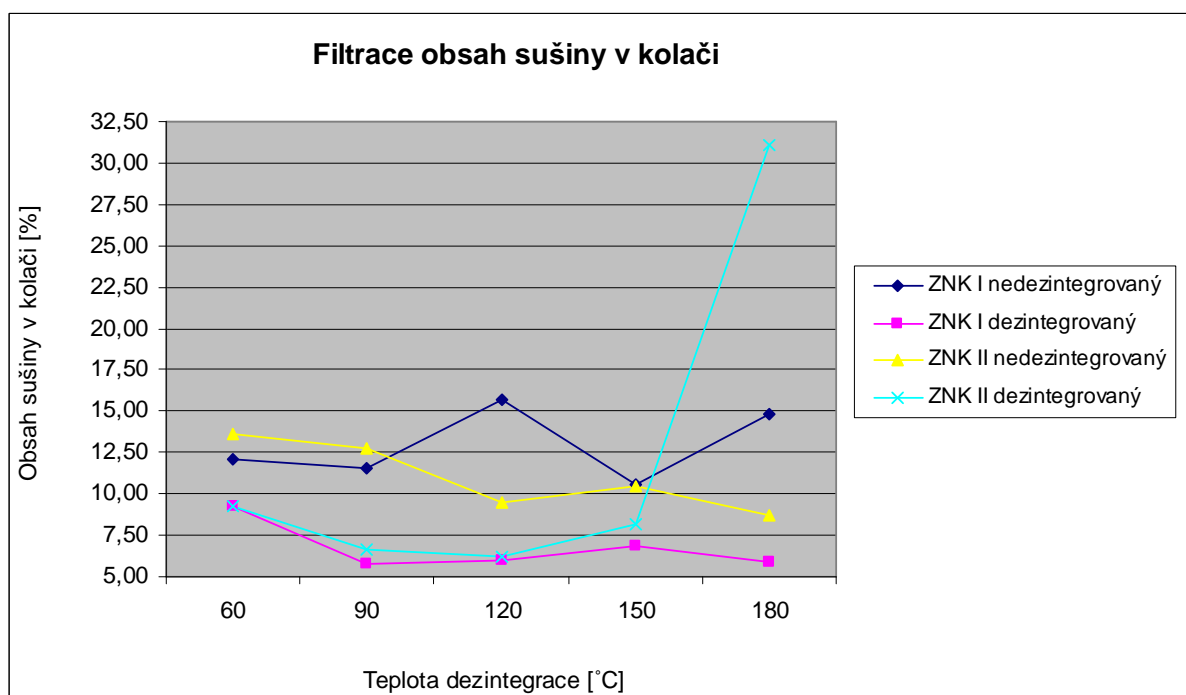
Tab. 18 Výsledky NL ZNK II

### 7.3.5 Hodnoty obsahu sušiny v kalu po filtraci

U naměřených hodnot při filtraci, byly porovnány hodnoty obsahu sušiny v koláči. Výsledky jsou znázorněny v tab.19 z níž je patrné, že obsahy sušiny nedezintegrovaného a dezintegrovaného kalu se podstatně liší. Při měření dezintegrovaného kalu bylo zjištěno, že hodnoty obsahu sušin jsou ve většině případech nižší.

#### Filtrace shrnutí:

- Nejvyšší obsah sušiny v koláči byl naměřen při teplotě dezintegrace 180 °C, kdy hodnota dosáhla 31,03 %.
- Při filtraci dezintegrovaného kalu ve všech případech docházelo k zacpání filtru, proto k odvodnění kalu nedocházelo u filtrace, ale posléze v sušárně. Výjimkou bylo měření při teplotě 180 °C, zde k zacpání filtru nedošlo. Proto byly hodnoty obsahů sušin u dezintegrovaného kalu nižší v porovnání s nedezintegrovaným.
- Výsledky obsahu sušin nejsou tedy moc věrohodné, proto je lepší přihlížet k naměřeným hodnotám pomocí sušící váhy KERN, které jsou v tab.13.



Graf. 7 Závislost obsahu sušiny v koláči na teplotě dezintegrace

Hodnoty filtrace

Složka	ZNK - odběr 8.12.2008										ZNK - odběr 11.2.2009									
	9.12.		10.12.		11.12.		12.12.		15.12.		11.2.		12.2.		19.2.		16.2.		23.2.	
Datum	9.12.		10.12.		11.12.		12.12.		15.12.		11.2.		12.2.		19.2.		16.2.		23.2.	
Teplota dezintegrace [°C]	60		90		120		150		180		60		90		120		150		180	
Množství ZNK [ml]	200		200		200		200		200		200		200		200		200		200	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska [g]	103,45	100,62	103,45	100,62	100,62	103,46	100,62	103,46	100,62	103,47	104,63	101,84	104,63	101,83	104,62	101,83	104,64	101,83	104,64	101,84
Miska+filtr [g]	104,31	101,55	104,31	101,55	101,55	104,38	101,52	104,37	101,55	104,41	105,36	102,56	105,38	102,58	105,39	102,59	105,39	102,59	105,39	102,59
Miska+mokrý filtr [g]	106,07	103,43	106,27	103,47	103,44	106,33	103,34	106,22	103,04	106,09	107,48	104,60	107,66	104,72	107,56	104,81	107,74	104,79	107,57	104,82
Filtrovaný kal [g]	178,06	187,93	166,19	215,98	145,71	200,28	185,02	215,77	137,48	178,68	174,52	200,28	179,94	240,33	201,39	244,85	194,13	204,74	209,69	125,98
Kal po vysušení [g]	113,0	109,4	111,20	107,99	108,17	110,00	110,17	111,82	106,66	108,70	114,47	111,42	114,56	111,64	114,30	111,33	114,42	110,74	114,31	109,16
Obsah sušiny v koláči [%]	12,14	9,24	11,50	5,72	15,66	5,99	10,59	6,80	14,85	5,91	13,59	9,26	12,71	6,68	9,50	6,24	10,45	8,15	8,73	31,03

Tab. 19 Výsledky filtrace

## 7.4 Teplota kalů

Teplota ZNK při dezintegraci nedosáhla vždy požadované teploty dezintegrace. Následující tab.20 poukazuje na dosažené teploty při dezintegraci.

### Důvody nedosažené teploty dezintegrace jsou:

- Vliv prostupu tepla - vedením (kondukce), kdy docházelo k pomalému prostupu teploty do celé nádoby.
- Nedocházelo k míchání kalu, což by umožnilo lepší a rychlejší ohřev.

ZNK	ZNK I (odběr 8.12.2008)					ZNK II(odběr 11.2.2009)				
Teplota dezintegrace [C°]	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180
Dosažená teplota [C°]	48	78	106	126	136	48	78	104	137	170

Tab.20 Teploty dezintegrace ZNK

### Návrhy na zlepšení a urychlení ohřevu kalu:

Na obr. 13 je znázorněna laboratorní tlaková nádoba, které byla použita pro dezintegraci ZNK. Tato nádoba nemá zabudované míchání, které by podstatně urychlilo ohřev kalu a přiblížilo nás k dosažení požadované teploty dezintegrace. Na obr. 26 jsou znázorněny různé varianty míchání kalu. U všech uvedených způsobu předpokládáme naplnění nádoby z 80 %.

### Navržené varianty:

- a) Tato varianta umožňuje promíchávání kalu dvěma způsoby. Základní části jsou vzduchové čerpadlo viz 3, přívodní trubka viz 1 a regulační trubka viz 2. Přívodní trubka slouží pro přívod vzduchu a k provzdušnění kalu. Regulační trubka slouží jako regulační ventil. Má za úkol regulovat tlak na požadovanou hodnotu. Dále odvádí potřebný vzduch , aby mohlo docházet k opakovanému promíchání kalu.

#### výhody

- dostatečné promíchání kalu
- zkrácení celého procesu ohřívání kalu
- snadná regulace tlaku v nádobě

#### nevýhody

- přídavné vzduchové čerpadlo
- vyšší náklady na ohřev kalu
- dražší mechanické těsnění

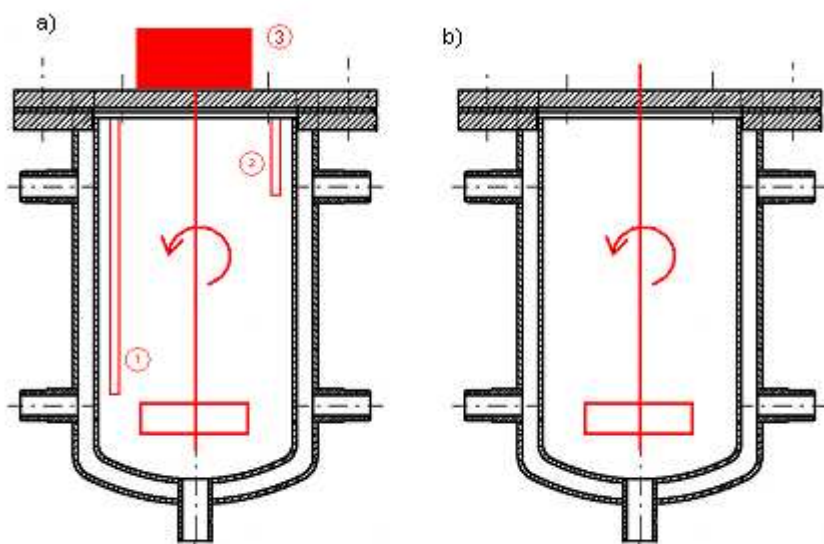
- b) Tato varianta umožňuje snadné a účinné promíchání kalu pomocí rotační lopatky. Z navržených variant představuje nejmenší zásah do tlakové nádoby, která je používána.

#### výhody

- účinné promíchání kalu
- nízké náklady na pořízení ve srovnání s ostatními návrhy
- zkrácení celého procesu ohřívání kalu

#### nevýhody

- dražší mechanické těsnění



Obr. 26 Varianty promíchávání kalu

## 7.5 Doplnková měření

Jako doplňkové měření byla provedena dezintegrace ZNK pro teplotu 150 °C, protože tato teplota byla podle předcházejících měření nejvýhodnější. Byla zde sledována závislost obsahu sušiny v kalu na teplotě dezintegrace. Bylo provedeno pět měření ZNK, kdy byl kal ohřátý na teplotu 130 °C a následně se pokračovalo v ohřívání kalu 60, 45, 30, 15 a 0 min. Poté byla provedeno závislost na době ohřevu a obsahu sušiny nedezintegrovaného a dezintegrovaného kalu při filtraci a u centrifugy.

### 7.5.1 Obsah sušiny u ZNK

Hodnoty obsahů sušin u nedezintegrovaného a dezintegrovaného ZNK byly stejné, bylo tedy potvrzeno předcházející měření. Kdy bylo stanoveno, že hodnota obsahu sušiny se s rostoucí teplotou dezintegrace není závislá. Tab.21 znázorňuje naměřené hodnoty sušiny.

Složka	ZNK				
Číslo měření	1	2	3	4	5
Čas dohřehu nad 130°C [min]	60	45	30	15	0
Teplota dezintegrace [°C]	150	150	150	150	150
Obsah sušiny u ZNK [%]	6,187	5,806	6,761	6,012	5,965
Obsah sušiny u ZNK po dezintegraci [%]	6,243	10,482	6,184	6,089	7,730

Tab.21 Hodnoty obsahu sušiny u ZNK

### 7.5.2 Hodnoty CST u ZNK

U hodnot CST byl pro všechna měření použit kruhový zásobník o průměru 18 mm. Nejlepší odvoditelnosti kalu bylo dosaženo při prodlevě ohřívání 45 min, kdy bylo dosaženo hodnoty 115,4 s. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v tab.22.

Složka	ZNK				
	1	2	3	4	5
Číslo měření					
Čas dohřehu nad 130°C [min]	60	45	30	15	0
Teplota dezintegrace [°C]	150	150	150	150	150
Hodnota CST u ZNK [s]	63	73,6	126,5	119,1	163,9
Hodnota CST u ZNK po dezintegraci [s]	288,9	115,4	368,9	436,2	481,7
Nárůst hodnoty CST [%]	458,57	156,79	291,62	366,25	293,90

Tab.22 Hodnoty CST

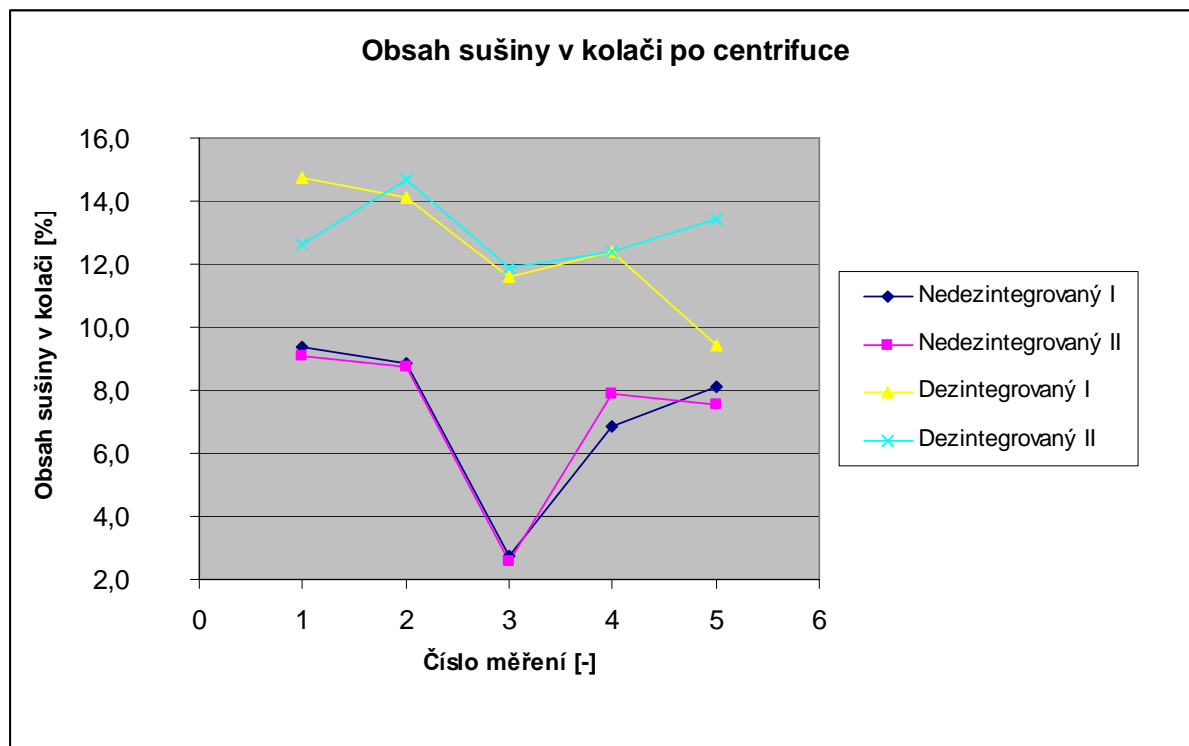
### 7.5.3 Hodnoty obsahu sušiny v kalu po centrifuze

Pro měření hodnot obsahu sušiny na centrifuze byly vždy srovnávány dva vzorky ZNK před a po dezintegraci. Množství vzorků bylo vždy 80 g, pro oba druhy kalu. Hodnoty odstředěného kalu po dezintegraci byly v rozmezí 25 – 42 g. Obsahy sušin v koláči dezintegrováného kalu byly relativně podobné, hodnoty byly v rozsahu 10 – 15 %. Výsledky sušin odstředěného kalu jsou shrnuty v tab.23 a zobrazeny v graf. 8.

**Při změně doby ohřevu kalu byly zjištěny následující poznatky:**

- Obsah sušiny v kalu roste s delší dobou ohřevu.
- Množství odstředěného kalu s rostoucím časem klesá, z důvodu dosažení menší teploty dezintegrace.
- Nejvyššího obsahu sušiny u ZNK bylo dosaženo při době ohřevu 60 a 45 min, kdy dosáhla hodnoty 14,7 a 14,6 %.
- Nejnižší hmotnosti odstředěného kalu bylo dosaženo době ohřevu 30 min, kdy dosáhla hodnoty 25,043 a 29,87 g.
- Průměrná výška fugátu dezintegrováného kalu dosáhla hodnoty 45 mm, což bylo ve srovnání s nedezintegrováním až o 80 % více.
- Zbarvení fugátu bylo hnědozelené a byl vyšší obsah NL.





Graf. 8 Závíslost obsahu sušiny v koláči na době ohřevu

Složka	ZNK																			
	16.3.				23.3.				6.4.				9.4.				16.4.			
Datum	16.3.		23.3.		6.4.		9.4.		16.4.		16.3.		23.3.		6.4.		9.4.		16.4.	
Teplota dezintegrace [°C]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Druh kalu	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II
Miska+kádinka [g]	193,57	193,02	192,64	192,21	193,59	193,03	192,64	192,22	193,64	193,23	192,69	198,15	189,86	193,74	191,73	190,56	193,59	191,95	193,57	190,81
Miska+kádinka+odstředěný kal [g]	245,84	246,83	222,39	222,38	248,76	248,60	224,79	223,71	246,00	253,37	222,56	223,20	258,89	254,36	228,29	227,20	250,63	253,97	233,40	232,12
Vysušený odstředěný kal [g]	198,46	197,90	197,02	196,02	198,47	197,90	197,18	196,84	195,09	194,79	196,15	201,13	194,61	198,51	196,27	195,11	198,21	196,63	197,32	196,37
Odstředěný kal [g]	52,27	53,81	29,76	30,17	55,16	55,58	32,14	31,49	52,36	60,14	29,87	25,04	69,03	60,61	36,56	36,64	57,05	62,02	39,83	41,31
Rozdíl odstředěného ned. a dez. Kalu [g]	22,52		23,64		23,02		24,09		22,49		35,10		32,47		23,98		17,22		20,71	
Výška fugátu [mm]	28	27	47	48	26	27	46	46	23	23	49	45	17	18	39	42	24	23	38	39
Celková výška [mm]	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	82	81	82	82
Obsah sušiny v koláči [%]	9,4	9,1	14,7	12,6	8,8	8,8	14,1	14,7	2,8	2,6	11,6	11,9	6,9	7,9	12,4	12,4	8,1	7,5	9,4	13,4

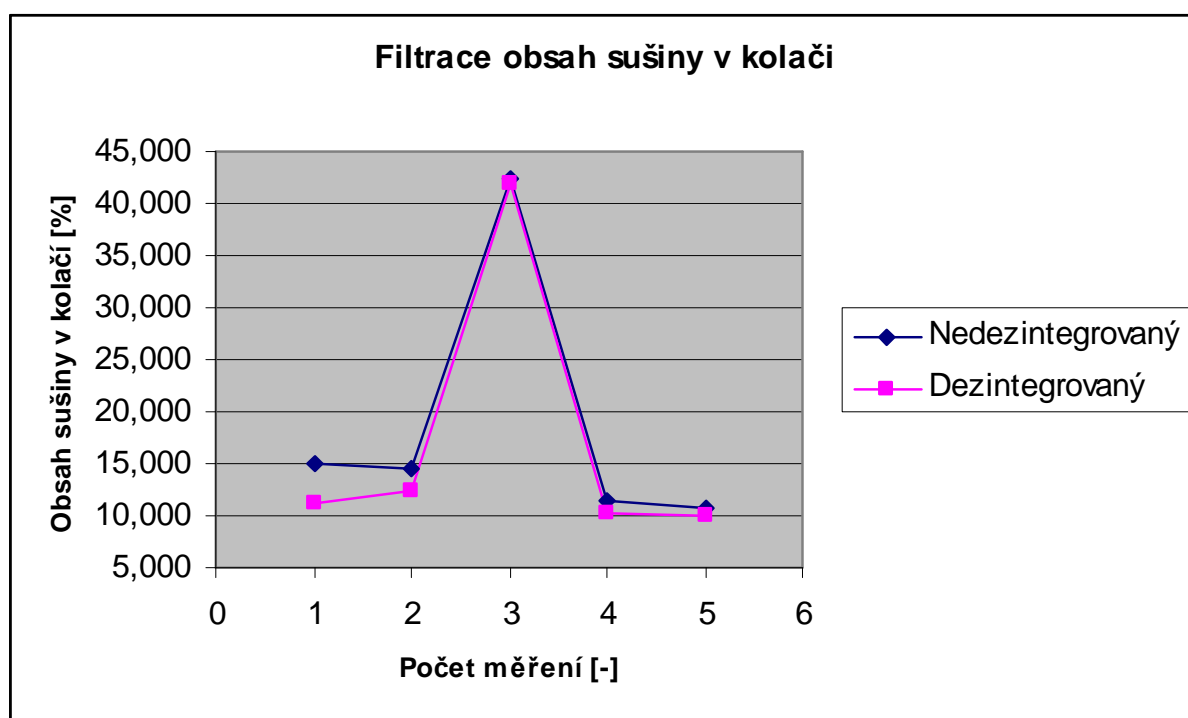
Tab.23 Hodnoty kalu po centrifuze při teplotě 150 °C

### 7.5.4 Hodnoty kalu po filtraci

Pro měření obsahu sušiny v koláči při filtraci, byly vždy srovnávány dva vzorky ZNK a ZNK po dezintegraci. Množství obou vzorků bylo vždy 200 ml. Výsledky jsou znázorněny v tab.24 a graf. 9 z níž je patrné, že obsahy sušiny dezintegrováného kalu jsou nižší.

#### Filtrace shrnutí:

- Nejvyšší obsah sušiny v koláči byl naměřen při teplotě dezintegrace 150 °C a době ohřevu 30 min, kdy hodnota dosáhla 41,87 %.
- Při filtraci dezintegrováného kalu ve všech případech docházelo k zacpání filtru, proto k odvodnění kalu nedocházelo u filtrace, ale posléze v sušárně.



Graf. 9 Závislost obsahu sušiny v koláči na době ohřevu

Složka	ZNK									
	16.3.		23.3.		6.4.		9.4.		16.4.	
Datum	150		150		150		150		150	
Teplota dezintegrace [°C]	150		150		150		150		150	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska [g]	100,746	103,242	100,755	103,243	99,636	100,618	99,637	100,621	99,631	101,249
Miska+filtr [g]	101,459	103,957	101,474	103,951	100,402	101,385	100,414	101,397	100,421	102,036
Miska+mokrý filtr [g]	103,612	106,116	103,624	106,279	102,832	103,766	102,719	103,728	102,796	104,516
Filtrovaný kal [g]	182,328	207,248	183,930	198,381	130,753	130,739	202,524	217,149	202,895	221,003
Kal po vynušení [g]	113,201	115,192	113,082	115,288	112,252	112,679	111,869	112,911	111,208	113,743
Obsah sušiny v kolači [%]	14,917	11,109	14,455	12,309	42,441	41,872	11,477	10,152	10,776	10,050

Tab.24 Hodnoty kalu po filtraci

## 8. Závěr

Při pohledu na rychlost rozvoje lidské společnosti je jasné, že produkce kalů se neustále navyšuje a současné metody likvidace čistírenských kalů jsou již nedostačující. Z tohoto hlediska je potřeba nalézt nové metody likvidace, které jsou ekologicky i ekonomicky výhodné. Zde se naskytuje uplatnění pro metodu dezintegrace kalů.

V diplomové práci byla řešena metoda termické dezintegrace. Při této metodě dochází k zahřátí kalu na určenou teplotu dezintegrace, při čemž dosáhneme rozkladu buněk. Proto dochází k lepšímu odvodnění a snížení objemu celkové produkce kalu. Experiment byl prováděn v tlakové nádobě na různé teploty dezintegrace (60, 90, 120, 150 a 180 °C).

Z provedených měření dezintegrace zahuštěného nestabilizovaného kalu na danou teplotu bylo zjištěno, že nejmenšího podílu obsahu sušiny bylo dosahováno při teplotách dezintegrace do 100 °C. Naopak vyššího podílu bylo dosahováno při teplotách nad 100 °C. Jako nejvýhodnější teplota dezintegrace použitelná v praxi je 150 °C a 180 °C a při tlaku 0,8 MPa. To způsobilo podstatně lepší odvodnění, urychlilo dobu rozkladu kalu a způsobilo uvolnění nerozpuštěných látek obsažených v kalu.

Při experimentu na obsah sušiny v odvodněném kalu byly srovnávány metody odvodnění kalu pomocí centrifugy a podtlakové filtrace.

Pro odvodnění kalu pomocí centrifugy bylo dosaženo maximálního obsahu sušiny 14,2 a 14,5 % a docházelo k lepšímu odstředění kalu. Rozdíl hmotnosti nedezintegrováného a dezintegrováného kalu u odstředění dosahoval snížení celkové hmotnosti až o 200 %. Snížení celkové hmotnosti se projevilo ve zvýšení obsahu nerozpuštěných látek ve fugátu, což je z technologického hlediska nevyhovující, protože se ve fugátu vrací zpět do biologického procesu až třetina produkce sušiny zahuštěného nestabilizovaného kalu.

Metodou podtlakové filtrace bylo dosaženo maximálního obsahu sušiny 6,8 a 8,15 % při teplotě 150 °C. Nevýhodou této metody bylo, že při filtraci docházelo k zacpání filtru. Proto k odvodnění kalu docházelo později v sušárně. Tuto metodu nepovažuji za vhodnou a použitelnou pro praxi.

Zhodnocením výsledků bylo zjištěno, že jako výhodnější využití pro praxi se prokazuje metoda odvodnění pomocí centrifugy. Metoda je ve srovnání s podtlakovou filtrací rychlejší a je zde možné snadnější začlenění do čistírenského procesu. Velkou roli hraje dávkování flokulantu při odvodnění na centrifuze. Se zvyšující měrnou dávkou flokulantu se zvyšuje obsah sušiny v odvodněném kalu.

Získané výsledky v kombinaci se zkušenostmi při průběhu měření a navržení dezintegrační jednotky poslouží pro vypracování ekonomické a energetické bilance nákladů na termickou dezintegraci [10].

## Použitá literatura

### *Monografie*

- [1] Pytl, V.: Příručka pro provozovatele čistírny odpadních vod. Vydání 1. Praha: 206 s. ISBN 80-239-2528-8
- [2] KOLEKTIV.: sborník referátů. Možnosti využití kalů z ČOV v zemědělství. Vydání 1. Praha: VÚVR, 200, ISBN 80-238-5333-3
- [3] Michal Dohányos, Jan Koller, Nina Strnadová: Čištění odpadních vod. 1. vydání. Praha, 1998. 177 s. ISBN 80-7080-207-3
- [4] Medek, J.: *Hydraulické pochody*. 3. vyd. Brno: VUT Brno, 2000. 339 s. ISBN 80-214-0563-5
- [5] Lubomír Mazel, Miloš Pokorný: Vodárny a čistírny. 2. přepracované vydání, VUT, Brno 1992. 149 s. ISBN 80-214-0473-6

### *Vědecko-kvalifikační práce*

- [6] Boráň, J.: Příprava kalů z ČOV pro jejich energetické využití. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2003. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Martinák, Ph.D.
- [7] Boráň, J.: Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 127s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík , CSc
- [8] Žerava, Z.: Čistírenské kaly-současnost a budoucnost. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.
- [9] Volejník, T.: Vliv specifické spotřeby fukulantu na odvoditelnost čistírenských kalů. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň Ph.D.
- [10] Brtna F.: Návrh dezintegrační jednotky. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2009. 107 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň Ph.D.

*Články v časopise*

- [11] Dohányos, M.: SOVAK. *Vliv dezintegrace na produkci bioplynu*, 2005, roč. 14, č. 11, s. 3-5, ISSN 1210-3039
- [12] Dohányos, M.: Odpadové fórum. *Kaly z ČOV*, 2004, roč. 4, č. 05, s. 7, ISSN 1212-7779
- [13] Beneš, J.: *Dezintegrace čistírenského kalu*, Sovak, 2000, č. 04,
- [14] *Statistická ročenka České republiky 2006* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2006. Dostupné z  
<[www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke\\_rocenky\\_ceske\\_republiky](http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke_rocenky_ceske_republiky)>
- [15] *ČOV Brno – Modřice*, [online]. Brno: Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., 2005. [cit. 2008-01-13]. Dostupné z:  
<<http://www.bvk.cz/page.jsp?lang=cz&firstLevel=29&secondLevel=43&thirdLevel=45>>
- [16] *Sbírka zákonů ČR*
- [17] *Statistická ročenka České republiky 2009* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2009. Dostupné z  
<[www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke\\_rocenky\\_ceske\\_republiky](http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke_rocenky_ceske_republiky)>
- [18] Commenges-Bernole N., Marguerie J.: *ScienceDirect.Ultresonics Sonochemistry*, 2009. Dostupné z  
<[www.elevier.com/locate/ultsonch](http://www.elevier.com/locate/ultsonch)>

*Firemní literatura (katalogy, výroční zprávy)*

- [19] *Technický popis VTA Technologie GMBH, Weibern: 2008*