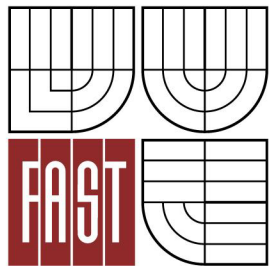


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ ENERGETIC UTILISATION OF SEWAGE SLUDGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV TLAŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. PETR HLAVÍNEK, CSc., MBA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Miroslav Tlašek
Název	Energetické využití čistírenských kalů
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....
doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] HLAVÍNEK, Petr; HLAVÁČEK, Jiří. Čištění odpadních vod-praktické příklady výpočtů, NOEL 2000, 1996, 196 s. ISBN 80-86020-00-2.
[2] HLAVÍNEK, Petr; MIČÍN, Jan; PRAX, Petr. Příručka stokování a čištění, NOEL 2000, 2001, 251 s., ISBN 80-86020-30-4.
[3] KREJČÍ, Vladimír; HLAVÍNEK, Petr; ZEMAN, Evžen. Odvodnění urbanizovaných území – koncepční přístup, NOEL 2000, 2002, ISBN 80-86020-39-8.
[4] MALÝ, Josef; MALÁ, Jitka. Chemie a technologie vody. 2. doplněné vydání. Brno: ARDEC s.r.o., 2006. 329 s. ISBN 80-86020-50-9.
[5] METCALF & EDDY: Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse (4th Edition ed.), MCGRAW-HILL, 2001, ISBN 0-07-041878-0.
[6] Sborníky Water Science and Technology, IWA Publishing.
[7] Časopisy SOVAK, VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ.

Zásady pro vypracování

Diplomová práce bude zaměřena na energetickou problematiku využití čistírenských kalů. Práce je řešena na základě požadavku z praxe ve spolupráci se společností HUBER CS. Bude zpracován přehled postupů a technologií, zejména s ohledem na zvýšení produkce energie na ČOV. V druhé části práce bude zpracována studie energetického využití kalů na vybrané ČOV. Podklady si diplomant zajistí po dohodě s vedoucím práce v rámci diplomového semináře u fy HUBER CS. Při zpracování textů, výpočtů a výkresové části dokumentace bude v maximální míře využita výpočetní technika.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).
- 3.

.....
prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou spojenou s finálním zpracováním kalů. Čistírenské kaly jsou nevyhnutelným produktem při čištění odpadních vod. Také je do nich koncentrována většina znečištění. A i díky tomu obsahuje i velké procento spalitelných látek. Před termickým využitím je nutno kaly vhodně upravit. Termické využití kalů nabízí nejefektivnější způsob energetického využití. Jedná se o přeměnu energie v kálech na teplo a elektrickou energii. V drtivé většině, pokud se nejedná o spolu-spalování, je nutné kaly upravit a to tak, že se vysuší. Neoptimálnější je to pomocí moderních technologií. Existuje několik variant možného využití. Bohužel není možné navrhnout obecně nejvhodnější technologii či metodický postup, jak co nejefektivněji využít čistírenských kalů. Konkrétní zadání mají svá specifika. Ve své práci jsem se proto nejprve snažil nastínit možné technologie a ve druhé části navrhnout kalovou koncovku pro ČOV Hodonín.

KLÍČOVÁ SLOVA

odpadní voda, čistírenský kal, čistírna odpadních vod, kalové hospodářství

ABSTRACT

Diploma thesis deals with issues related to final treatment sludge. Sewage sludge is an inevitable product of wastewater treatment. Also, most of them concentrated pollution. Most of pollution are concentrated in to them. And because it contains a large percentage of combustibles. Before thermal utilization, it is necessary to appropriately adjust the sludge. Thermal sludge utilization offers the most effective method of energy recovery. It is an energy conversion in the sludge, to heat and electricity. In the vast majority, if not the co-firing, it is necessary to modify the sludge and so it is dried. This is the optimal use of modern technology. There are several variations possible use. Unfortunately it is not in general able to propose the most appropriate technology or methodology, how to make best use of sewage sludge. Specific assignment usually have their own characteristics. In my work I will therefore first try to outline possible technology and in the second part to suggest sludge terminal for WWTP Hodonín.

KEYWORDS

wastewater, sewage sludge, wastewater treatment plant, sludge management

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Miroslav Tlašek *Energetické využití čistírenských kalů*. Brno, 2015. 67 s., 3 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního
hospodářství obcí. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2015

.....
podpis autora
Bc. Miroslav Tlašek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych touto formou poděkovat prof. Ing. Petru Hlavínkovi, CSc., MBA. za vedení diplomové práce. Dále pak za spolupráci firmě HUBER CS spol. s r.o., Vodovody a kanalizace Hodonín, a.s., Ing. Janu Ševčíkovi a Ing. Richardu Bábíčkovvi.

OBSAH

1. ÚVOD.....	3
2. ČISTÍRENSKÉ KALY A JEJICH VYUŽITÍ.....	4
2.1. Charakteristika kalu.....	4
2.2. Možnosti využití čistírenských kalů.....	5
2.2.1. Nakládání s kaly v ČR.....	5
2.2.2. Kritéria možnosti využití.....	7
2.3. Termické způsoby využití kalů.....	8
2.3.1. Důvody pro termické zpracování kalů.....	9
2.4. Vliv teploty na anaerobní stabilizaci kalů.....	10
2.4.1. Laboratorní testy.....	10
2.5. Spolu-spalování kalů.....	12
2.5.1. Spalování v elektrárnách.....	12
2.5.2. Spalování ve spalovnách odpadů.....	12
2.5.3. Spalování v cementářských pecích.....	13
2.6. Spalování kalů v pecích.....	13
2.6.1. Spalování ve fluidní vrstvě.....	13
2.6.2. Spalování v etážových pecích.....	14
2.7. Alternativní způsoby spalování kalů.....	15
2.7.1. Mokrý oxidace kalů.....	15
2.7.2. Pyrolýza kalů.....	16
2.7.3. Mikrovlnná pyrolýza.....	16
2.7.4. Zplyňování kalů.....	17
2.8. Systém HUBER SLUDGE2ENERGY.....	19
2.9. Sušení čistírenských kalů.....	22
2.9.1. Nepřímé sušení kalů.....	22
2.9.2. Přímé sušení.....	23
2.10. Termické zpracování kalů v zahraničí.....	26
2.10.1. Rakousko.....	26
2.10.2. Německo.....	27
2.10.3. Nizozemsko.....	28
3. POTŘEBA A VYUŽITÍ ENERGIE NA ČOV.....	29
3.1. Energetická efektivnost.....	30
4. KALOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ NA ČOV HODONÍN.....	31
4.1. Energetika provozu VAK Hodonín.....	31
4.2. Popis současného stavu ČOV Hodonín.....	31
4.3. Sušení čistírenských kalů.....	33
4.3.1. Zkouška sušení kalu z ČOV Hodonín.....	33

4.3.1.	Sušení kalů na pásové sušárně HUBER.....	36
4.3.2.	Sušení kalů solární sušárnou Huber.....	46
4.4.	Elektrárna Hodonín	51
4.5.	Využití kalů na zemědělské půdě	53
5.	ZÁVĚR	55
6.	POUŽITÁ LITERATURA.....	57
	SEZNAM TABULEK	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	65
	SEZNAM PŘÍLOH	66
	SUMMARY	70

1. ÚVOD

Energie, ať už v jakékoliv podobě, ovlivňuje náš život na Zemi a je s ním spjat od dávných dob. Co spojuje tento pojem napříč staletími je, že ji chceme jako lidstvo co nejvíce využít pro náš prospěch. Nicméně v posledních letech se dozvídáme, že období, kdy budeme jen těžit a brát si co chceme, je u konce. Proto se do podvědomí lidí dostávají slova, jako jsou: recirkulace, rekuperace, zpětné využití, obnovitelné zdroje, nebo zelená. Tyto slova mají jedno společné a to je energie. Od vynálezu parního stroje uplynula spousta let, technologie šly bleskovou rychlostí kupředu a nyní žijeme v době, ve které si nedovedeme představit, že potraviny nekoupíme v supermarketu, nebo že nepoteče teplá voda ve sprše. Je to také doba, ve které si můžeme spočítat tzv. uhlíkovou stopu, kterou po sobě zanecháme. A je to právě uhlík, respektive jeho plyny, které jsou veřejností vnímány jako škodlivé pro naši planetu.

Se šetřením energií a využíváním obnovitelných zdrojů energie (OZE) se v dnešní době setkáváme téměř všude. Nicméně jejich aplikace není vždy tak jednoduchá, jak se může zdát. A to platí hlavně pro nás Čechy. OZE si většina představuje jen jako výměnu plastového okna na domě a pořízení solárních panelů na střechu. Rok 2020 by měl být zásadní pro využívání energie z obnovitelných zdrojů. Na základě nové směrnice o obnovitelných zdrojích energie přijaté dne 23. dubna 2009 postupem spolurozhodování (směrnice 2009/28/ES o následném zrušení směrnice 2001/77/ES a 2003/30/ES) stanovila, že do roku 2020 musí 20% podíl spotřeby energie EU povinně pocházet z obnovitelných zdrojů energie. Tento cíl rozdělila na závazné vnitrostátní dílčí cíle, a to s ohledem na různé výchozí situace jednotlivých členských států. Všechny členské státy mají kromě toho povinnost do roku 2020 dosáhnout 10% podílu obnovitelných zdrojů v palivech určených pro dopravu. Směrnice rovněž navrhla různé mechanismy, jež mohou členské státy využít k dosažení svých cílů (režimy podpory, záruky původu, společné projekty, spolupráce mezi členskými státy a třetími zeměmi), a stejně tak kritéria udržitelnosti pro biopaliva [1].

Pohled dnešní společnosti ze začíná měnit i na nakládání s odpady. Západní země se snaží maximálně využívat odpadní vody přitékající na čistírny odpadních vod. Odpadní voda přitékající na ČOV obsahuje znečištění, které se koncentruje do kalů. Kaly poté tvoří 50 – 80 % původního znečištění [2]. Na tradiční odpady by se tedy nemělo pohlížet jako na odpady, ale jako na produkt, či surovinu, která by se měla využívat. Moderní technologie umožňují zpracovávat čistírenské kaly a vytvářet z tradičního „odpadu“ další suroviny (např. plyn, olej, pevnou část tzv. biochar, aj.). Navíc hygienizováním kalu získáme surovinu, která může být využívána např. v zemědělství. Pohled společnosti by se měl změnit i v motivování provozovatelů čistíren odpadních vod a to v rámci nakládání s odpady. Nynější situace v České republice je taková, že provozovatelé platí za nakládání s odpady, tedy s kalem. V praxi to znamená, že provozovatelé nejsou motivováni a mnohdy na nakládání s kaly nemají ani finanční prostředky. Závěrečné hygienizování kalu může být energeticky, tedy i finančně nákladné, a vkládat další investice na „výrobu“ využitelné suroviny, za které nebude mít zisk, ale výdaje spojené na nakládání s odpady je velmi nevhodné.

2. ČISTÍRENSKÉ KALY A JEJICH VYUŽITÍ

2.1. CHARAKTERISTIKA KALU

Znečištěná odpadní voda se čistí na čistírně odpadních vod. Nejprve se odstraňují pevné a usaditelné částice na mechanickém stupni (česle, lapák písku, apod.). Shrabky a písek se obvykle likviduje samostatně (podle jejich charakteru), nicméně existují provozy, ve kterých se využívají shrabky při úpravě kalu. Prvním separačním stupněm, který nemusí být na každé ČOV, je usazovací nádrž. Na usazovací nádrži je zachycován tzv. primární kal. Tento kal je převážně biologické povahy a může hrát důležitou roli při zpracování kalu. Dalším typem kalu, se kterým se setkáváme na běžných mechanicko-biologických ČOV, je kal přebytečný, též sekundární. Je to kal získávaný z dosazovacích nádrží. Obsahuje nerozložené zbytky organických látek a přebytečnou biomasu. Přebytečný kal je dominantní a dále se zpracovává v kalové lince.

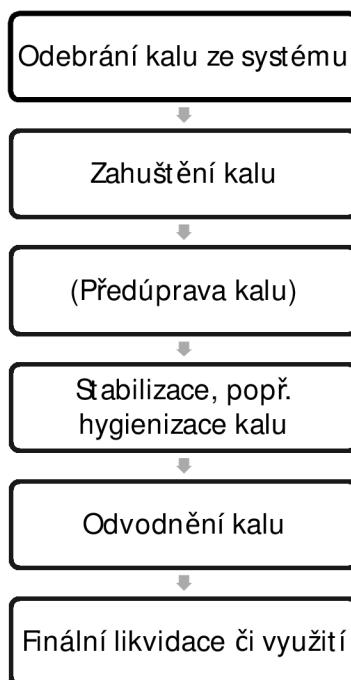
Podle zákona o odpadech č.185/2001 Sbírky se čistírenským kalem rozumí:

- 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 - zapracování kalu do půdy,
- d) programem použití kalů - dokumentace zpracovaná v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem. [3]

Běžné kaly obsahují přibližně 1 – 2 % objemu znečištěných vod, je v nich však zkoncentrováno 50 – 80 % původního znečištění. To je reprezentováno především patogenními nebo fakultativně patogenními mikroorganismy a obsahem obvykle celé řady toxických chemických látek (např. AOX, PCB, NEL aj.) a těžkých kovů (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) [2]. Klasické čistírenské kaly jsou poměrně složitou heterogenní suspenzí anorganických a organických látek, oddělených v průběhu technologií procesu čištění z odpadních vod [4]. Díky tomu, že čistírenské kaly jsou na každé čistírně odlišné, nemají jednoznačný chemický vzorec a jejich složení se může měnit i na konkrétní ČOV, nelze ani obecně říct, jak nejlépe kaly zpracovávat a využívat. Každá konkrétní lokalita má konkrétní zadání a prakticky jedinečné složení odpadní vody. S touto skutečností je nutno počítat, při návrhu kalového hospodářství.

Čistírenské kaly obsahují i patogenní organismy. Hlavním zdrojem jsou exkrementy infikovaných lidí a zvířat (bacilonosičů). Mezi patogenní organismy, které se mohou vyskytnout v odpadních vodách, patří zejména viry (hepatitida A), bakterie (Salmonella, Escherichia coli), protozoa a parazitičtí červi [5]. Počet a druh patogenů se dále mění v závislosti na místních podmínkách, tedy na provozních, geografických, či klimatických. Před dalším využitím kalu je vhodné jej po odvodnění stabilizovat a hygienizovat. V České republice se na zemědělskou půdu stále přímo aplikuje čistírenský kal. To může vést k budoucím problémům, protože se v kalech vyskytuje čím dál více xenobiotik, tedy látek vytvořených výhradně antropogenní činností, není jasné jak se tyto látky budou v přírodě chovat a jaký bude jejich zpětný dopad na člověka.

Zpracovávání kalu by se mělo realizovat co možná nejkompexněji. Obecné zpracování by mělo obsahovat zahušťování, stabilizaci, odvodnění a finální likvidaci [6].

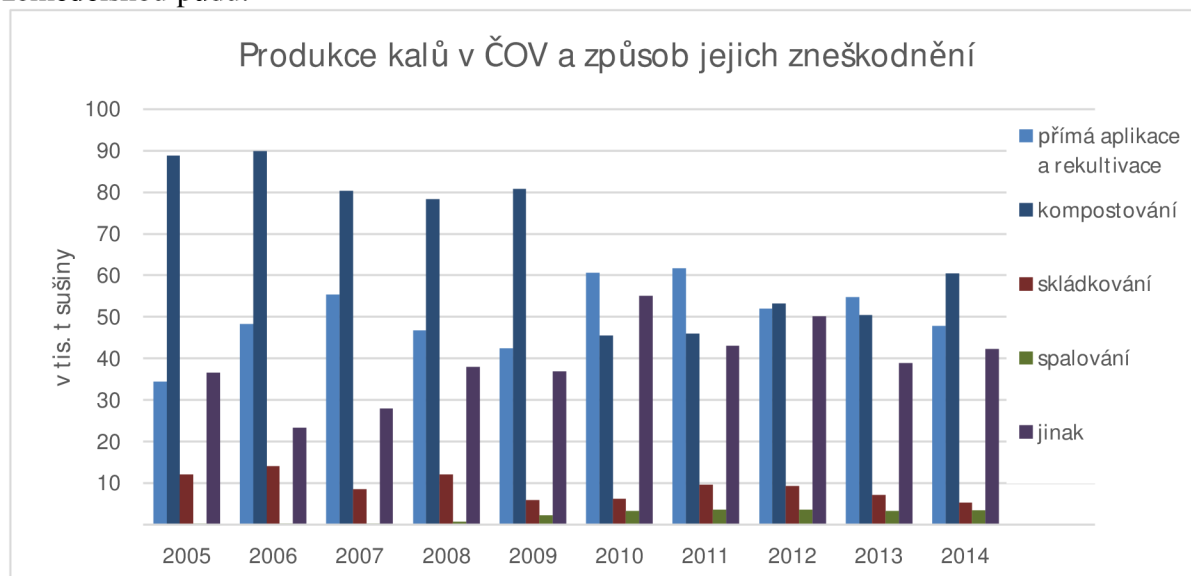


Obr. 2-1 Obecný postup zpracování kalů [6]

2.2. MOŽNOSTI VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

2.2.1. Nakládání s kaly v ČR

Dle Českého statistického úřadu v České republice převládá kompostování a aplikace na zemědělskou půdu.



Obr. 2-2 Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění

Aplikace na zemědělskou půdu se řídí Vyhláškou Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Tento předpis

nařizuje, jakým způsobem mohou být kaly ukládány na zemědělskou půdu a dělí je do následujících podmínek:

- 1) Technické podmínky použití upravených kalů na zemědělské půdě
- 2) Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v půdě a rizikových látek, které mohou být do zemědělské půdy přidány
- 3) Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech a mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě
- 4) Postupy odběru vzorků kalů a půdy a metody analýzy kalů a půdy
- 5) Obsah programu použití kalů na zemědělskou půdu[8].

Kvalita kalu je zde nejdůležitější. Musí splňovat například minimální obsah sušiny 5 nebo 18 %, dále je zde omezení maximální množství aplikovaného kalu na 5 t sušiny kalů na 1 ha za 3 roky. Nejdůležitějším aspektem je znečištění z kalů, které může kontaminovat zemědělsky obdělávanou půdu.

Tab. 2-1 Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě [8]

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech [mg. kg ⁻¹ sušiny]
As – arzén	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb - olovo	200
Zn - zinek	2500
AOX	500
PCB (suma 6 kongenerů - 28+52+101+138+153+180)	0,6

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

Kategorie kalů	Přípustné množství mikroorganismů (KTJ*) v 1 gramu sušiny aplikovaných kalů		
	termotolerantní kofiformní bakterie	enterokoky	Salmonella sp.
I.	<10 ³	<10 ³	negativní nález
II.	10 ³ -10 ⁶	10 ³ -10 ⁶	nestanovuje se

Kategorie I - kaly, které je možno obecně aplikovat na půdy využívané v zemědělství při dodržení ostatních ustanovení této vyhlášky.

Kategorie II - kaly, které je možno aplikovat na zemědělské půdy určené k pěstování technických plodin, a na půdy, na kterých se nejméně 3 roky po použití čistírenských kalů nebude pěstovat polní zelenina a intenzivně plodící ovocná výsadba, a při dodržení zásad ochrany zdraví při práci a ostatních ustanovení vyhlášky[8].

Nicméně je nutno podotknout, že díky častějšímu používání xenobiotik, mutací patogenních organismů a předběžnou prevencí by se mělo ustupovat od přímé aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu. Kaly by se měli nejdříve upravit, využít, či jinak hygienizovat, aby se na pole dostávali pouze tak upravené kaly, aby nedocházelo ke kontaminaci půdy či podzemní vody. Nutno podotknout, že využívání kalů upravených, např. sušením, kompostováním, či využitím pevných zbytků po termickém zpracování, by mělo převažovat. Takto zpracované kaly

jsou bohaté na uhlík a další potřebné živiny. Přímé použití je také zakázáno pro pěstování zeleniny, ovocných kultur, či aplikace v ochranných pásmech vodních zdrojů.

Výhodnější využití je zpracování čistírenských kalů do kompostů. Mikrobiální přeměna kalů z ČOV spolu s dalšími materiály (dřevní štěpka, kůra, listí, sláma, tráva, apod.). Působením aerobním organismů dochází k biologické oxidaci kalu a uvolňování tepla. Výsledkem je cenný produkt zbavený patogenních látek. Jeho využití se řídí zákonem č. 156/1998 Sb. Zákon o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd.

Dalším způsobem nakládání s kaly je skládkování. Od toho způsobu se nicméně opouští (nařízení EU apod.). Termickému využití bude věnována samostatná kapitola.

2.2.2. Kritéria možnosti využití

Pro další využití kalů je důležité znát jeho kvalitu. Kvalita kalu je závislá na kvalitě odpadní vody (nebo jiných technologických vodách) a také na způsobu úpravy kalu a technologickém zpracování, kterému je surový kal podroben. ČSN P CEN/TS 13714 rozděluje kvalitu kalu podle vlastností:

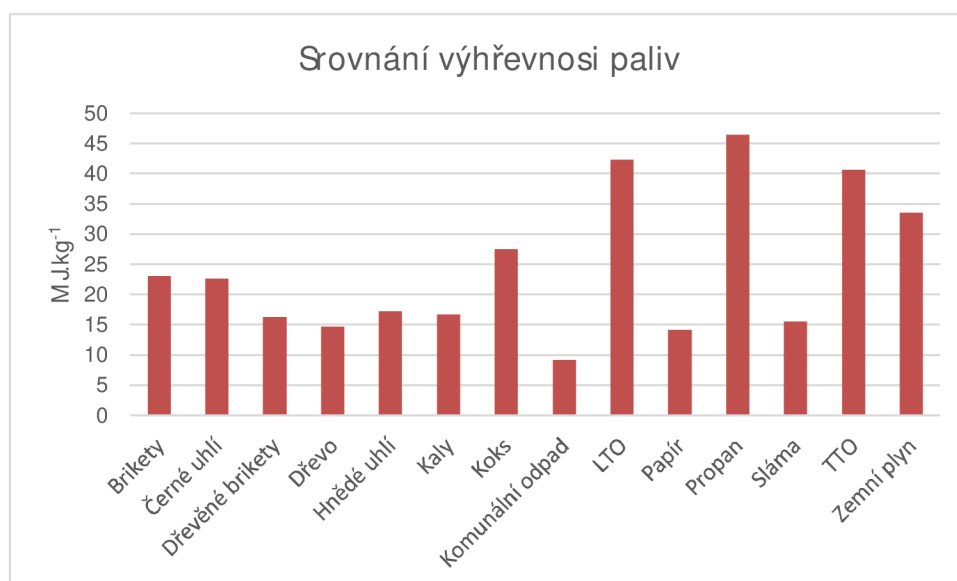
- biologické vlastnosti zahrnují mikrobiologickou stabilitu organických látek v kalu, zápach a infekčnost;
- chemické vlastnosti:
 - obsah potencionálně toxických složek složek (PTE) do kterých patří jak anorganické (kovy, sloučeniny kovů, ostatní minerální látky) tak organické znečišťující látky;
 - koncentraci a formu (dostupnost) nutrientů a převažujících složek;
- do fyzikálních vlastností patří, zda je kal tekutý, polotuhý (pastovitý) nebo tuhý, čehož je dosahováno zahušťováním a odvodňováním, dále estetické faktory spojené např. s účinnějším odstraněním výrazněji viditelných odpadků česlemi nebo síty. Výhřevnost kalu bude kritériem kvality, pokud bude kal spalován nebo používán jako palivo. Ostatní fyzikální vlastnosti jsou zahustitelnost, odvodnitelnost a nároky na pomocné prostředky při úpravách [7].

Základní vlastností pro spalitelnost kalů je jeho výhřevnost. Ta se odvíjí zejména od obsahu sušiny a hořlavých látek. Odvodněný kal na odstředivkách či lisech dosahuje přibližně sušiny 20 až 30 %. Takto odvodněný kal hoří jen velmi špatně a je vhodný pouze jako přídatné palivo při spolu-spalování s látkami s vyšším kalorickým obsahem (uhlí, komunální odpad), nebo spalován s podpurným palivem (zemní plyn, bioplyn). Výhřevnost vysušeného kalu je srovnávána s hnědým uhlím. Vysušený kal obsahuje přibližně až 70 % organických látek a dosahuje výhřevnosti 14 až 20 MJ/kg [8]. Vyhníly kal obsahuje sušiny méně a má tedy menší výhřevnost, v průměru 7,8 až 8,1 MJ/kg [9].

Z následujícího grafu vyplývá, že kal se jeví jako výhodné palivo budoucí doby. Pro termické zpracování je nevyhnutelná jeho předúprava sušením. Získávání energie z kalů je navíc šetrné k životnímu prostředí: nevzniká žádná uhlíková stopa.

Výhody termických procesů jsou:

- zmenšení objemu a hmotnosti kalů;
- destrukce toxických látek a patogenů;
- zisk energie.

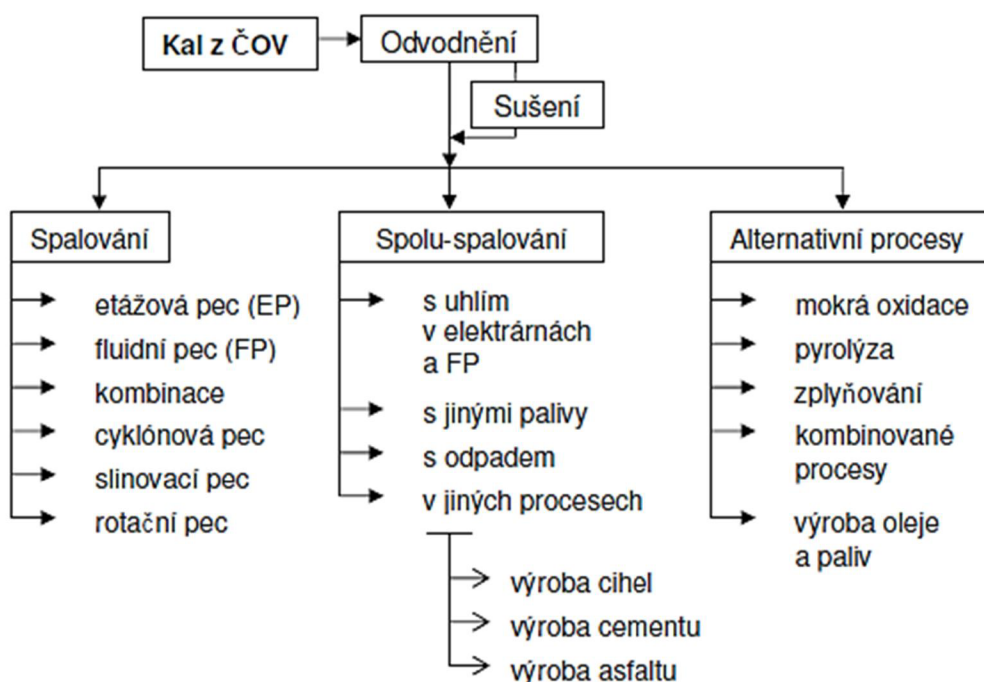


Obr. 2-3 Srovnání výhřevnosti paliv [10]

2.3. TERMICKÉ ZPŮSOBY VYUŽITÍ KALŮ

Čistírenské kaly budou v budoucnu narážet na zpřísňující se politiku EU, tudíž se budou prosazovat destruktivní metody likvidace kalů. Jako optimální sestava čištění OV s následným kalovým hospodářstvím se jeví:

- ČOV s primární sedimentací kalu;
- anaerobní stabilizace produkovaného primárního a přebytečného kalu s produkcí bioplynu;
- odvodnění kalu, popř. transport do místa jeho konečné likvidace;
- sušení kalu nízkokalorickým (nevyužitelným) teplem;
- termická destrukce usušeného kalu [11].



Obr. 2-4 Způsoby termického zpracování kalů [12]

2.3.1. Důvody pro termické zpracování kalů

Přesto že se dle ČSÚ v ČR za rok 2014 spálily jen necelé 2 % vyprodukovaných čistírenských kalů, tak se předpokládá, že v následujících letech bude toto číslo výrazně stoupat. Hlavní legislativní důvody pro termické zpracování jsou následující:

- nesplnění podmínek pro ukládání na zemědělskou půdu (překročení limitních koncentrací patogenů, těžkých kovů, apod.), nebo změna či zpřísnění legislativy spojená s nezájmem ze strany zemědělců;
- zvyšování nákladů za ukládání na skládky ve snaze úplného zákazu skládkování biologického materiálu (částečně vyplývá z plánu Opadového hospodářství a ze zákona o odpadech 185/2001 sb.);
- plnění legislativního nařízení:
 - podporovat z veřejných zdrojů investice spojené s energetickým využíváním kalů z čistíren komunálních odpadních vod s odpovídající produkcí kalů [13];
 - podporovat výstavbu zařízení pro aerobní rozklad, anaerobní rozklad, energetické využití a přípravu k energetickému využití biologicky rozložitelných odpadů. Vytvořit přiměřenou síť těchto zařízení v regionech pro nakládání s odděleně sebranými biologickými rozložitelnými odpady z obcí a od ostatních původců, včetně kalů z čistíren odpadních vod [13];
 - omezení ukládání na skládky biodegradibilní odpad dle Směrnice Rady 1999/31/ES, což zohledňuje vyhláška č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady;
 - snížit maximální množství biologicky rozložitelných odpadů ukládaných na skládky tak, aby podíl této složky činil v roce 2020 nejvíce 35 % hmotnosti z celkového množství biologicky rozložitelných odpadů vyprodukovaných v roce 1995 dle nařízení vlády 352/2014 o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024.

Z technického hlediska se vysušený kal nevyužívá při spalování jako odpad, ale jako palivo. Jinými slovy je po zapálení schopen sám hořet. Tím vzniká teplo, které se dále transformuje na jiné formy energie (el. energie, sušení kalu, vytápění apod.). Nutno podotknout, že se za likvidaci kalu stále platí. Při tepelném zpracování se redukuje objem kalu, tudíž vzniká méně odpadu. Výhody mohou být následující:

- snížení objemu kalů o 80 až 90 %;
- popel ze spáleného kalu je anorganický, sterilní, inertní odpad a může být použit např. ve stavebnictví či zpětném získávání fosforu;
- těžké kovy z kalů jsou navázány v nevyplavitelné podobě na sorbentech z procesu čištění odpadního vzduchu;
- termické spalování nezatěžuje okolí hlukem či nepříjemným zápachem;
- plynné emise nijak nezatěžují životní prostředí, vypouštěné koncentrace jsou hluboko pod přípustnými limity;
- zpracování kalů přímo v místě jejich vzniku, je trvale udržitelné v budoucnu, a činí ČOV samostatnou i v konečném zpracování kalů;
- různými technologiemi termického zpracování získáme různé produkty, které jsou využitelné (pevný zbytek, pyrolyzní plyn či olej, apod.)

Energie z kalů se nemusí vždy získávat jen z termického zpracování, ale může být využita i ve formě bioplynu při anaerobní stabilizaci. V následujících kapitolách popisují některé možnosti energetického využití.

2.4. VLIV TEPLoty NA ANAEROBNÍ STABILIZACI KALŮ

Tato kapitola se zabývá vlivem teploty na anaerobní stabilizaci kalů. Anaerobní stabilizace a jímání bioplynu je součástí každé větší ČOV. Následné spalování plynu v kogeneračních jednotkách má příznivý vliv na celkovou energetickou náročnost ČOV a v některých případech dokonce přispívá k její celkové soběstačnosti. V laboratorních podmínkách studie sleduje nejen nárůst objemu bioplynu, ale i rozklad hlavních organických sloučenin (bílkovin, sacharidů, mastných kyselin) a sloučenin anorganických (těžkých kovů, S, P) v průběhu anaerobního vyhnívání.

Anaerobní stabilizace je zvláště zajímavá v oblasti zpracování kalů, protože má schopnost snižovat celkové množství biomasy a redukovat její objem (o cca 40%), zatímco produkuje bioplyn (o obsahu 55 až 70 % CH₄), který se energeticky zhodnocuje [14]. K dalším prospěšným vlastnostem patří například inaktivace a snížení patogenů, či částečné odvodnění kalů [15]. Většina literárních pramenů se zaměřuje na vysoké teploty při úpravě kalů (> 100 °C). Ukázalo se, že v tomto rozmezí je teplota důležitějším faktorem než doba trvání stabilizace [16]. Vyšší teplotou je docíleno vyššího stupně stabilizace. Nicméně teploty vyšší než 180 °C vedou k tvorbě obtížně rozpustným organickým nebo toxickým látkám (inhibičním meziproductům), čímž se sníží biologická rozložitelnost [17]. Optimální podmínky procesu jsou spojeny s životem mikroorganismů a povaze kalů [18]. Největší nevýhodou zpracování při vysoké teplotě je fakt, že se spotřebovává více energie pro ohřev. Přebytek získaného plynu tak pouze nepatrně kompenzuje vysoké náklady procesu. Použití nižší teploty tepelného zpracování kalů (<100 °C) by mohly vytvořit alternativu pro překonání nedostatků. Při nízkých teplotách doba zdržení hraje dominantní roli oproti teplotě. Někteří autoři došli k závěru, že se rozklad tuhých látek při teplotách kolem 70 °C zvyšuje, protože některé termofilní bakterie mají větší aktivitu v termofilních podmínkách stabilizace.

Typy molekul, které jsou solubilizovány v průběhu tepelného vyhnívání, hrají významnou roli v posílení následné anaerobní stabilizace. Úspěšný proces anaerobní stabilizace vyžaduje účinnou degradaci částic komplexního substrátu na bioplyn, a různé sloučeniny v kalech mohou podporovat nebo inhibovat některé kroky tohoto procesu. Cílem současného práce je studium rozkladu organických a anorganických sloučenin při nízké teplotě zpracování a jejich účinky na anaerobní vyhnívání. Odděleně z celkové a rozpustné CHSK, uvolňování sacharidů a proteinů se analyzuje, přičemž zdroj pro anaerobní mikroorganismy je uhlík a fosfor. Vzhledem k tomu, že se v odpadních vodách vyskytují těžké kovy, tak se jejich koncentrace měří. Mikronutrienty, jako jsou fosfor a síra, se studie také zabývá. Vliv teploty a délky procesu se zkoumal v závislosti na obou parametrech [19]. Byla provedena laboratorní měření a výsledky jsou uvedeny v tabulce 2-2.

2.4.1. Laboratorní testy

Pro laboratorní pokus na Belgické univerzitě, byly použity kaly z tamější ČOV odebrané ze zásobníku kalu před vyhnívací nádrží. Kal byl skladován max. 4 hodiny při teplotě 4 °C. V tabulce 2-1 jsou uvedeny základní charakteristiky kalu. Laboratorní zkouška vyhnívání se provedla ve vytápěných reaktorech o objemu 1,5 l. Doba zdržení byla mezi 15 a 60 minutami a teplota se pohybovala v rozmezí od 70 do 90 °C. Po nadávkování kalu do reaktoru, byla doba zahřátí na požadovanou teplotu max. 3 minuty. Po konci stabilizace (testované době zdržení) byl kal zmrazen v ledové lázni. V reaktoru byl kal průběžně míchán [19].

2.4.1.1. Nastavení laboratorních testů

Bylo zkonstruováno dvanáct anaerobních fermentorů nastavených jako mezofilní, jednostupňové reaktory o objemu 1 l. Experimenty probíhaly po dobu dvaceti dnů. Byla použita

směs složená z 500 g kalu a 100 g očkovací kultury. Každý experiment se skládal ze tří kontrolních vzorků. Čas a teplota byla nastavena podle výše uvedeného způsobu. Válce byly naplněny okyselenou deionizovanou vodou, aby se zabránilo vzniku CO₂ v důsledku tvorby uhličitanů [19].

Před a po testu byly sledovány tyto ukazatele:

- obsah sušiny;
- chemická spotřeba kyslíku;
- koncentrace proteinů, sacharidů a mastných kyselin;
- obsah těžkých kovů (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), dále S a P;

Analýzy byly provedeny na vzorku kalu i na supernatantu, pro detekování celkové i rozpuštěné fáze sledovaných komponent. Tyto vzorky supernatantu byly získány po odstředění při 12 g po dobu 15 minut a následnou filtrací přes mikrovlákno (1,3 μm) [19].

Tab. 2-3 Základní charakteristika kalu [19]

	Zahuštěný přebytečný kal		Vyhníly kal	
	sušina g.kg ⁻¹ kalu	organická sušina % z sušiny	sušina g.kg ⁻¹ kalu	organická sušina % z sušiny
Průměrná hodnota	65,08	69,90	46,56	50,65
Standartní odchylka	2,70	0,36	0,16	0,08

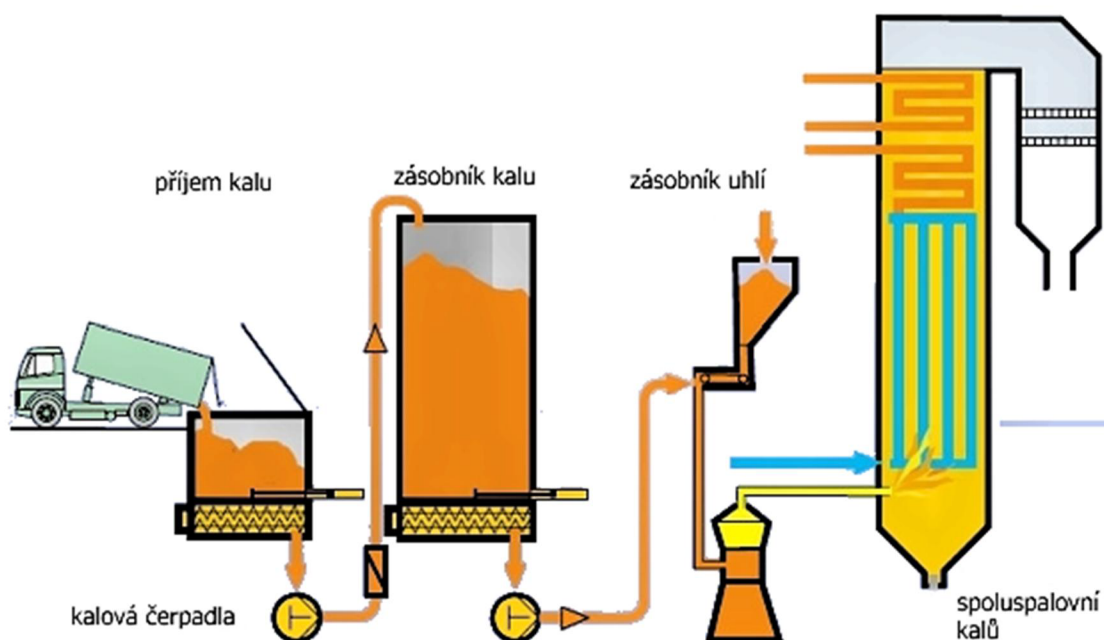
Tab. 2-4 Koncentrace a degradace org. složek neupraveného a upraveného kalu [19]

Parametr	Jedn otky	slepý vzorek	70 °C			80 °C			90 °C		
			15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
Koncentrace cukrů před	mg.l ⁻¹	8 160	8 324	7 059	7 361	6 219	8 370	8 420	7 913	5 489	9 648
Koncentrace cukrů po	mg.l ⁻¹	2 941	3 785	3 384	3 128	3 489	2 936	2 772	3 954	3 626	3 174
Degradace cukrů	%	63,96	54,53	52,07	57,51	43,91	64,92	67,08	50,03	33,94	67,11
Koncentrace bílkovin před	mg.l ⁻¹	29 500	30 524	28 429	27 929	27 833	30 548	33 762	29 786	21 597	29 905
Koncentrace bílkovin po	mg.l ⁻¹	22 028	23 056	23 819	25 028	23 583	24 889	20 694	29 556	18 190	21 597
Degradace bílkovin	%	25,33	24,47	16,21	14,52	15,27	18,52	38,70	0,77	15,78	27,78
Celkové množství mastných kyselin před	mg.l ⁻¹	75	111	618	1 071	988	1 177	1 277	1 733	1 963	2 744
Celkové množství mastných kyselin po	mg.l ⁻¹	37	93	201	539	819	956	1 184	1 367	1 440	1 611
Degradace mastných kyselin	%	50,37	15,55	67,47	49,61	17,12	18,74	7,29	21,11	26,67	41,30
Produkce bioplynu	mg.l ⁻¹	34,83	28,33	33,58	35,32	21,26	48,02	75,64	76,69	141,9 4	377,5 6
Složení bioplynu	%	63,37	63,35	66,99	63,49	63,92	65,95	64,46	64,20	63,05	63,66
	%	32,89	35,12	31,97	34,85	35,30	32,64	33,42	35,59	35,97	35,65

2.5. SPOLU-SPALOVÁNÍ KALŮ

2.5.1. Spalování v elektrárnách

Využívání čistírenských kalů jako paliva v elektrárnách se jeví jako levná alternativa proti spalování fosilních paliv. Další z výhod jsou nízké investiční náklady, investice se kladou pouze na přepravu kalu, zásobník a dávkovací zařízení [20]. Kal z ČOV stačí odvodnit na cca 25 %, není potřeba žádného sušení či granulování. Kal se jako palivo přidává k uhlí těsně před jeho mletím a směs je předsušena odpadním teplem z horkých spalin [21]. Při použití pouze odvodněného kalu se doporučuje dávkovat 1 až 5 % ze spotřeby uhlí. Tento poměr zaručuje, že kal nesnižuje teplotu hoření a nejsou ovlivněny produkty spalování [22]. Problém může nastat při větších koncentracích rtuti, výsledkem může být zhoršení kvality popílku (při použití vápencové vypírky), neboť vápencová suspenze (energósádovec) je materiál, kde se mají škodliviny zachycovat [23]. Tyto obavy byly potvrzeny při spalování odvodněného vyhnílého kalu z ÚČOV Praha v Mělnické elektrárně, ve které byly významně překročeny limitní koncentrace škodlivin v popílku i energósádovci, které následně spadaly do kategorie nebezpečných odpadů [24].



Obr. 2-5 Schéma spolu-spalování čistírenského kalu v elektrárnách

2.5.2. Spalování ve spalovnách odpadů

Jedná se o podobný způsob jako při spalování kalů v elektrárnách. Hlavní výhodou je systém čištění spalin, které spalovny komunálního odpadu mají (několika stupňový proces čištění). Literatura uvádí, že není vhodné přidávat odvodněné kaly o sušině kolem 20 % [25]. Může docházet k narušení spalování (snižování teploty, dušení) a čištění spalin také nemusí probíhat v optimálních podmínkách [26]. Proto se doporučuje kal nejprve vysušit na cca. 60 % (podobná sušina jako má komunální odpad). Pro spalování zcela vysušeného kalu je zapotřebí ho nejdříve důkladně promíchat s odpadem, nebo je možné rozemletý kal přivádět rovnou do spalovacího roštu společně se vzduchem. Kal se může dávkovat i v tekutém stavu přímo do pece, v maximálním poměru 1:4. Ve fluidních spalovnách lze spalovat i odvodněný kal [27].

2.5.3. Spalování v cementářských pecích

Další způsob spolu-spalování, tentokrát v cementářských pecích. Tento provoz patří mezi tzv. bezodpadové, dochází k zapracování popele do cementářského slinku. Využívá se vysušených kalů. Tento způsob je výhodný zejména z těchto důvodů:

- vysoká spalovací teplota (1700 až 2200 °C), stabilita celého procesu (spalování v rotačních pecích), velká doba zdržení a oxidační atmosféra zaručují dokonalý rozklad organických látek (včetně PCDD/F a PCB) především na vodní páru a CO₂;
- systém úpravy spalin bývá v cementárnách na vysoké úrovni;
- díky spolu-spalování kalů dochází k úspoře fosilních paliv (o 1/5 až 1/3);
- další výhodou je jednoduchá aplikace do pece, vysušený kal se jednoduše smíchá s uhlím a dávkuje se do prostoru pece současně;
- jedná se o bezodpadovou technologii, navíc dochází i k úspoře suroviny pro vlastní výrobu slinku, úspora je závislá na kvalitě kalů;
- většina těžkých kovů je v technologii výpalu slinku zachycena v silikátových mřížkách. Výluhy odpovídají limitům pro pitnou vodu;
- neproblematičtější jsou těkavé látky (rtuť, kadmium). Ty se odpařují a následně usazují v odprašcích, které musí být zachycovány na filtrech[32][33].

Tab. 2-5 Množství čistírenských kalů spálených v cementárnách, Německo [65]

rok	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
množství	4	48	157	238	254	267	263	276	tisíc tun.rok ⁻¹
výhřevnost	11	4	3	4	4	4	4	4	MJ.kg ⁻¹

2.6. SPALOVÁNÍ KALŮ V PECÍCH

Kaly z ČOV lze spalovat, pokud obsahují alespoň z části spalitelné složky. Tyto složky se v kalech vyskytují v kapalně nebo tuhé fázi. Pro spalování kalů jsou nejdůležitější tyto parametry:

- obsah sušiny a organické složky;
- kalorický obsah (výhřevnost kalů).

Energetická bilance procesu, je závislá na několika faktorech. Odvíjí se hlavně od složení kalu a použité technologie spalování. Je-li kal vysušen (či obsahuje složky s vysokou výhřevností), může být spalován samostatně. Získaná tepelná energie se může dále využívat (sušení kalů, vytápění objektů na ČOV, apod.), nebo může být přeměněna na elektrickou energii. Nutno podotknout, že ne všechny kaly mohou být spáleny, ty s vyšším obsahem nespalitelných složek spalovat nelze, neboť teplo vzniklé hořením nepokryje potřebu tepelných ztrát při hoření. V těchto případech se nabízí spolu-spalování. Kaly se doporučuje spalovat po jejich co možná nejlepším odvodnění či vysušení. Voda obsažená v odvodněném kalu se při spalování odpařuje, čímž spotřebovává značné množství energie vzniklé při spalování.

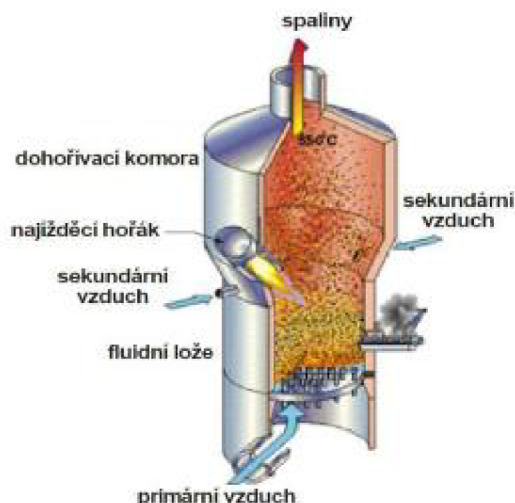
2.6.1. Spalování ve fluidní vrstvě

Spalování ve fluidní vrstvě je pravděpodobně nejrozšířenější způsob spalování kalů. Pomocí této technologie se spalují jak kvalitní paliva, tak i ty méně kvalitní, do kterých se zařazuje čistírenský kal.

Spalovací komora je nejčastěji konstruována jako cihlová pec válcovitého tvaru s roštem ve spodní části. Fluidní lože je tvořeno křemičitým pískem, který představuje dobrý rezervoár tepla (stabilita procesu). Písek ve fluidním loži je udržován ve vznosu díky vzduchu, který je

vháněn spodní částí do pece. Kal se přidává do horní části pece. Spalovací teplota se pohybuje v rozmezí 800 – 900 °C. Díky vysoké teplotě spalin v peci, se rychle vysouší a rozpadá na menší částice, které jsou lehce spalitelné. Postupně dochází ke spálení celého organického podílu kalu. Lehčí produkty po spálení odchází ve spalinách, těžší komponenty (popř. větší) a nespalitelné kusy propadají srze fluidní lože a opouštějí pec jako popílek [28].

Hlavní výhodou této metody je snížení NO_x a malého množství CO₂. Popílek je možné využít ve stavebnictví či důlním průmyslu, nebo odvést na skládku (v závislosti na jeho složení) [29].



Obr. 2-6 Schéma fluidní pece [30]

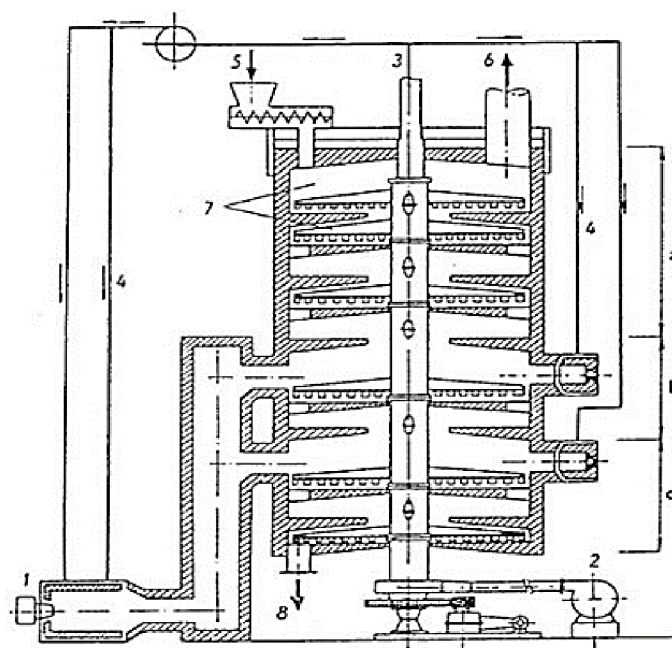
Největší výhody fluidního spalování jsou:

- díky velmi dobrému promíchání kalu a písku dochází k téměř dokonalému spalování při poměrně nízkých teplotách a přebytku vzduchu
- dostatečná doba zdržení pro vyhoření kalu;
- volný objem komory nad fluidním ložem slouží jako dohořivací komora, kde dochází ke kompletní destrukci organických látek;
- díky fluidnímu loži dochází k velké zásobě horkého materiálu, který dokáže dobře odolávat náhlým změnám (např. ve složení kalu);
- rychlé a plynulé najíždění či odstávka provozu [12].

2.6.2. Spalování v etážových pecích

Etážová pec je konstruována jako vertikální válcová konstrukce, do které se palivo dávkuje se shora. Využívá postupného průchodu spalovaného média mezi jednotlivými patry (etážemi). Díky postupnému průchodu se kal vysušuje (může být tedy dávkován s vyšším obsahem vody). Samotné spalování probíhá v nejnižší vrstvě. Praxí se osvědčilo využívat fluidní pec s horní etážovou vrstvou a využívat výhody této kombinace.

Při použití této technologie je kal nejprve dostatečně odvodněn (např. na kalolisech). Dále je dávkován ze zásobníku do etážové pece, kde je před vstupem podroben mechanickému rozmělnění na menší části. Po průchodu všemi patry je spalován na fluidním roštu.



a – sušící pásmo; b – spalovací pásmo; c – chladicí pásmo;
1 – přídavné spalování odpadních kapalných paliv, 2 – ventilátor chladicího vzduchu,
3 – výstup ohřátého vzduchu, 4 – ohřátý vzduch do hořáků,
5 – přívod odpadního materiálu, 6 – odvod plyných spalin, 7 – etáže sušícího pásma
8 – odvod tuhých zbytků po spalování

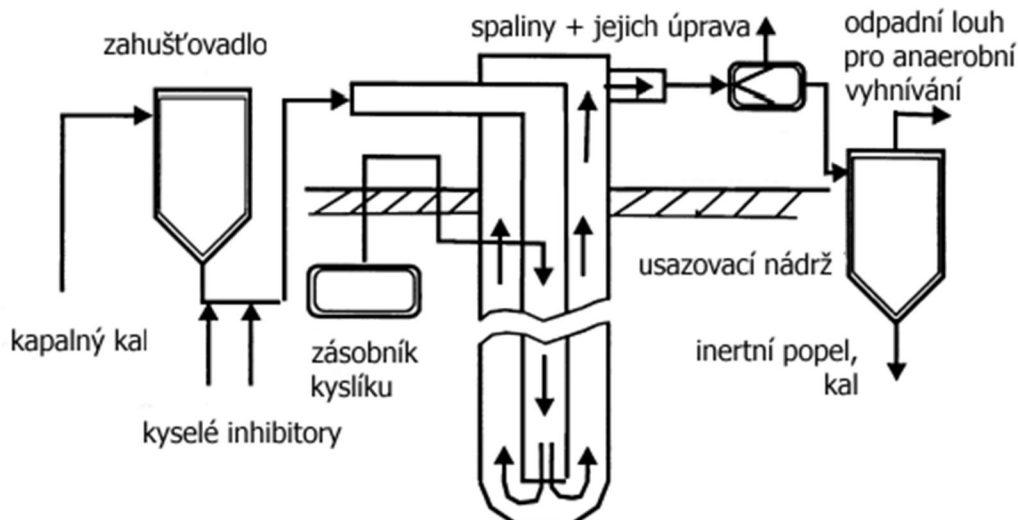
Obr. 2-7 Schéma etážové pece [31]

2.7. ALTERNATIVNÍ ZPŮSOBY SPALOVÁNÍ KALŮ

2.7.1. Mokrú oxidace kalů

Mokrú oxidace je proces, který probíhá ve vodné fázi (směs vody a plynů) a to při teplotách 150 – 330 °C a tlaku 1 - 22 MPa. Oxidace využívá buď čistého kyslíku, nebo atmosférického vzduchu. Během procesu je organická hmota obsažená v čistírenském kalu tepelně degradovaná, hydrolyzovaná, oxidovaná a přeměněna na oxid uhličitý, vodu a dusík. Během mokré oxidace, se rozlišují dva režimy: první sub-kritická s teplotou pod 374 °C a tlakem 10 MPa, druhá super-kritická s teplotou vyšší než 374 °C a tlakem 21,8 MPa. Potřebného tlaku se může dosáhnout v nádobě buď nad zemí, nebo podzemí [34].

V holandském městě Apeldoorn byla v roce 1994 uvedena do provozu (po předchozích laboratorních testech) mokrá šachtová oxidace VerTech. Základ systému tvoří šachtový reaktor hloubky 1280 m tvořený ze tří trub (vnější dvě slouží jako chladič). Kal je spolu s čistým kyslíkem dávkován do středu trouby. Exotermní oxidací stoupá teplota až na cca 275 °C. Vodná fáze zajišťuje tlak u dna reaktoru 8,5 až 11 MPa. V reaktoru dochází ke snížení celkové sušiny o 70 %, vzniklý popel se separuje běžnou technikou (bez použití přídavných flokulantů). Vzniklá kapalná fáze (obsahující amoniak, nižší mastné kyseliny) je podrobena čištění [35].



Obr. 2-8 Systém VerTech [36]

2.7.2. Pyrolýza kalů

Pyrolýza je tepelný rozklad za nepřítomnosti kyslíku a probíhá při 300 až 900 °C. Proces se skládá z řady složitých chemických reakcí, které vedou k rozkladu a rozbití organické hmoty na produkty pyrolýzy. Mezi ně patří plyn, biochar a olej. Plyn a olej může být spálen (nebo jinak využit v chemickém průmyslu), biochar může najít své využití v různých oblastech (zemědělství, stavebnictví, průmysl, apod.) [37]. Výtěžnost těchto tří složek závisí hlavně na technickém postupu pyrolýzy a na její teplotě:

1. nízkoteplotní (< 500 °C)
2. středněteplotní (500 – 800 °C)
3. vysokoteplotní (> 800 °C) [38]

V posledních letech se věnuje pozornost tzv. rychlé pyrolýze, při které je největší výtěžnost oleje. Tento produkt s vysokou viskozitou a vysokou výhřevností 29 – 38 MJ.kg⁻¹ dosahuje i díky vysokému obsahu uhlíku (70 – 80 %) podobnosti olejům těžké ropy [39]. Typické složení prvků bývá: C = 76 %, H = 11 %, O = 6,5 %, N = 4 %, S = 0,5 % [38].

Výhodou tohoto postupu je redukce čistírenských kalů na minimum, zbyde pouze malý objem inertního popele (zbytku po termickém zpracování), dochází k produkci vysoce kvalitního oleje, který může být spalován např. v městských teplárnách. Proces dále zamezuje vzniku škodlivých produktů, jako jsou dioxiny [40].

2.7.3. Mikrovlnná pyrolýza

Čistírenské kaly obsahují velké množství těkavých látek. Při vhodném způsobu pyrolýzy se mohou přeměnit na užitečné produkty. Při použití této technologie se používají pouze odvodněné kaly (70 % vlhkosti), které jsou vysušeny a podrobeny teplotám až 1000 °C. Vysoké teploty jsou vhodné pro vysoký výtěžek plynové frakce [44]. Při těchto teplotách dochází k silnému zplyňování. Výhodou tohoto procesu je rychlý ohřev (cca o 200 °C za minutu), z kalu se odpařuje velké množství par, které přispívají ke zplyňování. Tento proces kombinuje více kroků do jednoho. Kaly jsou zároveň sušeny, pyrolyzovány a zplyňovány [45].

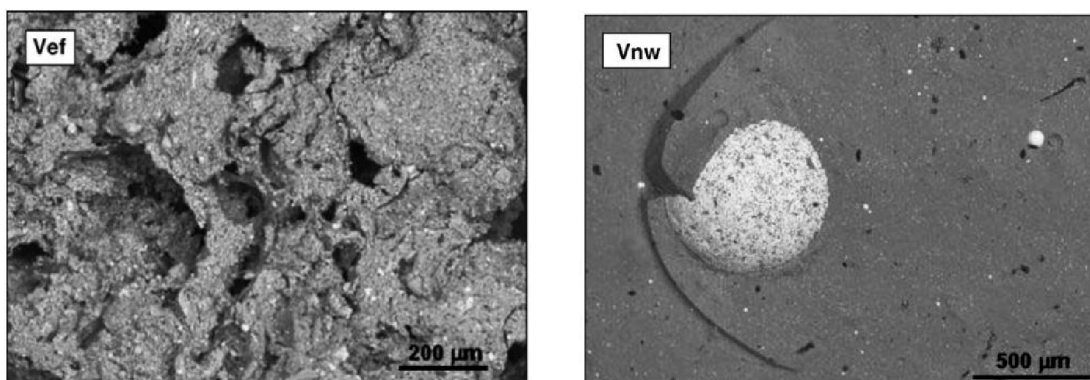
Proces MWDPG (Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification, mikrovlny – zahrnující pyrolýzu, zplyňování a sušení) probíhá za použití jedné mikrovlnné trouby. Trouba pracuje na frekvenci 2450 MHz a výkon lze regulovat až do 2000 W. Vzorek se umísťuje do středu pece. Experiment byl proveden na vzorku o hmotnosti 15 g v křemenném reaktoru.

Mikrovlny musí působit na kal alespoň 15 minut. Po šesti minutách bylo v peci dosaženo teploty 1000 °C. Reakce probíhala v héliové atmosféře[45].

Tab. 2-6 BSK₅ a CHSK čistírenského kalu a zbytku z pyrolýzy [45]

	BSK ₅ (mg.l ⁻¹)	CHSK (mg.l ⁻¹)
Surový kal	6255	10100
Kal podroben pyrolýze	0	2200
Kal podroben mikrovlnné pyrolýze	0	500

Systém MWDPG při vysokých teplotách produkuje pevný zbytek o nízké pórovitosti. V porovnání s klasickou pyrolýzou v elektrické peci se ukázalo, že je tento způsob více efektivní (produkuje pevný zbytek s menším zbytkovým obsahem těkavých látek). Produkuje pevný zbytek o menším objemu. Char z tohoto procesu je ale i méně porézní a odolnější k vyloučení těžkých kovů [45].



Obr. 2-9 Mikrofotografie pevného zbytku po pyrolýze (Vef) a mikrovlnné pyrolýze (Vnw) [45]

2.7.4. Zplyňování kalů

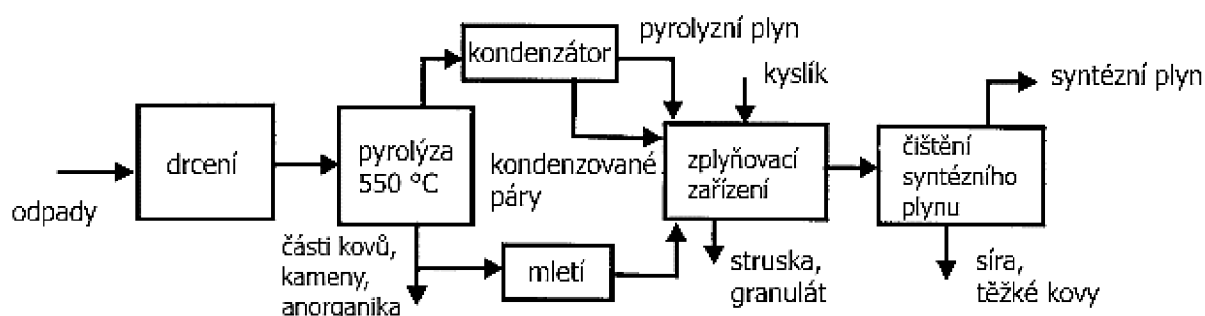
Zplyňování je řízený rozklad organických látek na syntézní plyn, za řízené přítomnosti kyslíku. Proces probíhá při teplotách 800 – 1300 °C. Výsledný plyn je složen z CO, N₂, CO₂, H₂, CH₄. Zplyňování se provozuje hlavně v Německu, kde se kromě čistírenských kalů zplyňují i odpady. Proces se z počátku chová jako pyrolýza, postupně se zahřívá na teploty 500 – 600 °C. V tomto okamžiku se uvolňují těkavé látky a zbývající dehet a char. Proto se vyvíjejí procesy, které kombinují provozování pyrolýzy a zplyňování [41].

2.7.4.1. SVZ proces

Proces Sekundarrohstoff Verwertungszentrum (SVZ) (sekundární recyklace surovin) byl vyvinut v Německu, pro zplyňování druhotných surovin z odpadů. Provozní kapacita byla 400 000 t.rok⁻¹ pevného odpadu a 50 000 t.rok⁻¹ práškového či tekutého odpadu. Zpracovávalo se zde dřevo, plasty, kontaminované odpady, čistírenské kaly apod. Ze všech odpadů byl odstraněn kov a poté se drtily a briketizovaly. Následně probíhá spalování při teplotě 1300 °C. Výsledným produktem byl syntézní plyn a metanol. Odpadní teplo se využívá pro výrobu elektrické energie [41]. Nicméně v roce 2004 se od této technologie ustoupilo a to kvůli nevydělečnosti zařízení [42].

2.7.4.2. Systém Noell

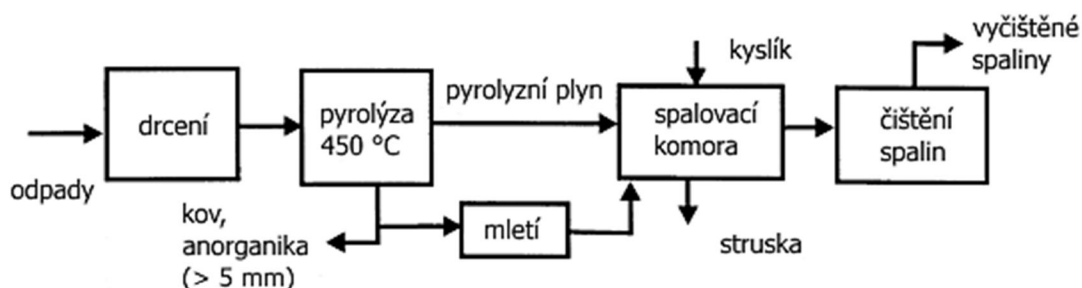
Systém Noell zahrnuje pyrolýzu následovanou zplyňováním. U této metody se využívá vysokých tlaků a to až do 3,5 MPa a teploty až 2000 °C. Odpady jsou nejdříve rozdrceny, následně pyrolyzovány při teplotě 550 °C. Po pyrolýze se oddělí anorganická část (kamery, kovy). Zbytek se mele a přivádí do zplyňovacího zařízení. Pyrolyzní plyn se nejprve chladí, kvůli odstranění kondenzovatelných výparů, následně je stlačen a veden do hořákové komory, do které je přiváděn i kondenzát pomocí kalového čerpadla. Pro zplyňování je použit čistý kyslík. Při využívání zplyňování čistírenských kalů, se kaly nejprve suší, melou a nakonec pneumaticky přivádějí do komory. Výsledkem tohoto procesu je vysoce kvalitní syntézní plyn o vysokém obsahu CO a H₂, který může být spalován v plynových turbínách pro výrobu energie [40, 43].



Obr. 2-10 Schéma systému Noell [40]

2.7.4.3. Systém Siemens Schwel–Brenn

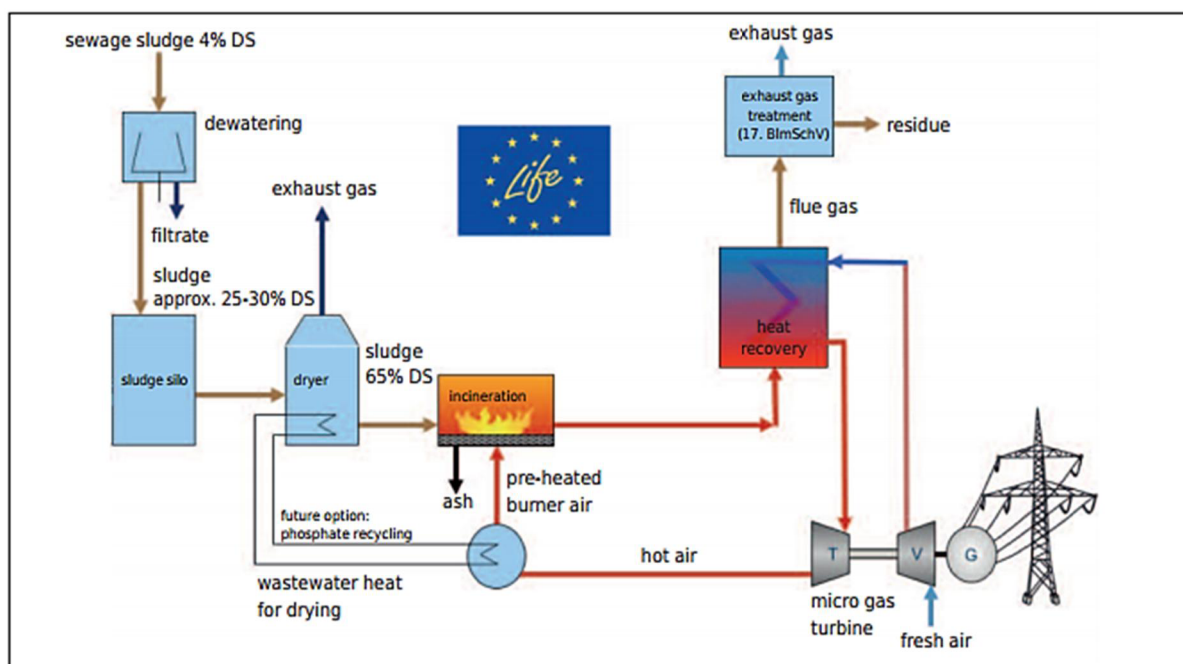
Tento systém využívá pyrolýzu za vysoké teploty a následného zplyňování. Na vstupu jsou rozdrcené odpady a vysušené čistírenské kaly vkládány do rotačního karbonizéru, kde jsou pyrolyzovány za teploty 450 °C. Pevný zbytek se proseje a částice větší než 5 mm opouští systém (bezuhlíkaté části), zatímco druhá část (obsahující alespoň 30 % z hmotnosti uhlík) se rozemele a přivádí do spalovací komory. Tam jsou společně s pyrolyzním plynem a kyslíkem podrobeny teplotě 1300 °C. Zbytky po spálení (rozžhavený popel) se odstraňují. Odpadní teplo je využíváno pro přeměnu na elektrickou energii. Výhodou tohoto systému je, že se dá instalovat do stávajících systému (po úpravách). Spalovací zařízení na pyrolyzní char se nepříliš liší od standardních zařízení na spalování např. uhlí [44, 40].



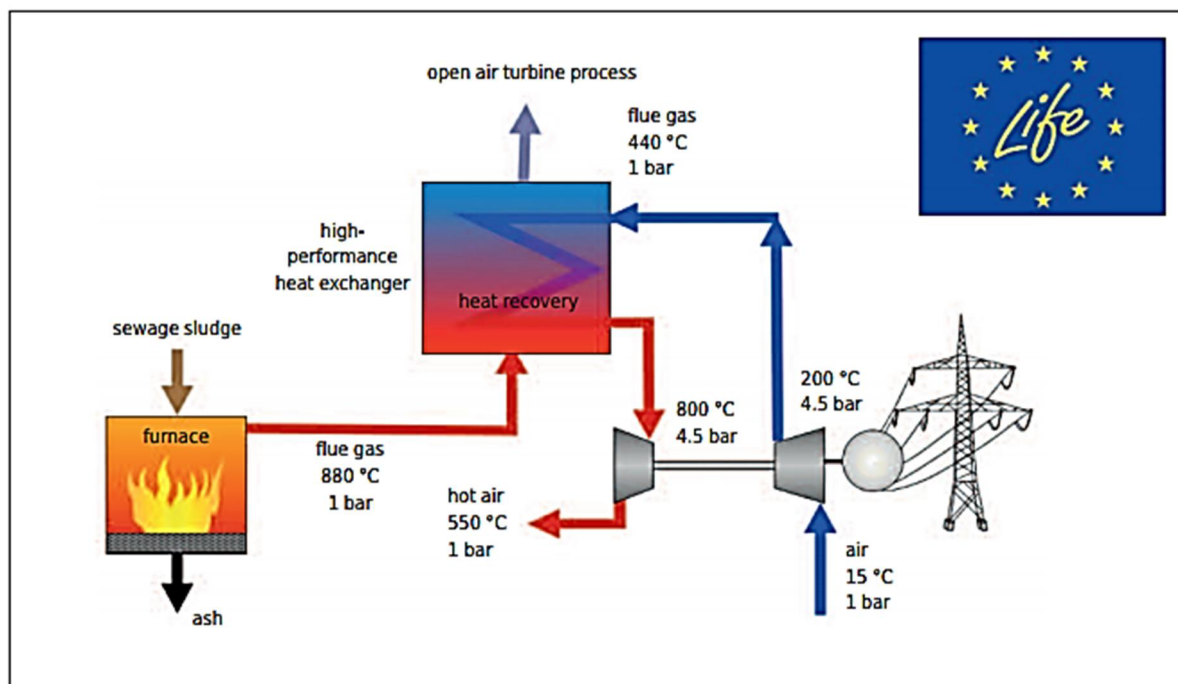
Obr. 2-11 Schéma systému SSB [40]

2.8. SYSTÉM HUBER SLUDGE2ENERGY

Tento inovativní projekt se zaměřil na spalování čistírenských kalů jako na celek v regionálním měřítku při decentralizovaném konečném řešení kalového hospodářství. Projekt byl zahájen v roce 2005 v Bavorsku a byl předložen Evropské komisi, jako demonstrativní projekt podporující program LIFE. V roce 2011 bylo zařízení uvedeno do provozu. Cílem projektu je ukázat, že decentralizovaný systém v rámci řešení kalového hospodářství je za použití inteligentní technologie energeticky soběstačný a provozovatelé VaK tak budou mít vlastní místo pro nakládání s kaly. Při tomto způsobu spalování je možné zpětně získávat fosfor z popela. Navíc při využití odpadního tepla dokáže spalovna vylepšovat tepelnou bilanci na ČOV [47].

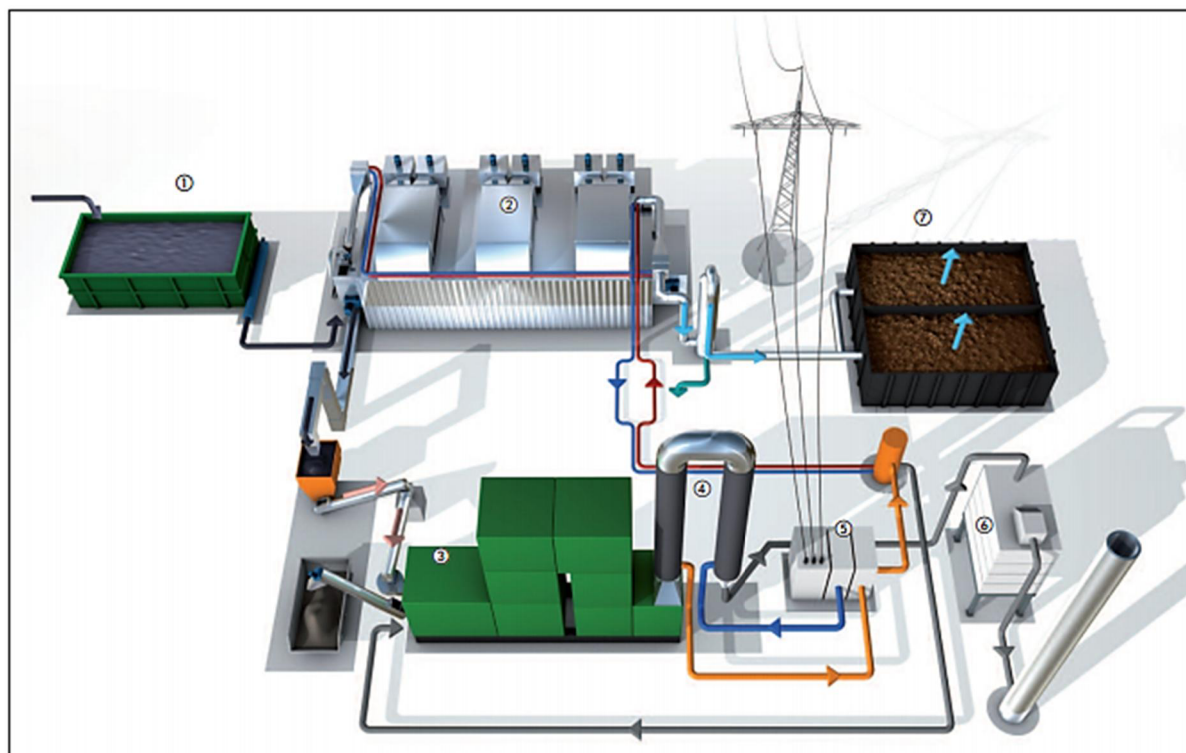


Obr. 2-12 Blokové schéma systému sludge2energy [47]



Obr. 2-13 Využití energie v procesu sludge2energy [47]

Ve spolupráci s ATZ (vývojové a výzkumné centrum) HUBER SE vyvinul inovativní koncept pro tepelné využití čistírenských kalů, který produkuje současně tepelnou i elektrickou energii. Systém dále umožňuje zpracování různých kombinací příchozích médií - čistírenské kaly, jiné komunální odpady, zahradní odpad, shrabky apod. Jako reakce na zvyšující se nároky udržitelného nakládání s odpady je tento inovativní systém podporován v rámci programu ochrany živ. prostředí evropským environmentálním programem EU LIFE06. Pilotní projekt je v provozu na ČOV Straubing - Bavorsko s návrhovou kapacitou 3000 t sušiny kalu za rok. Energeticky soběstačný systém snižuje objem kalu až na 1/8 původního objemu určeného ke zpracování. Odpad ze systému (popel) může být vhodným zdrojem pro zpětné získávání fosforu [48].



Obr. 2-14 Schéma ČOV Straubing [48]

1) *Manipulace s kalem:*

Odvodněný kal je dávkován pomocí šnekového dopravního systému. Velikost uskladňovací nádrže určují specifické parametry konkrétní ČOV.

2) *HUBER Pásová sušička BT:*

Sušení probíhá v sušárně s inovativním systémem rekuperace tepelné energie při teplotě cca 100 °C. Pásová sušička využívá odpadní vzduch ze spalování kalu, využívá generovanou elektrickou energii, čímž je omezena potřeba externích zdrojů tepla. Celá sušící technologie je navržena tak, aby produkovala suchý granulát optimální pro spalování.

3) *Roštová pec:*

Tepelné využití vysušeného kalu probíhá v peci s roštem, která umožňuje flexibilitu v použitých palivech, díky níž se vyznačuje snadným a spolehlivým provozováním. Pro optimalizaci spalování je rošt vybaven jednotlivými ovládacími prvky a přívody vzduchu.

4) *Výměník tepla:*

Horké spaliny proudí ze spalovacího prostoru do vysoce výkonného výměníku, který převede tepelnou energii ze spalin do stlačeného procesního vzduchu z mikroturbíny. Ochlazené spaliny jsou poté odvedeny do pračky spalin.

5) *Plynová mikroturbína:*

Elektrická energie je vyráběna pomocí jednoduché jednostupňové plynové mikroturbíny a pomocí jednostupňového kompresoru. Kompresor, turbína a generátor jsou umístěny na jedné hřídeli. Rekuperátor (tepelný výměník) převezme tepelnou energii z vystupujících odpadních plynů a předá ji nasávanému vzduchu, jenž poté nemusí být tolik ohříván.

6) *Čištění odpadního vzduchu:*

Redukce dusíkatých oxidů je zajištěna pomocí prověřených opatření, jako jsou stupňové spalování, recirkulace spalin a selektivní nekatalická redukce (SNCR). Kyselé složky spalin, jako např. SO_2 a HCl jsou odstraňovány pomocí suchého sorpčního procesu.

7) Čištění odpadního vzduchu z pásové sušárny:

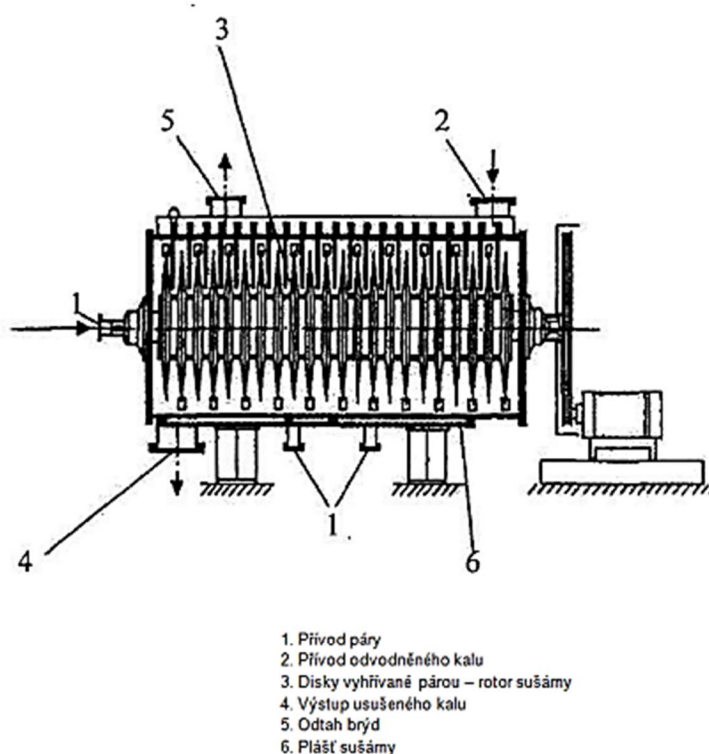
Čištění odpadního vzduchu z pásové sušárny je obvykle prováděno pomocí dvoustupňového pracího systému. Vertikální pračka vzduchu odstraní prachové částice a chemické sloučeniny. Organické složky, které mohou zapáchat, jsou absorbovány a biologicky rozloženy v následném biofiltru [48].

2.9. SUŠENÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Pro mnoho termických technologií likvidace čistírenských kalů je důležité jejich sušení. Principem sušení se rozumí odstraňování kapaliny z vlhkého materiálu, přičemž se jedná převážně o odstranění vlhkosti ve formě vody. Účelem tohoto procesu je zpravidla snížení hmotnosti, zvýšení výhřevnosti kalu a hygienizace (působením tepla po určitou dobu).

2.9.1. Nepřímé sušení kalů

Při tomto sušení dochází k přenosu tepla nepřímo, tedy přes teplosměnnou plochu výměníku. Teplonosné médium může být pára, spaliny, atd. a nedochází k přímému kontaktu s kalem. Příkladem těchto sušáren mohou být diskové sušárny. Základ konstrukce tvoří válcové tělo sušárny, které má uvnitř žebrovaný výměník tepla. Vyhřívaná rotor slouží k sušení, rozměňování a pohybu kalů. Systém je vybaven stěrkami, aby nedocházelo k lepení kalu ke konstrukci sušárny. Tyto sušárny zaručují dobrou kvalitu sušícího procesu. Používají pro kal nevyhnilý i vyhnilý.



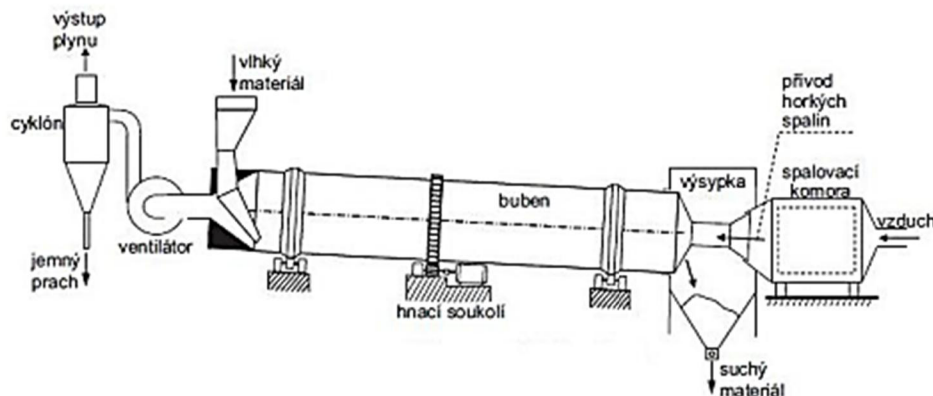
Obr. 2-15 Schéma diskové sušárny [50]

2.9.2. Přímé sušení

Principem přímého sušení je přivádět médium (nejčastěji horký plyn) přímo k sušenému materiálu.

2.9.2.1. Rotační bubnová sušárna

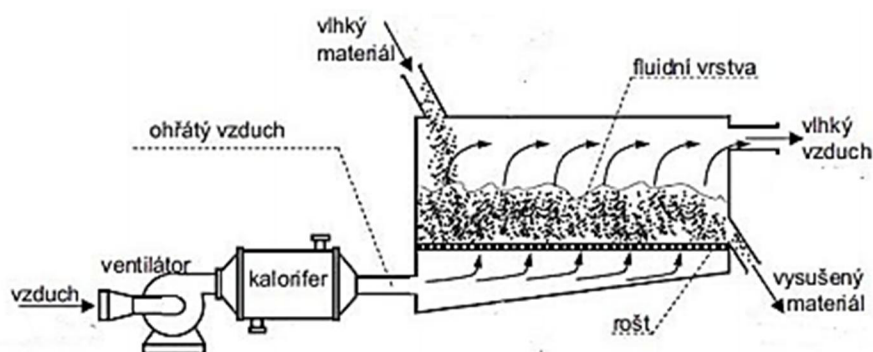
Do bubnové sušárny je kal přiváděn z jedné strany. Díky rotaci uvnitř sušárny dochází zároveň k pohybu kalu, vysoušení a mělnění. Výsledkem je granulovaný kal s obsahem sušiny vyšším než 90 %. V praxi se osvědčilo míchat kal vysušený a odvodněný před vstupem do sušárny a to z důvodu prevence ucpáním bubnu [50].



Obr. 2-16 Schéma rotační bubnové sušárny [50]

2.9.2.2. Fluidní sušárna

Fluidní sušárna patří mezi další zástupce klasického sušení kalů z ČOV. Princip sušárny je založen na udržování částic kalu ve vznosu a to díky stoupajícímu proudu vzduchu s velkou turbulencí. Rychlost plynu se zde pohybuje až kolem $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Složení kalu má závislost na výsledném podílu sušiny, ale obecně se pohybuje vysušený kal na 90% sušiny. Tyto sušárny mohou být jednostupňové či vícestupňové, ve fluidní vrstvě může být umístěn tepelný výměník [50].



Obr. 2-17 Schéma fluidní sušárny [50]

2.9.2.3. Pásová sušárna

Pásově sušárny se skládají obvykle ze dvou nebo více pásů uspořádaných nad sebou. Čistírenský kal, který má být vysušen, se strojně rozmísťuje na tyto pásy. Do prostoru sušárny je vháněno teplotné médium (spaliny, horký vzduch), které kal zbavují vlhkosti. Sušení je nastaveno tak, aby nevznikaly prachové částice. Sušený kal má celou řadu výhod. Vzniká

suchý, hygienizovaný produkt, který se může dále lehce uskladňovat, či využívat. Moderní pásové sušičky umožňují nastavit obsah sušiny na výstupu. Pracují automaticky, provoz je optimalizován tak, aby nedocházelo ke zbytečné spotřebě energií.



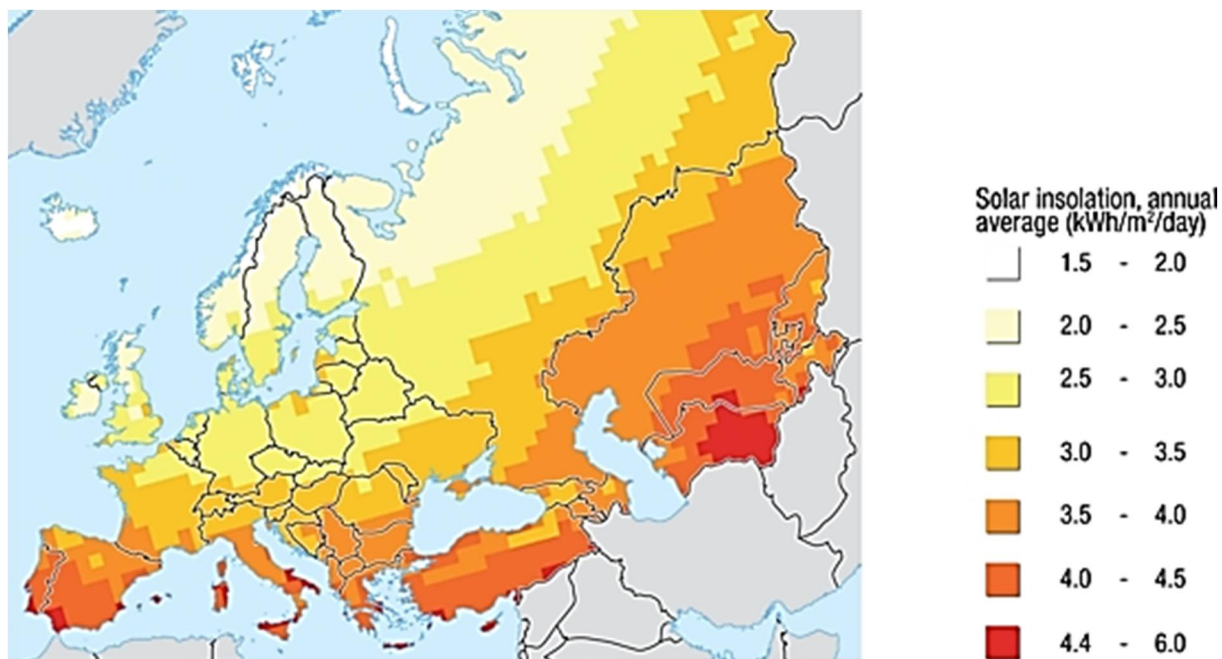
Obr. 2-18 Pásová sušárna HUREB BT a vysušený kal [49]

2.9.2.4. Solární sušárna

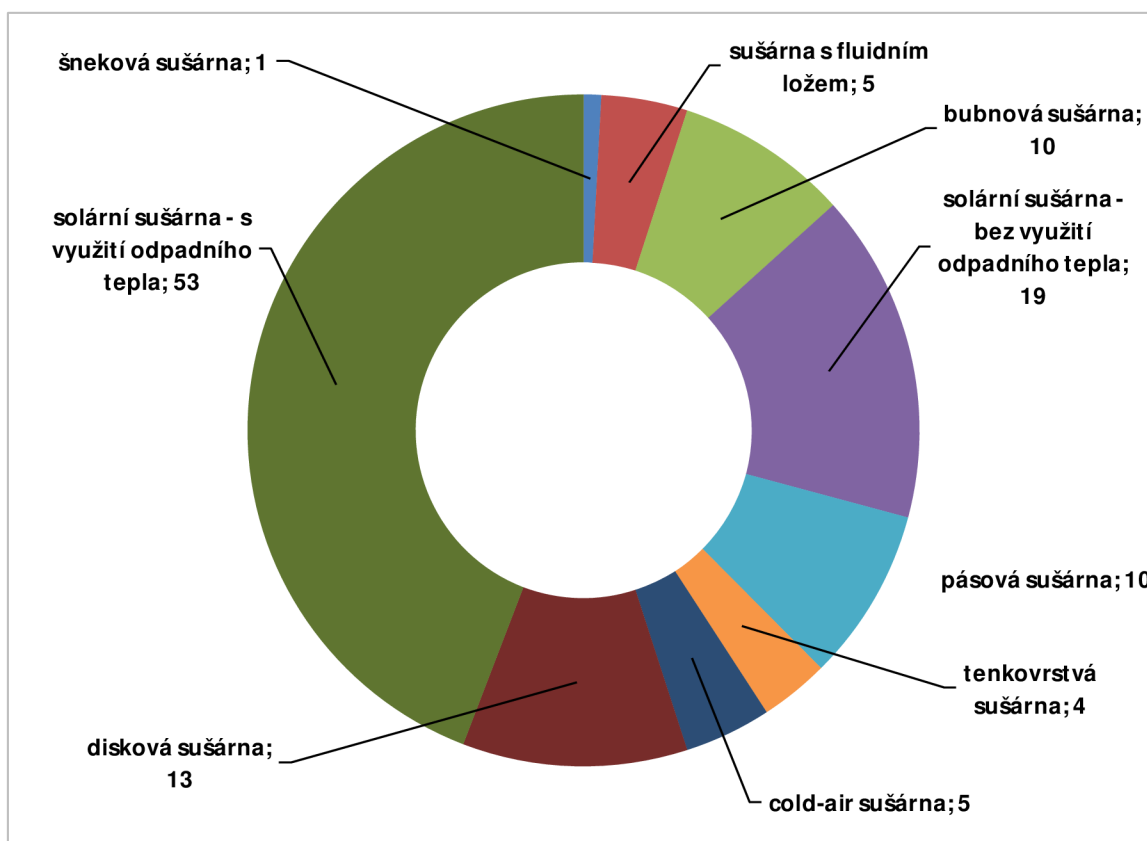
Zatím co do předešlých typů sušáren se musí vkládat značné množství energie, solární či skleníkové, sušárny představují inovativní technologii vůči tradičním způsobům sušení kalů. Přenos tepla se realizuje jako kombinace sálání a vedení. Sušárny fungují jako velké skleníky s vytápěnou podlahou. Dále zde bývá umístěn systém ventilátorů, který vytváří potřebné turbulence vzduchu. Intenzita sušení je do jisté míry závislá na roční době. Sušárny jsou vybaveny stroji na automatické přehrabování kalů. Výsledkem sušení je granulovaný kal. Firma HUBER, která se těmito sušárny zabývá, instalovala několik sušáren ve střední Evropě. Zde jsou technická data jedné z nich: sušárna Bayreuth zpracovává:

- 8 940 m³.rok⁻¹ vyhnílého kalu, odvodněného na 28 %;
- 3 340 m³.rok⁻¹ vyhnílého kalu, po solárním sušení na 75 %;
- 5 600 m³.rok⁻¹ odpařené vody (využití bioplynové stanice);
- 4 970 m³.rok⁻¹ odpařené vody (bez využití odpadního tepla);
- sušárna zaručuje sušení na 63 % bez využití odpadního tepla;
- k sušení se využívá 7 000 m² plochy skleníků;
- dále 300 m² dvoupodlažní budovy pro strojní odvodnění kalu, chemickou místnost, předávací stanici tepla, velín a skládku suchého granulátu [51].

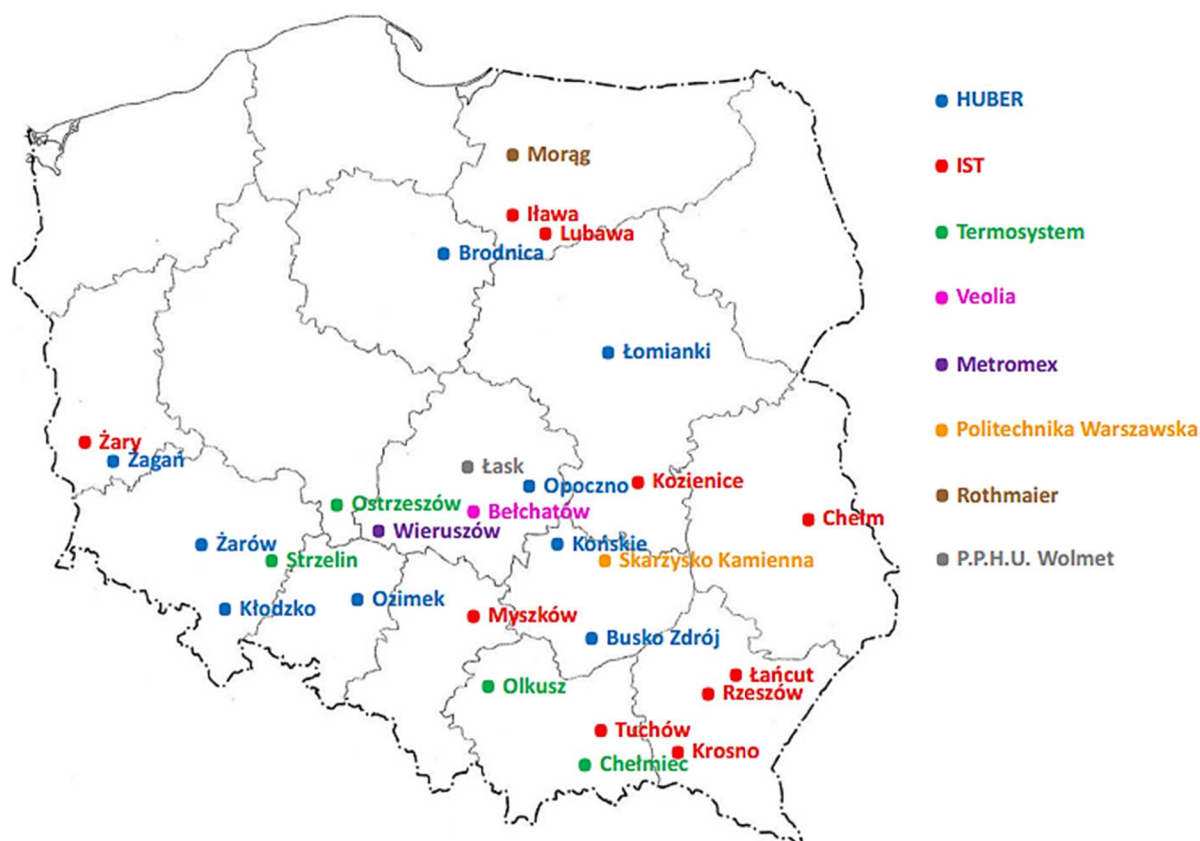
Solární sušení čistírenských kalů se v posledních letech dostává do popředí a v rámci celé Evropy (i východní) začíná postupně těchto zařízení přibývat. Největší výhodou je energetická nezávislost na zdroji tepla (ve variantě bez vytápění). Díky tomuto provozu není nijak ovlivněna tepelná bilance ČOV a teplo (má-li ČOV nadbytek) může být využito jinde. Další energetické nezátížení může pomáhat čistírnám k energetické soběstačnosti. V zahraničí se staví solární sušárny všech velikostí. Následující obr. ukazuje sílu slunečního záření. Je tedy jasné, že solární sušení, bez výhřevu, je vhodné krom severských států pro všechny země.



Obr. 2-19 Sluneční záření v Evropě [68]



Obr. 2-20 Počet zařízení na sušení kalů v Německu [65]



Obr. 2-21 Počet solárních sušáren v provozu v Polsku

V Polsku je solární sušení velmi populární a připravuje se zde dalších více než 20 zařízení. Solární sušárny, ať už realizované či plánované, mají nejrůznější výkony a velikosti. Sušárny dosahují výstupní sušiny kalu v průměru 75 % a ročně zpracují každá od 1 do cca. 6 tisíc tun kalů za rok.

2.10. TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ V ZAHRANIČÍ

2.10.1. Rakousko

Rakousko přistoupilo k zakázce ukládání čistírenských kalů na skládky v roce 2004. Toto stanovení mělo zásadní vliv na trend spalování kalů. V Rakousku se preferuje spolu-spalování čistírenských kalů s jiným odpadem (komunálním, biomasa) či spalování spolu s uhlím v elektrárnách. Spolu-spalování ve stávajících zařízení je investičně levnější variantou, než např. vybudování nových zařízení se zpětným získáváním fosforu z popele. V Rakousku se spálí až 35 % veškerých kalů. Zbytek se využívá především v aplikaci na půdu, a to buď zemědělskou, rekultivaci či městskou zeleň. Tento způsob je spjat s předchozí úpravou kalů např. kompostováním [64].

Spalovna odpadu Simmeringer Haide je moderním zařízení pro spalování komunálního odpadu, čistírenských kalů, apod. Jedná se o procesy, které jsou šetrné k životnímu prostředí. Je zde spalováno 100 000 tun komunálního odpadu, 110 000 tun průmyslového odpadu a 190 000 tun čistírenských kalů. Zařízení je konstruováno tak, aby se zde daly upravovat téměř jakékoliv odpady, výjimku netvoří ani radioaktivní či výbušný odpad. Díky tomu zařízení vyrábí 450 000 MWh tepla pro dálkového vytápění a 50 000 MWh elektřiny. Jsou zde spalovány kaly z ČOV Vídeň, které jsou nejdříve odvodněny na odstředivkách a poté spalovány ve fluidních pecích při teplotě přibližně 950 °C [63].

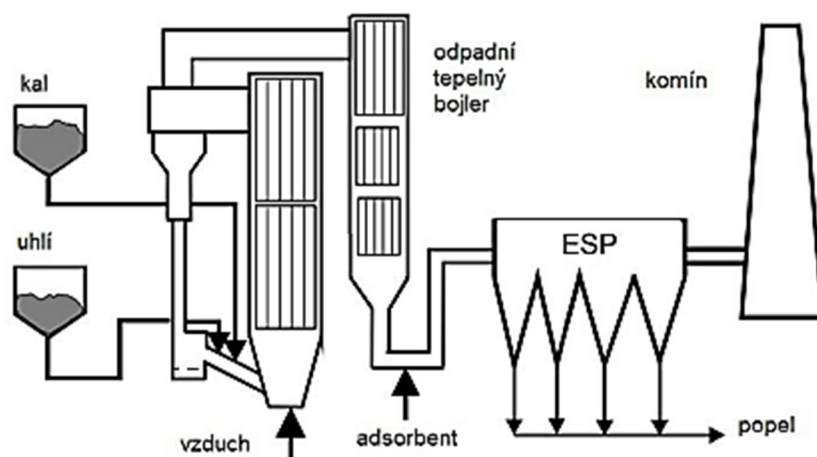
2.10.2. Německo

Německo patří mezi evropskou špičku pro nakládání s čistírenskými kalů. Průměrná roční produkce kalů zde dosahuje 2 milionů tun sušiny kalů. V roce 2010 byla více než polovina spalována v zařízení na spalování kalů či jako přídatné palivo pro spolu-spalování [66].



Obr. 2-22 Seznam elektráren pro spolu-spalování kalů v Německu [66]

V Německu patří mezi přední energetické společnosti RWE energy a EnBW Energy. Obě tyto společnosti využívají ve svých zařízeních (elektrárny, spalovny) spolu-spalování druhotných surovin. Známostou je elektrárna Berrenrath v Kolíně, patřící RWE.



Obr. 2-23 Elektrárna Berrenrath [65]

Zařízení je v provozu od roku 1991 v současné době má více než 150 zaměstnanců. Spaluje se zde uhlí (0,825 mil. tun uhlí za rok) a čistírenský kal (okolo 300 tisíc tun za rok). Zařízení má 5 turbín a výkon 49 MW, produkuje 0,483 TWh elektrické energie [65].

2.10.3. Nizozemsko

Politika o nakládání s kaly z ČOV je v Nizozemsku odlišná od ostatních zemí. Platí zde daleko přísnější pravidla a zákaz o recyklování kalů na zemědělskou půdu platí již od roku 1996. Kal se zde dodává hlavně jako granulované palivo, které se využívá v elektrárnách. Výrobou těchto granulátů se zabývá německá firma GMB. Tato firma využívá dvou hlavních kompostáren, ve kterých zpracovává kolem 15 % veškeré produkce kalů v Nizozemsku. Velká část produkce je přímo spalována (58 %) a zbytek je sušen pomocí solárních sušáren (27 %). Celkově se dá říct, že problematika likvidace kalu se zde řeší stejně jako ostatní biomasa, která je převážně spalována ve spalovnách [66]. Známa je zde například elektrárna Hemweg 8, která spaluje hnědé uhlí. Výkon elektrárny je 650 MW a od roku 1997 začala spolu-spalovat i cca. 75 tisíc tun kalové sušiny za rok [67].

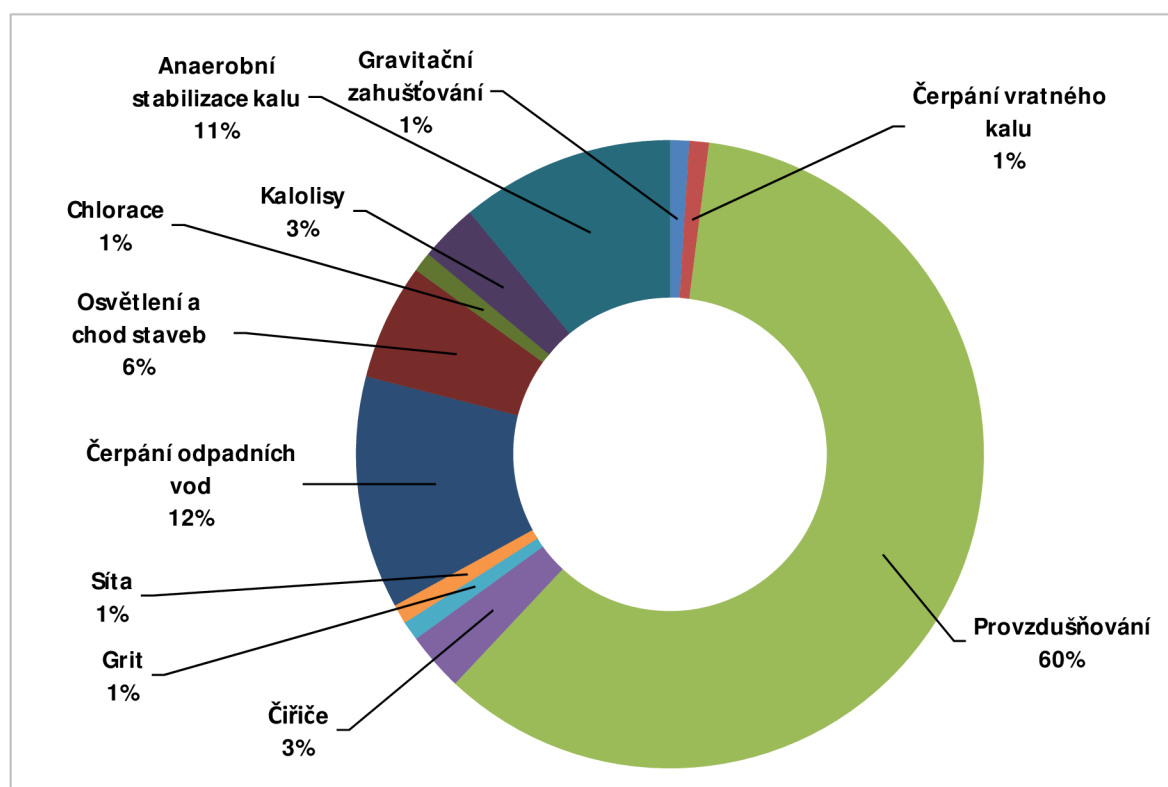


Obr. 2-24 Elektrárna Hemweg 8

3. POTŘEBA A VYUŽITÍ ENERGIE NA ČOV

Čistírny odpadních vod spotřebovávají k procesu čištění velké množství energie. K pohánění čistírenských procesů se používá energie ze stále vzácnějších fosilních paliv. Těch je nejen čím dál méně, ale navíc produkují skleníkové plyny, jako jsou oxid uhličitý, metan a oxid dusný. Kritika k tradičnímu přístupu čištění odpadních vod neustále roste a to hlavně z důvodu, že není šetrná k životnímu prostředí. Tato kritika vede k novým strategickým paradigmatům k čištění odpadních vod a jejího rozvoje. Zejména pak k získávání energie z čistírenských procesů a produktů, zahrnující také nakládání s kaly a vyčištěnou vodou [53].

Ve skutečnosti komunální odpadní voda obsahuje všechny potřebné komponenty pro zlepšení udržitelného rozvoje. Jeden kubický metr odpadní vody obsahuje vodu spotřebovanou pěti až deseti lidmi za den a obsahuje přibližně 2 kWh ekvivalentní energie a dostatečné živiny pro alespoň jeden metr čtvereční zemědělské produkční oblasti za rok [54]. Zatím ČOV používají další energii k odstranění chemické energie a přítomných živin. Odhady založené na množství organických látek obsažených v odpadní vodě ukazují, že je potřeba vyčistit pouze 18 % z přítoku na běžné ČOV. Některé odhady dokonce tvrdí, že energie obsažená v odpadních vodách (organické znečištění a nerozpuštěné látky) je až desetkrát větší než energie, která se spotřebuje k jejímu vyčištění [55]. Potenciálně může pokrýt až 12 % odběru elektrické energie v USA [56]. Nicméně ve Velké Británii konvenční technologie umožňuje obnovení přibližně 11 % z přitékající energie na ČOV, pomocí kogenerační jednotky na výrobu elektrické energie a to díky získanému metanu z anaerobní stabilizace kalu. Jinými slovy, asi polovina energie potřebná k vyčištění odpadní vody je získána zpět [57].



Obr. 3-1 Spotřeba energie pro různé velikosti a postupy na ČOV [52]

3.1. ENERGETICKÁ EFEKTIVNOST

Elektrická energie vyrobená na čistírně odpadních vod redukuje odběry elektrické energie ze sítě. Energetická efektivnost je vyjádřena jako poměr vyrobené elektrické energie ke spotřebované elektrické energii pro provoz ČOV. V České republice dostávají čistírny odpadních vod tzv. zelené bonusy. Jsou to bonusy za vyrobenou elektrickou energii, kterou samy spotřebují. Tyto bonusy se pohybují kolem 2 Kč za kWh (v závislosti na uvedení zařízení do provozu - kogenerační jednotky).

Evropa je v současné době světovým lídrem ve zpětném získávání energie na městských čistírnách odpadních vod. S největší pravděpodobností je to díky rozpočtovým omezením a silnému povědomí o životním prostředí [52]. 63 % čistíren odpadních vod ve Velké Británii mají anaerobní stabilizaci kalu, jímají bioplyn a vyrábějí elektrickou energii [57]. V USA mají z celkového počtu anaerobní stabilizaci kalu a následné jímání bioplynu pouze na 19 % ČOV, z tohoto počtu asi 10 % využívá bioplyn.

Tab. 3-1 Energetická efektivnost některých ČOV [52]

Stát/ČOV	Švédsko (průměr ze všech ČOV)	Česko (ÚČOV Praha)	Singapur (ČOV Jurong)	Velká Británie (průměr ze všech ČOV)	Švýcarsko (ČOV Curych)	Rakousko (ČOV Strass)
Energetická efektivnost	9 %	83,5 %	40 %	50 %	100 %	108 %

Pro konvekční nádrž s aktivovaným kalem s mezofilní anaerobní stabilizací kalu se 40 % odstraněním nerozpuštěných látek a generátorem elektrické energie s účinností 30 %, může být dosaženo 20 – 50 % energetické efektivnosti [58]. S předúpravou biologických nerozpuštěných látek nebo tepelným rozkladem, odstranění olejů a tuků a efektivním energeticky úsporným procesem, lze energetické efektivnosti ještě zvýšit a to až na 80 % či více. Důkazem toho je ČOV v Praze a ČOV v Curychu. Čistírna komunálních odpadních vod v Rakouském Strassu dosahuje dokonce energetické efektivnosti 108 % [59]. Čistírna vyprodukuje dostatek elektrické energie pro svou vlastní spotřebu, při procesu čištění odpadní vody. Navíc 8 % z vytvořené elektrické energie prodává do veřejné elektrické sítě. Mezi hlavní přístupy pro dosažení tohoto pozitivního stavu jsou:

- dynamická kontrola a řízení aerace
- zvýšení produkce bioplynu tím, že se maximalizuje CHSK posílané do anaerobní vyhnívací nádrže při automatickém provozu inovativního před koncentračního procesu
- zapojení generátorů s vysokou účinností
- snižování dávky kyslíku použitím anaerobní oxidace amoniaku pro odstranění amoniaku v boční lince

Body I a IV redukují spotřebu elektrické energie a body II a III zvyšují generování elektřiny [52].

4. KALOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ NA ČOV HODONÍN

Zpřísňující se legislativní podmínky, soběstačnost, modernizace, trend, optimalizace provozu a další, to vše jsou důvody, proč společnost VaK Hodonín hledá řešení pro konečnou fázi čištění odpadních vod a tj. nakládání s kaly. Projekt vznikl ve spolupráci s firmou HUBER CS spol. s r. o. a Vodovody a kanalizace Hodonín, a. s.. Hlavním cílem je navrhnout doporučení pro finální nakládání s kaly v souladu s platnou legislativou i výhledem do budoucna.

4.1. ENERGETIKA PROVOZU VAK HODONÍN

Celková spotřeba elektrické energie u společnosti VaK Hodonín za rok 2014 činila 10 905 MWh/rok, což představuje úsporu 432 MWh/rok (3,81%) oproti roku 2013. Velkým přínosem pro společnost byla výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů za rok 2014 byla následující:[60]

Tab. 4-1 Výroba el. energie z OZE [60]

Výroba elektrické energie	MWh/rok
Kogenerační jednotky na ČOV Hodonín – bioplyn (125 kW a 21 kW)	691
Fotovoltaická elektrárna (30 kW) ÚV Moravská Nová Ves	33
Fotovoltaická elektrárna (30 kW) ÚV Bzenec- Přívoz 30	30
Fotovoltaická elektrárna (30 kW) ČOV Bzenec	30
Fotovoltaická elektrárna (30 kW) ČOV Hodonín	27
Celkem	811

Výše uvedená výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů představuje úsporu 2,6 mil. Kč/rok, z toho zelený bonus 0,7 mil. Kč. Vyplácení zeleného bonusu za výrobu energie z obnovitelných zdrojů bylo bohužel z legislativních důvodů v průběhu roku 2014 ukončeno [60].

4.2. POPIS SOUČASNÉHO STAVU ČOV HODONÍN

ČOV Hodonín je mechanicko-biologická čistírna odpadních vod. Čistírnou odpadních vod za rok 2014 prošlo celkem 2 553,7 tis.m³. odpadní vody. Kapacita čistírny je 13 750,0 m³.den⁻¹ a 90 000 EO. V současné době je část technologie odstavena (např. dosazovací nádrž), protože je na ČOV napojeno jen 51 791 EO. Kal se zde zpracovává anaerobním vyhníváním a využívá se bioplynu v kogeneračních jednotkách. Na menších ČOV patřící pod správu VaK Hodonín se kaly zpracovávají různými způsoby, podle velikosti produkce kalů. Společné pro veškeré zpracování je konečné odvodňování kalů. Snahou je vybudovat zařízení, které bude zpracovávat kaly z různých provozoven VaK Hodonín, nebo vymyslet vhodnou koncepci pro nakládání s kaly.

Tab. 4-2 Hodnoty sušiny kalu v procentech

OBJEKT	MIN	MAX	Průměr
ČOV Bzenec	14,4	27,02	17,82
ČOV Dolní Bojanovice	18,19	27,28	22,52
ČOV Dubňany	11,82	16,15	14,64
ČOV Koryčany	18,17	31,92	20,98
ČOV Kyjov	19,47	36,59	24,34
ČOV Milotice	15,75	24,29	19,732
ČOV Ratiškovice	13,65	17,65	15,79
ČOV Strážnice	13,64	20,87	16,29
ČOV Mistrín	13,01	23,92	16,38
ČOV Veselí nad Moravou	20,16	24,04	22,49
ČOV Vnorovy	15,73	29,53	19,97
ČOV Ždánice	15,67	24,57	19,46
ČOV Hodonín	18,04	36,86	23,3

V současné době se veškerá produkce kalů předává za úplatu firmě TOMA. Provoz ČOV Hodonín hledá způsob jak kal hygienizovat a snížit jeho objem. Snížení objemů kalů bude mít za přímý následek i snížení ceny, za likvidaci kalů.

Vedle areálu ČOV se nachází půda ve vlastnictví státu a Elektrárna Hodonín, patřící skupině ČEZ, a. s..



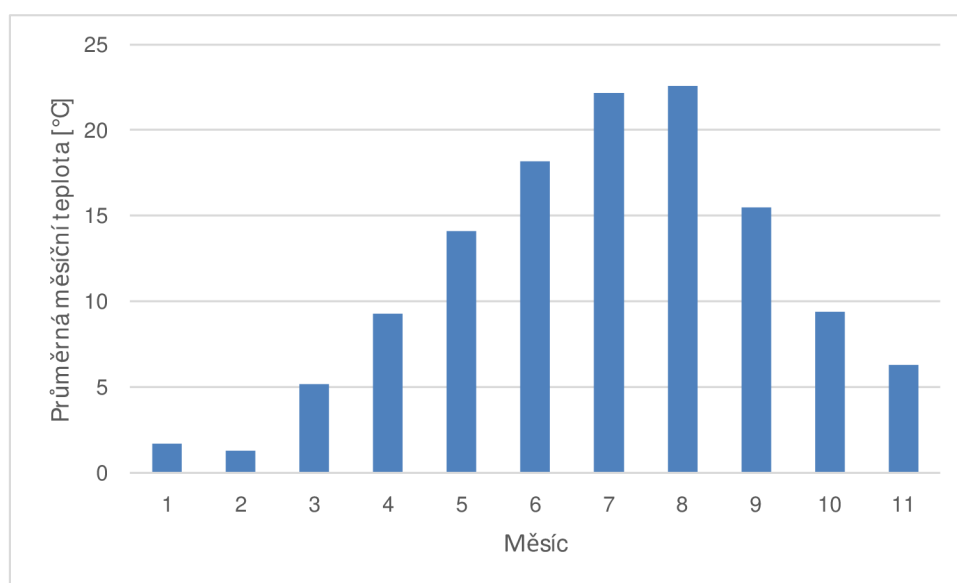
Obr. 4-1 Snímek areálu ČOV Hodonín [60]

V kombinaci možných technologií nabízených na trhu a požadavky provozu čistírny v Hodoníně, byly domluveny následující varianty k detailnějšímu průzkumu;

1. Sušení kalů
 - pásová sušárna
 - solární sušárna
2. Využití vysušených kalů
 - Elektrárna Hodonín
 - Aplikace na zemědělskou půdu

4.3. SUŠENÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Sušením kalů se vytváří z odpadů cenná surovina, která může najít využití v dalších odvětví (průmysl, zemědělství, rekultivace, apod.). Je nutno říci, že technologie je náročná na energii, která je nutná pro sušení kalů. Zkušenosti z provozu ukazují, že nejvhodnější je sušení odpadním teplem, kterého bohužel bývá větší přebytek pouze v letních měsících.



Obr. 4-2 Měsíční data průměrné venkovní teploty dle ČHMÚ pro rok 2015, stanice Strážnice

4.3.1. Zkouška sušení kalu z ČOV Hodonín

V rámci řešení kalové koncovky byla provedena zkouška sušení kalu. Vzorek kalu z ČOV Hodonín byl odebrán přímo po odvodnění. Kal je nejprve zahuštěn na kruhovém zahušťovači na sušinu cca. 4 % a poté dochází k jeho odvodnění na centrifuze na výsledných cca. 25 %. Odběr vzorku proběhl v listopadu 2015. Reprezentativní vzorek o hmotnosti cca 10 kg, byl nabrán z kontejneru na kal. Vzápětí byl vzorek uložen do krabice z lepenky vyloženou pěnovým polystyrenem. Následně byl poslán do laboratoře v Německu, kde byl podroben testování. Zkouška byla provedena na testovací lince HUBER. Cílem testů bylo zjistit, jak se kal chová při vysoušení, jeho vlastnosti, dobu sušení atp..



Obr. 4-3 Kruhový zahušťovač kalu HUBER RoS 2S na ČOV Hodonín



Obr. 4-4 Odběr vzorku kalu

Před zahájením se provede zkouška na ztrátu žíháním, změří se obsah sušiny v kalu a jeho objemová hmotnost. Kal se následně tlačí extruderem na kalové nudle a po vysušení vznikne peletový granulát. Během sušení se vzorek nepřetržitě kontroluje. Kal vykazoval dobrou tvárnost, přičemž se dal velmi lehce tvarovat i ručně. Na zkoušku bylo spotřebováno 2,8 kg kalu.



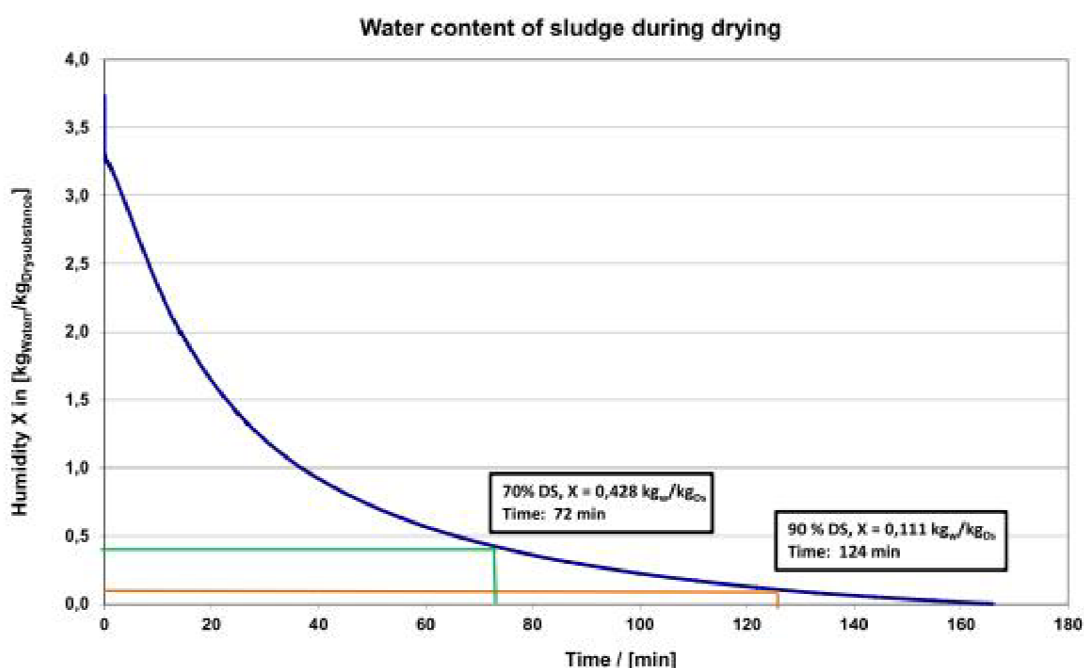
Obr. 4-5 Peletizovaný vzorek kalu

Obsah pevných částic se stanovoval podle DIN EN 12880, vzorek byl vystaven teplotě 105 °C v sušárně. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 4-3 Sušina a ztráta žháním

	Obsah sušiny [%]	Zbytek po žhání [%]	Ztráta žháním [%]
Průměr	21,13	48,52	51,48

Následující obrázek popisuje závislost obsahu vody na čase v testovaném vzorku kalu. Po 72 minutách bylo dosaženo 70% sušiny, respektive vlhkosti v kalu 30 %.



Obr. 4-6 Ztráta vlhkosti při sušení (165 min)

Chování kalu během sušení se klasifikovalo jako dobré. Vypozorována byla nízká smrštitelnost kalu. Hmotnost vzorku se zredukovala o 2,3 kg. Průměr pelet se zmenšil o 4 mm. Výsledný produkt byl vysušený a vytvořil velice tvrdé kusy, které se daly lehce drtit.

Tab. 4-4 Vlastnosti kalu před a po sušícím pokusu

vlastnost	před sušením	po sušení
hmotnost vzorku	3,7 kg	1,4 kg
výška plnění	10 cm	7 cm
průměr pelet	1 cm	0,6 cm
pórovitost kalu	59,46 %	79,73 %
objemová hmotnost kalu	434 kg.m ⁻³	217 kg.m ⁻³

**Obr. 4-7 Pohled na vysušený vzorek kalu po 165 min**

Testovaný vzorek kalu z ČOV Hodonín byl testován v sušárně HUBER. Kal vykazuje normální chování při sušení. Výsledná sušina je 99 % po 165 minutách sušení. Po vysušení lze kal snadno rozbít na malé kousky. Díky vysušení se hmotnost vzorku snížila o 62 %.

4.3.1. Sušení kalů na pásové sušárně HUBER

Návrh sušárny byl proveden dle uvedených provozních požadavků. Návrhové varianty byly pro dva provozní stavy a to pro vysušení na výstupní sušinu 65 % a 90 %. Na základě vstupních dat získaných od provozu ČOV Hodonín byl vypracován návrh pro vybudování pásové sušárny. Výhodou pásové sušárny jsou nižší investiční náklady, než na sušárnu solární. Také prostorový zábor by byl daleko menší. Jedná se o tradiční technologii, se kterou jsou dobré a bohaté zkušenosti. Hlavní nevýhodou je provoz samotné sušárny. Při nevyužívání odpadního tepla se stupeň sušení, hygienizace a finální úpravy kalu značně prodražuje. Náklady na provoz sušárny (výrobu tepla) mohou negativně ovlivnit bilanci městských čistíren. Díky těmto důvodům se doporučuje instalování sušáren pouze na větších ČOV. Proto je vhodné, jako v tomto případě, využít jednu sušárnu kalu pro celý region a odvodněné kaly vysušet na jednom místě.

Pro využití pásové sušárny HUBER BT, musí kal splňovat následující předpoklady:

- Odvodněné kaly musí dosahovat minimálního obsahu sušiny 18 %. Tato hodnota se stanovuje dle DIN EN 12880. Vyšší obsah zaručuje zvýšenou účinnost sušení a snižuje spotřebu tepelné energie. Vyžaduje se konzultace s HUBER SE.
- Nabídka na sušení je založena na základě standartních/normálních podmínek homogenity čistírenských kalů z komunálních ČOV s minimálním obsahem organických látek 45 % a maximální sušiny kalu 75 %. Obsah se stanoví ze ztráty žháním podle DIN 38114 T3.
- V případě sušení vyhnílého kalu musí být stáří kalu minimálně 20 dní, doporučuje se 25 dní.
- Obecně platí, že je potřeba kal mechanicky odvodnit na co nejvyšší podíl sušiny v kalu. Podle zkušeností je sušení provozně dražší než mechanické odvodňování. V případě, že nejde kal dostatečně odvodnit a ten obsahuje příliš vysoký podíl vody, nelze takto upravené kaly sušit v sušárně.
- Podíl průmyslových kalů by neměl být vyšší než 15 % z celkového zatížení ČOV. Překračuje-li množství průmyslových kalů tuto hodnotu, je nutné informovat výrobce.
- Dojde-li k zásadní změně vlastností kalů v důsledku budoucího provozu zařízení (např. nemožnost čerpání kalů na základě změny obsahu sušiny) je nutná instalace doplňkových zařízení, vedoucích k řešení těchto budoucích problémů.
- Zařízení se dimenzuje na základě objemové hmotnosti kalu mezi 500 až 800 kg.m⁻³ po peletizaci kalu. Takový kal zůstává tvarově stabilní a dobře propustný pro sušící vzduch.
- Odvodněný kal musí být skladován tak, aby nedocházelo k opětovnému nasátí vody do materiálu (např. chráněn před deštěm, neskladovat vlhkém prostředí apod.). Toto opětovné snížení obsahu sušiny v kalech vede ke zhoršení peletizace a procesu sušení a jeho zbytečnému prodražování.
- Kal nesmí obsahovat cizí předměty (nedopalky z cigaret, listí apod.) a specifický průměr částic kalu by neměl být větší než 8 mm.
- Kal nesmí obsahovat znečišťující látky které mohou být nebezpečné pro obsluhu zařízení či životní prostředí (látky toxické, žíravé, radioaktivní, hořlavé či výbušné).
- Vlhký (odvodněný) kal nesmí obsahovat vápno, které se přidává pro jeho stabilizaci/hygienizaci.
- Životnost všech zařízení včetně peletizátoru je značně ovlivněna tím, zda zákazník používá kompletní výbavu firmy HUBER.
- Dávka flokulatnu pro zahuštění kalu po odvodnění a množství mazadla pro transport kalu musí být minimalizována. Průměrná dávka polymeru je 2 až 6 g.kg⁻¹ suchého zbytku po zahuštění a 5 až 15 g.kg⁻¹ suchého zbytku po odvodnění. Příliš vysoké dávky polymeru mají negativní vliv na peletizaci kalu a jeho následné sušení.
- Čerpání odvodněného kalu přes nepřiměřeně dlouhé potrubí s vysokým podílem místních ztrát (kolen), plnění prázdného zásobního sila pádem kalu z vysoké výšky, opakované přemísťování kalu před sušením. Tyto důvody mohou být příčinou destrukce vnitřní struktury kalu a tím mohou mít nepříznivý vliv na peletizaci kalu a sušení.
- Následující body mohou mít při provozování vliv na proces sušení, spotřebu energie a výslednou kvalitu vysušeného kalu:
 - složení a kvalita kalu (např. organický/anorganický obsah kalu, obsah flokulatnu, obsah dalších složek, velikost zrn apod.);
 - stupeň dosaženého odvodnění a způsob odvodnění;
 - doba skladování odvodněného kalu před sušením;
 - počáteční a požadovaný (výstupní) obsah sušiny;
 - teplota surového kalu v okamžiku jeho přivedení do sušárny;

- kvalita a kvantita zdroje tepla (energie) a kvalita přestupu tepla (např. teplota a průtok teplotonosného média);
- podíl recyklujícího vzduchu a kvalita čerstvého vzduchu (teplota, množství). [62]

Tab. 4-5 Vstupní data pro návrh pásové sušárny HUBER

Vstupní data			
obsah sušiny po vysušení	více než 60 %		
využití pro vysušený kal	hnojivo, palivo		
zdroj kalu	městská ČOV		
typ kalu	anaerobně stabilizovaný, 22 dní		
typ odstředivky	centrifuga		
konzistence kalu po odvodnění	převážně drobná (kontejner), pastovitá (silo)		
zápach	neutrální		
čas odvodnění	24 hodin.den ⁻¹	4300 (8000 veškerého kalu)	hodin.rok ⁻¹
	4 dnů.týden ⁻¹		52 týden.rok ⁻¹
množství odvodněného kalu			
		20 tun.den ⁻¹	
		4000 (10000 veškerého kalu)	tun.rok ⁻¹
sušina odvodněného kalu			
	18,01 min	36,86 max	23,3 průměr
palivo k dispozici	bioplyn		
zdroj odpadního tepla	teplá voda, spaliny		
množství	8600	kWh	
teplota	60 - 80	°C	
časová dostupnost	24	hodin.den ⁻¹	
zdroj odpadního tepla	spaliny z bioplynu		
chladivo	procesní voda		
množství	přes 100	m ³ .hod ⁻¹	
teplota	10 - 24	°C	

Tab. 4-6 Návrh sušárny HUBER BT pro výstupní sušinu 65 %

vstupní data		
typ kalu		vyhnilý kal
roční produkce	10000	t.rok ⁻¹
doba provozu	24	h.d ⁻¹
doba provozu	8000	h.rok ⁻¹
max. doba provozu	8000	h.rok ⁻¹
dávka kalu	1250	kg.h ⁻¹
sušina na vstupu	20	%
sušina na výstupu	65	%
kapacita vodního výparu	867	kg.h ⁻¹
typ sušárny	BT 16	
počet jednotek	1	
tepelná energie		
měrná spotřeba energie	0,847	kWh.kg ⁻¹ H ₂ O
spotřeba tepelné energie	734	kWh.h ⁻¹
zdroj tepla	teplá voda	
teplota přívodu	80	°C
teplota vratu	70	°C
množství	63	m ³ .h ⁻¹
elektrická energie		
specifická potřeba el. energie	0,111	kWh.kg ⁻¹ H ₂ O
celková spotřeba el. energie	96	kWh.h ⁻¹
instalovaný výkon	134	kW
provozní voda		
chladicí voda	19	m ³ .h ⁻¹
servisní voda	0,5	m ³ .h ⁻¹
teplota	20	°C
odpadní voda	cca. 1,4	m ³ .h ⁻¹
odpadní vzduch		
průtok vzduchu	5000	m ³ .h ⁻¹
teplota	≤ 40	°C
úroveň hluku	< 85	dB

Tab. 4-7 Návrh sušárny HUBER BT pro výstupní sušinu 90 %

vstupní data		
typ kalu		vyhnilý kal
roční produkce	10000	t.rok ⁻¹
doba provozu	24	h.d ⁻¹
doba provozu	8000	h.rok ⁻¹
max. doba provozu	8000	h.rok ⁻¹
dávka kalu	1250	kg.h ⁻¹
sušina na vstupu	20	%
sušina na výstupu	90	%
kapacita vodního výparu	973	kg.h ⁻¹
typ sušárny	BT 18	
počet jednotek	1	

tepelná energie		
měrná spotřeba energie	0,847	kWh.kg ⁻¹ H ₂ O
spotřeba tepelné energie	824	kWh.h ⁻¹
zdroj tepla	teplá voda	
teplota přívodu	80	°C
teplota vratu	70	°C
množství	71	m ³ .h ⁻¹

elektrická energie		
specifická potřeba el. energie	0,113	kWh.kg ⁻¹ H ₂ O
celková spotřeba el. energie	110	kWh.h ⁻¹
instalovaný výkon	154	kW

provozní voda		
chladicí voda	37	m ³ .h ⁻¹
servisní voda	0,5	m ³ .h ⁻¹
teplota	20	°C
odpadní voda	cca. 1,5	m ³ .h ⁻¹

odpadní vzduch		
průtok vzduchu	5000	m ³ .h ⁻¹
teplota	≤ 40	°C
úroveň hluku	< 85	dB

Návrh rozpočtu sušení kalů Hodonín

Návrhová data:

Množství kalu:	10.000 t/r
Sušina na vstupu:	20 %
Sušina na výstupu:	65 %
Provozní doba:	8.000 h/r
Kapacita (kal):	1.250 kg/h
Odpar vody:	867 kg/h
Typ sušárny:	BT 16
Tepelný zdroj:	voda s 80°C (dodává zákazník)

Cenová kalkulace:

Položka 1 Transport odvodněného kalu

- 1 ks. čerpadlo odv. kalu s 2 m² násypkou
- 1 ks. potrubí odv. kalu DN 200 mezi čerpadlem a peletizační jednotkou sušárny
Délka 5 m

Položka 2 Pásová sušárna

- 1 ks. peletizační jednotka zahrnující tl. hadici
- 1 ks. nízkoteplotní sušárna BT 16
- 1 ks. výhazový dopravník (4.000 mm); následné nakládání s vysušeným kalem zajišťuje zákazník
- 1 ks. systém vzduchového vedení vč. nezbytných ventilátorů
Vzdálenost vstup čerstvého vzduchu – sušárna: 5 m
Vzdálenost sušárna – kyselá pračka: 6 m
Vzdálenost kyselá pračka – biofiltr: 5 m
- tep. výměníky zahrnující rekuperaci tepla, kondenzační jednotka
- vnitřní rozvedení teplé vody v těle sušárny

Položka 3 Čištění odpadního vzduchu

- 1 ks. kyselá pračka vč. dávkovací stanice chemikálií
- 1 ks. alkalická pračka dávkovací stanice chemikálií
- 1 ks. Biofiltr
Nádrž biofiltru (12.000 mm x 4.000 mm x 1.800 mm)
vyrobena z betonu; dodána zákazníkem

Položka 4 Ovládací panel

- 1 ks. ovládací panel (zn. Siemens S 7 300)

Položka 5 Doprava

- 1 ks. doprava ČOV Hodonín

Položka 6 Dozor

Dozor mechanické instalace

trvání mechanické instalace: 32 dní s 4 montéry (dodávka kvalifikovaných pracovníků zákazníkem)

Dozor HUBER je po celou dobu mechanické instalace přítomen.

Dozor elektro instalace

trvání dozoru elektro instalace: 2 x 1 týden

jeden elektroinženýr

první týden: převzetí projektu

druhý týden: dozor podle postupu výstavby

trvání instalace elektro: cca. 20 dní se 4 elektrikáři

(dodávka kvalifikovaných pracovníků zákazníkem)

Položka 7 Zprovoznění

Funkční testy, testy signalizace, testy pohonů, uvedení do provozu nabízených zařízení

Celková cena, ČOV Hodonín: Kč 43 428 000,00

Celková cena s montáží (1 980 000,00 Kč) Kč 45 408 000,00

Tab. 4-8 Výpočet návratnosti investice do pásové sušárny BT

Výpočet doby návratnosti sušárny		BT 16
		varianta na sušinu 65 %
Současné náklady na likvidaci kalů		
Množství odvodněného kalu	10 000,00	tun.rok ⁻¹
Cena za jeho likvidaci	800,00	Kč.t ⁻¹
Cena za likvidaci celkem	8 000 000,00	Kč.rok ⁻¹
Budoucí investice, náklady na provoz a likvidaci kalů		
Životnost zařízení	25	let
Náklady na pořízení zařízení	45 408 000	Kč
Spotřeba tep. energie	0,85	kWh.kg ⁻¹ H ₂ O
Spotřeba tep. energie	0,11	kWh.kg ⁻¹ H ₂ O
	45,00	%
Množství odpařené vody	4 500,00	tun
	4 500 000,00	kg.rok ⁻¹
Spotřeba tep. energie celkem	3 811 500,00	kWh
Spotřeba el. energie celkem	499 500,00	kWh
Cena za tep. energii	0,25	Kč.kWh ⁻¹
Cena za el. energii	0,55	Kč.kWh ⁻¹
Cena za tep. energii celkem	952 875,00	Kč.rok ⁻¹
Cena za el. energii celkem	274 725,00	Kč.rok ⁻¹
Náklady na náhradní díly	200 000,00	Kč.rok ⁻¹
Náklady na čištění odpadního vzduchu	325 000,00	Kč.rok ⁻¹
Náklady na provoz zařízení celkem	1 752 600,00	Kč.rok ⁻¹
Množství vysušeného kalu	5 500,00	tun.rok ⁻¹
Náklady na sušení 1t kalu	175,26	Kč.t ⁻¹ .rok ⁻¹
Cena za likvidaci vysušeného kalu	350,00	Kč.t ⁻¹
Rozdíl v nákladech (bez sušení - po sušení)	274,74	Kč.t ⁻¹ .rok ⁻¹
Cena za likvidaci vysušeného kalu celkem	1 925 000,00	Kč.rok ⁻¹
Celkem náklady (provoz + likvidace)	3 677 600,00	Kč.t ⁻¹ .rok ⁻¹
Ušetřená cena celkem	4 322 400,00	Kč.t ⁻¹ .rok ⁻¹

Doba živostnosti	25	let
Náklady celkem	45 408 000	Kč
Roční náklady	3 677 600	Kč
Roční výnos/úspora	4 322 400	Kč
Diskont	3	%
NPV - čistá současná hodnota projektu	75 266 590	Kč
Doba návratnosti - prostá	11	let
Diskontovaná doba návratnosti	13	let
Index ziskovosti	2	-

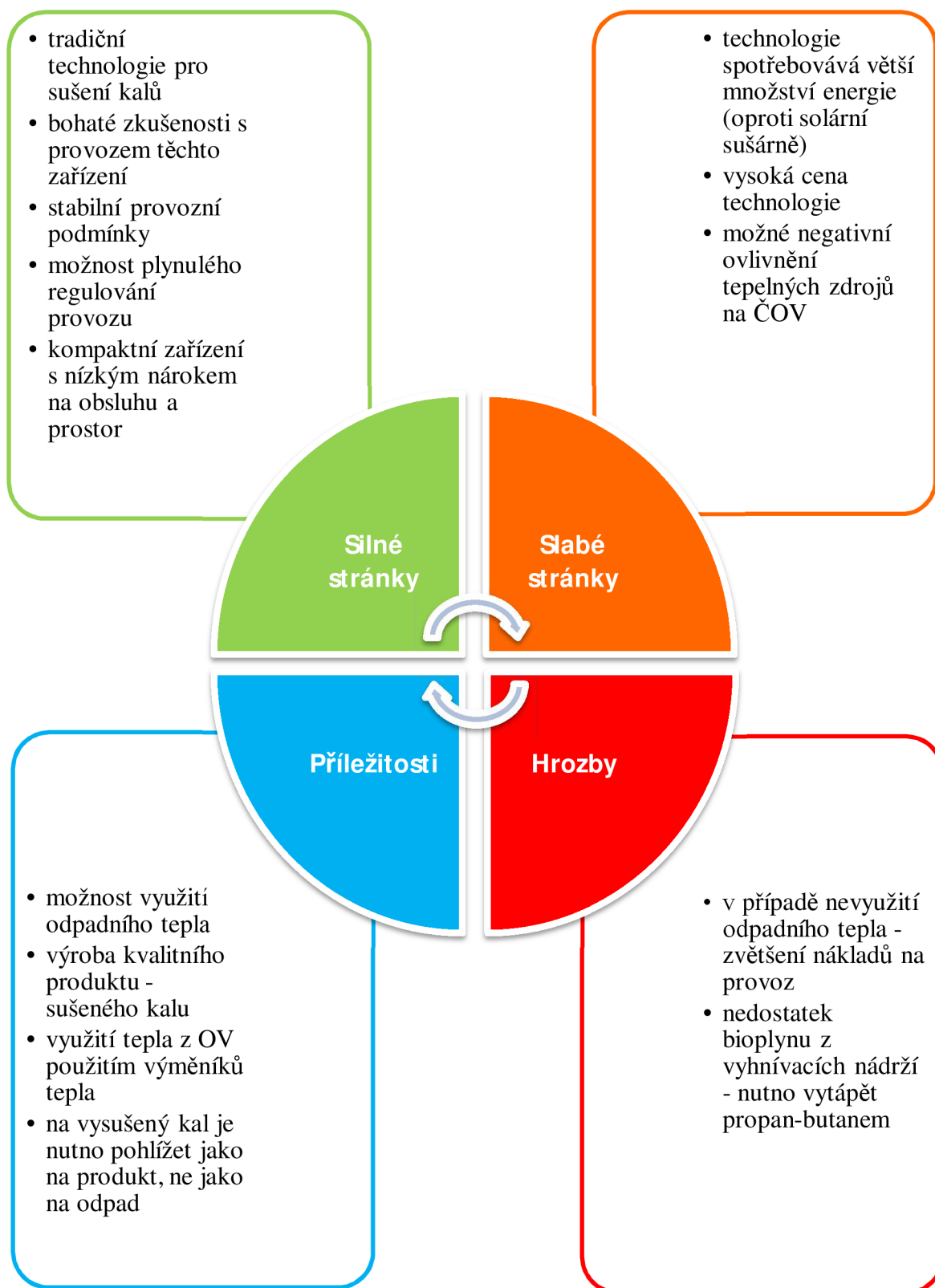
Výpočet se opírá o návrhové hodnoty sušárny BT (spotřeba energií) a odhadu nákladů spojených na budoucí likvidaci kalů, na provozní údržbu zařízení, čištění odpadního vzduchu ze sušárny, nákladů na tepelnou a elektrickou energii a na závěrečnou likvidaci kalů. Tyto hodnoty byly konzultovány s provozem ČOV Hodonín. Vypočtena je prostá doba návratnosti, diskontovaná doba návratnosti (pro diskont 3 %), čistá současná hodnota projektu a index ziskovosti. S takto zadanými údaji návratnost investice činí 13 let. Dále je nutno počítat s možným snížením nákladů. Optimalizováním dalších parametrů, či nezainvestování do některých komponentů může cenu zajímavě snížit.

Sušení čistírenských kalů v těchto zařízeních vede k výrobě produktu. Takto nově upravený kal by měl být předmětem obchodu, ale k jeho prodeji! Nejedná se totiž o nebezpečný odpad, jak je to u kalu pouze odvodněného. Jedná se o produkt sušení (či jiné technologie), do které se muselo na počátku investovat a dále se musí provozovat. Má-li tento systém do budoucna fungovat, měl by se aktualizovat zákon (či vyhláška) stanovující nakládání s takto hygienizovaným kalem. V současné době vodárenské společnosti musí platit za odvoz kalu. Za svoz tohoto druhu odpadu se platí průměrně 500 - 1000 Kč.t⁻¹. Pokud by se kal dále zpracovával (sušil) a poté se za jeho odvoz mělo platit stejnou mincí jako doposud, tak je to demotivující a nerentabilní způsob.

Na městských čistírnách odpadních vod, které mají dostatek odpadního tepla, se jeví sušení kalů na pásové sušičce jako neoptimalnější možná varianta. Při využití odpadního tepla se do sušárny HUBER BT vkládá jen nutné množství el. energie pro provoz stroje. Na ČOV Hodonín je k dispozici odpadní teplo z kogeneračních jednotek, kterého je dostatek hlavně v letních měsících. V zimním topném období je využíváno pro topný okruh, který vytápí administrativní budovu. Výkon kogeneračních jednotek, jsou k dispozici dvě, je 42 a 200 kW. Využití bioplynu a jeho následné spálení v kogeneračních jednotkách, se získá el. energie a teplo. Toto teplo bývá buď využito k ohřevu anaerobní stabilizace, nebo je mařeno (když je ho přebytek). Využitím tohoto odpadního tepla při sušení je dalším a posledním krokem pro kalové hospodářství ČOV.

Jako další možná varianta (při nedostatku tepla) se nabízí investice do využívání tepla z odpadní vody. Toho se může využít pro vytápění na ČOV, či ohřevu topné vody na sušárnu. Tím by vznikl další samostatný zdroj tepla, který by zajišťoval energii prakticky zdarma.

Při splnění předpokladu možnosti využití odpadního tepla a plánem o nakládání co s vysušeným kalem, je investice do pásové sušárny nejvýhodnější. Další využití, a to ihned na ČOV, je vybudování vlastního zařízení na spalování kalů, jako je např. systém Sludge2energy. Kal se suší odpadním teplem, které vzniká spálením již vysušeného kalu. Navíc zde mikroturbína pohání generátor, který produkuje el. energii.



Obr. 4-8 SWOT analýza sušárny HUBER BT

4.3.2. Sušení kalů solární sušárnou Huber

Solární sušení je moderní způsob úpravy a hygienizování čistírenských kalů. Jedná se o spojení několika způsobů sušení dohromady. Využívá se sálavého tepla (vytápění podlahy), dále sluneční energie pro výhřev skleníků a systému umělého větrání uvnitř skleníků. Ložená vrstva kalu je nepřetržitě prohrabávána, takže nedochází k nepříznivému zahřívání či nedokonalému vysušování. Bezpochyby největší výhodou je využívání sluneční energie. Solární sušení, dle mého názoru, bude jedním z velmi významných způsobů finálního nakládání s kalem na moderních ČOV. Tento systém velice dobře umožňuje využít odpadní teplo, které na ČOV vzniká. Dále se může systém zkombinovat např. s využitím tepla z odpadní vody, které je nezávislé na externí zdroje tepla a je dostupné po celý rok. Hlavní výhody jsou:

- snadná údržba a nenáročný provoz;
- nízká spotřeba elektrické energie;
- systém je šetrný k životnímu prostředí;
- proces sušení funguje i bez dodávání tepla;
- promíchávání kalu s různou sušinou díky obracecímu zařízení;
- možnost odebírat kal na stejné straně, jako je dávkován.

Na základě vstupních dat získaných od provozu ČOV Hodonín byl vypracován návrh pro vybudování solární sušárny. Pro tento typ sušení velkého množství kalů je nutný velký zábor půdy. Vedle areálu ČOV je místa dostatek. Nachází se zde pole, které jsou ve vlastnictví státu.

Tab. 4-9 Vstupní data pro návrh solární sušárny HUBER

Vstupní data			
obsah sušiny po vysušení		více než 60 %	
využití pro vysušený kal		hnojivo, palivo	
zdroj kalu		městská ČOV	
typ kalu		anaerobně stabilizovaný, 22 dní	
typ odstředivky		centrifuga	
konzistence kalu po odvodnění		převážně drobná (kontejner), pastovitá (silo)	
zápach		neutrální	
čas odvodnění			
	24	hodin.den ⁻¹	4300 (8000 veškerého kalu) hodin.rok ⁻¹
	4	dnů.týden ⁻¹	52 týden.rok ⁻¹
množství odvodněného kalu		20	tun.den ⁻¹
		4000	tun.rok ⁻¹
		(10000 veškerého kalu)	
sušina odvodněného kalu			
	18,01	min	36,86 max 23,3 průměr
palivo k dispozici		bioplyn	
zdroj odpadního tepla		teplá voda, spaliny	
množství		8600	kWh
teplota		60 - 80	°C
časová dostupnost		24	hodin.den ⁻¹
zdroj odpadního tepla		spaliny z bioplynu	
chladivo		procesní voda	
množství		přes 100	m ³ .hod ⁻¹
teplota		10 - 24	°C

Tab. 4-10 Sušení kalů solární sušárnou HUBER

	množství odvodněného kalu [t]	sušina na vstupu [%]	sušina [t]	sušina na výstupu [%]	vodní výpar [t]	vrstva kalu [cm]
leden	600	20	79	75	213	23
únor	600	20	123	75	333	25
březen	900	20	182	85	579	27
duben	900	20	303	85	967	21
květen	900	20	440	85	1401	7
červen	900	20	316	90	1084	5
červenec	1300	20	293	90	1007	5
srpen	1300	20	203	90	697	5
září	900	20	215	85	685	5
říjen	900	20	191	85	609	7
listopad	800	20	109	75	294	13
prosinec	600	20	75	75	203	18
celkem/průměr	10600	20	2529	85	8071	13

počet sušících linek	5	typ stroje	11 STR
délka skleníku	154 m	šířka skleníků	5 linek 60 m
zimní sušina granulovaného kalu	75%	průměrná sušina	85%



Obr. 4-9 Záběr plochy pro solární sušárnu

Tab. 4-11 Spotřeba energie – solární sušárna bez vytápění

specifický vodní odpar	0,7 – 0,8 t.m ⁻² .rok ⁻¹
specifická spotřeba tepelné energie	1,1 – 1,2 kWh.k H ₂ O

Tab. 4-12 Spotřeba energie – solární sušárna s podlahovým vytápěním

specifický vodní odpar	2,0 – 2,5 t.m ⁻² .rok ⁻¹
specifická spotřeba tepelné energie	1,1 – 1,2 kWh.k H ₂ O

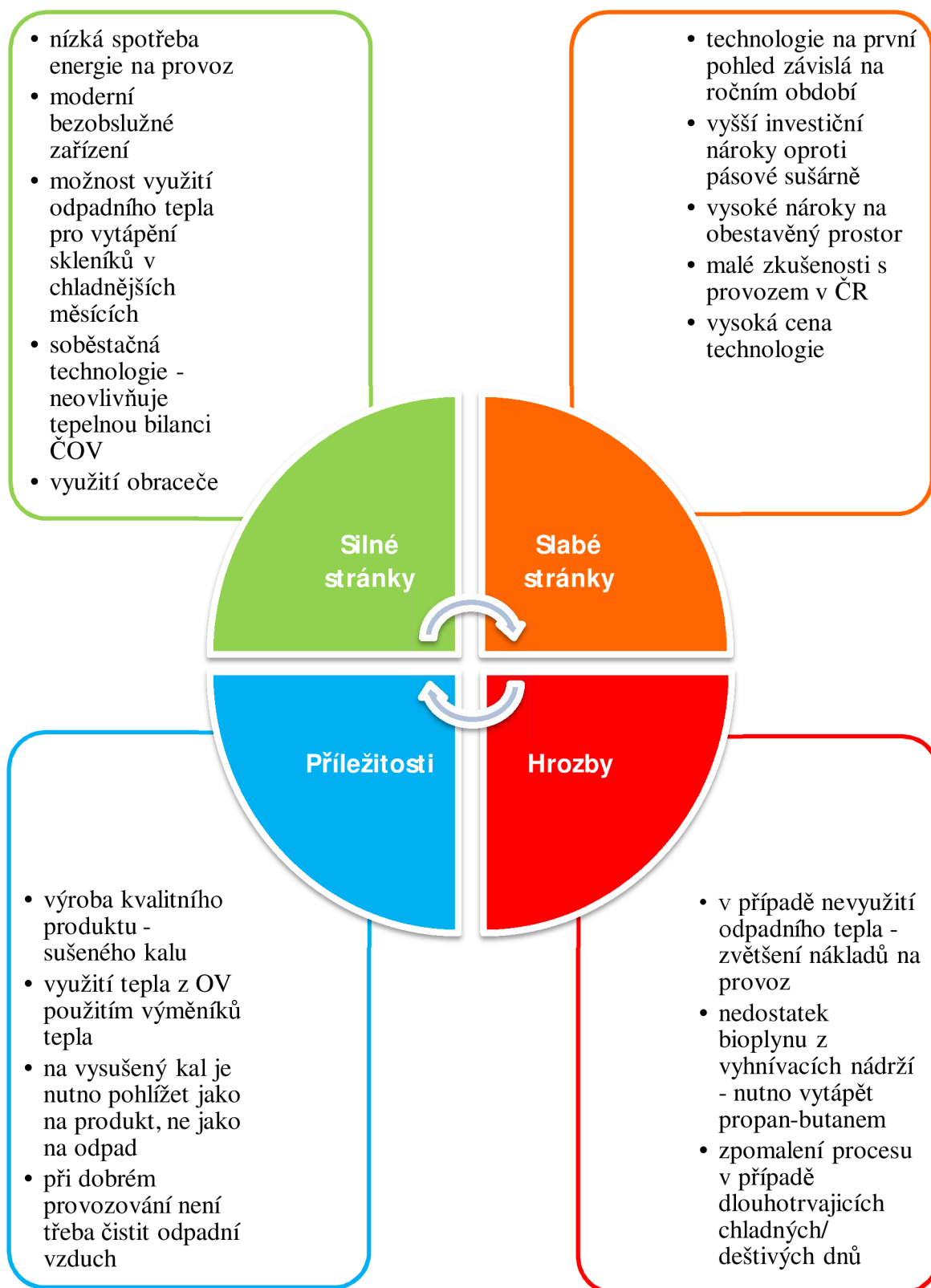
Tab. 4-13 Návrh ceny za solární sušárnu

150 000,00 €	skleník
25 000,00 €	zařízení ventilace
90 000,00 €	spodní stavba
60 000,00 €	pojezdová dráha
125 000,00 €	vybavení STR linky (včetně vzduchotechniky)
10 000,00 €	doplňky (např. osvětlení)
40 000,00 €	dohled na montáž + uvedení do provozu
500 000,00 €	celkem (za 1 linku STR)
	volitelné vybavení
35 000,00 €	automatický podavač kalů
35 000,00 €	automatický sběr vysušených kalů
570 000,00 €	celkem (za 1 linku STR)
2 850 000,00 €	celkem (za 5 linek STR)
77 007 000 Kč	celkem (za 5 linek STR),(kurz dle ČNB 27,02 CZK)

Uvažované ceny jsou pouze orientační a navrhnuté na standardní stavbu. Dá se odhadovat, že výstavba v českých podmínkách by měla být levnější, především za výstavbu skleníků. Náklady by se daly dále snížit za předpokladu jisté úpravy (optimalizování) zadání. Tím by se dalo ušetřit na jedné lince (celkový počet linek by byl čtyři). Optimalizování by se dotklo zvýšení odvodnění na 25 % sušiny na vstupu. Pokud by se to ukázalo jako investičně náročné (či provozně nemožné), tak další variantou je snížení sušiny kalu na výstupu ze sušárny. A to buď přes celý rok, nebo jen v zimních, chladnějších měsících. Cena za čtyři linky by se pohybovala okolo 61 605 600 Kč. Spotřeba elektrické energie při provozu sušárny je minimální. Na provoz všech pěti linek byl odhadnut příkon cca. 40 – 50kW. Do této potřeby je započtena energie pro řízení provozu, ventilátory, šnekové dopravníky a pohon.

**Obr. 4-10 Solární sušárna HUBER v provozu**

Velkou výhodou nachází toto zařízení u ČOV, které nemají k dispozici odpadní teplo. Skutečnost, že slunce dokáže vyvinout tolik energie potřebné k odpaření vody z kalu ve speciálních sklenicích je známá a hlavně v Německu osvědčená věc. Ale i např. v Polsku byla zaznamenána velké poptávka právě po solárních sušárnách. Zařízení může pracovat v režimu s i bez vytápění. Pro ČOV Hodonín se i tato varianta jeví jako výhodná, protože se nachází v klimaticky teplém regionu. Hodonín drží národní rekord s průměrnou roční teplotou 9,5 °C. Také splňuje další základní požadavek pro vybudování solární sušárny a to je velký prostor. Z hlediska záboru zde platí přímá úměra, pro větší množství kalu je třeba větší sušárna, která zabere větší prostor. Umístění ČOV Hodonín mimo městskou zástavbu a v okolí nepříliš obdělávané zemědělské půdy je vhodné pro výstavbu velkého skleníku. Při dimenzování sušárny se zohledňuje pomalejší sušení v zimních měsících. To má za následek, že přes zimu je kalu sušeno méně a v létě více. Proto by se musel navrhnout takový zásobník kalu, který by dokázal pokrýt nerovnoměrné sušení. Systém se dá také zkombinovat s využitím přebytečného tepla pro vytápění, či využít tepla z odpadní vody. I v ČR bylo zpracováno několik studií, projektů a experimentů se solární sušárnou. Tyto většinou primitivní pokusy měli jasné výsledky se sušinou na výstupu přes 70 % (a to i při výkyvu teplot v letních měsících). Zařízení od firmy HUBER je ale mnohem sofistikovanější a díky řízení celého procesu zaručuje kvalitní výsledky po celý rok. Nutno však připomenout, že náklady na vybudování solární sušárny jsou větší, než na sušárnu pásovou. Oba provozy, ač jsou od sebe odlišné, musí mít pro vysušený kal využití.



Obr. 4-11 SWOT analýza solární sušárny HUBER

4.4. ELEKTRÁRNA HODONÍN

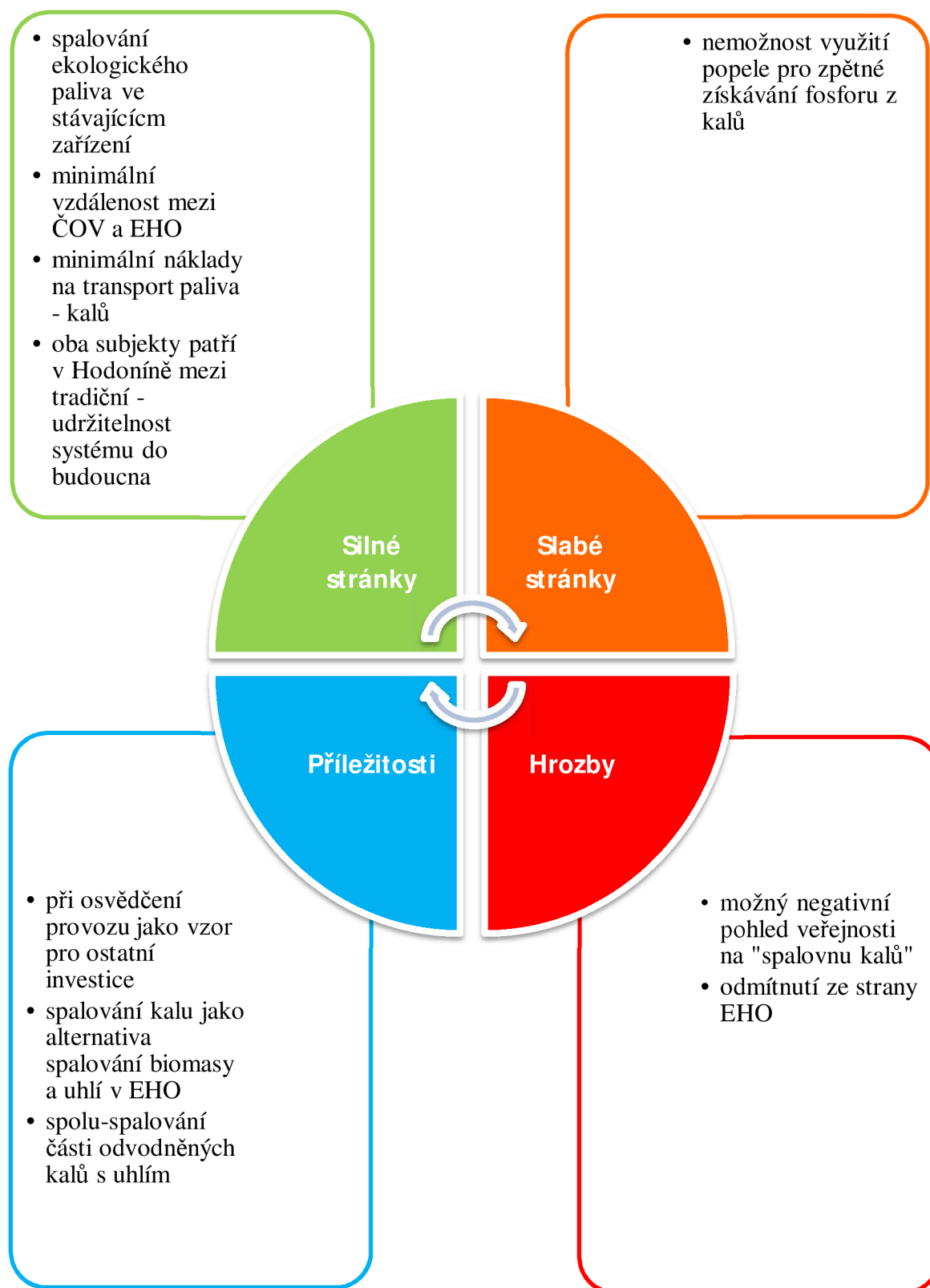
Elektrárna Hodonín se nabízí jako jedna možnost pro využití vysušeného kalu z ČOV Hodonín. Místní elektrárna byla uvedena do provozu v letech 1951 – 1957 a má instalovaný elektrický výkon 105 MW a tepelný výkon 250 MW tepla. Během svého působení prošla řadou rekonstrukcí a modernizací. V dnešní době se pyšní ekologickým provozem, protože se zde v jednom bloku spaluje čistě biomasa, ve druhém potom uhlí. Zařízení na spalování biomasy bylo uvedeno do provozu 31. prosince 2009 a denně si žádá 1 200 tun biomasy [61].

Vzdušná vzdálenost mezi ČOV Hodonín a EHO je necelých 650 m. Díky modernímu čištění spalin EHO, trendu OZE a výrobě „zelené energie“ z netradičních paliv, se jeví jako ideální budoucí spolupráce těchto dvou subjektů. Vysušené kalů z ČOV dosahují výhřevnosti hnědého uhlí. Výsledkem by mohlo být, sušení kalů na ČOV a následný transport do elektrárny, kde by docházelo ke spolu-spalování. V současné době se za likvidaci kalů platí poplatek, ovšem při této vzájemné symbióze, by mohl být dodáván vysušený kal „za korunu“ do elektrárny, která ušetří náklady na nákupu biomasy. Mohl by vzniknout unikátní systém, plně udržitelný do budoucna, který je šetrný k životnímu prostředí.



Obr. 4-12 Vzdálenost ČOV a EHO

Výhoda této varianty spočívá především v odbytu kalů do elektrárny, která se nachází v těsné blízkosti ČOV Hodonín. Elektrárna, která funguje více než půl století v Hodoníně má navíc po její modernizaci účinný systém čištění spalin. Navíc spalování OZE je v posledních letech nejen trendem, ale nutno připomenout, že se Česká republika zavázala k využívání ekologických zdrojů Evropské radě. Pro ČR bylo původně stanoveno minimální využití OZE podílem 13 %. Poslední úprava Národního akčního plánu ze srpna 2012 navrhuje podíl OZE na hrubé konečné spotřebě energie na 14 %. Takovéto projekty by mohli přispět k navýšení podílu výroby energie z obnovitelných zdrojů. Ze zkušeností ze zahraničí je jasné, že spalování kalů sebou nese pouze pozitiva. Navíc se dá dosáhnout i na dotace, které činí 50 Kč za GJ vyrobené „zelené“ energie.



Obr. 4-13 SWOT analýza pro spalování kalů v EHO

4.5. VYUŽÍ KALŮ NA ZEMĚDĚLSKÉ PŮDĚ

Nejen v oblasti kolem Hodonína, ale v celé České republice je zaznamenán úbytek organické hmoty z půdy. Úbytku organiky se docílilo nevhodným způsobem hospodaření (řádkové plodiny). Déle pak nevhodnou aplikací dusíkatých hnojiv, které měly za následek rychlou mineralizaci půdy. Intenzifikace vápnění či aplikování pesticidů, či herbicidů. Všechny tyto důvody a mnoho dalších má za následek erozi půdy [67].

Tab. 4-14 Bilance orné půdy v ČR dle ČSÚ, v tis. ha

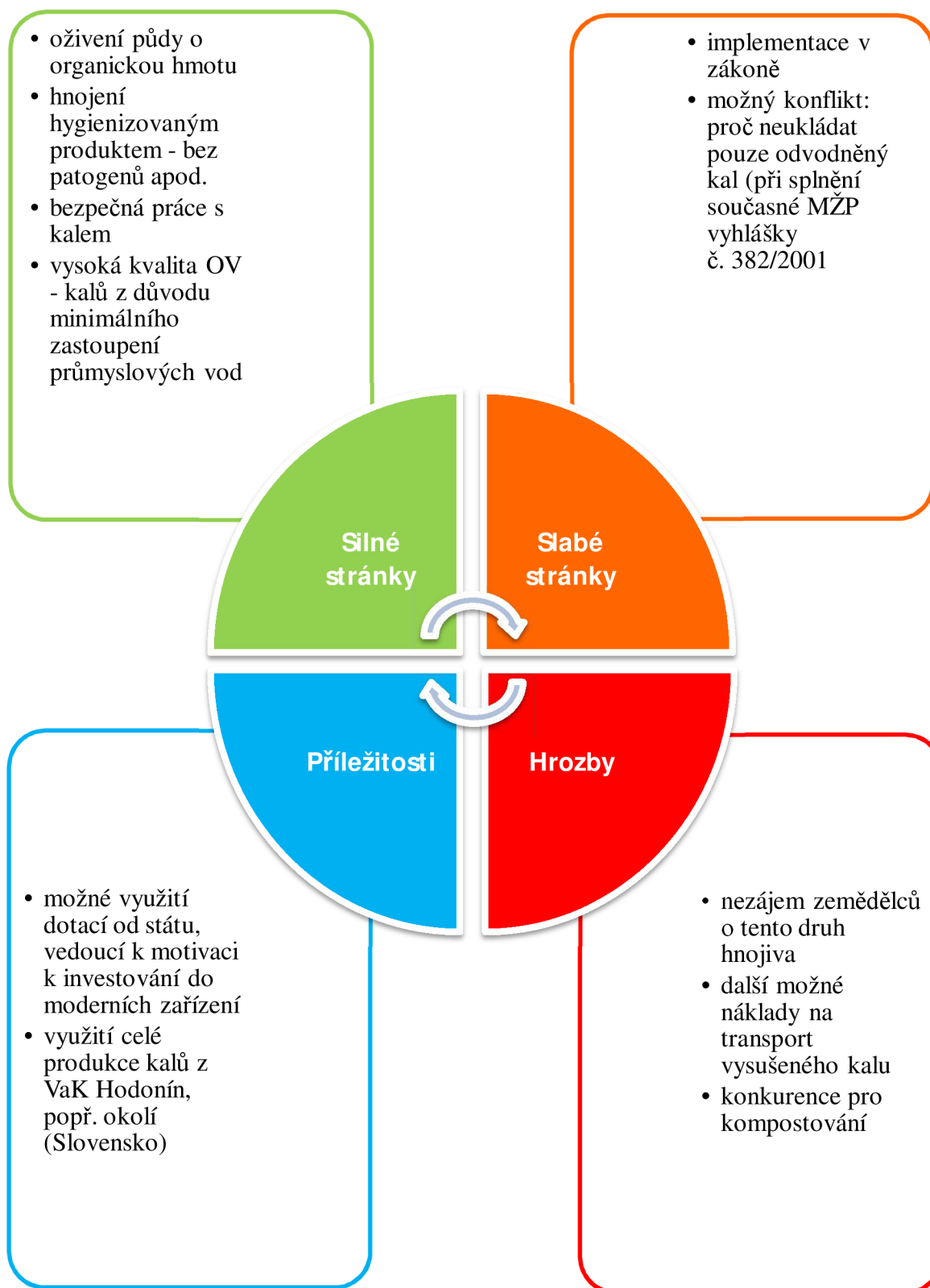
	2005	2010	2011	2012	2013	2014
Zemědělská půda	4 259	4 234	4 229	4 224	4 220	4 216

Aplikování čistírenských kalů na ornou půdu jako hnojivo bohaté hlavně na dusík a fosfor se jeví jako přírodě blízká alternativa hnojení. Jednalo by se samozřejmě o kal vysušený a hygienizovaný. Při aplikování je nutno dodržovat vyhlášku Ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Výpočet byl proveden na základě sušící zkoušky kalu, proto je nutné brát hodnoty pouze jako orientační. Množství vysušeného kalu a objemová hmotnost byla předpokládána na sušinu cca 85 %.

Tab. 4-15 Orientační množství kalu k aplikaci na půdu

množství vysušeného kalu	5 500,00	t
objemová hmotnost	250,00	kg.m ⁻³
objem kalu	22 000,00	m ³
ložná vrstva kalu	0,05	m
hnojená plocha	44,00	ha

Využití zpracovaného kalu na zemědělskou půdu se jeví jako racionální varianta pro nakládání s biologickým kalem. Živiny obsažené v čistírenských kalech jsou bohatým zdrojem živin pro půdu a pro celkové zlepšení půdy v regionu. Navíc se jedná o odvětví, které je na Hodonínsko hojně zastoupeno (a zbytku jižní Moravy). Půda zde dlouhodobě trpí na nedostatek živin, je přetěžována (řepka, kukuřice) a trpí erozí. Tento způsob nakládání s kaly má své kořeny dlouho v historii a dávkováním hygieizovaného kalu se navíc minimalizuje negativní dopad na životní prostředí, dále selepší a usnadní manipulace s kalem (bez obsahu bakterií, virů, patogenů, apod.). Celkově se tento způsob jeví jako šetrný k životnímu prostředí.



Obr. 4-14 SWOT analýza využití kalů na zemědělské půdě

5. ZÁVĚR

Dá se říci, že finální nakládání s čistírenským kalem nemá v ČR zatím jasné cíle. Podle statistiky stále převládá kompostování a přímá aplikace na půdu. Jde dobře vidět, že se postupně upouští od skládkování kalů. Výraznou změnu v trendu by mohla ovlivnit nová legislativa. Zpřísnující se pravidla a výrazné zdražení za neekologické nakládání s kalem, by mohlo mít za následek nátlak na provozovatele ČOV, za důsledkem zkvalitnění nakládání s čistírenským kalem. Dále je nutno připomenout, že Česká republika jako členský stát Evropské unie, musí respektovat nakládání s odpadem a osvojit si politiku EU. Ta se zaměřuje hlavně na předcházení vzniku odpadu, který je na vrcholu odpadové pyramidy. Dále se zaměřuje na opětovné využití a energetické využití. Na posledním místě je skládkování. Příklady bychom si měli brát ze zahraničí, realizovaných projektů u nás a studií, které byly laboratorně, nebo provozně odzkoušeny.

Termické nakládání s kalem se jeví jako neoptimálnější v případě získávání zelené energie. S nadsázkou se dá říci, že zdroje kalů z odpadní vody jsou nevyčerpatelné. Také jejich získávání může být snadnější, než získávání fosilních paliv. Spalování, či spolu-spalování ve stávajících zařízeních je zvláště výhodné všude tam, kde by došlo pouze k malým stavebním úpravám spalovny, či elektrárny. Při této myšlence, je nutno pomýšlet na soz kalů, zásobník a dopravu do spalovacího prostoru. Nejprve je důležité ověřit spalitelnost kalů a čištění spalin, ideálně provozními zkouškami. Tato symbióza ČOV – elektrárna (či jiné zařízení určené ke spalování) může být vhodná i pro sušení kalů odpadním teplem ze spalování. Vhodná by byla všude tam, kde by bylo výhodné svázat kaly k sušení z malých vzdáleností. Pro větší ČOV se jeví jako možná varianta vlastní spalovna kalů. Provozovatelé by si tak zajišťovali celé nakládání s kaly. Jedná se o investičně nejvyšší možnost, ale návratnost spojená s energetickou soběstačností může být pro velké provozovatele lákavá. Velké úspory se při této variantě dosahuje i ve spojení s náklady na likvidaci kalů. Jestliže by ČOV s vlastní spalovnou neplatila žádný poplatek za likvidaci 1 tuny kalu, tak v konečném důsledku by se dala doba návratnosti výrazně zkrátit. Dále fakt, že by spalovna produkovala vlastní teplo na sušení, více elektrické energie díky mikroturbíně a generátoru (či jiného zařízení na přeměnu tepelné energie na elektrickou) dává zcela jiný pohled na tento systém. Energetická soběstačnost systému a celé ČOV, dotace od státu spojené za výrobu zelené energie, trend a možnost vlastnit moderní zařízení může ovlivnit rozhodování provozovatelů ČOV. Inspirující může být i možnost zpětného získávání fosforu z popele, který zbyde po spálení kalu. Zásoby fosforu se tenčí a jeho cena vzrůstá. Proto se hledají cesty, jak tento prvek recyklovat a zpětně využívat.

Dále jsou zde zařízení, které byly ověřeny převážně laboratorně a nyní dostávají prostor především jako pilotní jednotky a pilotní projekty. Řeč je o zařízení na pyrolýzu kalů. Tento druh zpracování ukázal, že zpracovaný kal pyrolýzou může najít další využití. A to především biochar a část, která se dá energeticky využít tj. pyrolyzní plyn a olej. Tento moderní způsob využití (nejen čistírenských kalů) je velice efektivní. Testy probíhaly na několik variant, např. rychlá a pomalá pyrolýza, která se liší průběhem teplot a doby působení. Dále pak mikrovlnná pyrolýza, která využívá k vyvolání potřebného tepla mikrovlny. Výsledkem experimentování byly různé poměry získání oleje, plynu a charu. Také složení těchto prvků se značně lišilo. Systém se jeví jako velice efektivní a očekává se, že v blízké době bude pyrolýza čistírenských kalů aplikována na ČOV.

Ať už se jedná o jakýkoliv způsob termického využití kalů, mají vždy společné, že je jedná o způsoby likvidace spojené s energetickým využitím a redukcí objemu kalů. Oba tyto jevy jsou přínosné pro člověka (zisk) i pro životní prostředí (výroba energie z OZE, redukce skládek).

Podmětem pro praktickou část diplomové práce, byla spolupráce s VaK Hodonín na řešení kalové koncovky na tamější ČOV. Provozovatelé chtěli nastínit možné varianty sušení kalů a možnosti nakládání s vysušeným kalem. Na téhle myšlence vznikla i spolupráce s firmou HUBER, která se danou problematikou zabývá. Dá se říci, že navrhovaná řešení a jejich interpretace má za úkol usnadnit rozhodování do jaké technologie zainvestovat.

Nejprve bylo nutné ověřit jak se kal z tamější ČOV chová při sušení. Byly odebrány vzorky kalu, které byly následně poslány do Německa do laboratoře firmy HUBER. Testy ukázaly, že se kal chová normálně při sušení a je možné jej bez problému sušit. Byly také stanoveny jeho další vlastnosti. Následně se vybíralo z možností jak čistírenské kaly vysoušet. Následovala série dotazníků na provozovatele ČOV, kde byly zjišťovány základní údaje a požadavky pro sestavení nabídky. Byly vybrány tři hlavní. První dvě na sušení pomocí pásové sušárny HUBER BT s rozdílnou výstupní sušinou kalů a druhá pak na solární sušení. I když se solární sušení jeví jako progresivní metoda, která nepotřebuje externí zdroj tepla, neoptimálnější nakonec vyšla varianta s pásovou sušárnou BT a výstupní sušinou 65 %. A to hlavně díky nižší pořizovací ceně a faktu, že ČOV má přebytky tepla, které mohou být využity právě pro sušení. Je to právě odpadní teplo vzniklé při spalování bioplynu v kogeneračních jednotkách. V budoucnu se na ČOV Hodonín uvažuje s dalším přírůstkem bioplynu a tedy větší produkce tepla a vyšší výroba elektrické energie. V další části byly popsány varianty co s vysušeným kalem. Pakliže dojde na sušení, musí se najít vhodný odběratel. Nejlepší varianta je spalování vysušeného kalu v místní elektrárně Hodonín. Ta je v Hodoníně v provozu přes půl století a v současné době spaluje uhlí a biomasu. Také se svozem by nebyl problém, protože se nachází v bezprostřední blízkosti ČOV. Nicméně záleží na jednatelích obou společností, jak se dohodnou. Další variantou je aplikace vysušeného kalu na zemědělskou půdu. Okolní zemina trpí nedostatkem organiky, i tato varianta je zajímavá. V současné době probíhají jednání o možnosti tohoto využití. Tyto dvě finální varianty byly vybrána na základě předchozích jednání. Vycházelo se z reálných předpokladů a uskutečnitelných možností, jak reálně nakládat s kaly.

Výsledkem práce je návrh řešení kalové koncovky na ČOV Hodonín. V následujících letech se předpokládá výrazná změna v hospodaření s kaly, jejich využití či likvidace. Důsledkem by měl být rozmach i v oblasti sušení kalů s následným energetickým, či jiným využitím.

6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT: Renewable Energy Road Map Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future.* In: . Brussels: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2007, COM(2006) 848 final.
- [2] *Gough, M. A., Rhead, M. M., Rowland, S. J.: Biodegradation studies of unsolved complex mixtures of hydrocarbons. Org.Geochem., 18,1992, 1, s.17-22.*
- [3] Zákon č. 185/2001 Sb. ze dne 15. května 2001, o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: Sbírka zákonů. Dostupné z <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [4] Diaz, L.F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W., Stentiford, E.: *Compost science and technology. Waste management series 8.* Elsevier. 2007, Amsterdam, The Netherlands. p. 364.
- [5] Matějů, L., Zimová, M.: *Hodnocení technologií zpracovávajících bioodpad na základě mikrobiologických rozborů. APROCHEM 2008 – Odpadové fórum 2008 16. -18. 4. 2008, s. 3168 - 3171.*
- [6] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN, Petr PRAX, Petr HLUŠTÍK a Radim MIFEK. *Stokování a čištění odpadních vod: Modul 2 Čištění odpadních vod.* Brno, 2006.
- [7] ČSN P CEN/TS 13714. *Charakterizace kalů - Nakládání s kaly ve vztahu k jejich využití nebo odstraňování.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [8] Wherter J., Ogada T., *Sewage Sludge Combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, vol. 25, pp. 55 – 116*
- [9] Dirkzwager A. H., Hermite P.: *Sewage Sludge Treatment and Use – New Developments, Technological Aspects and Environmental effects, Elsevier Applied Science, Great Britain, 1989*
- [10] *Výhřevnosti paliv. TZB info [online]. [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>*
- [11] HARTIG, Karel. *Zpřísnující se legislativa způsobí, že kaly bude stále horší uplatnit na půdu či k rekultivacím. Budou se tedy energeticky využívat.* Waste to Energy 2014. www.allforpower.cz, 2014.
- [12] Wherter J., Ogada T., *Sewage Sludge Combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, vol. 25, pp. 55 – 116*
- [13] *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024.* In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2014.
- [14] Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., Dewil, R., 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog. Energy Combust. Sci.* 34, 755–781.
- [15] Climent, M., Ferrer, I., Baeza, M.D., Artola, A., Vazquez, F., Font, X., 2007. Effects of thermal and mechanical pre-treatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chem. Eng. J.* 133, 335–342.

- [16] Valo, A., Carrère, H., Delgenès, J., 2004. Thermal, chemical and thermo-chemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 79, 1197–1203.
- [17] Wilson, C.A., Novak, J.T., 2009. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment. *Water Res.* 43, 4489–4498.
- [18] Gavala, H., Yenal, U., Skiadas, I., Westermann, P., Ahring, B., 2003. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Res.* 37, 4561–4572.
- [19] APPELS, Lise, Jan DEGRÈVE, Bart VAN DER BRUGGEN, Jan VAN IMPE a Raf DEWIL. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 2010.
- [20] Hartig K., Fluidní spalování kalů, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [21] Neubrand K., Spalování čistírenských kalů v tepelných elektrárnách, používající jako palivo hnědé uhlí, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [22] Hartig K., Současná a blízká budoucnost v spalování kalů z čistíren odpadních vod, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [23] Divecká H., Valentová Z., Ovlivnění provozních nákladů spoluspalování kalů jeho dopravou do teplárny/ elektrárny, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [24] Kutil J., Prospěch L., Spoluspalování čistírenských kalů v elektrárně a cementárně, Konference kaly a odpady 2004, Ústav vedecko-technických informací pro půdohospodárstvo Nitra, 2004
- [25] European Commission, DG Environment, Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge, Part 3 – Scientific and technical Report, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001
- [26] Wherter J., Ogada T., Sewage Sludge Combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, vol. 25, pp. 55 – 116
- [27] Fa Integral., Preparation of Sewage Sludge and Combustion Plants for energetic purpose (FWW-Wien), konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [28] THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J. a Stephanie THIEL. Waste Management-Recycling and Recovery. vol.3. Neuruppin, 2012. ISBN 978-3-935317-83-2.
- [29] The European IPPC Bureau, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, 2006.
- [30] BORÁŇ, Jaroslav. Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím: zkrácená verze Ph.D. Thesis. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-214-36-7.
- [31] Využití odpadních kalů. [homen.vsb.cz](http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/vyuziti.html). [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/vyuziti.html>.

- [32] Veverka Z., Alternativní paliva v cementárnách, Odpadové fórum, 2004, roč. 5, č. 10, s. 8 – 11
- [33] Svaz švýcarských cementáren, Kennzahlen 2007, [cit. 2008], dostupné na internetových stránkách:
http://www.cemsuisse.ch/index.html?&page_id=51&node=13&level=2&l=2
- [34] WERTHER, J. a T. OGADA. *Sewage sludge combustion*. a Technical University of Hamburg-Harburg, Chemical Engineering I, Denickestrasse 15, 21071 Hamburg, Germany, 1997.
- [35] Company Information Booklet-Mannesmann Demag Energie-und Umwelttechnik.
- [36] Boon A, Thomas V. Resource or rubbish? The Chemical Engineer 1996:25–30.
- [37] Kaminsky W, Augustin T, Bellmann U, Kru'ger-Betz M. Pyrolyse industrieller und kommunaler Kla'rschla'mme [Pyrolysis of industrial and municipal sewage sludges]. In: Recycling von Kla'rschlamm 1. Berlin: EF fu'r Energie-und Umwelttechnik GmbH, 1987:309–316.
- [38] Caballero JA, Front R, Marcilla A, Conesa JA. Characterisation of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. J Anal and Applied Pyrolysis 1997;4041:433–450.
- [39] Loll U. Kla'rschlamm [Sewage sludge]. In: ATV Handbuch, 4th edn. Berlin: Ernst and Sohn, 1996.
- [40] WERTHER, J. a T. OGADA. *Sewage sludge combustion*. Progress in Energy and Combustion Science. 1999.
- [41] Lungwitz H. Thermische Behandlung von Kla'rschlamm, Neue Trends bei der Behandlung und Entsorgung kommunaler und industrieller Kla'rschla'mme [Thermal treatment of sewage sludge—new trends for the treatment and disposal of industrial and municipal sludges]. Darmstadt: Schrifreihe WAR, 1997.
- [42] Industriepark Schwarze Pumpe. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Industriepark_Schwarze_Pumpe
- [43] Company Information Booklet—Noell Conversion Process Noell, Germany.
- [44] Company Information Booklet—Schwel-Brenn Process-Siemens, Germany.
- [45] L. Shen, D. Zhang, Fuel 82 (2003) 465.
- [46] MENÉNDEZ, J.A., A. DOMÍNGUEZ, M. INGUANZO a J.J. PIS. *Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification (MWDPG) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue*. Spain, 2005.
- [47] *Layman Report: sludge2energy A way to energy self-sufficient sewage treatment plants* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: http://www.hubercs.cz/fileadmin/02_solutions/09_Schlammbehandlung/08_Schlammverbrennung_Thermische_Verwertung/pro_s2e_laymann_en.pdf
- [48] *Sludge2energy: Využití čistírenských kalů* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: http://www.hubercs.cz/fileadmin/huber-cs/PDF/pro_sludge2energy_cz.pdf
- [49] *Pásová sušárna čistírenských kalů HUBER BT* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.hubercs.cz/cz/reseni/uprava-kalu/suseni/suseni-za-strednich-teplot.html>

- [50] HASAL, P., et al. Chemické inženýrství I. 2. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2007. 350 s. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [51] *Largest solar sewage sludge drying site in Southern Germany fully equipped by HUBER* [online]. [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.hubercs.cz/cz/meta-navigation/huber-report/ablage-berichte/sludge-treatment/largest-solar-sewage-sludge-drying-site-in-southern-germany-fully-equipped-by-huber.html?popup=1>
- [52] CAO, Ye Shi. Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants. London: IWA Publishing, 2011. ISBN 1843393824.
- [53] STOWA (2010). NEWs: The Dutch Roadmap for the WWTP of 2030. Utrecht, The Netherlands.
- [54] Keller, J. (2008). Wastewater-Energy Conversion Options, IWA Leading-Edge Conference, 2-4 June 2008, Zurich.
- [55] GWCR (2008). State of Science Report: Energy and Resource Recovery from Sludge.
- [56] Reinhardt, G. and Fillmore, L. (2009). Energy Opportunities in Wastewater and Biosolids.
- [57] Johnson, T., Scanlan, P. A., Yurtsever, D. and Kuchenrither, R. D. State of Practice: Biosolids Energy and Resource Recovery, Water Convention, SIWW09, 23-26 June 2009 Singapore.
- [58] EPA 2007. Opportunities for and Benefits of Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities
- [59] Wett, B., Buchauer, K. and Fimml, C. (2007a). Energy Self-Sufficiency as a Feasible Concept for Wastewater Treatment Systems, Leading-Edge Conference, 4-6 June 2007, Singapore.
- [60] *Výroční zpráva 2014* [online]. [cit. 2015-12-22]. Dostupné z: <http://www.vak-hod.cz/vak/spolecnost/vyrocnizpravy/Vyrocnizprava2014.pdf>
- [61] Elektrárna Hodonín [online]. [cit. 2015-12-22]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/hodonin.html#!>
- [62] *Requirements for the dewatered sludge*. HUBER, (09.01.2014).
- [63] *Simmeringer Haide waste incineration plant* [online]. [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <http://www.wienenergie.at/eportal2/ep/channelView.do/pageTypeId/72164/channelId/-51716>
- [64] RONALD, J., P. MATTHEWS a P.R. RICHARD. Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management [online]. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2008 [cit. 2013-03-30]. ISBN 978-92-1-132009-1. Dostupné z: http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf.
- [65] *Sewage sludge management in Germany* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/sewage_sludge_management_in_germany.pdf
- [66] WERTHER, Joachim. Sustainable and energy-efficient utilization of biomass by co-combustion in large-scale power stations. [Http://ser.cienve.org.tw](http://ser.cienve.org.tw) [online]. 2009 [cit.2015-12-28]. Dostupné z: http://ser.cienve.org.tw/download/19-3/jeeam19-3_135-144.pdf.

- [67] *Úbytek organické hmoty* [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.ochrana-pudy.cz/hrozby-pro-pudu/ubytok-organicke-hmoty/ubytok-organicke-hmoty/2014/09/06/>
- [68] *Solar insolation* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.grida.no/graphicslib/detail/solar-insolation_83d8#

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě [8].....	6
Tab. 2-2 Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě [8]	6
Tab. 2-3 Základní charakteristika kalu [19].....	11
Tab. 2-4 Koncentrace a degradace org. složek neupraveného a upraveného kalu [19]	11
Tab. 2-5 Množství čistírenských kalů spálených v cementárnách, Německo [65]	13
Tab. 2-6 BSK ₅ a CHSK čistírenského kalu a zbytku z pyrolýzy [45].....	17
Tab. 4-1 Výroba el. energie z OZE [60].....	31
Tab. 4-2 Hodnoty sušiny kalu v procentech	32
Tab. 4-3 Sušina a ztráta žíháním	35
Tab. 4-4 Vlastnosti kalu před a po sušícím pokusu.....	36
Tab. 4-5 Vstupní data pro návrh pásové sušárny HUBER	38
Tab. 4-6 Návrh sušárny HUBER BT pro výstupní sušinu 65 %.....	39
Tab. 4-7 Návrh sušárny HUBER BT pro výstupní sušinu 90 %.....	40
Tab. 4-8 Výpočet návratnosti investice do pásové sušárny BT	43
Tab. 4-9 Vstupní data pro návrh solární sušárny HUBER	46
Tab. 4-10 Sušení kalů solární sušárnou HUBER	47
Tab. 4-11 Spotřeba energie – solární sušárna bez vytápění.....	48
Tab. 4-12 Spotřeba energie – solární sušárna s podlahovým vytápěním	48
Tab. 4-13 Návrh ceny za solární sušárnu.....	48
Tab. 4-14 Bilance orné půdy v ČR dle ČSÚ, v tis. ha.....	53
Tab. 4-15 Orientační množství kalu k aplikaci na půdu.....	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Obecný postup zpracování kalů [6].....	5
Obr. 2-2 Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění.....	5
Obr. 2-3 Srovnání výhřevnosti paliv [10].....	8
Obr. 2-4 Způsoby termického zpracování kalů [12]	8
Obr. 2-5 Schéma spolu-spalování čistírenského kalů v elektrárnách.....	12
Obr. 2-6 Schéma fluidní pece [30]	14
Obr. 2-7 Schéma etážové pece [31].....	15
Obr. 2-8 Systém VerTech [36].....	16
Obr. 2-9 Mikrofotografie pevného zbytku po pyrolýze (Vef) a mikrovlnné pyrolýze (Vnw) [45]	17
Obr. 2-10 Schéma systému Noell [40]	18
Obr. 2-11 Schéma systému SSB [40]	18
Obr. 2-12 Blokové schéma systému sludge2energy [47]	19
Obr. 2-13 Využití energie v procesu sludge2energy [47].....	20
Obr. 2-14 Schéma ČOV Straubing [48]	21
Obr. 2-15 Schéma diskové sušárny [50].....	22
Obr. 2-16 Schéma rotační bubnové sušárny [50].....	23
Obr. 2-17 Schéma fluidní sušárny [50]	23
Obr. 2-18 Pásová sušárna HUREB BT a vysušený kal [49].....	24
Obr. 2-19 Sluneční zařízení v Evropě [68].....	25
Obr. 2-20 Počet zařízení na sušení kalů v Německu [65].....	25
Obr. 2-21 Počet solárních sušáren v provozu v Polsku	26
Obr. 2-22 Seznam elektráren pro spolu-spalování kalu v Německu [66].....	27
Obr. 2-23 Elektrárna Berrenrath [65]	27
Obr. 2-24 Elektrárna Hemweg 8	28
Obr. 3-1 Spotřeba energie pro různé velikosti a postupy na ČOV [52]	29
Obr. 4-1 Snímek areálu ČOV Hodonín [60].....	32
Obr. 4-2 Měsíční data průměrné venkovní teploty dle ČHMÚ pro rok 2015, stanice Strážnice	33
Obr. 4-3 Kruhový zahušťovač kalu HUBER RoS 2S na ČOV Hodonín	34
Obr. 4-4 Odběr vzorku kalu	34
Obr. 4-5 Peletizovaný vzorek kalu	35
Obr. 4-6 Ztráta vlhkosti při sušení (165 min)	35
Obr. 4-7 Pohled na vysušený vzorek kalu po 165 min.....	36

Obr. 4-8 SWOT analýza sušárny HUBER BT	45
Obr. 4-9 Zábory plochy pro solární sušárnu	47
Obr. 4-10 Solární sušárna HUBER v provozu	48
Obr. 4-11 SWOT analýza solární sušárny HUBER	50
Obr. 4-12 Vzdálenost ČOV a EHO	51
Obr. 4-13 SWOT analýza pro spalování kalů v EHO	52
Obr. 4-14 SWOT analýza využití kalů na zemědělské půdě	54

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČOV	čistírna odpadních vod
OV	odpadní voda
EO	ekvivalentní obyvatel
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
BSK ₅	biochemická spotřeba kyslíku (5 dnů)
OZE	Obnovitelné zdroje energie
EHO	Elektrárna Hodonín
AOX	Halogenované organické sloučeniny
PCB	Polychlorované bifenyly
NEL	Nepolární extrahovatelné látky
MZE	Ministerstvo zemědělství
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
EU	Evropská unie
PCDD/F	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF)
ČSÚ	Český statistický úřad

SEZNAM PŘÍLOH

1. ČOV Straubing, Německo
2. ČOV Vilnius, Litva
3. ČOV Panevežys, Litva
4. ČOV Shenzhen, Čína
5. ČOV Żagań, Polsko
6. ČOV Końskie, Polsko

1. ČOV Straubing, Německo



typ sušárny:	BT+ 2-2
v provozu od:	leden 2012
kapacita:	10 000 t.rok ⁻¹
odpar vody:	900 kg.hod ⁻¹
sušina na výstupu:	70 %
zdroj energie:	odpadní teplo ze spalování kalů (T=140 °C)

2. ČOV Vilnius, Litva



typ sušárny:	2x BT+ 4-4
v provozu od:	březen 2012
kapacita:	47 000 t.rok ⁻¹
odpar vody:	2x 2 000 kg.hod ⁻¹
sušina na výstupu:	90 %
zdroj energie:	odpadní teplo z kogenerace (T=90 °C)

3. ČOV Panevežys, Litva



typ sušárny:	BT+ 3,5-2
v provozu od:	listopad 2013
kapacita:	14 560 t.rok ⁻¹
odpar vody:	1 500 kg.hod ⁻¹
sušina na výstupu:	90 %
zdroj energie:	odpadní teplo z kogenerace (T=90 °C)

4. ČOV Shenzhen, Čína



typ sušárny:	4x BT+ 5-4
v provozu od:	leden 2010
kapacita:	138 000 t.rok ⁻¹
odpar vody:	4x 3 000 kg.hod ⁻¹
sušina na výstupu:	70 %
zdroj energie:	odpadní teplo z elektrárny (T=105 °C)

5. ČOV Żagań, Polsko



typ sušárny:	3x SRT 11
plocha sušárny:	1 411,80 m ² , 1 411,80 m ² , 1 310,80 m ²
v provozu od:	srpen 2012
kapacita:	5 111 t.rok ⁻¹
sušina na výstupu:	60 %
rozměry skleníků:	12m x 125m, 12m x 125m, 12m x 116m

6. ČOV Końskie, Polsko



typ sušárny:	2x SRT 11
plocha sušárny:	1 430 m ² , 1 430 m ²
v provozu od:	prosinec 2014
kapacita:	2 570 t.rok ⁻¹
sušina na výstupu:	80 %
rozměry skleníků:	12m x 152m, 12m x 152m

SUMMARY

Thermal treatment of sludge appears as optimal in the case of obtaining green energy. Such acquisition may be easier than getting fossil fuels. Incineration or co-firing in existing plants is particularly advantageous everywhere where there would be only minor structural modifications incinerators or power plants. Symbiosis WWTP - power (or other equipment intended for combustion) may be suitable for drying sludge waste heat from combustion. There are also devices that have been tested mainly in the laboratory and are now receiving space primarily as a pilot unit and pilot projects. We are talking about the device for the pyrolysis of sewage sludge. This kind of treatment showed that the treated sludge pyrolysis can find another use. A particularly biochar and the part that can be utilized energetically i.e. gas and pyrolysis oil. The modern way of utilization (not only sewage sludge) is very effective. Tests conducted on several variants, e.g. fast and slow pyrolysis that is different temperature and time of action. Furthermore, microwave pyrolysis, which used to retrieve required heat microwaves. The result of experimentation, various ratios gave an oil, gas, and char. The composition of these elements varies considerably. The system appears to be very effective and it is expected that in the near future will pyrolysis of sewage sludge applied to the wastewater treatment plant. Whether it is any method of thermal sludge utilization, they always have in common is that it is a means of destruction associated with energy recovery and reducing the volume of sludge. Both are beneficial to humans and the environment.

Give cause for the practical part of the thesis was working with VaK Hodonín to deal with sludge ends at the local sewage treatment plant. Operators want to outline possible options for sludge drying and the possibility of dealing with the dried sludge. On this idea was also collaboration with HUBER, which is given subject. It can say that the proposed solutions and their interpretation is designed to facilitate decision-making in which technologies to invest.

First, it was necessary to ascertain how the sludge from the local sewage treatment plant behavior during drying. Sludge samples were taken, which were then sent to Germany, to the laboratory of the company HUBER. Tests have shown that the sludge behaves normally when dried and can be dried without any problems. They were also determined its other properties. Subsequently, the selection of the ways of sewage sludge to dry. It was chosen the best option for drying and discussed several options for disposal of sludge.

The result is a proposed solution to the wastewater treatment plant sludge ends Hodonín. The objective was to outline the possibilities of sludge and facilitate the subsequent making an investment decision. In the following years it assumed a significant change in the management of sludge and its use or disposal. The result should be the range and in the drying of sludge, followed by energy, or other use.