

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

## EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

EFFICIENT TREATMENT OF SEWAGE SLUDGE

DISERTAČNÍ PRÁCE  
PHD THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ING. LUCIE HOUDKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. JAROSLAV JÍCHA, CSc.

BRNO 2009



## Abstrakt

Disertační práce se věnuje problematice zpracování kalů z čistíren odpadních vod se zaměřením na výběr efektivního způsobu využití kalů z Ústřední čistírny odpadních vod v Praze. Jedná se o problematiku vysoce aktuální vzhledem k připravované rekonstrukci čistírny.

Disertační práce je řešena formou případové studie vybraných variant kalového hospodářství. Varianty kalového hospodářství byly voleny na základě rešerše používaných technologií s přihlédnutím k legislativním požadavkům a specifickým podmínkám zmíněné čistírny. Při výběru bylo nutné zohlednit zejména produkci kalu, která bude po rekonstrukci 156 t sušiny směsného surového kalu za den.

V rámci disertační práce byly posuzovány možnosti kompostování a spalování anaerobně stabilizovaného kalu a spalování směsného surového kalu. Při spalování anaerobně stabilizovaného kalu byly navíc posouzeny dvě lokality pro realizaci spalovny (Drasty a ZEVO Malešice). Pro vybrané varianty byly vyčísleny materiálové a ekonomické bilance, na základě kterých bylo provedeno ekonomické posouzení. Ekonomické posouzení zahrnuje investiční náklady a rovněž zjednodušené provozní náklady.

Na základě výše jmenovaného byla jako vhodná vybrána dvě řešení. Prvním je anaerobní stabilizace kalu s následným kompostováním. Nespornou výhodou této varianty jsou nejmenší investiční a provozní náklady. Nevýhodou je pak velké množství produkovaného kompostu a rovněž možnost nevyhovujících parametrů kalu (zejména při zpřísnění legislativy). Druhým doporučeným řešením je spalování anaerobně stabilizovaného kalu ve spalovně vybudované v Drastech (tedy spalovna je součástí kalového hospodářství). Nevýhodou této varianty jsou vysoké investiční a provozní náklady, na druhou stranu však finální zpracování kalu není ovlivněno jeho kvalitou (resp. obsahem rizikových látek). Pro výběr finálního řešení kalového hospodářství byl navržen postup vyjádřený formou rozhodovacího diagramu.

## Klíčová slova

Anaerobní stabilizace, čistírenský kal, čistírna odpadních vod, energetické bilance, kogenerace, materiálová bilance, spalování, sušení.

## **Abstract**

This thesis deals with the issue of sewage sludge treatment and focuses on effective utilization of sewage sludge coming from Central Waste Water Treatment Plant in Prague, Czech Rep. It is a highly pressing issue as the plant is about to undergo a major reconstruction.

The thesis is presented as a case study for several options of sludge management. These options originate in research of used technologies in addition to legislation requirements and specific demands of the above mentioned waste water treatment plant. One of the key factors in choosing effective options was a tentative sludge production which is estimated at 156 t of dry matter of mixed raw sludge per day.

The thesis compares possibilities of digested sludge composting and incineration and also possibilities of incineration of mixed raw sludge. Moreover, incineration of digested sludge enabled evaluation of two areas for the potential location of incineration plant (Drasty and ZEVO Malešice). Mass and heat balances were carried out for the options preferred and they served as a basis for economic evaluation. This involves financial costs as well as simplified operational costs.

In the end, two methods were chosen based on the previously mentioned facts. Anaerobic stabilization with consequent composting is one of them. One of the biggest advantages is its lowest financial and operational costs. On the other hand though, the amount of produced compost is enormous and sludge parameters are not likely to meet potential legislation restrictions. One of the other methods is incineration of digested sludge in Drasty Incineration Plant (i.e. incineration plant is part of the sludge management). High financial and operational costs are among the drawbacks; however quality of the sludge (i.e. amount of hazardous components) does not affect its final processing though. Procedure in the form of decisive diagram was designed in order to choose the final sludge management solution.

## **Key words**

Anaerobic digestion, cogeneration, drying, heat balance, incineration, mass balance, sewage sludge, wastewater treatment plant.

**Bibliografická citace**

Houdková, L. *Efektivní využití čistírenských kalů*. Brno, 2009. 104 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala.

V Brně dne 6. dubna 2009

.....

Ing. Lucie Houdková

### *Poděkování:*

*Ráda bych touto cestou poděkovala panu prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., panu doc. Ing. Jaroslavu Jíchovi, CSc. a panu doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. za odborné vedení při doktorském studiu a možnost realizace této disertační práce.*

**Obsah**

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>LEGISLATIVA V OBLASTI NAKLÁDÁNÍ S KALY</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>TRENDY VE ZPRACOVÁNÍ KALŮ VYCHÁZEJÍCÍ Z PLATNÉ LEGISLATIVY</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>ČISTÍRNÝ ODPADNÍCH VOD A ZPRACOVÁNÍ KALŮ</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>KALOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ</b>	<b>18</b>
2.1.1	AEROBNÍ STABILIZACE	19
2.1.2	VÁPNĚNÍ	19
2.1.3	PASTERIZACE	19
2.1.4	ANAEROBNÍ STABILIZACE KALU	19
2.1.5	SUŠENÍ	22
2.1.6	SPALOVÁNÍ	25
<b>3</b>	<b>SIMULAČNÍ VÝPOČTY A JEJICH APLIKACE V ŘEŠENÉ OBLASTI</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>ANAEROBNÍ STABILIZACE</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>SUŠENÍ</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>SPALOVÁNÍ</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>ŘEŠENÍ PŘÍPADOVÉ STUDIE – KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ÚČOV PRAHA</b>	<b>37</b>
4.1.1	KALOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ	37
4.1.2	MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ	38
<b>4.2</b>	<b>VÝHLEDOVÝ STAV</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ TESTY PRO ZÍSKÁNÍ VSTUPNÍCH DAT</b>	<b>42</b>
4.3.1	ZKOUŠKY NA ÚČOV PRAHA	42
4.3.2	REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ KALU	48
<b>4.4</b>	<b>SIMULAČNÍ VÝPOČTY VYBRANÝCH ALTERNATIV</b>	<b>50</b>
4.4.1	CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH ALTERNATIV	52
4.4.2	VSTUPNÍ DATA PRO SIMULAČNÍ VÝPOČTY	56
4.4.3	VÝSLEDKY MATERIÁLOVÝCH A ENERGETICKÝCH BILANCÍ JEDNOTLIVÝCH PROCESŮ	61
4.4.4	ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ VČETNĚ PARAMETRICKÉ CITLIVOSTI	65

4.4.5	VÝSLEDKY MATERIÁLOVÝCH A ENERGETICKÝCH BILANCÍ UVAŽOVANÝCH VARIANT	72
<b>4.5</b>	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ</b>	<b>75</b>
4.5.1	INVESTIČNÍ NÁROČNOST UVAŽOVANÝCH VARIANT	75
4.5.2	HLAVNÍ NÁKLADY A ZISKY UVAŽOVANÝCH VARIANT	76
<b>4.6</b>	<b>SOUHRN VÝSLEDKŮ MATERIÁLOVÝCH, ENERGETICKÝCH A EKONOMICKÝCH BILANCÍ</b>	<b>78</b>
4.6.1	ŘEŠENÍ Č. 1	78
4.6.2	ŘEŠENÍ Č. 2	80
4.6.3	ŘEŠENÍ Č. 3	82
4.6.4	ŘEŠENÍ Č. 4	83
4.6.5	DISKUSE VÝSLEDKŮ	84
<b>4.7</b>	<b>NÁVRH KONKRÉTNÍHO ŘEŠENÍ</b>	<b>84</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>87</b>
<b>5.1</b>	<b>KOMPLEXNÍ ŘEŠENÍ ZALOŽENÉ NA EXPERIMENTÁLNÍM A VÝPOČTOVÉM PŘÍSTUPU</b>	<b>87</b>
<b>5.2</b>	<b>BUDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>88</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>		<b>90</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b>		<b>95</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ</b>		<b>96</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>		<b>100</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>		<b>102</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>		<b>104</b>



# 1 ÚVOD

Disertační práce je věnována problematice čistírenských kalů, která je v posledních letech stále více diskutována. Mohlo by se zdát, že kaly se stávají problémem až v několika posledních letech, kdy došlo ke zpřísnění legislativních požadavků na nakládání s kaly. Opak je ale pravdou, jak dokládá citát Abrama Z. Jevileviče z roku 1979 [1]:

*„Problém využívání kalů z městských a průmyslových odpadních čistíren byl již dávno předmětem zájmu vědců a odborníků, nikdy však nebyl tak aktuální a neodkladný jako v současné době vzhledem k rozsáhlým opatřením pro ochranu životního prostředí, uskutečňovaným v celostátním měřítku.“*

Přestože je citovaná myšlenka 30 let stará, její obsah je stále aktuální. Problematice zpracování čistírenských kalů se věnují odborníci z celého světa. Zájem o tuto problematiku dokládá např. i vysoká účast na 1. ročníku monotematické konference European Conference of Sludge Management 2008, která se konala v září 2008 v belgickém Liège.

V posledních letech je diskutována a v zahraničí již i aplikována především termická likvidace čistírenských kalů (zejména spalování). Spalování kalů je možné hned v několika typech zařízení, jak je popsáno v dalším textu. Při výběru konkrétní technologie pro konkrétní čistírnu odpadních vod (ČOV) zůstává otázkou, jaký kal spalovat a jaké předúpravy provést, aby bylo spalování maximálně energeticky výhodné a zda bude vůbec pro danou čistírnu provoz spalovny ekonomicky únosný. Odpověď na tyto otázky poskytují energetické, materiálové a ekonomické bilance, které jsou stěžejní částí této práce. Uvedené bilance vycházejí z údajů poskytnutých provozovateli Ústřední čistírny odpadních vod v Praze (ÚČOV).

Pražská ÚČOV je v současné době v popředí zájmu odborníků na čistírenskou problematiku, protože se plánuje její rozsáhlá rekonstrukce. Přední české vědecké týmy navrhují různá řešení právě kalového hospodářství, pro něž zatím technologie vybrána nebyla. Příkladem jsou studie dle [2], [3], resp. [4], [5], [6].

Vlastní disertační práci je možné rozdělit na dva celky. Teoretická část této práce (str. 16 až 34) je zaměřena na podrobný popis hlavních technologií, se kterými se čtenář bude dále setkávat a které je teoreticky možné aplikovat na ÚČOV Praha. Technologie, které zde nejsou reálně použitelné, jsou, pro úplnost textu, zmíněny jen okrajově.

Praktická část práce (od str. 35) je věnována posouzení několika variant kalových koncovek, které lze reálně aplikovat na ÚČOV Praha. Pro každou variantu jsou vypočteny materiálové a energetické bilance, které jsou hlavním podkladem pro ekonomické vyhodnocení. Při doporučení konkrétní varianty, která může být označena jako „efektivní“, jsou brány v úvahu kromě ekonomického hlediska také různá omezení a požadavky plynoucí z konkrétní lokality.

## 1.1 Legislativa v oblasti nakládání s kaly

Kaly z čistíren komunálních odpadních vod jsou odpady dle zákona č. 185/2001 Sb. a nakládání s nimi se musí řídit příslušnou legislativou. V Katalogu odpadů, který byl stanoven vyhláškou č. 381/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů, jsou kaly z komunálních ČOV označeny katalogovým číslem 19 08 05. Surové kaly, které nebyly stabilizovány, mohou vykazovat celou řadu nebezpečných vlastností. Nejčastěji se jedná o infekčnost, která má v Seznamu nebezpečných vlastností odpadu označení H9 (příloha č. 2 k zákonu č. 185/2001 Sb.)

V zákoně o odpadech č. 185/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů, je definice kalu uvedena v § 32, v § 33 jsou pak uvedeny povinnosti při používání kalů (použitím kalu je v této části zákona myšleno jeho zapracování do půdy). Zákon č. 185/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů, je plně v souladu s evropskou legislativou, konkrétně se Směrnicí Rady 86/278/EEC o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství.

Nově jsou kaly s katalogovým číslem 19 08 05 uvedeny i v Seznamu využitelných bioodpadů, který byl zveřejněn v příloze č. 1 vyhlášky 341/2008 Sb. o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně některých dalších předpisů. Jedním ze změněných předpisů je vyhláška č. 383/2001 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady.

**Tab. 1 Mezní hodnoty koncentrací vybraných látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (Příloha č. 3 k vyhlášce 382/2001 Sb.)**

<i>Riziková látka</i>	<i>Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech [mg/kg sušiny]</i>
As – arsen	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb – olovo	200
Zn – zinek	2 500
AOX – absorbovatelné organické halogeny	500
PCB – polychlorované bifenyly (suma 6 kongenerů: 28 + 52 + 101 + 138 + 153 + 180)	0,6

Další předpisy, které se mohou týkat zacházení s kaly, jsou např. vyhláška č. 382/2001 Sb. o podmínkách použití kalu z ČOV v zemědělství nebo zákon č. 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší (pokud je uvažováno spalování nebo spoluspalování kalu). V případě zpracování

kalů na hnojiva nebo pomocné půdní látky je pak nutno splnit podmínky zákona o hnojivech č. 156/1998 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

Vyhláška č. 382/2001 Sb. definuje podmínky používání upravených kalů na zemědělskou půdu, v příloze č. 3 jsou pak uvedeny mezní koncentrace těžkých kovů a dalších vybraných rizikových látek v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (tab. 1).

V příloze č. 4 vyhlášky č. 382/2001 Sb. (tab. 2) jsou uvedeny požadavky na mikrobiologická kritéria, podle kterých se kaly dělí na dvě kategorie:

- 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.

Vyhláška č. 382/2001 Sb. dále definuje požadavky na kvalitu zemědělské půdy, na kterou jsou kaly aplikovány, četnost odběru vzorků půdy a metody odběru a analýz.

**Tab. 2 Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě (Příloha č. 4 k vyhlášce 382/2001 Sb.)**

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

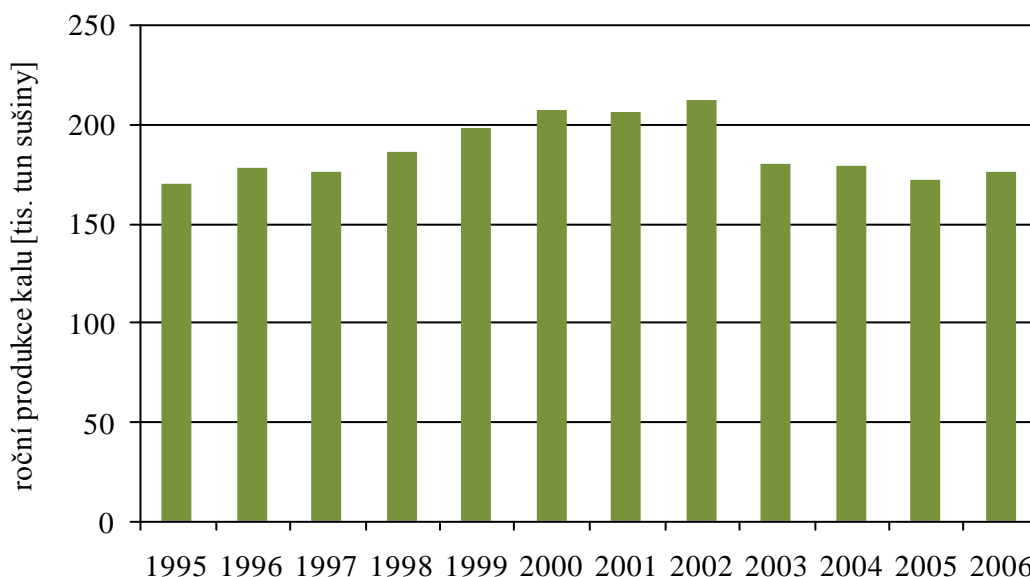
\* KTJ – kolonie tvořící jednotku

Při spalování nebo spoluspalování kalu jsou produkovány škodlivé plynné látky, a proto je nutné se řídit zákonem č. 86/2002 Sb. o ovzduší, v platném znění. Tento zákon rozděluje zdroje znečišťování ovzduší na mobilní a stacionární, u stacionárních zdrojů jsou dále definovány kategorie podle míry vlivu na ovzduší (malé, střední, velké a zvláště velké). Samostatným stacionárním zdrojem znečišťování ovzduší jsou spalovny odpadů, definované v § 4 odst. 4 písm. b).

Emisní limity jsou uvedeny v nařízení vlády č. 354/2002 Sb., v platném znění, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu. Mimo jiné je zde v § 5 odst. 1 písm. a) uvedeno, že spalování odpadu musí být vedeno tak, aby škvára a popel po spálení odpadu obsahovaly méně než 3 % celkového organického uhlíku (nebo méně než 5 % organického podílu v suchém popelu). V § 5 odst. 1 písm. c) stejného předpisu je požadováno, aby teplota spalin za posledním přívodem spalovacího vzduchu dosáhla 850 °C po dobu 2 s.

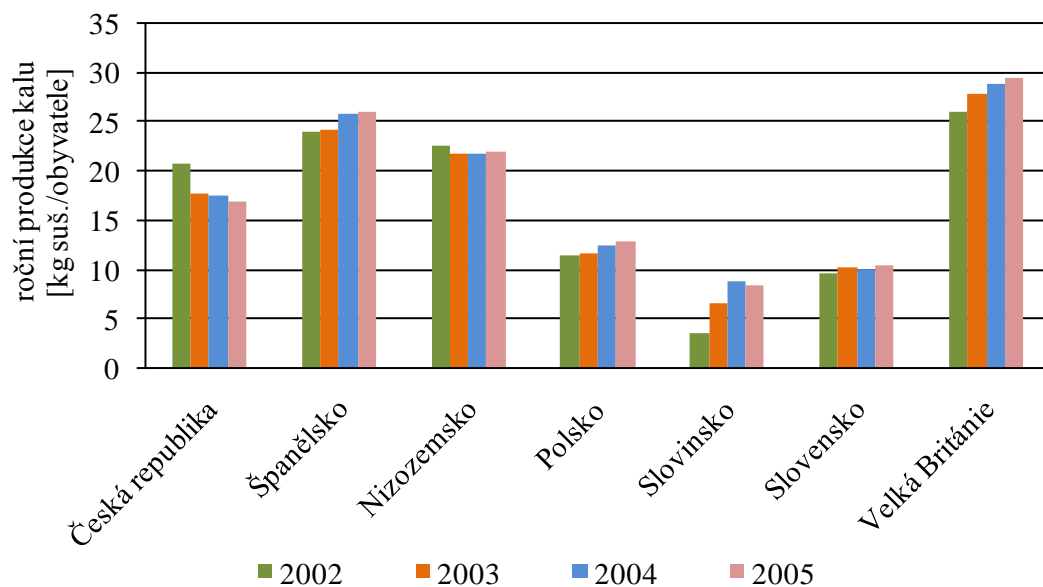
## 1.2 Trendy ve zpracování kalů vycházející z platné legislativy

Produkce kalů, stejně jako produkce ostatních odpadů, je v ČR dlouhodobě sledována. Získaná data shromažďuje Český statistický úřad [7]. Tato instituce třídí odpady podle odvětvové klasifikace ekonomických činností (OKEČ), proto můžeme sledovat pouze produkci komunálních kalů. Průmyslové kaly jsou zahrnuty mezi odpady vyprodukované jednotlivými průmyslovými odvětvími. Produkci kalů v evropském měřítku pak sleduje Eurostat [8]. Na obr. 1 je graficky znázorněna produkce kalů v ČR v posledních deseti letech. Z obrázku je dobře patrné, že v roce 2002 ustal trvalý mírný nárůst produkce kalů a v posledních letech se pohybuje se kolem hodnoty 175 tis. tun sušiny ročně.



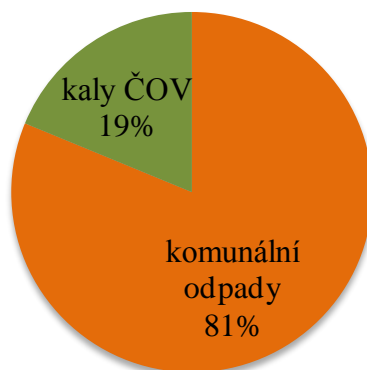
Obr. 1 Roční produkce kalů z komunálních ČOV v ČR v letech 1995 až 2006 [7]

Na obr. 2 je pro porovnání uvedena produkce kalů ve vybraných státech EU. Vzhledem k rozdílné velikosti jednotlivých zemí je produkce vztažena na jednoho obyvatele. Z obrázku je patrné, že vybrané země původní EU 15 vykazují výrazně vyšší produkci kalů, než nově přistoupivší státy (zejména Polsko, Slovinsko, Slovensko). Je to dáno tím, že původní členské státy s rozvinutou ekonomikou dlouhodobě dbají na ochranu životního prostředí, zatímco v nově přičleněných zemích jsou tyto trendy postupně doháněny. Zatímco v roce 2000 bylo na čistírny odpadních vod napojeno ve Španělsku 88 % obyvatel a v Nizozemí 98 % obyvatel, pak v České republice to bylo 66 %, v Polsku 54 % a ve Slovinsku dokonce jen 36 % obyvatel [8].



Obr. 2 Produkce kalů v některých zemích EU [8]

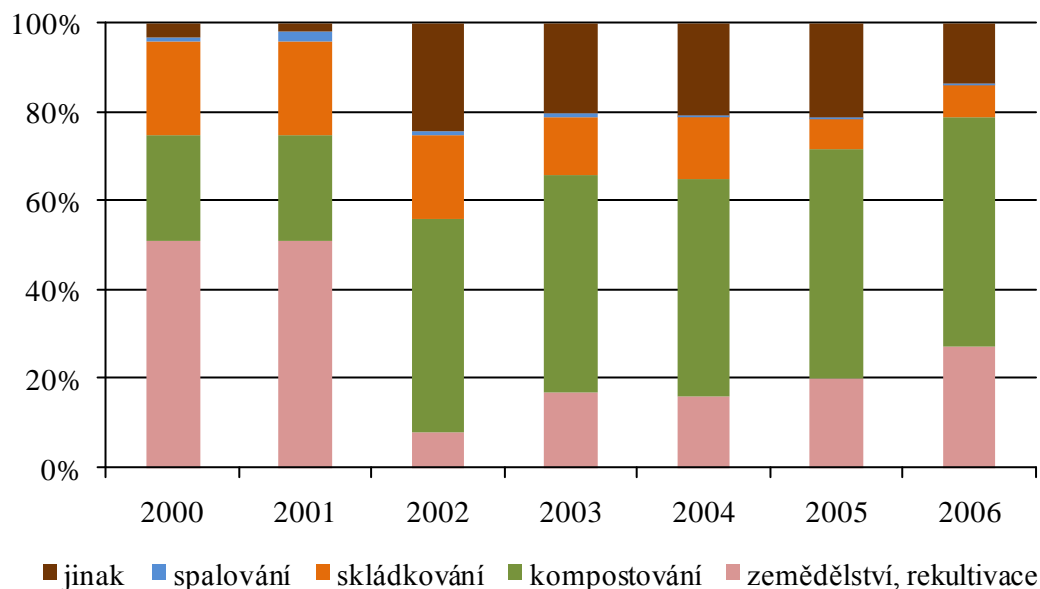
Představu o celkovém zastoupení kalů mezi produkovánými komunálními odpady dokresluje obr. 3. Týká se roku 2006, kdy bylo v ČR vyprodukováno 3,4 mil. t komunálního odpadu a 175,5 tis. t sušiny komunálního kalu [7]. Vydeme-li z poznatku, že kal se odváží z čistíren o sušině přibližně 25 %, pak se jedná o množství 0,7 mil. t odvodněného kalu, což představuje přibližně 19 % produkováného odpadu z komunální sféry.



Obr. 3 Podíl odvodněných kalů z ČOV (25 % sušiny) a komunálních odpadů v ČR v roce 2006 [7]

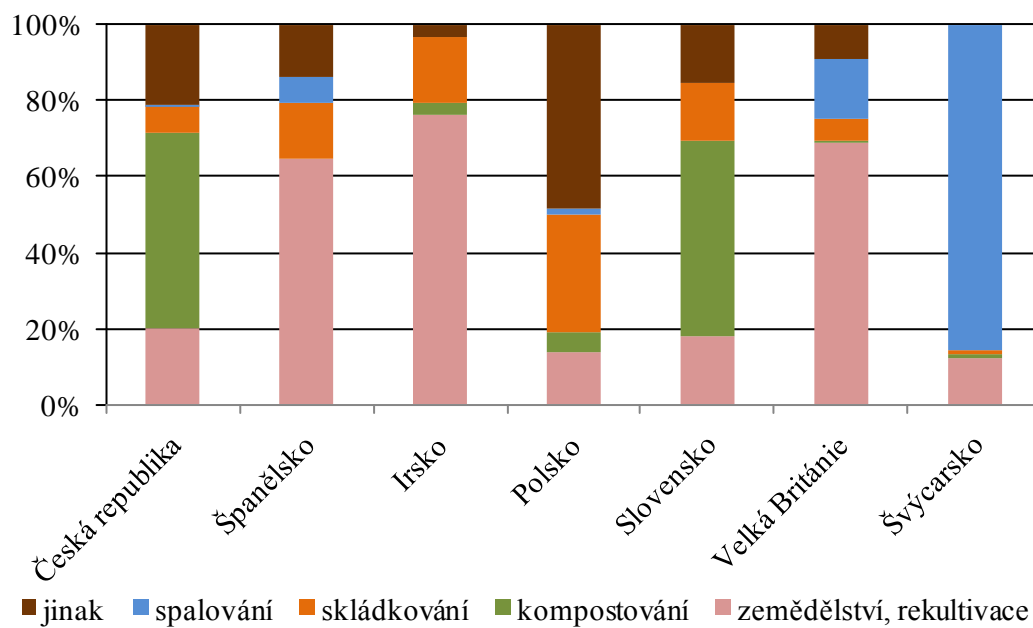
Před vstupem ČR do EU byla větší část produkováných čistírenských kalů aplikována přímo na zemědělskou půdu. Další významný podíl byl využit ke kompostování a nezanedbatelné množství bylo skládkováno. Jen nepatrné množství kalů bylo energeticky využito (jednalo se převážně o různé poloprovozní zkoušky). Po implementaci evropské legislativy v roce 2002 došlo k výrazné změně v nakládání s kaly, jak dokládá obr. 4. Zpřísnění požadavků na kvalitu kalu aplikovaného na zemědělskou půdu způsobilo výrazný odklon od tohoto způsobu využití. Většina kalu, který byl dříve aplikován přímo, je dnes využita k výrobě kompostů. Z grafu na obr. 4 je dále dobře patrné, že postupně dochází i ke snižování množství kalů ukládaných na skládky. Tento trend je přímo požadován Plánem odpadového hospodářství České republiky, který byl vyhlášen nařízením vlády č. 197/2003 Sb. V tomto dokumentu je mimo jiné uveden požadavek

snížit maximální množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů ukládaných na skládky tak, aby podíl této složky činil v roce 2010 nejvíce 75 %, v roce 2013 nejvíce 50 % a výhledově v roce 2020 nejvíce 35 % z celkového množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů vzniklého v roce 1995. Dále je v Plánu odpadového hospodářství ČR uvedeno, že pro kaly z ČOV má být zajištěno použití upravených kalů na zemědělské půdě a jiné využití, a že má být podporováno energetické využití bioplynu z ČOV s odpovídající produkcí kalů.



Obr. 4 Způsoby nakládání s čistírenskými kaly v ČR v letech 2000 až 2006 [7]

Pro srovnání jsou na obr. 5 uvedeny způsoby zpracování kalů ve vybraných státech EU a ve Švýcarsku v roce 2005. Z obrázku je dobře patrné, že i přes společnou evropskou legislativu se přístup k nakládání s kaly ve státech EU výrazně liší. Dobře patrný je např. rozdíl v používání kalů na zemědělské půdě. Zatímco u nás se od roku 2002 potlačuje, v některých původních členských státech (Španělsko, Irsko, Velká Británie) tento způsob stále převažuje. Od všech uvedených zemí se pak výrazně liší Švýcarsko, kde je absolutní prioritou spalování kalů.



Obr. 5 Způsoby nakládání s čistírenským kalem v některých zemích EU v roce 2005 [8]

## 2 ČISTÍRNÝ ODPADNÍCH VOD A ZPRACOVÁNÍ KALŮ

Čistírny odpadních vod v České republice jsou většinou koncipovány jako dvoustupňové. O dvoustupňových ČOV mluvíme tehdy, sestává-li vodní linka z mechanického (primárního) a biologického (sekundárního) stupně. V případě, že dvoustupňová technologie nesplňuje legislativní požadavky na vyčištěnou vodu, může být ČOV doplněna o tzv. terciární stupeň čištění. Tím může být např. filtrace vyčištěné vody před odtokem do recipientu, která zajistí snížení množství nerozpuštěných látek na požadovanou hodnotu.

Na vodní linku čištění odpadní vody zpravidla navazuje kalové hospodářství. Kalové hospodářství, resp. jeho technologická skladba je odvislá zejména od velikosti ČOV. Obecně lze říci, že velké ČOV zpracovávají kal anaerobní stabilizací, menší a střední ČOV využívají ke stabilizaci kalu méně náročnou aerobní stabilizaci a malé ČOV zpravidla vlastní kalové hospodářství nemají a kal odváží ke zpracování na větší ČOV. Vzhledem k zaměření této práce je popisu kalového hospodářství věnována samostatná kapitola.

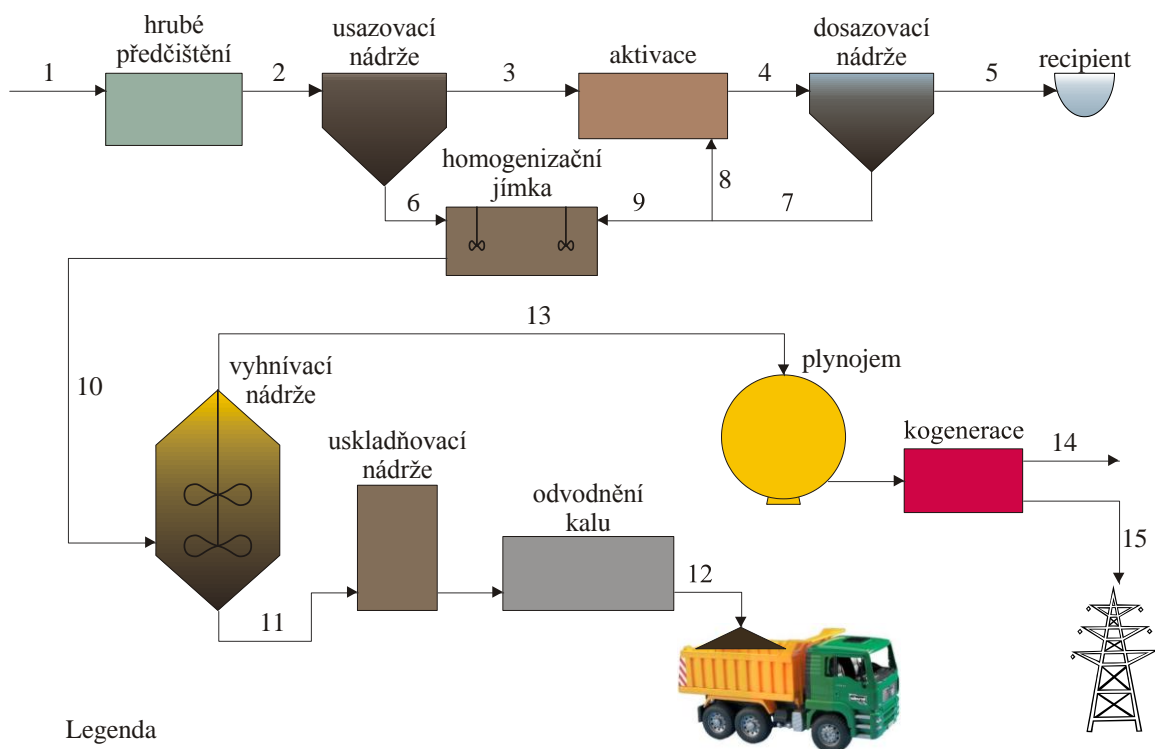
Schéma typické ČOV je znázorněno na obr. 6. Mechanický stupeň vodní linky sestává z objektů hrubého předčištění, kde je z přitékající odpadní vody odstraňován písek, štěrk a jiné větší mechanické nečistoty. To je nezbytné z důvodu ochrany dalších zařízení, kterými odpadní voda protéká. Odpadní voda je dále přiváděna do usazovacích nádrží, kde jsou vlivem sedimentace odděleny další jemné částice. Usazenina je ze dna nádrže odváděna jako primární kal do kalového hospodářství.

Voda zbavená mechanických nečistot následně prochází biologickým stupněm, který může být řešen různými způsoby, dnes se nejčastěji používají aktivační nádrže rozdělené do nitrifikačních a denitrifikačních zón, za kterými jsou řazeny dosazovací nádrže. Podstatou biologického čištění odpadní vody je odstranění dusíku, fosforu a rozpuštěných organických sloučenin z vody. Nezastupitelnou roli při odstraňování uvedených polutantů hrají mikroorganismy, pro které jsou biologicky rozložitelné organické látky zdrojem potravy. Během čištění odpadní vody v aktivaci vzniká směs vyčištěné vody a velmi jemného kalu, který je tvořen převážně odumřelými mikroorganismy. Kal sedimentuje v dosazovacích nádržích a po usazení je z nich odváděn jako tzv. aktivovaný kal. Část aktivovaného kalu je po regeneraci přiváděna zpět do biologického stupně, přebytečný aktivovaný kal je odváděn do kalového hospodářství.

Voda na odtoku z dosazovacích nádrží již musí splňovat všechny předepsané limity, neboť v případě dvoustupňových ČOV odchází přímo do recipientu.

Podrobnější popis vodní linky ČOV je možné najít v literatuře [9], [10], [11].





## Legenda

- |   |  |    |                           |
|---|--|----|---------------------------|
| 1 | přítok surové odpadní vody                           | 7  | aktivovaný kal            |
| 2 | odpadní voda zbavená velkého mechanického znečištění | 8  | vratný kal                |
| 3 | odpadní voda zbavená jemných suspendovaných částic   | 9  | přebytečný aktivovaný kal |
| 4 | směs vyčištěné vody a jemného kalu                   | 10 | směsný surový kal         |
| 5 | odtok vyčištěné vody z ČOV                           | 11 | vyhnilý kal               |
| 6 | primární kal   | 12 | odvodněný vyhnilý kal     |
|   |  | 13 | bioplyn                   |
|   |  | 14 | teplo                     |
|   |  | 15 | elektrická energie        |

Obr. 6 Obecné schéma čistírny odpadních vod

Čistírna schematicky znázorněná na obr. 6 odpovídá svojí skladbou větším ČOV, tedy ČOV s kapacitou přibližně nad 10 000 ekvivalentních obyvatel<sup>1</sup> (EO). U menších ČOV se setkáváme s jednodušším řešením kalového hospodářství, což je dáno především ekonomikou provozu.

Jak vyplynulo z popisu ČOV, při čištění odpadních vod jsou produkovány následující typy kalů:

- **Primární kal** se odděluje od surové odpadní vody sedimentací v usazovacích nádržích (nebo také jiném separačním zařízení). Složení primárního kalu je dáno především charakterem přitékající odpadní vody a druhem kanalizace, ovšem může být také ovlivněno chemickými úpravami (dávkování koagulantu) aplikovanými před vstupem odpadní vody do usazovacích nádrží.
- **Aktivovaný kal** vzniká v biologickém stupni čištění, jedná se převážně o nerozložené zbytky organických látek a odumřelou biomasu. Od vyčištěné vody se odděluje v dosazovacích nádržích. Část aktivovaného kalu se vrací zpět do

<sup>1</sup> 1 EO odpovídá látkovému znečištění 60 g/d BSK<sub>5</sub> (biochemická spotřeba kyslíku při rozkladu organického znečištěním anorganické za 5 dní v temnu při teplotě 20 °C)

biologického stupně čištění (tzv. *vratný kal*). Zbytek pak odchází do kalového hospodářství k dalšímu zpracování (tzv. *přebytečný aktivovaný kal*).

- **Chemický kal** vzniká v případě použití chemických přípravků k odstranění znečištění. Příkladem je chemické srážení fosforu síranem železitým nebo síranem železnatým. Chemický kal je v tomto případě tvořen sraženinou síranu fosforečného.

## 2.1 Kalové hospodářství

Kalové hospodářství je nezbytnou součástí každé čistírny odpadních vod. Jeho velikost a technologická skladba závisí na množství produkovaných kalů a tedy na velikosti ČOV. Kalové hospodářství zajišťuje takové úpravy kalu, které umožní jeho odvoz z ČOV k finálnímu zpracování. Jedná se zejména o mechanické úpravy kalů (např. směšování různých typů kalů, jejich zahušťování či odvodňování) a biochemické úpravy kalů (např. aerobní či anaerobní stabilizace, vápnění apod.).

Malé ČOV (do 5 000 EO<sup>2</sup>) produkují velmi malé množství kalu a je pro ně ekonomicky výhodnější kal odvézt na blízkou větší ČOV, kde je kal zpracován. V případě, že v blízkosti žádná vhodná ČOV není, musí i malá ČOV kal zpracovat, protože se jedná o materiál vykazující nebezpečné vlastnosti. Nejčastěji je malými čistírnami využívána aerobní stabilizace kalu nebo vápnění. Větším ČOV (zhruba od 10 000 EO) se již vyplatí investovat do vyhnívacích nádrží, ve kterých dochází k anaerobní stabilizaci kalu [12]. Při tomto procesu je produkován bioplyn, který ČOV dále energeticky využívá.

### *Obecný popis kalového hospodářství*

Kaly produkované čištěním odpadních vod jsou přijímány do homogenizační jímky, kde jsou před dalším zpracováním důkladně smíseny. Před vlastním smísením mohou být kaly ještě zahuštěny. Zahušťování je aplikováno zejména na přebytečný aktivovaný kal, čímž je obsah sušiny zvýšen z přibližně 1 % až na 7 %. Primární kal, který je z primárních usazovacích nádrží odváděn při sušině přibližně 3 %, je čerpán většinou přímo do homogenizační jímky. Vznikající směsný surový kal (SSK) obsahuje zpravidla kolem 5 % sušiny.

Směsný surový kal je dále stabilizován, zpravidla aerobně nebo anaerobně (podrobný popis v dalších kapitolách). Stabilizovaný kal obsahuje přibližně 3 % sušiny a je zbaven infekčních vlastností. Před odvozem z čistírny je stabilizovaný kal odvodněn na co největší obsah sušiny. Protože se jedná o odpad, za jehož likvidaci musí ČOV platit, snaží se provozovatel každé ČOV dosáhnout maximálního obsahu sušiny v odvodněném kalu. K odvodňování se používají zejména odstředivky a pásové lisy, které umožňují kal odvodnit na obsah sušiny přibližně 20 až 35 %. Na menších ČOV pak může být odvodňování kalu zajištěno mobilními odstředivkami nebo vysycháním kalu v kalových

---

<sup>2</sup> Dělení na malé a velké ČOV (přesná hodnota počtu EO) není nikde definováno. Z hlediska velikosti jsou rozděleny ČOV např. v nařízení vlády č. 61/2003 Sb., kde se emisní limity vypouštěné vody liší pro různé velké ČOV.

lagunách. Podrobnější popis způsobů odvodňování a vyhodnocení používání jmenovaných zařízení na ČOV v ČR je uveden v [9].

### 2.1.1 Aerobní stabilizace

Jedná se o stabilizaci kalu v otevřených nádržích, kdy působením vzdušného kyslíku a příslušných bakterií dochází k rozkladu organických látek za vzniku oxidu uhličitého a vody. Jedná se o proces, při kterém se energie obsažená v kalu mění na teplo. Toto teplo je uvolňováno do okolí a nelze ho technologicky využít. Při stabilizaci se teplota zvyšuje až na 50 až 60 °C, při průměrné době zdržení 20 až 30 dní tak dochází nejen k rozkladu organických látek, ale také k hygienizaci kalu [13], [14].

Aerobní stabilizace probíhá nejčastěji v otevřených betonových nádržích, které jsou míchány a v případě potřeby rovněž provzdušňovány (nevýhodou otevřených nádrží je riziko zápachu v blízkém okolí). Jedná se o technologie investičně i provozně méně náročnou než anaerobní stabilizace, a proto je vhodná spíše pro menší ČOV.

### 2.1.2 Vápnění

Jedná se o chemickou stabilizaci kalu, která může nahradit některou z forem biologické stabilizace. Přídavkem páleného vápna (CaO) [13] nejčastěji k odvodněnému kalu je dosaženo výrazného zvýšení pH. Je požadováno, aby pH bylo vyšší než 12 po dobu min. 2 hodin [11]. Tak je zajištěno, že bude zastaven růst bakterií a dojde ke zničení patogenů. Nevýhodou vápnění je, že po určité době klesá pH pod 11, a tak se obnoví růst bakterií a kal začne opět podléhat hnilobným procesům.

### 2.1.3 Pasterizace

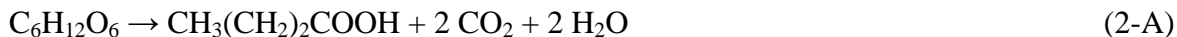
Pasterizace je proces, který zajišťuje maximální hygienizaci kalu. Při pasterizaci je nutné kal ohřát na 70 °C a na této teplotě ho udržet 60 minut [15]. Tím je zajištěno zničení přítomných patogenních organismů. Pasterizace je vhodná pro ČOV, které nezpracovávají takové odpadní vody, které by byly zdrojem těžkých kovů. Kal, který nepřekračuje limity obsahu těžkých kovů a je pasterizován (zbaven patogenů), může být bez problémů využit k přímé aplikaci na zemědělskou půdu nebo ke kompostování.

### 2.1.4 Anaerobní stabilizace kalu

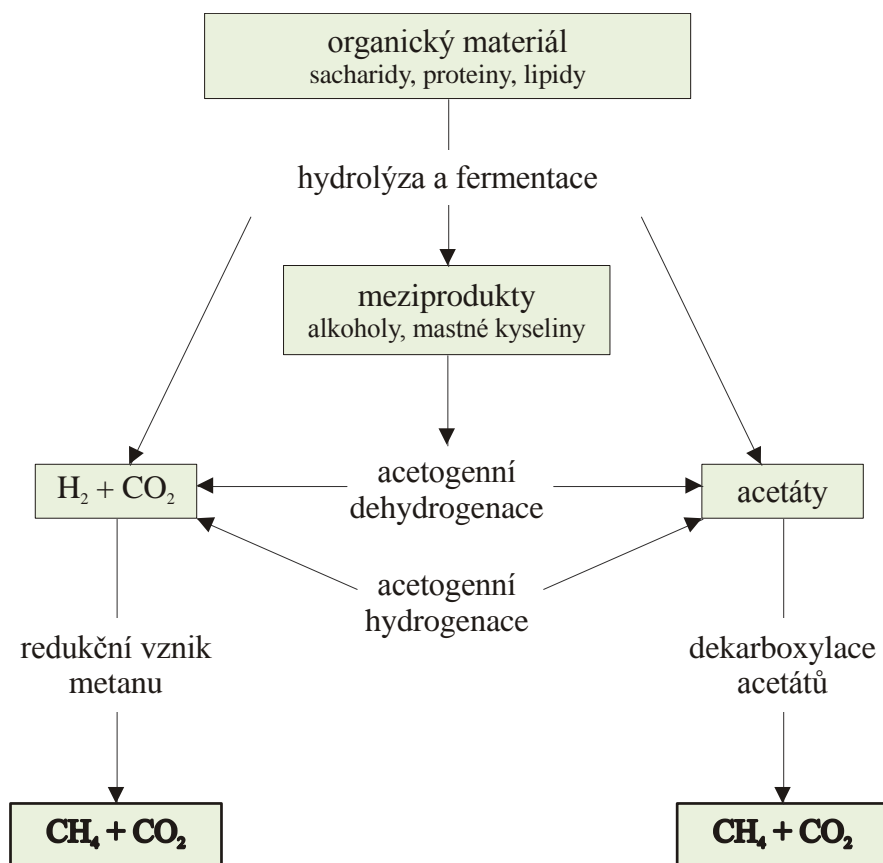
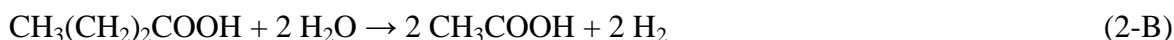
Anaerobní stabilizace neboli vyhnívání je řízený proces rozkladu organických látek bez přístupu vzduchu. Na rozdíl od aerobního procesu je při anaerobním rozkladu organických látek převeden jejich energetický potenciál do bioplynu, který je na ČOV dále energeticky využit. Rozklad organických látek probíhá v několika stupních, které na sebe postupně navazují. Jedná se o hydrolýzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi. Při kontinuálním provozu vyhnívacích nádrží probíhají všechny stupně štěpení organických látek souběžně. Jednotlivé fáze rozkladu (schematicky znázorněno na obr. 7) jsou [16], [17], [18]:

**Hydrolýza** je prvním stupněm rozkladu makromolekulárních látek, jako jsou polysacharidy (celulózy, hemicelulózy), bílkoviny (proteiny) nebo tuky (lipidy). Činností hydrolytických bakterií vznikají nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě (sacharidy, aminokyseliny, mastné kyseliny).

**Acidogeneze** je druhým stupněm, ve kterém jsou produkty hydrolýzy rozkládány fermentačními bakteriemi na alkoholy a mastné kyseliny s krátkým řetězcem (kyselina octová, propionová, máselná nebo mléčná). Dalšími produkty jsou oxid uhličitý a voda. Příkladem acidogenního rozkladu je štěpení glukózy na kyselinu máselnou, oxid uhličitý a vodu (rovnice 2-A):



**Acetogeneze a metanogeneze** probíhají většinou současně. Při acetogenezi jsou alkoholy a mastné kyseliny rozkládány acetogenními bakteriemi až na kyselinu octovou (příkladem je štěpení kyseliny máselné – rovnice 2-B). Při metanogenezi je kyselina octová dále rozkládána acetotrofními metanogenními bakteriemi až na metan a oxid uhličitý (rovnice 2-C). Současně vzniká metan z vodíku a oxidu uhličitého (rovnice 2-D) činností hydrogenotrofních metanogenů.



Obr. 7 Stupně rozkladu organických látek [19]

Anaerobní stabilizace vyžaduje udržování určitých podmínek, které jsou pro růst mikroorganismů optimální. Jedná se zejména o pH a teplotu. pH se udržuje při kontinuálním provozu v rozmezí 6,7 až 7,4 [20], tedy v neutrální oblasti, protože při takovém pH nejlépe prosívají právě metanogenní bakterie. Teplota se udržuje buď na

35 °C (při mezofilní stabilizaci) nebo na 55 °C (při termofilní stabilizaci). Mezofilní stabilizace je méně náročná na dodávky tepla a dříve byla v podstatě jedinou používanou technologií. V současné době přecházejí ČOV na termofilní vyhnívání, při kterém dochází k hlubšímu rozkladu organické hmoty a větší výtěžnosti bioplynu. Termofilní režim vyhnívání však vyžaduje větší dodávky tepla do procesu, navíc termofilní bakterie jsou více náchylné na výkyvy teploty.

Bioplyn je směsí plynů, z nichž majoritní podíl zaujímají metan (50 až 80 %) a oxid uhličitý (20 až 50 %). Z minoritních složek jsou to především vodík, sulfan a zbytkový kyslík. Surový bioplyn dále obsahuje vlhkost, která je odstraňována kondenzací.

Bioplyn je nejčastěji skladován v plynojemech různé konstrukce, ve výjimečných případech je spalován přímo bez možnosti uskladnění. Bioplyn je v zásadě využíván ve dvou typech zařízení, případné přebytky jsou spalovány na hořácích zbytkového plynu (HZP). Prvním zařízením pro využití bioplynu jsou bioplynové kotle. Tato možnost je využívána hlavně na ČOV s nízkou produkcí bioplynu, kde by investice do kogeneračních jednotek byla velkou zátěží. Energie bioplynu je tak převedena pouze na teplo, kterým jsou ohřívány vyhnívací nádrže, případně vytápěny provozní budovy v zimním období.

Druhou možností je spalování bioplynu v kogeneračních jednotkách. Jedná se o kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Kogenerační jednotky jsou složeny ze spalovacího motoru, alternátoru a výměníku tepla. Motor spaluje bioplyn, který by měl mít obsah metanu 55 až 65 %. Motor pohání alternátor, který vyrábí elektřinu. Motor musí být chlazen, k tomu slouží výměník tepla, který předává uvolněné teplo vodě (nejčastěji zapojení do teplovodního systému 70/90 °C). Vznikající spaliny mohou být v závislosti na potřebě tepla rovněž využity k výrobě teplé vody, nebo je jejich teplo mařeno. Elektrická účinnost kogeneračních jednotek se pohybuje v rozmezí 23 až 41 %, celková účinnost kogeneračních jednotek na bioplyn se pak pohybuje mezi 80 a 90 % [21].

Vyrobená elektřina částečně pokrývá potřebu ČOV, teplo je opět využito k ohřevu vyhnívacích nádrží, příp. k vytápění provozních budov. Elektřina z výroby bioplynu patří do kategorie elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Výroba takové elektřiny je pro čistírnu tedy výhodná i finančně, protože dle Nařízení Energetického regulačního úřadu je elektřina vyrobená spalováním bioplynu vykupována do veřejné sítě za státem garantovanou cenu nebo za ní mohou být inkasovány tzv. zelené bonusy. Vývoj cen elektřiny z bioplynu a zelených bonusů je uveden v tab. 3. Údaje jsou převzaty z cenových rozhodnutí Energetického regulačního úřadu, která jsou dostupná na [22].

**Tab. 3 Výkupní ceny a zelené bonusy pro spalování bioplynu [22]**

<i>Zařízení uvedená do provozu</i>	<i>Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh</i>				<i>Zelené bonusy v Kč/MWh</i>			
	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008
po 1. lednu 2006	2 230	2 270	2 330	2 420	1 260	1 150	1 050	880
od 1. ledna 2004 do 31. prosince 2005	2 520	2 570	2 630	2 730	1 550	1 450	1 350	1 190
před 1. lednem 2004	2 620	2 670	2 740	2 840	1 650	1 550	1 460	1 300

Z vývoje cen elektřiny z bioplynu a zelených bonusů je patrné, že zatímco výkupní cena mírně vzrůstá, cena zelených bonusů se postupně snižuje. Nárůst výkupních cen je dán nárůstem cen elektřiny obecně, ale z klesající ceny zelených bonusů je možné usoudit, že státní podpora elektřiny vyrobené z bioplynu rok od roku klesá.

### 2.1.5 Sušení

Sušení kalu je preferováno zejména tehdy, je-li jeho konečným zneškodněním spalování. V takovém případě je hlavním přínosem procesu sušení zvýšení výhřevnosti a snížení objemu kalu. V případě, že s kalem bude nakládáno jinak (přímá aplikace na zemědělskou půdu, skládkování apod.) může vysušení kalu přinést výhodu v tom, že bude sníženo jeho výsledné množství (menší náklady na likvidaci a dopravu). To se však vyplatí pouze v případě, že k sušení není využito fosilních paliv (např. solární sušení, využití odpadního tepla z jiného procesu).

Z hlediska stupně vysušení kalu rozlišujeme:

- částečné vysušení – kal je vysušen na 65 až 80 %,
- úplné vysušení – kal je vysušen na 80 až 95 % (obsah sušiny nad 90 % je požadován zejména při následném spalování v cementářské peci).

Při sušení kalů je nutné překonat tzv. lepivou fázi. Pojmem lepivá fáze je obecně používán pro kal, který je husté pastovité konzistence a velmi snadno se lepí na teplosměnné plochy. Tím se snižuje možnost přestupu tepla a účinnost sušení. V závislosti na povaze kalu se lepivá fáze nejčastěji vyskytuje při obsahu sušiny 45 až 65 % [23], [24]. U aktivovaného kalu bylo zjištěno, že lepivá fáze se vyskytuje dokonce v rozsahu od 25 do 75 % sušiny [25]. K překonání lepivé fáze je doporučováno mísení sušeného kalu s obsahem sušiny až 95 % se vstupním odvodněným kalem tak, aby kal na vstupu do sušárny měl 65 až 75 % sušiny. Překlenutí lepivé fáze kalu musí být věnována pozornost zejména při využití nepřímého sušení.

Sušení kalu může probíhat v sušárnách různého uspořádání. Podle způsobu přenosu tepla mezi tepelným médiem a kalem dělíme sušárny na:

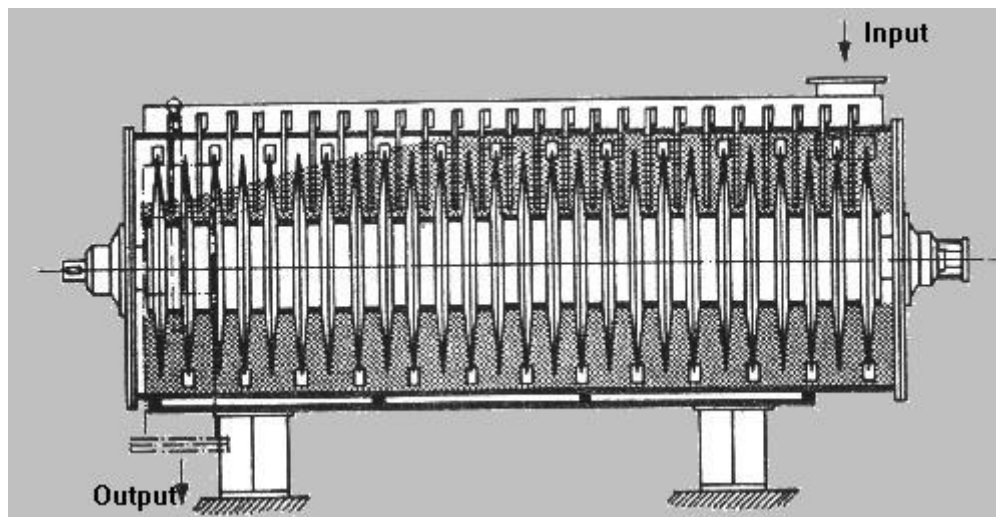
- kontaktní sušárny – nepřímé sušení, kdy teplotné médium je od kalu oddělenou teplotnou stěnou,
- konvekční sušárny – přímé sušení, kdy sušící médium (nejčastěji vzduch) je v přímém kontaktu s kalem
- sálavé sušárny – sušení s využitím solární energie.

Jak je uvedeno v [26], nejčastěji používanými sušárnami jsou diskové a lopatkové (kontaktní) sušárny, z konvekčních sušáren pak bubnové a fluidní. Na ČOV, kde je dostatek prostoru (např. malé ČOV situované mimo zástavbu obce), je pak možné využít solární sušení kalu, které je provozně i investičně nejméně náročné než klasické sušení.

#### *Diskové a lopatkové sušárny*

Diskové a lopatkové sušárny jsou tvořeny válcovým tělesem v horizontální poloze (obr. 8). Válec tvoří vyhříváný plášť sušárny. Uvnitř sušárny je umístěn otáčející se rotor. Na jeho duté ose jsou upevněny buď disky, nebo lopatky, které jsou zpravidla rovněž duté. Dutými

částmi rotoru proudí teplotně médium, které vyhřívá sušárnu, otáčením disků nebo lopatek dochází jak k promíchávání kalu, tak k jeho postupnému vynášení ze sušárny. Teplotně médium je nejčastěji termoolej nebo přehřátá pára. Ze sušárny je možné odebírat kal při různém obsahu sušiny (od pastovitěho charakteru kalu až po sypký granulát) dle požadavků provozovatele nebo finálního zpracovatele.



Obr. 8 Disková sušárna Stord-Bartz vyhřívána párou, převzato z [27]

V ČR je v současné době instalována jediná sušárna komunálního čistírenského kalu. Je to právě lopatková sušárna na ČOV Brno-Modřice. Sušárna typu NARA je vybavena dvěma hřídeli osazenými lopatkami. Tato sušárna je vytápěna termoolejem, který je ohříván zemním plynem. Teplota termooleje na vstupu do sušárny se pohybuje kolem 200 °C, termoolej vyhřívá plášť, duté hřídele i lopatky. Doba zdržení kalu v sušárně při teplotě kolem 100 °C přes tři hodiny zajišťuje dokonalou hygienizaci kalu. Kal o sušině 90 až 92 % je chlazenými dopravníky odváděn do speciálních krytých kontejnerů, ve kterých je kal odvážen z ČOV ke spalování v cementárně Mokrá [28].

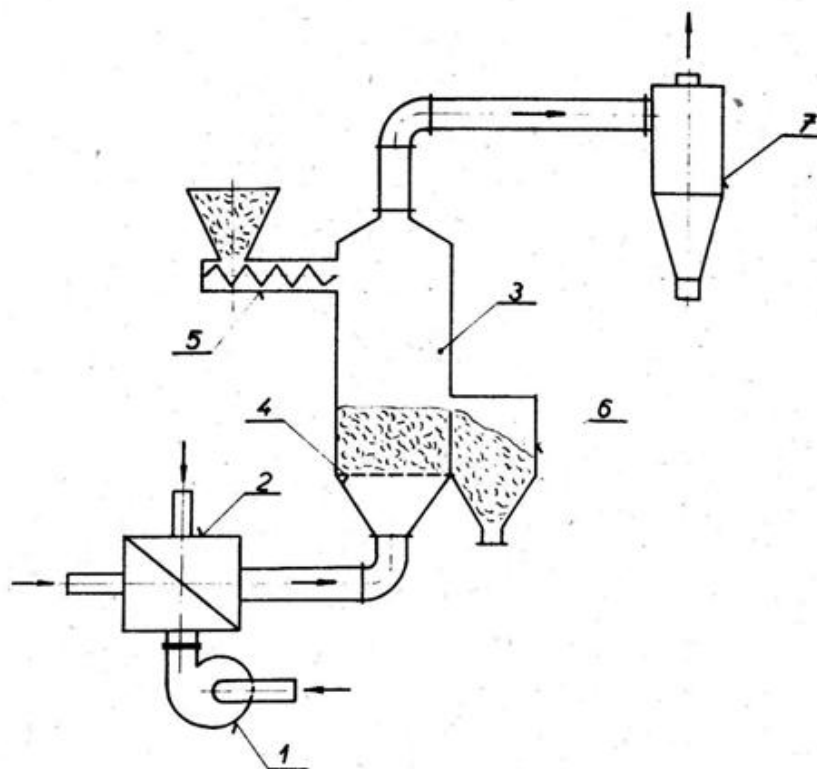
### **Bubnové sušárny**

Bubnové sušárny jsou podobně jako diskové a lopatkové sušárny tvořeny válcovým tělesem s mírně skloněnou horizontální osou. Pro zlepšení přestupu tepla bývají sušárny zpravidla vybaveny vhodnými vestavbami. Sušárna se otáčí kolem podélné osy, aby bylo zajištěno promíchávání kalu a jeho posun podél sušárny. Sušicím médiem je nejčastěji přehřátý vzduch, ale mohou být využity i spaliny. Podle postupu sušeného materiálu a sušicího média dělíme bubnové sušárny na dva základní typy: souproude a protiproude. Vlhký materiál je do sušárny dávkován vždy na vyšším konci. V případě souproude sušárny vstupuje na stejném konci do sušárny i sušící médium, v případě protiproudeho uspořádání vstupuje sušící médium na opačném konci sušárny a postupuje proti pohybu materiálu. Bubnové sušárny pracují nejčastěji v konvekčním režimu (přímé sušení). Můžeme se ale setkat i s kontaktním provedením sušárny.

Při sušení může docházet stejně jako u diskových a lopatkových sušáren k nalepování kalu na stěny bubnu, proto se vstupní mokrý kal mísí s částí již vysušeného kalu. Nevýhodou bubnových sušáren ve srovnání s jinými typy je poměrně nízká intenzita přestupu, což je příčinou pomalého sušení.

### Fluidní sušárny

Fluidní sušárny jsou vhodné pro sypké a zrnité materiály, a tedy i pro kaly. Kal je díky sušicímu vzduchu nebo spalinám udržován ve vznosu (viz obr. 9), a tak dochází k velmi intenzivnímu přestupu hmoty a tepla. Rychlost proudící vzduchu se udržuje mezi prahovou rychlostí fluidizace a prahovou rychlostí úletu částic materiálů.



1 - ventilátor, 2 - výměník tepla nebo spalovací komora, 3 - fluidní sušárna, 4 - rošt, 5 - podavač vlhkého materiálu, 6 - zásobník sušeného materiálu, 7 - odlučovač prachových částic

Obr. 9 Základní schéma fluidní sušárny, převzato z [29]

### Solární sušárny

Solární sušárny využívají energii slunečního záření. Jedná se o konstrukčně jednoduché zařízení, jehož základem je hala z odolné plastové folie (viz obr. 10). Hala je postavena na betonovém základu, který zamezuje případným průsakům. Sušárna je vybavena přehrabovacím zařízením, dále může být vybavena podlahovým vytápěním a ventilátory umístěnými v horní části sušárny. Sušárna ke své optimální činnosti potřebuje sluneční záření, proto pracuje v cyklickém režimu, přičemž jeden cyklus je roven jednomu roku. V zimním období je do sušárny navážen odvodněný kal, v letním období pak probíhá intenzivní sušení. Díky přirozené cirkulaci vzduchu v sušárně a pravidelnému přehrabávání vrstvy kalu nedochází k jeho hnití ani k emisím zápachu. Výhodou solární sušárny je především relativně nízká investiční náročnost a rovněž nízké provozní náklady, které jsou tvořeny pouze spotřebou elektřiny přehrabovacím zařízením. Nevýhodou solární sušárny je velká zastavěná plocha a závislost na slunečním svitu.





**Obr. 10 Solární sušárna Brumath, Francie (vlevo celkový pohled na haly, vpravo pohled na přehrabovací zařízení)**

### 2.1.6 Spalování

Se spalováním kalů se setkáme zejména v ekonomicky vyspělých státech (viz obr. 5 – Švýcarsko spaluje téměř celou produkci kalů). Čistírenské kaly je obecně možné spalovat v samostatných spalovnách, nebo spoluspalovat v elektrárnách, spalovnách odpadů a cementárnách [30], [31], [32]. První spalovna čistírenských kalů byla do provozu uvedena již v roce 1934, a to v Michiganu [26].

V ČR však na první spalovnu komunálních kalů stále čekáme. V minulosti bylo provedeno několik spalovacích zkoušek v různých typech zařízení. Kal z ÚČOV Praha byl spoluspalován v cementárně Radotín nebo v elektrárně v Mělníku (podrobnější popis zkoušek je uveden v [32]). Spoluspalování kalu bylo nedávno do provozu uvedeno v cementárně Mokrá, kam se dováží kal z ČOV Brno-Modřice. Za tímto účelem byla na ČOV Brno-Modřice instalována lopatková sušárna kalu a vysušený kal je pro účely spoluspalování v cementárně Mokrá certifikován jako alternativní palivo (osobní sdělení).

Spalováním kalů dochází k výrazné redukci hmotnosti i objemu kalu. Pevným produktem spalování je popel, inertní materiál, který neobsahuje biodegradabilní ani patogenní složky a může být bez problémů ukládán na skládky [33]. V případě, že popel vyhovuje legislativním požadavkům, je možné ho použít na výrobu rekultivačních směsí nebo ve stavebnictví. Jak uvádí [34] je možné popel ze spalování kalu použít i v zemědělství k doplnění prvků B, Ca, K a S. Další autor [35] uvádí, že popel z kalu obsahuje srovnatelné množství fosforu jako přírodní fosfátové horniny, takže může být využit jako fosforečné hnojivo. V případě aplikace popela na zemědělskou půdu je však nutné předem vyloučit negativní účinky, které mohou být způsobeny vyšším obsahem těžkých kovů.

Vedle popela vznikají také spaliny, které obsahují jednak prachové úlety, dále celou řadu škodlivin (od oxidů siřičitého, přes oxidy dusíku až po dioxiny). Spalovny kalů (podobně jako spalovny odpadů) proto musí být vybaveny účinným systémem čištění.

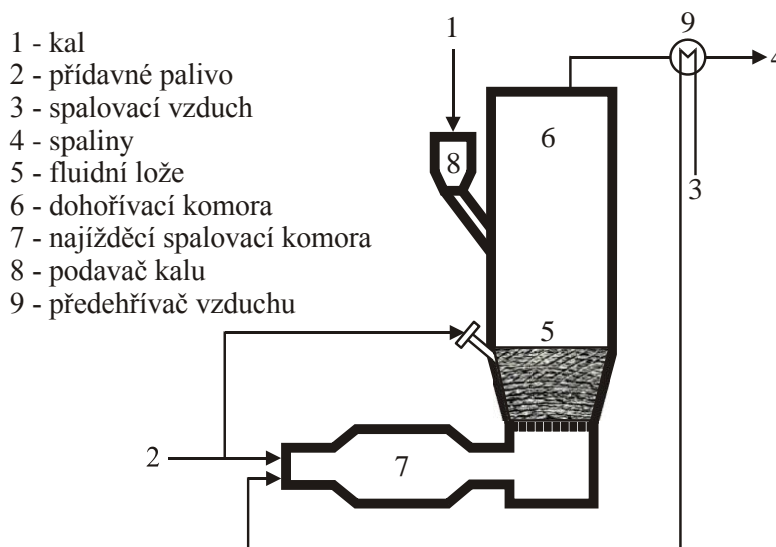
Spalovny určené pro spalování kalů jsou většinou provozovány při teplotách 850 až 950 °C. Spodní teplotní hranice je doporučena pro eliminaci emisí zápachu, teploty vyšší než 950 °C se nedoporučují z důvodů tavení popela [36].

Pro spalování čistírenských kalů se dříve používaly nejčastěji etážové pece, dnes jsou preferovány kotle s fluidním ložem. To dokládá i Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů [36]. Přimo pro kal jsou v tomto dokumentu doporučeny spalovny s fluidním ložem, etážové pece nebo kombinované etážové pece s fluidním ložem.

### ***Pece s fluidním ložem***

Spalovny s fluidním ložem jsou vhodné pro spalování homogenních materiálů, proto jsou vhodné i pro spalování čistírenských kalů. Spalovací komora je válcového tvaru, ve spodní části je umístěn rošt, nad kterým se pomocí vháněného vzduchu vytváří fluidní lože z inertního materiálu (viz obr. 11). Tím může být buď písek, nebo popel vznikající spalováním kalu. Ve fluidním loži probíhají všechny fáze spalování (sušení, vznícení i hoření). Spalovny s fluidním ložem umožňují dobrý přestup tepla, ve fluidní vrstvě je zajištěno dobré prohoření kalu díky rovnoměrnému přístupu kyslíku. Teplota ve vrchních částech fluidní vrstvy se pohybuje v rozmezí 760 až 820 °C.

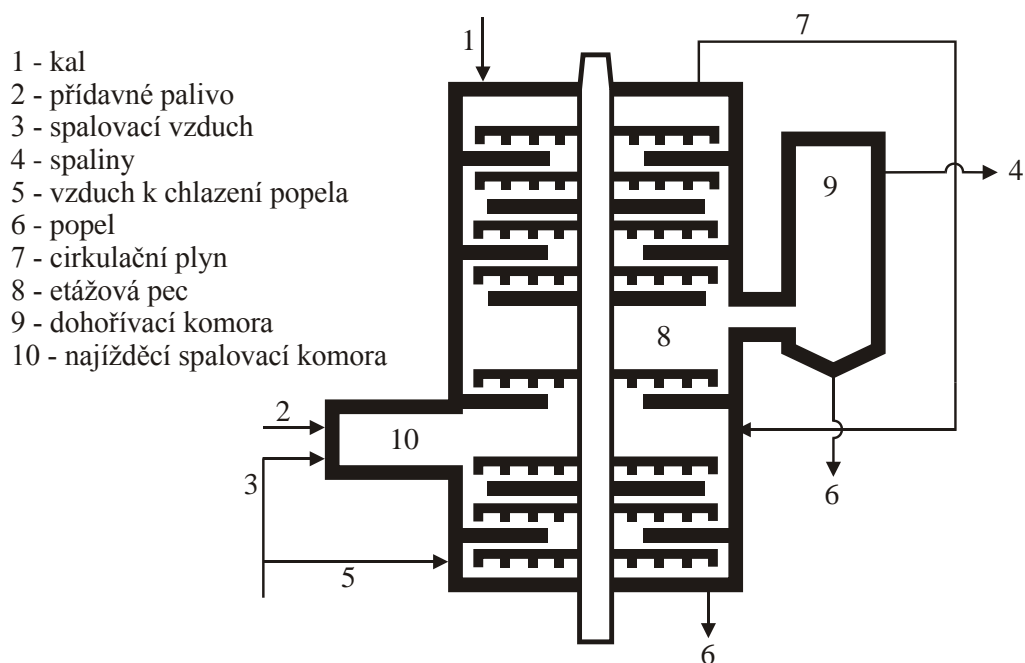
Jak je uvedeno v [26], investiční náklady na výstavbu spalovny s fluidním ložem se pohybují od 16 000 do 28 000 Kč/t sušiny a rok. Provozní náklady se pohybují v rozmezí 1 400 až 2 800 Kč/t sušiny kalu.



**Obr. 11** Pec s fluidním ložem, převzato z [36]

### ***Etážové pece***

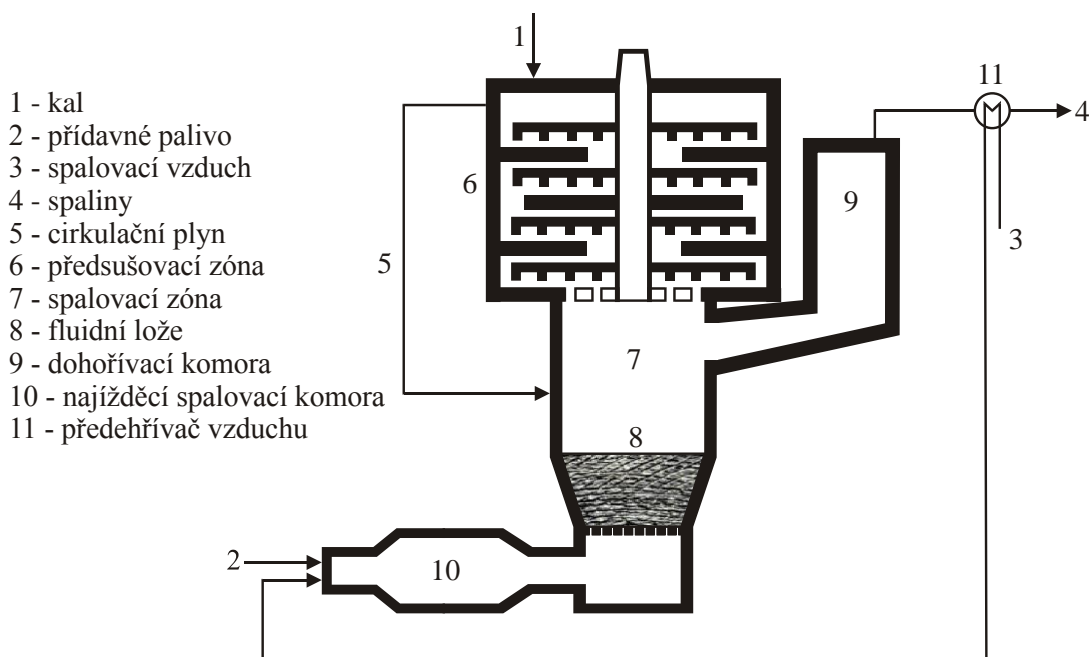
Etážové pece jsou válcového tvaru s vestavěnými patry (viz obr. 12). Kal je přiváděn na horní patro etážové pece. Ve vrchních částech pece je kal nejprve předsušen odcházejícími spaliny, postupně propadá na nižší patra, kde dochází ke vzplanutí a hoření. U dna pece je odebírán popel. Etážové pece jsou díky své konstrukci vhodné pro spalování vlhkých (pouze odvodněných) kalů.



Obr. 12 Etážová pec, převzato z [36]

### Etážové pece fluidním ložem

Etážové pece s fluidním ložem jsou kombinací dvou výše uvedených (viz obr. 13). Spodní část je tvořena fluidní vrstvou, kam propadávají a následně hoří předsušené kaly. Vznikající spaliny procházejí vrchní částí pece, která je tvořena etážemi. Na těchto patrech dochází k předsušení kalu. Při spalování vlhkých kalů je výhodou této kombinace, že do fluidní vrstvy přichází až vysušený kal. Fluidní vrstva tak může být objemově menší, než by tomu bylo u samotné fluidní spalovny.



Obr. 13 Etážová pec s fluidním ložem, převzato z [36]

Charakteristiky výše popsaných typů spalovacích pecí, které jsou vhodné pro spalování čistírenských kalů, jsou uvedeny dle [36] v tab. 4.

**Tab. 4 Porovnání pecních systémů pro spalování čistírenských kalů, převzato z [36]**

	<i>Pec s fluidním ložem</i>	<i>Etážová pec</i>	<i>Etážová pec s fluidním ložem</i>
Hlavní technické charakteristiky	Žádné mechanické pohyblivé části a nízké opotřebení.	Není nutné žádné samostatné předběžné sušení. Extenzivní pecní struktura s pohyblivými částmi. Chlazená dutá šachta.	Není nutné žádné samostatné předběžné sušení. Pohyblivá dutá šachta. Malý objem fluidního lože.
Provozní hlediska	Rychlá fáze startovací i zastavení provozu s krátkou dobou ohřevu a chlazení. Možné přerušení provozu.	Nezbytná dlouhá doba ohřevu, kontinuální provoz.	Střední doba ohřevu a chlazení.
Možné provozní problémy	Shlukování, defluidizace.	Pohyblivé díly pece.	Možné emise organických látek, pohyblivé díly pece.
Hlavní charakteristiky spalovacího stupně	Požadován malý přebytek vzduchu. Dokonalé spalování pouze nad fluidním ložem.	Obtížná kontrola spalování. Odolná změnám zatížení i vůči hrubým materiálům.	Potřebný malý přebytek vzduchu. Dobrá kontrola spalování. Dokonalé spalování ve fluidním loži. Větší odolnost vůči výkyvům v kvalitě kalu než u pecí s fluidním ložem.
Obsah popela ve spalinách	Vysoký.	Nízký.	Vysoký.
Odstraňování popela Zbytky	V proudu spalin a pomocí písku. Popel. Materiál fluidního lože.	Přímo z nejnižší vrstvy. Popel.	V proudu spalin a pomocí písku. Popel. Materiál fluidního lože.

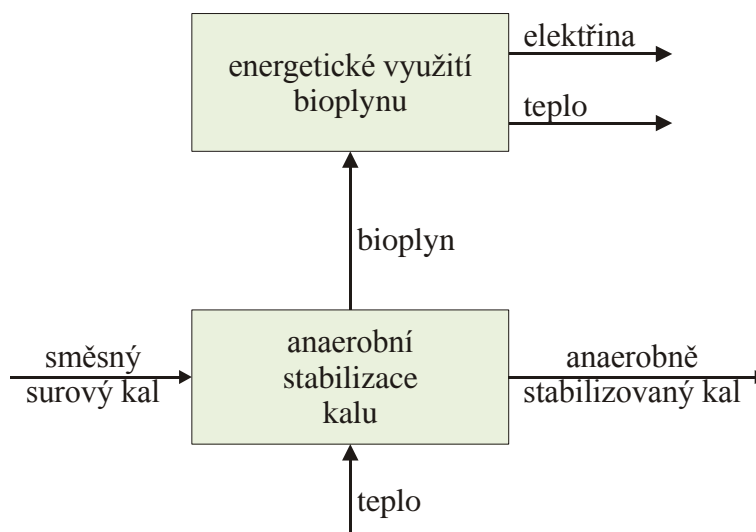
### 3 SIMULAČNÍ VÝPOČTY A JEJICH APLIKACE V ŘEŠENÉ OBLASTI

V předchozí kapitole byly popsány technologie, které jsou vhodné pro zpracování velkého množství kalu a se kterými je uvažováno v další části práce. Jedná se o anaerobní stabilizaci, sušení a spalování kalu. Protože jsou pro tyto procesy v praktické části disertační práci vyčísleny hmotnostní a energetické bilance, jsou v této kapitole popsány výpočetní postupy, které byly použity. Pro většinu výpočtů byly sestaveny vlastní simulační nástroje v aplikaci MS Excel. Pouze k výpočtu bilancí kotle na odpadní teplo a parní turbíny byl využit simulační program W2E dle [37].

V následujících kapitolách jsou podrobně popsány výpočty týkající se anaerobní stabilizace (včetně spalování bioplynu) a sušení kalu. Výpočty týkající se spalování jsou podrobně popsány v [38], proto jsou v této práci popsány pouze stručně s cílem nastínit postup výpočtu.

#### 3.1 Anaerobní stabilizace

Při výpočtu hmotnostní bilance anaerobní stabilizace (schematicky znázorněno na obr. 14) byl uvažován předpoklad, že množství anorganické složky ve vyhnílém kalu je stejné jako ve vstupním směsném surovém kalu, tzn., že během vyhnívání nevznikají ani nejsou rozkládány anorganické sloučeniny (výjimku tvoří voda a oxid uhličitý, které ale netvoří sušinu kalu).



Obr. 14 Schéma anaerobní stabilizace kalu

Pro vzájemný výpočet veličin jako je hmotnost organického nebo anorganického podílu v sušině, hmotnost sušiny v kalu, hmotnost vody a procentuální vyjádření těchto veličin je použit vzorec pro výpočet hmotnostního zlomku (po vynásobení stem udává procenta):

$$w_A = \frac{m_A}{m_{celk}} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3.1)$$

kde  $w_A$  [%] je obsah složky,  $m_A$  [kg] je hmotnost složky a  $m_{celk}$  [kg] je hmotnost uvažované soustavy.

Pro výpočet tepla  $\dot{Q}_o$ , které je potřebné na ohřátí kalu na teplotu anaerobní stabilizace, je použit vztah:

$$\dot{Q}_o = (\dot{m}_{suš,SSK} \cdot c_{p,suš} + \dot{m}_v \cdot c_{p,v}) \cdot (T_{SSK} - T_{VN,as}) \quad [kJ/d], \quad (3.2)$$

kde  $\dot{m}_{suš,SSK}$  a  $\dot{m}_v$  [kg/d] jsou hmotnostní sušiny SSK a vody na vstupu do vyhřívacích nádrží,  $c_{p,suš}$  a  $c_{p,v}$  [kJ/kg.K] jsou jejich měrné tepelné kapacity,  $T_{SSK}$  [°C] je vstupní teplota kalu a  $T_{VN,as}$  [°C] je teplota anaerobní stabilizace.

Pro výpočet tepelných ztrát vyhřívacích nádrží je použit zjednodušený vztah (použitý např. v [20], [39]), který zohledňuje rozdílné tepelné ztráty stěn a stropu a dna nádrží. Zjednodušení výpočtu tepelných ztrát vyhřívacích nádrží spočívá v tom, že není uvažován reálný prostup tepla stěnou nádrže. Ze vztahu (3.3) je patrné, že není uvažován pokles teploty na vnější straně pláště, ale pro výpočet je použita teplota na vnitřní straně pláště. Zjednodušení výpočtu tepelných ztrát je v praxi možné, protože tyto jsou velmi nízké v porovnání s teplem, které je nutné dodat na ohřev kalu (jak bude patrné při vlastním výpočtu).

$$\dot{Q}_{ztr,VN} = \alpha_{st} \cdot S_{st} \cdot (T_{VN,as} - T_o) + \alpha_d \cdot S_d \cdot (T_{VN,as} - T_p) \quad [W], \quad (3.3)$$

kde  $\dot{Q}_{ztr,VN}$  jsou tepelné ztráty vyhřívací nádrže,  $\alpha_{st}$  je koeficient přestupu tepla stěnami a stropem nádrží [W/m<sup>2</sup>.K],  $\alpha_d$  je koeficient přestupu tepla dnem nádrží [W/m<sup>2</sup>.K],  $T_o$  a  $T_p$  [°C] jsou teploty okolí a půdy.

Množství bioplynu produkované při anaerobní stabilizaci se na základě známé měrné produkce bioplynu  $\beta$  [m<sup>3</sup>/kg org. látek] a známé hmotnosti organických látek  $\dot{m}_{org,SSK}$  [kg/d] vstupujících do vyhřívacích nádrží vypočte dle vztahu:

$$\dot{V}_{BP,prod} = \dot{m}_{org,SSK} \cdot \beta \quad [m_N^3/d]. \quad (3.4)$$

Výhřevnost bioplynu je dána obsahem metanu. Při výhřevnosti metanu 35,8 MJ/m<sup>3</sup> je výhřevnost bioplynu  $LHV_{BP}$  dána vztahem:

$$LHV_{BP} = 35,8 \cdot \varphi_{CH_4} \quad [MJ/m_N^3], \quad (3.5)$$

kde  $\varphi_{CH_4}$  je obsah metanu v bioplynu [obj. %].

Výpočet vyrobené elektrické energie  $\dot{E}_{BP}$  a tepla  $\dot{Q}_{T,np}$  se počítá z účinností kogeneračních jednotek dle vztahů:

$$\dot{E}_{BP} = \dot{V}_{BP,KJ} \cdot LHV_{BP} \cdot \frac{\eta_{EE}}{100} \quad [MJ/d], \quad (3.6)$$

$$\dot{Q}_{T,np} = \dot{V}_{BP,KJ} \cdot LHV_{BP} \cdot \frac{\eta_{TEP}}{100} \quad [MJ/d], \quad (3.7)$$

kde  $\eta_{EE}$  [%] je elektrická účinnost a  $\eta_{TEP}$  [%] je tepelná účinnost kogenerační jednotky.  $\dot{V}_{BP,KJ}$  [m<sup>3</sup>/d] je množství bioplynu, které se spaluje v kogenerační jednotce. Výrobce kogeneračních jednotek většinou udávají účinnost elektrickou a celkovou ( $\eta_{TOT}$ ). Mezi nimi je potom vztah popsán rovnicí (3.8).

$$\eta_{TEP} = \eta_{TOT} - \eta_{EE}. \quad (3.8)$$

Vztah (3.7) lze použít i pro výpočet tepla získaného spalováním bioplynu v kotli na bioplyn, ve vztahu pak použijeme množství bioplynu spalovaného v kotli a účinnost kotle.

$\dot{Q}_{T,np}$  ve vztahu (3.7) je označení pro nízkopotenciální teplo, v takovém případě je tedy veškeré teplo produkované spálením bioplynu převedeno na topnou vodu 70/90 °C. V případě, že teplo spalin chceme použít např. na sušení kalu, je nutné vyhodnotit, kolik vysokopotenciálního tepla ( $\dot{Q}_{T,vp}$ ) můžeme v daném případě obdržet. Výpočet lze provést dle vztahu

$$\dot{Q}_{T,vp} = \dot{V}_{sp,BP} \cdot (h_{sp,BP,1} - h_{sp,BP,2}) \quad [MJ/d], \quad (3.9)$$

kde  $\dot{V}_{sp,BP}$  je průtok spalin vznikajících spalováním bioplynu [ $m_N^3/d$ ],  $h_{sp,BP,1}$  je entalpie spalin při teplotě na výstupu z kogenerační jednotky (obvykle 400 až 500 °C [21]) a  $h_{sp,BP,2}$  je entalpie spalin po ochlazení na požadovanou hodnotu.

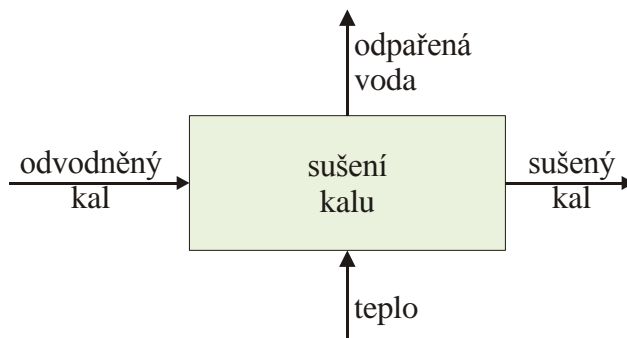
Množství produkovaných spalin se počítá na základě znalosti stechiometrických rovnic spalování bioplynu a známého přebytku vzduchu. Pro účely této disertační práce je uvažováno, že bioplyn je dvousložková směs, obsahující metan a oxid uhličitý. Stechiometrická rovnice pro spalování metanu je následující:



Další výpočty (množství stechiometrického kyslíku, celkové množství spalin atd.) jsou stejné jako při výpočtu spalování pevných paliv, které je podrobně popsáno v [38].

### 3.2 Sušení

Při výpočtu energetické náročnosti sušení (schematicky znázorněno na obr. 15) je nutné stanovit zejména množství vody, které je nutné ze vstupního materiálu odpařit. To je dáno obsahem sušiny ve vstupním materiálu a požadovaným obsahem sušiny ve vysušeném materiálu.



Obr. 15 Schéma sušení kalu

Při výpočtu materiálové bilance sušení kalu lze využít následující vztahy:

$$\dot{m}_K = \frac{\dot{m}_{suš}}{w_{suš}/100} \quad [kg/d], \quad (3.10)$$

kde  $\dot{m}_K$  je hmotnostní tok kalu [ $kg/d$ ],  $\dot{m}_{suš}$  [ $kg/d$ ] je hmotnostní tok sušiny v uvažovaném kalu a  $w_{suš}$  [%] je hmotnostní zlomek (neboli obsah) sušiny v uvažovaném kalu (odvodněném nebo sušeném). Množství vody  $\dot{m}_v$  v kalu je pak dáno vztahem:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{suš} \cdot \frac{100 - w_{suš}}{w_{suš}} \quad [kg/d]. \quad (3.11)$$

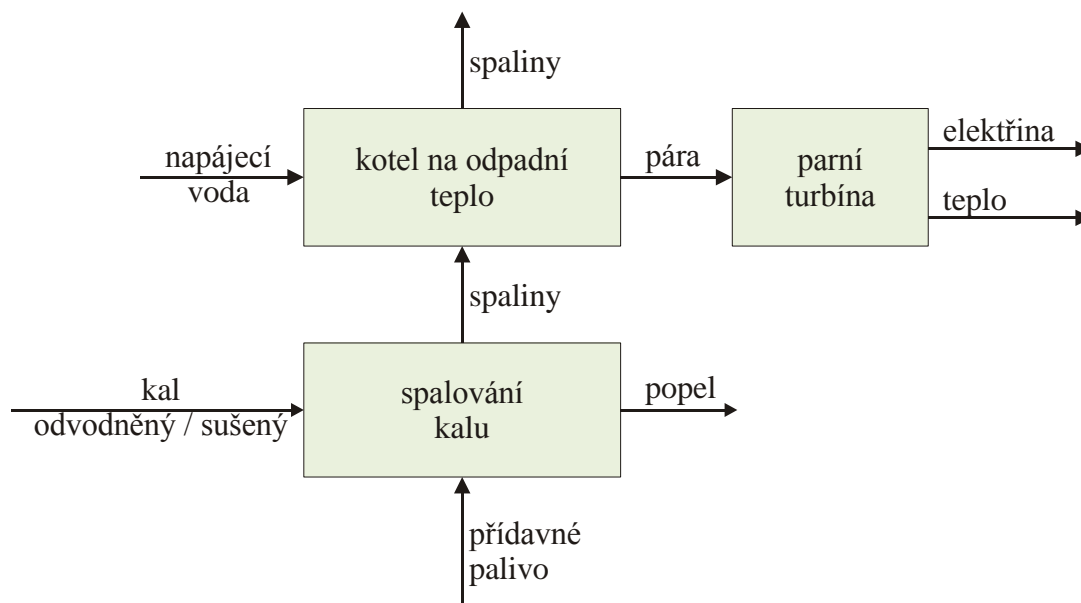
Pro výpočet tepla  $\dot{Q}_{s,k}$ , které je nutné dodat na sušení kalu na požadovaný obsah sušiny, platí následující vztah:

$$\dot{Q}_{s,k} = \dot{m}_{suš} \cdot c_{p,suš} \cdot (T_{S,out} - T_{S,in}) + \dot{m}_{v,z} \cdot (h_{sat} - h_{in}) + \dot{m}_{v,o} \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad [kJ/d], \quad (3.12)$$

kde  $c_{p,suš}$  [kJ/kg.K] je měrná tepelná kapacita sušiny kalu,  $T_{S,out}$  a  $T_{S,in}$  [°C] jsou teploty kalu na výstupu a na vstupu do sušárny,  $\dot{m}_{v,z}$  [kg/d] je zbytkové množství vody v sušeném kalu,  $\dot{m}_{v,o}$  [kg/d] je voda odpařená,  $h_{in}$  [kJ/kg] je entalpie vody při vstupních podmínkách,  $h_{out}$  [kJ/kg] je entalpie páry při podmínkách na výstupu ze sušárny a  $h_{sat}$  [kJ/kg] je entalpie vody na mezi sytosti.

### 3.3 Spalování

Při bilančních výpočtech spalování kalu (schematicky znázorněno na obr. 16) je uvažováno, že sušina kalu je tvořena organickým podílem, který je možné vyjádřit prvkovým složením C, H, O, N, S, a anorganickým podílem, který se vlastního spalování neúčastní a tvoří popel.



Obr. 16 Schéma spalování kalu

Spalování organického podílu sušiny kalu je možné zjednodušení popsat následujícími chemickými rovnicemi, do kterých vstupují prvky C, H, N a S:



Základem materiálové a energetické bilance spalovacího procesu je určení stechiometrického množství kyslíku, který je nutné dodat pro spálení odpadu zadaného



složení. Stechiometrické množství kyslíku  $\dot{n}_{vz,stech,O_2}$  určíme na základě výše uvedených chemických rovnic (3-B) až (3-E). Protože při spalování pracujeme jak s látkami pevnými (odpad), tak s látkami plynými (vzduch, spaliny), je vhodné provádět všechny výpočty přes látkové množství a teprve poté vyjadřovat potřebné výsledky v jednotkách hmotnosti nebo objemu.

$$\dot{n}_{vz,stech,O_2} = \dot{n}_C + \frac{\dot{n}_H}{4} + \dot{n}_S - \frac{\dot{n}_O}{2} \quad [kmol/d], \quad (3.13)$$

kde  $\dot{n}$  [kmol/d] s indexy  $C$ ,  $H$ ,  $S$  a  $O$  jsou látkové toky spalovaných složek organického podílu. Z rovnice (3.31) je patrné, že část kyslíku potřebného na spalování pokryje kyslík, který se uvolní přím spalováním daného materiálu.

Ze známého množství potřebného kyslíku a známého složení vzduchu je možné vypočítat množství stochiometrického spalovacího vzduchu ( $\dot{n}_{vz,stech}$ ) nebo množství spalovacího vzduchu ( $\dot{n}_{vz}$ ) včetně zvoleného přebytku.

$$\dot{n}_{vz,stech} = \frac{\dot{n}_{vz,stech,O_2}}{\varphi_{vz,O_2}} \cdot 100 \quad [kmol/d], \quad (3.14)$$

$$\dot{n}_{vz} = \alpha_{vz} \cdot \dot{n}_{vz,stech} \quad [kmol/d], \quad (3.15)$$

kde  $\varphi_{vz,O_2}$  je obsah kyslíku ve vzduchu [obj. %] a  $\alpha_{vz}$  [-] je přebytek spalovacího vzduchu.

Známe-li množství spalovacího vzduchu a jeho složení, můžeme vypočítat množství  $i$ -té složky vzduchu, která se při spalování stává součástí spalin:

$$\dot{n}_{vz,i} = \dot{n}_{vz} \cdot \frac{\varphi_{vz,i}}{100} \quad [kmol/d]. \quad (3.16)$$

Součástí spalin se nestane kyslík, který byl spotřebován na spalování organického podílu materiálu, a naopak se součástí spalin stanou produkty spalování dle chemických rovnic (3-B) až (3-E) a dále voda, která je přítomná jako vlhkost v původním spalovaném materiálu.

$$\dot{n}_{sp,O_2} = \dot{n}_{vz,O_2} - \dot{n}_{vz,stech,O_2} \quad [kmol/d], \quad (3.17)$$

$$\dot{n}_{sp,H_2O} = \dot{n}_{vz,H_2O} + \dot{n}_v + \frac{\dot{n}_H}{2} \quad [kmol/d], \quad (3.18)$$

$$\dot{n}_{sp,CO_2} = \dot{n}_{vz,CO_2} + \dot{n}_C \quad [kmol/d], \quad (3.19)$$

$$\dot{n}_{sp,N_2} = \dot{n}_{vz,N_2} + \frac{\dot{n}_N}{2} \quad [kmol/d]. \quad (3.20)$$

$$\dot{n}_{sp,SO_2} = \dot{n}_S \quad [kmol/d]. \quad (3.21)$$

Celkové množství vlhkých spalin  $\dot{n}_{sp}$  je pak součtem všech složek:

$$\dot{n}_{sp} = \sum \dot{n}_{sp,i} \quad [kmol/d]. \quad (3.22)$$

Složení vlhkých spalin je dáno vztahem:

$$\varphi_{sp,i} = \frac{\dot{n}_{sp,i}}{\dot{n}_{sp}} \cdot 100 \quad [obj. \%]. \quad (3.23)$$

Materiálová bilance spalování je určitým způsobem vyjádření zákona zachování hmoty, zákon zachování energie je možné vyjádřit vztahem:

$$\dot{Q}_{vz} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_{pp} = \dot{Q}_{sp} + \dot{Q}_p \quad [kJ/d], \quad (3.24)$$

$\dot{Q}_{vz}$  je teplo vnesené spalovacím vzduchem,  $\dot{Q}_K$  je teplo vnesené spalovaným kalem,  $\dot{Q}_{pp}$  je teplo vnesené přídavným palivem (pokud je použito),  $\dot{Q}_{sp}$  a  $\dot{Q}_p$  je teplo, které odchází ve spalinách a popelu.

$$\dot{Q}_{vz} = h_{vz} \cdot \dot{V}_{vz} \quad [kJ/d], \quad (3.25)$$

$$\dot{Q}_K = LHV_K \cdot \dot{m}_K \quad [kJ/d], \quad (3.26)$$

$$\dot{Q}_{pp} = LHV_{pp} \cdot \dot{m}_{pp} \quad [kJ/d], \quad (3.27)$$

$$\dot{Q}_{sp} = h_{sp} \cdot \dot{V}_{sp} \quad [kJ/d], \quad (3.28)$$

$$\dot{Q}_p = c_{p,p} \cdot \dot{m}_p \cdot T \quad [kJ/d], \quad (3.29)$$

kde  $h_{vz}$  a  $h_{sp}$  [kJ/m<sub>N</sub><sup>3</sup>] jsou měrné entalpie vzduchu a spalin,  $LHV_K$  a  $LHV_{pp}$  [kJ/kg] je výhřevnost kalu a přídavného paliva,  $\dot{m}_K$ ,  $\dot{m}_{pp}$  a  $\dot{m}_p$  [kg/d] jsou mnohostní toky kalu, přídavného paliva a popela,  $c_{p,p}$  [kJ/kg.K] je měrná tepelná kapacita popela a  $T$  [°C] je teplota popela na výstupu ze spalovací komory.

## 4 ŘEŠENÍ PŘÍPADOVÉ STUDIE – KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP

Při analýzách kalových koncovek čistíren odpadních vod je zapotřebí volit vhodnou technologii s ohledem na její velikost, umístění čistírny a další specifické podmínky. Z tohoto důvodu je nutné vypracovat detailní případovou studii pro konkrétní čistírnu.

Jak bylo napsáno již v úvodu, stěžejní částí této práce je nalezení vhodné koncepce kalového hospodářství pro ÚČOV Praha. Obecně lze říci, že volbu technologie je nutné provádět vždy s ohledem na velikost a umístění konkrétní čistírny a rovněž s ohledem na další specifické podmínky. V podstatě neexistuje univerzální koncepce kalového hospodářství, která by byla použitelná pro všechny ČOV. Zejména u tak velké čistírny jako je ÚČOV Praha musí být podkladem pro výběr detailní případová studie, a proto je disertační práce koncipována podobným duchu.

Volba kalového hospodářství ÚČOV patří mezi hlavní priority Magistrátu hlavního města Prahy. Jedná se o téma, které je v současné době velmi diskutované, neboť pražská čistírna bude muset v nejbližší době projít rozsáhlou rekonstrukcí.

V současné době se připravuje projekt „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově“, který zajistí dodržení přísných limitů pro vodu vypouštěnou do recipientu. Projekt předpokládá celkovou rekonstrukci stávající vodní linky ÚČOV a zároveň výstavbu její nové části. Celková kapacita ÚČOV bude zvýšena ze současných 1,4 mil. EO na 1,6 mil. EO, což znamená, že přítok na mechanicko-biologické čištění bude zvýšen ze 7 na 8,2 m<sup>3</sup>/s odpadních vod.

Rekonstrukce vodní linky bude mít přirozeně za následek zvýšení produkce kalů. Projekt uvažuje s navýšením produkce kalů na 156 tun sušiny směsného surového kalu za den (podrobnější rozbor produkce kalů je proveden v dalších kapitolách). Hledání vhodného způsobu zpracování tak velkého množství kalu je poměrně složité a to zejména proto, že nemůže vycházet pouze z technického posouzení různých variant. Při výběru vhodné kalové koncovky je nutné přihlížet mimo jiné k následujícím okolnostem:

- ÚČOV je vybudována na Císařském ostrově (viz obr. 17), v severní části Prahy, v těsném sousedství rezidenční čtvrti Troja. To přináší dvě negativa:
  - volba technologií jak vodní linky, tak kalového hospodářství je do jisté míry limitována prostorem, který je na ostrově k dispozici,
  - volba technologie kalové koncovky bude výrazně ovlivněna veřejným míněním. Jako příklad lze uvést dlouhodobý odpor veřejnosti a různých nevládních organizací k možné výstavbě spalovny kalů na Císařském ostrově.
- V současné době jsou na ÚČOV rekonstruovány vyhnívací nádrže. S rekonstrukcí bylo započato v roce 2006, kdy jedna nádrž prvního stupně musela být v důsledku havarijního stavu okamžitě vypuštěna. Od té doby je postupně rekonstruována vždy jedna dvojice nádrží (tedy jedna nádrž prvního stupně, jedna nádrž druhého stupně). Do roku 2010 má být rekonstruováno 6 vyhnívacích nádrží (tedy polovina celkového počtu), dále se plánuje zastřešení a dezodorizace manipulačních nádrží, oprava potrubí apod. Uvedené investiční akce budou muset být zohledněny i při

návrhu vhodné varianty kalového hospodářství, zejména s ohledem na zvýšení životnosti vyhnívacích nádrží.



Obr. 17 ÚČOV Praha – Císařský ostrov

- Dlouhodobým záměrem Magistrátu hlavního města Prahy je vymístění kalového hospodářství z Císařského ostrova do lokality Drasty [39] (viz obr. 18), kde je v současné době vybudované odkaliště. K vymístění kalového hospodářství by mělo dojít nejdříve po roce 2015.



Obr. 18 Odkaliště Drasty

Z výše uvedeného vyplývá, že situace na ÚČOV Praha vyžaduje návrh dvou řešení kalového hospodářství. Prvním je řešení krátkodobého výhledu, které umožní zpracovávat navýšenou produkci kalů na Císařském ostrově. Protože se předpokládá, že toto řešení bude využíváno jen několik let, mělo by být investičně co nejméně náročné. Druhé řešení pak musí navrhnout technologii pro tzv. dlouhodobý výhled, tedy pro kalové hospodářství vymístěné do lokality Drasty. V této lokalitě je možné navrhnout technologii, která není limitována prostorem, jako je tomu na Císařském ostrově. Navíc se bude jednat o stavbu na zelené louce, což přináší rovněž určitou volnost při výběru technologie zpracování kalů.

## 4.1 Analýza současného stavu zpracování kalů z ÚČOV Praha

Ústřední čistírna odpadních vod v Praze, v podobě jak ji známe dnes, byla vybudována v 60. letech 20. století. Během let prošla několika rekonstrukcemi. Současná ÚČOV má projektovanou kapacitu (denní průměr) 7 m<sup>3</sup>/s přítékajících odpadních vod (1,43 mil. EO). Jedná se o mechanicko-biologickou čistírnu s možností chemického srážení fosforu. Mechanický stupeň čištění odpadních vod je tvořen lapáky šterku, jemnými česlemi, provzdušňovanými lapáky písku a usazovacími nádržemi. Biologický stupeň je tvořen aktivačními nádržemi s jemnobublinnou aeraací a dosazovacími nádržemi.

### 4.1.1 Kalové hospodářství

Vzhledem k zaměření práce je kalové hospodářství popsáno podrobněji než vodní linka ÚČOV. Kalové hospodářství zajišťuje:

- zpracování kalů, které vznikají při čištění odpadních vod (anaerobní stabilizace),
- finální úpravu stabilizovaného kalu (odstředivky),
- úpravu a využití produkovaného bioplynu (energocentrum).

Primární kal z usazovacích nádrží je přiváděn do tzv. mokré jímky, kde je smísen se zahuštěným přebytečným aktivovaným kalem. Vzniká tzv. směsný surový kal (SSK), jehož sušina se pohybuje v rozmezí 6 až 8 %.

Po důkladném promíchání je směsný surový kal čerpán do vyhnívacích nádrží. Na ÚČOV jsou v současné době tři čtveřice vyhnívacích nádrží, z nichž polovina pracuje v režimu prvního stupně, polovina v režimu druhého stupně. První stupeň vyhnívání představuje anaerobní stabilizaci v termofilním režimu (tedy při 55 °C). Nádrže prvního stupně jsou vyhřívány, míchané vrtulovými míchadly, s pevnou střešou. Nádrže druhého stupně jsou nevyhřívány a nemíchané, s nasazeným plynojemem. Ohřev kalu v nádržích prvního stupně probíhá externě ve výměnících tepla. Ohřevným médiem je voda o teplotě 90 °C. Topná voda je zajišťována v energocentru, kde je k tomu účelu spalován bioplyn. Průměrná doba zdržení kalu ve vyhnívacích nádržích je 14 dní, což je doba poměrně krátká.

Anaerobně stabilizovaný kal (ASK) je odváděn do manipulačních nádrží, odkud je přiváděn na odstředivky. V současné době jsou na ÚČOV instalovány čtyři odstředivky o celkovém výkonu 240 m<sup>3</sup>/h. Před odvodněním je kal míchán s roztokem flokulantu, který zajišťuje tvorbu větších vloček kalu. V současné době je kal odvodňován na průměrný obsah sušiny 32 %.

V případě potřeby může být část kalu čerpána potrubím do Drast, kde je kal odvodňován na kalových polích. Rezervní kalové hospodářství v Drastech je s ÚČOV spojeno potrubím o celkové délce přibližně 8 km.

Odvodněný kal je odvážen z ÚČOV do kompostárny v Benátkách nad Jizerou k výrobě průmyslového kompostu (přibližně 90 %), nebo k přímé aplikaci na zemědělskou půdu (přibližně 10 %).

Během vyhnívání je produkován bioplyn. Bioplyn je zbavován vody a nově také sloučenin křemíku (na filtrech z aktivního uhlí [42]) a následně je využit pro výrobu topné vody a elektrické energie. Elektrické energie je vyráběna v pěti kogeneračních jednotkách. Tři kogenerační jednotky mají výkon 1 MW<sub>el</sub>, dvě jsou o výkonu 1,25 MW<sub>el</sub>. Teplo pro ohřev vody je generováno částečně v kogeneračních jednotkách, částečně pak ve čtyřech kotlích na bioplyn, které jsou vybaveny hořáky o výkonu 1,3 MW. Poměrně velká část bioplynu je spalována na hořácích zbytkového plynu (HZP), protože ÚČOV není vybavena plynoměry, ve kterých by mohl být bioplyn skladován.

#### 4.1.2 Materiálová a energetická bilance kalového hospodářství

Materiálová a energetická bilance současného stavu vychází z Vyhodnocení provozu čistírny odpadních vod v letech 2004 až 2007 ([42] až [46]). Základní výkonové parametry ÚČOV jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Základní výkonové parametry ÚČOV – průměrné hodnoty z let 2004 až 2007

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
Množství sušiny SSK	t/d	106
Obsah organických látek v sušině SSK	%	69
Množství sušiny ASK	t/d	69
Obsah organických látek v sušině ASK	%	52
Obsah sušiny v odvodněném kalu	%	31,9
Měrná produkce bioplynu (dopočetem)	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg org. látek	0,6234
Produkce bioplynu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d	45 617
Obsah CH <sub>4</sub> v bioplynu	obj. %	62,1
Výhřevnost bioplynu (dopočetem)	MJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	22,23

Způsob využití bioplynu je monitorován až v [46], odkud vyplývá, že na kogeneračních jednotkách bylo v roce 2007 spáleno až 80 % bioplynu (tab. 6). Dle provozovatele je však v průměru spalováno na kogeneračních jednotkách přibližně 75 % bioplynu a 10 % je spalováno v kotlích na bioplyn. Zbytek je spalován v hořácích zbytkového plynu. Tyto údaje byly použity pro bilanční výpočty.

Tab. 6 Využití bioplynu na ÚČOV v roce 2007

	$m_N^3/d$	% využití
Produkce bioplynu	44 526	100
Využití v KJ	35 989	80,83
Využití v kotlích na bioplyn	4 176	9,38
Spalování na HZP	4 348	9,76
Únik	13	0,03

Jak již bylo uvedeno výše, vyhnílý kal je po odvodnění odvážen k výrobě průmyslového kompostu, který se používá pro výrobu rekultivačních směsí. Kal tedy musí splňovat kritéria předepsaná technickou normou ČSN 46 5735, zejména z pohledu obsahu těžkých kovů. V tab. 7 je porovnán obsah těžkých kovů v ASK z ÚČOV jednak se jmenovanou normou a dále s vyhláškou č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě.

Tab. 7 Obsah těžkých kovů ve vyhnílému kalu z ÚČOV v mg/kg sušiny

Kov	382/2001 Sb.	ČSN 46 5735	průměr z let 2004 až 2007	maximum z let 2004 až 2007
As	30	50	6,9	20
Cd	5	13	3	17
Cr	200	1 000	149,5	530
Cu	500	1 200	322,5	415
Hg	4	10	3,4	15
Mo	-	25	-	-
Ni	100	200	54,3	140
Pb	200	500	123	470
Zn	2 500	3 000	1 757	4 300

Z tab. 7 je patrné, že průměrné hodnoty obsahu sledovaných těžkých kovů umožňují nejen výrobu průmyslového kompostu z vyhnílého kalu, ale rovněž jeho přímou aplikaci na zemědělskou půdu. Maximální zjištěné hodnoty však ukazují, že limity bývají překračovány, a to nejen pro aplikaci na zemědělskou půdu, ale v některých případech i pro výrobu průmyslového kompostu.

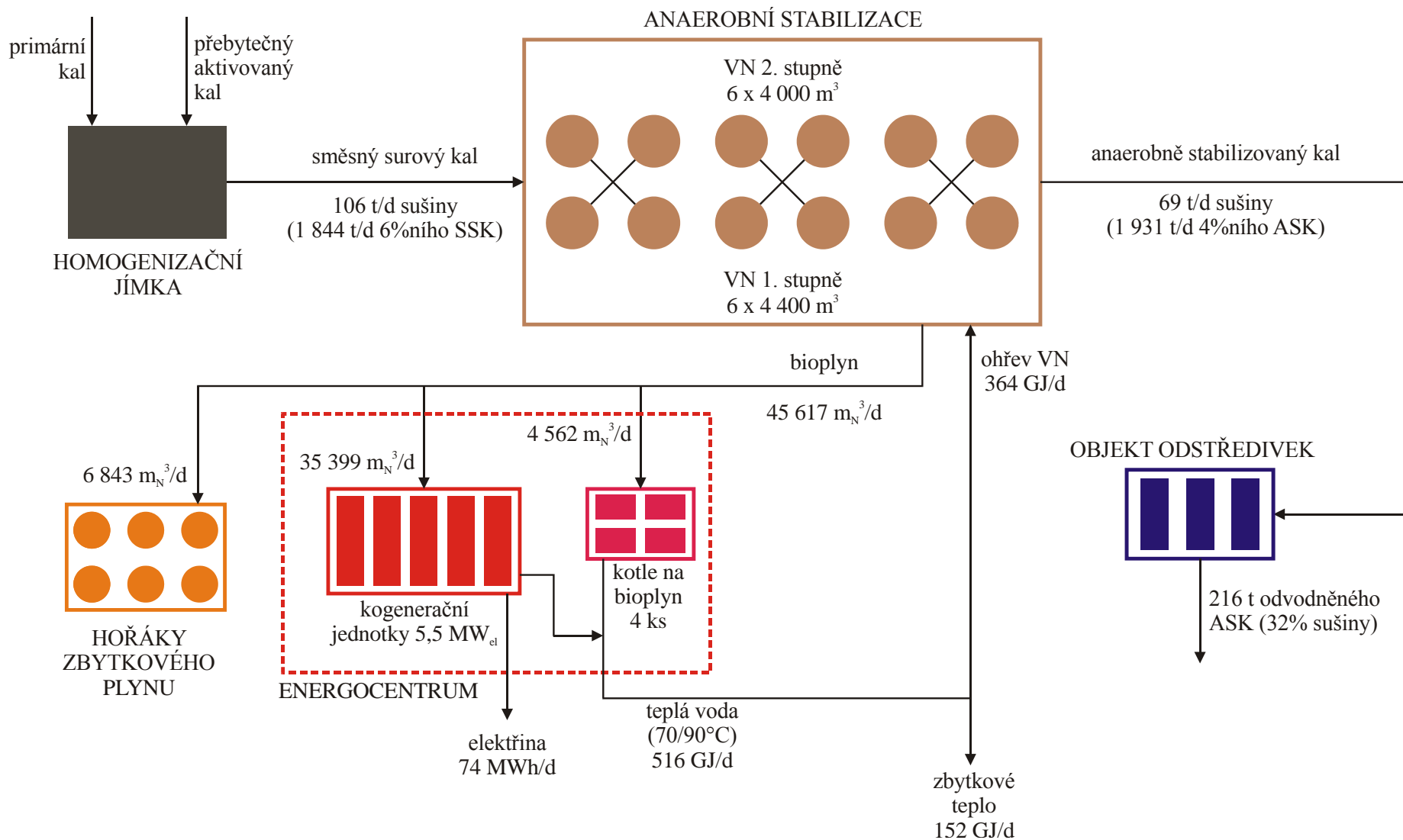
Výše popsaná materiálová a energetická bilance je názorně ukázána na obr. 19. Zahrnuje průměrné hodnoty z let 2004 až 2007, vč. distribuce bioplynu mezi kogenerační jednotky, bioplynové kotle a hořáky zbytkového plynu. Tyto hodnoty byly vypočteny na základě faktu, že průměrná výroba elektřiny v letech 2004 až 2007 je 74,4 MWh/d. Tomu odpovídá využití 77,5 % produkovaného bioplynu v kogeneračních jednotkách. Na obr. 19 jsou

rovněž uvedeny nároky na ohřev směsného surového kalu a na krytí tepelných ztrát vyhnívacích nádrží. Tyto údaje nejsou v [42] až [46] uvedeny, proto byly vypočteny dle vztahů (3.2) a (3.3) se zavedením následujících předpokladů:

- teplota směsného surového kalu je  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- zimní teplota vzduchu je  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zimní teplota půdy je  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- koeficienty přestupu tepla jsou dle [39] voleny  $\alpha_{st} = 0,5\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  a  $\alpha_d = 0,9\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Na základě učiněných předpokladů bylo vypočteno, že na ohřev kalu před vstupem do vyhnívacích nádrží je potřeba  $336,52\text{ GJ/d}$  tepla a na pokrytí tepelných ztrát je potřeba  $27,44\text{ GJ/d}$  tepla. Celkem je tedy nutné zajistit dodávku  $363,96\text{ GJ/d}$  tepla. Zde je nutné podotknout, že se jedná o dodávku tepla nutnou pro chod v zimním období.





Obr. 19 Materiálová a energetická bilance ÚČOV – současný stav

## 4.2 Výhledový stav

Posouzení výkonových parametrů kalového hospodářství ÚČOV po zamýšlené rekonstrukci vychází z projektu „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově“, který má zajistit odpovídající čištění odpadních vod Prahy po roce 2010. V tab. 8 jsou uvedeny základní parametry, které jsou převzaty z uvedeného projektu. Jejich relevantnost je diskutabilní, zejména měrná produkce bioplynu a jeho výhřevnost jsou při porovnání se současným stavem velmi optimistické.

**Tab. 8** Základní parametry kalového hospodářství po rekonstrukci ÚČOV

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
Množství sušiny SSK	t/d	156
Obsah organických látek v sušině SSK	%	69
Množství organických látek v sušině SSK	t/d	107
Množství sušiny ASK	t/d	87
Množství organických látek v sušině ASK	t/d	37
Obsah sušiny v odvodněném kalu	%	33
Denní produkce odvodněného ASK	t/d	263
Produkce bioplynu	$\text{m}_\text{N}^3/\text{d}$	68 729
Výhřevnost bioplynu	$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$	23

Data, která nejsou v projektu specifikována, a jsou potřebná pro detailní výpočet materiálových a energetických bilancí, byla odhadnuta na základě porovnání se současným stavem.

Další potřebné informace byly získány při experimentálních zkouškách provedených během doktorského studia. Jedná se zejména o poloprovozní zkoušky odvodnitelnosti, které byly na ÚČOV realizovány v roce 2005. Menšího rozsahu bylo laboratorní měření reologických vlastností kalu z ÚČOV, které poskytlo data pro výpočty nároků na čerpání apod. Uvedená měření jsou popsána v následující kapitole.

## 4.3 Experimentální testy pro získání vstupních dat

Pro získání potřebných dat týkajících se zejména vlastností kalů bylo provedeno několik experimentálních měření. Nejrozsáhlejší bylo měření odvodnitelnosti kalů na ÚČOV v roce 2005 podrobně popsané v [47]. Cílem tohoto měření bylo získat znalosti o odvodňování směsného surového kalu důležité pro výpočet materiálových a energetických bilancí jeho spalování.

### 4.3.1 Zkoušky na ÚČOV Praha

V průběhu měsíce srpna 2005 byly provedeny rozsáhlé poloprovozní zkoušky odvodnitelnosti SSK a ASK na ÚČOV Praha. Zároveň byly odebrány vzorky

k laboratornímu zjištění některých chemických a fyzikálně-chemických vlastností SSK a ASK.

K odvodňování kalů byla použita mobilní odstředivka KHD Humboldt Wedag o jmenovitém výkonu 12 m<sup>3</sup>/h (viz obr. 20). Mobilní odstředivka byla umístěna ve speciálně upraveném návěsu nákladního vozidla. Součástí celého systému byl tříkomorový systém na míchání flokulantu a vynášecí pásový dopravník.



**Obr. 20** Pohled na mobilní odstředivku (vlevo) a tříkomorový systém na míchání roztoku flokulantu

Měření odvodnitelnosti SSK probíhalo od 8. do 12. srpna 2005, tedy pět dní, přičemž byl každý den k odvodňování použit jiný flokulant. Porovnávání flokulantů od různých výrobců však nebylo cílem zkoušek. Kal do mobilní odstředivky byl čerpán přímo z mokré jímky, k čerpání bylo použito odstředivé čerpadlo FLYGT.

Měření odvodnitelnosti ASK probíhalo od 24. do 25. srpna 2005. Časová prodleva mezi prvním a druhým blokem měření byla zvolena s ohledem na dobu zdržení kalu ve vyhřívacích nádržích. Druhý blok měření trval pouze dva dny, protože ASK se na čistírně odvodňuje běžně a nepředpokládaly se žádné technické problémy. Toto měření bylo provedeno především proto, aby byl získán kompletní soubor dat z jednoho typu odstředivky. ASK byl do mobilní odstředivky čerpán z potrubí, které přivádí vyhnilý kal do odstředivek trvale pracujících na ÚČOV.

Odvodněný kal byl z odstředivky odváděn pásovým dopravníkem do přistaveného kontejneru. Ten byl po naplnění odvážen na rozdělovací objekt a kal se tak vracel na začátek vodní linky čistírny.

### ***Výsledky odvodňování směsného surového kalu***

Přestože cílem měření nebylo porovnávat jednotlivé flokulanty, ukázalo se, že výběr vhodného flokulantu výrazně ovlivnil jak obsah sušiny v odvodněném kalu, tak i kvalitu fugátu. Některé flokulanty totiž reagovaly s kalem velmi pomalu a vločky se začínaly tvořit až v potrubí za odstředivkou. Vzhledem k tomu, že na mobilní odstředivce bylo pouze jedno dávkovací místo flokulantu, nebylo možné tento negativní efekt nijak ovlivnit.

Podrobně jsou dále prezentovány výsledky se dvěma flokulanty, které s kalem výborně reagovaly. Jednalo se o flokulanty firem VTA Engineering und Umwelttechnik s.r.o. a Sokoflok s.r.o.

Výsledky odvodňování směsného surového kalu jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Výsledky odvodňování SSK – flokulanty VTA a Sokoflok

Datum	9. 8. 2005	10. 8. 2005
<i>Flokulanty</i>		
Firma	VTA	
Typ	F098	F096
Měrná spotřeba [kg/t suš.]	8,5	10,5
	Sokoflok	
	Sokoflok 68	
	10,5	
<i>Kal</i>		
Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	9,8	9,9
Vstupní sušina [%]	7,5	7,7
Výstupní sušina [%]	33,0	32,9
NL ve fugátu [mg/l]	1 674	844

Pozn.: NL = nerozpuštěné látky

Firma VTA vytypovala pro odvodňovací zkoušky směsného surového kalu dva flokulanty: F 096 MHW a F 098 MHW. Oba flokulanty výborně reagovaly s SSK. Bylo dosahováno velmi dobrých výsledků obsahu sušiny v odvodněném kalu při poměrně nízké měrné spotřebě flokulantu.

Flokulant SOKOFLOK 68 rovněž velmi dobře reagoval s SSK. Z odstředivky vypadal odvodněný kal jemné granulometrie, u kterého byl stanoven obdobný obsah sušiny jako u předchozích flokulantů. Měrná spotřeba flokulantu však bylo o něco vyšší.

Na obr. 21 jsou uvedeny doplňující fotografie pro ilustraci vzhledu odvodněného kalu a odebíraných vzorků fugátu.



Obr. 21 Vzhled odvodněného kalu a fugátu s použitím flokulantů VTA F 096 MHW a F 098 MHW

Poloprovozními zkouškami odvodňování směsného surového kalu bylo prokázáno, že tento kal je možné odvodnit od přibližně 25 do 33 % sušiny. Jak bylo zmíněno výše, výraznou roli na výsledcích sehrály použité flokulanty. Lze ovšem očekávat, že v provozním měřítku a při ustáleném chodu odvodňovacího zařízení by bylo dosahováno obsahu sušiny kolem 35 %.

**Výsledky fyzikálně-chemických rozborů směsného surového kalu**

Při výpočtech energetických bilancí je nutné znát pro stanovení množství a složení spalin složení spalitelné části kalu. V tab. 10 jsou tedy uvedeny výsledky elementárních analýz vzorků, které byly odebírány každý den měření, a dále průměrná hodnota z celého týdne.

**Tab. 10 Složení spalitelné části směsného surového kalu**

<i>Datum</i>	8. 8. 2005	9. 8. 2005	10. 8. 2005	11. 8. 2005	<i>průměr</i>
<i>Složení sušiny [%]</i>					
Hořlavina	68,45	64,05	65,63	72,15	67,57
Popeloviny	31,55	35,95	34,37	27,85	32,43
<i>Složení hořlaviny [%]</i>					
C	62,64	55,39	59,19	63,84	60,27
H	8,03	6,71	5,03	6,26	6,51
O	23,09	28,39	27,93	20,14	24,89
N	6,24	9,52	7,86	9,79	8,35
S	0	0	0	0	0

V jednom vzorku SSK byl dále stanoven obsah vybraných těžkých kovů. Výsledky provedeného rozboru jsou uvedeny v tab. 11.

**Tab. 11 Obsah těžkých kovů ve směsném surovém kalu**

<i>Prvek</i>	<i>Obsah [mg/kg sušiny]</i>
Cr	37,5
Cd	2,0
Pb	54,0
Hg	2,45
Tl	<10

Pro energetické bilance je nezbytně nutné znát spalné teplo a výhřevnost kalu. U vzorků odebraných během měření byla spalná tepla stanovena kalorimetricky, výhřevnost dopočtem. Výsledky provedených rozborů jsou uvedeny v tab. 12.

**Tab. 12 Spalné teplo a výhřevnost sušiny směsného surového kalu**

	8. 8. 2005	9. 8. 2005	10. 8. 2005	11. 8. 2005	průměr
Spalné teplo [MJ/kg]	16,82	15,71	15,85	17,45	16,46
Výhřevnost [MJ/kg]	15,67	14,63	14,76	16,25	15,33
Fluor [%]	0,070	0,045	0,029	0,023	0,042
Chlor [%]	0,047	0,054	0,049	0,045	0,049

### **Výsledky odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu**

Měření odvodnitelnosti vyhnílého kalu probíhalo pouze dva dny. Podrobné výsledky jsou opět uvedeny pro flokulanty VTA a SOKOFLOK.

Při odvodňování ASK s flokulantem firmy SOKOFLOK bylo dosaženo nejlepších výsledků v tomto bloku. Obsah sušiny v odvodněném kalu i čistota fugátu se blížily k provozním výsledkům, pouze měrná spotřeba flokulantu byla až dvojnásobná. S flokulanty firmy VTA bylo dosaženo podobných výsledků jako s flokulanty firmy SOKOFLOK, pouze kvalita fugátu byla horší. Tyto flokulanty však byly určeny firmou VTA na odvodňování směsného surového kalu (na základě rozboru kalu provedeného firmou před vlastním výběrem vhodného flokulantu). Výsledky jsou shrnuty v tab. 13, vzhled odvodněného kalu a fugátu dokumentuje obr. 22.

**Tab. 13 Výsledky odvodňování ASK – flokulanty VTA a Sokoflok**

<i>Datum</i>	24. 8. 2005	25. 8. 2005	
<i>Flokulanty</i>			
Firma	Sokoflok	VTA	
Typ	Sokoflok 68	F098	F096
Měrná spotřeba [kg/t suš.]	21,0	16,9	20,0
<i>Kal</i>			
Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	10,0	10,2	10,2
Vstupní sušina [%]	3,2	4,2	4,3
Výstupní sušina [%]	35,3	34,9	36,0
NL ve fugátu [mg/l]	502	2 463	2 440

Na obr. 22 jsou uvedeny doplňující fotografie pro ilustraci vzhledu odvodněného kalu a odebíraných vzorků fugátu.



Obr. 22 Vzhled odvodněného kalu a fugátu s použitím flokulantu Sokoflok 68 (vlevo) a VTA (vpravo)

Poloprovozními zkouškami odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu bylo dosahováno obsahu sušiny v odvodněném kalu od přibližně 29 do 36 %. Teplota kalu na vstupu do odstředivky se pohybovala okolo 40 °C. Měrná spotřeba flokulantu byla velmi vysoká a rovněž kvalita fugátu byla horší. V literatuře [13] se uvádí, že koncentrace nerozpuštěných látek ve fugátu by měla být vždy méně než 1000 mg/l. Tato hodnota však byla překročena se všemi flokulanty s výjimkou flokulantu SOKOFLOK 68.

#### *Výsledky fyzikálně-chemických rozborů anaerobně stabilizovaného kalu a bioplynu*

Stejně jako vzorky SSK, byly i vzorky ASK podrobeny analýzám, kterými byly zjištěny: elementární analýza hořlavé části kalu (tab. 14), obsah těžkých kovů (tab. 15) a spalné teplo (tab. 16).

Tab. 14 Složení spalitelné části anaerobně stabilizovaného kalu

Datum	24. 8. 2005	25. 8. 2005	průměr
<i>Složení sušiny [%]</i>			
Hořlavina	49,63	48,78	49,21
Popeloviny	50,37	51,22	50,795
<i>Složení hořlaviny [%]</i>			
C	60,12	65,27	62,70
H	8,56	7,97	8,27
O	24,26	14,63	19,45
N	7,06	7,69	7,38
S	0	4,44	2,22

**Tab. 15** Obsah těžkých kovů v anaerobně stabilizovaném kalu

<i>Prvek</i>	<i>Obsah [mg/kg sušiny]</i>
Cr	78,7
Cd	2,76
Pb	100
Hg	2,9
Tl	<10

**Tab. 16** Spalné teplo a výhřevnost sušiny anaerobně stabilizovaného kalu

	24. 8. 2005	25. 8. 2005	<i>průměr</i>
Spalné teplo [MJ/kg]	12,17	12,19	12,18
Výhřevnost [MJ/kg]	11,22	11,23	11,23
Fluor [%]	0,038	0,037	0,038
Chlor [%]	0,056	0,064	0,060

#### 4.3.2 Reologické chování kalu

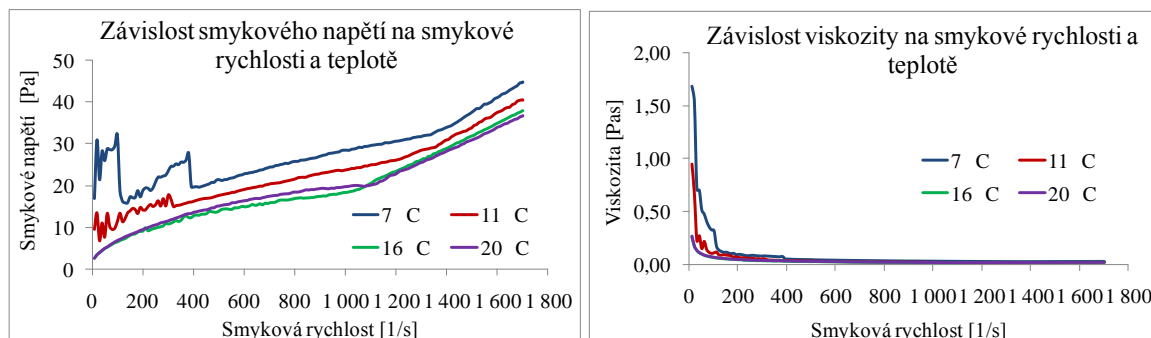
Znalost tokových vlastností kalu je důležitá zejména pro návrh čerpadel, protože při vymístění kalového hospodářství bude nutné kal čerpat do vzdálenosti přibližně 8 km, což není zcela běžné. Reologické chování kalu je poměrně složité a nelze pro něj použít jednoduchý zobecňující popis. V závislosti na obsahu a charakteru pevných částic, na smykové rychlosti i na typu a úpravě kalu se tento může chovat jako newtonská, převážně však jako neneutronská kapalina. Na ÚPEI se již delší dobu zabýváme měřením reologických vlastností kalů a některé výsledky byly publikovány např. v [48], [49].

Speciálně pro potřeby této práce byl odebrán vzorek SSK a ASK na ÚČOV Praha, u vzorků pak byla stanovena viskozita a hustota. Vzorky nebyly před měřením nijak upraveny, obsah sušiny byl stanoven na 5,26 % u SSK a 3,15 % u ASK. Pro měření byl zvolen teplotní interval 5 až 20 °C.

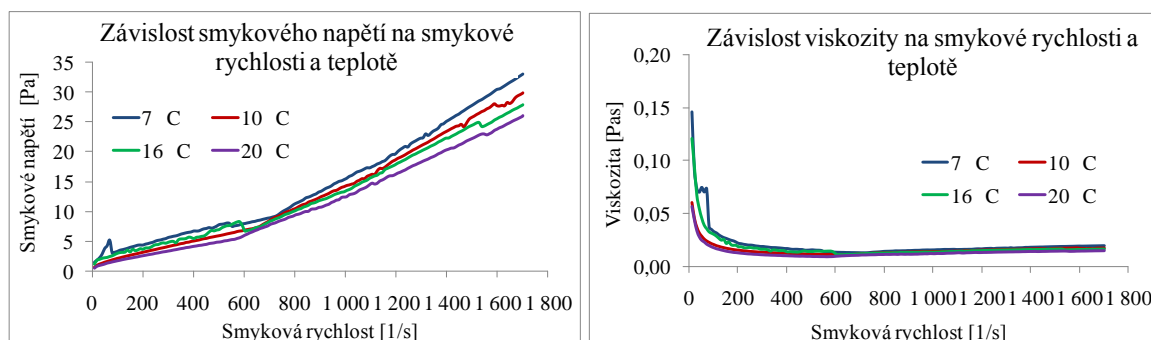
#### *Viskozita kalů z ÚČOV Praha*

Viskozita, resp. smykové napětí bylo měřeno v celém rozsahu smykových rychlostí, který dovoluje použitý přístroj (reometr RheolabQC vybavený temperační komorou a měřicím systémem CC39). Data naměřená přístrojem byla pomocí softwaru RheolabQC Data Export převedena do .xls souborů. Grafické znázornění získaných dat je uvedeno na obr. 23 (SSK) a obr. 24 (ASK).





Obr. 23 Reologické chování směšného surového kalu



Obr. 24 Reologické chování anaerobně stabilizovaného kalu

Jak je patrné z uvedených grafů, v daném teplotním rozmezí je viskozita obou typů kalu jen málo závislá na teplotě, zatímco závislost viskozity na smykové rychlosti je mnohem výraznější.

#### *Hustota kalů z ÚČOV Praha*

Hustota vzorků byla stanovena pyknometricky. Vzhledem k charakteru vzorku byly použity speciální pyknometry, které jsou tvořeny odměrnou baňkou 500 ml a zábrusovou zátkou opatřenou kapilárním otvorem pro odtok přebytečného vzorku. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 17.

Tab. 17 Hustota směšného surového a anaerobně stabilizovaného kalu z ÚČOV Praha

Teplota [°C]	Hustota SSK [kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota ASK [kg/m <sup>3</sup> ]
7	993,96	1 020,14
10	992,18	1 019,96
15	981,16	1 019,43
20	965,87	1 017,83

Jak je patrné z tabulky, na teplotě je v daném intervalu více závislá hustota SSK. Zatímco u ASK klesla hustota o pouhé 0,2 %, u SSK činil tento pokles 2,8 %.

#### 4.4 Simulační výpočty vybraných alternativ

Volba vhodné technologie pro konkrétní kalovou koncovku musí vycházet jak z energetického, tak z ekonomického posouzení. Dále musí zohledňovat konkrétní lokální podmínky.

Pokud bychom uvažovali obecnou čistírnu odpadních vod, je množství možných technologií kalových koncovek velmi vysoké. Můžeme uvažovat různé typy stabilizace kalu, různé způsoby jeho úpravy, případně finálního zpracování kalu. ÚČOV je však velmi specifická, a to nejen svojí velikostí, ale také lokalitou a podmínkami kladenými na volbu kalové koncovky. Jak již bylo zmíněno, ÚČOV byla vybudována na Císařském ostrově, kde je omezený prostor k rozšiřování jak vodní linky, tak kalového hospodářství. Proto je již nyní uvažováno, že kalové hospodářství ÚČOV bude vymístěno do lokality Drasty, kde jsou v současnosti pouze kalové laguny (viz obr. 25).

Vymístění kalového hospodářství se předpokládá ne dříve než v roce 2015. Jedná se o závažnou informaci z hlediska návrhu kalové koncovky. Protože přesný rok vymístění není znám, je pro potřeby této práce uvažováno, že do roku 2020 bude kalové hospodářství součástí ÚČOV, tedy zůstane na Císařském ostrově. Po roce 2020 bude kalové hospodářství provozováno v lokalitě Drasty, kde bude vybudováno v podstatě na zelené louce. Rok 2020 byl volen s ohledem na to, že zatím nejsou zahájeny ani práce na rekonstrukci vodní linky a že veškeré plánované termíny budou výrazně zpožděny.

Analyzovaná řešení jsou tedy rozdělena na dvě skupiny. Jednak jsou to řešení krátkodobá, která vycházejí ze současné koncepce kalového hospodářství, pouze zohledňují zvýšené množství produkovaných kalů.

Řešení dlouhodobá již poskytují prostor i pro jiné technologie, než je pouze anaerobní stabilizace, a to díky předpokladu, že kalové hospodářství bude vybudováno na zelené louce. Přesto však i zde je omezený počet zvažovaných technologií na dvě základní, a to na anaerobní stabilizaci a na spalování směsného surového kalu. Tyto technologie byly voleny s ohledem na to, že jsou vhodné pro zpracování velkého množství vstupního materiálu a že mohou určitým způsobem přinést užitek provozovateli. Při anaerobní stabilizaci je tím užitek produkce bioplynu, při přímém spalování je to minimalizace odpadu ve formě inertního popela.



Obr. 25 Poloha Císařského ostrova a lokality Drasty

#### 4.4.1 Charakteristika vybraných alternativ

Jak již bylo uvedeno výše, jsou samostatně posuzována vybraná krátkodobá a dlouhodobá řešení. Vzhledem k produkovanému množství kalu jsou uvažovány následující technologie jeho zpracování:

- **Anaerobní stabilizace:** V případě krátkodobého řešení je nutné navýšit počet vyhnívacích nádrží na Císařském ostrově, rovněž bude nutné zvýšit počet kogeneračních jednotek a uskladňovacích nádrží. V případě vymístění kalového hospodářství do lokality Drasty se jedná o kompletní výstavbu manipulačních nádrží, vyhnívacích nádrží a objektu odstředivek. V Drastech navíc musí být vybudováno i kompletní energocentrum.
- **Sušení kalu:** Pro sušení kalu je nezbytné zajistit dostatečný zdroj tepla. V případě umístění kalového hospodářství na Císařském ostrově je možné k sušení kalu využít přebytečný bioplyn. Podmínkou k takovému kroku je provedení důkladné energetické bilance, jejímž výsledkem je stanovení množství přebytečného bioplynu, resp. nastavení vhodného poměru využití bioplynu v kogeneračních jednotkách a bioplynových kotlích. V případě vymístění kalového hospodářství do Drastů lze uvažovat výstavbu vyhnívacích nádrží, a pak je možné sušit kal bioplynem, nebo spalovny, a pak je možné kal sušit odpadním teplem nebo párou.
- **Spalování:** Spalovat je možné v zásadě buď přímo směsný surový kal, nebo kal vyhnílý. Spalovna kalu v žádném případě nemůže být postavena na Císařském ostrově (viz dále). Protože zatím neproběhl žádný seriózní průzkum situace v Drastech, předpokládá se v této práci, že zde by spalovna být postavena mohla. Jednalo by se o výstavbu na zelené louce. Další možnou lokalitou pro výstavbu spalovny kaly je areál Závodu na energetické využití odpadu (ZEVO) Malešice, kde v současné době stojí spalovna tuhého komunálního odpadu. Zde by bylo možné napojit spalovnu kalu na připravované energocentrum, proto je v práci uvažováno s tím, že spalovna kalu bude vyrábět páru stejných parametrů jako spalovna TKO.

V případě variant, které uvažují spalování kalu, bude výsledným odpadem inertní popel. Jeho následné využití by bylo závislé na jeho vlastnostech, v ideálním případě je to např. materiálové využití ve stavebnictví nebo na výrobu rekultivačních směsí, v nejhorším případě přichází do úvahy skládkování popela.

V případě, že finálním zpracováním kalu bude anaerobní stabilizace, pak bude odpadem anaerobně stabilizovaný kal. V této práci je uvažováno, že bude kompostován, protože limity po použití v zemědělství nebývají vždy splněny.

Jak bylo popsáno výše, koncepce kalového hospodářství na ÚČOV musí sestávat z krátkodobého řešení, na které bude navazovat řešení dlouhodobé (po vymístění kalového hospodářství z Císařského ostrova). Krátkodobá i dlouhodobá řešení jsou navržena pro produkci kalu po rekonstrukci vodní linky ÚČOV, a tedy navýšení produkce sušiny směsného surového kalu na 156 t/d.

**Krátkodobá řešení**

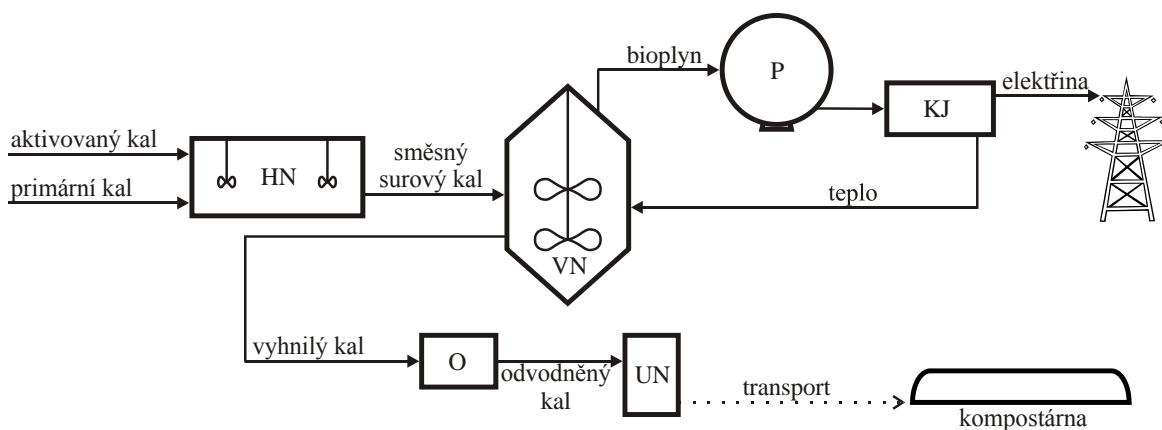
Koncepce krátkodobých řešení jsou situovány na Císařský ostrov. Magistrát hl. města Prahy si výslovně nepřeje, aby zde byl kal jakkoliv tepelně upravován. Tím je myšleno jak spalování kalu, tak i jeho sušení. Tento požadavek je pochopitelný z hlediska odporu veřejnosti ke spalovnám obecně. Co se týče sušárny, její technické řešení lze provést tak, aby architektonickým řešením, hlukem ani zápachem neobtěžovala okolí, problematické však bude umístění sušárny na ostrově, kde není prakticky dostatek místa.

Návrh jednotlivých variant respektuje to, že reálně není možné vystavět spalovnu na Císařském ostrově. Sušárna kalu však může přispět ke snížení množství kalu odváženého z Císařského ostrova, proto je s touto možností v navržených variantách uvažováno.

Krátkodobá řešení dále zohledňují v současnosti probíhající rekonstrukce vyhnívacích nádrží. Jedná se o investičně náročné akce a je velice pravděpodobné, že nebude vůle ani ze strany magistrátu ani ze strany provozovatele ÚČOV stupeň vyhnívání v krátkodobém horizontu zrušit. Proto všechny varianty krátkodobého řešení zachovávají vyhnívání na Císařském ostrově.

**K1: Zachování současné koncepce.**

Při zachování současné koncepce zpracování směsného surového kalu nedojde k žádné technologické změně, nutné je pouze navýšit zpracovatelskou kapacitu jak vyhnívacích nádrží, tak dalších aparátů. Navýšení produkce kalu bude mít dopad nejen na vlastní kalové hospodářství, ale rovněž na logistiku a kompostárnu kal zpracovávající. Zjednodušené schéma této koncepce je uvedeno na obr. 26.



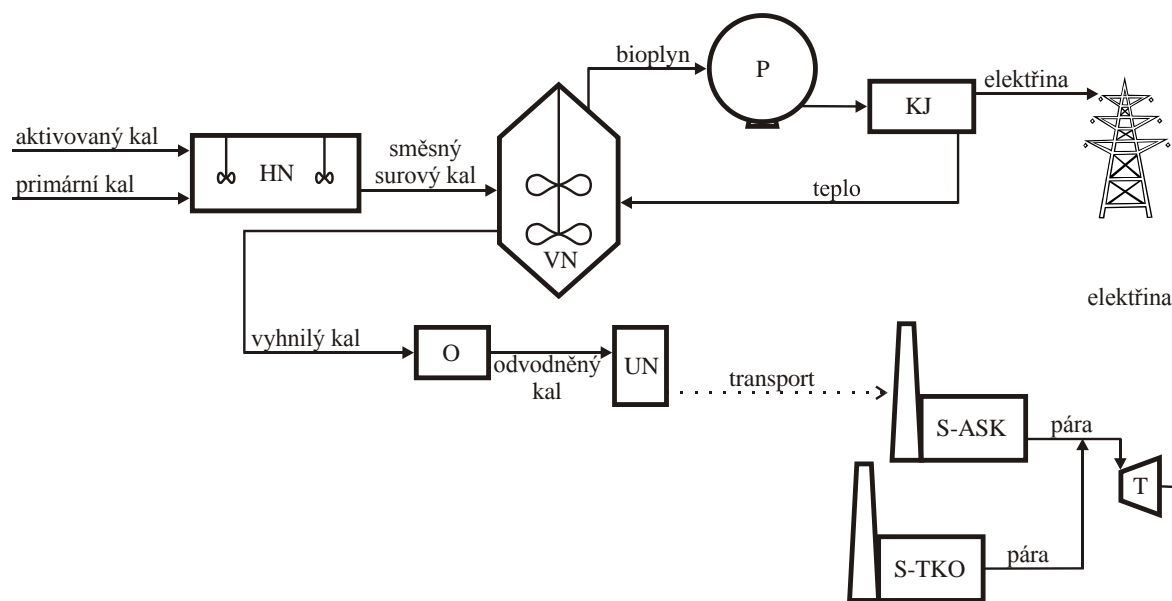
HN - homogenizační nádrž, KJ - kogenerační jednotky, O - odstředivky,  
P - plynojem, UN - uskladňovací nádrže, VN - vyhnívací nádrže

**Obr. 26 Zjednodušené schéma varianty K1**

**K2: Spalování vyhnilého kalu ve spalovně kalu v ZEVO Malešice.**

Kalové hospodářství na Císařském ostrově bude stejné jako u varianty K1. Místo na kompostárnu bude kal odvážen do spalovny vybudované v areálu ZEVO Malešice. U této varianty je nutné posoudit zejména efektivnost spalování odvodněného stabilizovaného

kalu, který má velmi nízkou výhřevnost, a předsušeného kalu. Je tedy nutné provést rozbor možnosti sušení kalu, a to buď přímo na Císařském ostrově nebo až v ZEVO. Při rozhodování o finální variantě bude hrát roli i finanční náročnost varianty, proto je nutné vyhodnotit rovněž investiční a provozní náklady spalovny vybudované v ZEVO. Výstavba spalovny kalu v ZEVO může přinést investiční i provozní úspory v tom smyslu, že systém využití páry k výrobě elektrické energie může být propojen se stávající spalovnou TKO (viz obr. 27). Problematické na druhou stranu může být zpracování kondenzátu ze sušení kalu.



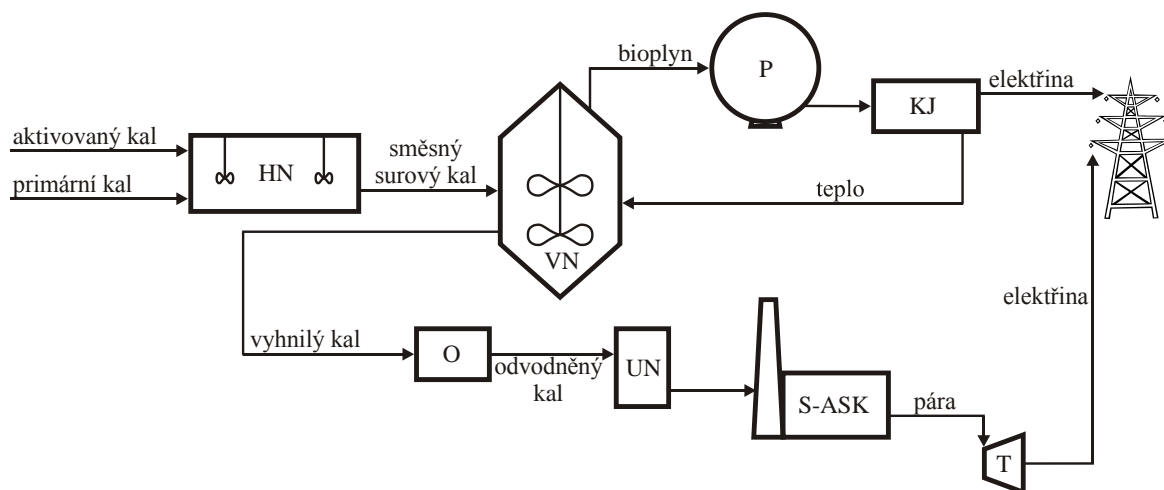
HN - homogenizační nádrž, KJ - kogenerační jednotky, O - odstředivky, P - plynojem,  
S-ASK - spalovna anaerobně stabilizovaného kalu, S-TKO - stávající spalovna tuhého komunálního odpadu,  
T - parní turbína, UN - uskladňovací nádrže, VN - vyhňovací nádrže

**Obr. 27 Zjednodušené schéma varianty K2**

### *K3: Spalování vyhnilého kalu ve spalovně kalu v Drastech.*

Kalové hospodářství zůstane stejné jako u varianty K1. Současně s rekonstrukcí a rozšířením stávajícího kalového hospodářství započne výstavba spalovny (a sušárny) kalu v Drastech (viz obr. 28). Vyhnilý kal může být dopraven do Drastů buď potrubím (v neodvodněném stavu) nebo odvodněný nákladní automobilovou dopravou (na obr. 28 není vyznačeno). V případě potrubní dopravy je nutné vybudovat potrubní trasu potřebné kapacity, navrhnout čerpadla dostatečného výkonu a přemístit odstředivky z Císařského ostrova do Drastů, kde bude nutné vybudovat nový objekt odstředivek. Rovněž je nutné vzít v úvahu, že fugát musí být dopraven zpět na ÚČOV.

Při výstavbě spalovny v Drastech je nutné posoudit investiční a provozní náklady s ohledem na možnost využití tepla spalin. Vzhledem k předpokládané nutnosti předsušit vyhnilý kal před vlastním spalováním bude pravděpodobně nutné část tepla využít na sušení, zbytek pak může být využit k produkci elektrické energie. Vhodné využití tepla spalin je jedním ze základních výstupů materiálových a energetických bilancí.



HN - homogenizační nádrž, KJ - kogenerační jednotky, O - odstředivky, P - plynojem,  
 S-ASK - spalovna anaerobně stabilizovaného kalu, T - parní turbína,  
 UN - uskladňovací nádrže, VN - vyhnívací nádrže

**Obr. 28** Zjednodušené schéma varianty K3

### ***Dlouhodobá řešení***

Jak již bylo uvedeno výše, v dlouhodobém horizontu je plánováno vymístění celého kalového hospodářství do Drast. Tento krok uvolní prostor na Císařském ostrově pro případné navyšování kapacity vodní linky čistírny nebo pro budoucí doplnění potřebných technologií. V případě vymístění kalového hospodářství zůstane na Císařském ostrově zachována pouze homogenizační jímka, kam budou čerpány kaly produkované v různých fázích čištění odpadní vody. Z homogenizační jímky se předpokládá čerpání směsného surového kalu do Drast. V Drastech je v současné době pouze odkaliště určené k odvodnění nepatrné části vyhníklých kalů z Císařského ostrova. Je tedy zřejmé, že zde není žádná technologie, která by mohla být v budoucnu využita.

#### *D1: Anaerobní stabilizace kalu v Drastech a následné kompostování kalu.*

Tato koncepce vychází ze současného stavu. Je v podstatě stejná jako varianta K1, pouze v jiné lokalitě.

#### *D2: Anaerobní stabilizace kalu v Drastech a jeho spalování v ZEVO Malešice.*

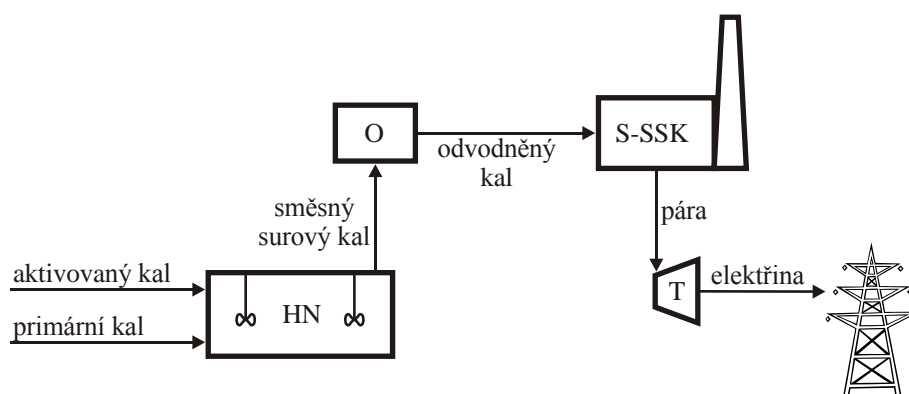
Tato varianta z dlouhodobého hlediska navazuje na variantu K2. Při její realizaci tedy dojde pouze k vybudování nového kalového hospodářství v Drastech (anaerobní stabilizace) a vyhníklý kal bude odvážen ke spalování do spalovny kalu v ZEVO Malešice stejně jako v případě varianty K2.

*D3: Anaerobní stabilizace kalu v Drastech a jeho spalování ve spalovně kalu v Drastech.*

Tato varianta navazuje na variantu K3, v rámci které je vybudována v Drastech spalovna kalu. Při vymístění kalového hospodářství do Drastů tak zbývá dobudovat pouze anaerobní stabilizaci.

*D4: Spalování směsného surového kalu ve spalovně v Drastech.*

Spalování směsného surového kalu (obr. 29) je možné uvažovat pouze v případě, že je spalovna kalu vybudována v místě vzniku kalu. V tomto případě se sice nejedná o místo vzniku, ale o cílové místo potrubní dopravy produkovaného kalu. Před vlastním spalováním je nutné kal odvodnit podobně jako kal vyhnílý. Z výše pospaných zkoušek je patrné, že směsný surový kal lze odvodnit na podobné hodnoty sušiny jako kal vyhnílý. Takový kal má, stejně jako kal vyhnílý, malou výhřevnost a bude nutné ho před vlastním spalováním alespoň částečně vysušit, aby mohlo být spalování zajištěno bez přídavného paliva. Protože tato varianta nenabízí k sušení žádný bioplyn, bude sušení zajištěno párou vyráběnou ve spalovně kalu.



HN - homogenizační nádrž, O - odstředivky,  
S-SSK - spalovna směsného surového kalu, T - parní turbína

**Obr. 29** Zjednodušené schéma varianty D4

#### 4.4.2 Vstupní data pro simulační výpočty

Základním údajem, ze kterého vycházejí veškeré provedené simulace, je množství kalu produkovaného po rekonstrukci. Jedná se o předpokládanou produkci 156 t/d sušiny SSK s obsahem organických látek v sušině 69 %. Dalším důležitým vstupním údajem je množství anaerobně stabilizovaného kalu, které činí 87 t/d sušiny. Ostatní data, která do bilancí vstupují, jsou odvozena na základě vyhodnocení současného provozu ÚČOV, provedených poloprovozních a laboratorních měření, literární rešerše a osobních konzultací. Pro každý dílčí bilancovaný proces (anaerobní stabilizace, spalování a sušení) jsou vstupní data podrobně rozebrána v dalších kapitolách.



**Anaerobní stabilizace**

Projekt „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově“ předpokládá, že po rekonstrukci bude produkováno  $68\,729\text{ m}_N^3/\text{d}$  bioplynu s výhřevností  $23\text{ MJ}/\text{m}_N^3$  (viz tab. 8). To by při uvažovaném množství organických látek vstupujících do procesu anaerobní stabilizace znamenalo, že měrná produkce bioplynu bude  $0,64\text{ m}_N^3/\text{kg}$  org. látek a bioplyn bude obsahovat 64,2 % metanu (oproti současnému průměru 62,1 %). Protože není ověřeno, že po rekonstrukci ÚČOV skutečně dojde ke zvýšení měrné produkce, jsou veškeré bilance počítány pro současnou měrnou produkci bioplynu  $0,62\text{ m}_N^3/\text{kg}$  org. látek a z projektu je převzata pouze uvažovaná výhřevnost bioplynu.

Dále je oproti údaji o obsahu organiky v sušině anaerobně stabilizovaného kalu uvedeném v tab. 8 dopočtem přes podíl anorganické složky stanoven obsah organiky v ASK na 44,5 %. Základem pro tento výpočet je údaj o produkováném množství anaerobně stabilizovaného kalu a předpoklad, že anorganické látky rozkladu nepodléhají. Další potřebné údaje jsou uvedeny v tab. 18.

**Tab. 18** Vstupní údaje pro výpočet materiálové a energetické bilance anaerobní stabilizace

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
Sušina v SSK	%	5,75
Teplota ve VN	°C	55
Sušina v ASK	%	3,58
Sušina v odvodněném kalu (ASK nebo SSK)	%	33
Produkce bioplynu	$\text{m}_N^3/\text{d}$	66 946
Výhřevnost sušiny SSK	MJ/kg	15,33
Výhřevnost sušiny ASK	MJ/kg	11,23

Tepelné ztráty vyhnívacích nádrží (VN) jsou počítány na základě údajů uvedených v tab. 19. Rozměry vyhnívacích nádrží jsou vypočteny ze známých objemů a průměrů odečtených z výkresové dokumentace ÚČOV Praha (není součástí této práce). V bilancích jsou uvažovány dva typy vyhnívacích nádrží. Staré vyhnívací nádrže mají objem  $4\,400\text{ m}^3$ , u nových se předpokládá objem  $6\,500\text{ m}^3$ . Průměr starých i nových nádrží je 20 m. Výška starých VN je 14 m, výška nových VN je 20,7 m. V současné době je na ÚČOV instalováno  $14,3\text{ m}^3$  vyhnívacích nádrží 1. stupně na denní produkci  $1\text{ m}^3$  SSK. Po navýšení produkce kalu bude jeho objem  $2\,594\text{ m}^3/\text{d}$  při očekávané sušině 6 %. Pro krátkodobé řešení je nutná výstavba dvou nových vytápěných VN (lokalita Císařský ostrov). V případě vymístění kalového hospodářství do lokality Drasty budou všechny nádrže nové, tedy o objemu  $6\,500\text{ m}^3$ , a pro pokrytí produkce kalu je třeba vybudovat celkem šest vytápěných vyhnívacích nádrží 1. stupně. Přestože jsou veškeré bilance počítány pro průměrné roční hodnoty, tepelné ztráty VN jsou počítány pro zimní období. Tehdy jsou požadavky na dodávky tepla největší, a pokud by byly uvažovány průměrné roční hodnoty, výsledky bilancí by byly neoprávněně optimistické.

Pro výpočet tepelných ztrát nádrží je uvažováno doporučení uvedené v [41], že při termofilní anaerobní stabilizaci má být tloušťka izolace stěn a stropu taková, aby koeficient přestupu tepla byl maximálně  $0,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Tento koeficient přestupu tepla je použit jak pro nové tak i pro staré vyhnivací nádrže (předpokládá se jejich rekonstrukce vč. modernizace izolace).

**Tab. 19** Vstupní údaje pro výpočet tepelných nároků anaerobní stabilizace

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Císařský ostrov</i>	<i>Drasty</i>
Počet VN 4 400 m <sup>3</sup>	ks	6	-
Počet VN 6 500 m <sup>3</sup>	ks	2	6
Plocha plášťů a stropů VN	m <sup>2</sup>	10 392	9 684
Plocha dna VN	m <sup>2</sup>	2 512	1 884
Koeficient přestupu tepla pro stěnu a strop	W/m <sup>2</sup> .K	0,2	
Koeficient přestupu tepla pro dno	W/m <sup>2</sup> .K	0,9	
Průměrná teplota okolí v zimním období	°C	-10	
Průměrná teplota půdy v zimním období	°C	5	

Produkováný bioplyn musí v první řadě vždy pokrýt tepelné nároky anaerobní stabilizace. Do bilance není zahrnuto teplo potřebné na vytápění provozních budov v zimním období. V rámci této práce bude dále kladen důraz na maximální produkci „zelené“ elektřiny. Prvotním předpokladem tedy je, že 95 % bioplynu je spalováno v kogeneračních jednotkách (KJ). Zbýlých 5 % zahrnuje úniky bioplynu nebo je spalováno na hořácích zbytkového plynu při havarijním stavu některé KJ. Pro výpočet výroby elektřiny a tepla jsou použity účinnosti KJ zjištěné od pracovníků ÚČOV: elektrická účinnost 34 %, celková účinnost 88 %. Teplo vyrobené v KJ je uvažováno ve formě teplé vody (70/90 °C), tzn., že i spaliny vznikající spalováním bioplynu předávají své teplo vodě ve výměníku spaliny-voda.

### Sušení

Pro výpočet energetické náročnosti sušení kalu byla volena vstupní data uvedená v tab. 20. Podmínky sušení jsou zvoleny zcela obecně, nevztahují se k žádnému konkrétnímu typu sušárny. Pro výpočet energetické bilance jsou uvažovány ztráty sušárny ve výši 5 % tepla potřebného na vysušení kalu.

**Tab. 20 Vstupní data pro výpočet bilance sušení kalu**

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
Vstupní teplota kalu	°C	10
Teplota sušení	°C	105
Tlak v sušárně	kPa	98
Měrná tepelná kapacita sušiny kalu	kJ/kg.K	2
Entalpie vody při 10 °C	kJ/kg	42,09
Entalpie vodní páry při 105 °C	kJ/kg	2 686,55
Entalpie vody v bodu varu	kJ/kg	415,14

### Spalování

Pro výpočet materiálové a energetické bilance spalování kalu není možné využít provozní data, protože v ČR zatím není tato technologie instalována. Vstupní data tedy vycházejí z provedené literární rešerše. Pro potřeby této práce jsou uvažovány tyto předpoklady:

- organický podíl kalu je tvořen prvky stanovenými elementární analýzou (C, H, N, O a S), při výpočtu množství a složení spalin jsou tyto prvky krom dusíku oxidovány na CO<sub>2</sub> (uvažováno dokonalé spalování, kdy nevzniká CO), H<sub>2</sub>O a SO<sub>2</sub>, dusík přechází na dvouatomový plyn N<sub>2</sub>,
- prohoření materiálu není dokonalé, v popelu je uvažován nedopal 2 % vyjádřený jako obsah organiky v suchém popelu,
- teplota popela je stejná jako teplota spalin a měrná tepelná kapacita popela je volena 1,5 kJ/kg.K,
- nedochází k úletu pevných částic ve spalinách,
- tepelné ztráty spalovací pece jsou uvažovány ve výši 4 % tepla vneseného kalem.

Složení organické části sušiny kalu rovněž vychází z měření provedených na ÚČOV a je uvedeno v tab. 21.

**Tab. 21** Elementární analýza organické části SSK a ASK

<i>Prvek</i>	<i>Obsah [%]</i>	
	<i>SSK</i>	<i>ASK</i>
C	60,27	62,70
H	6,51	8,27
O	24,89	19,45
N	8,35	7,38
S	0	2,22

Základním požadavkem na spalování kalu je dosažení zákonem požadované teploty spalin 850 °C. Tato teplota je uvažována jak při spalování ASK, tak při spalování SSK. Ten díky své infekčnosti hodnotíme jako nebezpečný odpad. Obsah Cl v sušině SSK byl ale stanoven menší než 1 %, a proto není nutné zajistit zdržení vznikajících spalin na teplotě 1 100 °C.

Důležitým parametrem při spalování je přebytek spalovacího vzduchu. Ačkoliv to dnes již zákon nevyžaduje, přebytek vzduchu je vypočítán pro výsledný obsah 6 obj. % kyslíku v suchých spalinách. Pro spalování je uvažován vzduch o vlhkosti 70 % a tlaku 98 kPa. Jeho složení je vypočteno ze složení suchého vzduchu uvedeného v tab. 22 při teplotě 10 °C.

**Tab. 22** Složení suchého vzduchu [48] a složení vlhkého vzduchu zadaných parametrů

<i>Složka</i>	<i>Suchý vzduch</i>	<i>Vlhký vzduch</i>
	<i>Objemový podíl [obj. %]</i>	
H <sub>2</sub> O	-	0,87
CO <sub>2</sub>	0,03	0,03
O <sub>2</sub>	21,00	20,82
N <sub>2</sub>	78,05	77,37
Ar	0,92	0,91

Pro výpočet entalpie spalin byly použity hodnoty uvedené v [50], podle kterých byly sestaveny vztahy pro výpočet entalpie dané plynné složky při požadované teplotě. Vztahy (4.1) až (4.6) byly sestrojeny pomocí softwaru Microsoft Excel pro grafické závislosti uvedené v Příloze 1.

$$h_{H_2O} = 2,551 + 1,4454 \cdot T + 0,0003 \cdot T^2 + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 \quad [kJ/m_N^3] \quad (4.1)$$

$$h_{CO_2} = -2,686 + 1,6758 \cdot T + 0,0008 \cdot T^2 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 4 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 \quad [kJ/m_N^3] \quad (4.2)$$

$$h_{O_2} = 0,2063 + 1,2849 \cdot T + 0,0003 \cdot T^2 - 9 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 1 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 \quad [kJ/m_N^3] \quad (4.3)$$

$$h_{N_2} = 1,9768 + 1,2458 \cdot T + 0,0002 \cdot T^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 8 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 \quad [kJ/m_N^3] \quad (4.4)$$

$$h_{Ar} = 7,6471 + 0,8555 \cdot T + 1 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \text{ [kJ/m}_N^3\text{]} \quad (4.5)$$

$$h_{SO_2} = 4,0113 + 1,9113 \cdot T + 0,0006 \cdot T^2 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 3 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 \text{ [kJ/m}_N^3\text{]} \quad (4.6)$$

#### 4.4.3 Výsledky materiálových a energetických bilancí jednotlivých procesů

Aplikací vztahů uvedených v kap. 3 na vstupní parametry uvedené v kap. 4.4.2 byly vypočteny materiálové a energetické bilance zvláště pro anaerobní stabilizaci, sušení a spalování.

##### *Anaerobní stabilizace*

Při výpočtu tepla potřebného pro ohřev vyhnívacích nádrží byly získány dva výsledky. Vyhnívací nádrže na Císařském ostrově mají v zimní období tepelné ztráty 21,44 GJ/d, vyhnívací nádrže vybudované v Drastech 18,20 GJ/d. Rozdíl 3,24 GJ/d je natolik malý v porovnání s teplem, které je potřeba na vlastní ohřev kalu (zimním období činní 472,65 GJ/d), že v dalších výpočtech je uvažováno pouze s jedním údajem, a to 21,44 GJ/d.

Výsledky materiálové bilance vyhnívání jsou uvedeny v tab. 23.

**Tab. 23 Materiálové bilance anaerobní stabilizace**

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
Množství sušiny SSK	t/d	155,64
Obsah organických látek v sušině SSK	%	69
Množství organických látek v sušině SSK	t/d	107,39
Množství sušiny ASK	t/d	86,91
Obsah organických látek v sušině ASK	%	44,48
Množství organických látek v sušině ASK	t/d	38,66
Obsah sušiny v odvodněném kalu	%	33
Denní produkce odvodněného ASK	t/d	263,36
Produkce bioplynu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d	66 946,33

Výsledky výpočtu výroby tepla a elektřiny jsou uvedeny v tab. 24. Jak je uvedeno na str. 58, uvažuje se s využitím 95 % celkové produkce bioplynu v kogeneračních jednotkách. Zbytek tvoří ztráty (úniky netěsnostmi systému) nebo je spalován v hořácích zbytkového plynu. Množství vyrobené elektrické energie a tepla je při daných předpokladech maximální možné. Teplo je formě topné vody 70/90 °C, tedy nízkopotenciální<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Možnost získání vysokopotenciálního tepla, které je vhodné např. k sušení je diskutována v kap. 4.4.4 na str. 66.

Tab. 24 Výroba tepla a elektřiny

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnota</i>
Bioplyn do KJ	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d	63 599,01
Vyrobená EE	MWh/d	138,15
Teplo z KJ	GJ/d	789,90

Z výše uvedených údajů je patrné, že i při využití maximálního množství bioplynu k výrobě elektřiny je produkováno dostatečné množství tepla na ohřev kalu pro anaerobní stabilizaci a krytí tepelných ztrát. Zbývající teplo 295,81 GJ/d je možné využít k vytápění budov, případně část spalin nevyužívat k výrobě provozní vody 70/90 °C, ale mařit. Na tomto místě je nutné podotknout, že uvedené výsledky jsou platné pouze při optimálním provozu kalového hospodářství a nezahrnují např. havarijní stavy vyhnívacích nádrží apod.

#### ***Sušení anaerobně stabilizovaného kalu***

Energetická náročnost sušení anaerobně stabilizovaného kalu (se vstupním obsahem sušiny 33 %) byla vypočtena pro konečný obsah sušiny 50, 70 a 90 %. Sušení nad 90 % není uvažováno, neboť takový obsah sušiny je vyžadován zejména tehdy, je-li kal následně spalován v cementárnách. Výsledky materiálové a energetické bilance jsou uvedeny v tab. 25.

Tab. 25 Výsledky materiálové a energetické bilance sušení ASK na různý obsah sušiny

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Obsah sušiny [%]</i>		
		<i>50</i>	<i>70</i>	<i>90</i>
Množství vysušeného kalu	t/d	173,81	124,15	96,56
Odpařená voda	t/d	89,54	139,20	166,79
Energie na sušení	GJ/d	300,01	418,45	484,25

#### ***Sušení směsného surového kalu***

Energetická náročnost sušení směsného surového kalu (se vstupním obsahem sušiny 33 %) byla rovněž vypočtena pro různý konečný obsah sušiny, tentokrát byly voleny hodnoty 40, 50, 70 a 90 % sušiny. Výsledky materiálové a energetické bilance sušení SSK jsou uvedeny v tab. 26.

**Tab. 26** Výsledky materiálové a energetické bilance sušení SSK na různý obsah sušiny

Parametr	Jednotka	Obsah sušiny [%]			
		40	50	70	90
Množství sušeného kalu	t/d	389,09	311,27	222,34	172,93
Odpařená voda	t/d	82,53	160,35	249,29	298,70
Energie na sušení	GJ/d	351,66	537,56	749,37	867,21

### Spalování anaerobně stabilizovaného kalu

Energetická bilance spalování anaerobně stabilizovaného kalu je výrazně závislá na obsahu sušiny ve spalovaném kalu. V zásadě je možné spalovat kal odvodněný, částečně předsušený (přibližně 65 až 80 % sušiny) nebo úplně vysušený (přibližně 80 až 95 % sušiny). Odvodněný kal není samospalitelný, kal popsaných parametrů odvodněný na 33 % sušiny má výhřevnost pouhých 2,1 MJ/kg a navíc při jeho spalování vzniká velké množství páry, která je součástí spalin a která zvyšuje nároky na dimenzování systému čištění spalin. Samospalitelnost kalu je možné zajistit sušením úplným nebo alespoň částečným. Nejdůležitější výsledky materiálové a energetické bilance spalování ASK při různém obsahu sušiny jsou uvedeny v tab. 27.

Pro výpočet výhřevnosti kalu byla na základě naměřených dat uvedených v kap. 4.3.1 odvozena rovnice (4.7), pomocí které je možné vypočítat výhřevnost kalu při zvoleném obsahu sušiny.

$$LHV_{ASK} = 0,1374 \cdot w_{suš} - 2,455. \quad (4.7)$$

Rovnice (4.1) byla sestavena v programu MS Excel na základě hodnot LHV pro různý obsah sušiny v kalu, které byly vypočteny z dat uvedených v tab. 16. Grafické znázornění uvedeno v Příloze 2.

**Tab. 27** Výsledky materiálové a energetické bilance spalování ASK s různým obsahem sušiny

Parametr	Jednotka	Obsah sušiny [%]			
		33	50,6	70	90
Množství kalu	t/d	263,36	173,75	124,15	96,56
Výhřevnost kalu	MJ/kg	2,08	4,50	7,16	9,91
Podpůrné palivo	GJ/d	642,83	-	-	-
Množství spalin	tis. m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d	829,55	519,20	459,98	425,66
Teplota spalin	°C	850,00	850,00	1 077,57	1 236,45
Měrná entalpie spalin	kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	1 341,62	1 316,92	1 693,80	1 955,62
Energie ve spalinách	GJ/d	1 112,93	683,74	779,12	832,43

Jak je patrné z tab. 27, množství spalin vznikajících při spalování mokrého (odvodněného) kalu je až dvojnásobné oproti spalování kalu s obsahem 90 % sušiny, ale energetický obsah

spalin je vyšší jen přibližně o 30 %. Velké množství spalin je způsobeno odpařením velkého množství vody, která je následně ve spalinách obsažena. Přestože se zdá, že energie obsažená ve spalinách při spalování odvodněného kalu je velmi vysoká, je nutné si uvědomit, že velká část této energie byla do celkové bilance spalování vnesena přídavným (fosilním) palivem.

V tab. 27 jsou také uvedeny výsledky bilance spalování anaerobně stabilizovaného kalu s nejnižším možným obsahem sušiny (50,6 %), při kterém již není nutné dodávat (za výše uvedených předpokladů) přídavné palivo.

Přebytek spalovacího vzduchu pro dosažení 6 obj. % kyslíku v suchých spalinách je 1,39. Produkce popela je 49,2 t/d.

### **Spalování směsného surového kalu**

Směsný surový kal má obecně vyšší spalné teplo sušiny než anaerobně vyhnílý, protože nebyl podroben žádnému procesu, při kterém by se rozkládaly organické látky v kalu obsažené. SSK je tedy samospalitelný při nižším obsahu sušiny než ASK, jak je patrné z tab. 28. V tomto případě je mezní hodnotou 40,1 % sušiny (u ASK to bylo 50,6 %). Pro výpočet výhřevnosti SSK o zadaném obsahu sušiny byla odvozena rovnice (4.8). Materiálové a energetické bilance byly podobně jako u ASK vypočteny pro různý obsah sušiny v SSK. Výsledky jsou uvedeny v tab. 28. Grafické znázornění uvedeno v Příloze 2.

$$LHV_{SSK} = 0,1795 \cdot w_{suš} - 2,4536. \quad (4.8)$$

**Tab. 28** Výsledky materiálové a energetické bilance spalování SSK s různým obsahem sušiny

Parametr	Jednotka	Obsah sušiny [%]				
		33	40,1	50	70	90
Množství kalu	t/d	471,62	388,46	311,27	222,34	172,93
Výhřevnost kalu	MJ/kg	3,47	4,74	6,52	10,11	13,70
Podpurné palivo	GJ/d	601,6	-	-	-	-
Množství spalin	tis. m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d	1 593,89	1 297,16	1 201,12	1 090,47	1 029,00
Teplota spalin	°C	850,00	850,00	998,21	1 199,79	1 330,69
Měrná entalpie spalin	kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	1 332,24	1 322,94	1 571,00	1 908,90	2 126,67
Energie ve spalinách	GJ/d	2 123,44	1 716,06	1 886,96	2 081,61	2 188,35

Množství popela 49,2 t/d vznikajícího spalování SSK je stejné jako v případě spalování ASK, protože anorganické látky nejsou při anaerobní stabilizaci rozkládány ani nevznikají. SSK je spalován s přebytkem vzduchu 1,39 pro zajištění 6 obj. % kyslíku v suchých spalinách.



#### 4.4.4 Analýza výsledků řešení včetně parametrické citlivosti

Výše uvedené výsledky bilancí tří technologií (anaerobní stabilizace, sušení a spalování) byly provedeny pro konkrétní vstupní údaje. Tyto údaje byly voleny na základě úvah popsanych v kap. 4.4.2. Stručně je lze shrnout v následujících bodech:

- Základním údajem je množství směsného surového kalu, které je převzato z projektu „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově (viz tab. 8). Z tohoto projektu bylo převzato i předpokládané množství kalu vyhnílého a rovněž výhřevnost bioplynu. Naproti tomu měrná produkce bioplynu byla volena na základě vyhodnocení provozu současného kalového hospodářství (viz tab. 5).
- Dále je předpokládáno, že maximální množství (95 %) produkovaného bioplynu bude využito v kogeneračních jednotkách (zaměření na maximální produkci elektřiny z obnovitelného zdroje).
- Prvotním předpokladem je výroba nízkopotenciálního tepla v kogeneračních jednotkách, v případě potřeby sušit kal bioplynem je však možné získat i teplo vysokopotenciální (uvedeno dále).
- Obsah sušiny v odvodněném kalu se předpokládá 33 % na základě provedených měření [47], [53].
- Při spalování kalu se předpokládá minimální teplota spalin na výstupu 850 °C a obsah kyslíku v suchých spalinách 6 obj.%.

Některá uvažovaná vstupní data však mohou být v reálném provozu mírně odlišná (např. obsah sušiny v odvodněném kalu). Proto je dále ukázán vliv hodnoty vybraných parametrů na výsledky materiálových a energetických bilancí uvažovaných procesů.

#### *Měrná produkce bioplynu*

Produkce bioplynu při anaerobní stabilizace je parametr, který bezesporu zásadně ovlivňuje celou bilanci vyhnívání a rovněž rozhodování o případných navazujících technologiích.

V této práci jsou bilance anaerobní stabilizace vypočteny pro měrnou produkci bioplynu  $0,62 \text{ m}_N^3/\text{kg}$  organických látek, která byla vypočtena na základě údajů o současné produkci bioplynu (viz tab. 5). Jak je ale uvedeno v tab. 8, v projektu „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově“ je předpokládána produkce bioplynu průměrně  $68\,729 \text{ m}_N^3/\text{d}$ , což představuje měrnou produkci bioplynu  $0,64 \text{ m}_N^3/\text{kg}$  org. látek. Tento předpoklad je založen na tom, že v rámci rekonstrukce kalového hospodářství ÚČOV budou stávající nemíchané nádrže druhého stupně osazeny míchadly, což by mohlo přinést další rozklad organických látek. Dále také bude pravděpodobně navýšen počet vyhnívacích nádrží tak, aby mohla být doba zdržení kalu v nádržích delší.

Pokud by úpravy vyhnívacích nádrží při rekonstrukci skutečně zajistily zlepšení procesu anaerobní stabilizace a došlo ke zvýšení produkce bioplynu, byla by samozřejmě vyšší i produkce elektrické energie a tepla. Díky hlubšímu rozkladu organických látek by zároveň kleslo množství anaerobně stabilizovaného kalu. Porovnání situace s vyšší produkcí bioplynu (uvažované v projektu „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově“) a nižší produkcí bioplynu (vycházející ze současných provozních dat) je uvedeno

v tab. 29. Pro oba případy je uvažováno s výhřevností bioplynu  $23 \text{ MJ/m}_N^3$  a s podílem bioplynu spalovaném na kogeneračních jednotkách 95 % celkové produkce.

**Tab. 29 Vliv měrné produkce bioplynu na energetickou bilanci**

Parametr	Jednotka	Měrná produkce bioplynu [ $\text{m}_N^3/\text{kg org. látek}$ ]	
		0,62	0,64
Produkce bioplynu	$\text{m}_N^3/\text{d}$	66 946,33	68 729,00
Vyrobena EE	MWh/d	138,15	141,83
Vyrobena teplo	GJ/d	789,90	810,93
Sušina ASK	t/d	86,91	85,62
Odvodněný ASK	t/d	263,35	259,45

### **Využití bioplynu v kogeneračních jednotkách a kotlích na bioplyn**

Výpočtem energetické bilance anaerobní stabilizace bylo zjištěno, že pokud je na kogeneračních jednotkách spalován téměř všechen bioplyn (95 % produkce), stačí vyrobené teplo na pokrytí tepelných potřeb anaerobní stabilizace (494,09 GJ/d v zimním období) a ještě zbývá 295,81 GJ/d nevyužitého nízkopotenciálního tepla, resp. tepla, které je možné v zimní období využít na vytápění provozních budov.

Uvažujme nyní, že vyhnitý kal chceme před dalším zpracováním sušit (ať už je požadováno zvýšení výhřevnosti pro spalování nebo jde jen o požadavek na snížení poplatků za odvoz kalu). Na ohřev sušícího média není většinou možné použít nízkopotenciální teplo, kterým teplá voda uvažovaná v předchozích výpočtech bezesporu je. Výjimkou je např. pásová sušárna španělské firmy STC, ve které je kal sušen vzduchem o teplotě  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  ohříváním topnou vodou  $75/90 \text{ }^\circ\text{C}$  (získanou právě z kogenerace) [51].

Z tab. 25 je patrné, že přebytečné teplo na výrazné vysušení kalu nestačí (zvláště pak bude-li nutné vytápět i provozní budovy). Například pro vysušení daného množství anaerobně stabilizovaného kalu z 33 na 50 % je potřeba 300,01 GJ/d tepla, pro vysušení na 70 % sušiny je to už 418,45 GJ/d.

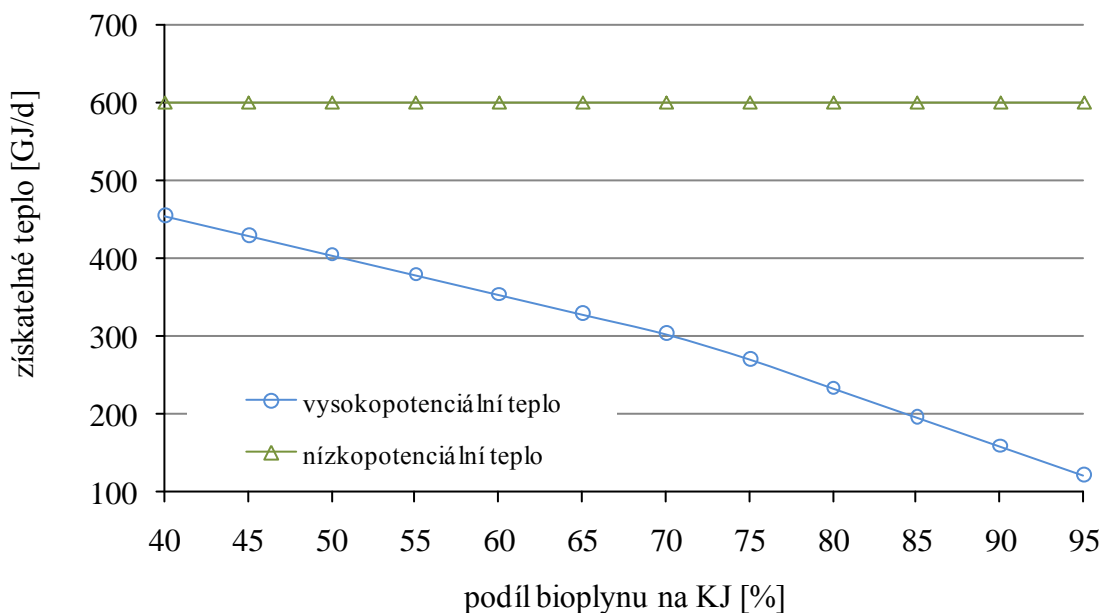
Získání potřebného množství vysokopotenciálního tepla však můžeme řešit tak, že část bioplynu nepovedeme na kogenerační jednotky, ale budeme ho spalovat v kotli na bioplyn. Pro výpočet energetické bilance kotlů na bioplyn jsou uvažovány následující vstupní údaje:

- spalování bioplynu probíhá s přebytkem vzduchu 1,3 (složení vzduchu viz kap. 4.4.2),
- bioplyn je tvořen pouze metanem a oxidem uhličitým v takovém poměru, že celková výhřevnost bioplynu je zadaných  $23 \text{ MJ/m}_N^3$ ,
- teplota vznikajících spalin je  $1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- teplota spalin po předání tepla teplotonému médiu ohřívajícímu sušárnu kalu je  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Další teplo vhodné k ohřevu teplotnosného média pro sušení kalu je možné získat ze spalin vznikajících v kogeneračních jednotkách tím, že teplo nebude využito k ohřevu topné vody 70/90 °C, ale bude využito jako tzv. vysokopotenciální teplo. Pro výpočet tepla, které je možné takto získat, jsou zavedeny následující předpoklady:

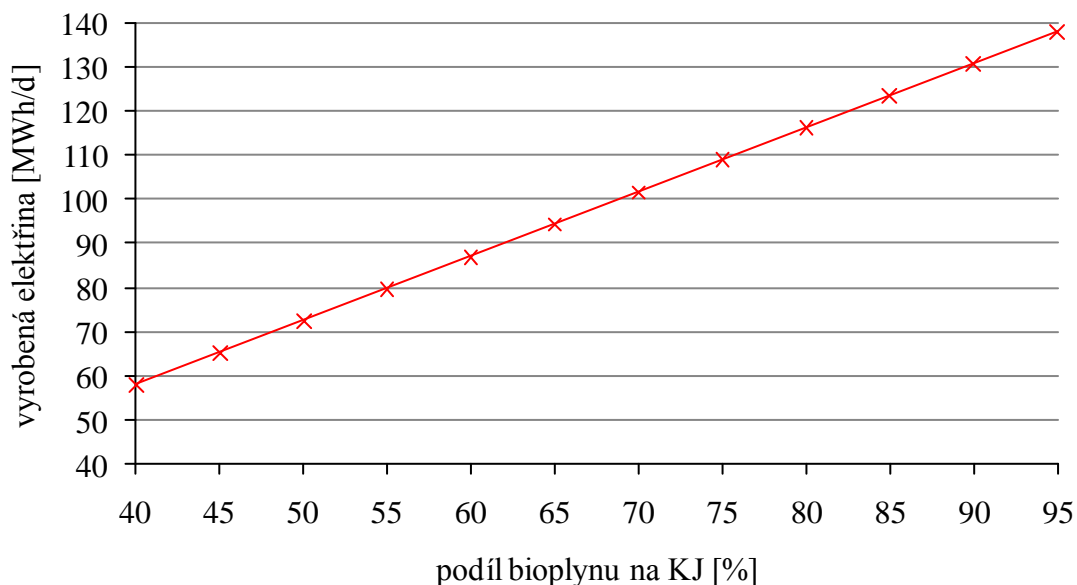
- spalování bioplynu v kogeneračních jednotkách probíhá s přebytkem vzduchu 1,5 (složení suchého vzduchu viz tab. 22),
- teplota vznikajících spalin je 450 °C (jak uvádí [21], obvykle se pohybuje mezi 400 až 550 °C),
- teplota spalin po předání tepla teplotnosnému médiu ohřívajícímu sušárnu kalu je 250 °C (voleno s ohledem na možnost ohřevu termooleje dle modelu sušárny na ČOV Brno-Modřice, kde je termoolej ohříván na přibližně 210 °C).

Množství vysokopotenciálního tepla dostupného na čistírně je znázorněno na obr. 30. Vysokopotenciální teplo, které je v grafu vyznačeno modrou barvou, představuje přebytečné teplo na čistírně v případě, že ve formě nízkopotenciálního tepla odvedeme 600 GJ/d (zvoleno s ohledem na tepelnou potřebu vyhnívacích nádrží 494,09 GJ/d a s rezervou na možné vytápění provozních budov v zimním období). Na křivce vysokopotenciálního tepla je patrný zlom při 70 % produkovaného bioplynu použitého v kogeneračních jednotkách. Jedná se o hodnotu, při které veškeré nízkopotenciální teplo produkované v kogeneračních jednotkách pokryje právě potřeby anaerobní stabilizace (a volené rezervy). Snižuje-li se dále množství bioplynu spalované v kogeneračních jednotkách, musí být i část spalin z kotlů na bioplyn použita k výrobě topné vody 70/90 °C.



**Obr. 30** Produkce vysokopotenciálního tepla v závislosti na podílu bioplynu spalovaného v kogeneračních jednotkách

Snižuje-li se množství bioplynu spalovaného v kogeneračních jednotkách, klesá množství vyrobené elektřiny. Tato závislost je vynesena v grafu na obr. 31.



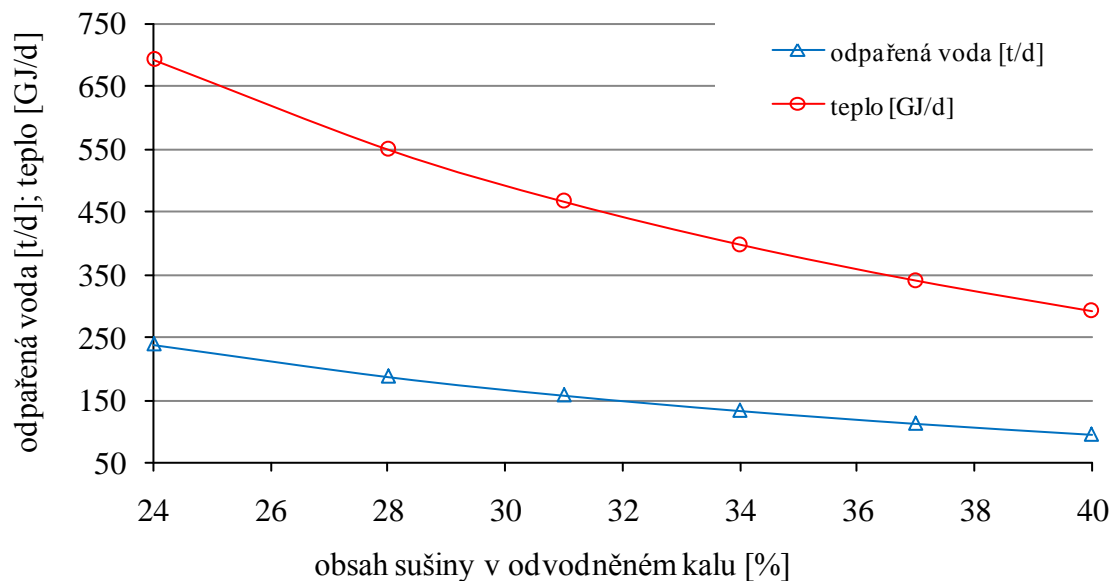
**Obr. 31** Vliv podílu bioplynu spalovaného v kogeneračních jednotkách na výrobu tepla a elektřiny

Na příkladu nyní ukažme, jak můžeme uvedenou rozvahu využít. Uvažujme, že chceme sušit kal na obsah sušiny 70 %. Tomu odpovídá spotřeba tepla 418,45 GJ/d (viz tab. 25). Takové množství vysokopotenciálního tepla získáme, pokud na kogenerační jednotky povedeme přibližně 47 % produkovaného bioplynu (odečteno z grafu na obr. 30), a tedy přibližně 48 % bioplynu spálíme v kotlích na bioplyn (5 % uvažujeme ztráty). Tomu odpovídá výrazné snížení výroby elektrické energie přibližně na 70 MWh/d (odečteno z grafu na obr. 31).

Uvedený příklad ukazuje, že elektrickou energii a teplo je možné vyrábět v různých poměrech. Konečná volba podílu bioplynu, který bude spalován v kogeneračních jednotkách, bude tedy ovlivněna prioritami provozovatele a bude muset být podložena nejen energetickou, ale také ekonomickou bilancí.

### **Sušení**

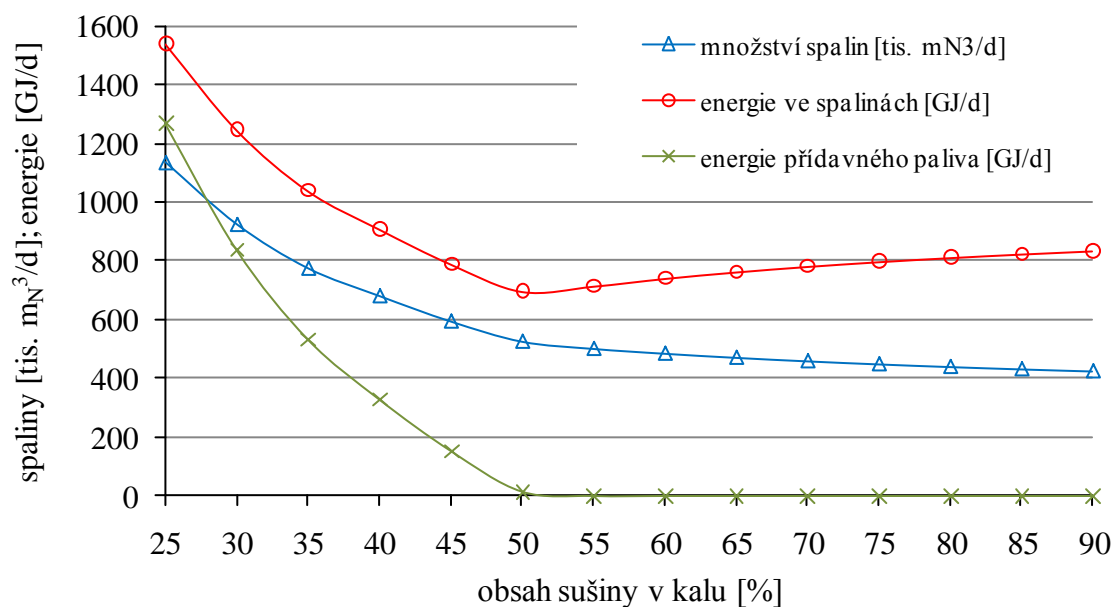
Energetická náročnost sušení je ovlivněna především obsahem sušiny ve vstupním kalu. Ve všech bilančních výpočtech je uvažován obsah sušiny v odvodněném kalu 33 %. Tato hodnota však není provozně ověřena (odvodnitelnost kalu bude mimo jiné ovlivněna i novou technologií čištění odpadních vod). Navíc v reálném provozu je nutné počítat s kolísáním této hodnoty, která ani dnes není v čase konstantní. Z [42] až [46] vyplývá, že v letech 2004 až 2007 se obsah sušiny v odvodněném kalu pohyboval od 28 do 37 % (v měsíčním průměru). Jaký vliv by měly tyto výkyvy na energetickou náročnost sušení, je ukázáno v grafu na obr. 32. Graf uvádí výsledky bilance sušení anaerobně stabilizovaného kalu na cílový obsah sušiny 70 %.



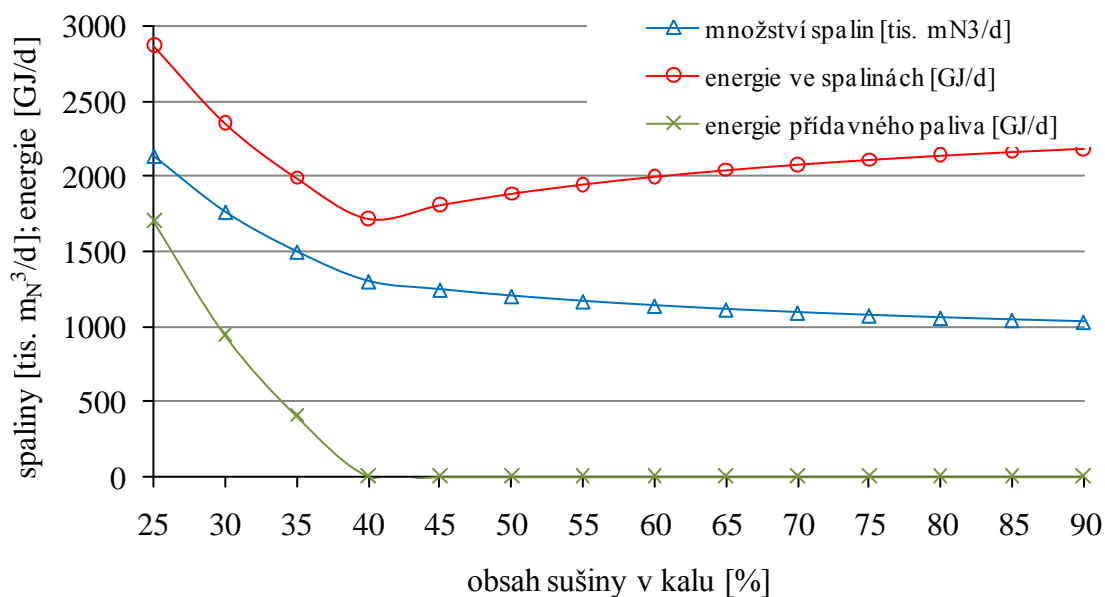
Obr. 32 Energetická náročnost sušení anaerobně stabilizovaného kalu při různém obsahu sušiny ve vstupním odvodněném kalu (obsah sušiny v sušeném kalu 70 %)

### Spalování

Spalování kalu je nejvýrazněji ovlivněno obsahem sušiny ve vstupním kalu, jak je patrné z tab. 27 a tab. 28. Vliv obsahu sušiny na množství a energetický obsah spalin a přídavné palivo je graficky znázorněn na obr. 33 a obr. 34.



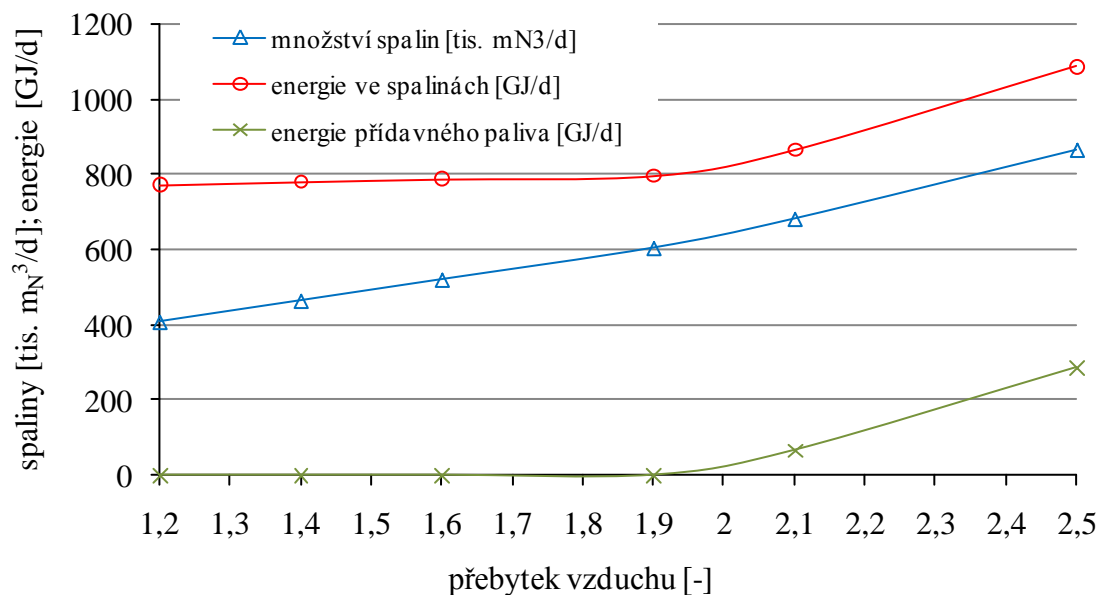
Obr. 33 Vliv obsahu sušiny anaerobně stabilizovaného kalu na vybrané parametry spalování kalu



**Obr. 34** Vliv obsahu sušiny směsného surového kalu na vybrané parametry spalování kalu

Materiálovou a energetickou bilanci ovlivňují i jiné parametry, než obsah sušiny ve spalovaném kalu. Mezi ty zásadní dále patří složení kalu (a tedy výhřevnost sušiny), které je ovlivněno zejména technologií čištění odpadní vody (u směsného surového kalu) a dokonalostí vyhnívacího procesu (u anaerobně stabilizovaného kalu). Tato data však přesně nebudou známa, dokud nebudou moci být odebrány vzorky kalu po rekonstrukci ÚČOV, a proto se zatím musíme spokojit s rozboru provedenými na několika vzorcích v roce 2005 (viz kap. 4.3.1).

Dalšími parametry, které ovlivní materiálovou a energetickou bilanci spalování kalu, jsou přebytek spalovacího vzduchu, tepelné ztráty spalovací pece nebo nedopal v popelu, které rovněž nevycházejí z reálného provozu, ale můžeme je považovat za kvalifikovaný odhad (na základě literární rešerše, posouzení obdobných provozů a legislativních požadavků). Diskutovat lze např. o přebytku spalovacího vzduchu. Ve výpočtech byl volen tak, aby obsah kyslíku byl 6 obj. % suchých spalin. Tento požadavek již v legislativě nefiguruje. Na druhou stranu v [52] je doporučeno tuhé odpady spalovat s přebytkem vzduchu 1,6 až 2,5. Na obr. 35 je uvedena závislost množství a energetického obsahu spalin a přídavného paliva na přebytku vzduchu při spalování anaerobně stabilizovaného kalu o sušině 70 %. Z grafu je patrné, že při zvýšení přebytku vzduchu na 2 nelze kal spalovat bez přídavného paliva (v bilancích není uvažován přehřev spalovacího vzduchu).



Obr. 35 Vliv přebytku spalovacího vzduchu na vybrané parametry spalování anaerobně stabilizovaného kalu s obsahem sušiny 70 %

### Možnosti využití energie spalin ze spalování kalů

Spalováním kalů vznikají spaliny, které v závislosti na množství a teplotě obsahují různé množství energie (viz červené křivky na obr. 33 a obr. 34). Tuto energii můžeme využít různými způsoby. V této práci je uvažováno, že energie spalin bude využita k výrobě přehřáté páry, jejíž parametry jsou voleny podle toho, kde bude spalovna vybudována.

V případě, že kal nebude sušen bioplynem, bude nutné část páry využít k předsušení kalu na takový obsah sušiny, aby jeho spalování probíhalo bez nutnosti dodávky přídavného paliva. Zbytek přehřáté páry bude použit k výrobě elektřiny v parní turbíně (uvažovaná izoentropická účinnost 72 % a účinnost generátoru 98 %). V případě, že do spalovny bude dodáván kal již (před)sušený (např. bioplynem), bude veškerá pára použita k výrobě elektřiny.

**Areál ZEVO Malešice:** Při výstavbě spalovny kalu v této lokalitě je možné uvažovat propojení systému využití energie spalin se současnou spalovnou komunálních odpadů. Ta produkuje přehřátou páru o tlaku 1,37 MPa (abs.) a teplotě 235 °C. V současné době se připravuje realizace kogeneračního systému, jehož základem bude kondenzační turbína. Spalovna tak bude vedle tepla vyrábět i elektrickou energii. Aby bylo možné páru ze spalovny kalů využít v této turbíně, jsou při výpočtech uvažovány stejné parametry, jako má pára vyráběná ve spalovně odpadů.

**Areál Drasty:** Při výstavbě spalovny na „zelené louce“ je možné vyrábět hodnotnější páru. Pro potřeby této práce byla volena přehřátá pára o tlaku 2,5 MPa (abs.) a teplotě 300 °C. Vyrobená pára je vedena do kondenzační turbíny s odběrem. K sušení kalu (je-li uvažováno) je odebírána přehřátá pára o tlaku 1 MPa (abs.) a teplotě 214 °C.

V případech, kdy je pro sušení kalu uvažována pára jako teplonosné médium, je možné použít např. diskovou sušárnu, ve které dochází ke kondenzaci páry (např. sušárny Atlas-

Stord [56]). S tímto sušícím systémem je uvažováno v dalších bilančních výpočtech. Parametry kondenzátu jsou voleny na základě osobního sdělení: tlak 1 MPa (abs.) a teplota 150 °C.

#### 4.4.5 Výsledky materiálových a energetických bilancí uvažovaných variant

V předchozím textu byly popsány výsledky bilancí jednotlivých procesů, které figurují ve výše popsaných variantách kalového hospodářství. Následuje vyhodnocení výsledků materiálových a energetických bilancí těchto variant jako celků. Při spalování kalu (ať už anaerobně stabilizovaného nebo směsného surového) je kladen důraz na to, aby spalování probíhalo bez nutnosti dodávat fosilní palivo. Proto je vždy uvažováno se sušením kalu tak, aby byl spalován materiál s dostatečnou výhřevností bez nutnosti používat přídavné palivo.

Pro lepší přehlednost jsou v tab. 30 souhrnně uvedeny všechny uvažované varianty kalového hospodářství ÚČOV Praha.

**Tab. 30 Přehled uvažovaných variant**

<i>Krátkodobá řešení</i>	
K1	Kompostování anaerobně stabilizovaného kalu
K2	Spalování anaerobně stabilizovaného kalu v ZEVO Malešice
K3	Spalování anaerobně stabilizovaného kalu v Drastech
<i>Dlouhodobá řešení</i>	
D1	Kompostování anaerobně stabilizovaného kalu
D2	Spalování anaerobně stabilizovaného kalu v ZEVO Malešice
D3	Spalování anaerobně stabilizovaného kalu v Drastech
D4	Spalování směsného surového kalu v Drastech

#### *Zachování současné koncepce*

Se zachováním současné koncepce kalového hospodářství (anaerobní stabilizace a následné kompostování kalu) uvažují varianty **K1** a **D1**. Liší se pouze umístěním kalového hospodářství. V případě umístění kalového hospodářství v Drastech je nutné uvažovat zvýšené energetické nároky na čerpání kalu. Na základě výsledků měření reologického chování směsného surového kalu z ÚČOV a délky a převýšení potrubní trasy byly výpočtem stanoveny energetické nároky na čerpání kalu na 2,4 MWh/d. Při výpočtu bylo uvažováno, že kal bude proudit rychlostí 1 m/s potrubím 2xDN 250 o délce 8 700 m a převýšení 72 m.

Uvažujeme-li využití 95 % produkovaného bioplynu v kogeneračních jednotkách, je produkováno 138,15 MWh/d elektrické energie a 789,90 GJ/d nízkopotenciálního tepla (ve formě topné vody 70/90 °C). Část tepla (494,09 GJ/d) je využita pro krytí potřeb anaerobní stabilizace. Zbývající část (295,81 GJ/d) může být zejména v zimním období použita k přehřevu budov. K sušení kalu toto teplo není vhodné. Pro sušení je nutné mít



k dispozici vysokopotenciální teplo. To lze získat ze spalin z kogeneračních jednotek, pokud tyto nejsou využity k výrobě topné vody 70/90 °C. V případě spalování 95 % produkovaného bioplynu v kogeneračních jednotkách a při zajištění potřebného množství nízkopotenciálního tepla (uvažováno 600 GJ/d pro krytí potřeb anaerobní stabilizace s rezervou pro vytápění provozních budov v zimním období) je možné získat pouze 120,66 GJ/d vysokopotenciálního tepla. Tím je možné kal vysušit jen na obsah sušiny 34,9 % z původních 33 %. V takovém případě by se jednalo o snížení množství odváženého z ÚČOV z 263,36 na 249,01 t/d. Snížení množství kompostovaného kalu je natolik malé, že lze očekávat, že investice do sušárny by se nevyplatila.

### ***Spalování anaerobně stabilizovaného kalu***

Koncepci spalování anaerobně stabilizovaného kalu uvažují varianty **K2**, **K3**, **D2** a **D3**, které se liší jednak umístěním kalového hospodářství, dále pak umístěním spalovny kalu.

Pro zajištění spalování anaerobně stabilizovaného kalu bez přídavného fosilního paliva je nutné kal alespoň částečně vysušit. Z výše uvedených výsledků energetických bilancí spalování anaerobně stabilizovaného kalu při různém obsahu sušiny vyplývá, že spalování bez přídavku podpůrného paliva je možné přibližně od 55 % sušiny. Takto přesušený kal je ovšem v lepivé fázi, proto je dále uvažováno, že spalován bude kal o sušině 70 %.

Vysušení kalu na obsah sušiny 70 % zajistí jednak spalování bez přídavného paliva a rovněž překlenutí lepivé fáze. Energie potřebná na vysušení kalu z 33 na 70 % sušiny představuje 418,45 GJ/d. Předsušení anaerobně stabilizovaného kalu je možné zajistit dvěma způsoby, a to spalováním dostatečného množství bioplynu v kotlích na bioplyn (tedy snížení výroby elektrické energie v kogeneračních jednotkách) nebo využitím páry vyrobené ve spalovně kalů.

Sušení kalu pomocí bioplynu přináší výrazné snížení výroby elektrické energie (podrobně popsáno v kap. 4.4.4). Naproti tomu veškerá pára vyrobená ve spalovně může být k výrobě elektřiny využita. V případě spalování kalu v lokalitě ZEVO však může přinést sušení bioplynem úspory, protože je jednak převáženo menší množství kalu a rovněž poplatek za spalování kalu bude menší.

K sušení pomocí páry o výše popsaných parametrech je nutné zajistit 185,12 t/d páry 1,37 MPa, 235 °C (sušárna a spalovna v lokalitě ZEVO Malešice) nebo 178,75 t/d páry 1 MPa, 214 °C (sušárna a spalovna v lokalitě Drasty). Číselně jsou výsledky celkové bilance vyhnívání – sušení – spalování uvedeny v tab. 31.

**Tab. 31 Výsledky materiálové a energetické bilance spalování anaerobně stabilizovaného kalu předsušeného na obsah sušiny 70 %**

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Sušení bioplynem</i>		<i>Sušení párou</i>	
		<i>ZEVO</i>	<i>Drasty</i>	<i>ZEVO</i>	<i>Drasty</i>
BP do KJ	% produkce	47,11	47,11	95,0	95,0
EE - bioplyn	MWh/d	68,50	68,50	138,15	138,15
Množství páry	t/d	255,98	248,86	255,98	248,86
Tlak páry	MPa	1,37	2,5	1,37	2,5
Teplota páry	°C	235	300	235	300
EE - spalovna	MWh/d	20,31	26,25	5,26	14,11
EE - celkem	MWh/d	88,81	94,75	143,41	152,26

Z tab. 31 vyplývá, že energeticky výhodnější je sušení kalu párou vyrobenou ve spalovně kalu než sušení bioplynem. Tato koncepce je výhodnější i z hlediska podpory výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, mezi které bioplyn patří. Ekonomické vyhodnocení rozdílu mezi sušením kalu bioplynem a párou bude provedeno v dalších kapitolách. Pro tyto potřeby budou posuzovány podvarianty K2 a D2 (sušení párou produkovanou spalovnou v ZEVO), resp. K2' a D2' (sušení kalu bioplynem v rámci kalového hospodářství a spalování sušeného kalu ve spalovně v ZEVO).

### ***Spalování směsného surového kalu***

Spalování směsného surového kalu je podstatou varianty **D4** a je uvažováno pouze v případě, že kalové hospodářství včetně spalovny bude vybudováno v Drastech. Vzhledem k infekčnímu charakteru materiálu nelze doporučit jeho převážení přes Prahu.

Produkce směsného surového kalu je 155,64 t/d. Uvažujeme-li jeho odvodnění na 33 % sušiny (stejně jako u anaerobně stabilizovaného kalu), potom množství odvodněného směsného surového kalu je 471,62 t/d. Výchřevnost takového materiálu je velmi nízká (3,47 MJ/kg). K zajištění spalování kalu bez přídavku fosilního paliva je nutné jeho předsušení alespoň na 41 % sušiny, ale pro překonání lepivé fáze je opět uvažováno se sušením kalu na obsah sušiny 70 %. Při spalování směsného surového kalu není možné uvažovat sušení bioplynem, neboť žádný nevzniká. Proto je dále uvažován pouze jeden model: sušení přehřátou párou z odběrové kondenzační turbíny (1 MPa (abs.), 214 °C), které je pro tento případ potřeba 336,23 t/d.

Energii spalin uvolněných spalováním kalu je možné využít k výrobě 690,07 t/d páry 2,5 MPa, 300 °C. Vedením páry na kondenzační turbínu s odběrem je vyrobeno 51,57 MWh/d elektrické energie.

## 4.5 Ekonomické zhodnocení

Vybrat vhodnou technologii kalového hospodářství pouze na základě materiálových a energetických bilancí uvedených variant je v podstatě nemožné. Výběru musí předcházet rovněž ekonomická bilance jednotlivých variant. V následující kapitole jsou vyhodnoceny investiční a zjednodušeně vyčísleny provozní náklady na jednotlivé technologie. Veškeré uvedené ceny jsou pouze kvalifikovaným odhadem. To se týká zejména investičních cen, investice na sušárnu a spalovnu byly stanoveny dle [26], odhad investice na anaerobní stabilizaci vychází z osobního sdělení.

### 4.5.1 Investiční náročnost uvažovaných variant

Podstatnou roli při výběru technologie hraje výše investičních nákladů. Výstavba spalovny, stejně jako výstavba klasického kalového hospodářství je investičně velmi náročná. Pro jednotlivé technologie jsou uvažovány následující investiční náklady:

- anaerobní stabilizace vč. energocentra a čerpání kalů do Drast: 2 000 mil. Kč
- rekonstrukce a rozšíření stávajícího kalového hospodářství: 700 mil. Kč
- spalovna směsného surového kalu: 1 600 mil. Kč
- spalovna anaerobně stabilizovaného kalu: 900 mil. Kč
- sušárna směsného surového kalu: 1 500 mil. Kč
- sušárna anaerobně stabilizovaného kalu: 900 mil. Kč

Vzhledem k nutnosti posoudit ekonomické výhody (či nevýhody) sušení kalu bioplynem je v následujícím textu rozlišena možnost sušení kalu přímo na ÚČOV (varianty K2' a D2') a možnost sušení kalu až v rámci spalovny vybudované v ZEVO (varianty K2 a D2). Investiční náklady na varianty jsou uvedeny v tab. 32, kde je zároveň rozlišeno, které náklady zatíží provozovatele ÚČOV a které provozovatele ZEVO.

**Tab. 32 Investiční náklady uvažovaných variant**

Varianta	Investiční náklady	
	ÚČOV	ZEVO
K1 – současná koncepce na Císařském ostrově	700 mil. Kč	-
K2 – spalování ASK v ZEVO (sušení párou)	700 mil. Kč	1 800 mil. Kč
K2' – spalování ASK v ZEVO (sušení BP)	1 600 mil. Kč	900 mil. Kč
K3 – spalování ASK v Drastech (sušení párou)	2 500 mil. Kč	-
D1 – současná koncepce v Drastech	2 000 mil. Kč	-
D2 – vyhánění v Drastech, sušení a spalování ASK v ZEVO	2 000 mil. Kč	1 800 mil. Kč
D2' – vyhánění a sušení v Drastech, spalování ASK v ZEVO	2 900 mil. Kč	900 mil. Kč
D3 – vyhánění i spalování ASK v Drastech (sušení párou)	3 800 mil. Kč	-
D4 – spalování SSK v Drastech (sušení párou)	3 100 mil. Kč	-

#### 4.5.2 Hlavní náklady a zisky uvažovaných variant

Jednotlivé varianty se výrazně liší produkcí zelené elektřiny a množstvím materiálu k finální likvidaci. Je uvažováno, že:

- v rámci ÚČOV bude veškerá vyrobená elektřina spotřebována vlastním provozem, což se projeví jako úspora při nákupu elektřiny z veřejné sítě s uvažovanou nákupní cenou 2 000 Kč/MWh (odhad dle cen elektřiny pro velkoodběratele),
- na elektřinu vyrobenou z bioplynu budou uplatňovány zelené bonusy [57] ve výši 880 Kč/MWh (nově vybudované kalové hospodářství v lokalitě Drasty) nebo 1300 Kč/MWh (rozšířené stávající kalové hospodářství na Císařském ostrově),
- veškerá elektřina vyrobená v ZEVO bude prodána do veřejné sítě za výkupní cenu 1 500 Kč/MWh (osobní sdělení),
- cena za odběr kalu oprávněnou firmou (převážně ke kompostování) je 500 Kč/t (osobní sdělení),
- cena za skládkování popela je 500 Kč/t (odhad dle ceníků skládek),
- cena za spalování kalu v ZEVO Malešice je 2 300 Kč/t (zvoleno na základě [58]),
- cena za dopravu je 2 Kč/t.km (odhad dle ceníků autodopravců),
- je využita skládka a kompostárna v Benátkách nad Jizerou.

Při výpočtu nákladů na dopravu kalu a popela jsou uvažovány následující vzdálenosti, přičemž výsledná cena je počítána za zpáteční cestu:

- Císařský ostrov – ZEVO Malešice: 20 km,
- Drasty – ZEVO Malešice: 22 km,
- Drasty – Benátky nad Jizerou: 42 km,
- ZEVO Malešice – Benátky nad Jizerou: 40 km.

Provozní náklady sušárny byly na základě osobního sdělení odhadnuty na 500 Kč/t sušiny kalu, provozní náklady spalovny byly na základě [26] odhadnuty na 2 100 Kč/t sušiny kalu<sup>4</sup>. Provozní náklady klasického kalového hospodářství (tedy anaerobní stabilizace) nebyly zjištěny, proto z hlediska provozních nákladů nemůže být srovnávána varianta D4 s těmi ostatními.

V tab. 33 jsou shrnuty uvažované zisky a náklady jednotlivých variant, a to z pohledu ÚČOV a ZEVO. Zisky zahrnují zelené bonusy a úspory za vyrobenou elektřinu (ÚČOV) nebo zisk za spálení kalu a prodej vyrobené elektřiny (ZEVO). Zisky z možného prodeje tepla jsou vzhledem k množství a ceně zanedbány. V nákladech se promítá jednak platba za dopravu kalu nebo popela, platba za skládkování popela a na straně ÚČOV také platba za kompostování nebo spalování kalu. Dále jsou zahrnuty provozní náklady spalovny a sušárny.

---

<sup>4</sup> Pro potřeby této práce zahrnují provozní náklady sušárny i spalovny náklady spojené se spotřebou energií, čištění brýdových par a spalin a obsluhou. Provozní náklady spalovny nezahrnují náklady spojené s likvidací popela, tyto jsou kalkulovány zvlášť.

Tab. 33 Roční zisky a náklady na vybrané položky uvažovaných variant

Varianta	Roční zisky (+) / náklady (-)	
	ÚČOV	ZEVO
K1 – současná koncepce na Císařském ostrově	118,34 mil. Kč	-
K2 – spalování ASK v ZEVO (sušení párou)	- 62,38 mil. Kč	69,09 mil. Kč
K2' – spalování ASK v ZEVO (sušení BP)	- 45,21 mil. Kč	11,20 mil. Kč
K3 – spalování ASK v Drastech (sušení párou)	82,14 mil. Kč	-
D1 – současná koncepce v Drastech	97,16 mil. Kč	-
D2 – vyhánění v Drastech, sušení a spalování ASK v ZEVO	- 84,33 mil. Kč	69,09 mil. Kč
D2' – vyhánění a sušení v Drastech, spalování ASK v ZEVO	- 55,34 mil. Kč	11,20 mil. Kč
D3 – vyhánění i spalování ASK v Drastech (sušení párou)	60,96 mil. Kč	-
D4 – spalování SSK v Drastech (sušení párou)	-122,40 mil. Kč	-

Při porovnání všech variant kromě D4 je z tab. 33 patrné, že ekonomicky nejméně výhodné je pro ÚČOV spalování vyhnílého kalu v ZEVO. Takové řešení je oproti kompostování nebo spalování kalu ve vlastní spalovně výrazně nákladnější z důvodu vysoké částky, kterou lze očekávat za spalování. V případě, že by však toto řešení bylo jediné možné, pak je z tab. 33 patrné, že sušení kalu bioplynem v rámci kalového hospodářství ÚČOV je ekonomicky nevýhodné jak z hlediska ÚČOV, tak z hlediska ZEVO. ÚČOV by sice při sušení bioplynem měla nižší roční náklady, ale ne natolik, aby se vyplatila investice do vlastní sušárny (při předpokládaných investicích by návratnost byla přibližně 53 let). V dalším textu tedy varianta K2, resp. D2 znamená vždy sušení i spalování anaerobně stabilizovaného kalu v areálu ZEVO.

Z ekonomického hlediska je dále nutné posoudit návratnost investic. U výstavby spalovny může být toto posouzení zvláště obtížné vzhledem k možným investorům. Za předpokladu, že by investorem byl provozovatel ZEVO, byl by požadavek na návratnost investic pravděpodobně 10 let. V takovém případě by však poplatek za spalování kalů nemohl být pouhých 2 300 Kč/t, protože návratnost investic by se pohybovala na úrovni 28 let. Poplatek za spalování kalu by musel být minimálně 3 600 Kč/t, což by bylo ovšem pro ÚČOV velmi nevýhodné a více by to podpořilo variantu vlastní spalovny.

Při porovnávání kompostování a spalování anaerobně stabilizovaného kalu bude za současných podmínek ekonomicky výhodnější samozřejmě kompostování, což je patrné i z tab. 33. Jednak jsou poplatky za kompostování velmi nízké, navíc není nutné provozovat finančně náročnou spalovnu. Nevýhodou kompostování je pak pouze to, že je nutné splnit požadované limity obsahu těžkých kovů, které se mohou výhledově zpřísnit, a dále to, že o vyráběný kompost není velký zájem [26].

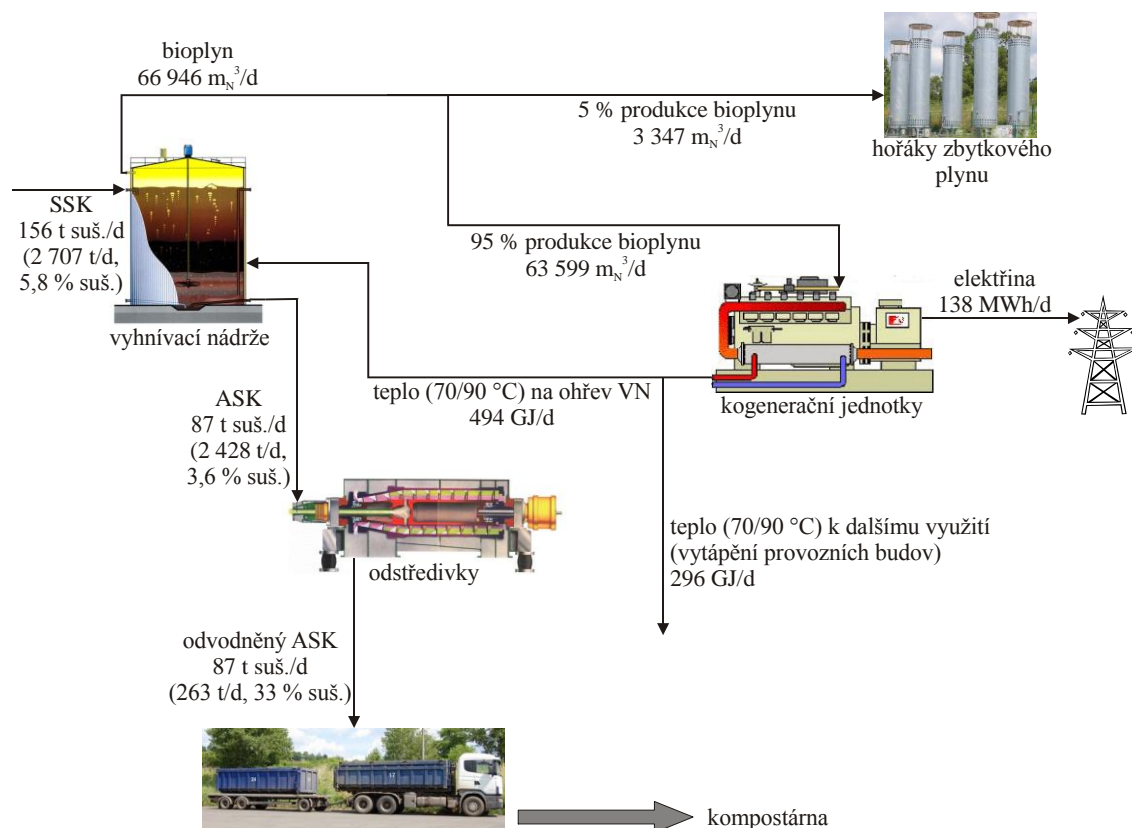
Přímé spalování směsného surového kalu (varianta D4) není příznivé ani z ekonomického hlediska, ani z hlediska energetického. Pro porovnání varianty D4 s variantou D3 z ekonomického hlediska byly vyčísleny roční zisky bez započtení provozních nákladů na spalovnu a sušárnu následovně: zisk varianty D3 činí 166,11 mil. Kč a zisk varianty D4 28,67 mil. Kč. Výhodou varianty D3 je mimo jiné i profit z výroby „zelené“ elektřiny. V případě, že by v budoucnu byly zrušeny dotace na elektřinu vyrobenou z bioplynu, roční zisk varianty D3 by činil pouze 121,74 mil. Kč. I tak by vyšší investice do kalového hospodářství byla výhodná, protože návratnost v porovnání s variantou D4 by byla pouhých 8 let (nebo 5 v případě uplatnění zelených bonusů).

#### 4.6 Souhrn výsledků materiálových, energetických a ekonomických bilancí

V předchozích kapitolách byly popsány výsledky bilancí jak jednotlivých samostatných procesů včetně parametrické citlivosti, tak materiálové a energetické bilance uvažovaných variant. Dále byl proveden zjednodušený ekonomický rozbor každé varianty. Na tomto místě bude následovat shrnutí všech podstatných kladů a záporů každého uvažovaného řešení kalového hospodářství ÚČOV Praha. Každé řešení přitom sestává z krátkodobé a dlouhodobé části (jedná se tedy o logické kombinace variant K a D). Vyhodnocení všech uvažovaných řešení je provedeno z hlediska ÚČOV Praha.

##### 4.6.1 Řešení č. 1

Kombinace variant: K1 + D1, schematicky znázorněno na obr. 36.



Obr. 36 Materiálová a energetická bilance řešení č. 1 – schéma

Stručný popis: Rekonstrukce stávajícího kalového hospodářství na Císařském ostrově v krátkodobém horizontu s následnou výstavbou kalového hospodářství v Drastech. Zaměření na maximální produkci „zelené“ elektrické energie (z bioplynu) a kompostování odvodněného kalu.

Celkové investiční náklady:  $700 + 2\,000 = 2\,700$  mil. Kč.

Klady:

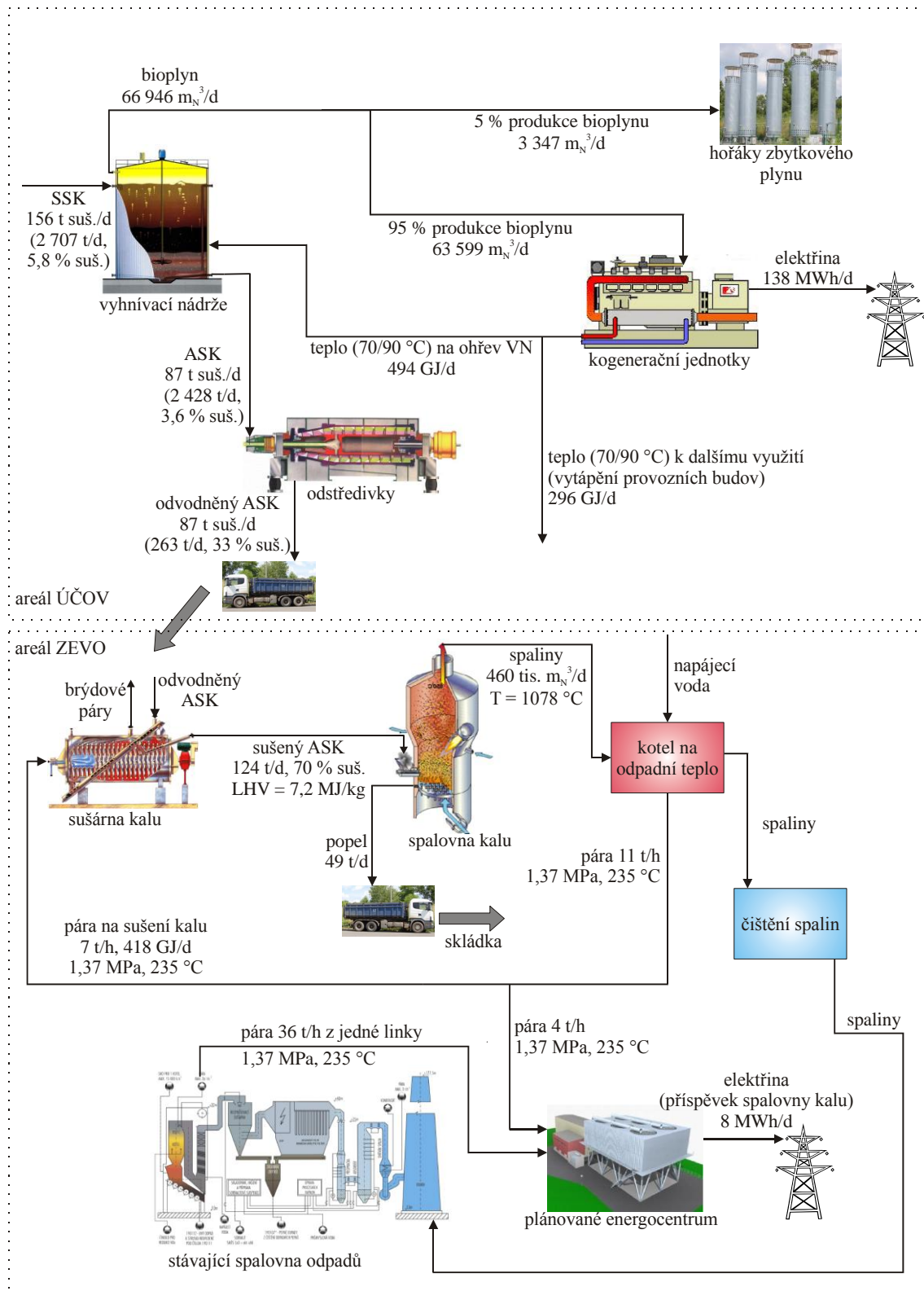
- ⊕ výroba „zelené“ elektrické energie (138,15 MWh/d),
- ⊕ provozování pouze jedné technologie (anaerobní stabilizace), čemuž budou odpovídat i provozní náklady,
- ⊕ minimální investiční náklady,
- ⊕ kompostování je materiálové využití, což je z hlediska legislativy upřednostňováno před energetickým využitím.

Zápory:

- ⊖ velké množství vyhnílého kalu, pro který je nutné zajistit odvoz z ÚČOV a finální likvidaci/využití,
- ⊖ pravděpodobné zpřísnění limitů obsahu rizikových látek,
- ⊖ možnost zvýšení obsahu rizikových látek v kalu.

## 4.6.2 Řešení č. 2

Kombinace variant: K2 + D2, schematicky znázorněno na obr. 37.



Obr. 37 Materiálová a energetická bilance řešení č. 2 – schéma



Stručný popis: Rekonstrukce stávajícího kalového hospodářství na Císařském ostrově v krátkodobém horizontu s následnou výstavbou kalového hospodářství v Drastech. Zaměření na maximální produkci „zelené“ elektrické energie (z bioplynu) a odvoz odvodněného kalu ke spalování v nově vybudované spalovně v ZEVO Malešice.

Celkové investiční náklady:  $700 + 2\,000 = 2\,700$  mil. Kč.

Klady:

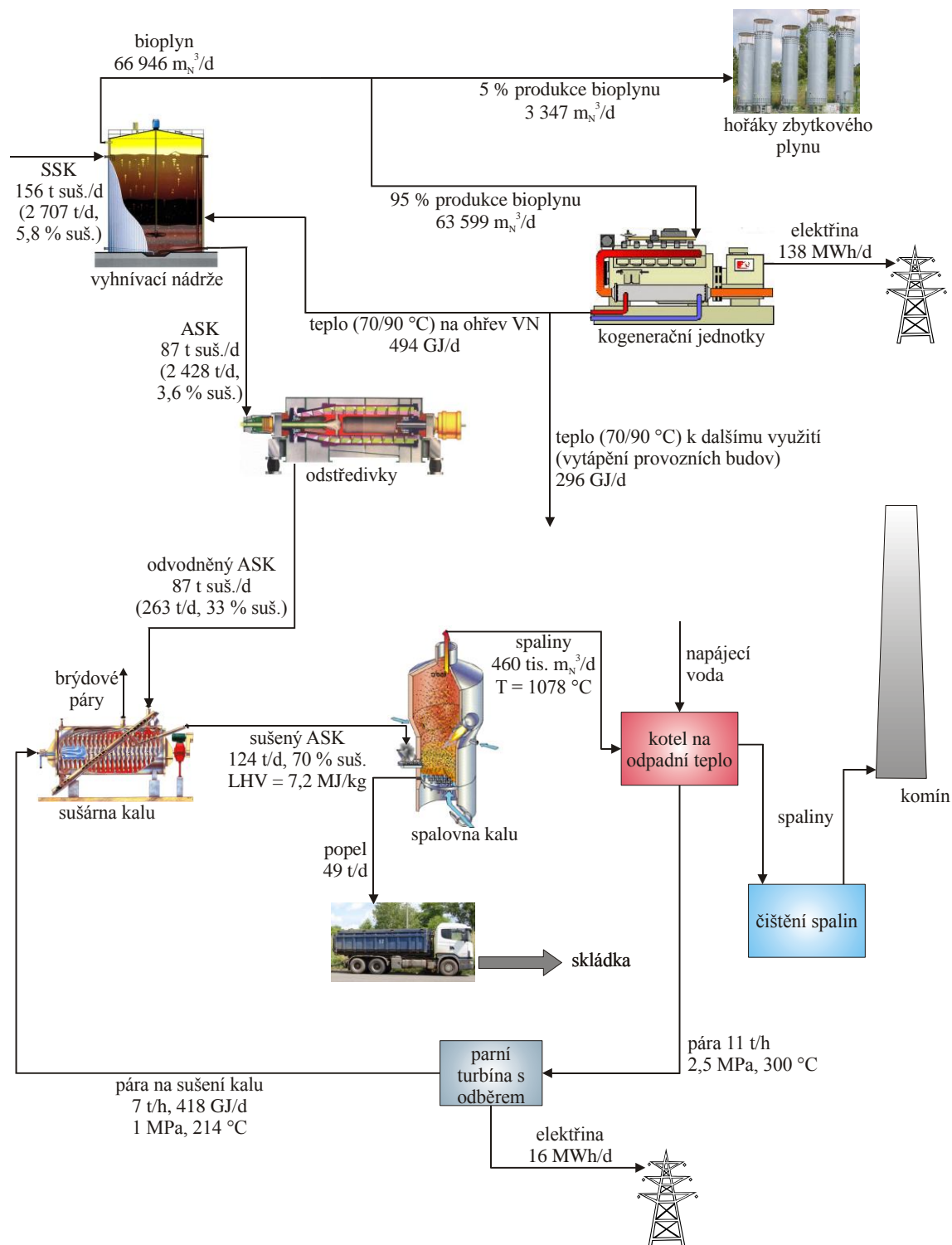
- ⊕ výroba „zelené“ elektrické energie (138,15 MWh/d),
- ⊕ provozování pouze jedné technologie (anaerobní stabilizace), čemuž budou odpovídat i provozní náklady,
- ⊕ minimální investiční náklady.

Zápory:

- ⊖ velké množství vyhnílého kalu, pro který je nutné zajistit odvoz z ÚČOV a za jehož spalování je nutné platit vysokou částku (lze očekávat, že bude mnohem vyšší než za kompostování s ohledem na provozní náklady spalovny a sušárny kalu),
- ⊖ nutné dobré smluvní ošetření jak běžného provozu, tak i mimořádných stavů (např. dlouhodobý výpadek spalovny apod.),
- ⊖ jediné řešení, které není ziskové.

## 4.6.3 Řešení č. 3

Kombinace variant: K3 + D3, schematicky znázorněno na obr. 38.



Obr. 38 Materiálová a energetická bilance řešení č. 3 – schéma

Stručný popis: Rekonstrukce stávajícího kalového hospodářství na Císařském ostrově a zároveň výstavba vlastní spalovny kalů v Drastech v krátkodobém horizontu s následnou výstavbou anaerobní stabilizace v Drastech. S výstavbou spalovny současně výstavba

sušárny kalu. Zaměření na maximální produkci „zelené“ elektrické energie (z bioplynu) a spalování kalu bez podpurného fosilního paliva. Skládkování produkovaného popela (příp. možnost využití popela ve stavebnictví, k přípravě rekultivačních směsí apod. – nutnost provedení příslušných chemických a fyzikálních rozborů reálného popela).

Celkové investiční náklady:  $700 + 900 + 900 + 2\,000 = 4\,500$  mil. Kč.

Klady:

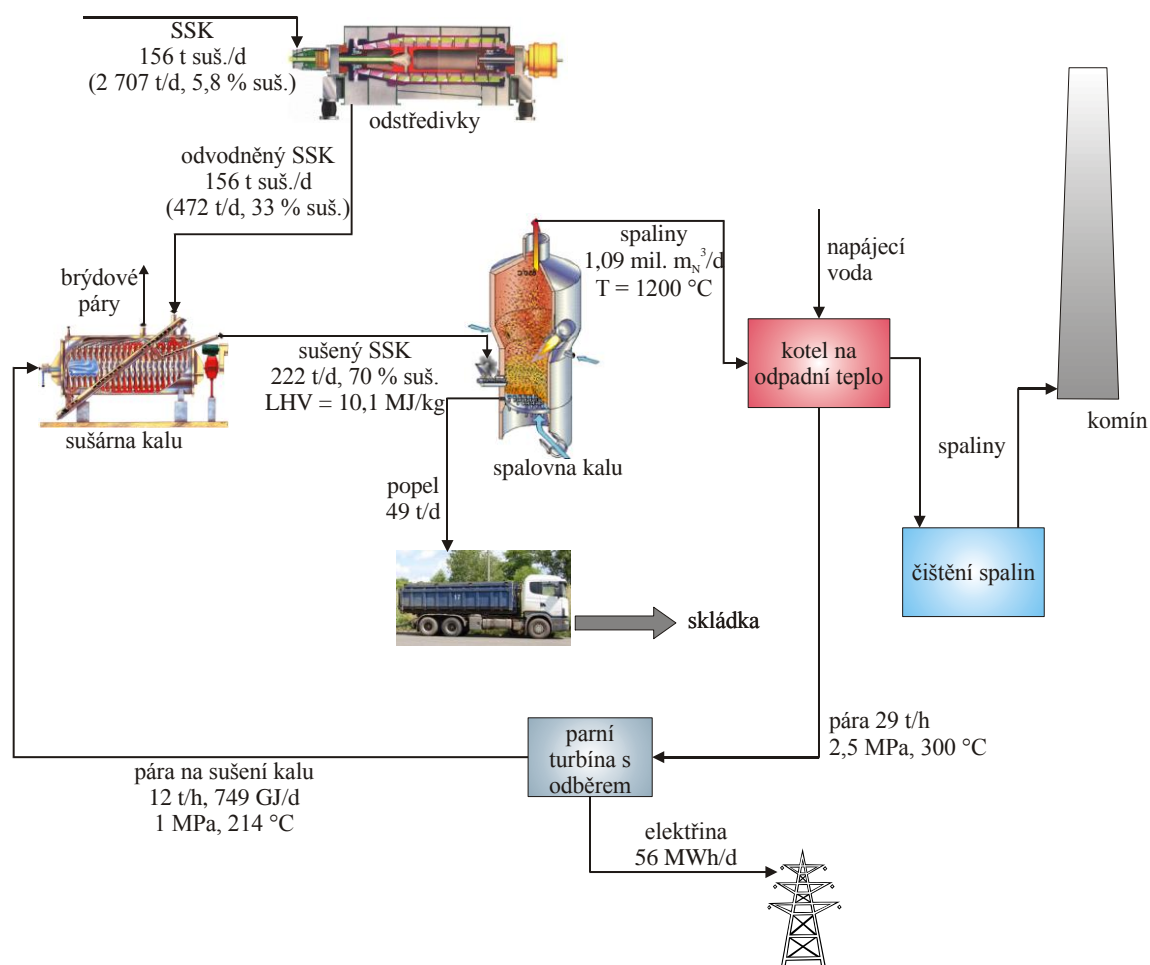
- ⊕ výroba „zelené“ elektrické energie (138,15 MWh/d),
- ⊕ výroba další elektrické energie využitím páry v turbíně (16,04 MWh/d),
- ⊕ veškeré stupně zpracování kalu patří jednomu provozovateli,
- ⊕ pouze 49,21 t/d inertního popela, který je nutné dále zpracovat.

Zápory:

- ⊖ provoz celkem tří technologií (anaerobní stabilizace, sušení a spalování), což přináší i vyšší provozní náklady,
- ⊖ vysoké investiční náklady.

#### 4.6.4 Řešení č. 4

Kombinace variant: K1 + D4, schematicky znázorněno na obr. 39 (pouze D4).



Obr. 39 Materiálová a energetická bilance řešení č. 4 – schéma

Stručný popis: Rekonstrukce stávajícího kalového hospodářství na Císařském ostrově a následné kompostování kalu. V dlouhodobém horizontu výstavba spalovny směšného surového kalu v Drastech. Skládkování produkovaného popela (příp. možnost využití popela ve stavebnictví, k přípravě rekultivačních směsí apod. – nutnost provedení příslušných chemických a fyzikálních rozborů reálného popela).

Celkové investiční náklady:  $700 + 1\,500 + 1\,600 = 3\,800$  mil. Kč.

Klady:

- ⊕ provoz pouze dvou technologií (sušení a spalování),
- ⊕ veškeré stupně zpracování kalu patří jednomu provozovateli,
- ⊕ pouze 49,21 t/d inertního popela, který je nutné dále likvidovat,

Zápory:

- ⊖ malá produkce elektrické energie (55,71 MWh/d) a žádná „zelená“,
- ⊖ minimální variabilita likvidace směšného surového kalu v případě výpadku hlavní technologie,
- ⊖ nutná výstavba dvou totožných linek (jedna v provozu, jedna v pravidelné servisní odstávce), protože spalování musí být zajištěno celoročně.

#### 4.6.5 Diskuse výsledků

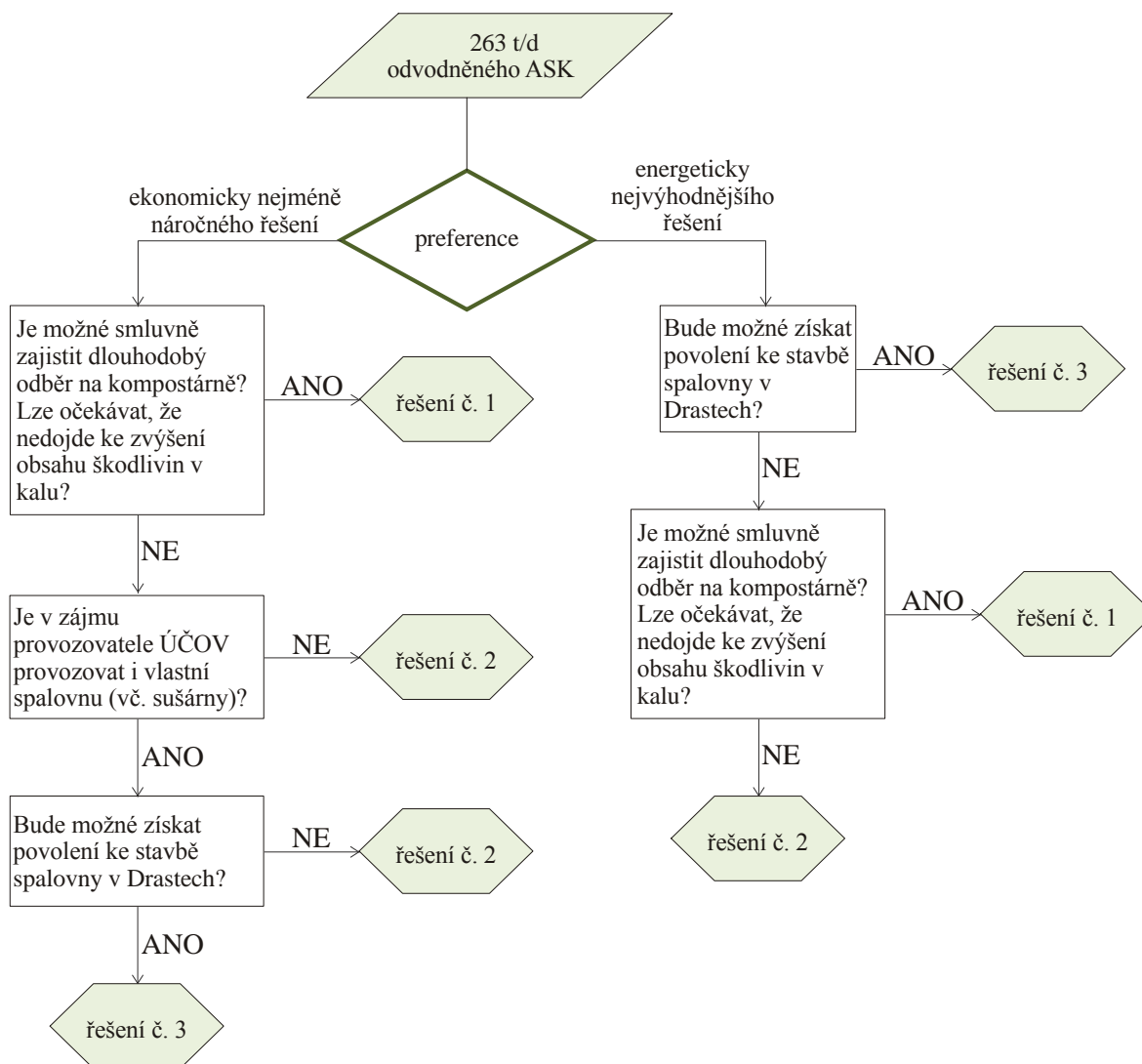
Z provedených rozborů je patrné, že pro ÚČOV je z energetického hlediska nejméně výhodné přímé spalování směšného surového kalu (řešení č. 4) a z ekonomického hlediska odvoz vyhnílého kalu ke spalování do ZEVO Malešice (řešení č. 2). Je to dáno vysokou cenou za spálení kalu. Pouze v případě, že by cena za spalování kalu byla stejná jako cena za kompostování kalu, bylo by toto řešení konkurenceschopné. To je však zcela nemožné, protože při takové ceně by nebylo možné pokrýt ani provozní náklady (zisky z prodeje elektřiny a tepla jsou při vyráběném množství zanedbatelné).

Při porovnání zbývajících dvou řešení (tedy spalování anaerobně stabilizovaného kalu ve vlastní spalovně nebo jeho kompostování) je zcela evidentní, že z hlediska výroby energie je výhodnější řešení č. 3 (tedy vlastní spalovna). Vzhledem k provozním nákladům sušárny a spalovny však v celkovém ekonomickém hodnocení vychází lépe řešení č. 1 (tedy kompostování), které je investičně i provozně méně náročné. Velkou nevýhodou kompostování kalu však je, že musejí být splněny zákonem požadované limity obsahu rizikových látek, zejména těžkých kovů. Vzhledem ke zvyšující se snaze chránit životní prostředí můžeme v budoucnu očekávat, že limity budou nejen zpřísněny, ale navíc bude rozšířen seznam rizikových látek. Pokud by kvalita kalu nedosahovala přísných požadavků a bylo nutné zamezit jeho skládkování, potom jedinou možnou cestou je jeho spalování, i když je finančně náročné.

#### 4.7 Návrh konkrétního řešení

Z výše uvedených výsledků materiálových a energetických bilancí a z ekonomického vyhodnocení všech uvažovaných variant vyplývá, že ideální řešení kalového hospodářství ÚČOV, které by nemělo žádné nevýhody, v podstatě neexistuje. Při výběru finálního řešení, které bude možné označit jako vhodné, je vždy nutné stanovit priority, podle

kterých bude výběr postupovat. Navíc se do výběru promítnou i vazby (resp. smluvní vztahy) mezi všemi zainteresovanými provozovateli (ať už se jedná o provozovatele ÚČOV, ZEVO nebo kompostárny a skládky), které nemohou být v rámci této disertační práce definovány (obchodní tajemství, ke kterému není běžně přístup). Proto je výsledkem této práce doporučení, jak by mělo být postupováno při výběru řešení kalového hospodářství. Tento postup je znázorněn formou rozhodovacího diagramu na obr. 40.



**Obr. 40** Rozhodovací diagram pro výběr řešení kalového hospodářství na ÚČOV Praha

Rozhodovací diagram, vytvořený na základě provedeného hodnocení uvažovaných variant, vychází ze dvou základních poznatků:

- 1) Řešení č. 4 (spalování směsného surového kalu) se nedoporučuje realizovat, protože není výhodné ekonomicky ani energeticky. Spalovaný kal není možné skladovat, protože je nestabilní ani s ním jinak nakládat (např. kompostovat), protože vykazuje nebezpečné vlastnosti (infekčnost).

- 2) Řešení č. 2 (spalování anaerobně stabilizovaného kalu v ZEVO Malešice) se doporučuje pouze jako nouzové řešení, kdy nebude možné kal kompostovat kvůli nesplnění zákonných limitů na obsah rizikových látek a zároveň nebude vydáno povolení ke stavbě spalovny v Drastech.

Postup při volbě vhodného řešení kalového hospodářství ÚČOV Praha by měl být tedy následující:

Posouzení kvality kalu na základě provedených laboratorních analýz a odhad, zda v budoucnu nedojde k výraznému zhoršení kvality kalů (obsah rizikových látek) s ohledem na producenty napojené na kanalizační síť. Posouzení možnosti uzavření dlouhodobé smlouvy s odběratelem kalu (kompostárnou) na odběr navýšeného množství kalu.

V případě kladného zjištění lze doporučit **řešení č. 1** (kompostování anaerobně stabilizovaného kalu), protože toto řešení je ekonomicky nejméně náročné a zároveň je kal materiálově využíván.

V případě, že kal nebude možné z dlouhodobého hlediska kompostovat, je vhodné uvažovat o **řešení č. 3** (výstavbě vlastní spalovny anaerobně stabilizovaného kalu v Drastech). V takovém případě je nutné nejprve zajistit studii proveditelnosti, které by měla zejména vyloučit odpor veřejnosti ke stavbě spalovny v dané lokalitě.

V případě, že kal nebude možné kompostovat a dále nebude povolena výstavba spalovny v Drastech, přichází na řadu **řešení č. 2** (výstavba spalovny anaerobně stabilizovaného kalu v areálu ZEVO Malešice). V tomto případě lze očekávat, že povolení ke stavbě bude vydáno, protože v daném areálu je provozována již spalovna komunálního kalu.

## 5 ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na aplikaci poznatků a vhodných technologií v oblasti zpracovávání odpadů, na efektivní využití kalů z ČOV, konkrétně z Ústřední čistírny odpadních vod v Praze. Jedná se o téma v současné době velmi diskutované, neboť se připravuje rekonstrukce čistírny, což přinese i zvýšenou produkci kalu.

Při hledání vhodného řešení kalového hospodářství byly porovnávány pouze takové technologie na zpracování kalů, které jsou reálné právě pro ÚČOV, a to jak z hlediska množství produkovaného kalu, tak z hlediska umístění ÚČOV. Do úvahy byl vzat rovněž plán na vymístění kalového hospodářství z Císařského ostrova do Drast, kde je v současné době odkaliště.

Na základě provedených rozvah byly vybrány k podrobnému posouzení čtyři varianty zpracování kalu, které jsou podrobně popsány v kap. 4.4.1:

- 1) kompostování anaerobně stabilizovaného kalu,
- 2) spalování anaerobně stabilizovaného kalu ve spalovně vybudované v areálu ZEVO Malešice,
- 3) spalování anaerobně stabilizovaného kalu ve spalovně vybudované v areálu Drasty,
- 4) spalování směsného surového kalu ve spalovně vybudované v areálu Drasty

### 5.1 Komplexní řešení založené na experimentálním a výpočtovém přístupu

Podkladem pro výběr vhodného řešení kalového hospodářství byly výsledky materiálových, energetických a ekonomických bilancí, které jsou stručně shrnuty v kap. 4.6. Vstupní data, která byla použita pro veškeré výpočty, pocházejí jednak z vyhodnocení provozu ÚČOV Praha v letech 2004 až 2007, dále z provedených experimentálních měření a z literatury, a jsou uvedena v kap. 4.4.2. Při výpočtu materiálových a energetických bilancí bylo nutné učinit určité předpoklady, které se mohou v reálném provozu lišit. Proto byla provedena parametrická citlivost vybraných dílčích výsledků provedených bilancí (kap. 4.4.4).

Shrnutím všech získaných poznatků je možné konstatovat, že pro případ ÚČOV je možné doporučit ke zvážení dvě řešení. Prvním je zachování současné koncepce, tedy kompostování kalu. Toto řešení je v souladu s legislativním požadavkem upřednostňovat materiálové využití odpadů před energetickým. Dále je toto řešení investičně i provozně nejméně náročné ze všech uvažovaných variant. Druhým řešením doporučeným ke zvážení je výstavba vlastní spalovny v lokalitě Drasty. Toto řešení je vhodné zejména pro nezávislost na kvalitě kalu, resp. obsahu rizikových látek v něm, které mohou omezit vhodnost kalu ke kompostování.

Při zvažování uvedených řešení je nutné důkladně posoudit zejména dvě věci:

- 1) Možnost uzavření dlouhodobé smlouvy na odběr navýšeného množství kalu s provozovatelem kompostárny s uvážením rizika zpřísnění legislativních požadavků na kvalitu kompostovaných kalů.

- 2) Možnost výstavby vlastní spalovny kalu v lokalitě Drasty s ohledem na možný odpor veřejnosti k této stavbě.

Je možné, že ze sociálně-politických důvodů nebude možné realizovat ani jedno z výše doporučených řešení. Potom přichází na řadu řešení, které uvažuje vybudování spalovny kalu v ZEVO Malešice. Toto řešení je pro ÚČOV bohužel ekonomicky poměrně nevýhodné, navíc je podmíněno dobrým smluvním ošetřením odběru kalu provozovatelem spalovny.

Cesta k řešení problematiky prezentované v disertační práci je graficky znázorněna na obr. 41.

## 5.2 Budoucí práce

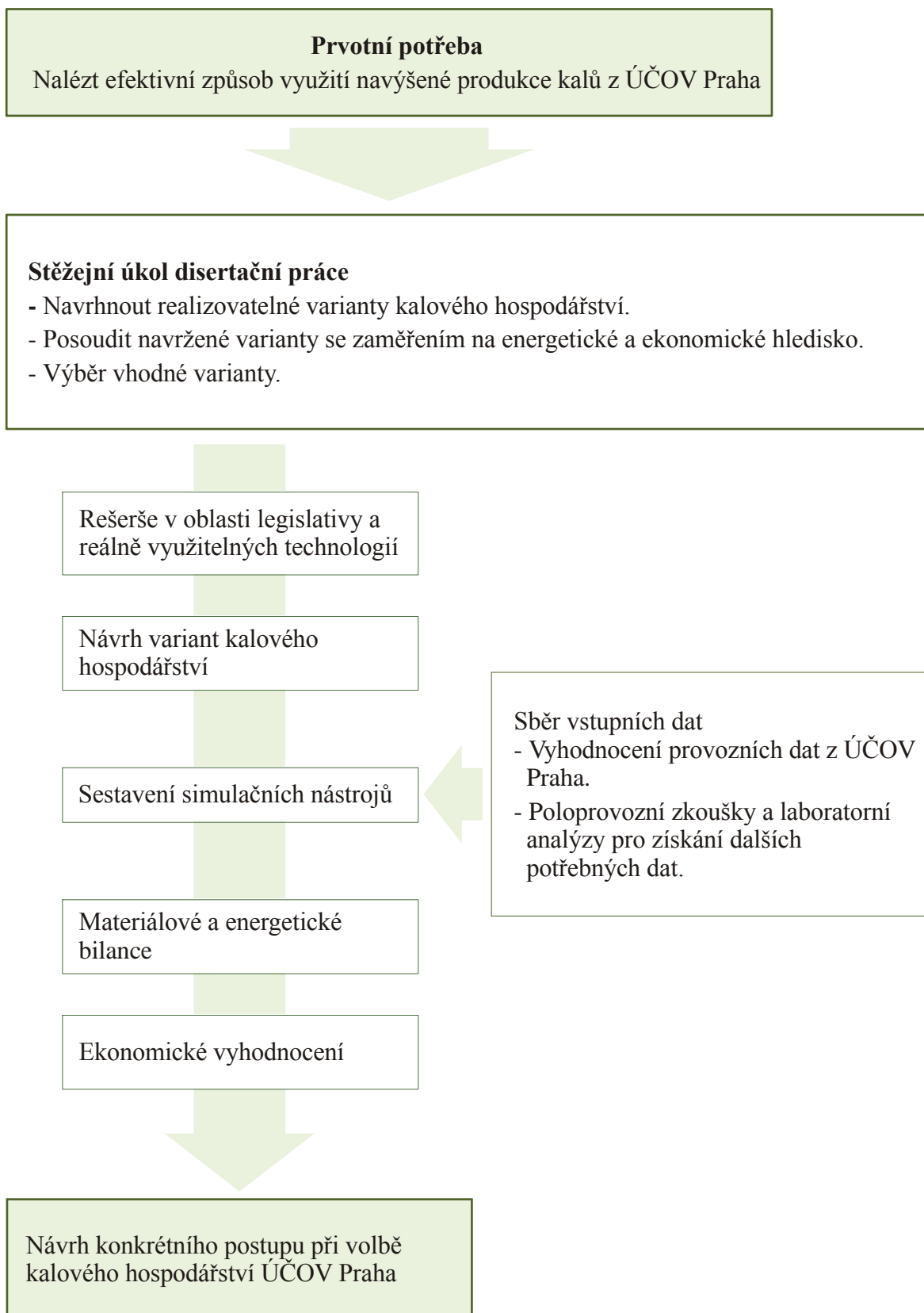
Výsledky a závěry této disertační práce jsou základem hlubší analýzy výběru alternativy kalového hospodářství. Jak bylo uvedeno výše, v rámci této práce není možné postihnout majetkoprávní a smluvní vztahy mezi dotčenými společnostmi, které výrazně ovlivní výběr finálního řešení kalového hospodářství. Byly započaty práce k přípravě detailní studie, která kromě bilančních výpočtů uvedených v této práci vyhodnotí rovněž tyto vztahy.

Disertační práce je rovněž příspěvkem k řešení strategického projektu NPV II „Odpady jako surovina a zdroje energie“. V rámci tohoto projektu bude posouzena možnost využití teplotní desintegrace ke zvýšení odvodnitelnosti kalů na ÚČOV Praha, což by výrazně zlepšilo energetickou bilanci případného spalování kalu.

Simulační výpočty anaerobní stabilizace a sušení vytvořené v rámci této práce budou podkladem pro rozšíření softwaru W2E o další moduly.

Další výzkum, který úzce souvisí s tématem disertační práce, se připravuje v oblasti možnosti zvýšení produkce bioplynu při anaerobní stabilizaci kalů užitím organických aditiv rostlinného původu. Výsledky výzkumu by bylo možné aplikovat rovněž na ÚČOV Praha. Pouze bude nutné, z hlediska možného prohloubení rozkladu organické hmoty, posoudit vhodnost aplikace i v případě následného spalování kalu.





Obr. 41 Komplexní řešení problematiky kalového hospodářství ÚČOV Praha

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JEVILEVIČ, A. Z. *Využití kalů z odpadních vod*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 94 s.
- [2] DOHÁNYOS, M., et al. Vývoj kalového hospodářství na ÚČOV Praha za posledních 10 let. In *Kaly a odpady 2008*. 1. vyd. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2008. s. 29-36. ISBN 978-80-890881.
- [3] DOHÁNYOS, M., et al. Dlouhodobé hodnocení stavu a účinnosti technologie zpracování kalů na ÚČOV Praha. *Čistírenské listy*. 2008, č. 6, s. 3-8.
- [4] SÝKORA, K., et al. Řešení kalového hospodářství ÚČOV Praha ve vztahu na zisk OZE. *Voda* [online]. 2007, roč. 3, č. 2, s. 2-6. [cit. 2008-12-04]. Dostupný z WWW: <www.e-voda.cz>. ISSN 1801-5794.
- [5] SÝKORA, K., et al. Technologických, energetických, ekologických a provozních hledisek pro výhledové hospodaření s kaly na ÚČOV Praha. In *Kaly a odpady 2008*. 1. vyd. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2008. s. 31-43. ISBN 978-80-890881.
- [6] KUTIL, J., HARTIG, K. Sušení čistiarenských kalů. *Čistírenské listy*. 2008, č. 6, s. 1-2.
- [7] *Český statistický úřad* [online]. 2008, aktualizováno dne: 29. 12. 2008 [cit. 2008-12-29]. Dostupný z WWW: <www.czso.cz>.
- [8] *Eurostat* [online]. 2008, December 29, 2008 [cit. 2008-12-29]. Dostupný z WWW: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?\_pageid=1090,30070682,1090\_33076576&\_dad=portal&\_schema=PORTAL>.
- [9] BORÁŇ, J. *Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím*. Brno, 2008. 127 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [10] MAZEL, L., POKORNÝ, M. *Vodárny a čistírny*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992. 149 s. ISBN 80-214-0473-6.
- [11] SHUNDAR, L. *Water and wastewater calculations manual*. 1st ed. New York: McDraw-Hill, 2001. 854 p. ISBN 0-07-137195-8.
- [12] PÉREZ-ELVIRA, S. I., NIETO DIEZ, P., FDZ-POLANCO, F. Sludge minimisation technologies. *Environmental Science and Bio/Technology*, 2006, no. 5, pp. 375-398.
- [13] PYTL, V., et al. *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod*. 1. vyd. Praha, 2004. 209 s. ISBN 80-239-2528-8.
- [14] FOLLER, J., JELÍNEK, J. Provozní zkušenosti se zpracováním čistiarenských kalů technologií OSS – oxyterm sludge systém na čistírně odpadních vod Tetčice. In *Kaly a odpady 2006*. 1. vyd. Brno: Asociace čistiarenských expertů ČR, 2006. s. 95-100. ISBN 80-239-7258-8.
- [15] LUNDIN, M., OLOFSSON, M., PETTERSSON, G. J., ZETTERLUNG, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, vol. 41, pp. 255-278.

- [16] STRAKA, F., et al. *Bioplyn: příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. 1. vyd. Říčany: Gas, 2003. 517 s. ISBN 80-7328-029-9.
- [17] KAŠTÁNEK, F. *Bioinženýrství*. 1. vyd. Praha: Academia, 2001. 334 s. ISBN 80-200-0768-7.
- [18] DOHÁNYOS, M., et al. *Anaerobní čistírenské technologie*. 1. vyd. Brno: Noel 2000, 1998. 343 s. ISBN 80-86020-19-3.
- [19] *Updated Guidebook on Biogas Development*. New York: United Nations Pubns, 1984. 178 p. ISBN 9211192269.
- [20] REYNOLDS, T. D., RICHARDS, P. A. Unit operations and processes in environmental engineering. 2nd ed. Boston: PWS Publishing Company, 1995. 798 p. ISBN 978-0-534-94884-9
- [21] *TEDOM, s.r.o.* [online]. [cit. 2008-12-6]. Dostupný z WWW: <www.tedom.cz>.
- [22] *Energetický regulační úřad* [online]. 2007-2009, aktualizováno dne: 22. 1. 2009 [cit. 2009-1-22]. Dostupný z WWW: <www.eru.cz/dias-read\_article.php?articleId=1>.
- [23] FLAGA, A. Sludge drying. In *And optimisation of urban sanitation systems*. 1st ed. Cracow: [s.n.], 2005. pp. 73-82. [cit. 2008-12-04]. Dostupný z WWW: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/Flagasludgedrying73.pdf>. ISSN 1650-8610.
- [24] SANGER, M., WERTHER, J., OGADA, T. NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. *Fuel*, 2001, vol. 80, pp. 167-177.
- [25] ARLABOSE, P., CHAVEZ, S., PREVOT, C. Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2005, vol. 22, no. 2, pp. 227-232.
- [26] DUU-JONG, L., et al. Introduction to Sludge Treatment. edit. WANG, L. K. *Physicochemical Treatment Processes*. Handbook of Environmental Engineering, Vol. 3, 2nd ed. New York: The Humana Press, 2005. 723 p. ISBN 978-1588291653.
- [27] Richards, E. A. *Energy Costs and Spent Grains Drying*. [online]. Dostupné z <my.execpc.com/~drer/stord1.jpg>. [cit. 2008-12-6].
- [28] *Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.* [online]. 2005-2009, aktualizováno dne: 6. 12. 2008 [cit. 2008-12-6]. Dostupný z WWW: <www.bvk.cz>.
- [29] VALCHÁŘ, J., et al. *Základy sušení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967. 396 s.
- [30] ŠTASTA, P., BORÁŇ, J., BÉBAR, L., STEHLÍK, P., ORAL, J. Thermal Processing of Sewage Sludge. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, is. 9, pp. 1420-1426.
- [31] SPONAR, J. *Possibilities of Using Sludge from Water Treatment Plants and Sewage Disposal Plants in Silicate Technologies*. Ph.D. Thesis. Brno: FCH VUT, 2002. 103 p.
- [32] KUTIL, J. Spoluspalování čistírenských kalů v elektrárně a cementárně. *Odpadové fórum*, 2004. č. 5. s. 19 – 21. ISSN 1212-7779.

- [33] FYTILI, D., ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, pp. 116-140.
- [34] RIJNDERS, L. Disposal, uses and treatments of combustion ashes: a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2005, vol. 43, is. 3, pp. 313-336.
- [35] FRANZ, M. Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Management*. 2008, vol. 28, is. 10, pp. 1809-1818.
- [36] Integrovaná prevence a omezování znečištění. *Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů*. 2005. 753 s.
- [37] PAVLAS, M. *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů*. Brno, 2008. 109 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [38] HOUDKOVÁ, L. *Možnosti energetického využití kalů z ČOV*. Brno, 2005. 49 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [39] HLAVÍNEK, P., HLAVÁČEK, J. *Čištění odpadních vod: praktické příklady výpočtů*. 1. vyd. Brno: NOEL 2000, 1996. 196 s. ISBN 80-86020-00-2.
- [40] Územní plán hlavního města Prahy: Průvodní zpráva. [online]. 2009, Aktualizováno: 27. 2. 2009 [cit. 2009-2-27]. Dostupný z WWW:< magistrat.prahamesto.cz/Uzemni-planovani-a-rozvoj>.
- [41] SHULZ, H., EDER, B. *Bioplyn v praxi*. 1. vyd. Ostrava: HEL, 2004. 168 s. ISBN 80-86167-21-6.
- [42] Ústřední čistírna odpadních vod užívá novou technologii. *Technický týdeník*. 2008, č. 19.
- [43] POSPĚCH, L., et al. *Vyhodnocení provozu Ústřední čistírny odpadních vod za rok 2004*.
- [44] POSPĚCH, L., et al. *Vyhodnocení provozu Ústřední čistírny odpadních vod za rok 2005*.
- [45] POSPĚCH, L., et al. *Vyhodnocení provozu Ústřední čistírny odpadních vod za rok 2006*.
- [46] POSPĚCH, L., et al. *Vyhodnocení provozu Ústřední čistírny odpadních vod za rok 2007*.
- [47] HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J. *Zpráva o výsledcích poloprovozních odvodňovacích zkoušek na ÚČOV Praha*. Výzkumná zpráva VZ-UPEI-2006-02/01. Brno: VUT v Brně, 2006.
- [48] HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J., ELSÄSSER, T. Termofyzikální vlastnosti čistírenských kalů. In *Sborník posterových sdělení*. 1. Brno: AČE ČR, 2007. s. 61-64. ISBN: 978-80-239-9618-0.
- [49] ELSÄSSER, T., HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J. Thermophysical properties of sewage sludge II. In *CD-ROM of Full Texts CHISA 2008*. 1. Praha: Process Engineering Publisher, 2008. ISBN: 978-80-02-02047-9.
- [50] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 212 s. ISBN 80-01-02591-8.

- [51] *STC, s.a.* [online]. [cit. 2008-12-11]. Dostupný z WWW: <[www.stcsa.es](http://www.stcsa.es)>.
- [52] OBROUČKA, K. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2003. 143 s. ISBN 80-248-0009-8.
- [53] HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J., UCEKAJ, V., ELSÄSSER, T., STEHLÍK, P. Thermal Processing of Sewage Sludge – II. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28, is. 16, pp. 2083-2088.
- [54] SANIN, F. D. Effect of solution physical chemistry on the rheological properties of activated sludge. *Water S.A.*, 2002, vol. 28, no. 2. [cit. 2008-7-10]. Dostupný z WWW: <[www.wrc.org.za/archives/watersa%20archive/2002/April/1489.pdf](http://www.wrc.org.za/archives/watersa%20archive/2002/April/1489.pdf)>.
- [55] KRYLÓW, M, FRYZLEWICZ-KOZAK, B. Rheological properties of wastewater sludge. In *Integration and optimisation of urban sanitation systems*. 1st ed. Cracow: [s.n.], 2005. pp. 81-86. [cit. 2008-12-04] Dostupný z WWW: <<http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/Krylowetal81.pdf>>. ISSN 1650-8610.
- [56] *Atlas-Stord* [online]. [cit. 2009-2-27]. Dostupný z WWW: <[www.atlas-stord.dk/page315.aspx](http://www.atlas-stord.dk/page315.aspx)>.
- [57] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008 ze dne 18. listopadu 2008, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů* [online]. 22. 12. 2008 [cit. 2008-12-29]. Dostupný z WWW: <[www.eru.cz](http://www.eru.cz)>.
- [58] *Pražské služby* [online]. 2006, aktualizováno dne: 1. 1. 2008 [cit. 2008-12-29]. Dostupný z WWW: <[www.psas.cz/cenikZevo.cfm](http://www.psas.cz/cenikZevo.cfm)>.

## Citované právní předpisy a normy

Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů ve znění pozdějších předpisů.

Zákon č. 86/2002 Sb. o ovzduší a o změně některých dalších zákonů.

Vyhláška č. 381/2001 Sb., kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů)

Vyhláška č. 382/2001 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě.

Vyhláška č. 383/2001 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady.

Vyhláška č. 341/2008 Sb. o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky 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 (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady).

Nařízení vlády č. 197/2003 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky.

Nařízení vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu.

Nařízení vlády č. 63/2001 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech.

Norma ČSN 46 5735 Průmyslové komposty.

Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008 ze dne 18. listopadu 2008, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů.

Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2007 ze dne 20. listopadu 2007, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů.

Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2006 ze dne 21. listopadu 2006, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů.

Cenové rozhodnutí ERÚ č. 10/2005 ze dne 18. listopadu 2005, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných zdrojů.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

Zkratka	Význam
AOX	absorbovatelné organické halogeny
ASK	anaerobně stabilizovaný kal
BP	bioplyn
BSK	biologická spotřeba kyslíku
ČOV	čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
EO	ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
HZP	hořák(y) zbytkového plynu
KJ	kogenerační jednotka(y)
KTJ	kolonie tvořící jednotku
OKEČ	odvětvová klasifikace ekonomických činností
OZE	obnovitelné zdroje energie
PCB	polychlorované bifenyly
SSK	směsný surový kal
TKO	tuhý komunální odpad
ÚČOV	Ústřední čistírna odpadních vod (v Praze)
VN	vyhňivací nádrž(e)
ZEVO	Závod na energetické využití odpadu

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Název	Jednotka
$c_p$	měrná tepelná kapacita	$\text{kJ/kg.K}$
$c_{p,p}$	měrná tepelná kapacita popela	$\text{kJ/kg.K}$
$c_{p,suš}$	měrná tepelná kapacita sušiny	$\text{kJ/kg.K}$
$c_{p,v}$	měrná tepelná kapacita vody	$\text{kJ/kg.K}$
$E_{BP}$	elektřina vyrobená z bioplynu	$\text{kJ}$
$h_{Ar}$	měrná entalpie argonu (složka spalin)	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{CO_2}$	měrná entalpie oxidu uhličitého (složka spalin)	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{H_2O}$	měrná entalpie vody (složka spalin)	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{in}$	měrná entalpie vody na vstupu do sušárny	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{out}$	měrná entalpie vody na výstupu ze sušárny	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{O_2}$	měrná entalpie kyslíku (složka spalin)	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{N_2}$	měrná entalpie dusíku (složka spalin)	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{sat}$	měrná entalpie vody při nasycení	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{SO_2}$	měrná entalpie oxidu siřičitého (složka spalin)	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{sp}$	měrná entalpie spalin	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{sp,BP,1}$	měrná entalpie spalin z bioplynu na výstupu z KJ	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{sp,BP,2}$	měrná entalpie spalin z bioplynu po ochlazení	$\text{kJ/m}_N^3$
$h_{vz}$	měrná entalpie vzduchu	$\text{kJ/m}_N^3$
$m_A$	hmotnost složky A	$\text{kg}$
$m_{celk}$	celková hmotnost soustavy	$\text{kg}$
$\dot{m}_K$	hmotnostní tok kalu	$\text{kg/d}$
$\dot{m}_{org,SSK}$	hmotnostní tok organického podílu směsného surového kalu	$\text{kg/d}$
$\dot{m}_{suš}$	hmotnostní tok sušiny	$\text{kg/d}$
$\dot{m}_{suš,SSK}$	hmotnostní tok sušiny směsného surového kalu	$\text{kg/d}$
$\dot{m}_v$	hmotnostní tok vody	$\text{kg/d}$
$\dot{m}_{v,o}$	hmotnostní tok vody k odpaření	$\text{kg/d}$



Symbol	Název	Jednotka
$\dot{m}_{v,z}$	hmotnostní tok vody zbytkové	kg/d
$\dot{m}_p$	hmotnostní tok popela	kg/d
$\dot{m}_{pp}$	hmotnostní tok přídavného paliva	kg/d
$\dot{n}_C$	látkový tok C v hořlavině	kmol/d
$\dot{n}_H$	látkový tok H v hořlavině	kmol/d
$\dot{n}_N$	látkový tok N v hořlavině	kmol/d
$\dot{n}_O$	látkový tok O v hořlavině	kmol/d
$\dot{n}_S$	látkový tok S v hořlavině	kmol/d
$\dot{n}_{sp}$	látkový tok spalin	kmol/d
$\dot{n}_{sp,CO_2}$	látkový tok CO <sub>2</sub> ve spalinách	kmol/d
$\dot{n}_{sp,H_2O}$	látkový tok H <sub>2</sub> O ve spalinách	kmol/d
$\dot{n}_{sp,i}$	látkový tok i-té složky ve spalinách	kmol/d
$\dot{n}_{sp,N_2}$	látkový tok N <sub>2</sub> ve spalinách	kmol/d
$\dot{n}_{sp,O_2}$	látkový tok O <sub>2</sub> ve spalinách	kmol/d
$\dot{n}_{sp,SO_2}$	látkový tok SO <sub>2</sub> ve spalinách	kmol/d
$\dot{n}_v$	látkový tok vody v kalu	kmol/d
$\dot{n}_{vz}$	látkový tok vzduchu	kmol/d
$\dot{n}_{vz,CO_2}$	látkový tok CO <sub>2</sub> ve vzduchu	kmol/d
$\dot{n}_{vz,H_2O}$	látkový tok H <sub>2</sub> O ve vzduchu	kmol/d
$\dot{n}_{vz,i}$	látkový tok i-té složky ve vzduchu	kmol/d
$\dot{n}_{vz,N_2}$	látkový tok N <sub>2</sub> ve vzduchu	kmol
$\dot{n}_{vz,O_2}$	látkové množství O <sub>2</sub> ve vzduchu	kmol
$\dot{n}_{vz,stech}$	látkový tok stechiometrického vzduchu	kmol
$LHV_{BP}$	výhřevnost bioplynu	kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>
$LHV_K$	výhřevnost kalu	kJ/kg
$LHV_{pp}$	výhřevnost přídavného paliva	kJ/ m <sub>N</sub> <sup>3</sup>
$\dot{Q}_K$	teplo získané spálením kalu	kJ/d
$\dot{Q}_O$	teplo na ohřev kalu	kJ/d

Symbol	Název	Jednotka
$\dot{Q}_p$	teplo odvedené popelem	kJ/d
$\dot{Q}_{pp}$	teplo získané spalováním přídavného paliva	kJ/d
$\dot{Q}_{s,k}$	teplo na sušení kalu	kJ/d
$\dot{Q}_{sp}$	teplo odvedené spalinami	kJ/d
$\dot{Q}_{T,np}$	nízkopotenciální teplo z kogenerační jednotky	kJ/d
$\dot{Q}_{T,vp}$	vysokopotenciální teplo z kogenerační jednotky	kJ/d
$\dot{Q}_{vz}$	teplo vnesené vzduchem	kJ/d
$\dot{Q}_{ztr,VN}$	tepelné ztráty vyhnívacích nádrží	W
$S_d$	plocha stěn a stropu vyhnívací nádrže	m <sup>2</sup>
$S_{st}$	plocha dna vyhnívací nádrže	m <sup>2</sup>
$T$	teplota	°C
$T_o$	teplota okolí	°C
$T_p$	teplota půdy	°C
$T_{S,in}$	teplota kalu na vstupu do sušárny	°C
$T_{S,out}$	teplota kalu na výstupu ze sušárny	°C
$T_{SSK}$	teplota směsného surového kalu	°C
$T_{VN,as}$	teplota anaerobní stabilizace	°C
$\dot{V}_{BP,KJ}$	objemový tok bioplynu spalovaný v KJ	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d
$\dot{V}_{BP,prod}$	objemový tok produkovaného bioplynu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d
$\dot{V}_{sp}$	objemový tok spalin	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d
$\dot{V}_{sp,BP}$	objemový tok spalin ze spalování bioplynu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d
$\dot{V}_{vz}$	objemový tok vzduchu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /d
$w_A$	hmotnostní zlomek složky	%
$w_{suš}$	hmotnostní zlomek sušiny	%
$\alpha_d$	koeficient přestupu tepla dna VN	W/m <sup>2</sup> .K
$\alpha_{st}$	koeficient přestupu tepla stěny a stropu VN	W/m <sup>2</sup> .K
$\alpha_{vz}$	přebytek vzduchu	-
$\beta$	měrná produkce bioplynu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg org. látek

Symbol	Název	Jednotka
$\eta_{EE}$	elektrická účinnost kogenerační jednotky	%
$\eta_{TEP}$	tepelná účinnost kogenerační jednotky	%
$\varphi_{CH_4}$	objemový zlomek metanu v bioplynu	obj. %
$\varphi_{sp,i}$	objemový zlomek i-té složky ve spalinách	obj. %
$\varphi_{vz,i}$	objemový zlomek i-té složky ve vzduchu	obj. %
$\varphi_{vz,O_2}$	objemový zlomek kyslíku ve vzduchu	obj. %

Pozn.: index N v jednotce  $m_N^3$  značí normální podmínky (101,325 kPa a 0 °C)

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1	Roční produkce kalů z komunálních ČOV v ČR v letech 1996 až 2006 [7] .....	12
Obr. 2	Produkce kalů v některých zemích EU [8].....	13
Obr. 3	Podíl odvodněných kalů z ČOV (25 % sušiny) a komunálních odpadů v ČR v roce 2006 [7] .....	13
Obr. 4	Způsoby nakládání s čistírenskými kaly v ČR v letech 2000 až 2006 [7] .....	14
Obr. 5	Způsoby nakládání s čistírenským kalem v některých zemích EU v roce 2005 [8] .....	15
Obr. 6	Obecné schéma čistírny odpadních vod .....	17
Obr. 7	Stupně rozkladu organických látek [19].....	20
Obr. 8	Disková sušárna Stord-Bartz vyhřívána párou, převzato z [27].....	23
Obr. 9	Základní schéma fluidní sušárny, převzato z [29].....	24
Obr. 10	Solární sušárna Brumath, Francie (vlevo celkový pohled na haly, vpravo pohled na přeřabovací zařízení).....	25
Obr. 11	Pec s fluidním ložem, převzato z [36].....	26
Obr. 12	Etážová pec, převzato z [36] .....	27
Obr. 13	Etážová pec s fluidním ložem, převzato z [36] .....	27
Obr. 14	Schéma anaerobní stabilizace kalu.....	29
Obr. 15	Schéma sušení kalu .....	31
Obr. 16	Schéma spalování kalu .....	32
Obr. 17	ÚČOV Praha – Císařský ostrov .....	36
Obr. 18	Odkaliště Drasty .....	36
Obr. 19	Materiálová a energetická bilance ÚČOV – současný stav .....	41
Obr. 20	Pohled na mobilní odstředivku (vlevo) a tříkomorový systém na míchání roztoku flokulantu.....	43
Obr. 21	Vzhled odvodněného kalu a fugátu s použitím flokulantů VTA F 096 MHW a F 098 MHW .....	44
Obr. 22	Vzhled odvodněného kalu a fugátu s použitím flokulantu Sokoflok 68 (nahore) a VTA (dole) .....	47
Obr. 23	Reologické chování směsného surového kalu.....	49
Obr. 24	Reologické chování anaerobně stabilizovaného kalu.....	49
Obr. 25	Poloha Císařského ostrova a lokality Drasty.....	51
Obr. 26	Zjednodušené schéma varianty K1.....	53
Obr. 27	Zjednodušené schéma varianty K2.....	54

Obr. 28	Zjednodušené schéma varianty K3.....	55
Obr. 29	Zjednodušené schéma varianty D4.....	56
Obr. 30	Produkce vysokopotenciálního tepla v závislosti na podílu bioplynu spalovaného v kogeneračních jednotkách .....	67
Obr. 31	Vliv podílu bioplynu spalovaného v kogeneračních jednotkách na výrobu tepla a elektřiny .....	68
Obr. 32	Energetická náročnost sušení anaerobně stabilizovaného kalu při různém obsahu sušiny ve vstupním odvodněném kalu (obsah sušiny v sušeném kalu 70 %). .....	69
Obr. 33	Vliv obsahu sušiny anaerobně stabilizovaného kalu na vybrané parametry spalování kalu .....	69
Obr. 34	Vliv obsahu sušiny směsného surového kalu na vybrané parametry spalování kalu .....	70
Obr. 35	Vliv přebytku spalovacího vzduchu na vybrané parametry spalování anaerobně stabilizovaného kalu s obsahem sušiny 70 % .....	71
Obr. 36	Materiálová a energetická bilance řešení č. 1 – schéma.....	78
Obr. 37	Materiálová a energetická bilance řešení č. 2 – schéma.....	80
Obr. 38	Materiálová a energetická bilance řešení č. 3 – schéma.....	82
Obr. 39	Materiálová a energetická bilance řešení č. 4 – schéma.....	83
Obr. 40	Rozhodovací diagram pro výběr řešení kalového hospodářství na ÚČOV Praha	85
Obr. 41	Komplexní řešení problematiky kalového hospodářství ÚČOV Praha.....	89

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1	Mezní hodnoty koncentrací vybraných látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (Příloha č. 3 k vyhlášce 382/2001 Sb.) .....	10
Tab. 2	Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě (Příloha č. 4 k vyhlášce 382/2001 Sb.) .....	11
Tab. 3	Výkupní ceny a zelené bonusy pro spalování bioplynu [22] .....	21
Tab. 4	Porovnání pecních systémů pro spalování čistírenských kalů, převzato z [36] .....	28
Tab. 5	Základní výkonové parametry ÚČOV – průměrné hodnoty z let 2004 až 2007....	38
Tab. 6	Využití bioplynu na ÚČOV v roce 2007 .....	39
Tab. 7	Obsah těžkých kovů ve vyhnílem kalu z ÚČOV v mg/kg sušiny .....	39
Tab. 8	Základní parametry kalového hospodářství po rekonstrukci ÚČOV .....	42
Tab. 9	Výsledky odvodňování SSK – flokulanty VTA a Sokoflok .....	44
Tab. 10	Složení spalitelné části směsného surového kalu .....	45
Tab. 11	Obsah těžkých kovů ve směsném surovém kalu .....	45
Tab. 12	Spalné teplo a výhřevnost sušiny směsného surového kalu .....	46
Tab. 13	Výsledky odvodňování ASK – flokulanty VTA a Sokoflok.....	46
Tab. 14	Složení spalitelné části anaerobně stabilizovaného kalu .....	47
Tab. 15	Obsah těžkých kovů v anaerobně stabilizovaném kalu.....	48
Tab. 16	Spalné teplo a výhřevnost sušiny anaerobně stabilizovaného kalu.....	48
Tab. 17	Hustota směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu z ÚČOV Praha..	49
Tab. 18	Vstupní údaje pro výpočet materiálové a energetické bilance anaerobní stabilizace .....	57
Tab. 19	Vstupní údaje pro výpočet teplených nároků anaerobní stabilizace .....	58
Tab. 20	Vstupní data pro výpočet bilance sušení kalu .....	59
Tab. 21	Elementární analýza organické části SSK a ASK .....	60
Tab. 22	Složení suchého vzduchu [48] a složení vlhkého vzduchu zadaných parametrů. 60	
Tab. 23	Materiálové bilance anaerobní stabilizace .....	61
Tab. 24	Výroba tepla a elektřiny .....	62
Tab. 25	Výsledky materiálové a energetické bilance sušení ASK na různý obsah sušiny	62
Tab. 26	Výsledky materiálové a energetické bilance sušení SSK na různý obsah sušiny	63
Tab. 27	Výsledky materiálové a energetické bilance spalování ASK s různým obsahem sušiny.....	63
Tab. 28	Výsledky materiálové a energetické bilance spalování SSK s různým obsahem sušiny.....	64

---

Tab. 29	Vliv měrné produkce bioplynu na energetickou bilanci .....	66
Tab. 30	Přehled uvažovaných variant.....	72
Tab. 31	Výsledky materiálové a energetické bilance spalování anaerobně stabilizovaného kalu předsušeného na obsah sušiny 70 % .....	74
Tab. 32	Investiční náklady uvažovaných variant .....	75
Tab. 33	Roční zisky a náklady na vybrané položky uvažovaných variant.....	77

## SEZNAM PŘÍLOH

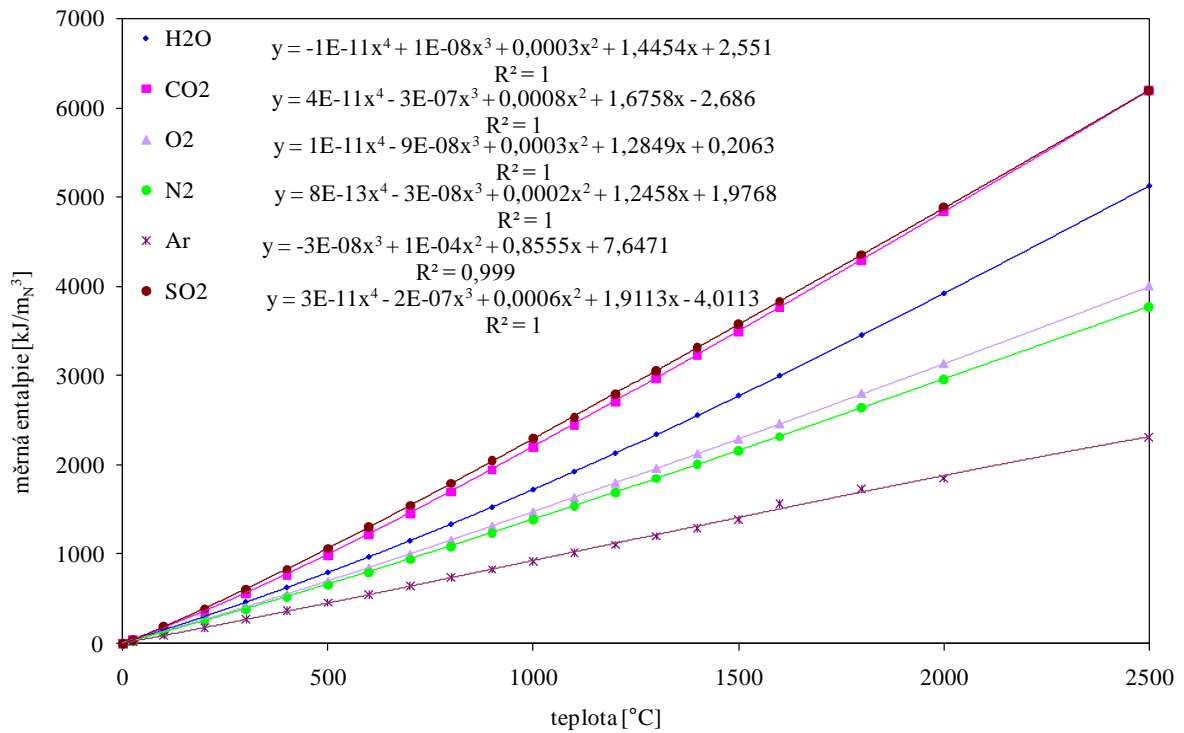
**Příloha č. 1** – Závislost entalpie vybraných složek spalin na teplotě

**Příloha č. 2** – Závislost výhřevnosti směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu na obsahu sušiny v kalu



## Příloha č. 1

Grafické znázornění závislosti entalpie plynné složky na teplotě s rovnicemi „spojnice trendu“ získanými využitím MS Excel.



## Příloha č. 2

Grafické znázornění závislosti výhřevnosti směsného surového kalu (SSK) a anaerobně stabilizovaného kalu (ASK) na obsahu sušiny v kalu s rovnicemi „spojnice trendu“ získanými využitím MS Excel.

