

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Možnosti zpětného získávání fosforu z čistírenských kalů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Marcela Synáčková, CSc.

Autor práce: Bc. Adéla Gogová

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Adéla Gogová

Regionální environmentální správa

Název práce

Možnosti zpětného získávání fosforu z čistírenských kalů

Název anglicky

Phosphorus recovery from sewage sludges

Cíle práce

Zpracování literární rešerše na téma kalového hospodářství na ČOV. Popis současného způsobu nakládání s kalů na ČOV Karlovy Vary – Drahovice. Popis potenciálního zařazení technologie sloužící ke zpětnému získávání fosforu z kalů na kalové lince ČOV Karlovy Vary – Drahovice.

Metodika

Zásady pro zpracování

1. Úvod
2. Cíle práce
3. Literární rešerše
4. Zpřehlednění stávající legislativy
5. Metodika
6. Popis řešeného objektu
7. Návrh zařízení na zpětné získávání fosforu z kalů
8. Výsledky
9. Diskuze
10. Závěr
11. Použité zdroje
12. Přílohy

Doporučený rozsah práce

min. 60 stran textu a grafické přílohy

Klíčová slova

čistírenské kaly, fosfor, čistírna odpadních vod

Doporučené zdroje informací

- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA, – ŠVEJKOVSKÝ, J. *Technologie a strojní zařízení pro kompostování biologických odpadů*. Disertační práce. Praha: 2008.
- HANČ, A. – PLÍVA, P. – ALTMANN, V. – ROY, A. – SOUČEK, J. – HEJÁTKOVÁ, K. – VALENTOVÁ, L. *Kompostování a kompostárny*. Praha: Profi Press s.r.o., 2016. ISBN 978-80-86726-74-8.
- HANČ, A. – PLÍVA, P. *Vermikompostování bioodpadů : (certifikovaná metodika)*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013. ISBN 978-80-213-2422-0.
- KALINA, M. *Kompostování a péče o půdu*. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0907-4.
- Kaly a odpady 2006 : Brno – 19.-21. června 2006*. Brno: VUT, 2006. ISBN 80-239-7258-8.
- NESVADBA, J. *Kaly a tepelné zpracování čistírenských kalů*. Praha: Inkoteka, 1994.
- NESVADBA, J. *Kompostování odpadů*. PRAHA: INKOTEKA, 1996.
- PLÍVA, P. *Kompostování v pásových hromadách na volné ploše*. Praha: Profi Press, 2009. ISBN 978-80-86726-32-8.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Marcela Synáčková, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 16. 12. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 17. 12. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 05. 01. 2020

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Možnosti zpětného získávání fosforu z čistírenských kalů“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

Karlovy Vary 16.03.2020

Bc. Adéla Gogová

.....

PODĚKOVÁNÍ

Mé díky patří na prvním místě vedoucí diplomové práce Ing. Marcele Synáčkové, CSc. za její přínosné postřehy a poznámky k obsahu samotné práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Zdeňku Frčkovi, MBA ze společnosti Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., za jeho ochotu, čas a cenné rady, které mi věnoval. V neposlední řadě také děkuji svým kolegům za jejich součinnost při vyhledávání informací a za jejich čas věnovaný odborným konzultacím.

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o problematice kalového hospodářství na čistírnách odpadních vod. Popisuje čistírenské kaly, způsoby nakládání s kaly a možnosti jejich následného využití. V práci jsou také rozepsány způsoby zpětného získávání fosforu z čistírenských kalů, které jsou na jeho obsah poměrně bohaté. V navazující části jsou popsány nejdůležitější legislativní předpisy Evropské unie a České republiky, které se dotýkají problematiky nakládání s čistírenskými kaly.

Praktická část práce je založena na popisu technologické linky čistírny odpadních vod Karlovy Vary - Drahovice, která v současnosti jako jediná na území České republiky disponuje unikátní technologií na sušení kalu - nízkoteplotní pásovou sušárnou. Dále je v práci zpracován teoretický návrh zařazení další technologie, díky níž bude umožněno zpětně získávat fosfor z usušeného kalu.

KLÍČOVÁ SLOVA

čistírenské kaly, fosfor, čistírna odpadních vod

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the problem of sludge management in waste water treatment plants. Describes sewage sludge, ways of sludge handling and possibilities of their subsequent use. The thesis also describes ways of recovering phosphorus from sewage sludge, which are relatively rich in its content. The following section describes the most important legislative regulations of the European Union and the Czech Republic, which concern the issue of treatment of sewage sludge.

The practical part of the thesis is based on the description of the technological line of the wastewater treatment plant in Karlovy Vary - Drahovice, which is currently the only one in the Czech Republic that has a unique technology for sludge drying - a low temperature belt dryer. Furthermore, the thesis elaborates a theoretical proposal for the inclusion of another technology, thanks to which it will be possible to recover phosphorus from dried sludge.

KEYWORDS

sewage sludge, phosphorus, wastewater treatment plant

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	CÍLE PRÁCE	12
3	PROBLEMATIKA KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.....	13
3.1	Základní popis mechanicko-biologické ČOV	13
3.1.1	Mechanické čištění.....	13
3.1.2	Biologické čištění.....	15
3.2	Kalové hospodářství čistíren odpadních vod.....	19
3.3	Charakteristika kalů.....	20
3.4	Typy kalů.....	21
3.6	Základní popis kalového hospodářství na ČOV	24
3.6.1	Zahušťování kalu.....	24
3.6.2	Stabilizace kalů	25
3.6.3	Odvodňování kalu	26
4	NAKLÁDÁNÍ S KALY Z ČOV A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ	29
4.1	Využití kalů v zemědělství	30
4.2	Kompostování	31
4.3	Anaerobní stabilizace – zplyňování	32
4.4	Skládkování	33
4.5	Sušení kalů	33
4.5.1	Kondukční (kontaktní) sušárny	34
4.5.2	Konvekční sušárny	35
4.5.3	Solární sušárny	37
4.6	Termické zpracování kalů	37
4.6.1	Spalování kalů	38
4.6.2	Spoluspalování kalů	41
4.6.5	Pyrolýza kalů.....	43
4.6.6	Zplyňování kalů.....	44
5	RECYKLACE FOSFORU Z ČISTÍRENSKÝCH KALŮ.....	46
5.1	Možnosti získávání fosforu z popela čistírenských kalů.....	49
5.1.1	Hydrometalurgické procesy získávání fosforu.....	50
5.1.2	Pyrometalurgické procesy získávání fosforu	52
6	ZPŘEHLEDNĚNÍ STÁVAJÍCÍ LEGISLATIVY V OBLASTI NAKLÁDÁNÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY.....	55
6.1	Legislativa v České republice.....	55

6.2	Legislativa Evropské unie	57
7	METODIKA	58
8	POPIS TECHNOLOGICKÉ LINKY ČOV KARLOVY VARY – DRAHOVICE	59
8.1	Popis technologie čištění	59
8.1.1	Mechanické čištění	59
8.1.2	Biologické čištění	64
8.2	Kalové hospodářství	68
8.2.1	Nízkoteplotní sušárna kalů	71
9	NÁVRH ZAŘÍZENÍ NA ZPĚTNÉ ZÍSKÁVÁNÍ FOSFORU Z KALU	80
9.1	Údaje o zájmovém území	80
9.2	Spalování usušeného kalu	83
10	VÝSLEDKY	84
10.1	Popis technologie spalování usušeného kalu	84
10.1.1	Zpětné získávání fosforu z popela	86
11	DISKUZE	87
12	ZÁVĚR	89
13	PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
14	PŘÍLOHY	99

Seznam zkratk

AOX	halogenové organické sloučeniny
BSK ₅	biochemická spotřeba kyslíku
ČOV	čistírna odpadních vod
EO	ekvivalentní obyvatel
CHSK _{Cr}	chemická spotřeba kyslíku
NEL	nepolární extrahovatelné látky
ou _E	evropská pachová jednotka
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované bifenyly
PE	polyethylen
PES	polyester
PVDF	polyvinylidenfluorid

1 ÚVOD

Téma čištění odpadních vod je v posledních letech obecně velmi často diskutovaným tématem. Jedním z důvodů je stále se zpřísnující legislativa ve všech zemích Evropské unie, jejíž požadavky nejsou stávající technologie schopny naplňovat. Nové legislativní předpisy mimo jiné nastavují i nekompromisní kritéria v oblasti nakládání s čistírenskými kaly, která značně omezují jejich použití v zemědělství.

Z těchto důvodů se tak v současnosti přechází v mnoha zemích na technologie termického zpracování kalů, díky němuž je zajištěno efektivního odstranění většiny nežádoucích látek. Zároveň je termickým zpracováním kalů otevřena možnost energetického využívání a zpětného získávání cenných a hnojivých látek, zejména pak fosforu. Fosfor je nenahraditelný esenciální prvek pro všechny živé organismy. Jeho zásoby jsou však celosvětově ohroženy. Evropský trh je navíc téměř absolutně závislý na importu fosforu (Holba et Došek, 2016). Možnou alternativou jeho získávání by mohla být jeho recyklace z popelu po monospalování právě čistírenských kalů (Šyc et al., 2015). To s sebou však nese potřebu modernizace stávajících technologií na čistírnách odpadních vod, což je ovšem žádoucí, neboť některé země jako je například Německo, mají v současnosti již vytvořený politický a legislativní rámec týkající se povinnosti fosfor z čistírenských kalů recyklovat (Matějů et al., 2019).

Čistírenský kal je velmi cennou surovinou, která má výborné hnojivé a protierozní vlastnosti. To je v současné době velmi žádané. Proto je nutné hledat způsoby a zavádět nové technologie úpravy kalů, které využití kalů (nebo produktů z nich) v oblasti zemědělství umožní i v budoucnu. Zároveň je nezbytné, aby původci kalů při hledání té nejlepší cesty mysleli i na zdraví lidí a na životní prostředí (Matějů et al., 2019).

2 CÍLE PRÁCE

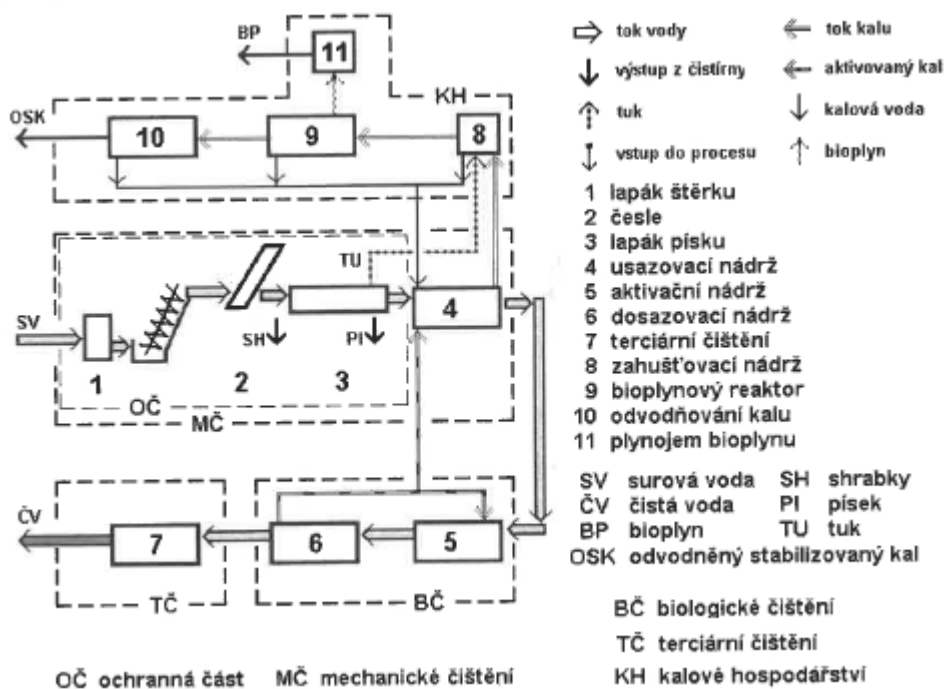
Cílem diplomové práce je zpracování literární rešerše týkající se čištění odpadních vod, při kterém nevyhnutelně vzniká nežádoucí odpad - čistírenský kal. Problematika kalového hospodářství bude jedním z témat práce. Zabývat se bude také legislativními předpisy, které se čistírenských kalů dotýkají. Dalším předmětem rešerše bude možnost zpětného získávání fosforu z kalů. Praktická část práce je zaměřena na popis technologické linky ČOV Karlovy Vary - Drahovice, která v současné jako jediná v České republice disponuje nízkoteplotní pásovou sušárnou kalů. Součástí bude teoretický návrh nevhodnějšího zařízení pro další zpracování usušeného kalu navazující na stávající technologii ČOV.

3 PROBLEMATIKA KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

3.1 Základní popis mechanicko-biologické ČOV

Mechanicko-biologické čištění odpadních vod se v dnešní době řadí mezi nejrozšířenější a nejúčinnější technologie čištění komunálních odpadních vod. Samotná technologie čistírny pracující na tomto principu se skládá z hrubého předčištění, mechanického stupně čištění, biologického stupně čištění a kalového hospodářství. Jsou-li nároky na kvalitu vyčištěné vody vyšší, může technologickou linku doplňovat ještě terciární stupeň čištění či chemické hospodářství (Šťastný et al., 2014).

Obrázek 1: Technologické schéma velké čistírny odpadních vod (Pošta et al., 2005)



3.1.1 Mechanické čištění

Mechanické čištění slouží k odstranění nerozpuštěných látek ve vodě, které jsou podstatnou součástí odpadních vod. Jedná se o první stupeň čištění, při kterém se sníží organické znečištění BSK_5 zhruba o 30 % (Pošta et al., 2005). Odstraněním velkých plovoucích předmětů dochází v této fázi také k zajištění ochrany technologických zařízení čistírny (Dohányos et al., 1998).

Lapák šterku

Odpadní voda je na čistírnu přiváděna hlavní stokovou sítí. Odtud je vedena do lapáku šterku, kde jsou odstraněny velké a těžké předměty přicházející na čistírnu zejména v období přivalových dešťů. Lapák šterku je jímka s rozšířeným průtočným průřezem a sníženým dnem. To umožňuje zachycení velkých a těžkých předmětů, jako jsou cihly, dlažební kostky nebo šterk (Pošta et al., 2005).

Česle

Česle jsou významnou částí hrubého předčištění odpadní vody. Slouží k odseparování hrubých plovoucích nečistot. Jsou tvořeny řadou ocelových prutů (česlic) kruhového, obdélníkového nebo lichoběžníkového profilu. Tyto pruty jsou zasazeny do pevného rámu, který je skloněný ve směru toku pod úhlem 30° až 60° (Dohányos et al., 1998). Rychlost průtoku na česlích se musí pohybovat mezi 0,3 m/s a 1 m/s. Při menší rychlosti by docházelo k usazování písku, při rychlejším průtoku by mohlo docházet ke strhávání již zachycených nečistot (Pošta et al., 2005).

Důležitou činností v této části čistírny je stírání česlí od zachycených nečistot (shrabků). To se provádí jednou až dvakrát denně ručně nebo strojně. U jemnějších česlí je nutné provádět stírání častěji. Produkce shrabků na jemných česlích je 12 až 15 l na 1 EO za rok (Pošta et al., 2005).

Na česlích se zachycují převážně hadry, papír, plasty, zbytky ovoce a zeleniny, větve, cigaretové filtry či nerozpadlé fekálie. Proto jsou shrabky z hygienického hlediska svým složením velmi nebezpečné. Mohou obsahovat patogenní organismy nebo zárodky lidských i zvířecích parazitů. Z tohoto důvodu není vhodné shrabky používat ke kompostování, ale zneškodňovat je spalováním nebo stabilizovat vápnem a následně skladovat na skládkách pro nebezpečný odpad (Pošta et al., 2005).

Lapák písku

K zachycování těžkých částic písku velkých 0,1 až 0,2 mm je v lapáku využíváno snížené průtočné rychlosti, gravitační síly a rozdílu hustot. Oddělený písek se musí z lapáku pravidelně odstraňovat. Jedná se o pravoúhlé nebo kruhové nádrže se zařízením na stírání dna i hladiny (Dohányos et al., 2008) (Pošta et al., 2005).

Současně může lapák písku oddělovat plovoucí látky, například tuky. Toho je dosaženo pomalejším prouděním, kdy lehčí látky (tuky) začnou splývat na hladině.

Odtud jsou tuky stírány hladinovou lištou a vedeny ke zpracování do kalového hospodářství (Pošta et al., 2005).

Usazovací nádrž

V usazovacích nádržích dochází k separaci primárního organického znečištění sedimentací. Vzniklý kal se nazývá primární a je energeticky velice cennou surovinou. Usazovací nádrže pracují většinou kontinuálně, jsou tedy průtočné. Dělí se na pravoúhlé nebo kruhové, průtok v nich pak na horizontální a vertikální. Nádrže, jejichž provoz je přerušovaný, se nazývají dekantační (Pošta et al., 2005).

3.1.2 Biologické čištění

Procesy biologického čištění odpadních vod probíhají v biologických reaktorech za působení mikroorganismů. Aktivním činitelem v tomto procesu je funkční polykultura kultivovaná nejčastěji ve formě aktivovaného kalu (suspenze) v aktivační nádrži nebo ve formě biofilmu ve zkrápěných kolonách – biofiltrech nebo v rotačních biofilmových reaktorech (Pošta et al., 2005).

Funkční polykultura je složena z bakterií, mikromycet, plísní, kvasinek, bezbarvých sinic a tzv. vyššího osídlení. Vyšší osídlení zastupují podle stavu funkční polykultury jednobuněčné organismy jako bičíkovci, měňavky či nálevníci, z mnohobuněčných organismů pak háďátka, vířníci, červy nebo roztoči. Aktivovaný kal se od většiny čistých kultur mikroorganismů liší svou schopností flokulovat – tvořit tzv. vločky a oddělovat se od kapalné fáze prostou sedimentací (Pošta et al., 2005).

Aktivační proces

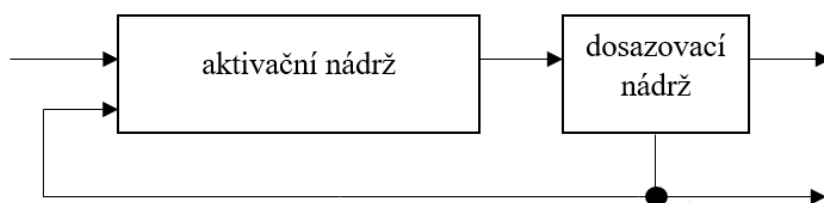
Aktivační proces je nejrozšířenějším procesem v rámci biologického čištění odpadních vod. Byl vyvinut v roce 1913 v Anglii a pojmenován byl dle své funkce produkovat aktivovanou hmotu mikroorganismů, která dokáže aerobně stabilizovat odpad (Paul et Liu, 2012).

Předčištěná odpadní voda zbavená hrubých nečistot je dále vedena do biologického stupně čištění – aktivační nádrže, kde je promíchávána s aktivovaným kalem. Zde bakterie zčásti vážou a zčásti metabolizují organické znečištění přítomné v odpadní vodě. Znečištění je následně transformováno v částice biologického kalu, které se usazují (Šťastný et al., 2014). Aby bylo biologické čištění efektivní, musí být

směs intenzivně provzdušňována tlakovým vzduchem nebo mechanickými aerátory. Z aktivační nádrže, kde je voda zdržena po dobu 12 - 15 hodin, je směs vedena do dosazovacích nádrží, kde se separuje aktivovaný kal od vyčištěné vody (Dohányos et al., 1998). Dosazovací nádrže jsou v principu stejné jako nádrže usazovací, zpravidla však mívají větší hloubku, která zajišťuje delší dobu zdržení (Pošta et al., 2005).

V posledních letech se vedle gravitační sedimentace prosazují membránové technologie, které zajišťují účinnější a spolehlivější oddělení aktivovaného kalu od vyčištěné odpadní vody. Část kalu se vrací do aktivačních nádrží jako vratný kal (Šťastný et al., 2014). Odstraňování nerozpuštěných a rozpuštěných organických látek z odpadní vody má za následek kontinuální tvorbu nové biomasy, která se musí ze systému periodicky odstraňovat ve formě přebytečného aktivovaného kalu (Dohányos et al., 1998).

Obrázek 2: Blokové schéma aktivačního procesu (Dohányos et al., 1998)



Aerobní stabilizace

Aerobní stabilizace nazývaná také jako prodloužená aerace je v podstatě založena na stejném principu jako aktivační proces. Liší se pouze dobou zdržení v aktivačních nádržích. V případě aerobní stabilizace se doba zdržení pohybuje mezi 18 a 24 hodinami. Delší doba zdržení zajistí redukci zápachu a množství kalu, který následně recirkuluje zpět do aktivačních nádrží (Ahsan, 2012).

SBR systémy (Sequential Batch Reaction)

Biologické čištění prováděné pomocí procesu SBR nazýváme jako sekvenční. Využívá stejný princip jako výše zmíněná aerobní stabilizace, ovšem s tím rozdílem, že biodegradace, sedimentace pevných částic i odstraňování kalu probíhá pouze v jedné nádrži (Ahsan, 2012).

Proces SBR je charakteristický pěti procesními fázemi - plnění, aktivace, sedimentace, čerpání vyčištěné vody a prázdnění (dekantace). Existuje několik typů systémů SBR, některé umožňují určité fáze vynechat, nebo naopak mají přidané další dílčí fáze. Všechny etapy čištění jsou závislé na přívodu energie do systému (Wilderer et al., 2001). Ovládání systému probíhá pomocí snímačů hladiny a časovače, nebo mikroprocesoru. Výhodou této metody biologického čištění jsou menší nároky na prostor, minimální množství vzniklého kalu a bezzápašnost. Nevýhodou je zejména vysoká spotřeba energie na provoz, nutnost častého odstraňování kalu a potřeba odborné obsluhy systému (Ahsan, 2012).

Systém FBR (Fluidized Bed Reactor)

Proces FBR (reaktory s fluidním ložem) je jedním z moderních pokroků v technologii biologického aerobního čištění odpadních vod. Na výstupu dosahuje vyčištěná voda velice přívětivých hodnot BSK₅ a CHSK (Ahsan, 2012).

Odpadní voda se v reaktorech čerpá určitou rychlostí skrze nosiče biofilmu. Bakterie obsažené v odpadní vodě se přichytávají na nosiče, což způsobí jejich znehybnění. Toho využívají mikroorganismy, které tímto způsobem znečištění zlikvidují. Koncentrace biomasy je v celém systému několikanásobně vyšší než u aktivace, což výrazně zvyšuje účinnost čištění. Tato technologie je téměř bezobsluhová a to zejména díky neustále dostatečnému množství aktivovaného kalu, který tak není nutné do systému vracet. Zároveň se nadbytečná biomasa automaticky odstraní v procesu. Problémy nastávají při výpadcích proudu, kdy může docházet k hnilobným procesům. (Ahsan, 2012).

SAFF reaktor (Submerged Aeration Fixed Film Reactor)

Technologie SAFF neboli reaktory s upevněným ponořeným biofilmem jsou novinkou několika posledních let. Jedná se o nosiče biofilmu upevněné v aktivačních nádržích, kde zlepšují účinnost čištění. V čistírnách, které pracují na principu denitrifikace a nitrifikace, je nosič umístěn do nitrifikační nádrže (aerobní zóny). Aerobní prostředí je zajištěno použitím jemného bublinového difúzního provzdušňovače, který zároveň kapalinu promíchává. Směs nových a starých buněk dále přetéka do sedimentační nádrže, kde se oddělí od odpadní vody. Část sedimentovaných buněk se recykluje za pomoci ponorných čerpadel tak, aby byla zachována požadovaná koncentrace

mikroorganismů v reaktoru. Nadbytečná část je odváděna do kalových nádrží k dalšímu zpracování.

Mezi výhody lze řadit nenáročnou údržbu, nízkou spotřebu energie, nízkou produkci kalu, nízké provozní náklady a také absenci komplikací s hnilobnými procesy po výpadku proudu (biomasa je zachována i při nepravidelné dodávce energie). Je však zapotřebí důsledně sledovat koncentraci kalu v reaktoru kvůli možnému zanesení biofilmu. (Ahsan, 2012).

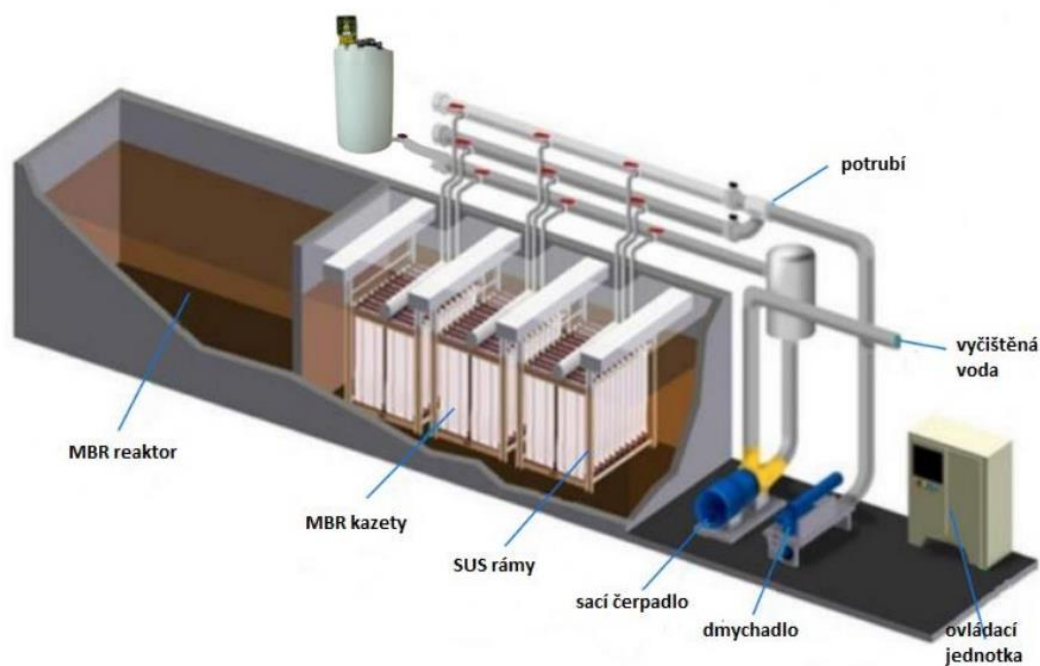
Membránové bioreaktory (MBR systémy)

Membránový bioreaktorový systém je jednou z nejmodernějších technologií pro čištění odpadních vod. Čištění je prováděno přes syntetické membrány nebo difúzí přes membránu v kombinaci s činností aktivovaného kalu (Ahsan, 2012).

Membránový systém funguje na principu filtrace odpadní vody přes membrány, které jsou vyrobeny z polymerních organických látek (PE, PVDF, PES), sestavené do jednotek (moduly, kazety nebo stohy). V membránách dochází k zachycení mikroorganismů a systém tak zaručuje vysokou kvalitu vody na výstupu (může být použita např. jako závlahová) (Ahsan, 2012). Tato technologie umožňuje vyčistit vodu do libovolné kvality, záleží pouze na velikosti pórů použitých membrán. Dokonce je možné touto metodou odstranit i některé látky pocházející z hormonální antikoncepce (CZEMP, ©2010 - 2018).

Největší výhodou této technologie je schopnost plnit nejpřísnější normy na kvalitu vody. Dále možnost znovuvyužití jednotlivých modulů membrán, nízké nároky na čištění (jednou za 3 - 6 měsíců), až o 80 % nižší množství produkovaného kalu, nízká náročnost na prostor, či dálkové ovládání a monitoring systému. Naproti tomu se jedná o ekonomicky zatěžující technologii, a to především vzhledem k vysokým investičním nákladům a velké spotřebě energie. Další problémy se týkají limitované tolerance pro abrazivní a vláknité materiály (písek, vlasy), zanášení membrán a potřebě duálního systému provzdušňování (míchání, zamezení zanášení membrán) (Ahsan, 2012).

Obrázek 3: Model membránového bio-reaktoru (Alibaba.com, ©1999-2020)



3.2 Kalové hospodářství čistíren odpadních vod

Kaly z čistíren jsou nevyhnutelným produktem čištění odpadních vod. Obsahují nežádoucí nebezpečné látky, jako jsou pesticidy, endokrinní disruptory, patogeny a další mikrobiologické znečištění (Bailey, 2009). Kaly představují 1 až 2 % objemu čistěných vod, avšak obsahují 50 až 80 % původního znečištění (Pošta et al., 2005). Aby se zabránilo kontaminaci životního prostředí, je nutné kaly řádně stabilizovat a likvidovat. Účelem zpracování kalu je zlepšit jeho odvodňovací vlastnosti, odstranit bakterie způsobující onemocnění, snížit zápach a množství organických solí. Teprve poté je možné finální produkt dále zpracovávat a likvidovat, aniž by představoval nebezpečí pro životní prostředí (Bailey, 2009).

Kalové hospodářství vyžaduje mimo jiné efektivní a ekonomické řízení (Tay et al., 2007). Náklady na provoz kalového hospodářství představují až 50 % celkových provozních nákladů čistírny odpadních vod (Pošta et al., 2005). Vzhledem k rostoucímu zájmu o využití kalu jako suroviny k výrobě produktů s přidanou hodnotou je nezbytné provádět jejich rozsáhlou charakterizaci. Kaly z odpadních vod totiž vykazují velké rozdíly ve svých vlastnostech v závislosti na původu pevných

látek, stáří kalu či typu zpracování, jemuž byly podrobeny (Metcalf et Eddy et al., 2003).

3.3 Charakteristika kalů

Kaly představují poměrně složitou suspenzi pevných látek a agregovaných koloidních částic, které se původně nacházely v odpadní vodě nebo vznikly při jejím čištění. Kal lze také definovat jako směs složenou ze dvou či více odpadních látek, z nichž minimálně jedna je přítomna v kapalném skupenství a vytváří souvislou kapalnou fázi a nejméně jedna další látka je ve směsi obsažena v tuhém skupenství, dispergovaná v souvislé kapalně fázi (Raclavská, 2007).

Vlastnosti čistírenských kalů závisí na původu odpadních vod a procesech jejich čištění. Důležitým aspektem jsou však i místní podmínky, tedy geografické, klimatické a demografické faktory (Dirner, 1998). Obecně se kaly skládají z bohaté směsi látek, které obsahují velké množství makronutrientů, širokou škálu mikronutrientů, ale současně řadu rizikových prvků, neesenciálních stopových kovů, organických polutantů a patogenních látek (Kulling, 2001). Jak již bylo výše zmíněno, i přes minimum obsaženého objemu znečištěných vod v kalech (1 – 2 %), je v nich koncentrována většinová část původního znečištění (až 80 %). Toto znečištění je prezentováno především patogenními organismy a velkým počtem toxických chemických látek (např. AOX, PCB, NEL) a těžkých kovů jako jsou Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn (Gouch et al., 1992). Hlavním původcem obsažených patogenních mikroorganismů jsou exkrementy infikovaných lidí a zvířat. Mezi patogeny, které se nejčastěji vyskytují v odpadních vodách, řadíme zejména viry (hepatitida A), bakterie (*Salmonella*, *Escherichia Coli*), protozoa a parazitické červy (Zimová et Matějí, 2001).

Tabulka 1: Přehled základních parametrů charakterizace kalů; A – sedimentace, B - stabilizace, C – kondicionace, zahušťování a odvodňování, D – čerpání, E – vrácení kalové vody, F, G, H – využití (Pošta et al., 2005)

parametr	vysvětlení	proces (viz Obrázek 6)
fyzikální vlastnosti		
Obsah sušiny	koncentrace sušiny	A – H
Obsah organické sušiny	koncentrace organických látek	A – H
Kalový index	měřítka sedimentovatelnosti	A
Kondicionace	spotřeba činidel	C
Velikost částic	popis částic	A, C, E
CST	odvodňovací testy	C
Distribuce vody	vliv na odvodňování	C
Hustota	vliv na odvodňování na centrifugách	C
Filtrační odpor	vliv na odvodňování	C
Reologické vlastnosti	vliv na čerpání	D
Výhřevnost	vliv na spalování	H
chemické vlastnosti		
pH, alkalita	stabilita metanizace	B
Mastné kyseliny	stabilita metanizace	B
Obsah C, N, P	vliv na biologické procesy	B, E, F
Toxické látky	těžké kovy	B, F, G
biologické vlastnosti		
Obsah patogenů	hygienické vlastnosti kalu	F
Biologická stabilita	další biologický rozklad	F, G
Bytnění	vliv na sedimentaci a zahušťování	A

3.4 Typy kalů

Primární kal

Primární kal se odděluje ze surové vody sedimentací v usazovacích nádržích. Jeho struktura je zpravidla zrnitá a tvoří ho nerozpuštěné látky, které prošly česlemi i lapákem písku (Lyčková et al., 2008). Tento typ kalu je obtížné vysoušet, jelikož obsahuje množství koloidních látek a má schopnost vázat vodu (Chudoba et al., 1991). Díky svému složení umožňuje vyšší výtěžnost bioplynu. Organická hmota se pohybuje v rozmezí 60 - 80 % složek v kalu, zbylými složkami jsou pak inertní látky (Lyčková et al., 2008).

Sekundární (aktivovaný kal)

Sekundární kal, aktivovaný kal nebo také přebytečný kal vzniká ve fázi biologického čištění odpadních vod. Jedná se především o směs mikroorganismů, které narostly na rozpuštěném organickém znečištění. Množství mikroorganismů je závislé především na množství odstraněného znečištění a na druhu aerobního čištění. Od vyčištěné vody se kal odděluje v dosazovacích nádržích. Jeho struktura je vločkovitá. Množství organické hmoty v aktivovaném kalu je 60 - 75 %, zbylá část jsou inertní látky (Crittenden et Harza, 2005; Lyčková et al., 2008).

Surový kal

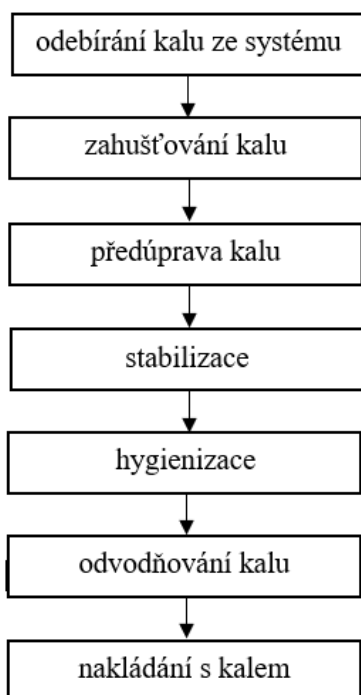
Kal, který vznikne spojením primárního a sekundárního kalu, se nazývá surový kal. Takto spojený kal se před dalším zpracováním zahušťuje (Lyčková et al., 2008). Surový kal obsahuje okolo 70 % organických látek v sušině, což zvyšuje možnost přítomnosti patogenních mikroorganismů (Pošta et al., 2005). Z tohoto důvodu je surový kal dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, klasifikován jako nebezpečný odpad.

3.5 Úprava a zpracování čistírenských kalů

Obecně lze metody zpracování kalů rozdělit do dvou základních skupin – primární metody úpravy kalů a finální metody zpracování kalů. Primární metody jsou prvním stupněm zpracování kalů a mají za cíl usnadnit průběh dalšího nakládání s kalem, dokonce mohou být podmínkou pro aplikování finálních metod zpracování (Kupec, 2002).

Upraveným kalem se dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, rozumí kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě, dlouhodobému skladování nebo jakémukoliv jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalech, a tím i zdravotní riziko spojené s jeho aplikací, na základě ověření účinnosti technologie úpravy kalů v souladu s požadavky stanovenými prováděcím právním předpisem.

Obrázek 4: Zjednodušené schéma zpracování kalů (Hlavínek et al., 2001)



Mezi primární metody úpravy kalů zahrnujeme následující:

- separace – třídění dle kvality materiálu (oddělení organické frakce, oddělení materiálů vhodných k recyklaci)
- kondicionace – chemická, termická, nebo fyzikálně-chemická předúprava (např. přidání flokulantů ke zlepšení odvodnitelnosti kalů, termická předúprava aktivovaného kalu)
- zahušťování a odvodňování – zvýšení koncentrace sušiny kalu před jeho dalším zpracováním (sušina do cca 40 %)
- desintegrace – mechanická (mlýny, centrifugy), fyzikální (ultrazvuk), fyzikálně-chemická (hydrolýza)
- hygienizace – inaktivace patogenů
- anaerobní biologická stabilizace – metanizace mezofilní nebo termofilní (vznik bioplynu, minimalizace zpracovávaného materiálu, hygienizace)
- aerobní biologická stabilizace – mezofilní probíhající v otevřených nádržích nebo termofilní vyžadující uzavřené reaktory (často jako předstupeň anaerobní stabilizace)
- sušení – zvýšení obsahu sušiny na 60 – 95 % (Pošta et al., 2005).

Finální metody zpracování kalů:

- kompostování – aerobní biologická stabilizace kalů, využití hnojivých vlastností (vodohospodářsky neexponované plochy – městská zeleň, pásy podél silnic)
- aplikace na zemědělskou půdu – využití kalů jako hnojiva v zemědělské výrobě (pouze upravené kaly)
- chemická stabilizace vápněním – stabilizace a hygienizace surových i upravených kalů před aplikací na pole
- mokrý spalování – ekologicky výhodná likvidace kalů
- spalování v cementářské peci – bezodpadová technologie likvidace (zapracování do cementu)
- spoluspalování – spalování s energeticky bohatším palivem (teplárny, elektrárny, spalovny tuhého komunálního odpadu)
- termické zpracování – pyrolýza, zplyňování
- spalování – nejúčinnější metoda hygienizace kontaminovaných, toxických či jinak nebezpečných materiálů
- skládkování (deponie) – uložení materiálu na skládku, ekologicky nevhodné řešení (odložení problému na pozdější dobu) (Pošta et al., 2004).

3.6 Základní popis kalového hospodářství na ČOV

Aktivovaný kal usazený na dně dosazovacích nádrží je zachycen v kalové jínce, odkud je odváděn na začátek procesu biologického čištění odpadní vody. Část kalu, který není potřeba dodávat do systému zpět (přebytečný kal), se oddělí a je zpracováván spolu s kalem z usazovacích nádrží v rámci kalového hospodářství (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

3.6.1 Zahušťování kalu

Zahuštění kalu by mělo následovat ihned po jeho separaci. Účelem zahuštění kalu je zvýšení koncentrace tuhých částic až na trojnásobek. Zahuštěním dojde k podstatnému snížení objemu kalu, což umožní jeho další zpracování v systému. Nižší objem kalu také zaručí nižší provozní náklady. Obecně mohou být biologické kaly zahuštěny na 3 - 6 % sušiny, primární kal až na 8 % (Lyčková et al., 2008).

Gravitační způsob zahušťování je založen na principu rozdílu mezi specifickou hmotností vody a částičky kalu. Obecně se využívá gravitační zahušťování v procesu, nebo oddělené zahušťování. Zahušťování v procesu se děje v kalovém prostoru usazovacích nádrží a je určeno především pro primární kaly. Oddělené gravitační zahušťování je určeno pro primární kaly, chemické kaly, nebo kaly s přisedlou biomasou z biologického čištění. Dalšími způsoby zahuštění kalu jsou např. flotace, zahuštění na odstředivkách, nebo sítopasové lisy (Lyčková et al., 2008).

3.6.2 Stabilizace kalů

Stabilizaci kalu je nutné provádět především k získání takových vlastností kalu, které umožní jeho další zpracování. Účelem je snížení obsahu organických látek na takové množství, kdy již kal nemůže podléhat rozkladu. Vyprodukovaný kal se stabilizuje anaerobní, nebo aerobní cestou. U menších čistíren se využívá převážně aerobní stabilizace. U větších ČOV (30 000 - 50 000 EO) se zpravidla volí cesta anaerobní stabilizace (Hartig, Vodní hospodářství).

Aerobní stabilizace

Aerobní stabilizace kalu může probíhat v aktivační nádrži (použití u nejmenších ČOV), nebo odděleně od celého procesu čištění. Funguje na principu provzdušňování kalu. Je využívána u menších čistíren bez primární sedimentace. Nádrže na aerobní stabilizaci jsou vybavené aerací, mechanickým míchadlem a zónovými odběry vody nad sedimentem. Postupně zde probíhají procesy aerace, sedimentace, odpouštění oddělené vody a míchání, při němž je odebírán zahuštěný stabilizovaný kal k odvodnění (Hartig, Vodní hospodářství).

Termofilní aerobní stabilizace

V podmínkách České republiky není tato metoda příliš využívána. Její princip vychází z provzdušňování kalové nádrže při teplotě 50 °C (Lyčková et al., 2008). Pro zajištění autotermního procesu je vhodnější používat směs primárního a přebytečného kalu, neboť přebytečný kal byl zčásti aerobně stabilizován již v čistícím procesu. Primární kal tak obsahuje více lehce rozložitelných látek. Ty jsou důležité k samoohřevu kalu v průběhu provzdušňování. Při procesu stabilizace touto metodou je produkována tepelná energie, která však prakticky nemá žádné využití (Hartig, Vodní hospodářství).

Anaerobní stabilizace

Jedná se o proces, během kterého rozkládá směsná kultura mikroorganismů biodegradovatelnou hmotu za nepřístupu vzduchu (Lyčková et al., 2008). Anaerobní stabilizace se používá především u větších čistíren s primární sedimentací. V dnešní době se používá jak proces mezofilní s provozní teplotou 38 - 40 °C, tak i proces termofilní s provozní teplotou kolem 55 °C. Při procesu stabilizace touto metodou je produkován bioplyn, který je možné spalovat v kogeneračních jednotkách, což je ekonomicky výhodné (Hartig, Vodní hospodářství).

3.6.3 Odvodňování kalu

Odvodnění kalu je zásadním krokem v procesu jeho zpracování. Je při něm dosaženo zmenšení objemu, což je žádoucí zejména pro jeho transport, či metody dalšího zpracování. Způsob odvodnění a množství výsledné sušiny v odvodněném kalu určuje jeho možnosti pro další technologické využití. To vše se následně promítá i v nákladech na jeho další zpracování, použití, či likvidaci (Lyčková et al., 2008).

Kalové pole

Kalové pole je přirozeným způsobem odvodňování. Představuje otevřenou mělkou nádrž s betonovým dnem a vrstvou štěrkopísku se zabudovanou drenáží. Ta odvádí odseparovanou vodu z kalu. Do nádrže je dávkován kal ve vrstvě 20 - 40 cm. Odvodněn je nejen vsakováním, ale i výparem. Jedná se o metodu časově náročnou a závislou na klimatických činitelích. Problémové jsou také velké investiční náklady a nároky na zastavěnou plochu (Lyčková et al., 2008).

Obrázek 5: Kalové pole (Lyčková et al., 2008)



Kalové laguny

Laguny jsou charakteristické přirozeným dnem bez drenážní vrstvy. Plní funkci jak odvodňovací, tak i zahušťovací. Obvodové hráze jsou zemní, zpevněné kameninou, dlažbou, nebo panely. Navrhují se vždy nejméně dvě samostatně pracující jednotky. Upraven musí být i vjezd pro stroje, které následně těží vysušený kal. Odsazená voda je vypouštěna přes přepady, které je nutno regulovat. V období mrazů je potřeba laguny pečlivě řídit, neboť může docházet k rychlému vyčerpání zásobního objemu zmrzlou kalovou vodou (Lyčková et al., 2008).

Flotace

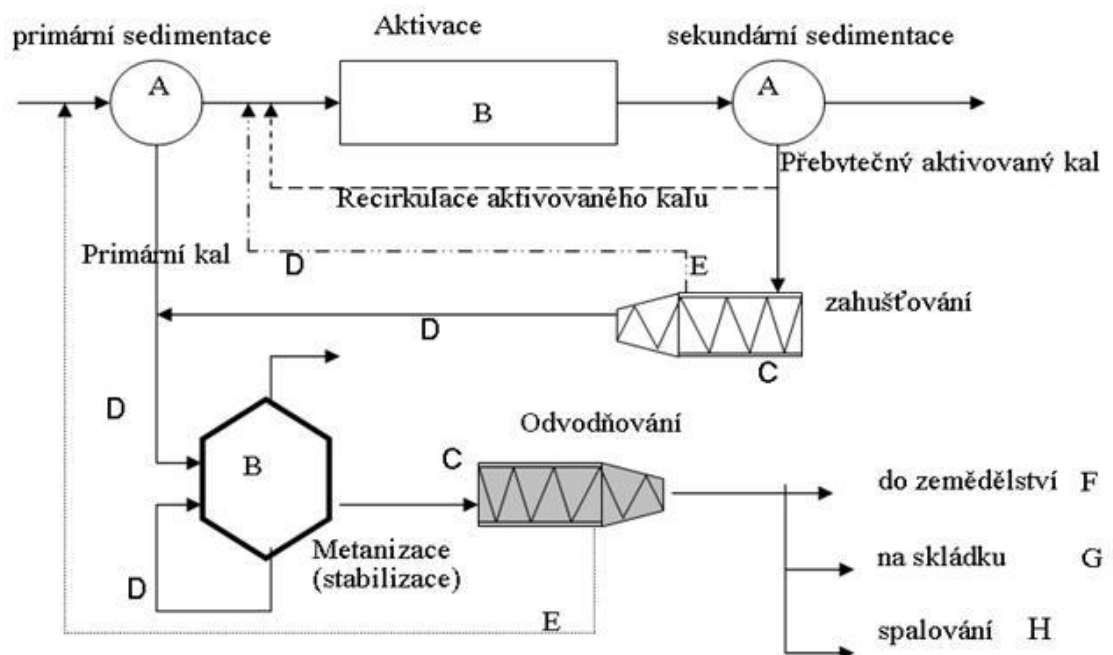
Flotace využívá k odvodnění rozdílnou smáčivost jemných materiálů, která způsobuje jejich oddělení. Nejčastěji je používána tzv. pěnová flotace, při níž je směs intenzivně míchána v provzdušňované vodě. Hydrofobní částice se tak na vzduchových bublinách dostávají na hladinu vody. Zde se hromadí ve formě pěny, která je mechanicky odstraňována a dopravována k dalšímu zpracování. Naopak hydrofilní částice smáčené vodou klesají ke dnu, odkud jsou odstraňovány (Lyčková et al., 2008).

Odstředivky

Při použití technologie odstředivek je kal přiváděn do otáčivého bubnu s vodorovně uloženou osou. Vlivem rotace bubnu dochází k oddělení tuhé složky, která se usazuje na vnitřním povrchu pláště díky odstředivé síle, a dále je tuhá složka vynášena šnekovým dopravníkem. Zhuštěný sediment je vytlačen do výsypní části, odkud vypadává do prostoru pod odstředivkou. Oddělená kalová voda je odváděna z odstředivky potrubím (Lyčková et al., 2008).

Dalšími typy odvodňovacích technologií jsou lisy (sítopásový, šnekový), kalolisy, nebo různé typy sušení (Lyčková et al., 2008).

Obrázek 6: Základní schéma čistírny odpadních vod s kalovým hospodářstvím; procesy: A – sedimentace, B – stabilizace, C – kondicionace, zahušťování a odvodňování, D – čerpání, E – vrácení kalové vody, F, G, H – využití (Pošta et al., 2005)



4 NAKLÁDÁNÍ S KALY Z ČOV A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ

Přestože se poslední dvě desetiletí aktivně diskutuje o různých způsobech nakládání s kaly, které nejsou v souladu s ochranou zdraví a životního prostředí a o nezbytnosti zpřísnit legislativu a začít využívat novější a efektivnější technologie zpracování kalů, mnohé z čistíren se nových technologií na kalové lince nedočkaly. Tyto čistírny se v dnešní době potýkají s problémy, jelikož nejsou schopny plnit nová pravidla nakládání s kaly, která přinesla vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. To by mohlo postupem času vést k upřednostňování metod termického zpracování, jako je tomu ve státech západní Evropy nebo jednoduššímu způsobu hygienizace vápnem, které sice efektivně snižuje mikrobiologické znečištění, avšak znehodnocuje hnojivou hodnotu kalů. Vyskytují se i názory, podle kterých by zpřísněné limity pro biologické parametry, které začnou v ČR platit od roku 2020, mohly vyústit až v úplný zákaz využívání kalů na zemědělské půdě (Matějů et al., 2019).

V České republice je produkováno velké množství čistírenských kalů, z nichž většina obsahuje nadlimitní množství některého polutantu. Tím je značně omezen objem kalů přímo použitelných k hnojení na zemědělské půdě, což se z mnoha důvodů jeví jako jeden z nejrozměrnějších způsobů jejich využití. Problém však nastává, pokud uvažujeme využití ostatních kalů (Valečko, 2002).

V zemích EU je v současnosti využíváno již cca 40 – 45 % čistírenských kalů, z nichž většina z tohoto množství je využívána v zemědělství. Zbývající část kalů je ukládána na skládky (30 – 35 %), 15 – 20 % se spaluje a 5 – 10 % se využívá jinak, zejména ve stavebnictví (Michalová, 2003).

Využití kalů je úzce spjato nejen s lokálními podmínkami, ale i se státní politikou a stupněm vyspělosti používaných technologií. Ve státech, ve kterých je prioritou princip předběžné opatrnosti, došlo k úplnému či alespoň částečnému omezení využívání kalů na zemědělské půdě. Nejprísnější kritéria pro tento způsob využití mají státy západní Evropy a USA. Právní předpisy nastavující tato přísná kritéria sledují zejména výskyt patogenních a rezistentních mikroorganismů, ale také další polutanty jako jsou antibiotika, hormony či endokrinní disruptory. Další důležitým dokumentem, který výrazně ovlivnil směr nakládání s odpady, je Evropská směrnice 86/278/EHS

o kalech z čistíren odpadních vod, která nařizuje sledování těžkých kovů a vybraných organických polutantů. Z těchto důvodů v dnešní době vzrůstá termické zpracování kalů, energetické využívání a znovuzískávání cenných a hnojivých látek, především fosforu (Matějů et al., 2019).

4.1 Využití kalů v zemědělství

Vzhledem ke svému složení bohatému na organické složky je možné některé typy kalů používat samostatně nebo ve směsi s hnojivý k hnojení zemědělské půdy. Surové kaly jsou pro tento typ využití nevhodné zejména kvůli přítomnosti velkého množství nebezpečných mikroorganismů. Z tohoto důvodu se využívají především stabilizované kaly z ČOV. Ani stabilizace však nezaručuje dokonalé potlačení výskytu mikroorganismů v kalu, proto je nutné na tuto skutečnost brát ohled (Lyčková et al., 2008).

Nespornou výhodou zemědělského využití kalů je obsah živin (zejména dusík a fosfor) a organických látek, které se podílí na tvorbě humusu v půdě. Mezi výhody můžeme také řadit možnost regulovaného aplikování na zemědělskou půdu (Lyčková et al., 2008).

Kal může být na půdu aplikován jen několikrát do roka (nejčastěji jednou až dvakrát v závislosti na orbě a výsevu). To s sebou nese velké náklady na skladování. Dalším problémem při tomto typu využívání kalů je nedostatek znalostí o obsahu organických mikropolutantů a patogenů obsažených v kalech, které mohou mít neblahý účinek na potravní řetězce (Lyčková et al., 2008).

Použití kalů v zemědělství je přísně limitováno vyhláškou č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě (viz Tabulka 2). I přesto je tento způsob zneškodňování kalu společně s využitím na rekultivace v ČR k roku 2018 nejvyužívanější (ČSÚ, ©2019). Stále se zpřísňující limity pro tento typ využití však mohou mít za následek razantní úbytek používání kalů v zemědělství, stejně jako je tomu například v západní Evropě (Matějů et al., 2019).

Čistírenský kal je velice cennou surovinou s vynikajícími hnojivými a protierozními vlastnostmi, což je v dnešní době velmi žádané. Z těchto důvodů je zapotřebí hledat způsoby a technologie úpravy kalů, které využití kalů na zemědělské půdě umožní

i v budoucnu. Zároveň je nezbytné, aby původci kalů při hledání té nejlepší cesty mysleli na zdraví lidí a životní prostředí (Matějů et al., 2019).

Tabulka 2: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě)

riziková látka	mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech (mg.kg⁻¹ sušiny)
As - arzén	30
Cd - kadmium	5
Cr - chrom	200
Cu - měď	500
Hg - rtuť	4
Ni - nikl	100
Pb - olovo	200
Zn - zinek	2500
AOX	500
PCB (suma 7 kongenerů - 28+52+101+118+138+153+180)	0,6
PAU (suma antracenu, benzo(a) antracenu, benzo(b) fluoranthenu, benzo(k) fluoranthenu, benzo(a) pyrenu, benzo(ghi) perylenu, fenantrenu, fluoranthenu, chrysenu, indeno(1,2,3 -cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu)	10

4.2 Kompostování

Kompostování je způsob rozkladu biologicky rozložitelných odpadů za účelem výroby organického hnojiva. Rozklad zajišťují mikroorganismy (převážně bakterie a houby), které potřebují k životu specifické podmínky. Mezi tyto podmínky patří vlhkost, přístup vzduchu, vhodné materiálové složení, přídavek půdy, promíchání, tma a teplo (Kalina, 2004). V první fázi je uvolňováno teplo, při kterém dochází k zahřátí kompostu na 50 – 65 °C, což způsobuje rozklad polysacharidů, bílkovin a tuků. Svou úlohu zde mají i termofilní houby, které rozkládají lignocelulózní hmoty. Při těchto procesech se výrazně zvyšuje kyselost substrátu způsobená hromaděním organických

kyselin. Tato fáze trvá 2 týdny – 2 měsíce. Doba trvání se odvíjí od materiálového složení. V další fázi nastává snížení teploty na 40 – 45 °C, mění se složení mikroorganismů a vzniká humus. V poslední fázi kompost dozrává, jeho barva se mění na hnědou, kyselost substrátu klesá a kompost přestává být fyto toxický (Lyčková et al., 2008).

Aby bylo kompostování efektivní, musí použitý materiál obsahovat dostatečný obsah fosforu a dusíku, vlhkosti a poskytovat vhodné podmínky pro mikroorganismy. Skladba surovin v kompostu musí být přizpůsobena optimální vlhkosti, podílu C:N, přítomnosti rozložitelných látek a fosforu. Čistírenský kal je v této skladbě nejčastěji zastoupen 20 % hmotnostními. Aby mohl být kal v surovinové skladbě zastoupen vyšším podílem, je zapotřebí zajistit dostatečnou pórovitost kompostu přidávkou strukturního substrátu. Při kompostování čistírenských kalů se k zajištění nejlepší možné struktury přidává drcená stromová kůra, dřevní štěpka, papírová drť nebo řezanka ze slámy. (Lyčková et al., 2008).

Ačkoliv klade tento způsob využití kalů nejvyšší nároky na kvalitu kalu po stránce fyzikálních, chemických a mikrobiologických vlastností, na přijatelný vzhled (absence cizích těles jako jsou plasty a podobně) a bezzápašnost (Lyčková et al., 2008), jedná se dnes o druhý nejrozšířenější způsob likvidace kalů v ČR (ČSÚ, ©2019).

Výhodou kompostování kalů je bezpečná hygienizace, které je dosaženo udržováním teploty nad 55 °C po dobu více než 21 dní. Při termofilním kompostování za teploty 65 – 70 °C je hygienizace dosaženo již po 3 dnech (Lyčková et al., 2008). Některé studie dokonce naznačují, že i perzistentní mikropolutanty obsažené v odpadních vodách a následně v čistírenských kalech, jako je například diclofenac, může kompostování efektivně degradovat. Děje se tak pravděpodobně díky přítomnosti plísní (Butkovskiy et al., 2016; Matějů et al., 2019).

4.3 Anaerobní stabilizace – zplyňování

Takzvaná anaerobní methanová stabilizace organických látek je proces, při němž dochází bez přístupu vzduchu a za činnosti směsné kultury mikroorganismů k degradaci biologicky rozložitelné organické hmoty. Na výstupu vzniká produkt zvaný bioplyn tvořený převážně methanem (až 70 %) a oxidem uhličitým (30 - 40 %), který může být následně využíván v kogeneračních jednotkách, což je výhodné jak

z ekonomického, tak z ekologického hlediska. Dalšími obsaženými látkami jsou sulfan, dusík, vodík a stabilizovaný kal. Mimo získání hodnotného bioplynu dochází ke stabilizaci a hygienizaci kalu (Lyčková et al., 2008).

Předností anaerobní stabilizace je zejména získání již zmíněného bioplynu, díky jehož produkci je získávána energie postačující na kompletní pokrytí energetických požadavků celého procesu, přebytečná energie se poté využívá v rámci celé čistírny odpadních vod (vytápění budov, elektrická energie, ohřev vody). Další výhodou je výrazné snížení sušiny kalu o 45 – 65 % oproti kalu surovému, což má za následek snížení nákladů na další zpracování kalu (Pošta et al., 2005).

Naopak nevýhodou jsou poměrně vysoké investiční náklady, dlouhá doba zdržení v anaerobních reaktorech a silně znečištěná kalová voda vznikající odvodněním anaerobně stabilizovaného kalu (Pošta et al., 2005).

4.4 Skládkování

Přestože ukládání kalů na skládky je způsob likvidace, který velmi silně zatěžuje životní prostředí, byla u nás tato metoda dříve hojně využívána (Pošta et al., 2005). Se vstupem do EU však vstoupila v platnost legislativa zakazující skládkování čistírenských kalů. Zákaz skládkování vychází konkrétně z vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. O zákazu ukládání kalů na skládky se lze dočíst i na webových stránkách Ministerstva životního prostředí. Přesto ČSÚ uvádí ve statistice způsobů nakládání s kaly za rok 2018 skládkování jako čtvrtý nejčastější způsob likvidace kalů s hodnotou 17 728 tun sušiny (celková produkce kalů na ČOV v České republice v roce 2018 byla 202 358 tun sušiny) (ČSÚ, ©2019).

4.5 Sušení kalů

Sušení kalů je zásadní podmínkou pro jejich další zpracování termickými metodami. Ty jsou v posledních letech upřednostňovány především kvůli obavám z nesplnění přísných kritérií použití kalů v zemědělství, nebo kvůli obsahu škodlivých látek, které se následně mohou dostávat do potravinového řetězce (Hartig, 2017). Proces sušení čistírenských kalů má vliv také na následné energetické využití kalů, kdy je

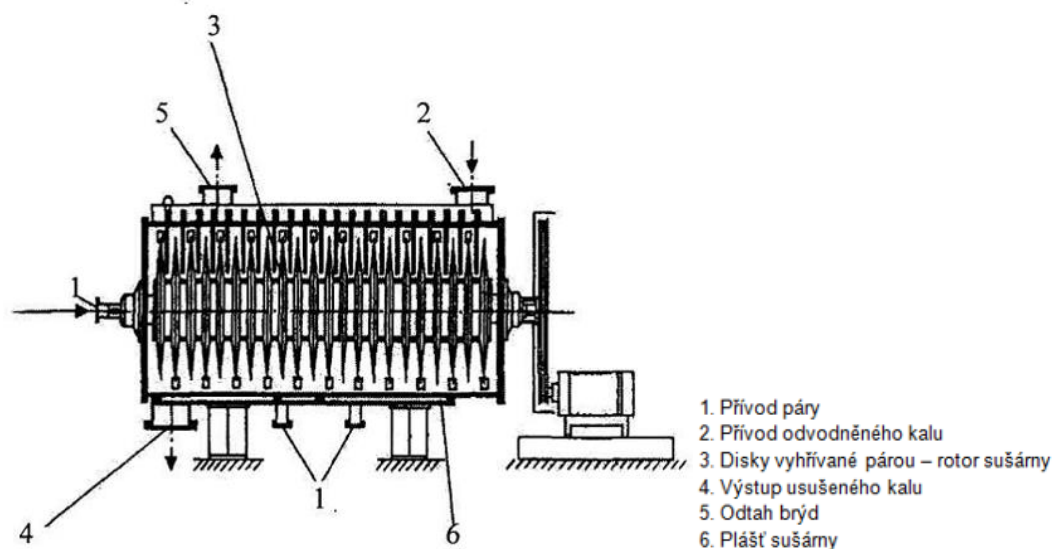
u navazujících technologií zapotřebí dosáhnout obsahu sušiny kalu až 90 %, aby následné zpracování nebylo energeticky ztrátové (Ševčík, 2016).

Výhodou sušení je navýšení možností finálního využití kalů, snížení objemu produkovaných kalů, zvýšení sušiny kalu až o 70 % a samozřejmě hygienizace kalu. Hlavní nevýhodou sušení kalu je zejména energetická náročnost, která vzrůstá s vyšším procentem koncentrace sušiny v usušeném kalu (Hartig, 2017). Vzhledem k této skutečnosti je nutné klást velký důraz na výběr vhodného typu sušárny pro konkrétní zařízení.

4.5.1 Kondukční (kontaktní) sušárny

Kondukcí neboli kontaktní sušárny pracují na principu převádění tepla z vyhřívaného povrchu zařízení na sušený materiál. Teplo je přenášeno nepřímo, tedy teplotní médium (pára, horký olej) není v přímém kontaktu s kalem. Jedním z typů kondukcí sušáren je **disková sušárna**. Diskové sušárny dokáží zpracovávat vyhnilý i nevyhnilý kal (Lyčková et al., 2009). Jejich hlavní výhodou je nenáročnost na prostor. Teplo přechází do sušeného média z rotujících disků, které svým pohybem kal posouvají a zároveň promíchávají. Dalším typem je **sušárna lopatková**, která je složena z těla v horizontální poloze, ve kterém rotují v opačném směru dva hřídele s klínovitými lopatkami. **Tenkovsrtvá sušárna** suší kal jeho roztíráním speciálními lopatkami po vnitřním povrchu vyhřívaného válce (Hartig, 2017).

Obrázek 7: Disková sušárna (Lyčková et al., 2008)



4.5.2 Konvekční sušárny

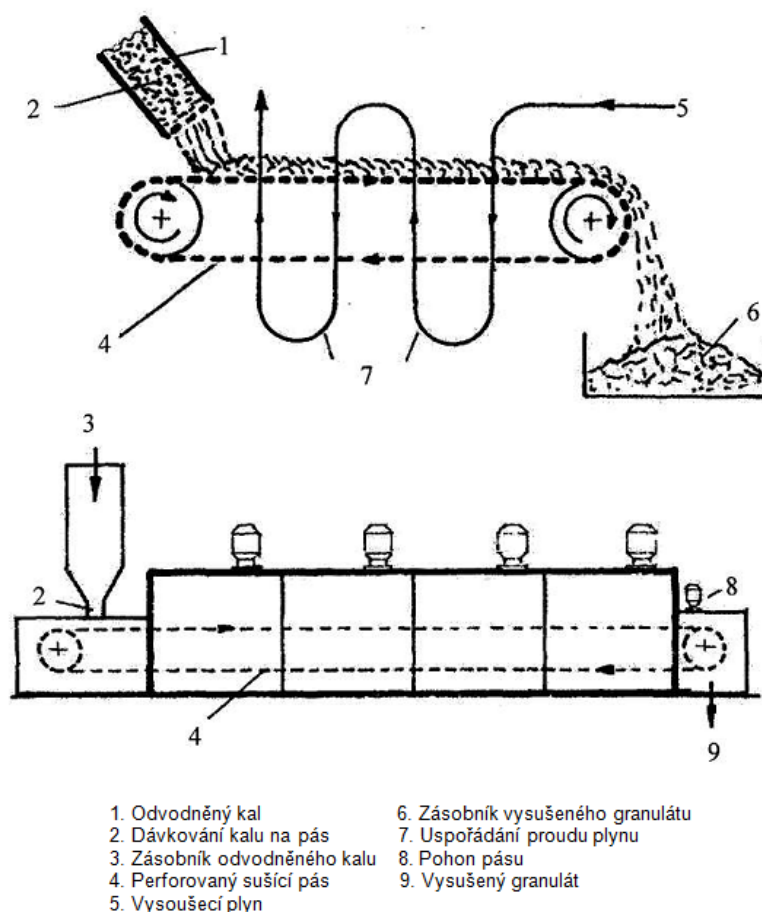
Princip konvekčního sušení spočívá v přímém vystavení kalu horkému proudu plynu. Tento způsob sušení zahrnuje nejvíce technologií použitelných právě pro sušení čistírenských kalů. Mezi nejvíce využívané patří sušárna pásová, fluidní a rotační bubnová sušárna (Hartig, 2017).

Pásové sušárny mohou kal vysušit na obsah sušiny vyšší než 90 % přímo přes adhezní (smykovou) fázi, tj. fáze, ve které kal připomíná „lepivou hmotu“ (obsah sušiny se pohybuje mezi 40 – 60 %). Vlhký odvodněný kal je v dávkách rozprostírán na pásích. Tyto pásy se pomalu pohybují v proudu teplotního media (spaliny, horký vzduch). Teplota horkých plynů se v závislosti na zdroji tepla a potřebné intenzitě sušení pohybuje od 70 °C do 140 °C (takto nízká teplota je mimochodem velkou výhodou, jelikož umožňuje využívání odpadního tepla). Zdroj tepla a potřebná intenzita sušení ovlivňuje i délku doby zdržení, či velikost sušárny. Za účelem úspory prostoru využívají sušící systémy různé typy uspořádání pásů (jednopásové, dvoupásové, vícepásové), přičemž jsou pásy umístěné nad sebou. V dnešní době dominuje použití nízkoteplotních sušáren, ve kterých se udržuje konstantní teplota, tyto typy mohou mít ovšem problémy s dosažením obsahu sušiny 85 % a více. Usušený kal ve formě granulí s velmi malou prašností umožňuje jeho skladovatelnost. (Hartig, 2017; Lyčková et al., 2008).

Kompletní pásová sušárna je složena z:

- výměníku tepla pro ohřev vzduchu, granulaci odvodněného kalu za pomoci zpětného vedení již vysušeného kalu, nebo „nudličkovač“ kalu, nebo jiné zařízení zajišťující rovnoměrné rozprostření kalu na pás,
- dávkovací silo na odvodněný kal,
- chlazení vysušeného kalu (granulátu),
- silo na vysušený kal (granulát),
- zařízení odpadního vzduchu (Hartig, 2017).

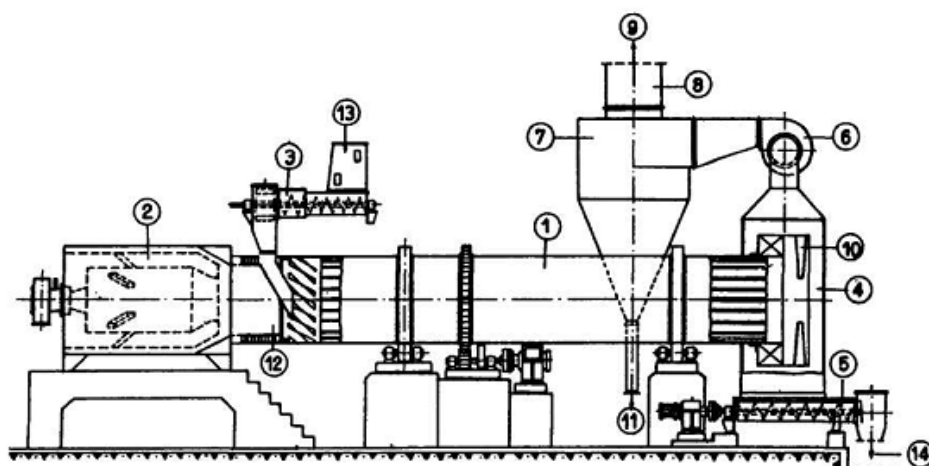
Obrázek 8: Princip pásové sušárny (Lyčková et al., 2008)



Fluidní sušárny se využívají pro úplné vysoušení kalů. Nemají žádné otočné části uvnitř sušárny. Ventilátory zajišťující cirkulaci vzuchu jsou umístěny mimo vlastní těleso sušárny. Principem fluidního sušení je stoupající proud plynů vytvářený turbulencí. Ten udržuje granule kalu ve vznosu a zároveň je intenzivně promíchává. Plyny, které jsou poháněné ventilátorem, prochází až do fluidní lože kalu. Cirkulace plynu zajišťuje odvod odpařené vody. K odpaření vody dochází díky topným trubkám umístěných uvnitř fluidního lože kalu. Teplota topného zařízení bývá vyšší než u sušáren pásových a pro přenos tepla bývá využíván termoolej (Hartig, 2017).

Do rotační bubnové sušárny je kal přiváděn z jedné strany. Díky rotaci bubnu je kal přesypáváním přesouván na druhou stranu válce, přičemž přichází do kontaktu s velmi horkým proudícím plynem. Na konci procesu získáváme kal ve formě granulí s obsahem sušiny $> 90 \%$. Materiál, který je na vstupu do bubnové sušárny musí obsahovat více než 65% sušiny, aby nedošlo k ucpání bubnu. Proto se před vstupem kalu do sušárny často přimíchává k odvodněnému kalu kal sušený (Lyčková et al., 2008).

Obrázek 9: Bubnová sušárna (Lyčková et al., 2008)



- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Buben sušárny | 8. Odvod brýd |
| 2. Hořák nebo ohřívák vzduchu | 9. Odtah |
| 3. Dopravník kalů | 10. Hradící zařízení |
| 4. Zásobník sušeného kalu | 11. Prach |
| 5. Šnekový vynašeč suchého kalu | 12. Napojení zdroje tepla k bubnu |
| 6. Ventilátor | 13. Zásobník odvodněného kalu |
| 7. Odlučovač prachu | 14. Usušený granulát |

4.5.3 Solární sušárny

Sušení kalu v solárních sušárnách je dosaženo za pomoci sluneční energie. Odvodněný kal je transportován do skleníku, kde je rozprostřen po zemi a v určitých intervalech dochází k jeho obrácení. Uvnitř skleníku probíhá řízená ventilace na základě hodnot měření teploty a vlhkosti vzduchu. Solární sušení kalů je ekonomicky nenáročnou variantou sušení, nicméně je nutné počítat s větším záborem půdy kvůli požadované ploše sušárny. Rychlost sušení závisí na intenzitě slunečního záření, v zimě je možné ke zvýšení intenzity sušení využívat podlahové topení. Primárním zdrojem solární sušárny však zůstává sluneční záření, jemuž je přímo úměrný výkon sušárny. Je proto nezbytné, aby se sušárna nenacházela v zástínu (Hartig, 2017).

4.6 Termické zpracování kalů

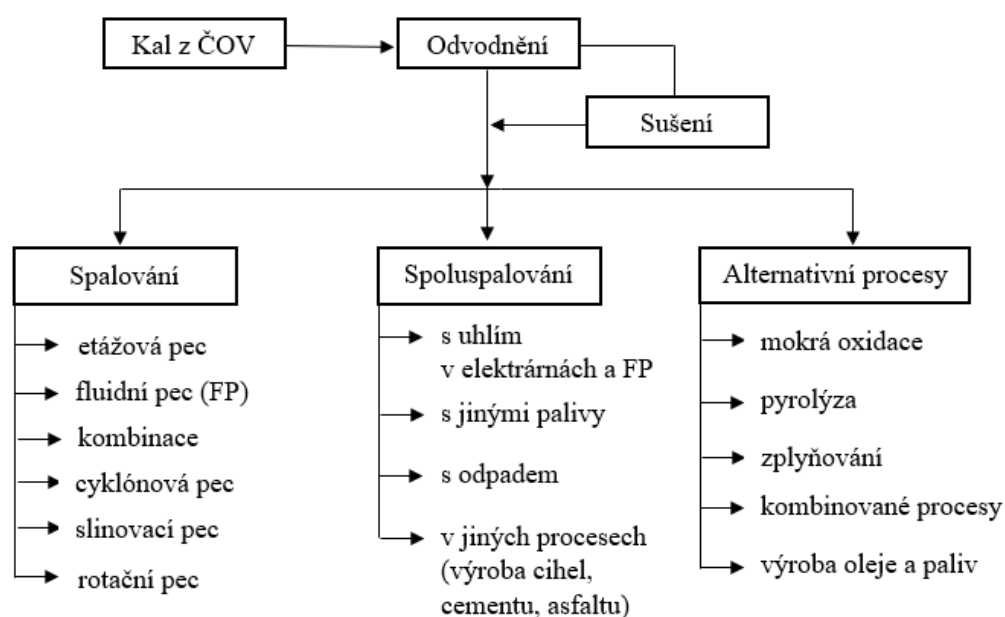
V současné době je využíváno několik metod pro termické zpracování čistírenských kalů. Nejčastěji se jedná o monospalování, spalování nebo alternativní procesy (viz Obrázek 10) (Werle et Wilk, 2010). Termické procesy jsou výhodné z hlediska získání druhotných surovin, které mohou být dále upraveny a zužitkovány. Aby však

bylo možné kal termicky zpracovávat, je vhodné je nejdříve co nejefektivněji vysušit (Pohořelý et al., 2017). Další výhody termického zpracování lze shrnout do několika bodů:

- kal je obnovitelný zdroj energie,
- energetické využívání kalů neovlivňuje bilanci CO₂ na Zemi,
- zařízení pro termické zpracování lze umístit v areálu ČOV nebo její blízkosti, což minimalizuje náklady na dopravu kalu,
- hmotnostní redukce kalu až na 15 % původní hmotnosti kalu odvodněného,
- využitelný zbytkový materiál (Hartig, 2017).

V této kapitole budou popsány některé z nejrozšířenějších způsobů termického zpracování kalů.

Obrázek 10: Metody termického zpracování kalů (Štáta, 2009)



4.6.1 Spalování kalů

Samostatné spalování čistírenských kalů umožňuje spalovat odvodněný surový kal i anaerobně stabilizovaný kal. Aby však bylo možné využít nevyhnilý kal jako zdroj energie při monospalování bez použití přídavného paliva, je potřeba zajistit tepelně samonosné spalování při dokonalé tepelné izolaci o teplotě 850 °C. Neméně důležité je dosáhnout minimální hodnoty efektivní výhřevnosti kalu, která by měla být pro vlhký kal $H_{uef} = 4,2$ MJ/kg. Další podmínkou je navržení vhodného typu ohniště pro spalovací proces (Hartig, 2017). Ke spalování kalů s co nejvyšší efektivitou by

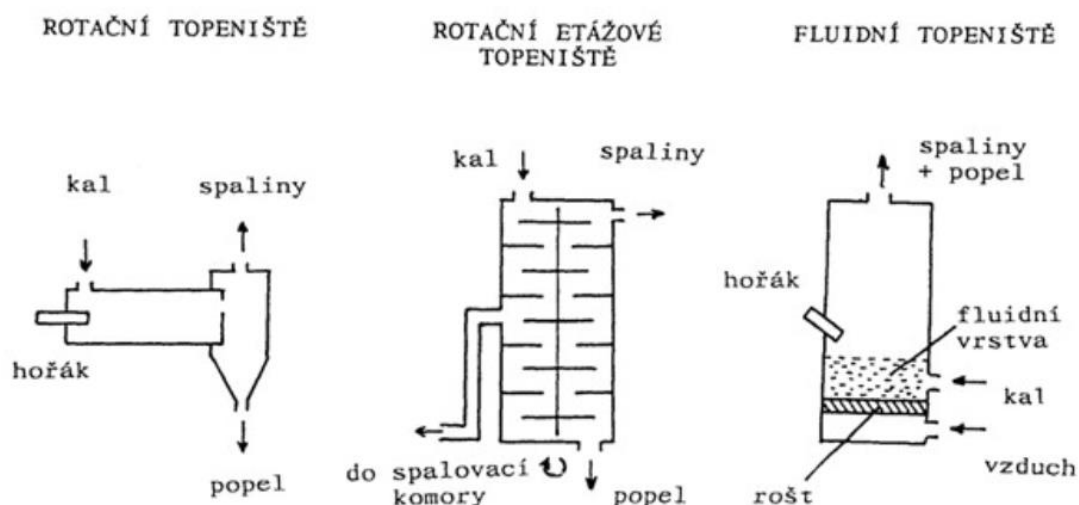
však mělo docházet až po jejich anaerobní stabilizaci a dokonalém odvodnění, nejlépe vysušením. Pokud by k vysušení nedošlo, voda obsažená v kalu by se odpařovala a spotřebovávala tak značné množství vznikající tepelné energie. To by zapříčinilo snížení energetického přínosu spalování, případně by to celý proces spalování znemožnilo (Lyčková et al., 2008).

Významným pozitivem spalování kalů je radikální redukce jeho objemu - o více než 90 % (Dohányos, 2006). Velice žádanou komoditou při monospalování kalů je kromě tepelné a elektrické energie i popel, který má vysoký podíl nutrientů, mezi nimiž je asi nejzajímavější přítomnost oxidu fosforečného (P_2O_5). Ten je v popelu obsažen až z 18 %. Běžně vytěžený fosfor má zhruba dvojnásobnou koncentraci P_2O_5 , ale vzhledem k velkému problému omezených zásob fosforu ve světě se jedná o velmi žádoucí alternativu (Wanner, 2019).

K výstavbě zařízení na spalování kalů je samozřejmě potřeba kladné stanovisko EIA. Také je nutné zajistit kontinuální měření emisí, což s sebou nese velmi vysoké investiční a provozní náklady. Pokud jsou spalovny realizovány přímo v místě čistírny odpadních vod, je možné využít vyprodukované teplo k sušení čistírenských kalů a částečně tak ponížít provozní náklady (Wanner, 2019). Zásadním problémem v budoucnosti spalování kalů je ale velký odpor ze strany obyvatelstva (Hartig, 2017).

Mezi základní druhy technologií využívané ke spalování čistírenských kalů patří rotační topeniště, rotační etážové topeniště a fluidní topeniště (Lyčková et al., 2008).

Obrázek 11: Schémata topenišť pro spalování kalů (Lyčková et al., 2008)



Rotační topeniště

Rotační topeniště jsou využívána především pro spalování kalů pocházejících z průmyslu. Spalování je prováděno ve vodorovně umístěném válcovém bubnu z ocelového plechu se žáruvzdornou vyzdívkou, který se pomalu otáčí. Rotace bubnu zajišťuje dobré přehrnování a mísení odpadu a také přístup spalovacího vzduchu. Díky možnosti volby otáček je možné přizpůsobit pec různým druhům odpadu a různým spalovacím režimům. V případě potřeby aditivního paliva je do bubnu zaveden plynový hořák nebo olejové topení. Na výstupní straně bubnu je situován odvod spalin. Ty jsou obvykle dále odváděny na dodatečné tepelné zpracování za účelem úplného spálení zbytků spalitelných složek v případě nedokonalého spálení v bubnu. Také jsou zde spáleny těkavé zápachající podíly kalů, čímž je zabráněno jejich nežádoucímu úniku do ovzduší (Lyčková et al., 2008).

Rotační etážové topeniště

Princip spalování v rotačních etážových topeništích je podobný jako u výše zmíněných rotačních topenišť. Tento typ topeniště představuje několik spojených válcových topenišť umístěných nad sebou ve svislé poloze. Kal zde prochází směrem shora dolů a díky spirálovitému postupu pecí je zajištěna dlouhá doba zdržení. Tok spalovacího vzduchu a spalin může být souběžný (vzduch a spaliny postupují se spalovaným kalem), nebo protiproudý. Stejně jako u předchozího topeniště je na výstupu instalována komora pro dodatečné tepelné zpracování (Lyčková et al., 2008).

Fluidní topeniště

Fluidní topeniště je obvykle vertikálně situovaný válec. Ve spodní části válce je umístěn tryskový nebo keramický rošt, který vhání vzduch do spalovacího prostoru. Na tomto roštu je vrstva písku, který vlivem vstupujícího vzduchu do válce vytvoří vířivý mrak ve spalovacím prostoru. V něm pak probíhá spalování rozprašovaného kalu. Rozprašení kalu je u této technologie zásadní. Proto je nejdříve potřeba zajistit velmi dobré vysušení kalu. Rozprašení usušeného kalu provádí rozmetávací zařízení. Následně je kal unášen proudem vzduchu do horní části válce, kde je zpravidla opět umístěno dodatečné tepelné zpracování (Lyčková et al., 2008).

4.6.2 Spoluspalování kalů

Při spoluspalování dochází ke spalování kalu společně s primárním nositelem energie, kterým je černé nebo hnědé uhlí. Kal se přidává v množství do 5 % z celkového množství primárního paliva. Jedná se o ekologický a ekonomicky výhodný způsob likvidace odvodněných kalů. Díky vysoké teplotě a delší době setrvání plynu v topeništi umožňuje spoluspalování dosáhnout prakticky úplné degradace kalu za současného dodržení všech ekologických požadavků (Hartig, 2017).

Hlavní výhody pro využívání této metody tkví v postačujícím odvodnění na 25 - 30 % obsahu sušiny v kalu, dodržení limitních hodnot spalin díky moderní technologii na odsíření, poměrně nízké investiční náklady pro výchozí zařízení (elektrárnu), stejně jako zanedbatelné personální náklady či náklady na odstraňování zbytku po spalování. Vzhledem k nízkému poměru spalovaného kalu vůči uhlí je však tato metoda termického zpracování limitující zejména pro velké ČOV (Hartig, 2017).

4.6.3. Spalování kalů v cementářenské peci

Další možností termického zpracování usušených kalů je jejich spalování v cementárně (případně ve spalovnách tuhého komunálního odpadu). Jedná se o neekologičtější způsob spalování vzhledem k vysoké teplotě používané při výrobě cementu. Vysoká teplota (> 1 000 °C) zajistí dokonalou likvidaci organických látek včetně rezistentních. Anorganický podíl kalu pak přechází do formy slínku, která je součástí cementu - tím je dosaženo materiálového využití odpadu. Popel vzniklý spálením je obsahem minerálních látek blízký složení slínku. Může tak nahradit část vstupní suroviny (podle kvality může 1 tuna usušeného kalu nahradit až třetinu tuny suroviny). Aby byly zachovány dobré vlastnosti cementu, je možné sušeným kalem (s obsahem sušiny cca 95 %) nahradit pouhých 5 % používaného uhlí. (Dohányos, 2006; Hartig, 2017).

4.6.4. Mokrý spalování čistírenských kalů

Systém ATHOS®

Principem metody mokrého spalování je oxidace tekutého kalu za aerobních podmínek a působení teploty v rozmezí 200 - 300 °C a tlaku 40 - 60 barů. Doba zdržení je 60 minut. Při těchto podmínkách je až 90 % organických látek zoxidováno a převedeno

do kapaln  fáze ve formě ni z ich mastných kyselin a metanolu. T m je dosaženo mineralizace kalu. Celkov  proces je energeticky aktivn  díky exotermicit . Kapaln  fáze obsahuje vysok  koncentrace amoniakálního dusíku, proto je do systému p rd v n katalyzátor na bázi mědi, kter  umožňuje zoxidování amoniaku a následnou přeměnu na plyn n  dusík. Kapaln  fáze m e být použita jako extern  substrát pro denitrifikaci. Pevnou fázi lze snadno odvodnit b e n mi metodami i bez p rd vku flokulantu. Touto cestou lze dosáhnout sušiny a  50 %. Mokr m spalováním je v p r m ru dosaženo odstranění a  87 % CHSK a 45 - 70 % amoniakálního dusíku (Dohányos, 2006).

Vysokotlak  mokr  spalování - APO (Aqueas phase oxidation)

Reaktor na vysokotlak  mokr  spalování se skládá ze tři soustreden ch trub, z nichž vn j i slou i k chlazen . Kal s kyslíkem jsou čerpány do st edov  roury. Teplota směsi postupn  stoupá díky exotermn  oxidaci až na 275  C. Sloupec vody a plynů způsobuje u dna tlak až 11 MPa, což zabraňuje varu reakční směsi. Odtok z reaktoru m  pouhých 50  C, kterých je dosaženo protiproud m chlazen m. Rozpu ten  i suspendovan  organické látky jsou oxidovány dod van m plyn m kyslíkem.   st látek je oxidována na CO₂, zbytek je transformován na biologicky rozlo iteln  látky. Po oxidaci obsahuje směs anorganick  „popel“ a odpadní plyny. Plyny jsou katalyticky zoxidovány při 500  C a popel je oddělován standartními separačními metodami. Kapaln  fáze obsahující amoniak je biologicky čištěna. Tato metoda snižuje sušinu kalu až o 80 % a organické látky v něm obsa en  likviduje prakticky absolutn  (Dohányos, 2006).

Mokr  spalování v nadkritick  oblasti vody

Proces mokrého spalování v nadkritick  oblasti vody probíhá při teplotě vody 374  C a tlaku 22 MPa. Tato metoda umožňuje nejv t i využití zisk n  energie z kalu. Švýcarsko - americk  společenství v dc  provedlo výzkum na poloprovozním zařizení při teplotě 500 - 600  C a tlaku 25 MPa, spalován byl kal s obsahem sušiny 10 %. Při těchto podmínkách došlo k  pln  p em n  všech organických i anorganických látek a to za dobu zdržení do pouhých 30 vteřin. Z energetického hlediska postačuje dodávat cca 30 % z celkového energetického obsahu kalu, zbývajících 70 % lze využit. Náklady na zpracování kalu touto metodou mokrého spalování jsou odhadovány na zhruba 250 amerických dolarů / tunu sušiny (Dohányos, 2006; Sakai et al., 1997; Svanstr m et al., 2003).

4.6.5 Pyrolýza kalů

Obecně lze konstatovat, že pyrolýza je proces degradace chemických molekul za působení dostatečně vysoké teploty bez přístupu vzduchu (Werle et Wilk, 2010). Lze tak efektivně přeměnit biomasu a organické látky na dále využitelné chemikálie a materiály. Lepší kvality produktů na výstupu lze dosáhnout nastavením správné technologie pyrolýzy a jejích provozních parametrů, které lze přizpůsobit i vlastnostem biomasy na vstupu. Proces pyrolýzy může být z hlediska dodávané energie soběstačný až tepelně přebytečný díky spalování vznikajícího plynu z čistírenských kalů v nízko-emisních hořácích, které jsou součástí pyrolyzéro (Kos, 2016). Při pyrolýze vzniká jednak kapalné palivo, biouhlí (biochar), plyny, voda, síra a anorganické odpady. Kapalné palivo lze využívat pro výrobu elektřiny, vytápění nebo jako pohonné hmoty. Plyny jsou směsí metanu, propanu, pentanu a dalších vysoce těkavých látek. Obsah síry závisí na druhu vstupních surovin a použitém kapalném obsahu síry. Anorganické odpady jsou zastoupeny ve frakcích solí sodíku, vápníku, draslíku nebo ve formě ekologicky neutrálních křemičitanů (Hlavínek, 2015; Menéndez et al., 2005). Celý proces by měl být navržen tak, aby vznikalo co nejméně kapalného podílu, a aby byl tuhý zbytek co nejméně vyluhovatelný (Dohányos, 2006).

Pyrolýzní procesy lze z technologického hlediska dělit dle dosahované teploty na nízkoteplotní (do 500 °C), středněteplotní (500 - 800 °C) a vysokoteplotní (více než 800 °C) (Hlavínek, 2015). Dále dělíme pyrolýzu dle rychlosti ohřevu na dva základní typy: rychlou a pomalou. Rychlá pyrolýza se vyznačuje rychlým teplotním nárůstem, krátkou dobou zdržení (v řádech sekund) a finální teplotou až 1 000 °C. Při rychlé pyrolýze vzniká podílově nejvíce oleje (60 - 75 % hm.), biochar se podílí z 15 - 25 % hm. a pyrolýzní plyn pak tvoří 15 - 25 % hm. Při pomalé pyrolýze dochází k nárůstu teploty na konečných až 800 °C pozvolna. Při ní vzniká 20 - 25 % hm. bio-oleje, 25 - 35% hm. plynu a 35 - 55 % biocharu. Z toho důvodu se pro vznik biocharu preferuje metoda pomalé pyrolýzy. Dochází při ní také k potlačení produkce bio-oleje a naopak vyššímu podílu plynu, který se může využívat pro ohřev reaktoru (Kos, 2016).

Vlastnosti vzniklých produktů jsou velmi ovlivněny materiálem na vstupu a zvolenou technologií pyrolýzy. Proto je biochar certifikován pro každý jeden případ zvlášť. Obecně se jedná o materiál, který je tvořen až z 90 % uhlíkem a skládá se z aromatických sloučenin obsahujících šest atomů uhlíku (Kos, 2016). Biochar patří

v dnešní době k často diskutovaným tématům. Jeho vlastnosti umožňují využívat tento materiál ve velkém množství oblastí. Biouhel může nahrazovat fosilní zdroje uhlíku a při použití v průmyslu představuje odstranění antropogenně vznikajícího CO₂ z atmosféry (Schmidt, 2012). V případě jeho použití na půdu dochází k vyjmutí uhlíku z cyklu, čímž se zásadně snižuje uhlíková stopa (Kos, 2016). Dále se dá použít v chovu zvířat např. jako doplněk krmiva nebo pro úpravu kejdy, také může plnit funkci půdní výživy formou uhelného hnojiva nebo nahrazovat rašelinu. Využití najde také v oboru stavebnictví jako materiál do izolací nebo k dekontaminaci vzduchu a zemních základů. Sloužit může i k sanování půd např. na bývalých skládkách. Dokáže vytvořit bariéru zabraňující vyplavání pesticidů do povrchových vod. Použit může být i k ošetření eutrofizovaných rybníků, dále např. při čištění odpadních vod jako uhlíkový filtr, nebo jako mikrofiltr při úpravě pitné vody. Pro představu, kde všude je možné biochar využívat, je potřeba zmínit alespoň okrajově odvětví, ve kterých se může uplatnit: průmyslové materiály, elektronika, hutnictví, kosmetika, zdravotnictví, textilní průmysl, energetika a nespočet dalších (Hlavínek, 2015). Je však třeba zdůraznit, že použití biocharu v zemědělství a pro sanace je podmíněno - jednak legislativně a jednak finanční náročností jeho úpravy na takový stupeň, aby s ním mohlo být dále nakládáno. Proto je biouhel ve výsledku skládkován či jinak likvidován, neboť ve většině případů nespĺňuje požadavky na hnojiva (Wanner, 2019). V současnosti je možné hledat jeho využití pro filtraci na menších ČOV nebo na sanaci menších nádrží. Rozsáhlejší použití biocharu lze očekávat v případě, že dojde k optimalizaci ceny výroby. Pak bude jeho použití možné i v zemědělství a při ochraně vody a půdy před kontaminací (Šťastný, 2019).

Technologie pyrolýzy nepatří vzhledem k ekonomické náročnosti k oblíbeným. Představuje vysoké investiční náklady a velmi vysokou potřebu chladicí vody (tisíce m³ za rok), což předurčuje umístění zařízení na pyrolýzu přímo na ČOV, případně u jiného zdroje vody. Při pyrolýze také dochází oproti spalování k redukci materiálu pouze na cca 25 % původní hmotnosti (Dohányos, 2006; Wanner, 2019).

4.6.6 Zplyňování kalů

Zplyňování je proces přeměny pevného paliva na plyn, tedy zpracování pevného paliva v generátoru pomocí kyslíku, vzduchu, páry nebo jinými zplyňovacími metodami (Nadziakiewicz et al., 2007). Při této metodě je produkován vysoce kvalitní hořlavý

plyn, který lze použít k výrobě elektřiny nebo může energeticky podpořit např. proces sušení čistírenských kalů (Marrero et al., 2004). Vzniklý plyn je nazýván také jako „syngas“ či „syntézní plyn“. Oproti spalování se při zplyňování využívá pouze 20 - 30 % vzduchu pro úplné vyhoření paliva. Do reaktoru je dodáváno jen takové množství vzduchu, aby docházelo k hoření pouze malé části paliva, což má za následek vyvinutí dostatečného tepla k rozložení zbytku paliva vlivem pyrolýzy a chemického rozkladu na syngas a popel. Celý proces zplyňování lze popsat ve čtyřech základních krocích: sušení, pyrolýza, redukce, oxidace, přičemž první tři procesy jsou endotermního charakteru, tedy spotřebovávají teplo. Potřebné teplo k těmto procesům je získáváno oxidací, tedy hořením části paliva přímo v reaktoru (Hartig, 2017).

Syngas je složen z oxidu uhelnatého, vodíku a metanu. Umožňuje čisté spalování paliva a může tak substituovat zemní plyn, topný olej nebo propan sloužící k výrobě tepelné a elektrické energie. Své uplatnění najde zejména v petrochemickém a rafinérském průmyslu (Hartig, 2017).

Jako výhody zplyňování oproti přímému spalování při výrobě tepla a elektrické energie (v kogeneračních jednotkách) lze zmínit např.: dosažení větší konverze paliva na elektrickou energii, nižší provozní náklady, snadnější odstraňování škodlivin v plynné fázi, rovnoměrný ohřev velkých ploch plynnými palivy, možnost přímého spalování plynných paliv v tepelných zařízeních a snížení produkce oxidů uhlíku, síry a dusíku (Hartig, 2017).

Za nevýhodu lze považovat nutnost čištění syngasu od dehtů. Řešením může být zavedení plynu do vyhřívacích nádrží, kde vznikne směs bioplynu a syntetického plynu, která je velmi dobře spalitelná v upravených kogeneračních jednotkách. Je potřeba zmínit, že aby bylo možné kaly zplyňovat, je nutné do technického řešení ČOV zařadit technologii alespoň částečného sušení kalů (Hartig, 2017).

Tabulka 3: Porovnání termických procesů s ohledem na pevný zbytek z čistírenského kalu (Pohořelý et al., 2017)

Stabilizované čistírenské kalý			
Proces (teplota procesu)	Fluidní spalování (850 °C)	Zplyňování (850 °C)	Pyrolýza (600 °C)
Ověřená technologie	ANO	NE	ANO
Nutnost vysušeného kalu	ANO	ANO	ANO
Hmotnostní redukce	ANO, cca na 1/2	ANO, cca na 1/2	ANO, cca na 3/5
Záchyt fosforu	ANO, více jak 95%	ANO, více jak 95%	ANO, více jak 95%
Záchyt ostatních nutrientů	ANO, kromě N	ANO, kromě N	ANO, včetně části N*
Úplné odstranění organického podílu	ANO	NE, pouze částečné	NE, pouze částečné
Odstranění Hg	ANO	ANO	ANO
Odstranění ostatních těžkých kovů a As	NE, částečně polo-těkavé	NE, polo-těkavé ano	NE
Produkt	popel s obsahem P	popel s obsahem P a C	kalochar s obsahem P a N
Kapacita	nad 150 000 EO	nad 150 000 EO	nad 30 000 EO

* obsah N v biocharu je cca 2 hm. % (cca 50% redukce proti obsahu v čistírenském kalu)

5 RECYKLACE FOSFORU Z ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Zásadní změny ve složení kalu spočívající zejména v nárůstu mikropolutantů a dalších škodlivých látek, které zapříčinil životní styl obyvatelstva, vedly k vytvoření nové legislativy jak EU, tak i jednotlivých členských států. To způsobilo spolu s ekonomickými důvody rozvoj moderních technologií na kalových linkách ČOV. Nově se tak vedou snahy o kombinaci využití energie získané z čistírenských kalů s jejich materiálovou transformací do formy, která je opět využitelná jako hnojivo, nebo se zájmem na zpětném získání fosforu, který je výhledově kriticky nedostačujícím materiálem EU (Frýba, Kos).

Fosfor je unikátní a nenahraditelná surovina, jejíž nedostatek přímo ohrožuje zemědělskou produkci, nepřímo pak ovlivňuje veškeré potravní řetězce. Evropa je v současnosti z více než 90 % závislá na importu fosforu (Holba et Došek, 2016) a celkové náklady EU na dovoz fosforu dosahují až 2 miliard EUR za rok (Hartig, 2017). Pokud by se však začaly hojněji využívat technologie na zpětné získávání fosforu z odpadních vod, čistírenských kalů nebo popílku, bylo by možné zabezpečit až 15 % fosforu, který je v současné době do Evropy dovážen (Holba et Došek, 2016).

Evropská komise fosfor zařadila v roce 2014 na listinu dvaceti kritických surovin (European Commission, 2014). Světové zásoby apatitu ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) jako hlavního zdroje fosforu jsou odhadovány na dalších 50 - 100 let (Šyc et al., 2016). Z celkové

produkce fosforu je více než 80 % využíváno v zemědělství, 12 % jako součást krmiva pro dobytek a zhruba 5 % pro výrobu detergentů (Šyc et al., 2015).

Zpráva Komise Evropskému parlamentu, Radě, Evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a Výboru regionů o stavu provádění a o programech provádění (podle článku 17) směrnice Rady 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod zmiňuje, že v roce 2014 bylo v Evropě vyprodukováno celkem 8,7 miliony tun sušiny kalu, což odpovídá přibližně 17 kg na obyvatele. Množství fosforu spolu s dusíkem recyklovaných do půdy dosahovalo v obou případech 250 000 tun. Tuna dusíku má hodnotu zhruba 1 300 EUR, hodnota oxidu fosforečného (P_2O_5) se pohybuje okolo 900 EUR za tunu. Celková hodnota získaná recyklací kalů z ČOV v Evropě by tak v roce 2014 představovala asi 550 milionů EUR.

Fosfor ve formě oxidu fosforečného (P_2O_5) se v sušině kalu vyskytuje okolo 10 hm. %, v některých případech může dosahovat až 20 hm. %. Z toho důvodu byly kaly často využívány jako hnojivo v zemědělství. Surové kaly ovšem obsahují řadu těžkých kovů a patogenních organismů, což jeho přímé aplikaci na zemědělskou půdu brání. V několika zemích (např. Švýcarsko, některé spolkové země Německa) je v současnosti přímé použití kalů v zemědělství zakázáno a do budoucna lze očekávat rozšíření zákazu i do dalších zemí. Je tedy nutné hledat metody recyklace kalů, které budou splňovat jak ekonomické, tak environmentální požadavky. V tomto ohledu lze uvažovat o termickém zpracování kalů s následnou recyklací fosforu (Šyc et al., 2015).

Spolková republika Německo přistupuje na přísnější limity pro použití kalů v zemědělství. Dne 27. září 2017 bylo konečně přijato nařízení o čistírenských kalech pojednávající o jejich recyklaci (VDI Wissensforum, ©2020). Podle tohoto nařízení je přímé využití kalů bez materiálové transformace zcela zakázáno pro ČOV nad 50 000 EO. Materiálová transformace fosforu bude povinná při obsahu fosforu v sušině kalu nad 2 %. Menší ČOV pak budou muset splňovat nové a přísnější předpisy pro aplikování kalu v zemědělství. Doba pro výstavbu nových zařízení, případně aplikování nových technologií, je stanovena na maximálně 12 let pro ČOV nad 100 000 EO, ČOV nad 50 000 tak musí učinit do 15 let (Kos, 2017). Do roku 2023 musí provozovatelé čistíren předložit technickou koncepci způsobu recyklace fosforu (VDI Wissensforum, ©2020).

Fosfor lze v dnešní době získávat třemi základními druhy technologií:

- mokrým procesem srážení fosforu z odpadní vody,
- termickou destrukcí kalu v oxických podmínkách (spalování nebo zplyňování a následné využití popelu k získávání fosforu),
- termochemickou transformací (pomalou pyrolýzou vedoucí k získání biocharu a v něm obsaženého fosforu) (Hartig, 2017).

Z odpadní vody se fosfor získává pomocí adsorpčních nebo srážecích metod. Nejpoužívanějším způsobem prováděným v praxi je získávání fosforu srážením amonnými činidly ve formě struvitu ($MgNH_4PO_4 \cdot 6 H_2O$). Výhodou je získání čistého fosforečného produktu díky rekrystalizaci. Účinnost této metody je ale velice nízká, maximální hodnoty jsou udávány kolem 40 % (Šyc et al., 2015). Získávání fosforu přímo z čistírenského kalu je založeno na kyselé extrakci s následnou separací fosforečného produktu a těžkých kovů. Většina metod pro tento způsob recyklace fosforu je nyní ve fázi testování. Výtěžnost fosforu může dosáhnout až 90 %, nicméně vysoký obsah vody a organické složky v kalu celý proces značně komplikují. Třetí variantou recyklace fosforu je jeho získávání z popelu po termickém zpracování kalu. Touto metodou lze zpětně vytěžit až přes 90 % fosforu, redukovat objem zpracovávaného materiálu až o 90 % a jeho hmotnost snížit až na polovinu (Šyc et al., 2015). Následující podkapitola se bude věnovat právě možnostem a postupům získávání fosforu z popela.

Obrázek 12: Porovnání doporučených technologií pro získávání fosforu z čistírenských kalů (Kos, 2016)

	mokrý proces srážení fosforu	separace fosforu z termického zpracování kalů (z popela)	termochemická transformace (pyrolýza, produkce biocharu)
výhody	<ul style="list-style-type: none"> • nákladově středně náročné • přijatelné z hlediska vybavení • vysoká agrochemická dostupnost fosforu • provozně ověřené • zlepšení odvodňovacích vlastností vyhnílého kalu 	<ul style="list-style-type: none"> • vysoký stupeň zachycení fosforu • simultánní využití materiálu a energie kalu • vhodné pro všechny typy kalů • všechny organické polutanty jsou inaktivovány • podstatně nižší objemy odpadů 	<ul style="list-style-type: none"> • vysoký stupeň zachycení fosforu • simultánní využití materiálu a energie kalu • všechny organické polutanty jsou inaktivovány • významné další agrochemické vlastnosti (porozita, vázání vody) • vhodné i pro malé kapacity • minimální produkce odpadů
nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> • pouze cca 40–60 % zachycení fosforu • potřeba chemikálií • obtížná separovatelnost sraženiny • dodatečné zatížení biologie • kompatibilní pouze s procesy biologického odstraňování fosforu • vhodné jen pro velké kapacity 	<ul style="list-style-type: none"> • vysoké investiční náklady • vyšší provozní náklady • využití pro převážně sušené kaly • potřeba chemikálií • potřeba dotažení provozní aplikace, vývoj • vysoká emisní zátěž ovzduší 	<ul style="list-style-type: none"> • střední investiční náklady • využití pro sušené kaly • provozně neutrální proces při využití tepelné energie • potřeba dotažení provozní aplikace, vývoj

5.1 Možnosti získávání fosforu z popela čistírenských kalů

Fosfor se při spalování chová velmi stabilně a i při teplotě 1 000 °C ho většina zůstává v popelu. Aby bylo možné recyklovat fosfor z popelu, je nezbytné kaly monospalovat, tedy nepřidávat do procesu spalování žádná jiná paliva. Na území České republiky se v dnešní době žádné zařízení pro monospalování kalů nenachází (Šyc et al., 2015).

Popel získaný spalováním čistírenských kalů obsahuje srovnatelné množství P_2O_5 jako fosfátová ruda (až 25 hm. %). Fosfor vázaný v popelu se zde vyskytuje především ve formě whitlockitu ($Ca_3(PO_4)_2$) a fosforečnanu hlinitého či železitého (dle typu použitého koagulantu) (Adam, 2005; Steen, 1998). Termickým využitím čistírenských kalů je dosaženo odstranění organických reziduí, nicméně popel stále obsahuje velké množství těžkých kovů, které jeho přímému využití brání. Klíčovou roli teda sehraje až sekundární úprava popelu, kterou se zajistí oddělení fosforu a těžkých kovů (Šyc

et al., 2015). Obecně vedou procesy získávání fosforu z popelu po monospalování čistírenských kalů (SSA - sewage sludge ash) k inertizaci organických polutantů, oddělení těžkých kovů od fosforu, převedení fosforu do bio-dostupné formy s možným využitím jako hnojiva a převedení fosforu do formy, která je vhodná pro zpracování ve fosforovém průmyslu (Šyc et al., 2016).

Existují dva hlavní přístupy k získání fosforu z popelu po monospalování čistírenských kalů: hydrometalurgickými procesy (kyselou extrakcí) nebo pyrometalurgickou cestou (termickou či termochemickou úpravou) (Šyc et al., 2016).

5.1.1 Hydrometalurgické procesy získávání fosforu

Hydrometalurgické procesy obecně pracují na principu kyselého loužení. Prvním krokem pro získání fosforu z popelu je jeho téměř úplné rozpuštění při hodnotách $\text{pH} < 2$. V roztoku se současně rozpouští i těžké kovy, které se musí následně separovat. To je náročné nejen technologicky, ale i vysokou spotřebou chemikálií a energií. Kromě těžkých kovů je potřeba odstranit i ostatní kovy, jako jsou hliník a železo, které by mohly snížit kvalitu produktu. K odstranění těchto nežádoucích složek se využívají metody postupného srážení (Takahashi et al., 2001), sulfidického srážení (Franz, 2008; Pinnekamp et al., 2010; Schaum, 2007), iontové výměny (Donatello et al., 2010), nanofiltrace (Niewerscha et al., 2009) a podobně.

Fosfor se z popelu získává pomocí kyseliny sírové (H_2SO_4) nebo kyseliny chlorovodíkové (HCl). Loužením kyselinou sírovou se při $\text{pH} < 1,5$ uvolňuje až 99 % celkového fosforu společně s podílem těžkých kovů. Množství kovů rozpouštěných spolu s fosforem se odvíjí podle typu činidla používaného ke srážení fosforečnanů z odpadních vod, složení popela a použité kyseliny. Běžný popel z čistírenských kalů obsahuje fosforečnany vápníku, hliníku a železa. Fosforečnan vápenatý a hlinitý se v kyselém prostředí rozpouští velmi dobře, fosforečnan železitý se rozpouští o něco méně (Schaum et al., 2005).

TetraPhos

Proces TetraPhos® je vyvíjen od roku 2013 firmou Remondis. V současnosti je ve fázi laboratorního vývoje. Pracuje na principu rozpouštění popelu v kyselině fosforečné

a sírové. Kyselina fosforečná je obohacena fosforem obsaženým v popelu a následně je zpracováván v různých stupních. Vznikne několik finálních produktů včetně kyseliny fosforečné, která se dále využívá pro výrobu fosfátů, sádrovce v oboru stavebnictví nebo železitých a hlinitých solí, které mohou být využity na čistírnách odpadních vod jako srážecí činidla. První zkušební jednotka fungující na principu TetraPhos je postavena v německém Hamburku a zpracovává 20 000 - 25 000 tun popelu (Šyc et al., 2016; REMONDIS, ©2020).

P-bac proces

Proces P-bac je v současnosti laboratorně testován. Vyvíjen je firmou Fritzmeier Umwelttechnik a Institute of Hygiene and Environmental Medicine RWTH Aachen. P-bac metoda je založena na principu bio-loužení pomocí bakterie *Acidithiobacillus* za současného působení nízkých teplot a tlaku. Zmíněná bakterie dokáže zoxidovat kovové sulfidy za současné produkce kyseliny sírové, ve které se následně rozpouští jak fosforečnany obsažené v popelu, tak i těžké kovy. Složky v pevném skupenství, které se nerozpustily, jsou posléze odděleny. V dalším kroku je opět nutné oddělit fosforečnany od těžkých kovů. Tento proces dokáže recyklovat až 90 % fosforu. Produkt na výstupu obsahuje 30 - 45 % kyseliny fosforečné a neobsahuje žádné patogenní organismy (Šyc et al., 2016).

RecoPhos

Metoda Recophos je založena na principu loužení popela po spalování čistírenských kalů kyselinou fosforečnou za vzniku dihydrogenfosforečnanu hořečnatého a vápenatého, které jsou hlavními vyživujícími složkami v produkovaném hnojivu RecoPhos P 38. Všechny hodnoty rizikových prvků obsažených v RecoPhos P 38 jsou v normě s německou vyhláškou o hnojivech (Weigand et al., 2013).

LeachPhos

Proces LeachPhos byl vyvinut společností BSH Umweltservice GmbH. Funguje na principu kyselé extrakce a následném srážení fosforečnanu. LeachPhos proces se dá přirovnat k procesu FLUWA, který je založen na úpravě popílku ze spaloven komunálního odpadu za účelem recyklace těžkých kovů. Zkušební provoz byl prováděn na vyřazeném zařízení právě pro FLUWA proces v Bernu. Popel pocházel ze zařízení pro monospalování kalu v Zurichu. Při pilotní zkoušce, která probíhala

několik měsíců, bylo zpracováno asi 400 kg popelu za hodinu a zpětně získáno zhruba 80 hm. % (Šyc et al., 2016).

Na začátku procesu je popel loužen ve zředěné kyselině sírové v promíchávaném reaktoru po dobu 30 - 120 minut. Díky úpravě koncentrace kyseliny a poměru pevné a kapalné fáze je regulováno množství rozpuštěného fosforu a kovů. To ovlivňuje následné převedení fosforu z popelu do výluhu, kdy množství fosforu se pohybuje mezi 70 - 90 %. Následuje separace nerozpuštěného popelu na pásovém vakuovém filtru nebo ve filtračním lisu. Filtrační koláč je určen k likvidaci. Výluh bohatý na fosfor je pak veden do druhého reaktoru, který je také promícháván, a zde dochází k vysrážení rozpuštěného fosforu pomocí vápna (CaO), které je preferováno z hlediska nižší ceny, nebo hydroxidu sodného (NaOH). Díky zvýšenému pH (pH~6) je zajištěna vysoká účinnost srážení fosforu, ale zároveň i srážení rozpuštěných těžkých kovů. Výsledný produkt obsahuje fosforečnany v různých minerálních fázích. Při použití vápna se fosfor v produktu vyskytuje nejčastěji formou fosforečnanu vápenatého a hlinitého. Posledním krokem je úprava zbylého kapalného odpadu ve třetím reaktoru. Tam je dávkováno vápno do hodnoty pH = 9 a následně dochází k sulfidickému vysrážení kovů. Oddělení pevné fáze od kapalné probíhá na kalolisu, kde je odpadní voda zbavena většiny kovů a po úpravě na neutrální pH je vypouštěna na ČOV nebo do kanalizace (Šyc et al., 2016).

5.1.2 Pyrometalurgické procesy získávání fosforu

Pyrometalurgické procesy jsou založeny na sekundárním zpracování popela za působení vysokých teplot, obvykle přesahujících 1 000 °C. Při takových teplotách dochází k separaci fosforu od těžkých kovů díky rozdílné těkavosti látek (Šyc et al., 2016).

Obecně rozlišujeme dva termické přístupy pro získání fosforu pyrometalurgickou cestou. Liší se teplotou v zařízení zpracovávající popel, která je buď pod teplotou tavení popela, nebo naopak nad teplotou tavení popela (Hermann, 2009). Teplota tavení popelu z čistírenských kalů závisí na složení popelu. Obvykle se pohybuje v rozmezí 1 150 - 1 250 °C (Schaum et al., 2007; Schipper et al., 2001). U obou metod pyrometalurgického zpracování popelu dochází k odpaření těkavých kovů (Cd, Hg, Pb, Zn) z popelu. Je-li pracovní teplota pod teplotou tavení popelu,

méně těkavé kovy jako Fe, Cu, Cr nebo Ni se koncentrují v popelu spolu s fosforem. Zástupcem této metody je proces zvaný Outotec / ASH DEC. Dosahuje-li teplota v zařízení vyšší teploty než je bod tavení popela, méně těkavé kovy přejdou do formy kovové taveniny, zatímco fosfor je koncentrován do pevné minerální fosforečné strusky. Tato metoda je zastoupena procesy Mephrec, RecoPhos a Kubota, které pracují při teplotách 1 300 - 2 000 °C (Šyc et al., 2016).

Z hlediska dosahované destrukce toxických organických látek (včetně perzistentních organických polutantů aj.), objemové a hmotnostní redukci materiálu, jsou pyrometalurgické procesy velmi výhodné. Jejich realizace je však technologicky i energeticky velmi náročná, což vede i k vysokým provozním nákladům. Oproti metodám hydrometalurgickým mají termické procesy výhodu v možnosti zpracovávat většinu druhů popelů z čistírenských kalů. Aby však byly získány ekonomicky zajímavé alternativy běžných hnojiv, musí být celý proces provozován ve větších měřítcích (Petzet et Cornel, 2013; Rapf et al., 2012).

Outotec / ASH DEC proces

Proces Outotec je založen na volatilizaci snadno těkavých těžkých kovů při vysokých teplotách za přídavku chloračního činidla. Chlorační činidlo se mísí s popelem a následně je materiál ve formě granulí či pelet zahříván v rotační peci na vysokou teplotu (1 000 - 1 100 °C), při níž vznikají chloridy těžkých kovů. Teplota by neměla přesáhnout 1 100 °C, neboť může docházet ke spékání materiálu, čímž by se snížila účinnost celého procesu (Boutoussov, 2009). Do procesu je možné přidávat plniva jako např. mleté uhlí, oxid hlinitý nebo jemný dřevní odpad, což ovlivňuje konečné složení produktu. Touto metodou je možné dosáhnout odstranění až 90 % pro Cd, Cu, Pb a Zn a více než 70 % pro Mo a Sn. Pro nikl a chrom je metoda neúčinná. Proces dokázal zvýšit bio-dostupnost fosforu v popelu pro kyselější až neutrální typy půd z původních 30 - 50 % až na 100 %. Je tomu tak zejména z důvodu přeměny fosforečnanu hlinitého a vápenatého na chlorapatit (Adam, 2009).

Finálním produktem je hnojivo ve formě pelet nebo granulí o velikosti 2 - 5 mm, pórovitostí 20 - 40 % a obsahem P₂O₅ nad 10 %. Laboratorní testy prokázaly, že až 67 % fosforu obsaženého v peletách se rozpouští v citrátech a více než 25 % celkového obsahu fosforu se rozpouští ve vodě (Adam, 2009; Šyc et al., 2016).

Mephrec® proces

Tento proces je založený na tavení a zplyňování vysušených čistírenských kalů nebo popela za teplot vyšších než 1 450 °C (nejteplejší části reaktoru dosahují teplot až 2 000 °C) v redukčních podmínkách šachtové pece za přídavku aditiv jako jsou koks, vápenec nebo dolomit. Za zmíněných podmínek dochází u vysoce těkavých kovů (Cd, Pb, Zn) k přechodu do plynné fáze. Méně těkavé kovy (Fe, Cu, Cr, Ni) jsou odváděny diskontinuálně v metalické formě do taveniny. Fosfor je následně získáván ve formě minerální strusky, která je oddělována od taveniny za teploty 1 450 °C a následně vedena sifonem do vodní nádrže. Výsledným produktem je struska s obsahem fosforu 5 - 10 % rozpustná v neutrálním citronanu amonném. Vystavení materiálu takto vysoké teplotě a jeho následné prudké ochlazení na pokojovou teplotu však může zvýšit rozpustnost až na 80 %. Dle požadované kvality hnojiva se získaná struska granuluje s přídavkem jiných nutričních látek. Kovová tavenina se může dále zpracovávat pro získání kovů. Prach obsahující těžké kovy je vrácen zpět do reaktoru nebo likvidován. Z ekonomického hlediska by měl mít provoz v reálných podmínkách kapacitu minimálně 40 000 tun za rok (Šyc et al., 2016).

RecoPhos

Proces RecoPhos je založen na principu tavení popela v peci s indukčním ohřevem za teploty vyšší než 1 300 °C při redukčních podmínkách. Méně těkavé kovy jsou redukovány do metalické podoby a odváděny ve formě taveniny. Snadno těkavé kovy volatilizují spolu s fosforem. Proto není tento proces vhodný pro popel z čistírenských kalů obsahující vyšší koncentraci těžkých kovů s nízkou teplotou varu. Vzniklý reaktorový plyn, který tvoří oxid uhelnatý a fosfor, se následně spaluje v komoře, přičemž dochází ke vzniku oxidu fosforečného a uhličitého. Produkty spalování jsou udržovány v plynném skupenství až do vstupu do vodní pračky, tam vzniká kyselina fosforečná jako hlavní produkt procesu (Rapf et al., 2012).

Problém tohoto procesu spočívá v silné afinitě fosforu k železu. V současnosti se experimenty zaměřují právě na izolování elementárního fosforu od železa, aby tak nedocházelo k jeho ztrátám, a aby nebyl obsah fosforu ve strusce příliš vysoký, to by mohlo způsobovat problémy při výrobě cementu (Šyc et al., 2016).

Kubota proces

Technologie KSMF (Surface Melting Furnace) vyvíjená společností Kubota má sloužit pro zpracování různých druhů odpadů a mimo to i k získávání fosforu z popelu čistírenských kalů. Tento proces umožňuje ze vstupní suroviny separovat fosforečnou strusku od těžkých kovů. Výsledným produktem je struska s obsahem fosforu více než 80 %. Těžké kovy volatilizují a koncentrují se v popílku. Zdrojem energie pro dosažení a udržení vysokých teplot v peci jsou spalitelné odpady jako čistírenský kal, odpadní plasty a jiné. V současnosti není v provozu žádné zařízení, které by touto cestou fosfor získávalo. Nicméně společnost KUBOTA prezentuje právě získávání fosforu z popelu čistírenských kalů jako svůj hlavní cíl do budoucna (Šyc et al., 2016).

6 ZPŘEHLEDNĚNÍ STÁVAJÍCÍ LEGISLATIVY V OBLASTI NAKLÁDÁNÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY

V této kapitole budou představeny některé z nejdůležitějších legislativních dokumentů upravující problematiku čistírenských kalů jak v Evropské unii, tak v České republice.

6.1 Legislativa v České republice

Čistírenské kaly jsou v České republice předmětem množství legislativních dokumentů. Kaly jsou v nich řešeny nejen pouze z materiálového hlediska, ale i z hlediska nakládání s nimi. Dále je na kal nahlíženo jako na odpad, což znamená, že se o něm dá uvažovat hned v několika dalších rovinách. Mezi ně se dá zařadit kal jako biologicky rozložitelný odpad, nebezpečný odpad, nebo například hnojivo. Také ukládá povinnosti jeho původcům, tedy například provozovatelům čistíren odpadních vod. Na následujících řádcích jsou vypsány nejzásadnější dokumenty pro oblast čistírenských kalů

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů

Zákon o odpadech je jedním z nejdůležitějších dokumentů v oblasti nakládání s kaly. Dle § 25 odst. 1 písm. d) je v něm kal definován jako odpad, tedy ukládá původcům povinnosti při nakládání s ním. Dále je v tomto zákoně kalům věnován § 32,

který zahrnuje kaly pod biologicky rozložitelné odpady. Následující § 33 upravuje povinnosti související s úpravou kalů provozovatelům čistíren odpadních vod a následně povinnosti právnických a fyzických osob při používání kalů. V zákoně o odpadech jsou také uvedeny informace o plánech odpadového hospodářství, ekonomických nástrojích, přestupcích, či přeshraničním transportu odpadu.

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

Tato vyhláška je zaměřena na žádosti k provozu zařízení k využívání, odstraňování, sběru nebo výkupu odpadů a na nakládání s nebezpečnými odpady. Dále jsou zde uvedeny technické požadavky na zařízení a seznam odpadů. V § 22 jsou uvedeny povinnosti k ohlašování evidence odpadů pro původce odpadů, mezi nimi i pro provozovatele čistíren odpadních vod a zařízení na úpravu kalů. Součástí vyhlášky jsou také informace k dopravě odpadů, jejich shromažďování, sběru, přepravě a odstraňování.

Vyhlášku č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu je třeba zmínit zejména kvůli problematice skládkování kalů, které má Česká republika v současné době tendenci potlačovat zejména i díky odpadové politice EU. V příloze č. 5 k této vyhlášce je uveden seznam odpadů, které je zakázáno ukládat na skládky a používat jako technologický materiál na povrchu terénu.

Vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě

Ve vyhlášce č. 437/2016 Sb., jsou vymezeny základní definice týkající se používání upravených kalů na zemědělské půdě, obsahuje požadavky na ověření účinnosti technologií na úpravu kalů, dále stanovuje mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v půdě a v kalech, popisuje postupy pro analýzu a monitoring kalů a také určuje podmínky pro skladování kalů.

V ČR byla tato vyhláška novelizována. Byla zpracována v důsledku změn novely zákona o odpadech, požadavků MŽP, ČIŽP, zemědělců i producentů ČOV. Vyhláška stanovuje nové povinnosti pro provozovatele ČOV a zařízení na úpravu kalů. Dále specifikuje nové podmínky pro skladování kalů v zařízení i upravených kalů u zemědělce. Dalším z cílů je stanovení jednoznačných požadavků pro provozovatele zařízení na zpracování kalů tak, aby bylo prokazatelné, že používaná technologie

úpravy je schopna splnit přísné mikrobiologické limity, které začnou platit od roku 2020 (Matějů et al., 2019).

6.2 Legislativa Evropské unie

Legislativa Evropské unie je v oblasti používání čistírenských kalů zásadní zejména z důvodu rozdílných předpisů jednotlivých členských států, což může ovlivňovat fungování společného trhu. Proto je nutné podporovat sblížení právních předpisů v této oblasti. Tato slova vychází ze směrnice Rady 86/278/EHS ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství. Jejím cílem je regulace používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství tak, aby bylo zabráněno škodlivým účinkům na půdy, rostlinstvo, zvířectvo a člověka. Také má podpořit správné používání kalů z čistíren odpadních vod. V článku 2 jsou definovány důležité pojmy z oblasti kalového hospodářství. Součástí směrnice jsou přílohy obsahující mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů v půdě a v kalech používaných v zemědělství, pravidla pro rozbor kalů a půdy, či metody odběru vzorků a jejich rozboru.

Směrnice Rady 91/271/EHS ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod

Jedním z mnoha důvodů pro vznik této směrnice byla potřeba zavést opatření na úrovni Společenství, neboť vlivem nedostatečně vyčištěných odpadních vod v jednom členském státě docházelo k ovlivnění znečištění vod v jiných členských státech. Problematika kalů se mimo jiné také podílela na impusech ke vzniku této směrnice. Jedním z nich byla nezbytná podpora recyklace kalů vznikajících při čištění odpadních vod a zamezení vypouštění kalů do vod povrchových. Dalším bodem bylo například zajištění informovanosti veřejnosti ohledně zneškodňování odpadních vod a kalů, a to formou podávání pravidelných zpráv.

Cílem směrnice je ochrana životního prostředí před nepříznivými účinky odvádění, čištění a vypouštění městských odpadních vod a vod z určitých průmyslových odvětví. Dosahuje ho za pomoci stanovených podmínek zejména v oblasti stokování a jejich zavedením do praxe. Přílohou směrnice jsou požadavky na městské odpadní vody, kritéria pro vymezení citlivých a méně citlivých oblastí a seznam průmyslových odvětví vybraných pro účely této směrnice.

Směrnice Rady 91/676/EHS ze dne 12. prosince o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů

Tato směrnice, známá také jako nitrátová směrnice, má za cíl snížit znečištění vod způsobené dusičnany ze zemědělských zdrojů a předcházet dalšímu znečišťování tohoto typu. Kalové problematiky se tato směrnice dotýká v článku 2, který, kromě jiných pojmů, definuje „hnojivo“ jako jakoukoliv látku obsahující jednu nebo více dusíkatých složek, jež je používána v půdě k podpoře růstu rostlin, konkrétně může zahrnovat i statkové hnojivo, odpad z chovu ryb, nebo právě čistírenský kal.

7 METODIKA

Na základě prostudování množství odborných článků týkající se problematiky čistírenských kalů byla sepsána literární rešerše zabývající se popisem technologie čištění odpadních vod na biologicko-mechanických čistírnách, které je neodlučitelně spjata s kalovým hospodářstvím. Obsahem literární rešerše je obecná charakteristika čistírenských kalů, jejich vlastností, ale i způsoby nakládání s nimi, či možnosti jejich následného využití. Dále byly prostudovány a vypsány nejdůležitější evropské a české legislativní předpisy týkající se čistírenských kalů.

Praktická část byla zahájena návštěvou biologicko-mechanické čistírny odpadních vod Karlovy Vary - Drahovice s odborným výkladem technického náměstka Ing. Frčka. Na čistírně byly pořízeny fotografie jednotlivých částí technologické linky ČOV, které byly následně v práci i popsány. Součástí je i popis nízkoteplotní pásové sušárny kalů, která je v současnosti jedinou fungující nízkoteplotní pásovou sušárnou kalů v České republice.

Na základě prostudované literatury a zjištění současného stavu technologické linky čistírny, bylo vybráno nejvhodnější zařízení pro následné zpracování usušeného kalu termickou metodou, které umožní zpětné získávání fosforu z takto zpracovaného usušeného kalu. Metoda následného zpracování usušených kalů je popsána teoreticky a schematicky.

8 POPIS TECHNOLOGICKÉ LINKY ČOV KARLOVY VARY - DRAHOVICE

Čistírna odpadních vod Karlovy Vary – Drahovice byla dostavěna v roce 1967 a od té doby prošla třemi rekonstrukcemi, které vedly k jejímu rozšíření a modernizaci. Jedná se o největší čistírnu provozovanou na území spravovaném akciovou společností Vodárny a kanalizace Karlovy Vary (Vodakva). Technologie čistírny je mechanicko-biologická s biologickým odstraňováním dusíku a chemickým srážením fosforu. Projektovaná kapacita čistírny je 80 000 ekvivalentních obyvatel a v současné době je na ni napojeno zhruba 60 000 obyvatel z Karlových Varů a okolních obcí a také množství průmyslových podniků. Průměrný denní přítok na čistírnu se pohybuje okolo 24 000 m³ odpadní vody. Vyčištěná voda je vypouštěna do řeky Ohře. V současnosti je provoz čistírny plně automatizován (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

8.1 Popis technologie čištění

Čištění odpadních vod je technologicky rozděleno na tři části – mechanickou, biologickou a kalové hospodářství. V první – mechanické části dochází k odstranění nerozpuštěných látek, hrubých nečistot, písku, usaditelných a plovoucích látek. V navazující biologické části je z vody odbouráváno rozpuštěné organické znečištění a odstraňovány jsou i sloučeniny dusíku a fosforu. V poslední části – kalovém hospodářství – se pak zpracovává odpad vzniklý v čistícím procesu (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

8.1.1 Mechanické čištění

Mechanické čištění odpadní vody je prvním krokem v celém procesu čištění. Dochází k odstranění nerozpuštěných látek, které by, mimo jiné, mohly v dalších částech čistírny způsobovat poškození jednotlivých strojních zařízení. Do této části patří odlehčovací komora (ke které náleží i dešťová zdrž), česlovna s pračkou a lisem na shrabky, lapák písku a dvě usazovací nádrže.

Odlehčovací komora

Odpadní voda je na čistírnu přiváděna gravitačně z centrální kmenové stoky, do které jsou napojeny kanalizační stoky. Prvním objektem čistírny je odlehčovací komora. Ta plní funkci ochrannou, a to zejména v případě intenzivních dešťů, kdy by mohlo hrozit zatopení a poškození technologie čistírny. Součástí odlehčovací komory je přepad, přes jehož hranu voda přepadá zpět přímo do recipientu v případě nadměrného přítoku při velmi intenzivních deštích. Vzhledem k velkému naředění přiváděné odpadní vody vodou dešťovou nehrozí znečištění vody v řece. Navíc jsou za přepadem umístěny hrubé česle, které největší nečistoty bezpečně zachytí. Část nadměrně přitékající odpadní vody se zachytí v dešťové zdrži a do čistícího procesu je přivedena později (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 13: Odlehčovací komora s přepadem



Obrázek 14: Dešťová zdrž zadržující nadměrný přítok v případě velmi intenzivních dešťů



Česlovna

Z odlehčovací komory je voda přiváděna gravitačně potrubím do česlovny, ve které jsou umístěny dvoje jemné česle. Ty slouží k zachycení plovoucích nečistot, nejčastěji se jedná o hadry, plasty, papír či zbytky jídla. Zachycené shrabky jsou dále přivedeny do vodní pračky a propíracího lisu. Zde dochází ke zmírnění charakteristického zápachu a také snížení jejich objemu. Následně se shrabky vyváží na skládku (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 15: Propírací lis shrabků



Lapák písku

Další částí mechanického čištění odpadních vod je lapák písku. Jedná se o nádrž, na jejímž dně se usazují drobné nečistoty písčitého a štěrkovitého charakteru, které by mohly v dalším procesu čištění způsobit poškození strojních zařízení čistírny. Usazený písek se v určených intervalech těží ze dna a odváží na skládku (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 16: Lapák písku



Usazovací nádrže

Do posledního stupně mechanického čištění je oproti předchozím částem již nutno vodu přečerpávat. O to se starají dvě čerpací jímky – splašková a povodňová. Ty čerpají vodu do dvou usazovacích nádrží, ve kterých se od vody oddělují další nerozpuštěné látky. Těžší látky se usazují na dně nádrže a jsou shrabovány do kalových jímek. Lehké látky, zejména tuky, zůstávají plout na hladině, odkud jsou stírány pomocí shrabovacích mostů. Mechanicky předčištěná voda dále přepadá do odtokového žlabu, odkud je potrubím vedena do biologické části čistírny (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 17: Poslední stupeň mechanického čištění - usazovací nádrže



8.1.2 Biologické čištění

Proces biologického čištění hraje klíčovou roli v celém procesu čištění odpadních vod. Na vstupu do tohoto stupně čištění je sice voda zbavená nerozpuštěných nečistot, zůstává v ní však velké množství rozpuštěného znečištění, jako např. uhlikaté a dusíkaté látky nebo sloučeniny fosforu. Tyto látky je potřeba z vody odstranit. Odstranění organického znečištění je dosaženo pomocí směsi mikroorganismů, nazývané též jako „aktivovaný kal“. Jedná se o směs bakterií, hub, kvasinek, sinic či prvoků. Nutno podotknout, že složení aktivovaného kalu se různí dle typu znečištění odpadní vody. Mikroorganismy využívají organické znečištění jako zdroj energie, čímž dochází k přirozenému odbourání znečištění z vody v metabolismu těchto organismů (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Na konci aktivačního procesu se část aktivovaného kalu oddělí a vrací se zpět na začátek. Odstraňování organického znečištění pomocí aktivovaného kalu je založeno na stejném principu, jako samočistící procesy v řekách. Je však dosaženo většího efektu čištění díky řízení celého procesu a usnadnění existenčních podmínek pro mikroorganismy (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Biologická část čištění odpadních vod probíhá ve dvou aktivačních nádržích a dále v šesti dosazovacích nádržích.

Aktivační nádrže

Před nátokem odpadní vody do první aktivační nádrže se voda smíchá s vratným kalem z dosazovacích nádrží (z konce celého čistícího procesu) a také s částí aktivovaného kalu z druhé (nitrifikační) nádrže. Tím dojde ke zlepšení podmínek pro existenci mikroorganismů a zvýšení účinnosti čištění.

V první z aktivačních nádrží zvané také „denitrifikační“ dochází za anaerobních podmínek k odstranění především dusíkatého znečištění. Mikroorganismy získávají potřebný kyslík rozkladem dusíkatých látek, zbylý dusík následně uniká v neškodné plynné formě do ovzduší. Během celého procesu je nádrž promíchávána ponornými míchadly, které zaručují homogenizaci směsi odpadní vody a aktivovaného kalu (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 18: Denitrifikační nádrž - první ze dvou aktivačních nádrží



Ve druhé aktivační nádrži je odstraňováno zejména uhlíkaté znečištění. Tato nádrž je na rozdíl od první nádrže intenzivně provzdušňována, čímž je do vody dodáván kyslík potřebný k životu mikroorganismů a zároveň je celá směs udržována ve vznosu.

Jako zdroj energie využívají mikroorganismy také fosforečnany obsažené ve vodě, ovšem pouze částečně, a tak se pro úplné odstranění fosforu z odpadní vody musí ještě před odtokem z druhé aktivační nádrže do dosazovacích nádrží dávkovat do vody chemikálie, které rozpuštěný fosfor vysráží do vloček (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 19: Provdzušňovaná nitrifikační nádrž



Dosazovací nádrže

Posledním článkem v procesu čištění odpadních vod je soustava šesti kruhových nádrží, zvaných dosazovacích. V těchto nádržích dochází k oddělení vyčištěné odpadní vody od aktivovaného kalu z předešlého kroku čištění. Kal postupně sedimentuje na dně nádrže, lehčí složky naopak stoupají k hladině. Dno i hladinu nádrží mechanicky stírá strojní zařízení. Část usazeného kalu se vrací na začátek biologického procesu čištění, tím se zajistí dostatečné množství mikroorganismů v systému. Zbylý kal, tzv. přebytečný, se odčerpává do kalové jámy a dále je zpracováván v kalovém hospodářství (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 20: Jedna z šesti dosazovacích nádrží



Vyčištěná voda následně odtéká z dosazovacích nádrží přepadem nebo děrovaným potrubím do otevřeného žlabu, který je sveden přímo do řeky Ohře (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 21: Vyčištěná voda na odtoku z procesu čištění



Tabulka 4: Průměrné výsledky čištění odpadních vod na ČOV Karlovy Vary - Drahovice za rok 2019 (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017)

	odtok	„p“	„m“
CHSK_{Cr}	39	70	100
BSK₅	5,3	15	30
N_{Lsuš}	4	20	30
N-NH₄⁺	0,6		
N_{anorg}	9,9		
N_{celk}	11	15*	30
P_{celk}	1	2*	6

odtok - průměrná hodnota odtoku z ČOV za kalendářní rok

„p“ - přípustné koncentrace za kalendářní rok, které mohou být překročeny v povolené míře podle hodnot uvedených v NV 23/2011 Sb. příloze č. 5

„m“ - maximální, nepřekročitelné koncentrace

* - uváděné hodnoty jsou aritmetické průměry koncentrací za kalendářní rok a nesmí být překročeny

CHSK_{Cr} – chemická spotřeba kyslíku

BSK₅ – biochemická spotřeba kyslíku

N_{Lsuš} – nerozpuštěné látky (sušené při 105°C)

N-NH₄⁺ – amoniakální dusík

N_{anorg} – suma anorganického dusíku (amoniakální, dusitanový a dusičnanový dusík)

N_{celk} – celkový dusík (suma všech forem dusíku, organického a anorganického)

P_{celk} – celkový fosfor

8.2 Kalové hospodářství

V čistícím procesu vzniká odpad – přebytečný kal z dosazovacích nádrží a kal z usazovacích nádrží. Kaly obsahují velké množství organických látek, patogenních organismů a snadno podléhají hnilobnému rozkladu. Další překážkou v nakládání s kaly je jejich tekutý stav, který znemožňuje jejich transport. Proto je nutné v rámci kalového hospodářství kaly odvodnit a snížit množství nebezpečných látek. Výhodou je energetický potenciál obsažený v jejich biomase, který se zde využívá ve formě bioplynu (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Prvním důležitým krokem ve zpracování kalů je jejich zahuštění. Přebytečný kal z dosazovacích nádrží je zahušťován ve flotační nádrži, nebo za použití odstředivky (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 22: Flotační nádrž sloužící k částečnému zahuštění přebytečného kalu



Částečně zahuštěný kal se následně čerpá spolu s kalem z usazovacích nádrží do dvou vyhnívacích nádrží. V první vyhnívací nádrži je kal zdržen po dobu 22 dní, ve druhé nádrži dalších 20 dní. Zde dochází k zahřívání kalu až na 40 °C za anaerobních podmínek, zároveň je kal promícháván. Tímto způsobem dochází k rozkladu organických látek a zároveň je tvořen bioplyn. Vzniklý bioplyn je jímán do plynojemu o objemu 2 500 m³, následně odváděn do kotelny a spalován v kogenerační jednotce. Vyrábí se z něj elektrická a tepelná energie využívaná v rámci areálu čistírny (např. k vytápění budov) (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Obrázek 23: Vyhnivací nádrže kulatého tvaru



Vyhnilé kaly se následně odvádí do homogenizační nádrže, ve kterých jsou promíchávány spolu s kaly, které sem sváží okolní menší čistírny odpadních vod. Promíchávání se děje za pomoci ponorného míchadla. Díky tomu vznikne homogenizovaná směs.

Dále jsou kaly vedeny do odvodňovací linky, která je tvořena třemi odstředivkami typu Andritz. Před odvodněním na odstředivkách je do kalu dávkován flokulant, který zajistí snadnější oddělení vody od kalu. Kal je odvodněn z původních 3 % na 23 - 27 % sušiny (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017). Takto odvodněný kal je možné dále zpracovávat na kompostárnách. Možnost jeho využití tímto způsobem však nemá v místních podmínkách velký potenciál.

Obrázek 24: Odvodněný kal z odstředivek (sušina se pohybuje kolem 25 %)



Kal odvodněný na zhruba 25 % sušiny se následně dopraví do dávkovacího sila, odkud je pomocí čerpadel vytlačován na pás sušárny ve formě špaget. Zde je kal sušen pomocí horkého vzduchu na granulát o obsahu až 90 % sušiny. Výsledný produkt je z čistírny vyvážen k dalšímu použití (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

8.2.1 Nízkoteplotní sušárna kalů

Vzhledem ke stále se zpřísňující legislativě v oblasti odpadového hospodářství bylo nutné hledat způsoby, jak snížit množství kalů, a naopak zvýšit možnosti jeho následného uplatnění. Na čistírně odpadních vod v Karlových Varech tak byla v roce 2016 instalována nízkoteplotní sušárna kalů, která se jevila jako nejvhodnější řešení. Jedná se o vůbec první takový projekt v České republice (Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017).

Moderní technologie sušení kalů umožňuje výrazné snížení celkového objemu i hmotnosti kalů a zároveň zaručuje jejich kvalitu a hygienickou nezávadnost. Svě uplatnění najde výsledný produkt ve stavebnictví, zemědělství nebo při výrobě energií (svou výhřevností se směle vyrovnají hnědému uhlí). Technologie nízkoteplotní sušení umožňuje vysušit kal až na 90 % sušiny a snížit hmotnost až na jednu čtvrtinu původní

hmotnosti kalu. Nízkoteplotní sušení se také vyznačuje bezpečným provozem, při němž nehrozí výbuch či zahoření (VSOZČ, ©2016).

Mezi největší výhody sušárny patří zejména:

- snížení objemu kalu až o 75 %,
- zvýšení sušiny z cca 23 % na 90 %,
- vytvoření produktu s většími možnostmi dalšího využití,
- hygienizace kalu,
- bezpečný provoz.

Příprava a realizace projektu

Příprava projektu probíhala ve dvou etapách. V první etapě byly stanoveny požadavky na sušárnu s ohledem na technologii a podmínky stávající karlovarské čistírny. Jako nejvhodnější dodavatel byla zvolena španělská firma STC Aquatec. Ve druhé etapě byl připraven projekt pro stavební a technologické úpravy zajišťující napojení sušárny na stávající technologii čistírny. Zároveň byl připraven projekt pro výstavbu nové haly, ve které je v současné době sušárna umístěna. Součástí projektu bylo i dobudování třetí odstředivky, díky které byla navýšena kapacita odvodňovací linky. Realizace projektu byla zahájena v červnu 2015 a do zkušebního provozu byla sušárna uvedena o rok později v červnu 2016. Celá výstavba a napojení technologií probíhaly bez omezení provozu ČOV. Celkové náklady projektu, včetně rozšíření odvodňovací linky, dosáhly 60 milionů Kč (VSOZČ, ©2016).

Dispozice sušárny je navržena s ohledem na možné rozšíření technologie o další fázi zpracování kalu, konkrétně spalování usušeného kalu v místě (Vodohospodářský podnik a.s., ©2004-2019).

Tabulka 5: Vybrané projektové parametry sušárny kalu (Frček, 2019)

projektový parametr	rozměr	zadání projektu
typ zařízení	-	nízkoteplotní pásová sušárna kalu
princip ohřevu	-	teplovodní
rozšiřitelnost	-	ano
peletizace vstupního kalu	-	ano
rozměry	m	max. 16,0 x 5,0 x 6,8 (L x W x H)
výkon zařízení	t/rok	min. 6 000
	kg/h	min. 750
odpařovací kapacita	kg/h	min. 558
provozní doba	hod/rok	min. 8000
- typ provozu	-	24 hodin nepřetržitý
- doba odstávky	den	max. 7
provozní venkovní teplota	°C	do -10
parametry kalu	-	stabilizovaný komunální kal po odvodnění
- vstup	%	sušina 22 - 23
- výstup	%	sušina min. 90
- forma výstupu	-	pelety, granule
- podíl prachových částic	%	max. 5 % pod 500 μm
- teplota výstupu	°C	max. 40
topný systém	kW	2x kotel á 470 kW, kaskádní výkon 2x 300/470 kW
- vstupní topná voda	°C	min. 85, max. 92
- gradient teploty na sušárně	°C	max. 10
chladicí voda	m ³ /hod	max. 60
- teplota vody	°C	max. 20
- tlak vody	bar	max. 6
tlakový vzduch	l/min	max. 400
- tlak vzduchu	bar	max. 8
- sušení	-	ano
procesní vzduch - sušárna	m ³ /hod	dle dodavatele
- ostatní odsávání prostorů	m ³ /hod	1 000
- vstupní teplota	°C	-10 až +32
- výstupní teplota	°C	max. 40
- výstupní kvalita vzduchu	ou _E /m ³	max. 2 000
specifická potřeba - teplo	kWh/kg H ₂ O	max. 0,90
- el. energie	kWh/kg H ₂ O	max. 0,14

Popis sušárny kalů

Sušárna je tvořena:

- samotnou konstrukcí sušičky,
- kalovým silem na odvodněné kaly o objemu 30 m³,
- šnekovým dopravníkem,
- vodní a kyselinovou pračkou vzduchu,
- biofiltrem,
- kontejnery na vysušený kal ve formě granulátu.

Těleso sušičky je složeno ze tří uzavřených, tepelně izolovaných modulů: řídicího modulu, hlavního modulu (obsahujícího pět sušících komor) a návratového modulu. V jednotlivých modulech je udržován podtlak odsáváním části vzduchu, což zaručuje, že nedojde k úniku zápachu. Provoz všech zařízení sušárny je plně automatizován (VSOZČ, ©2016).

Obrázek 25: Těleso nízkoteplotní pásové sušárny



Princip sušení kalů

Sušení kalů probíhá na dvou posuvných pásech, které jsou v tělese sušičky umístěny nad sebou. V řídicím modulu dojde k vytlačení odvodněného kalu z odstředivek přes extrudér na horní pás. V extrudéru získá odvodněný kal špagetový tvar. Dále je kal posouván do hlavního modulu, kde dochází k procesu sušení. Hlavní modul je složený z pěti sušících komor a na jeho konci je přiřazen modul návratový. V tomto místě dojde k přesypání kalu z horního pásu na pás dolní, na kterém je kal přesouván zpět přes jednotlivé sušící komory k řídicímu modulu a dochází k jeho finálnímu usušení. Vysušený kal je následně odebírán ze spodní části řídicího modulu vodou chlazeným šnekovým dopravníkem, který přemístí výsledný produkt do kontejnerů. Ochlazením granulátu v dopravníku je také eliminováno riziko samovznícení. Usušený kal je v této formě následně expedován z čistírny k dalšímu použití (VSOZČ, ©2016). Produkované množství usušeného granulátu je v průměru 192 kg/hod s obsahem sušiny 90 % (Frček, 2019).

Sušení probíhá za teploty 80 °C. Vzduch ohříváný tepelnými výměníky je rozváděn do jednotlivých sušících komor. Ohřev vody pro výměníky je zajišťován dvěma plynovými kotli, které jako doplňkové palivo využívají bioplyn vzniklý při vyhnívání kalů. Bioplyn však nestačí pokrýt veškerou energetickou potřebu, proto je nutné zajišťovat dodávku zbylé energie zemním plynem. Při průchodu vzduchu komorami dochází k vypařování vody z kalu. Vzduch nasycený o tuto páru proudí směrem nahoru k výměníkům se studenou vodou, které převedou vzniklou páru zpět do kapalné fáze. Vzniklý kondenzát je gravitačně odváděn mimo těleso sušárny a dále zpracován v technologickém procesu ČOV. Vzduch, který je v procesu kontinuálně odsáván je následně smíchán s odsávaným vzduchem z prostoru odvodnění a přiveden do chemicko-kyselinové pračky, po které následuje dočištění ve vodní pračce a finálním krokem v čištění vzduchu je biofiltr, umístěný mimo budovu sušárny. Originální náplň biofiltru bylo kokosové vlákno, v současnosti je jako náplň využívána borová kůra, která dostatečně plní svou funkci v biofiltru a navíc je ve zdejších podmínkách dostupnější (VSOZČ, ©2016).

Obrázek 26: Kyselinová a vodní pračka vzduchu



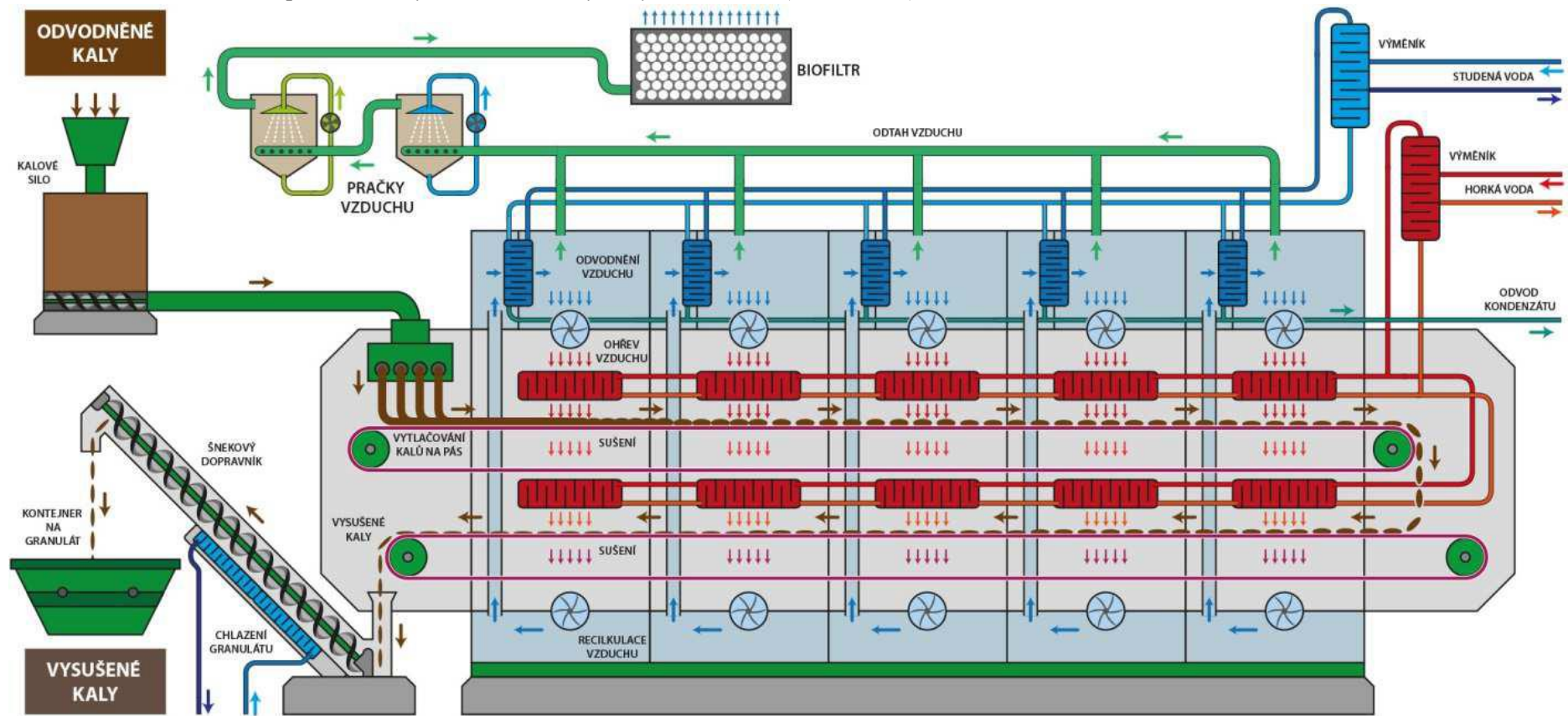
Obrázek 27: Biofiltr naplněný borovou kůrou.



Obrázek 28: Výsledný produkt - usušený kal ve formě granulátu



Obrázek 29: Schéma nízkoteplotní sušárny na ČOV Karlovy Vary - Drahovice (Frček, 2019)



Výsledky zkušebního provozu

V průběhu zkušebního provozu byly analyzovány vzorky kalu. Průměrná **sušina kalu** na výstupu ze sušárny byla 91,4 %, což je o 1,4 % více, než bylo v požadavku projektové dokumentace. Minimální hodnota sušiny dosahovala 84,5 %, maximální potom 95,5 %. Rozboru podléhal také podíl jednotlivých frakcí, který potvrdil **podíl prachových částic** o velikosti menší než 500 μm pod 5 % obsahu. Dalším sledovaným parametrem byla **energetická náročnost**, která byla stále udržována pod maximální stanovenou hodnotou, jež byla stanovena pro tepelnou energii na 0,90 kWh/kg H₂O a pro elektrickou energii 0,14 kWh/kg H₂O. Byla provedena také kontrola **kvality čištěného vzduchu** za biofiltrem, jejíž výsledky dosahovaly pouhých 73 ou_E/m³ (ou_E = evropská pachová jednotka) oproti 2 000 ou_E/m³ uvedených v požadavcích projektu (Frček, 2017). **Kondenzát** vykazuje vysokou koncentraci amoniakálního dusíku. Při produkci kondenzátu 558 kg/hod a provozní době sušárny 8 000 hod/rok dosahuje hodnota amoniakálního dusíku 1,3 t/rok (Frček, 2019). To ovšem vzhledem k produkci těchto vod, která se pohybuje do 0,558 m³/hod, nepředstavuje významnější zatížení pro čistírnu (Frček, 2017). Proces sušení má vynikající výsledky v **odstraňování mikropolutantů**. Jednotlivé hodnoty jejich obsahu v kalu na vstupu a výstupu ze sušárny jsou uvedeny níže v Tabulce 6. Následující Tabulka 7 obsahuje průměrné hodnoty palivo-energetických vlastností usušeného kalu.

Tabulka 6: Odstranění léčiv při sušení v porovnání se stabilizovaným kalem (Frček, 2019)

látka	použití	odvodněný kal	vysušený kal	odstranění [%]
Kofein	psychostimulant	83	8	90
Citalopram	antidepresivum	353	58	84
Metoprolol	β - blokátor	68	10	85
Oxazepam	anxiolytikum	6	0	100
Piroxikam	nesteroidní antirevmatikum	22	2	91
Tramadol	analgetikum	38	1	97
Trimethoprim	antibiotikum	11	0	100
Valsartan	antihypertenzivum	31	9	71
Zolpidem	hypnotikum	8	3	63

Tabulka 7: Průměrné palivo-energetické vlastnosti usušeného kalu (Frček, 2019)

vlastnost, veličina	jednotka	průměrná hodnota
vlhkost, W	% hm.	9,2
popel, A	% hm.	43,4
prehřívání, V	% hm.	47,8
spalné teplo, Q_s	MJ.kg ⁻¹	13,0
výhřevnost, Q_i	MJ.kg ⁻¹	12,0
obsah uhlíku, C	% hm.	29,2
obsah vodíku, H	% hm.	4,4
obsah dusíku, N	% hm.	4,3
obsah spalitelné síry, S	mg.kg ⁻¹	9642
obsah chloru, Cl	mg.kg ⁻¹	599
obsah fluoru, F	mg.kg ⁻¹	408

9 NÁVRH ZAŘÍZENÍ NA ZPĚTNÉ ZÍSKÁVÁNÍ FOSFORU Z KALU

Navrhovaným zařízením je spalovací jednotka, která má za účel doplnit současnou technologii kalové koncovky na ČOV Karlovy Vary. Jedná se o rotační pec, ve které bude docházet k termickému oxidačnímu rozkladu usušeného kalu. Vyprodukované teplo při spalování bude zpětně využíváno pro sušení kalů. Tato technologie má primárně za cíl eliminovat problém s využitím čistírenských kalů. Výsledný produkt po spalování (popel) bude nadále podroben některé z metod pro zpětné získávání fosforu z kalů. Rozšíření kalové koncovky je uvažováno na území areálu ČOV Karlovy Vary.

9.1 Údaje o zájmovém území

Území uvažované pro stavbu rozšiřující stávající technologii kalové koncovky leží v areálu ČOV Karlovy Vary v obci Karlovy Vary, k. ú. Drahovice [663701] na p. č. 1183/1 o celkové výměře 38 286 m². Druh pozemku je definován jako ostatní

plocha a způsob využití jako manipulační plocha. Území areálu ČOV Drahovice je zařazeno do reziduální kategorie ohrožení citlivých objektů dotčených scénáři povodňového nebezpečí (Povodí Ohře, 2014). Na parcele nejsou evidovány žádné způsoby ochrany. Pro účely rozšíření technologie kalové koncovky se konkrétně jedná o zpevněnou plochu o rozloze zhruba 300 m² za objektem sušárny kalů. Instalací dalšího objektu se charakter využití území nezmění.

Obrázek 30: Uvažovaná plocha pro umístění zařízení na spalování kalů (Marushka®)



Obrázek 31: Uvažovaná plocha pro umístění zařízení na spalování kalů za objektem sušárny kalů



Účel užívání stavby

Rozšíření technologie současné kalové koncovky o zařízení na spalování usušeného kalu, konkrétně rotační pec, umožňující následné zpracování popela pro zpětné získávání fosforu.

Technická infrastruktura

Provoz bude zabezpečen napojením na stávající inženýrské sítě v areálu ČOV Drahovice (elektrická energie, rozvod zemního plynu, vodovodní rozvody).

Dopravní řešení

Přístup k zájmové ploše bude zajištěn existujícími vnitroareálovými komunikacemi.

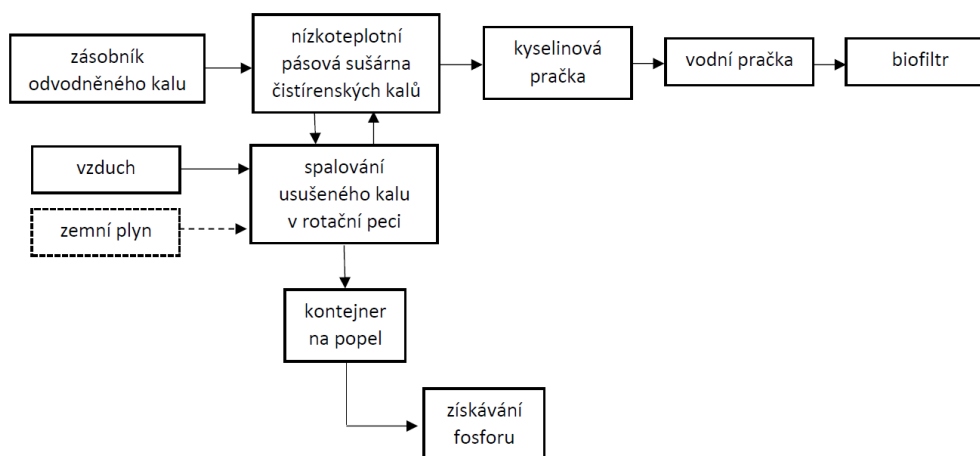
Vliv na přírodu a krajinu

V rámci projektu nedojde k záboru pozemků zemědělského půdního fondu ani pozemků určených k plnění funkcí lesa. Nedojde ke kácení dřevin. Nově umístěné zařízení je obdobné povahy jako existující objekty a zařízení na pozemku.

9.2 Spalování usušeného kalu

Navrhovaným zařízením je rotační pec, do které bude přiváděn šnekovým dopravníkem usušený kal ze stávající nízkoteplotní sušárny kalů. Do rotační pece bude zaveden přívod vzduchu a hořák na zemní plyn, který ale bude sloužit pouze pro najíždění technologie spalování a v případě nepředpokládaných situací. Odpadní plyny ze spalovacího zařízení budou odváděny přes chlazení zpět do sušárny, čímž bude zajištěno snížení potřeby dodávaného tepla na sušárnu a zároveň bude dosaženo důkladného čištění odpadních plynů v kyselinové a vodní pračce umístěných za technologií sušárny.

Obrázek 32: Zjednodušené schéma doplněné technologie kalové koncovky

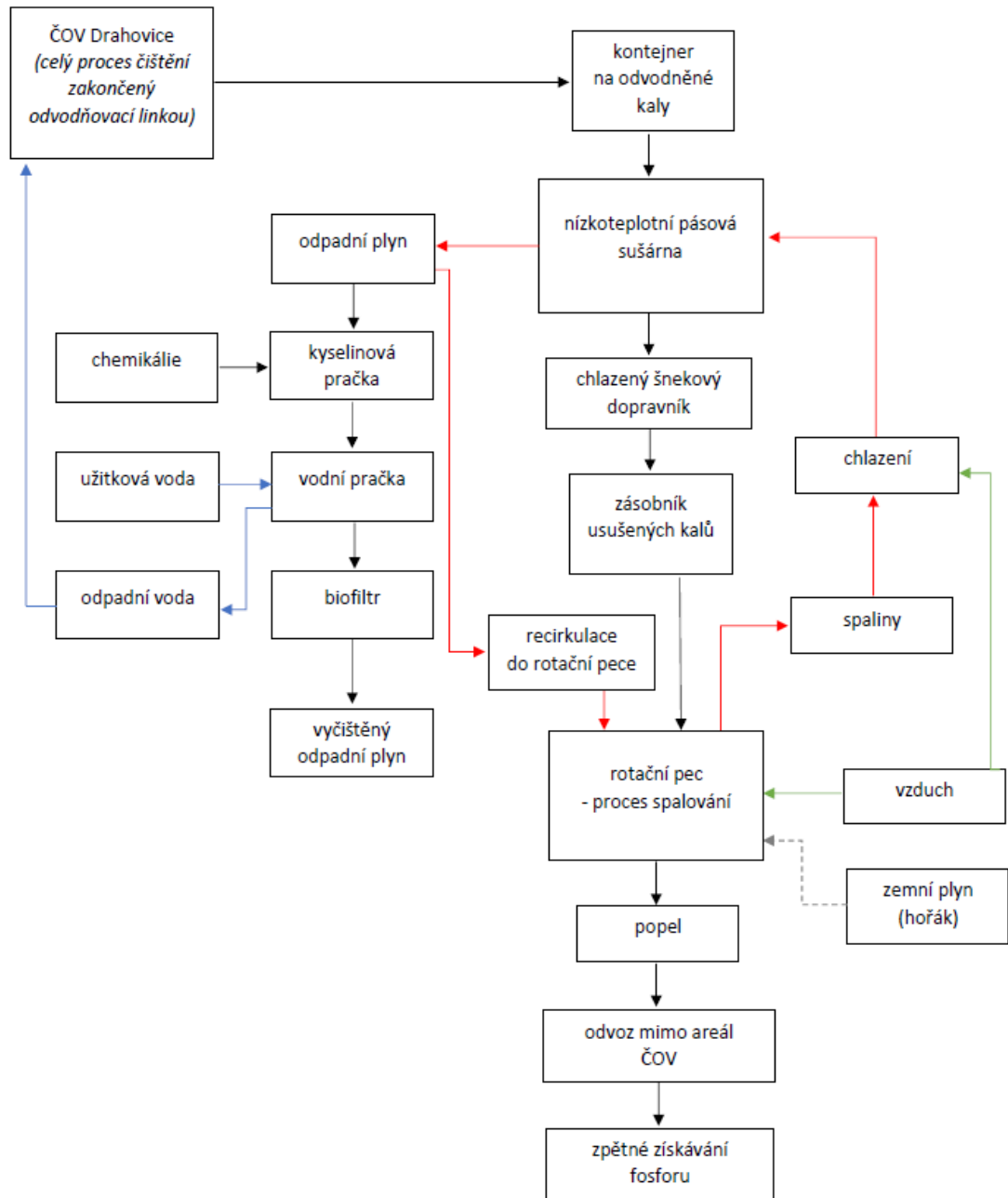


10 VÝSLEDKY

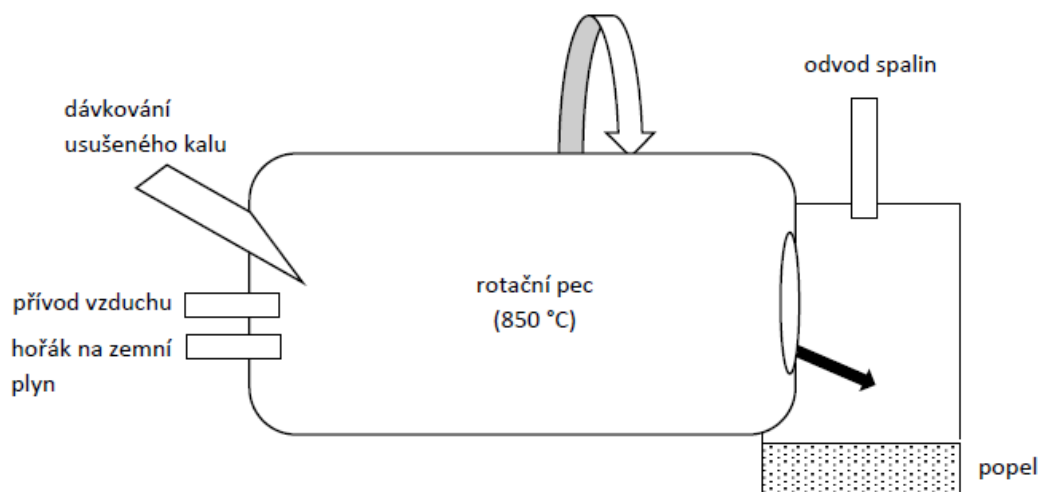
10.1 Popis technologie spalování usušeného kalu

Vysušený kal ze sušárny bude odváděn do násypky rotační pece, odkud bude dávkován do spalovacího prostoru pomocí šnekového dopravníku. Samotná rotační pec bude představovat vodorovně umístěný pomalu rotující válcový buben z ocelového plechu s žáruvzdornou vyzdívkou. Do bubnu bude kromě přívodu teplého vzduchu zaveden i hořák na zemní plyn v případě potřeby dodatečného přísunu tepelné energie (např. při zahájení provozu nebo při nestandardních podmínkách). V topeništi bude docházet vlivem vysoké teploty (850 °C) k autarknímu spalování za vzniku spalin. Pro dosažení autarkního průběhu spalování při spalovací teplotě 850 °C je nutná minimální hodnota efektivní výhřevnosti vlhkého kalu $H_{uef} = 4,2$ MJ/kg (Hartig, 2017). V případě nedostačující výhřevnosti je možné přehřívát vzduch na potřebnou teplotu díky hořáku na zemní plyn. Spaliny pocházející z rotační pece budou zaústěny do sušárny kalů, čímž dojde nejen ke snížení potřebného množství dodávaného tepla na sušárnu, ale bude ošetřeno i účinné čištění odpadních plynů, které zajišťuje kyselinová a vodní pračka s následnou biofiltrací za sušárnou kalů. Proces spalování tedy bude bez vlastního výdechu. Díky tomu nedojde ke vzniku nového zdroje znečištění, přesto však bude nutné emisním měřením zjistit, zda je čištění odpadních plynů ze sušení a spalování dostatečné a případně zajistit účinnější čištění vzniklých plynů. Popel bude dále odváděn chlazeným šnekovým dopravníkem do kontejnerů. Následně bude z popela získáván fosfor vybranou metodou.

Obrázek 33: Technologické schéma zamýšlené kalové koncovky se spalováním usušeného kalu v rotační peci



Obrázek 34: Jednoduché schéma rotační pece pro spalování usušeného kalu



10.1.1 Zpětné získávání fosforu z popela

Množství P_{celk} v sušině kalu není běžně na ČOV Drahovice sledováno. Nicméně na základě údajů měření z roku 2016 byl fosfor v sušině kalu obsažen v průměru 2,4 % (Frček, 2019). Ve srovnání s novou německou legislativou by tak čistírna spadala do kategorie ČOV nad 50 000 EO, obsah fosforu v sušině $> 2 \%$ a od roku 2032 by byla povinná fosfor zpětně získávat.

Výběr metody pro zpětné získávání fosforu z popela po spalování usušeného kalu bude zřejmě nejsložitější částí v celém procesu následného využívání kalu. Velmi totiž záleží na výsledné kvalitě a složení popela. Konečné rozhodnutí týkající se přístupu pro regeneraci fosforu by mělo zahrnovat úzkou koordinaci s existujícími zařízeními pro nakládání s odpadními vodami a dále různé požadavky týkající se využití odpadů, dekontaminace či účinků na životní prostředí. Předcházet by mu mělo také důkladné technicko-ekonomické zhodnocení. Dalším bodem by mělo být určení charakteristiky finálního produktu ohledně jeho biodostupnosti a obsahu znečišťujících látek (Egle et al., 2015). Většina způsobů znovuzískání fosforu z popela je navíc v současné době teprve ve fázi vývoje. Určení nejlepší metody bude tedy možné až na základě případného zkušebního provozu spalovny a získání údajů o finálním složení popela. Zajímavý potenciál by mohla mít termochemická metoda ASH DEC, která dosahuje výtěžnosti fosforu až 98 %, odstraňuje těžké kovy a zároveň zvyšuje biologickou dostupnost živin obsažených v popelu (ASH DEC, 2009; Havukainen et al., 2016).

Některé z metod získávání fosforu z popela jsou vypsány v kapitole 5.1 Možnosti získávání fosforu z popelu čistírenských kalů.

11 DISKUZE

Z údajů Českého statistického úřadu za rok 2018 vyplývá, že z celkového množství vyprodukovaných kalů v ČR (202 358 tun sušiny) se 43,92 % využívá k přímé aplikaci na půdu a k rekultivacím, 31,88 % je kompostováno, 8,76 % skládkováno a 9,60 % je zneškodňováno spalováním. Zbylých 5,82 % je využíváno jinak (zejména jako technické vrstvy skládek). Oproti roku 2017 došlo v roce 2018 u způsobu zneškodňování spalováním k radikálnímu nárůstu (téměř o 7 %). Z celkového množství spalovaných kalů v ČR v roce 2018 bylo největší množství (78,47 %) termicky zpracováno v Ústeckém kraji.

Tabulka 8: Způsoby nakládání s čistírenskými kaly v ČR za období 2017 – 2018 (ČSÚ)

způsob zneškodnění kalů	2017 (tuny sušiny / rok)	2018 (tuny sušiny / rok)
přímá aplikace a rekultivace	74 451	88 883
kompostování	60 930	64 515
skládkování	11 809	17 128
spalování	4 736	19 440
jinak	25 151	11 792
celkem	178 077	202 358

K úpravě kalových koncovek a způsobů nakládání s čistírenskými kaly je nutné přistoupit zejména z důvodu změn ve stávající legislativě. Lze očekávat úplný zákaz skládkování a přímé aplikace na zemědělskou půdu, jako se tomu děje ve státech západní Evropy. Dá se tedy předpokládat postupné přecházení k termickým úpravám kalu například procesem spalování, díky kterému bude následně možné kal využívat jako surovinu pro recyklaci fosforu. Aby však bylo možné kal termicky zpracovávat, je v první řadě žádoucí zavádět na kalových koncovkách technologii sušení kalu (Pohořelý et Moško, 2019).

V Německu byl již přijat zákon o zákazu použití kalu nebo kompostu z kalu jako hnojiva od roku 2029 pro čistírny nad 100 000 EO a od roku 2032 bude tento zákaz

platit i pro čistírny o kapacitě 50 000 EO a více. Mimo to je uložena povinnost zpětně získávat fosfor z kalu, pokud je jeho obsah v sušině vyšší než 2 %. Ten je nutné získávat s minimální výtěžností 50 %, ve druhém případě bude nutné kal spalovat bez přídavku jiných paliv (monospalovat). V případě spalování kalu se musí získat nejméně 80 % fosforu z popela, nebo je možné popel ukládat pro využití v budoucnu (BMU; Bayerische Landesamt für Umwelt). V roce 2017 bylo v Německu termicky zpracováno 70 % čistírenských kalů. Podobný trend lze sledovat např. ve Švýcarsku, Nizozemsku, Rakousku či Slovinsku (Pohořelý et Moško, 2019).

Další členské státy EU se vydávají cestou předběžné opatrnosti a zakazují využití neupravených čistírenských kalů v zemědělství. Proto je nezbytné vybrat vhodný způsob materiálové transformace kalů, který umožní zachování hnojivých látek v kalu a zároveň eliminuje obsažené mikropolutanty. V evropských zemích lze sledovat nárůst technologií sušení kalů a jejich následnou transformaci spalováním nebo termochemickým zpracováním (pyrolýza, zplyňování). Cílem těchto technologií je jednak využití energie obsažené v kalu a dále možnost zpětného získání fosforu jako výhledově kriticky nedostačujícího materiálu (Kos, 2019).

Fosfor je nenahraditelnou surovinou, jejíž nedostatek přímo ovlivňuje zemědělskou produkci a nepřímo veškeré potravní řetězce (Holba et Došek, 2016). Evropská komise zařadila fosfor v roce 2014 na listinu dvaceti kritických surovin (European Commission, 2014). Světové zásoby zdrojů fosforu jsou odhadovány na 50 až 100 let (Šyc et al., 2016). V současné době je Evropa závislá na importu fosforu z více než 90 % (Holba et Došek, 2016). Celkové náklady EU na dovoz fosforu dosahují ročně až 2 miliard EUR (Hartig, 2017). V sušině kalu se fosfor vyskytuje ve formě oxidu fosforečného 10 – 20 hm. % (Šyc et al., 2015). V případě zavádění nových technologií umožňující fosfor zpětně získávat z odpadních vod a čistírenských kalů by bylo možné zajistit až 15 % fosforu, který je v současnosti do Evropy dovážen (Holba et Došek, 2016). V tomto ohledu je tedy nutné hledat a zavádět efektivní způsoby nakládání s kaly. Uvažovat lze zejména termické zpracování kalů např. monospalováním (tedy bez přídavku jiných aditiv, která by mohla naředit popel bohatý na fosfor nebo ho kontaminovat jinými polutanty) s následnou recyklací fosforu. Tato metoda umožňuje zpětně vytěžit až 90 % obsaženého fosforu, redukovat objem zpracovávaného materiálu až o 90 % a snížit hmotnost až o 50 % (vztaženo na suchý kal) (Pohořelý et Moško, 2019; Šyc et al., 2015). Mezi hlavní přístupy získávání

fosforu z popelu po monospalování kalu patří kyselá extrakce, termická či termochemická úprava (Šyc et al., 2016).

Jednou z dalších možností termického zpracování kalů je pyrolýza (termický rozklad bez přístupu vzduchu). Finálním produktem pyrolýzy je biochar (kalouhel, biouhel) využitelný zejména v zemědělství za účelem zvýšení úrodnosti půdy. Je však nutné dodržet mezní hodnoty. Česká legislativa pro přímé aplikování kalouhlu na zemědělskou půdu je připravována (Pohořelý et Moško, 2019). Ve většině případů však kalouhel nesplňuje požadavky na hnojiva, a proto je v současné době ve výsledku skládkován, či jinak likvidován (Wanner, 2019). Pyrolýza obecně nepatří mezi hojně využívané technologie z důvodu ekonomické náročnosti. Navíc při ní oproti spalování dochází k redukci materiálu pouze na 25 % původní hmotnosti (Dohányos, 2006; Wanner, 2019).

12 ZÁVĚR

Produkce čistírenských kalů se celosvětově zvyšuje a spolu s produkcí se zvyšuje i obsah znečištění v kalech. Postupně se tak dostáváme do situace, kterou je potřeba efektivně řešit, neboť současný způsob nakládání s kaly je trvale neudržitelný a neadekvátní vzhledem ke stále se zpříšňujícím legislativním předpisům jak EU, tak i jednotlivých členských států. Stávající technologie na čistírnách odpadních vod jsou zastaralé a nejsou schopny plnit nová pravidla pro nakládání s kaly. Je proto pravděpodobné, že se v budoucnu dočkáme úplného zákazu využívání kalů na zemědělské půdě. Z tohoto důvodu se státy západní Evropy uchylují k inovativním způsobům zpracování kalů zejména termickými metodami, které zabezpečují absolutní hygienickou nezávadnost. Navíc je touto cestou možné získávat druhotné suroviny, které lze následně využívat v zemědělství. To je zajímavé zejména z hlediska možnosti recyklovat fosfor, který je kriticky nedostačujícím prvkem.

Termické zpracování kalů se v brzké době může stát jedinou možnou cestou pro likvidaci čistírenských kalů. Proto je vhodné zamýšlet se nad zařazením dalších technologií do současných kalových koncovek na čistírnách. V první řadě by se mělo jednat zejména o sušárny kalu, které znatelně zjednoduší a zefektivní případné termické zpracování. Čistírna odpadních vod Karlovy Vary – Drahovice disponuje v současnosti jako jediná v České republice technologií nízkoteplotní pásové sušárny

kalů. Tato technologie umožňuje výrazné snížení objemu i hmotnosti kalu a zaručuje hygienickou nezávadnost. Díky stávající technologii sušení kalu je možné uvažovat o zařazení další technologie – monospalování kalu v rotační peci umožňující následné získávání fosforu z popelu.

Vezmeme-li v úvahu novou legislativu v Německu, ukládající povinnost získávat fosfor z kalu po spalování čistírnám nad 50 000 EO při obsahu fosforu v sušině nad 2 % od roku 2032, je v tomto ohledu technologická linka karlovarské čistírny o značný krok napřed oproti standardu v České republice. Nová legislativní opatření tak nevyhnutelně vedou k nutným inovacím kalových koncovek v České republice. V první řadě by měly být čistírny vybaveny technologií na sušení kalu, na kterou by bylo možné navázat další technologií pro termické zpracování. Různé metody samotné recyklace fosforu z kalu jsou v současné době ve fázi vývoje a laboratorního testování.

Zavádění nových technologií v rámci kalového hospodářství povede jistě k množství nových zkušeností, poznatků a postupů v oblasti čištění odpadních vod. Důležitým aspektem v inovaci technologií týkajících se samotného spalování kalu bude však potřeba osvěty široké veřejnosti, která se obecně k těmto způsobům likvidace odpadů staví velmi antipaticky.

13 PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

Odborné publikace

Adam, C., 2005: Sustainable and safe re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery. SUSAN (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z

<<https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/39160>>.

Adam, C., 2009: SUSAN - Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery - Final Activity Report. Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung. Berlin, Germany.

Ahsan, N., 2012: Study of widely used treatment technologies for hospital wastewater and their comparative analysis.

Baily, R. E., 2009: Sludge: Types, Treatment Processes and Disposal. Nova Science Publishers, Incorporated.

Boutoussov, M., 2009: Thermal process for separating heavy metals from ash in agglomerated form. U.S. Patent Application No 12/298. 725.

Butkovskiy, A. Ni, G., Leal, L. H., Rijnaarts, H. H. M., Zeeman, G., 2016: Mitigation of micropollutants for black water application in agriculture via composting of anaerobic sludge. Journal of hazardous materials 303. 41 - 47.

Crittenden, J. C., Harza, B. M. W., 2005: Water treatment: principles and design. Wiley.

Dirner, V., 1998: Komplexanalyse der Untertagedeponierung von Abfällen. Europäisches Institut für Postgraduale Bildung an der Technischen Universität Dresden eV.

Dohányos, M., 2006: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. Biom.cz (online) [cit. 2020.02.25], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>.

Dohányos, M., Koller, J., Strnadová, N., 1998: Čištění odpadních vod. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.

Donatello, S., Tong, D., Cheeseman, C. R., 2010: Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA). Waste management 30 (8 - 9). 1634 - 1642.

Egle, L., Rechberger, H., Zessner, M., 2015: Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. Resources, Conservation and Recycling 105. 325 - 346.

Franz, M., 2008: Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). Waste Management 28 (10). 1809 - 1818.

- Frček, Z., 2017: Sušárna kalů v ČOV Karlovy Vary - Drahovice, nový směr kalových koncovek. Časopis stavebnictví 2017 (11). 44 - 47.
- Frýba, L., Kos, M.: Materiálová transformace čistírenského kalu z energetického hlediska.
- Gouch, M. A., Rhead, M. M., Rowland, S. J., 1992: Biodegradation studies of unresolved complex mixtures of hydrocarbons: model UCM hydrocarbons and the aliphatic UCM. Organic Geochemistry 18 (1). 17 - 22.
- Hartig, K.: Problematika kalového hospodářství. Vodní hospodářství ©2016 - web (online) [cit. 2020.02.21], dostupné z <<http://vodnihospodarstvi.cz/problematika-kaloveho-hospodarstvi/>>.
- Hartig, K., 2017: Problematika kalového hospodářství - sušení kalů. Vodní hospodářství 2017 (04). 3 - 7.
- Hartig, K., 2017: Problematika kalového hospodářství - termická destrukce kalů. Vodní hospodářství 2017 (05). 3 - 7.
- Havukainen, J., Nguyen, M. T., Hermann, L., Horttanainen, M., Mikkilä, M., Deviatkin, I., Linnanen, L., 2016: Potential of phosphorus recovery from sewage sludge and manure ash by thermochemical treatment. Waste management 49. 221 - 229.
- Hermann, L., 2009: Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung: eine Bestandesaufnahme. Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Hlavínek, P., 2015: Mikrovlnná pyrolýza čistírenského kalu. Vodovod.info - vodárenský informační portál (online) [cit. 2020.02.25], dostupné z <http://vodovod.info/index.php/kanalizace-a-cov/312-mikrovlenna-pyrolyza-cistirenskeho-kalu#.XIUO_GhKhPY>.
- Hlavínek, P., Mičín, J., Prax, P., 2001: Příručka stokování a čištění. NOEL 2000.
- Holba, M., Došek, M., 2016: Potřeba recyklace fosforu. TVIP (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <<http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2016/prispevky/309.pdf>>.
- Chudoba, P., Dohányos, M., Wanner, J., 1991: Biologické čištění odpadních vod. Státní nakladatelství technické literatury.
- Kalina, M., 2004: Kompostování a péče o půdu. Grada Publishing, a.s.
- Kos, M., 2016: Čistírenský kal - obnovitelný zdroj pro výrobu paliva a hnojiva. SOVAK - Časopis oboru vodovodů a kanalizací 2016 (1). 16 - 20.
- Kos, M., 2016: Použití pyrolýzy k produkci hnojiva z čistírenských kalů (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <http://www.cpga.cz/files/prednasky/1603_Kos_Pyrolyza_hnojiva_fulltext.pdf>.

- Kos, M., 2017: Výhled přístupů k využívání kalů z ČOV (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <https://www.sovak.cz/sites/default/files/MWnpyp7fQxtgPm6X6/06%20-%20Kos.pdf>.
- Kos, M., 2019: Aktuální názory na využívání kalů. Jihomoravské ekologické speciál 16. 5 – 8.
- Kulling, D., Stadelmann, F., Herter, U., 2001: Sewage sludge–fertilizer or waste. UKWIR Conference, Brussels.
- Kupec, J., 2002: Zpracování odpadních vod a čistírenských kalů. Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta.
- Lyčková, B., Fečko, P., Kučerová, R., 2008: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů. Vysoká škola Baňská–Technická univerzita Ostrava. (online) [cit. 2020.02.26], dostupné z <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/index.html>.
- Marrero, T. W., McAuley, B. P., Sutterlin, W. R., Morris, J. S., Manahan, S. E., 2004: Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge. Waste Management 24 (2). 193 - 198.
- Matějů, L., Boštíková, Z., Zimová, M., Státní zdravotní ústav, 2019: Rizika a výhody při využití čistírenských kalů na zemědělské půdě. Odpadové fórum 23 (19). 26 - 27.
- Menéndez, J. A., Domínguez, A., Inguanzo, M., Pis, J. J., 2005: Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification (MWDPG) of sewage sludge: Vittrification of the solid residue. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 74 (1 - 2). 406 - 412.
- Metcalf et Eddy, Burton, F. L., Stensel, H. D., Tchobanoglous, G., 2003: Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. McGraw Hill.
- Michalová, M., 2003: Kaly z ČOV. Odpadové fórum 03 (09). 28.
- Nadziakiewicz, J., Waclawiak, K., Stelmach, S., 2007: Thermal processes for waste treatment. The Silesian University of Technology, Gliwice.
- Niewerscha, C., Petzet, S., Henkel, J., Wintgens, T., Melina, T., Cornel, P., 2009: Phosphorus recovery from eluted sewage sludge ashes by nanofiltration. In International Conference on Nutrient Recovery From Wastewater Streams Vancouver. IWA Publishing.
- Paul, E., Liu, Y., 2012: Biological Sludge Minimization and Biomaterials/Bioenergy Recovery Technologies. John Wiley et Sons, Incorporated.
- Petzet, S., Cornel, P., 2013: Phosphorus recovery from wastewater. Waste as a Resource 37. 110.
- Pinnekamp, J., Montag, D., Heil, J., Gajic, D., et al., 2010: Recovery of phosphorus from sewage sludge ash. Final Report.

- Pohořelý, M., Moško, J., 2019: Materiálové a energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu. Jihomoravské ekologisty speciál 16. 16 – 20.
- Pohořelý, M., Moško, J., Zach, B., Šyc, M., Václavková, Š., Jeremiáš, M., Svoboda, K., Skoblia, S., Beňo, Z., Brynda, J., Trakal, L., Straka, P., Bičáková, O., Innemanová, P., 2017: Materiálové a energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu – výroba biocharu středněteplotní pomalou pyrolýzou. Waste Forum 2017 (2). 42 - 48.
- Pošta, J., Hejtmánková, A., Just, T., Růžicková, I., Koller, J., Dohányos, M., 2005: Čistírny odpadních vod. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Raclavská, H., 2007: Technologie zpracování a využití kalů z ČOV. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- Rapf, M., Raupenstrauch, H., Cimatoribus, C., Kranert, M., 2012: A new thermo-chemical approach for the recovery of phosphorus from sewage sludge. In Proceedings of the 11th DepoTech Conference.
- Sakai, Y., Fukase, T., Yasui, H., Shibata, M., 1997: An activated sludge process without excess sludge production. Water Science and Technology 36 (11). 163.
- Schaum, C., 2007: Procedure for a future sewage sludge treatment: Sewage sludge conditioning and recovery of phosphorus from sewage sludge ash. Institute WAR, Darmstadt. Ref. Adam, C., 2009: Techniques for P recovery from wastewater, sewage sludge.
- Schaum, C., Cornel, P., Jardin, N., 2005: Possibilities for a phosphorus recovery from sewage sludge ash. In Proceedings of the IWA Specialist Conference on Management of Residues Emanating from Wastewater Treatment.
- Schipper, W. J., Klapwijk, A., Potjer, B., Rulkens, W. H., Temmink, B. G., Kiestra, F. D. G., Lijmbach, A. C. M., 2001: Phosphate recycling in the phosphorus industry. Environmental technology 22 (11). 1337 - 1345.
- Schmidt, H. P., 2012: 55 Anwendungen von Pflanzenkohle. Ithaka–Journal für Terroir - Biodiversität und Klimafarming (online) [cit. 2020.02.25], dostupné z <<http://ithaka-journal.net/druckversionen/162012-pflanzenkohle-anwendungen.pdf>>.
- Steen, I., 1998: Phosphorus availability in the 21st century: management of a nonrenewable resource. British Sulphur Publishing.
- Svanström, M., Modell, M., Tester, J., 2004: Direct energy recovery from primary and secondary sludges by supercritical water oxidation. Water Science and Technology 49 (10). 201 - 208.
- Ševčík, J., 2016: Solární vs pásové sušení čistírenských kalů. Sborník přednášek konference Městské vody.

- Šťasta, P., 2009: Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- Štastný, V., 2019: Biouhel - nová perspektiva v technologii dočišťování odpadních vod, nebo slepá ulička?. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace 61 (3). 40 - 43.
- Šťastný, V., Beránková, M., Mlejnská, E., Marková, A., Marek, V., 2014: Metodika aplikace biotechnologických přípravků SEKOL® k dosažení optimálních výsledků při použití na malých ČOV. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha.
- Šyc, M., Kameníková, P., Kruml, M., Sobek, J., Pohořelý, M., Svoboda, K., Punčochář, M., 2015: Možnosti recyklace fosforu z čistírenských kalů (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <<http://invenio.nusl.cz/record/181127>>.
- Šyc, M., Kruml, M., Pohořelý, M., Svoboda, K., Punčochář, M., 2016.: Recyklace fosforu z popelu po spalování čistírenských kalů (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <<http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2016/prispevky/304.pdf>>.
- Tay, J. H., Yang, P., Zhuang, W. Q., Tay, S. T. L., Pan, Z. H., 2007: Reactor performance and membrane filtration in aerobic granular sludge membrane bioreactor. Journal of Membrane Science 304 (1 – 2). 24 – 32.
- Takahashi, M., Kato, S., Shima, H., Sarai, E., Ichioka, T., Hatyakawa, S., Miyajiri, H., 2001: Technology for recovering phosphorus from incinerated wastewater treatment sludge. Chemosphere 44 (1). 23 - 29.
- Valečko, Z., 2002: Čistírenské kaly - prokleté nebo životodárné? (online) [cit. 2019.09.26], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/cistirenske-kaly-proklete-nebo-zivotodarne>>.
- Wanner, F., 2019: Nakládání s čistírenskými kaly v České republice. SOVAK (online) [cit. 2020.02.25], dostupné z <<https://www.sovak.cz/sites/default/files/2019-11/SOVAK%20C4%8CR%20Studie%20nakl%C3%A1d%C3%A1n%C3%AD%20s%20C4%8Dist%C3%ADrensk%C3%BDmi%20kaly%20v%20C4%8CR%20FINAL.pdf>>.
- Weigand, H., Bertau, M., Hübner, W., Bohndick, F., Bruckert, A., 2013: RecoPhos: Full-scale fertilizer production from sewage sludge ash. Waste management 33 (3). 540 - 544.
- Werle, S., et Wilk, R. K., 2010: A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. Renewable Energy 35. 1914 - 1919.
- Wilderer, P. A., Irvine, R. L., Goronszy, M. C., eds., 2001: Sequencing batch reactor technology. IWA publishing.

Zimová, M., Matějů, L., 2001: Hodnocení zdravotního rizika při nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. Kaly a odpady.

Internetové zdroje

Alibaba.com, ©1999-2020: MBR Membrane Bioreactor Bio reactor (online) [cit. 2020.02.21], dostupné z <https://www.alibaba.com/product-detail/package-portable-Wastewater-Treatment-Plant-MBR_60480940733.html>.

Bayerisches Landesamt für Umwelt, ©2018: Novelle Klärschlammverordnung 2017 (online) [cit. 2020.03.19], dostupné z <<https://www.klaerschlammbayern.de/themen/novelle.jsp>>

CZEMP – Česká membránová platforma, z. s., ©2016: Membránové reaktory (online) [cit. 2020.02.21], dostupné z <<http://www.czemp.cz/cs/membranove-procesy/membranove-reaktory>>.

Český statistický úřad: Katalog produktů – Vodovody, kanalizace a vodní toky 2017 (online) [cit. 2020.03.19], dostupné z <<https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2017>>.

Český statistický úřad: Katalog produktů – Vodovody, kanalizace a vodní toky 2018 (online) [cit. 2020.03.19], dostupné z <<https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2018>>.

Český statistický úřad: Vodovody, kanalizace a vodní toky – 2018 (online) [cit. 2019.11.20], dostupné z <<https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2018>>.

Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU): New sewage sludge ordinance reforms sewage sludge utilisation and sustainable phosphorus utilization (online) [cit. 2020.03.19], dostupné z <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/RCM_Website/SDG_6_Additional_Case_Study2.pdf>.

Igniss Energy, ©2020: Rotary kiln (online) [cit. 2020.03.16], dostupné z <<http://www.igniss.com/rotary-kiln>>.

REMONDIS, ©2020: The municipal sewage treatment plant a facility for recovering raw materials - thanks to TetraPhos® and ReAlPhos® (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z: <<https://www.remondis-aqua.com/en/aq/latest-news/new-processes/>>.

VDI Wissensforum, ©2020: Novellierung der Klärschlammverordnung (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <<https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-umwelttechnik/novellierung-der-klaerschlamverordnung/>>.

Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017: Čistírna Drahovice (online) [cit. 2020.02.18], dostupné z <<https://vodakva.cz/cs/o-vode/odpadni-vody/prezentace-cistiren/84-prezentace-cov/244-cistirna-drahovice.html>>.

Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017: Průměrné výsledky čištění odpadních vod na největších čistírnách provozovaných Vodakvou v roce 2019 (online) [cit. 2020.02.19], dostupné z <https://vodakva.cz/images/voda/cisteni_2019.pdf>.

Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., ©2017: Sušárna kalů na karlovarské čistírně - reportáž (online) [cit. 2020.02.19], dostupné z <<https://vodakva.cz/cs/118-videogalerie/353-nova-susarna-kalu-na-cov-karlovy-vary-drahovice.html>>.

Vodohospodářské sdružení obcí západních Čech (VSOZČ), ©2016: Sušárna kalů na ČOV Drahovice - Prezentace projektu (online) [cit. 2020.02.19], dostupné z <<http://www.vsozc.cz/cs/investice/nejvyznamnejsi-investice/123-investice/nejvyznamnejsi-investice/636-susarna.html>>.

Vodohospodářský podnik a.s., ©2004-2019: ČOV Karlovy Vary - sušení kalu (online) [cit. 2020.02.19], dostupné z <<http://www.vhp.cz/menu.do;jsessionid=03822C870512973EA4E0B82821CF8162?key=about.ref.03>>.

Legislativní zdroje

Směrnice Rady 86/278/EHS ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství.

Směrnice Rady 91/271/EHS ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod.

Směrnice Rady 91/676/EHS ze dne 12. prosince o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů.

Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.

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

Vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky 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).

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů.

Ostatní zdroje

ASH DEC, 2009: Short Description ASH DEC PhosKraft® Fertiliser Process and Manufacturing Plants.

EC–European Commission, 2014: Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. Brüssel.

Frček, Z., 2019: Prezentace - sušárna Drahotice (pdf). Archiv autora.

Mapový aplikační server Marushka® firmy GEOVAP

Povodí Ohře, 2014: Dokumentace oblastí s významným povodňovým rizikem. Sweco Hydroprojekt a.s. HYDROSOFT Velešlavín s.r.o.

ZPRÁVA KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU, RADĚ, EVROPSKÉMU HOSPODÁŘSKÉMU A SOCIÁLNÍMU VÝBORU A VÝBORU REGIONŮ - Devátá zpráva o stavu provádění a o programech provádění (podle článku 17) směrnice Rady 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod. Brusel 14.12.2017, COM(2017) 749 final (online) [cit. 2020.02.28], dostupné z <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0749&from=EN>>.

14 PŘÍLOHY

Příloha 1: Odvodňovací odstředivky

Příloha 2: Zásobník usušeného kalu

Příloha 3: 3D model rotační pece a pohled v řezu (Igniss Energy, ©2020)

Příloha 1: Odvodňovací odstředivky



Příloha 2: Zásobník usušeného kalu



Příloha 3: 3D model rotační pece a pohled v řezu (Igniss Energy, ©2020)

