ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE

POSOUZENÍ TECHNOLOGIE BIOSUŠENÍ A KOMPOSTOVÁNÍ PRO ÚPRAVU ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.
Diplomant: Bc. Monika Pouzarová

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Monika Pouzarová

Krajinné inženýrství
Regionální environmentální správa

Název práce

Posouzení technologie biosušení a kompostování pro úpravu čistirenských kalů

Název anglicky

Assessment of bio drying and composting technology for sewage sludge treatment

---

Cíle práce

Práce se zaměřuje na proces zpracování čistírenských kalů formou kompostování a biosušení. Cílem práce je specifikace těchto technologií a posouzení ekonomických a environmentálních přínosů pro následný provoz na ČOV.

Metodika

Práce formou rešerše zhodnotí možnosti praktické aplikace technologie stabilizace čistírenských kalů kompostováním a na inovativní lince biosušení. Jako parametry, které indikují výkonnost technologie a její ekonomické a environmentální dopady budou vybrány: spotřebu energie, emise do ovzduší a spotřeba vody.

Bude rovněž zhodnoceno využití výstupů obou technologií jm. palivo, kompost nebo biouhel a jejich využít ve stavebnictví, zemědělství nebo k výrobě energie.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

čistírenský kal, biosušení, kompostování, biouhel, palivo

Doporučené zdroje informací

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Sedlář, O., 2019: Využiti čistírenských kalů jako zdroje organických látek, Racionální použiti hnojiv, Česká zemědělská univerzita, Praha, 108 s.

Felicio dos Reis, R., Cordeiro, J., Font, X., Achon, C., 2020: The biodrying process of sewage sludge – a review. Drying Technology Volume 38, Issue 10. P. 1247-1260.

Li, J., Fraikin, L., Salmon, T., Toye, D., Léonard, A., 2022. Influence of back-mixing on the convective drying of sewage sludge: The structural characteristics. Drying Technology Volume 40, Issue 1. P. 205-212.

Lyčková, B., Fečko, P., Kučerová, R., 2008: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů (online) [cit. 2022.01.05], dostupné z <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/index.html>

Raheem, A., Sikarwar, V., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D., Wang, W., Zhao, M., 2018: Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. Chemical Engineering Journal Volume 337, P. 616 – 641

Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.

Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Konzultant

Mgr. Michal Šereš

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2022

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2022

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Posouzení technologie biosušení a kompostování pro úpravu 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 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.

V Praze dne 30.3.2022

.....

(podpis autora práce)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala především vedoucí své diplomové práce Ing. Tereze Hnátkové, Ph.D. za pomoc, cenné rady a připomínky, trpělivost a ochotu, které mi pomohly při zpracování této práce.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá technologiemi stabilizace čistírenských kalů na ČOV. Jedná se o metody biosušení a kompostování. Jejich srovnání probíhá na úrovni vstupů, průběhu procesu zpracování a výsledného výstupu, tzn. produktu k dalšímu použití.

V této práci je uvedena legislativa pro nakládání s odpadními kaly. Zároveň je zde vysvětlen pojem čistírenský kal, jeho charakteristika spolu s jeho zpracováním, stabilizací a využití odpadních kalů. Využitím se rozumí získávání surovin, a to především fosforu a biouhle.

Charakteristika technologií biosušení a kompostování. Možné využití výstupních produktů v zemědělství, stavebnictví nebo k výrobě energií.

Cílem práce je srovnání dvou technologií pro stabilizaci kalu, a to pro inovativní biosušení a tradiční kompostování z pohledu energetické náročnosti, dopadu na životní prostředí a jejich přínosem k dalšímu využití.

Klíčová slova: čistírenský kal, biosušení, kompostování, biouhel, palivo

ABSTRACT

This thesis deals with the technologies of sewage sludge stabilisation at WWTP. These are the methods of biodrying and composting. They are compared at the level of inputs, the course of the treatment process and the final output, i.e. the product for further use.

Legislation for the management of waste sludge is presented. Concurrently, the concept of sewage sludge, its characteristics together with its treatment, stabilisation and utilisation of waste sludge are explained. Utilisation means the recovery of raw materials, especially phosphorus and biochar.

Characteristics of biodrying and composting technologies. Possible use of the output products in agriculture, construction or energy production.

The thesis compares two technologies for sludge stabilisation, namely innovative biodrying and traditional composting, in terms of energy consumption, environmental impact and their contribution to further utilisation.

Key words: sewage sludge, biodrying, composting, biochar, fuel

OBSAH

1. ÚVOD 10
2. Cíle práce 11
3. Metodika 12
4. Literární rešerše 13
4.1 Legislativa 13
4.2 Čistírenský kal 16
4.2.1 Obecná charakteristika čistírenských kalů 17
4.2.2 Primární kal a jeho parametry 20
4.2.3 Aktivovaný kal a jeho parametry 21
4.2.4 Další druhy kalu 21
4.2.5 Vybrané kontaminanty čistírenského kalu 22
4.3 Zpracování odpadních kalů 24
4.3.1 Zahušťování 25
4.3.2 Odvodňování 26
4.4 Stabilizace a hygienizace kalů 26
4.4.1 Anaerobní stabilizace 27
4.4.2 Hygienizace páleným či hašeným vápnem 29
4.4.3 Sušení 29
4.4.4 Biosušení 32
4.4.5 Další metody 34
4.5 Využití odpadních kalů 35
4.5.1 Získávání surovin – fosfor 35
4.5.2 Biouhel 36
4.5.3 Zemědělské využití 36
4.5.4 Kompostování 37
4.5.5 Spalování 38
4.6 Porovnání biosušení a kompostování 39
4.7 Ekonomické a environmentální dopady: biosušení a kompostování 41
5. Diskuze 44
6. Závěr 47
7. Přehled literatury a použitých zdrojů 49
7.1 Odborné publikace 49
7.2 Legislativní zdroje 50
7.3 Internetové zdroje 51

7.4 Seznam obrázků 52
7.5 Seznam tabulek 53
8. Přílohy 54
8.1 Přehled čistírenských kalů a jejich řazení do druhů odpadu dle platného Katalogu odpadů. 54

1. ÚVOD

Zajištění účinného a zároveň ekonomického čištění odpadních vod je jedním z pilířů ochrany životního prostředí. Vzhledem ke stále opakovanému problému sucha se zdá být toto téma stále důležitější. Veškeré používané technologie úpravy odpadních vod však vedou ke tvorbě nejen upravené vody, ale i čistírenských kalů, které jsou suspenzí organických i anorganických látek, ale i různých mikroorganismů a těžkých kovů. Právě složení kalu určuje možnosti jeho dalšího využití.

Pro jistou ilustraci rozsahu problému v České republice si můžeme pomoci sadou čísel. V roce 2020 bylo v naší zemi evidováno přes 3100 čistíren komunálních vod a na ně bylo pomocí kanalizace připojeno přes 8,6 milionu osob, což odpovídá přibližně 80% celkové populace. Přestože bych osobně očekávala něco jiného, je od roku 2010 produkce kalu z čištění komunálních odpadních vod poměrně stálá kolem 160 tisíc tun sušiny ročně (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

Na čistírenský kal je možné se dívat z několika úhlů pohledu, a proto je možné ho nazývat odpadem, ale i druhotnou surovinou. Vzhledem k rozšiřujícím se tendencím a podpoře oběhového hospodářství se zvyšují tendence pro jeho využívání. Technologie pro zpracování kalu stále postupují a již v současnosti jich je celá řada od po staletí známého kompostování, přes produkci bioplynu a spalování, až k cílenému získávání fosforu. Pro všechny metody zpracování je však nezbytná vhodná příprava materiálu, která zajistí ekonomický, ale hlavně bezpečný provoz.

V rámci této práce se zabývám možností praktické aplikace technologie stabilizace čistírenských kalů kompostováním a na inovativní lince biosušení. Zhodnoceno bude využití výstupů obou technologií při použití v zemědělství, k výrobě energie nebo ve stavebnictví.

2. CÍLE PRÁCE

Práce se zaměřuje na proces zpracování čistírenských kalů formou kompostování a biosušení. Cílem práce je poskytnout specifikaci těchto technologií a následné posouzení ekonomických a environmentálních přínosů pro následný provoz na ČOV. Záměrem dosažení cíle je srovnání obou technologií a jejich výstupů.

3. METODIKA

Práce formou rešerše má zhodnotit praktické aplikace technologie stabilizace čistírenských kalů kompostováním a na inovativní lince biosušení. Jako parametry, které indikují výkonnost technologie a její ekonomické a environmentální dopady budou vybrány: spotřeba energie, emise do ovzduší a spotřeba vody. První část rešerše popisuje platnou legislativu a charakterizuje čistírenský kal. Druhá část vysvětluje zpracování čistírenského kalu. Ve třetí části je popsaná stabilizace kalu a biosušení. Další, pátá část obsahuje využití kalů a kompostování a závěrečná šestá část se zabývá srovnáním výstupů obou technologií a využití jejich výsledných produktů na výstupu.

4. LITERÁRNÍ REŠERŠE

4.1 LEGISLATIVA

Česká republika je již od roku 2004 členem Evropské unie, v jejímž rámci existuje slučitelnost právního řádu národního s právem Evropské unie. Proto je nezbytné v rámci legislativních předpisů upravujících problematiku čistírenských kalů začít od evropských nařízení a směrnic, které jsou následně implementovány v právním řádu České republiky, na který je možné se zaměřit následně.

V rámci legislativních dokumentů Evropské unie je nezbytné zmínit „Směrnici Rady 86/278/ES o ochraně životního prostředí, a zvláště půdy při používání čistírenských kalů v zemědělství“, která reguluje používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství tak, aby se zabránilo škodlivým účinkům na půdu, rostliny, zvířata a člověka. Jsou v ní definovány mimo jiné i pojmy „kal“ a „upravený kal“ a zároveň cílí na správné používání čistírenských kalů v zemědělství především s ohledem na bezpečnost (Rada Evropské unie, 1986). Za zmínku zcela jistě stojí i „Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1010 ze dne 5. června 2019 o sladění povinností podávání zpráv v oblasti právních předpisů souvisejících s politikou životního prostředí a o změně nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 166/2006 a (EU) č. 995/2010, směrnic Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES, 2004/35/ES, 2007/2/ES, 2009/147/ES a 2010/63/EU, nařízení Rady (ES) č. 338/97 a (ES) č. 2173/2005 a směrnice Rady 86/278/EHS“, jehož cílem je modernizace správy informací mimo jiné o množství, složení a vlastnostech kalu, jeho úpravách a použití (Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2019).

Dále je nutné zmínit tzv. balíček oběhového hospodářství, který obsahuje mimo jiné „Směrnici Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/850 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů“, který mimo jiné definuje cíle pro množství ukládaného odpadu do roku 2035 a tím fakticky podporuje znovuvyužití komunálního odpadu (Evropský parlament; Rada Evropské unie, 2018). Do české legislativy se výše zmíněný balíček oběhového hospodářství promítl především v podobě „Zákona č. 541/2020 Sb. o odpadech“, který upravuje pravidla pro předcházení vzniku odpadu, jakožto i práva a povinnosti osob, ale i působnost orgánů veřejné správy v odpadovém hospodářství. V níže uvedené tabulce 1 je přehled vybraných paragrafů tohoto zákona, které se týkají problematiky čistírenských kalů.

Paragraf	Řešená problematika
§4	Definice pojmu „Odpad“
§67	Definice pojmů „Kal“ a „Upravený kal“, zařazení kalu mezi ostatní odpad a zacházení s ním
§68 - §69	Úprava kalů před použitím na zemědělské půdě a s tím spojené povinnosti
§94 - §96	Průběžná evidence a ohlašování
§98 - §99	Plán odpadového hospodářství České republiky
§116 - §125	Přestupky a opatření k nápravě týkající se odpadového hospodářství

Tabulka 1: Paragrafy týkající se problematiky čistírenských kalů zákona č. 541/2020 Sb.

Dále bych na tomto místě chtěla uvést dvě zásadní vyhlášky navazující na zákon č. 541/2020 Sb., které odpad katalogizují a upravují podrobnosti nakládání s odpady.

První z nich je „Vyhláška č. 8/2021 Sb. o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů)“, která definuje druhy odpadů a jejich katalogová čísla, stejně jako upravuje postupy zařazování odpadu do jednotlivých kategorií či například hodnocení nebezpečných vlastností odpadu a provádění laboratorních zkoušek. Kaly z čištění odpadních vod jsou v tomto řádu zařazeny do celé řady skupin dle jejich vzniku, níže v tabulce 2 je k dispozici přehled vybraných jednotlivých katalogových čísel relevantních pro čistírenské kaly a odpovídajících skupin a podskupin. Pro text byla vybrána pouze jedna skupina odpadů zaměřená čistě na zpracování odpadu. Kompletní přehled skupin, podskupin i druhů odpadů týkající se čistírenských kalů je možné nalézt v Příloze č.1. Obecně platí, že je odpad zařazován pod šestimístná katalogová čísla druhů odpadů, v nichž první dvojčíslí označuje skupinu odpadů, druhé dvojčíslí podskupinu odpadů a třetí dvojčíslí druh odpadu. Další část textu práce se bude zaměřovat především na kaly z čištění komunálních odpadních vod, které jsou identifikovány pod katalogovým číslem 19 08 05.

19			**Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely**
19	**08**		**Odpady z čistíren odpadních vod jinde neuvedené**
19	08	05	Kaly z čištění komunálních odpadních vod
19	08	11*	Kaly z biologického čištění průmyslových odpadních vod obsahující nebezpečné látky
19	08	12	Kaly z biologického čištění průmyslových odpadních vod neuvedené pod číslem 19 08 11
19	08	13*	Kaly z jiných způsobů čištění průmyslových odpadních vod obsahující nebezpečné látky
19	08	14	Kaly z jiných způsobů čištění průmyslových odpadních vod neuvedené pod číslem 19 08 13
19	**11**		**Odpady z regenerace olejů**
19	11	05*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
19	11	06	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 19 11 05

Tabulka 2: Přehled čistírenských kalů a jejich řazení do druhů odpadu dle platného Katalogu odpadů.

Druhou z těchto vyhlášek je „Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady“, která upravuje mimo jiné technické podmínky soustřeďování odpadu, ale i podrobnosti nakládání s komunálními či nebezpečnými odpady, skládkování a podmínky předávání odpadů k jeho energetickému využití. Konkrétně paragrafy §57 – §64 se zabývají povinnostmi při nakládání s kaly z čistíren odpadních vod.

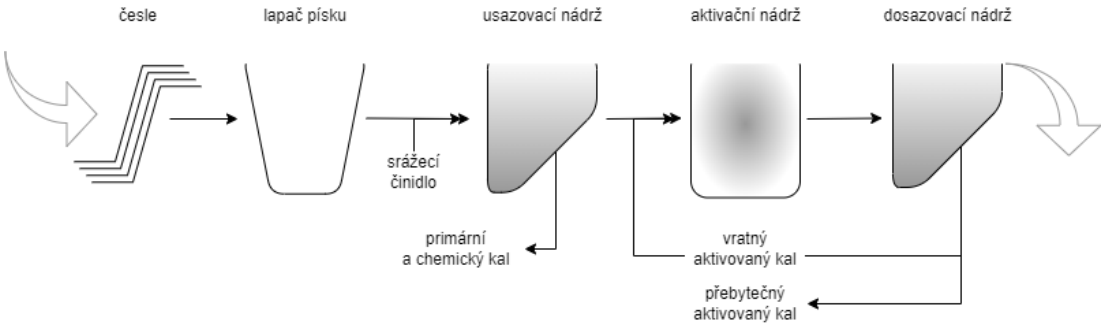
Kromě těchto vyhlášek se v dokumentech týkajících se tématiky čistírenských kalů často vyskytují i následující:

- Vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě
- Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady
- Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu
- Vyhláška č. 94/2016 Sb., o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů

Jejich platnost však skončila s počátkem platnosti zákona č. 541/2020 Sb. o odpadech a v současnosti není dostupná jejich platná alternativa.

4.2 ČISTÍRENSKÝ KAL

Čistírenské kaly jsou jedním z odpadních produktů čištění odpadních vod v průmyslovém měřítku. Čistírny odpadních vod je možné nalézt na mnoha místech, ať už v blízkosti zemědělských a průmyslových provozů, tak i u měst a obcí. Obecně existuje mnoho typů čistíren, které obvykle kombinují několik různých procesů čištění vody. Zjednodušené schéma funkce čistírny odpadních vod je možné nalézt na obrázku 1, kde je přívod odpadní vody v levé části a odtok přečištěné vody v pravé části obrázku.



Obrázek 1: Jednoduché technologické schéma čistírny odpadních vod.

Prvním stupněm čištění je mechanické čištění, které je zaměřeno na odstranění velkých nečistot, a to jak plovoucích, tak sedimentujících. Plovoucí nečistoty se odstraňují pomocí česlí, případně různých sít různé jemnosti. Sedimentující nečistoty jako například štěrk či písek se mohou zachycovat v lapači písku. Po usazení hrubých nečistot voda pokračuje do usazovacích nádrží, které pro odloučení nerozpuštěných částic využívají gravitační sílu. Zde se kromě jemných anorganických částic usazují i některé látky organické, a kromě sedimentů je tato nádrž často spojena i se sběrem tuků a jiných ve vodě nerozpustných látek plujících na jejím povrchu (Richter, 2014). V této části vznikají primární kaly a končí zde mechanické čištění odpadní vody, která dále pokračuje do aktivační nádrže, kde začíná čistění biologické. To prakticky simuluje přirozené čištění vody v přírodě, avšak v případě ČOV jsou navozeny podmínky pro intenzivní růst heterotrofních mikroorganismů živících se organickými látkami z čištěných vod. Tento biochemický rozklad proběhne v průmyslovém

měřítku za přístupu vzduchu obvykle za 6 až 8 hodin pomocí aktivovaného kalu (Richter, 2014), což je směsná kultura mnoha druhů mikroorganismů, které se více budeme věnovat dále v textu. Poslední fází čištění odpadní vody je přečerpání do dosazovací nádrže, kde dojde k sedimentaci kalu, jehož část je znovu použita pro čištění další odpadní vody a přebytek je smísen s primárním kalem a tvoří odpad čištění odpadních vod, který je dále zpracováván.

4.2.1 Obecná charakteristika čistírenských kalů

Pojmem „odpadní kal“ lze nazývat směs odpadních látek, z nichž alespoň jedna tvoří souvislou kapalnou fázi, v níž je dispergována alespoň jedna pevná látka. Celkově kaly tvoří přibližně 1-2 % obj. odpadních vod, nicméně obsahují až 80 % původního znečištění. Čistírenské kaly jsou složitou heterogenní suspenzí anorganických a organických látek, ale i mikroorganismů, které vznikají spojením primárního a přebytečného aktivovaného kalu v průběhu technologických postupů čištění vody. Jsou bohatým zdrojem organické hmoty, základních živin ale i různých stopových prvků. Významně je v nich zastoupen především dusík a fosfor, zatímco obsah draslíku bývá relativně nízký. Složení čistírenského kalu je značně variabilní mezi jednotlivými čistírnami, ale v průběhu času u jedné čistírny je jeho složení poměrně stabilní (Lyčková et al. 2008). Kaly na čistírně odpadních vod lze dělit na několik druhů, z nichž některé byly již zmíněné v předchozím textu.

Obsah sušiny v kalu velmi ovlivňuje jeho konzistence. Vody oddělitelné od pevného základu mohou být provedeny sedimentací anebo za většího působení sil v odstředivce či za pomoci elektrické energie. Sušina prakticky nepřekročí 10 %, ale závisí na charakteru kalových částic. Z tohoto důvodu mohou mít dva kaly o stejné sušině zcela netotožnou konzistenci (Lyčková et al. 2008).

Na tomto místě však nelze opominout ani potenciální nebezpečné charakteristiky čistírenských kalů, jakožto například infekčnost, ekotoxicita a jeho schopnost uvolňovat nebezpečné látky do životního prostředí (Andreoli et al. 2007).

Za zmínku stojí i kvalita kalů pocházejících z čistíren odpadní vod v ČR, které byly porovnány za období 2010–2018 a z tohoto porovnání vyplývá, že koncentrace těžkých kovů v nich je poměrně stabilní a hodnoty rizikových látek k využití

na zemědělské půdě nepřekračují stanovené hranice k tomuto účelu. Hodnoty a jsou uvedeny níže v tabulce 3.

Dále lze z uvedených hodnot usoudit, že problém, na který bylo hojně poukazováno a Evropou přísně sledováno překračování limitů pro koncentrace těžkých kovů, se vede úspěšně nezhoršovat. Problémem však zůstávají díky využívaným technologiím mikrobiologické ukazatele na ČOV. Zde je nutné apelovat na nevypouštění rizikových látek do kanalizace, neboť toto je nejlepší způsob pro nepřekračování limitů množství těžkých kovů. Tato metoda se jeví jako velmi účinná jak z hlediska prevence, tak i z hlediska kvality kalů z ČOV (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

Ukazatel kromě pH (mg/kg sušiny kalu)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
pH	6,84	6,97	6,89	6,52	7,09	6,55	7,4	7,94	7,93
Cd	1,68	2,06	1,01	1,4	1,09	0,95	1,13	1,14	1,56
Cu	163,89	147,09	160,39	197,89	151,07	159,92	167,06	179,74	171,01
Hg	2,37	1,6	2,3	1,2	1,17	1,14	1,19	1,19	1,49
Pb	49,79	45,31	36,99	34,73	25,64	26,25	31,66	31,06	27,63
Zn	841,82	1011,12	757,74	756,33	753,03	737,67	714,4	800,71	789,52
As	7,42	4,9	5,94	4,62	5,96	6,16	11,77	6,16	5,96
Cr	47,1	92,44	35,86	40,75	33,05	31,21	38,72	43,25	39,25
Ni	29,94	32,66	28,36	27,34	26,38	27,23	29,34	32,64	30,75
AOX	242,4	242,4	231,71	223,64	786,63	280,45	270,91	239,17	252,64
PCB	1,28	0,85	0,08	0,08	0,7	0,7	0,06	29,53	0,09
PAU								2,86	4,15

Tabulka 3: Kaly z ČOV – kvalita kalů – průměrné obsahy rizikových prvků, látek v kalech v ČR za roky 2010–2018.

Čištění odpadních vod z komunálních i průmyslových odpadů má za následek produkci mnoha druhů odpadů. Tento odpad je nutné likvidovat dle platné legislativy a provozovatel ČOV je za tento proces zodpovědný. V EU se v současné době

soustředí na prosazování odpadové politiky, která má vést k minimalizaci odpadů, jejich recyklaci a zabránit jejich ukládání, a to vše do roku 2025 a do roku 2030 by měly od skládkování upustit i členské státy. V ČR je podle nového zákona o odpadech směřováno k recyklaci a opětovnému využití materiálů z odpadů. Pro nakládání s čistírenskými kaly toto znamená převážně omezování ukládání na skládku. (Wanner 2019).

V tabulce 4 je uvedený přehled produkce a nakládání s čistírenskými kaly v ČR v letech 2009-2020. Sloupec v tabulce s názvem „jinak" představuje uložení kalů na skládku ve formě technického zabezpečení skládky. Je viditelné, že přes menší rozdíly v produkci kalů a jejich zpracování, největší nárůst představoval rok 2018, a to v celkové produkci a ve formě nakládání s kaly spalováním. V roce 2020 se zvedl poměr zpracování kalů kompostováním a opět spalováním. V tomto roce také pokleslo za sledované období zneškodnění kalů jiným způsobem.

Rok	**Způsob zneškodnění kalů**					
	Kaly produkované v ČOV celkem produkované v ČOV celkem	*přímá aplikace a rekultivace*	*kompostování*	*skládkování*	*spalování*	*jinak*
	tun sušiny					
2009	168 164	42 442	80 727	5 931	2 179	36 885
2010	170 689	60 639	45 528	6 177	3 336	55 009
2011	163 818	61 750	45 985	9 527	3 538	43 018
2012	168 190	51 912	53 222	9 340	3 528	50 188
2013	154 274	54 713	50 384	7 123	3 232	38 822
2014	159 162	47 830	60 511	5 236	3 400	42 185
2015	172 997	63 061	67 065	6 513	2 167	34 191
2016	173 709	62 551	65 163	10 183	4 814	30 998
2017	178 077	75 451	60 930	11 809	4 736	25 151
2018	202 358	88 883	64 515	17 728	19 440	11 792
2019	196 967	90 663	63 462	16 869	15 206	10 767
2020	192 393	63 064	84 747	15 225	21 330	8 027

Tabulka 4: Produkce a nakládání s čistírenskými kaly (v tunách) v ČR v letech 2009-2020 (ČSÚ, 2021).

Čistírenské kaly jsou nosičem energie a živin, které lze využít jako organické hnojivo. Zejména organická hmota obsažená v kalech z čistíren odpadních vod se pohybuje od 50 do 70 % celkové pevné látky, včetně bílkovin, sacharidů a lipidů. Je důležité zmínit, že chemické složky spolu s živinami, je nutné brát v potaz

při zvažování konečného uložení kalů z čistíren odpadních vod. Surový kal z čistíren odpadních vod nelze přímo použít jako zemědělské hnojivo, protože by mohlo způsobit nevratná poškození půdy a rostlin z důvodu působení fytotoxických a patogenních nestabilních a škodlivých látek. Proto je nutné provádět udržitelné zpracování kalů, které splňuje požadavky na účinnou recyklaci zdrojů bez dodávek škodlivých látek lidem nebo životnímu prostředí. Z tohoto hlediska byla v několika zemích podporována přeměna surových kalů z čistíren odpadních vod na bezpečné a stabilní produkty, jako jsou úpravy půdy a hnojiva, které jsou potencionálními nosiči energie (Wang et al. 2020).

V poslední době je zpracování čistírenských kalů velkým problémem. Může za to vydatný nárůst počtu obyvatel ve městech a jejich okolí. Zároveň se na tomto problému podílí časté změny životní úrovně, které mají za následek ohromnou spotřebu vody a s tím související vypouštění použité vody do povrchových vod, respektive vodních toků. Organické a anorganické zatížení vypouštěných vod způsobilo zhoršení kvality povrchových vod až do té míry, že se musely považovat za tzv. mrtvé ekosystémy. Problém je v tom, že vody, do kterých byly všechny „produkty civilizace“ vypuštěné, představovaly především zdroje pitné vody. Jejich znečištění představovalo zátěž na lidské zdraví (Iticescu et al. 2015).

Čištění odpadních vod produkovaných domácnostmi, ale i průmyslem, vede sice k lepší kvalitě vyčištěné vody, ale i k výrazně většímu objemu odpadních kalů. Po zveřejnění enviromentálních programů, které se zabývají čištěním vod a využíváním kalů, se bohužel množství čistírenských kalů na celém světě výrazně zvedla. Jejich optimální zpracování a zužitkování závisí na množství uvolněných financí pro investice a využití vhodného podnikatelského přístupu (Murariu et al. 2015).

4.2.2 Primární kal a jeho parametry

Primárním kalem je kal vzniklý mechanickým přečištěním odpadní vody, který se usadil v usazovací nádrži a je tvořen nerozpustnými látkami. Obvykle má zrnitou strukturu a obsah sušiny je mezi 2,5 a 5 %. Je tvořen jak inertními, tak organickými složkami, kde přibližně 20-40 % přísluší látkám inertním a 60-80 % organické hmotě (Lyčková et al. 2008).

4.2.3 Aktivovaný kal a jeho parametry

Druhým významným druhem kalu je kal aktivovaný, který je nezbytnou součástí, ale i produktem biologických procesů čištění odpadních vod. Od primárního kalu se liší jak vločkovitou strukturou, tak i procentuálním množstvím sušiny, které dosahuje přibližně 0,5 – 1,5 % (Lyčková et al. 2008). Na druhou stranu poměr inertních složek a organické hmoty se příliš neliší.

Jak již bylo zmíněno, aktivovaný kal je směsnou kulturou různých mikroorganismů, které se shlukují do formy zoogleí. Jsou v něm zastoupeny bakterie (např. rody *Pseudomonas, Bacillus, Mycobacterium, Micrococus* aj.), nitrifikační bakterie (*Nitromonas, Nitrobacter*), houby, plísně, kvasinky, ale i vláknité mikroorganismy (např. *Spirulina albida, Leptomitus* aj.). Složení kultur aktivovaného kalu je velmi rozdílné a v případě, že převládnou vláknité mikroorganismy, tak se mohou objevit technologické potíže se sedimentovatelností a ztíženým zahušťováním kalu (Richter, 2014). Kromě mikroorganismů se v aktivovaném kalu mohou vyskytovat i některé vyšší organismy jako například protozoa, vířníci a hlístice. Přítomnosti prvoků je možno využít pro odhad stavu aktivovaného kalu (Lyčková et al. 2008).

Aktivovaný kal se v ČOV nachází v několika různých variantách. V prvé řadě je přidáván do mechanicky přečištěné vody, kde dochází k jeho množení díky biochemické degradaci organických látek. V poslední fázi čištění vody se část tohoto aktivovaného kalu vrací v rámci technologického procesu zpět, aby byla znovu použita pro další čištění odpadní vody, zatímco přebytečná masa kalu je odstraněna.

Spojením primárního a přebytečného aktivovaného kalu vzniká kal surový, který je určen k dalšímu zpracování. Před dalším zpracováním se surový kal, nebo jeho jednotlivé složky před spojením, zahušťují tak, aby se zvýšilo množství sušiny a snížil jeho celkový objem.

4.2.4 Další druhy kalu

Mezi další druhy kalu, vznikající v průběhu čištění odpadních vod patří kaly terciální, které jsou produktem terciálního čištění odpadních vod, které slouží k dalšímu snížení koncentrace anorganických sloučenin dusíku, fosforu a případně dalších znečišťujících látek jako například těžkých kovů. Toho je dosaženo použitím

srážecích činidel jako je například síran železitý, hlinitých solí či vápenného mléka. Při vyšším pH jsou z vody vysráženy ve formě hydroxidů i ionty těžkých kovů jako např. olova, kadmia, cínu či niklu. Vzniklý kal je oddělitelný sedimentací či filtrací (Richter, 2014).

Dále je vhodné zmínit i kal vyhnilý, který je produktem, což je kal stabilizovaný za anaerobních podmínek, přičemž dále se o této metodě zmíníme v jedné z následujících kapitol textu.

4.2.5 Vybrané kontaminanty čistírenského kalu

Jak již bylo dříve naznačeno, surový kal může obsahovat různé kontaminanty, které jsou více či méně nebezpečné. V první řadě se může jednat o patogenní organismy, které se do kalu dostanou z původních odpadních vod a v případě špatného zpracování kalu by mohlo dojít k dalšímu šíření infekce. Mezi tyto organismy patří různí parazité (např. tasemnice či *Toxoplasma gondii*), jejichž cysty, vajíčka či larvy se z odpadních vod odstraňují sedimentací, ale i patogenní bakterie (např. rod *Salmonella, Vibrio cholerae* či *Escherichia coli*) a viry (např. *Hepatitis, Rotavirus* či *Enterovirus*) (Andreoli et al. 2007). Přítomnost právě takových patogenních kontaminantů je častým důvodem pro nemožnost použití čistírenského kalu v zemědělství.

Druhou skupinou kontaminantů jsou organické sloučeniny, které se do odpadních vod a následně i do kalů mohou dostat především z průmyslové výroby, ale i díky využívání různých chemických prostředků, případně vyloučením z lidského těla, což se týká především různých léků. Problémem této kontaminace je vysoká rezistence proti biochemickému rozkladu a zároveň v mnoha případech biologická aktivita, což ve finále může vést k negativním dopadům na lidskou populaci díky negativním vlivům např. rezistence proti antibiotikům či potenciální rakovinotvornosti (Ministerstvo životního prostředí, 2020). Mezi tyto látky patří například polychlorované bifenyly, různá rozpouštědla (Andreoli et al. 2007), ale i syntetické hormony (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

Třetí významnou skupinou kontaminantů jsou kovy, které se mohou v menších koncentracích vyskytovat v komunální odpadní vodě, ale jejich zásadním zdrojem jsou odpadní vody průmyslové, a to především vzniklé v chemickém průmyslu. Obsah těžkých kovů v kalech je velmi závislý na charakteristice odpadní vody, např. jejím

pH – v zásaditém prostředí se sloučeniny olova a dalších kovů stávají méně rozpustnými, a proto se v tomto prostředí vyskytují v kalech ve vyšších koncentracích. Zároveň jsou ale kovy a jejich sloučeniny ovlivněny přítomností dalších látek a například přítomnost chelatačních činidel zvyšuje toxicitu mědi (Andreoli et al. 2007). V následující tabulce číslo 5 je přehled vybraných kovů a účinnosti jejich odstranění z odpadní vody (převzato, přeloženo a zkráceno z (Andreoli et al. 2007). Pokud bylo možné, byly zvoleny koncentrace v komunálních odpadních vodách.

Polutant	**Čistící proces**	**Odstraněno**	**Koncentrace na odtoku**
kadmium	Primární	7 %	-
	Aktivovaný kal	24 %	19 ± 17 µg / l
olovo	Primární	20 %	-
	Aktivovaný kal	6,5 %	58 ± 75 µg / l
měď	Primární	18 %	-
	Aktivovaný kal	82 %	61 ± 40 µg / l
chrom	Primární	16 %	-
	Aktivovaný kal	82 %	40 ± 18 µg / l
rtuť	Primární	22 %	-
	Aktivovaný kal	33 - 94 %	n.d. – 0,9 µg / l
nikl	Primární	6 %	-
	Aktivovaný kal	43 %	61 ± 45 µg / l
zinek	Primární	26 %	-
	Aktivovaný kal	0 - 92 %	49 – 510 µg / l

Tabulka 5: Účinnost čistících procesů na vybrané kovy (Andreoli et al. 2007).

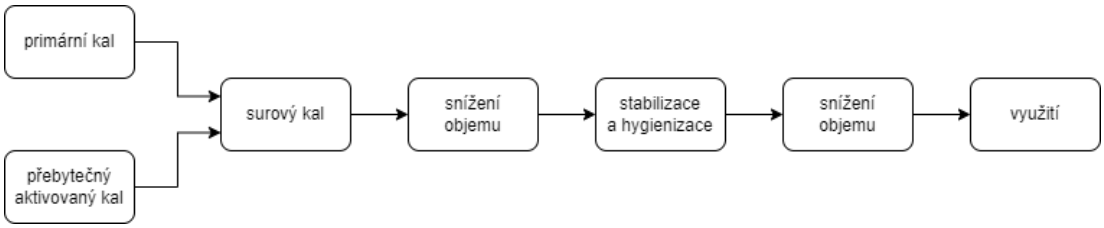
Jak vyplývá z předchozí tabulky, značná část kovů v průběhu čištění odpadní vody přechází do kalu. Vzhledem k faktu, že jedním z využití kalu je i jeho aplikace v zemědělství jako bohatého zdroje organických látek, je nutno brát ohled i na potenciální obsah rizikových prvků a množství, které je možné vnést do zemědělské půdy. Tyto hodnoty jsou na celoevropské úrovni definovány již dříve zmiňovanou směrnicí 86/278/EHS následovně v tabulce 6 (Rada Evropské unie 1986).

	Mezní hodnoty koncentrace daného kovu	
Polutant	**V sušině (mg/kg sušiny)**	**Ročně vnesené do zemědělské půdy (kg/ha/rok)**
kadmium	20–40	0,15
olovo	750-1200	15
měď	1000-1750	12
chrom	-	-
rtuť	16-25	0,1
nikl	300-400	3
zinek	2500-4000	30

Tabulka 6: Přehled mezních hodnot koncentrací v kalech používaných v zemědělství v mg/kg sušiny a jejich množství, které je možné ročně vnést do zemědělské půdy na základě desetiletého průměru v kg/ha/rok (dle směrnice 86/278/EHS přílohy 1B a 1C).

4.3 ZPRACOVÁNÍ ODPADNÍCH KALŮ

Vzhledem ke snaze o celkové snížení produkce čistírenského kalu je jedním z prvních a také mnohdy opakovaných kroků snížení objemu surového kalu. Vzhledem k výše zmíněnému obsahu sušiny lze tento krok považovat za klíčový. Zjednodušené schéma návaznosti jednotlivých technologických kroků je zobrazeno na obrázku 2, kde snížení objemu kalu předchází i následuje hygienizaci a stabilizaci, nicméně při použití některých metod je možné tyto kroky považovat za souběžné.

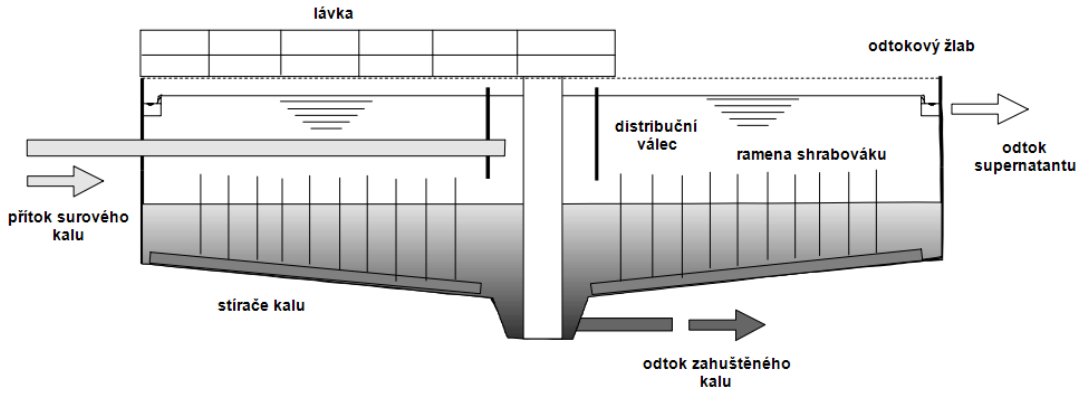


Obrázek 2: Zjednodušené schéma vzniku surového kalu a procesních kroků jeho zpracování až ke konečnému využití.

4.3.1 Zahušťování

Zahušťování kalu by mělo následovat ihned po jeho separaci a jeho cílem je dosažení přibližně 4,5-6% koncentraci sušiny, což je obvykle přibližně trojnásobná koncentrace oproti kalu syrovému (Lyčková et al. 2008) (Mach, 2014). K zahušťování je možno využít řady metod jako například prosté sedimentace, řízeného gravitačního zahuštění či odstřeďování. Každá z těchto metod má své výhody i nevýhody, stejně jako umožňuje dosáhnout jiné koncentrace sušiny (Mach, 2014).

Gravitační zahušťování využívá rozdílu specifické hmotnosti pevných částic kalu a vody. Schéma gravitační zahušťovací nádrže je zobrazeno na obrázku 3. Obvykle se jedná o kruhové nádrže, přičemž surový kal je přiváděn do jejich středu, zahuštěný kal je odváděn ze spodní části nádrže a supernatant, což je kalová voda, je přiváděn zpět do provozu (Andreoli et al. 2007). Tento způsob zahušťování je nejvhodnější pro primární kaly o nízké koncentraci sušiny, chemické kaly, biologické kaly z procesu se smíšenou biomasou, případně tytéž smíšené s kaly primárními (Lyčková et al. 2008). Tyto nádrže jsou často zařazeny před anaerobní stabilizaci, přičemž mohou sloužit i jako zásobník surového kalu pro jeho zpracování (Mach, 2014).



Obrázek 3: Průřez gravitační zahušťovací nádrží. Převzato a přeloženo z (Andreoli et al. 2007)

Další metodou, používanou především u velkých čistíren odpadních vod, je odstřeďování (Mach, 2014), které může být doprovázeno i dezintegrací buněk přítomných mikroorganismů za vzniku buněčného lyzátu, což je katalyzátor

methanové anaerobní fermentace a tím může vést ke zvýšení produkce bioplynu (Lyčková et al. 2008).

4.3.2 Odvodňování

Zmenšení objemu kalu odstraněním přebytečné vody je klíčové pro další zpracování či transport a v konečném důsledku i pro redukci nákladu na zpracování, využití a likvidaci kalů. Existuje řada způsobů odvodnění a několik z nich jich je dále představeno (Lyčková et al. 2008).

K přirozenému odvodňování je možno využívat kalová pole, kalové laguny či usazovací nádrže odpadních kalů. Zatímco kalová pole jsou uměle vytvořenou mělkou nádrží s drenážní vrstvou, kalové laguny mají dno přirozené bez drenáže. V kalových polích dochází k odvodnění jak odvodem vody drenáží, tak jejím vypařováním. Odvodněný kal bývá z pole převážen k dalšímu zpracování a tento způsob je investičně i časově nákladný a závisí i na klimatických faktorech. Kalové laguny plní zahušťovací i odvodňovací funkci a je nezbytné jich mít k dispozici několik, aby byl umožněn plynulý provoz. (Lyčková et al. 2008).

Usazovací nádrže je možné rozdělit dle jejich následného využití na ty, kde je plánována těžba usazené pevné fáze a na ty, kde je plánována na místo těžby rekultivace. V druhém případě se jedná o dlouhodobý projekt a je nezbytné počítat s nutností vsakování vody do dna nádrže (Lyčková et al. 2008).

Odvodňování je možno provádět i strojně, a to například opět odstřeďováním (Lyčková, at al, 2008), ale i pomocí tlakové flotace, což je moderní metoda, při které je vzduch vháněn do roztoku za zvýšeného tlaku, díky čemuž je v tomto roztoku rozpuštěn. V okamžiku snížení tlaku dojde k tvorbě malých bublinek, které k hladině mohou nést jiné malé částečky (Andreoli et al. 2007).

4.4 STABILIZACE A HYGIENIZACE KALŮ

Surový čistírenský kal je ve své podstatě plný patogenních organismů, snadno podléhá hnilobnému rozkladu a stává se původcem silného zápachu. V průběhu času došlo k vývoji stabilizačních procesů, jejichž smyslem je stabilizace biodegradovatelné složky organického materiálu v kalu a tím i snížení rizika

hnilobných procesu, ale i koncentrace patogenů (Andreoli et al. 2007). Stabilizovanost kalů je možno posoudit podle kritérií, která se řadí do tří skupin:

1. Přímá – toxicita, infekčnost, zápach
2. Nepřímá – respirační rychlost, enzymová aktivita, mikrobiologické složení aj.
3. Doplňující – odvodnitelnost, viskozita aj.

Množství a kvalita organických látek v kalu je zásadním faktorem pro jeho posuzování a zároveň na něm závisí fyzikální vlastnosti a chování kalu. Všechna používaná kritéria pro určení stabilizovanosti čistírenského kalu jsou do jisté míry měřítkem množství a rozložitelnosti přítomných organických látek (Lyčková et al. 2008). Tématem nedílně navazující na stabilizaci kalů je jejich hygienizace, ke které je prakticky možno použít jakýchkoli metod, které usmrcují mikroorganismy. Tyto metody lze třídit na tři skupiny podle jejich umístění v technologické lince zpracování čistírenských kalů na následující:

1. Metody před procesem stabilizace
2. Metody tvořící součást procesu stabilizace
3. Metody následující po stabilizaci

Z jiného úhlu pohledu je možné tyto metody dělit na chemické, fyzikální a biotechnologické, které obvykle jsou součástí stabilizace (Lyčková et al. 2008).

Co se týče metod používaných v České republice, je možné se dle publikace vydané v květnu 2019 Sdružením oboru vodovodů a kanalizací dozvědět, že v České republice převažuje, co se týče základní úpravy čistírenských kalů metoda studené stabilizace a anaerobního vyhnívání. Co se týče doúpravy, tak velká část provozovatelů žádnou neprovádí a z těch používaných převažuje vápnění a aerobní stabilizace (Wanner, 2019).

Dále rozeberu podrobněji několik příkladů používaných technologií.

4.4.1 Anaerobní stabilizace

Tento způsob stabilizace je znám již od pozdního 19. století a díky své efektivitě a robustnosti může sloužit jak v malých, tak i průmyslových čistírnách odpadních vod (Andreoli et al. 2007). V průběhu anaerobní stabilizace dochází díky využití směsné kultury mikroorganismů k přeměně většiny biologicky rozložitelné

organické hmoty a tím ke stabilizaci a hygienizaci kalu za vzniku bioplynu, který je tvořen převážně methanem a částečně oxidem uhličitým. Konečným produktem tohoto procesu je kal vyhnilý, který je možno dále upravovat či přímo využít (Lyčková et al. 2008). Co se týče obsahu organických látek, dochází v průběhu anaerobní stabilizace k jejich poklesu z cca 70 % na cca 50 % při stanovení žíháním. Dochází i k významnému snížení výskytu patogenních organismů (Černý, 2019).

Tento proces probíhá ve třech fázích (Andreoli et al. 2007):

1. Dochází k enzymatickému rozkladu velkých organických sloučenin, jako je například celulóza a bílkoviny, za vzniku organických rozpustných látek a anorganických vedlejších produktů jako je oxid uhličitý a amoniak.
2. Mikroorganismy přeměňují produkty první fáze na nízkomolekulární organické sloučeniny, kyseliny octovou a propionovou, vodík a oxid uhličitý.
3. Začnou působit dvě skupiny organismů produkujících methan. První z nich ho tvoří z oxidu uhličitého a vodíku, zatímco druhá přeměňuje octany na methan a uhličitany.

Tento proces ovlivňují několika základní faktory. Prvním z nich je teplota procesu, která se odvíjí dle použité kultury mikroorganismů. Druhým faktorem je pH, které je nutno udržovat neutrální mezi 6,5-7,5. Schopnost růstu mikroorganismů je ovlivněna přítomností živin včetně některých stopových prvků, a naopak může být inhibována látkami toxickými a inhibujícími (Lyčková et al. 2008).

Vznikající bioplyn je možno energeticky využívat a tím dosáhnout úspory v nákladech na čištění odpadních vod, což může vést nejen k soběstačnosti, ale v některých případech i k přebytkové energii, kterou tato pracoviště mohou dodávat do sítě. Spálením jednoho normovaného krychlového metru je možné získat přibližně 4,2 kWh tepelné energie a 2,3 kWh energie elektrické (Ministerstvo životního prostředí, 2020). Porovnáním bioplynu o obsahu 70 % methanu se zemním plynem, který je směsí methanu, propanu a butanu, zjistíme že bioplyn má přibližně 62,5% výhřevnost oproti zemnímu plynu (Andreoli et al. 2007).

4.4.2 Hygienizace páleným či hašeným vápnem

Levnou metodou hygienizace, která je velmi rozšířena v České republice je vápnění. Z hlediska provozovatelů tato metoda není považována za dlouhodobé řešení a nese s sebou několik komplikací (Wanner, 2019), které rozebereme dále v textu.

Tato metoda byla popsána již v průběhu 70. let 20. století (Farrell, 1974) a má dvě varianty dle toho, zda se používá vápno pálené či hašené. V případě, že je použito vápno pálené, dojde k hygienizaci pomocí zvýšené teploty a zároveň zvýšeného pH, zatímco při použití vápna hašeného dojde pouze ke zvýšení pH.

Při smísení páleného vápna s kalem dojde k jeho přeměně na vápno hašené, což je doprovázeno vývojem tepla. Pro dostatečnou hygienizaci je nutno dosáhnout teploty 55 °C a pH nad 12 po dobu více než dvou hodin. Při použití vápna hašeného je nezbytné dosažení minimálního pH 12 a toto pH je nezbytné udržet po dobu 3 měsíců. Zásadní komplikací při použití páleného vápna je nutnost jeho skladování tak, aby se zabránilo zvlhnutí pomocí vzdušné vlhkosti. Hašené vápno na druhou stranu tato specifika nevyžaduje, nicméně jeho použití se vyplatí až v případě vyšší spotřeby (Andreoli et al. 2007). Využitím vápnění také dochází k významnému nárustu množství kalu, neboť je nezbytné počítat s nutným poměrem CaO přibližně 110-300 kg na jednu tunu kalu. Dalšími komplikacemi je nutnost důsledné homogenizace směsi kalu a vápna a vznik amoniaku jako vedlejšího produktu, který je nutno likvidovat a předcházet jeho uvolnění do ovzduší. Výhodou je dobrá struktura hygienizovaného kalu, který je následně vhodný pro použití na kyselých půdách a vysoké hygienické zabezpečení produktu. Metodu je vhodné kombinovat s aerobní stabilizací (Ministerstvo životního prostředí, 2020), která bude zmíněna dále.

4.4.3 Sušení

Pro některé způsoby využití kalů je nezbytné z nich odstranit převážnou většinu vody. K tomu slouží celá řada způsobů sušení, které se mohou lišit jak teplotou sušení, tak i způsobem jakým se dodává energie nutná pro sušení. Výsledný obsah sušiny závisí především na požadavcích navazující technologie a může dosahovat i více než 90 % sušiny (Ministerstvo životního prostředí, 2020). Obecně lze říci, že oproti mechanickým způsobům snížení obsahu vody, jako je například lisování, je sušení výrazně dražší, nicméně výsledný produkt má značně zredukovaný objem a je

vhodný pro celou řadu aplikací od použití jako hnojivo, přes skládkování až po jeho energetické využití (Lyčková et al. 2008).

V průběhu sušení kal ztrácí vodu odpařováním za pomoci zdroje tepla. Působením tepla dochází i k inaktivaci mikroorganismů. Je nutné, aby před sušením byl kal stabilizován a odvodněn přibližně na 20-35 % sušiny (Andreoli et al. 2007). Nejvýznamnějším parametrem ovlivňujícím sušící proces je teplota, která přímo ovlivňuje množství ztracených těkavých látek. Zároveň s rostoucí teplotou sušení roste i riziko vzniku výbušného prostředí a v případě teplot dosahujících 130-150 °C by mohlo dojít až k samovznícení (Raček, et al, 2018). Obecně lze typy sušících zařízení rozdělit na dva základní:

1. Kontaktní sušárny, kde je teplo přenášeno pomocí kontaktních ploch, podobně jako u tepelného výměníku. Teplonosným médiem je obvykle pára nebo olej. Jako příklad těchto sušáren může sloužit sušárna disková, kde je teplo vedeno do rotujících disků, které svým pohybem kal posouvají a zároveň provzdušňují. (Raček, et al, 2018)
2. Konvenční sušárny, ve kterých je kal v přímém kontaktu s horkým vzduchem, který odnáší vlhkost, ale i plyny a prach. Tento druh je používaný častěji a typickými, velmi rozšířenými zástupci, jsou sušárny fluidní, rotační bubnové a pásové (Raček, et al, 2018).

Fluidní sušárny využívají stoupajícího proudu plynů, který nese částice kalu až do jejich vysušení. Obsah sušiny získaného produktu se pohybuje kolem 90 % (Lyčková et al. 2008). Výhodou tohoto typu je, že pracují za teploty 85 °C, která je dostatečně nízká a tedy bezpečná, a voda se odpařuje díky podtlaku, čímž dochází k eliminaci úniku škodlivin z cirkulujícího plynu (Raček, et al, 2018).

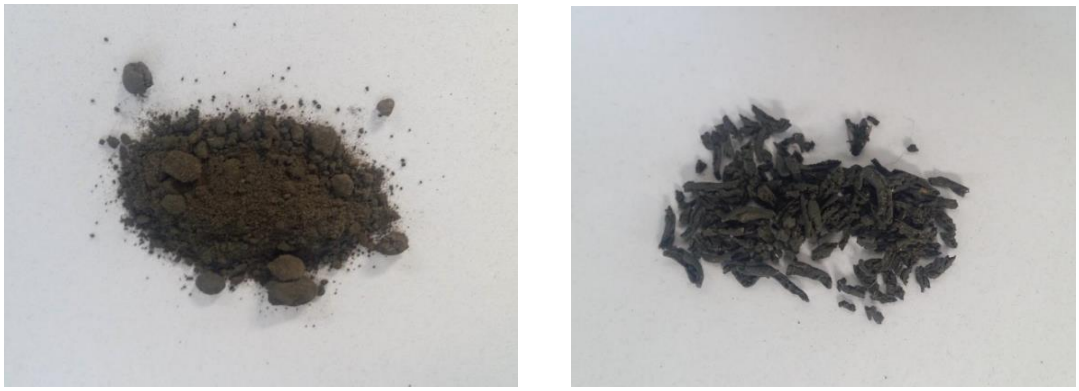
U rotační bubnové sušárny je kal přiváděn z jedné strany otáčejícího se válce, který je mírně skloněn. Kal bubnem prostupuje a díky rotaci se přesypává, čímž se mísí s horkým vzduchem. Na konci bubnu z něj vypadává již vysušený kal (Ministerstvo životního prostředí, 2020). Z technologických důvodů je často tento vysušený kal částečně přimícháván do příchozího, neboť obsah sušiny na vstupu vyšší než 65 % snižuje riziko ucpání. Výsledný obsah sušiny je opět více než 90 % (Lyčková et al. 2008). Ucpávání je způsobeno převážně strukturou vstupního kalu, která je obvykle kašovitá a přidáváním vysušeného produktu se vylepšuje struktura vstupního

materiálu a tím lze dosáhnout i optimálního sušícího účinku. To může ovlivnit nejen dobu sušení, ale například i délku sušárny samotné v případě pásových sušáren (Li, 2022), neboť v jejich případě je kal rozprostřen na pásech pohybujících se v proudu teplonosného plynného média. Tyto pásy jsou obvykle prodyšné, aby byl zajištěn co nejlepší kontakt mezi médiem a sušeným kalem. Výhodou je nízký podíl prachových částic v odtahovém plynu, neboť kal není nijak mechanicky namáhán (Lyčková et al. 2008).

Specifickým typem sušáren jsou sušárny solární, které mohou kombinovat dva až tři způsoby přenosu tepla – zářením, konvenční i kontaktní (Raček, et al, 2018). Co se týče konstrukce, jsou solární sušárny založeny na stejném principu jako skleníky. Kal je rozprostřen na podkladu, kde za průběžného obracení dochází k odparu vody. Obvykle je zařízení vybaveno i ventilátory zajišťujícími optimální proudění vzduchu (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

Tak jak jsou rozdílné technologie sušení, je možné vidět i rozdíly ve finálním produktu. Příklady sušeného kalu je možné vidět na obrázku 4, kde porovnáváme sypký vysušený kal z kontaktní sušárny s produktem sušárny pásové, která produkuje větší částice. Je také možné za pomoci aditiv získat produkt peletizovaný, což kromě nižší prašnosti umožňuje zlepšit vlastnosti produktu vzhledem k jeho následnému využití (Raček, et al, 2018).

A **B**

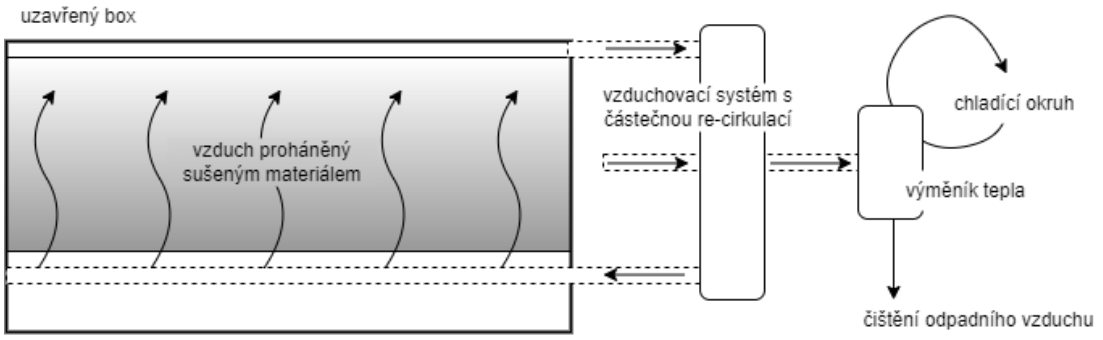


Obrázek 4: Ukázka vzhledu vysušeného produktu z kontaktní lopatkové sušárny jako zástupce jednoho typu (A) a konvenční pásové sušárny jako zástupce druhého typu sušáren (B). (Raček, et al, 2018).

4.4.4 Biosušení

Odpadní vody a jejich čištění můžeme rozdělit na tři fáze: pevné, kapalné a plynné. Pevné látky se upravují v několika částech, jde zde především o čistírenský kal zbavený vody, ve kterém je největším problémem přítomnost vázané vody v kalu. Kal se upravuje biosušením, sušením. Tato metoda je vedena jako biologická a již byla aplikována na tento odpad (dos Reis et al. 2020).

Specifickým způsobem sušení je tzv. biosušení, které je v podstatě kombinací aerobní biodegradace rozložitelných organických látek podobně jako v prvních stádiích kompostování, a to za průběžného odstraňování vlhkosti kontrolovaným provzdušňováním. Zatímco principy jsou velmi podobné kompostování, jejich cíle a také realizace je značně rozdílná. Biosušení probíhá v reaktoru tak, aby nedocházelo ke ztrátám tepla vzniklého biologickou aktivitou materiálu, a jeho cílem je za co nejkratší čas vyprodukovat co nejkvalitnější recyklované palivo. Toho je dosaženo několika cestami. Za prvé zvýšením energetického obsahu jak odstraněním vlhkosti v matrici za minimální biodegradace organických látek a relativně nízké úrovni odstranění těkavých pevných látek (dos Reis et al. 2020), za druhé zprostředkováním zapojení biogenního materiálu do paliva a také díky vylepšení mechanických vlastností produktu díky snížení jeho adhezivity. Mimo to biosušení vede i k částečné stabilizaci a hygienizaci produktu (Velis et al. 2009) . Zjednodušené schéma reaktoru pro biosušení je zobrazeno na obrázku 5.



Obrázek 5: Zjednodušené schéma reaktoru pro biosušení. (Velis et al. 2009)

Biosušení samotné probíhá ve čtyřech základních fázích, které vyžadují různé podmínky (dos Reis et al. 2020). Detailněji jsou rozebrány v kapitole 4.6, která se

zabývá porovnáním biosušení a kompostování. Optimálního výkonu při biosušení je možné dosáhnout dobrým návrhem reaktoru, přípravou vstupního materiálu a také kontrolou celého procesu. Struktura vstupního materiálu ovlivňuje schopnost průchodu vzduchu masou, a tedy i efektivitu sušení. Využití míchání uvnitř reaktoru zajišťuje homogenitu materiálu a tím stabilitu podmínek v průběhu sušení. Množství vháněného vzduchu ovlivňuje rychlost procesu a doba, kterou materiál tráví v reaktoru ovlivní stupeň dokončení biochemických i fyzikálních procesů (Velis et al. 2009).

Všechny tyto faktory ovlivňují nejen průběh procesu, ale i výslednou kvalitu produktu. Při porovnání biosušení za vyšší a nižší ventilace, tak mají nejen rozdílné teplotní profily v průběhu procesu, k odstranění největšího podílu vody dochází v různých dnech, ale u více ventilovaného biosušení dochází i k nižším energetickým ztrátám (Yu et al. 2022).

Biosušení se používá k vysoušení biologicky rozložitelných odpadů především k výrobě paliva. Nicméně vysušený materiál se dá využít i jinak. Čistírenský kal by mohl být použit jako hnojivo v zemědělství. Při testování biosušení jako metody pro předúpravu odvodněného, anaerobně stabilizovaného čistírenského kalu k použití v zemědělství jako hnojiva, bylo zjištěno, že lze odstraňovat látky, které hnojiva pro zemědělství nemají obsahovat, jako jsou antibiotika a endokrinní distruptory (Pilnáček et al. 2019).

Technologie biosušení je jedním z podporovaných cílů současného aplikovaného výzkumu i v České republice. V roce 2018 byl uplatněný užitný vzor na semi-kontinuální reaktor pro biosušení, který je složen ze dvou reaktorových komor a využívá čistírenský kal obohacený o vylehčující složku. Vznikající teplo je efektivně využito k sušení a není nutné použití externího zdroje tepla, takže energetická bilance při spalování organického materiálu je kladná (Innemanová et al. 2018). Na obrázku 6 je zobrazeno poloprovozní zařízení se dvěma dvouplášťovými válci daných na sebe a propojeny propadávajícím dnem. Zařízení má systém provzdušnění, odvodu vlhkého vzduchu a shromažďování přebytkového tepla ke zpětnému využití (Innemanová et al. 2018).

Obrázek 6: Poloprovozní zařízení pro biosušení (Innemanová et al. 2018).

4.4.5 Další metody

V současné době se pro úpravu čistírenských kalů využívá metod kompostování, anaerobní vyhnívání a termochemické procesy, jako je spalování, pyrolýza nebo zplyňování (Raheem et al. 2018).

Aerobní stabilizace je proces nápadně podobný procesům v aktivovaném kalu, nicméně vzhledem k nedostatku organického substrátu, který by mikroorganismy mohly zpracovávat, jsou nuceny zpracovávat vlastní energetické rezervy a přibližně 75-80% buněčné hmoty je přeměněno na oxid uhličitý, vodu a amoniak, který je dále přeměněn na dusičnany. Tento proces obvykle probíhá v provzdušňovací nádrži a existuje několik typů procesů běžně používaných pro stabilizaci kalu. Zásadní pro správně provedenou aerobní stabilizaci je dostupnost kyslíku, neboť při jeho nedostatečné přístupnosti se aerobní procesy změní v anaerobní, což je doprovázeno mimo jiné zápachem (Andreoli et al. 2007).

Další možností hygienizace je využití pasterizace, kdy je surový kal v tekuté podobě zahřát na teplotu alespoň 70 °C po dobu 30 minut. Tato metoda často předchází anaerobní stabilizaci, neboť díky částečnému štěpení napomůže zvýšit produkci

bioplynu. Zároveň však znamená vyšší investiční náklady a energetickou náročnost procesu (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

4.5 VYUŽITÍ ODPADNÍCH KALŮ

Jak již bylo probíráno, kaly jsou bohatou směsí různých látek organického i anorganického, které je možné a vhodné dále využívat. Ať už se bavíme o získávání jednotlivých komponent, využití této směsi jako celku či energetickém využití. Využití kalů jako zdroje surovin v rámci recyklačních technologií je v posledních letech významným předmětem zkoumání a je možné věřit, že zde bude postupem času docházet k dalšímu pokroku. Využívání kalů přímo v zemědělství, či k produkci hnojiv je již dlouho známé. Energetickým využitím je již dříve zmiňovaný bioplyn, ale i spalování (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

4.5.1 Získávání surovin – fosfor

V současné době je možno kal využívat k získávání již několika druhů surovin, zde více rozebereme fosfor a biouhel.

Fosfor je jedním z makrobiogenních prvků, a tedy patří mezi základní stavební kameny života. Pro zajímavost, v lidském těle je ho přibližně 2,5 %. Běžně je vyráběn z fosfátových rud, nicméně jejich úplné vytěžení se očekává během následujících 100-120 let. Tento přístup se však stane velmi obtížným a ekonomicky neudržitelným mnohem dříve (Holba, 2012). Udržitelné využívání a recyklace fosforu jsou proto jednou z priorit technologického rozvoje a v současnosti existuje již velké množství přístupů, jakými lze fosfor z kalu získávat, a to jak neodvodněného kalu či kalové vody, tak i z kalu sušeného či z popela vzniklého při jeho mono-spalování (Ministerstvo životního prostředí, 2020). Přestože existuje řada metod, pouze jedna z nich – srážení fosforečnanu vápenatého, je používána v plném provozu na čistírnách odpadních vod. Zásadním problémem při recyklaci fosforu je přítomnost těžkých kovů, které je nutné jako kontaminanty oddělit. Při srážení je možno recyklovat až 40 % fosforečnanů (Holba, 2012), avšak běžněji se účinnost nachází mezi 5-10 %. Cesta mono-spalování se postupně rozšiřuje, v Evropě je tímto způsobem zpracováno až 35 % kalů, avšak v České republice takovéto zařízení ještě neexistuje (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

4.5.2 Biouhel

Další surovinou, kterou je možno získat z čistírenských kalů je biouhel. Tak je nazývána biomasa, která je získána termickým rozkladem za nepřístupu vzduchu, což je princip podobný jako výroba dřevěného uhlí. Tento materiál obsahuje vysoký podíl uhlíku a až 90 % fosforu, který byl přiveden do čistírny odpadních vod. Původně bylo očekáváno, že získaný biouhel bude možno použít v zemědělství, případně díky jeho sorbčním vlastnostem k dočištění odpadních vod. Tyto předpoklady se nepotvrdily, neboť biouhel získaný z kalů má zrnitou strukturu, která mění možnosti přenosu živin, a proto není vhodná pro zemědělství. Další komplikací je přítomnost kontaminantů a složité udržení kontinuální kvality, vzhledem k nemožnosti ovlivnění vstupních surovin (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

Nicméně použití biouhle by mělo mít možnost v oblasti technologií vody. Využití by bylo možné k dočišťování odpadních vod, k sanaci povrchových vod, při úpravě povrchové vody a také zlepšování vlastností vyráběného plynu. Biouhel vyráběný z čistírenských kalů a jeho opětovné využití na ČOV je zatím diskutabilní z hlediska předpisů na kvalitu materiálu k jeho výrobě a také optimalizaci nákladů, které jsou vyšší než u běžného spalování (Šťastný 2019).

4.5.3 Zemědělské využití

Odpadní kaly lze používat v zemědělství, a to jak samostatně, tak i ve směsi s přírodními či umělými hnojivy. Je nutné používat dobře stabilizované a hygienizované kaly z čistíren odpadních vod a mít v povědomí obsah kontaminantů, které jsou jejich aplikací vnášeny do zemědělské půdy (Lyčková et al. 2008).

Z agronomického pohledu je nezbytné se zamyslet nad složením používaného kalu a potřebami rostlin tak, aby bylo možné případně nedostatečně přítomné prvky doplnit z dalších zdrojů. Kaly obvykle obsahují velká množství dusíku a fosforu, zatímco vápník a hořčík je přítomen v menších množstvích. Omezené množství je i u draslíku a je obvykle nutné jej přidávat. Přítomnost stopových prvků je obvykle v množství dostatečném pro vývoj rostlin (Andreoli et al. 2007).

Vzhledem k množství organických látek kaly vylepšují fyzikální, chemické i biologické vlastnosti půd. Upravené kaly mohou být také použity pro vylepšení

vlastností půdy co se týče pH, kdy použití vápnem stabilizovaného kalu může vylepšit vlastnosti kyselých půd (Andreoli et al. 2007).

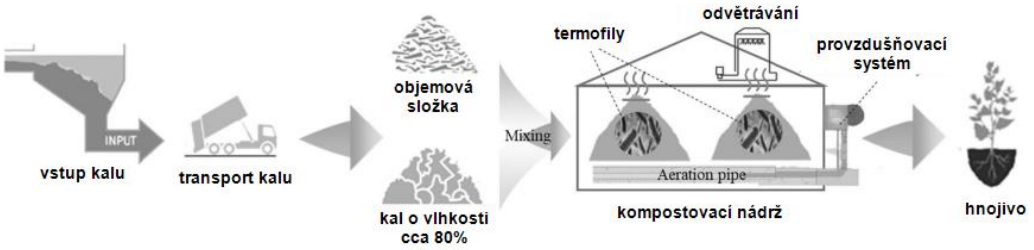
Kal je běžně na zemědělskou půdu aplikován jednou až dvakrát ročně a pro jeho aplikaci se využívá stejných zařízení jako pro aplikaci vody a kejdy. Následně je zaoráván do půdy. Jednou z komplikací je častý nedostatek znalostí o přesném obsahu drobných kontaminantů a nezbytnost pečlivého sledování aplikovaného množství tak, aby nebylo možné překročit určené limity (Lyčková et al. 2008). Tyto limity byly již prezentovány v tabulce 6.

4.5.4 Kompostování

Kompostování je udržitelným procesem, který je plně kompatibilní s konceptem cirkulární ekonomiky a jeho produkt, kompost, může být snadno využit jako organické hnojivo, pokud dosažené teploty zajistí dostatečnou hygienizaci (López-González, 2021). Kompostování je aerobním procesem, při kterém dochází k přeměně biologicky rozložitelných odpadů na organické hnojivo složené z humusových složek, zvané kompost. Jedná se o analogii přeměny organické hmoty v přírodním prostředí. Probíhá v několika základních fázích (Lyčková et al. 2008):

1. Rozklad polysacharidů, bílkovin a tuků je doprovázen uvolňováním tepla, které zahřeje zrající kompost na teplotu 50-60 °C. Tato fáze trvá 2 týdny až 2 měsíce dle podílu dřevní štěpky a zvyšuje se kyselost substrátu.
2. Mění se složení mikroorganismů, klesá teplota na 40-45 °C a za vzniku humusových látek už není možné rozeznat původní odpad.
3. Dozrávající kompost získává hnědou barvu, klesá kyselost substrátu.

Pro kompostování je nutné čistírenský kal míchat s jiným materiálem jakožto objemovou složkou, a to nejčastěji organickým odpadem z domácností a biologickým odpadem jako například dřevo a posečená tráva. Pro správné kompostování je nutné udržet několik zásadních požadavků týkajících se poměru uhlíku a dusíku v kalu, zabezpečení dostatečného provzdušnění a udržení teploty materiálu, stejně jako optimální vlhkosti mezi 40-65 % (Andreoli et al. 2007). Schéma procesu kompostování je znázorněno na následujícím obrázku 7.



Obrázek 7: Schéma procesu kompostování. Kal je smísen s objemovou složkou, následně za provzdušňování dochází k biologickému rozkladu až k zisku konečného produktu, hnojiva. Převzato a přeloženo z (Wang et al. 2021)

Využití kalu pro kompostování je limitováno ochotou provozovatelů s tímto materiálem pracovat, a to především z důvodu certifikace takto produkovaných hnojiv (Wanner, 2019). Pokud odhlédneme od kalů z komunálních čistíren odpadních vod, stojí za zmínku fakt, že kaly vzniklé v papírenském průmyslu nejsou zatíženy jakýmikoli hygienickými riziky a jsou obecně vhodné a využívané pro výrobu kompostů a rekultivačních substrátů (Slejška, 2005).

Kompostování je proces, který je momentálně považován za jednu z nejlepších možností díky své udržitelnosti a integraci do konceptu cirkulární bioekonomiky, k čemuž se současný evropský systém zavázal (Razza et al. 2018). Proces kompostování vytvořil bezpečný a stabilní bioprodukt, kompost, který lze využívat jako organické hnojivo. Vysoké teploty během procesu odstraňují vyskytující se patogeny a zároveň snižují výskyt bakterií odolných vůči antibiotikům přítomných v surovinách (Zittel et al. 2020).

4.5.5 Spalování

Čistírenské kaly je možno spalovat pouze pokud obsahují alespoň zčásti spalitelné složky, což je u běžných typů odpadních kalů organická hmota. Energetická bilance spalování se odvíjí od složení kalu a použité technologie, přičemž kaly obsahující složky s vyšší výhřevností je možné spalovat samostatně, zatímco při vyšším obsahu nespalitelných složek je nutné využívat spoluspalování (Lyčková et al. 2008). Je nutné brát v úvahu fakt, že při spalování dochází k úniku oxidu uhličitého do atmosféry. Obecně jsou metody spalování investičně nákladnější než jiné metody

zpracování, a proto by měl být tento způsob nakládání s kaly omezen pouze na problematické kaly, které vzhledem k obsahu kontaminantů není možné využít jinak (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

4.6 POROVNÁNÍ BIOSUŠENÍ A KOMPOSTOVÁNÍ

Zatímco kompostování je známá technologie, běžně používaná pro zpracování biologického odpadu v různých měřítkách a zpracování čistírenských kalů je pouze jedna z možných aplikací, biosušení je technologie relativně nová a pro kaly z komunálních čistíren odpadních vod je zkoumána až v posledních letech (dos Reis et al. 2020).

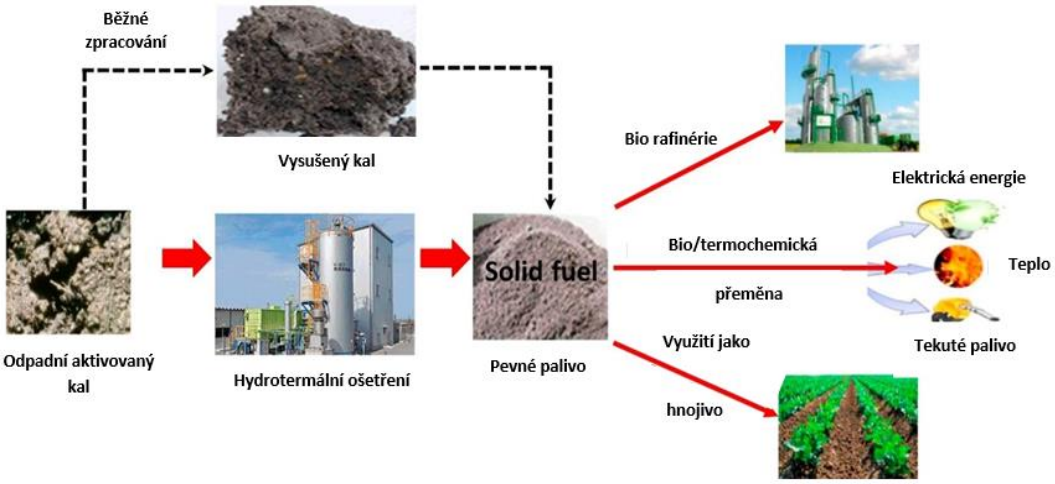
Oba procesy jsou si principiálně podobné, kdy u nich dochází k nárůstů teploty v důsledku aerobního rozkladu organických látek, nicméně jejich provedení se liší. Schémata je možné vidět na obrázcích 5 a 7, přičemž biosušení probíhá v alespoň částečně hermeticky uzavřeném reaktoru (dos Reis et al. 2020), což pro kompostování není nezbytné. Přehled srovnání je v následující tabulce 7. Z něj lze dojít k závěru, že ačkoliv je biosušení technologicky náročnější, lze u něj dojít k pozitivní energetické bilanci díky využití produktu jako paliva. Dále je významným rozdílem vypouštění emisí a spotřeba vody nezbytná pro správně provedený kompostovací proces (Wang et al. 2021).

	Vstupní materiál	Charakteristika a podmínky procesu	Popis produktu a jeho využití	Cena
Kompostování	Obvykle směs kalu s biologicky rozložitelnou objemovou složkou, případně vápnem[2] o vlhkosti 50-60 % a podílem organické hmoty cca 70 %[1]	Proces biooxidace zahrnuje mineralizaci a částečnou humifikaci organické hmoty. Optimální teplota kompostování je 40 – 65 °C, což vede nejen k tlumení aktivity mikroorganismů, ale i redukci obsahu vody, přičemž je nutné udržet dostatečnou vlhkost pro aktivitu mikroorganismů. Je nutný dostatečný přístup kyslíku a doba kompostování je závislá na teplotě a použitých mikroorganismech, cca 24-48 dní[2]	Produkt lze použít jako hnojivo, vlhkost cca 30 % a podíl organické hmoty cca 30-50 %, v průmyslové kompostárně odpovídá hygienickým požadavkům[1]	500 Kč/t + 21 % DPH
Biosušení	Směs kalu s jinou biologicky rozložitelnou objemovou složkou jako například piliny či sláma, o vlhkosti cca 70 %[3]	Biosušení probíhá v reaktoru, který zajišťuje dostatečný přísun vzduchu a jeho odvádění spolu s přebytečným teplem vzniklým biodegradací. V průběhu termofilních fází teplota dosahuje více než 50 °C a celý proces trvá obvykle 24 dní v průmyslovém měřítku[3]	Produkt je vhodný pro spalování i zemědělské využití[4], v průmyslovém měřítku je obsah sušiny v produktu cca 67 %[3]	Pro zpracování 150 000 tun kalu je v průmyslovém měřítku třeba 0.5MW energie a 9.3MW energie je získáno[3]

Tabulka 7: Porovnání procesů kompostování a biosušení z pohledu vstupního materiálu, produktu, ale i charakteristik procesu a technologického uspořádání, doplněno o cenu zpracování. Pro kompostování čerpáno z (López-González et al. 2021)[1], (Wang et al. 2021)[2] a cena byla získána z (Kompostárna Hořátev). Pro biosušení byly informace získány z (dos Reis et al. 2020)[3] a (Yu et al. 2022)[4].

4.7 EKONOMICKÉ A ENVIRONMENTÁLNÍ DOPADY: BIOSUŠENÍ A KOMPOSTOVÁNÍ

Čistírenský kal, který produkují čistírny odpadních vod, může být považován za problém vůči životnímu prostředí. Důvodem, proč je životní prostředí znečišťováno, je přítomnost kontaminujících látek (polycyklické aromatické uhlovodíky, dioxiny, furany, těžké kovy atd.), názorně zobrazeno obrázkem 8. Nové způsoby zpracování kalů, které nejsou tak nákladné, vedou k ekologické a bezpečné likvidaci. Regenerace enzymů, biopesticidů, bioplastů, proteinů a fosforu je diskutována jako prostředek k vizualizaci kalu jako potenciální příležitosti místo způsobování problémů (Raheem et al. 2018).



Obrázek 8: Vlivy na životního prostředí (Raheem et al. 2018).

Biosušení je proces, který neumožní únik tepla do atmosféry při sušení dříve odvodněného čistírenského kalu, protože probíhá v hermeticky uzavřeném reaktoru. Vše probíhá skrze biologické aktivity, které v kalu degradují organickou hmotu a uvolňují teplo. Uvnitř matrice dochází vlivem zvyšující se teploty k rozbití částic kalu a následnému odpařování vodních seskupení a zároveň se zvyšuje energie, aby se tyto vodní frakce odstranily a současně zůstaly v matrici. Vpouštění vzduchu usnadňuje kontakt mikroorganismů aerobního rozkladu s kyslíkem, aktivuje biologickou aktivitu, a odpařená voda se odstraňuje konvekcí, z důvodu přítomnosti přívodních a odtokových kanálů na reaktoru. Biosušení představuje nízké odstranění těkavých

pevných látek z matrice na konci procesu. Je to metoda, která je považována za atraktivní pro výrobu energie, vzhledem k výhřevnost z biosušeného odpadu (dos Reis et al. 2020).

Faktory, které ovlivňují proces biosušení jsou také obsah vlhkosti a volného vzduchového prostoru v odpadech, použití plnidel, provzdušňování a jeho rychlost a mikrobiální aktivity. Podle těchto faktorů se dají určit schopnosti, jak odstranit při biosušení přebytečnou vodu. Při použití této technologie při zpracování kalu lisovaného na pásu se obsah vlhkosti snížil z 80 % hmotnosti na cca 53 % hmotnosti a energetický obsah produktu zpracovaného biosušením se výrazně zvýšil. Díky tomuto vysoušecímu efektu by mohlo být ušetřeno 57,5 l topného oleje nebo 575 kWh elektrické energie na tunu kalu lisovaného za tepla ve srovnání s tepelným sušením, protože energetické náklady na biosušení jsou způsobeny pouze provzdušňováním a není potřeba žádná další externí dodávka energie. (Yang et al. 2017).

Hlavním produktem procesu biosušení je palivo. Palivo lze využít buďto přímým spalováním ve specializovaných zařízeních nebo některých tepelných elektrárnách, nebo pro spoluspalování v cementárnách, tepelných elektrárnách a dalších provozech (Negoi et al. 2009).

Kompostování je metoda aerobní biologické úpravy biologicky rozložitelných odpadů s využitím čistírenských kalů. Následné využití kompostů v zemědělství připadá v úvahu zejména ke hnojení. Ke kompostování jsou vhodné zejména ty kaly, které jsou stabilizované, mají vysoký podíl organických látek a minerálních složek. Tyto kaly není účelné zneškodňovat nebo využívat samostatně. Pro nezatěžování životního prostředí je nutné se držet daných technologii a řídit se procesy a postupy v kvalitě i v čase. Proto jsou předepsány limity pro vstup kalů z ČOV do zařízení – na kompostárnu dle normy ČSN 46 5735 viz tabulka 8 (Ministerstvo životního prostředí, 2020).

Sledované látky	Nejvyšší přípustné množství sledované látky (mg.kg-1 sušiny)
As – arzén	50
Cd - kadmium	13
Cr - chrom	1000
Cu - měď	1200
Hg - rtuť	10
Mo - molibden	25
Ni - nikl	200
Pb - olovo	500
Zn - zinek	3000

Tabulka 8: Limity pro vstup kalů z ČOV do zařízení (na kompostárnu) (dle limitů vstupních surovin pro kompostárnu dle normy ČSN 46 5735) (Ministerstvo životního prostředí 2020).

Kompostování je proces, který omezuje tvorbu skleníkových plynů při nakládání s bioodpady, a zmírňuje důsledky klimatické změny. Funkcí kompostování je tzv. sekvestrace uhlíku, která vyřazuje uhlík obsažený ve stabilizovaném kompostu z přírodního koloběhu. Uhlík nacházející se v humusových látkách se mikrobiologicky obtížně rozkládá a není tak zdrojem oxidu uhličitého. Kompostování je právem považováno za technologii trvale udržitelného života na této planetě (Váňa, 2013).

5. DISKUZE

Tato práce se zabývá posouzením dvou technologií zpracování čistírenského kalu, a to biosušení a kompostování. Tyto dvě metody jsou mají nějaké aspekty společné a další rozdílné, proto se od sebe ve výsledku liší.

Na základě získaných podkladů zaměřených na tyto dvě technologie lze zjistit, zda výsledné produkty můžeme dále využívat nebo na ně můžeme nahlížet jako na odpad.

Biosušení je inovativní metoda zpracování čistírenského kalu. Poměrně nová a velmi zkoumaná technologie, která by mohla být přínosem jak v enviromentálním prostředí, tak z hlediska spotřebovaných energií.

Biosušení je prakticky kombinací aerobní biodegradace rozložitelných organických látek, stejně jako u začátku procesu kompostování. Tyto dvě technologie mají společné metody zpracování, a to průběžné odstraňování vlhkosti kontrolovaným provzdušňováním. Přestože principy jsou velmi podobné kompostování, jejich cíle a také realizace je velmi odlišná, jak uvádí v literárním zdroji dos Reis et al. (2020). Realizace se provádí v reaktorech, které jsou hermeticky uzavřené, aby nedocházelo k úniku tepla a vyrobilo se kvalitní palivo. Dle literárního zdroje Velis et al. (2009), dobu a rychlost procesu v reaktoru ovlivňuje do něho vháněný vzduch, který zároveň ovlivní stupeň fyzikálních a biochemických procesů.

Podle zkoumání Yu et al. (2022) všechny uvedené faktory ovlivňují nejen celý proces, ale i výslednou kvalitu produktu. Porovnáním biosušení za vyšší a nižší ventilace, nemají pouze rozdílné teplotní profily, ale k odstranění největšího podílu vody dochází v různých dnech, ale u více ventilovaného biosušení dochází i k nižším energetickým ztrátám.

Biosušení se používá k vysoušení biologicky rozložitelných odpadů především k výrobě paliva. Nicméně vysušený materiál se dá využít i jinak. Čistírenský kal by mohl být použit jako hnojivo v zemědělství. Při testování biosušení jako metody pro předúpravu odvodněného, anaerobně stabilizovaného čistírenského kalu k použití v zemědělství jako hnojiva, bylo zjištěno, že lze odstraňovat látky, které hnojiva pro zemědělství nemají obsahovat, jako jsou antibiotika a endokrinní distruptory, podle tvrzení Pilnáčka et al. (2019).

Z literárního zdroje Innemanová et al. (2018) vyplývá, že teplo, které vzniká v semi-kontinulním reaktoru s využitím čistírenského kalu obohaceného o vylehčující složku, je dále využito k sušení a není nutné použití dalších zdrojů tepla, a tudíž energetická bilance při spalování organického materiálu je kladná.

Kompostování je tradiční metoda, která se vyznačuje rozkladem organických látek aerobními procesy a na rozdíl od biosušení zachovává v odpadu co nejvyšší možný podíl organické složky. Podle Lyčkové. et al. (2008) probíhá kompostování v několika fázích a za určitých podmínek, a to:

- Rozkládají se bílkoviny, tuky, polysacharidy
- Složení mikroorganismů se mění
- Kompost získává hnědou barvu

Kompostování je považováno za jednu z nejlepších možností zpracování čistírenského kalu díky své udržitelnosti a integraci do konceptu oběhového biohospodářství a zároveň zde dochází ke snížení množství zbytků látek, např. léčiv, které kaly obsahují. Podle Wannera (2019) je využití kalu pro kompostování omezováno ochotou provozovatelů s tímto materiálem pracovat, a to hlavně z důvodu certifikace takto produkovaných hnojiv.

Při srovnávání těchto technologií bylo zjištěno, že některé postupy při zpracování čistírenského kalu mohou být prakticky stejné nebo odlišné. Jak tvrdí dos Reis et al. (2020) je kompostování technologie pro zpracování odpadů a kalů v praxi využívána běžně, technologie biosušení je stále předmětem zkoumání.

Biosušení se od kompostování liší tím, že probíhá v minimálně částečně hermeticky uzavřeném reaktoru. U kompostování toto není vyžadováno. Přestože biosušení vyžaduje náročnější technologii, lze podle Wanga et al. (2021) dostat se na kladnou energetickou bilanci především využitím produktu jako paliva. Pro úspěšný kompostovací proces, na rozdíl od biosušení, je spotřeba vody a vypouštění emisí.

Pro životní prostředí nepředstavují tyto technologií žádnou výraznou zátěž a ani ekonomický dopad na provoz není zatěžující. U technologie biosušení budou vysoké pořizovací náklady, nicméně provoz bude soběstačný z důvodu využití produktu jako paliva, jak tvrdí Wang et al. (2021).

Mezi produkty získané z čistírenských kalů, které jsou v této práci zmíněné, a kterým je věnována pozornost ze strany využití výstupů diskutovaných technologií, patří biouhel, kompost a palivo.

Biouhel – biomasa, vzniká termickým rozkladem za nepřístupu vzduchu. Obsahuje velké množství uhlíku a až 90 % fosforu. Bohužel se podle Ministerstva životního prostředí (2020) zjistilo, že kvůli jeho sorpčním vlastnostem není vhodný pro použití v zemědělství. Nicméně podle tvrzení Šťastného (2019) není vyloučené, že bude možné jeho využití v oblasti technologií vody, převážně k sanaci povrchové vody.

Kompost je další produkt stabilizace čistírenských kalů technologií kompostování, který se používá převážně pro výrobu hnojiv a je důležitý pro využívání v zemědělství. Kompost vzniká analogií přeměny organické hmoty v přírodním prostředí a probíhá v několika základních fázích podle Lyčkové et al. (2008).

Palivo je hlavním produktem procesu biosušení, které lze využít buďto přímým spalováním ve specializovaných zařízeních nebo některých tepelných elektrárnách, nebo pro spoluspalování v cementárnách, tepelných elektrárnách a dalších provozech, jak tvrdí Negoi et al. (2009).

6. ZÁVĚR

Tato práce se zabývá čistírenskými kaly, jejich charakteristikou, zpracováním, a využitím. Zároveň porovnává dvě metody zpracování, a to biosušení a kompostování. Tyto dvě technologie srovnává a posuzuje ze strany enviromentální a ekonomické pro provoz na čistírně odpadních vod.

Oba způsoby stabilizace čistírenských kalů si jsou podobné jak při vstupu do procesu, tak i v jeho průběhu. U obou technologií dochází při procesu zpracovávání k zvýšení teploty na základě aerobního rozkladu organických látek. Zde podobnost končí, neboť provedení stabilizace se u biosušení koná v hermeticky uzavřeném reaktoru a výstupem je produkt v podobě paliva, a to celé probíhá za úspory energie. Palivo je využitelné pro přímé spalování například v tepelných elektrárnách nebo pro spoluspalování v cementárnách.

Kompostování je na rozdíl od biosušení známá technologie. Je to proces, který je v současnosti vyzdvihován díky své udržitelnosti a integraci do konceptu oběhového hospodářství. Při vysoké teplotě se během procesu odstraňují patogeny a zároveň se snižuje výskyt bakterií odolných vůči antibiotikům přítomných v surovinách. Aby proces správně probíhal, potřebuje se dodržovat poměr uhlíku a dusíku v kalu, zabezpečit dostatečné provzdušňování a dodržování správné teploty a vlhkosti. Výstupem kompostování je vytvoření bezpečného a stabilního bioproduktu, kterým je kompost, a který lze využívat jako organické hnojivo.

Čištění a likvidace kalů z čistíren odpadních vod se stává stále kritičtějším environmentálním problémem kvůli rostoucí produkci a potenciálním rizikům znečištění. Jak nejlépe nakládat s odpadními kaly je předmětem mnoha výzkumů a studií, z nichž plyne platná legislativa, která stanoví pevné hranice pro zpracování těchto kalů. Díky dostupným informacím jsem v této práci zjistila, že technologie biosušení a kompostování má budoucnost pro nakládání s čistírenskými kaly, a to především při správném provozu a dodržování daných norem. Ani jedna z uvedených metod zpracování kalů není ekonomicky náročná, i když si dovolím konstatovat, že pro potřeby biosušení budou vyšší vstupní náklady na pořízení inovativní linky oproti nákladům na kompostování, ale uvedené technologie

především nezatěžují životní prostředí. Naopak produkty těchto činností jako je palivo, hnojivo, biouhel se využívají v zemědělství, stavebnictví a k výrobě energií.

7. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

7.1 ODBORNÉ PUBLIKACE

Andreoli, C., von Sperling, M., Fernandes, F., 2007: Sludge Treatment and Disposal, Biologcal Wastewater Treatments Series, IWA Publishing, Volume 6.

dos Reis, R., Cordeiro, J., Font, X., Achon, C., 2020: The biodrying process of sewage sludge – a review, Drying Technology Volume 38, Issue 10. P. 1247-1260.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Sedlář, O., 2019: Využití čistírenských kalů jako zdroje organických látek, Racionální použití hnojiv, Česká zemědělská univerzita, Praha, 108 s.

Farrell, J., Smith,J., Hathaway, S., Dean, R., 1974. Lime Stabilization of Primary Sludges, Journal (Water Pollution Control Federation) Volume 46.

Innemanová, P., Šereš, M., Pilňáček, V., 2018: Biosušení jako účinný nástroj pro zpracování a konečnou úpravu čistírenských kalů, Odpadové fórum, Odborný měsíčník pro průmyslovou a komunální ekologii 7–8. S. 38-39.

Iticescu, C., Georgescu, L., Murarescu, M., Gurau, G., Dima, D., Murariu, G., Gheorghies, C., 2015: Methods to reduceenvironmental impact of municipal waste water sewage sludge: Environmental Engineering. and Management Journal Volume 14, Issue 10.P 2457-2463.

Li, J., Fraikin, L., Salmon, T., Toye, D., Léonard, A., 2022. Influence of back-mixing on the convective drying of sewage sludge: The structural characteristics. Drying Technology Volume 40, Issue 1. P. 205-212.

López-González, J., Estrella-González, M., Lerma-Moliz, R., Jurado, M., Suárez-Estrella, F., López, M., 2021: Industrial Composting of Sewage Sludge: Study of the Bacteriome, Sanitation, and Antibiotic-Resistant Strains. Frontiers in Microbiology. Volume 12.

Murariu, G., Iticescu, C., Georgescu, L., Mocanu, I., Topa, C., Dobre, M., 2015: The optimization of urban selective waste collection activity: Galati city case study, Environmental Engineering. and Management Journal Volume 14, Issue 10. P. 2471–2492.

Negoi, R., Ragazzi, M., Apostol, T., Rada, E., Marculescu, C., 2009: Bio-drying of romanian municipal solid waste: An analysis of its viability. U.P.B. Scientific Bulletin Volume 71, Issue 4.

Pilnáček, V., Innemanová, P., Šereš, M., Michalíková, K., Stránská, Š., Wimmerová, L., Cajthaml, T., 2019: Micropollutant biodegradation and the hygienization potential of biodrying agriculture. Ecological Engineering Volume 127. P. 212-219.

Raheem, A., Sikarwar, V., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D., Wang, W., Zhao, M., 2018: Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. Chemical Engineering Journal Volume 337, P. 616–641.

Razza, F., D'Avino, L., L'Abate, G. a Lazzeri, L. 2018: The Role of Compost in Bio-waste Management and Circular Economy, Designing Sustainable Technologies, Products and Policies . P.133-143.

Richter, M., 2014: Technologie ochrany životního prostředí, Část I. Ochrana čistoty vod. Fakulta životního prostředí Univerzity J.E.Purkyně v Ústí n.L., Ústí nad Labem, 78 s.

Velis, V., Longhurst, P., Drew G., Smith, R., Pollard, S., 2009: Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering, Bioresource Technology Volume 100, Issue 11. P. 2747-2761.

Wang, Z., Wu, D., Wang, X., 2021: Role of Temperature in Sludge Composting and Hyperthermophilic Systems: a Review. BioEnergy Research.

Yang, B., Zhang, L., Jahng, D., 2013: Importance of Initial Moisture Content and Bulking Agent for Biodrying Sewage Sludge. Drying Technology Volume 32, Issue 2. P. 135-144.

Yang, B., Hao, Z., Jahng, D., 2017: Advances in biodrying technologies for converting. Drying Technology Volume 35, Issue 16. P. 1950-1969.

Yu, B., Chen, T., Zheng, G., Yang, J., Huang, X., Fu, L., Cai, L., 2022: Water-heat balance characteristics of the sewage sludge bio-drying process in a full-scale bio-drying plant with circulated air, Waste Management Volume 141. P 220-230.

Zittel, R., Da Silva, C., Domingues, C., Seremeta, D., da Cunha, K., de Campos, S., 2020: Availability of nutrients, removal of nicotine, heavy metals and pathogens in compounds obtained from smuggled cigarette tobacco compost associated with industrial sewage sludge. Science of The Total Environment Volume 699.

7.2 LEGISLATIVNÍ ZDROJE

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2019/1010 ze dne 5. června 2019, o sladění povinností podávání zpráv v oblasti právních předpisů souvisejících s politikou životního prostředí a o změně nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 166/2006 a (EU) č. 995/2010, směrnic Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES, 2004/35/ES, 2007/2/ES, 2009/147/ES a 2010/63/EU, nařízení Rady (ES) č. 338/97 a (ES) č. 2173/2005 a směrnice Rady 86/278/EHS, v platném znění.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/850 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 1999/31/ES, o skládkách odpadů, v platném znění.

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, v platném znění.

Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů), v platném znění.

Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady., v platném znění.

Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech, v platném znění.

7.3 INTERNETOVÉ ZDROJE

Český statistický úřad, 2021: Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2020. Kaly (online) [cit.2022.01.08], dostupné z <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2020>.

Holba, M., Plotěný, M., Maršálková, E., Maršálek, B.,2012: Klady a zápory technologických procesů pro recyklaci a odstranění fosforu z povrchových a odpadních vod (online) [cit.2021.12.27] dostupné z <https://www.asio.cz/cz/79.klady-a-zapory-technologickych-procesu-pro-recyklaci-a-odstraneni-fosforu-z-povrchovych-a-odpadnich-vod>.

Kompostárna Hořátev, s.r.o., © 2022: Likvidace odpadu ze zeleně (online) [cit.2022.03.09] https://www.kompostarna-horatev.cz/likvidace-opadu-zelene.

Lyčková, B., Fečko, P., Kučerová, R., 2008: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů (online) [cit 2022.01.05], dostupné z <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/index.html>.

Mach, P., Mareček, J. 2014. Hygienizace kalů v čistírnách odpadních vod (online) [cit.2022.02.23], dostupné z <https://mnet.mendelu.cz/mendelnet09agro/files/articles/tech_mach.pdf>

Ministerstvo životního prostředí, 2020: Podklady pro oblast podpory odpadového a oběhového hospodářství OPŽP 2021-2027 (online) [cit.2021.12.28], dostupné z <https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_obehove_hospodarstvi/$FILE/OODP-5_Kaly%20z%20%C4%8COV_20200529.pdf>.

Raček, J., Doskočil, B., Ševčík, J., Chorazy, T., Hlavínek, P., 2018. Sušení čistírenského kalu pro podmínky České republiky (online) [cit.2022.02.11], dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/327107649_Suseni_cistirenskeho_kalu_pro_podminky_Ceske_republiky>.

Slejška, A., 2005: Posouzení vhodnosti papírenských kalů k výrobě kompostů a rekultivačních substrátů (online) [cit.2021.12.10], dostupné z <https://biom.cz/data/posudek3.pdf>

Šťastný, V., 2019: Biouhel – nová perspektiva v technologii čištění odpadních vod, nebo slepá ulička? Vodohospodářský technický a ekonomický informační časopis (online) [cit.2022.01.13], dostupné z < https://www.vtei.cz/2019/06/biouhel-nova-perspektiva-v-technologii-docistovani-odpadnich-vod-nebo-slepa-ulicka/>.

Váňa J., 2013: Posuzování vlivu kompostáren na životní prostředí (online) [cit.2022.02.15] dostupné z < https://biom.cz/cz/odborne-clanky/posuzovani-vlivu-kompostaren-na-zivotni-prostredi>

Wanner, F., 2019: Nakládání s čistírenskými kaly v České republice, Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, z.s. (SOVAK ČR) (online) [cit.2022.01.20], dostupné z <https://www.sovak.cz/>

Wang, Z., Wu, D., Wang, X., Lin, Y., 2020. Role of Temperature in Sludge Composting and Hyperthermophilic Systems: a Review, BioEnergy Research (online) [cit.2020.03.01] dostupné z <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12155-021-10281-5.pdf >

7.4 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Jednoduché technologické schéma čistírny odpadních vod (vlastní zpracování, 2022)

Obrázek 2: Zjednodušené schéma vzniku surového kalu a procesních kroků jeho zpracování až ke konečnému využití. (vlastní zpracování, 2022)

Obrázek 3: Průřez gravitační zahušťovací nádrží. (Andreoli et al. 2007)

Obrázek 4: Ukázka vzhledu vysušeného produktu z kontaktní lopatkové sušárny jako zástupce jednoho typu (A) a konvenční pásové sušárny jako zástupce druhého typu sušáren (B). (Raček et al. 2018), (online) [cit.2022.02.11], dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/327107649_Suseni_cistirenskeho_kalu_pro_podminky_Ceske_republiky>.

Obrázek 5: Zjednodušené schéma reaktoru pro biosušení. (Velis et al. 2009)

Obrázek 6: Poloprovozní zařízení pro biosušení (online), [cit.2022.01.18], dostupné z < http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/eof-07-08-2018-pdf.pdf>

Obrázek 7: Schéma procesu kompostování. Kal je smísen s objemovou složkou, následně za provzdušňování dochází k biologickému rozkladu až k zisku konečného produktu, hnojiva. Převzato a přeloženo z (Wang et al. 2021)

Obrázek 8: Vlivy na životního prostředí (Raheem et al. 2018).

7.5 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Paragrafy týkající se problematiky čistírenských kalů zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech, v platném znění.

Tabulka 2: Přehled čistírenských kalů a jejich řazení do druhů odpadu dle platného Katalogu odpadů (Vyhláška č. 8/2021 Sb., o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů, v platném znění).

Tabulka 3: Kaly z ČOV – kvalita kalů - průměrné obsahy rizikových prvků, látek v kalech v ČR za roky 2010 – 2018 (online) [cit.2021.12.28], dostupné z <https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_obehove_hospodarstvi/$FILE/OODP-5_Kaly%20z%20%C4%8COV_20200529.pdf>.

Tabulka 4: Produkce a nakládání s čistírenskými kaly (v tunách) v ČR v letech 2009-2020 (online) [cit.2022.01.08], dostupné z <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2020>.

Tabulka 5: Účinnost čistících procesů na vybrané kovy (Andreoli et al. 2007).

Tabulka 6: Přehled mezních hodnot koncentrací v kalech používaných v zemědělství v mg/kg sušiny a jejich množství, které je možné ročně vnést do zemědělské půdy na základě desetiletého průměru v kg/ha/rok (dle směrnice 86/278/EHS přílohy 1B a 1C).

Tabulka 7: Porovnání procesů kompostování a biosušení z pohledu vstupního materiálu, produktu, ale i charakteristik procesu a technologického uspořádání, doplněno o cenu zpracování. Pro kompostování čerpáno z (López-González et al. 2021), (Wang et al. 2021) a cena byla získána z (Kompostárna Hořátev). Pro biosušení byly informace získány z (dos Reis et al. 2020) a (Yu et al. 2022).

Tabulka 8: Limity pro vstup kalů z ČOV do zařízení (na kompostárnu) (dle limitů vstupních surovin pro kompostárnu dle normy ČSN 46 5735) (Ministerstvo životního prostředí, 2020), (online) [cit.2021.12.28], dostupné z <https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpadove_obehove_hospodarstvi/$FILE/OODP-5_Kaly%20z%20%C4%8COV_20200529.pdf>.

8. PŘÍLOHY

8.1 PŘEHLED ČISTÍRENSKÝCH KALŮ A JEJICH ŘAZENÍ DO DRUHŮ ODPADU DLE PLATNÉHO KATALOGU ODPADŮ.

02			**Odpady z prvovýroby v zemědělství, zahradnictví, myslivosti, rybářství, lesnictví a z výroby a zpracování potravin**
02	**01**		**Odpady ze zemědělství, zahradnictví, rybářství, lesnictví a myslivosti**
02	01	01	Kaly z praní a z čištění
02	**02**		**Odpady z výroby a zpracování masa, ryb a jiných potravin živočišného původu**
02	02	01	Kaly z praní a z čištění
02	02	04	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
02	**03**		**Odpady z výroby a ze zpracování ovoce, zeleniny, obilovin, jedlých olejů, kakaa, kávy, čaje a tabáku; odpady z konzervárenského průmyslu z výroby droždí a kvasničného extraktu, z přípravy a kvašení melasy**
02	03	01	Kaly z praní, čištění, loupání, odstřeďování a separace
02	03	05	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
02	**04**		**Odpady z výroby cukru**
02	04	03	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
02	**05**		**Odpady z mlékárenského průmyslu**
02	05	02	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
02	**06**		**Odpady z pekáren a výroby cukrovinek**
02	06	03	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
02	**07**		**Odpady z výroby alkoholických a nealkoholických nápojů (s výjimkou kávy, čaje a kakaa)**
02	07	05	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
03			**Odpady ze zpracování dřeva a výroby desek, nábytku, celulózy, papíru a lepenky**
03	**03**		**Odpady z výroby a zpracování celulózy, papíru a lepenky**
03	03	10	Výmětová vlákna, kaly z mechanického oddělování obsahující vlákna, výplně a povrchové vrstvy z mechanického třídění
03	03	11	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 03 03 10
04			**Odpady z kožedělného, kožešnického a textilního průmyslu**
04	**01**		**Odpady z kožedělného a kožešnického průmyslu**
04	01	06	Kaly obsahující chrom, zejména kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
04	01	07	Kaly neobsahující chrom, zejména kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
04	**02**		**Odpady z textilního průmyslu**

04	02	19*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
04	02	20	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 04 02 19
05			**Odpady ze zpracování ropy, čištění zemního plynu a z pyrolytického zpracování uhlí**
05	**01**		**Odpady ze zpracování ropy**
05	01	09*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
05	01	10	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 05 01 09
06			**Odpady z anorganických chemických procesů**
06	**05**		**Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku**
06	05	02*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
06	05	03	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 06 05 02
07			**Odpady z organických chemických procesů**
07	**01**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání základních organických sloučenin**
07	01	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
07	01	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 01 11
07	**02**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání plastů, syntetického kaučuku a syntetických vláken**
07	02	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
07	02	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 02 11
07	**03**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání organických barviv a pigmentů (kromě odpadů uvedených v podskupině 06 11)**
07	03	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
07	03	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 03 11
07	**04**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání organických pesticidů (kromě odpadů uvedených pod čísly 02 01 08 a 02 01 09), činidel k impregnaci dřeva (kromě odpadů uvedených v podskupině 03 02) a dalších biocidů**
07	04	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
07	04	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 04 11
07	**05**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání farmaceutických výrobků**
07	05	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky

07	05	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 05 11
07	**06**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání tuků, maziv, mýdel, detergentů, dezinfekčních prostředků a kosmetiky**
07	06	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
07	06	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 06 11
07	**07**		**Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání čistých chemických látek a blíže nespecifikovaných chemických výrobků**
07	07	11*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
07	07	12	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 07 07 11
10			**Odpady z tepelných procesů**
10	**01**		**Odpady z elektráren a jiných spalovacích zařízení (kromě odpadů uvedených v podskupině 19)**
10	01	20*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
10	01	21	Jiné kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 10 01 20
10	**12**		**Odpady z výroby keramického zboží, cihel, tašek a staviv**
10	12	13	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku
19			**Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu, z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely**
19	**08**		**Odpady z čistíren odpadních vod jinde neuvedené**
19	08	05	Kaly z čištění komunálních odpadních vod
19	08	11*	Kaly z biologického čištění průmyslových odpadních vod obsahující nebezpečné látky
19	08	12	Kaly z biologického čištění průmyslových odpadních vod neuvedené pod číslem 19 08 11
19	08	13*	Kaly z jiných způsobů čištění průmyslových odpadních vod obsahující nebezpečné látky
19	08	14	Kaly z jiných způsobů čištění průmyslových odpadních vod neuvedené pod číslem 19 08 13
19	**11**		**Odpady z regenerace olejů**
19	11	05*	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku obsahující nebezpečné látky
19	11	06	Kaly z čištění odpadních vod v místě jejich vzniku neuvedené pod číslem 19 11 05