

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Daniela Wagnerová

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE

NAKLÁDÁNÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY PRO VYBRANÉ
TYPY ČISTÍREN ODPADNÍCH VOD
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

Bakalant: Daniela Wagnerová

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Daniela Wagnerová

Krajinářství

Územní technická a správní služba

Název práce

Nakládání s čistírenskými kaly pro vybrané typy čistíren odpadních vod

Název anglicky

Sewage sludge treatment for selected types of sewage treatment plants

Cíle práce

Bakalářská práce si v teoretické části klade za cíl podrobně vymežit rozdílné přístupy k nakládání s čistírenskými kaly pro různé typy čistíren odpadních vod, přičemž v úvahu bere velikost a technologie čistíren odpadních vod a typ kalového hospodářství. Pozornost bude rovněž soustředěna na platnou a účinnou legislativu České republiky související s touto problematikou. V praktické části budou formou případové studie porovnány dvě konkrétní čistírny odpadních vod v ČR s rozdílným kalovým hospodářstvím. Sledovat se u nich bude kvalita čistírenského kalu především z hlediska chemického složení. Pozornost bude zaměřena na přítomnost endokrinních disruptorů, reziduí léčiv, polyaromatických uhlovodíků, polychlorovaných bifenyly a kovů. V této části se bude zjišťovat míra znečištění kalu daná koncentrací znečišťující látky v odebraném vzorku a následně se představí možnosti využití spolu se zhodnocením ekonomického hlediska.

Metodika

Bakalářská práce bude zpracována formou literární rešerše. Čerpat bude ze zdrojů odborné literatury, portálu životního prostředí CENIA, dat Českého statistického úřadu a dalších relevantních zdrojů týkajících se problematiky kalového hospodářství.

V práci bude diskutováno využití čistírenských kalů metodami přímé aplikace na zemědělskou půdu, spalováním, extenzivním odvodněním pomocí reed bed systémů, kompostováním, biosušením aj. s ohledem na jejich složení a ve vztahu k jejich původu.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

Čistírenské kaly, ČOV, odpady, polutanty, odpadní vody, legislativa

Doporučené zdroje informací

- Čechmánková K., 2017: Přehled technologií kalového hospodářství komunálních ČOV. Waste Forum 2017/1. S. 24-32.
- Kutil J., Dohányos M., 2005: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů (online) [cit. 2019.03.07], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2>>.
- Matějů L., Boštková Z., Zimová M., 2018: Rizika a výhody při využití čistírenských kalů na zemědělské půdě. Odpadové fórum 19/3. S. 26-27.
- Muspratt A., Miller A., 2018: Mechanical Dewatering for Fecal Sludge Treatment Applications Process & Technology Review (online) [cit. 2019.03.07], dostupné z <https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-2946-7-1518694688.pdf>.
- Wei H., Gao B., Ren J., Li A., Yang H., 2018: Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. Water Research 2018/143. P. 608-631.
-

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 23. 11. 2019

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25. 11. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 02. 2020

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Nakládání s čistírenskými kaly pro vybrané typy čistíren odpadních vod 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 bakalářskou 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 bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

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

V Rožmitále p. Tř. dne 10. 3. 2020

.....
(podpis autora práce)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí práce Ing. Tereze Hnátkové, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vedení práce a za čas, který mi věnovala ke konzultacím.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou čistírenského kalu, jeho vznikem, způsoby zpracování a možnostmi následného nakládání. Jelikož je proces čištění odpadních vod úzce spojen s produkcí kalu, jsou v práci nejprve popsány jednotlivé na sebe navazující technologie běžně užívané pro čištění komunálních odpadních vod. V další části se práce blíže věnuje charakteristice jednotlivých druhů kalů. Uvádí fáze čištění, ve kterých kaly vznikají, popisuje pro ně typické vlastnosti, poukazuje na rozdílnosti a nastiňuje možnosti využití. Dále se práce zabývá nejčastěji používanými technologiemi pro zpracování kalů a s tím souvisejícími možnostmi následného nakládání s kaly. Metody nakládání jsou představeny z hlediska jejich výhod i nevýhod, dostupnosti a četnosti užití v České republice. V praktické části této práce se zkoumá kalové hospodářství dvou přibližně stejně velkých čistíren odpadních vod, konkrétně čistírny v Březnici a čistírny v Rožmitále pod Třemšínem.

Klíčová slova

Čistírenské kaly, ČOV, odpady, polutanty, odpadní vody, legislativa

Abstract

The bachelor thesis deals with the issue of sewage sludge, process of sewage sludge creation, treatment and disposal. Since there is a close connection between wastewater treatment process and sludge production, the commonly used municipal wastewater treatment techniques are described at first. The thesis gives detailed characteristics of different types of sludge in the next chapter. Stages of wastewater treatment, from which different types of sludge are generated, are mentioned, attributes of sewage sludge are described, the differences are pointed out and possible options of different types of sludge disposal are outlined. The following chapters deal with issue of the most commonly used technologies of sludge treatment relating to sludge disposal options. These options of sludge disposal are presented with respect to advantages and disadvantages, availability and frequency of use. The practical part is focused on sludge management of two wastewater treatment plants which have approximately the same size – namely treatment plant in Březnice and treatment plant in Rožmitál pod Třemšínem.

Keywords

Sewage sludge, sewage treatment plant, waste, pollutants, wastewater, legislation

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce	2
3. Technologie čistíren odpadních vod	3
3.1 Mechanické čištění.....	4
3.1.1 Česle.....	4
3.1.2 Drtiče.....	5
3.1.3 Lapáky písku	5
3.1.4 Usazovací nádrže	5
3.1.5 Lapáky tuků	7
3.2 Biologické čištění.....	7
3.2.1 Aktivační proces	8
3.2.2 Biofilmové reaktory	10
3.2.3 Zkrápěné biologické kolony.....	10
3.2.4 Rotační diskový reaktor	11
3.2.5 Biologické anaerobní čištění	12
3.3 Koagulace a flokulace.....	13
4. Kaly.....	15
4.1 Primární kal.....	15
4.2 Sekundární kal	16
4.2.1 Kal z biologické filtrace.....	16
4.2.2 Přebytečný aktivovaný kal	17
4.3 Chemický kal	17
4.4 Kal z digesce.....	17
5. Technologie zpracování kalů	19
5.1 Zahušťování kalů	19
5.1.1 Gravitační zahušťování	20
5.1.2 Aerační flotace	20
5.1.3 Odstředování	20
5.2 Stabilizace	21
5.2.1 Anaerobní digesce.....	21
5.2.2 Aerobní digesce.....	22
5.3 Odvodňování kalů.....	23
5.3.1 Filtrační lis	23
5.3.2 Pásový lis	24

5.3.3	Dekantační odstředivka.....	25
5.3.4	Rotační bubnové filtry	26
5.4	Hygienizace.....	26
5.4.1	Pasterizace.....	26
5.4.2	Hygienizace radiací.....	26
5.4.3	Úprava vápnem	27
6.	Nakládání s kaly.....	28
6.1	Využití kalů na zemědělské půdě.....	28
6.2	Spalování kalů.....	30
6.3	Kompostování	31
6.4	Skládkování.....	31
6.5	Pyrolýza	31
7.	Kalové hospodářství ČOV Březnice	34
7.1	Nakládání s kalem na ČOV Březnice	35
8.	Kalové hospodářství ČOV Rožmitál pod Třemšínem	37
8.1	Nakládání s kalem na ČOV Rožmitál p. Tř.	38
8.2	Ekonomické zhodnocení provozu kalového hospodářství	40
9.	Diskuze	43
10.	Závěr	45
11.	Přehled literatury a použitých zdrojů	46
12.	Seznam obrázků.....	57
13.	Přílohy.....	59

1. Úvod

Každým dnem vzniká nejen v České republice v důsledku lidské činnosti a činnosti průmyslové velké množství odpadních vod. Tyto odpadní vody je před dalším využitím třeba podrobit procesu čištění, ke kterému dochází v čistírnách odpadních vod. V České republice bylo v roce 2018 evidováno celkem 2 677 čistíren různých velikostí, které dohromady umožňují vyčištění až 4 274 245 m³ odpadní vody za den (Český statistický úřad, 2019). Při čištění odpadních vod však vzniká nevyhnutelně sekundární produkt a tím je čistírenský kal, přičemž rozlišujeme jeho různé druhy v závislosti na fázi čištění, ve které vzniká a na jeho kvalitě.

Kalové hospodářství čistírny není levnou a zanedbatelnou záležitostí, neboť může v současnosti průměrně představovat až 50 % z celkových provozních nákladů čistírny (Čechmánková a kol., 2017). Ačkoli nelze produkci kalu úplně zamezit, je možné ovlivnit množství a kvalitu vyprodukovaného kalu výběrem technologií používaných na čistírně a tím i tyto náklady optimalizovat.

V současnosti probíhají v Evropě a tedy i v České republice úvahy nad tím, jakou úlohu v budoucnosti sehrají čistírenské kaly v oběhovém hospodářství. Již dnes je zřejmé, že hlavním cílem v procesu nakládání s kaly bude využití energie z kalů a současně též snaha snížit množství energie spotřebované na využívané procesy (Kos, 2019).

Vyhláškou č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, se zpřísnily limity mikrobiologických hodnot pro ukládání kalů na zemědělské půdy. Česká republika by se v důsledku toho měla v následujících letech přeorientovat na nové pojetí nakládání s kaly. Tím je myšlen odklon od zemědělské půdy a kompostů, jakožto nejčastějších současných možností, na termické zpracování (SOVAK ČR, 2019).

Na základě výše uvedeného lze říci, že se v případě čistírenských kalů jedná o téma aktuální, ve kterém je prostor pro zlepšování a hledání nových přístupů.

2. Cíle práce

Cílem bakalářské práce je vymezení rozdílných přístupů k nakládání s čistírenskými kaly pro různé typy čistíren odpadních vod. V úvahu se bere velikost a technologie čistírny odpadních vod a typ kalového hospodářství. Dále se práce zaměřuje na popis jednotlivých technologií čistíren používaných v oblasti kalového hospodářství a také se zabývá kvalitou kalu z hlediska přítomnosti endokrinních disruptorů, reziduí léčiv, polyaromatických uhlovodíků, polychlorovaných bifenylnů a kovů. Práce rovněž zmíní platnou a účinnou legislativu České republiky související s kalovou problematikou a ekonomické hledisko nakládání s kaly. V praktické části dojde formou případové studie k porovnání dvou konkrétních čistíren odpadních vod v ČR s rozdílným kalovým hospodářstvím.

3. Technologie čistíren odpadních vod

Navrhování čistíren odpadních vod se začalo ve světě rozmáhat kolem roku 1920. Hlavním impulsem byl neustálý nárůst počtu obyvatel a industrializace, kdy již nebylo možné dále ukládat odpady na půdu nebo je vypouštět do řek, aniž by tím nebyla dotčena kvalita životního prostředí a především lidské zdraví. Úkolem čistíren odpadních vod bylo redukovat množství pevných látek, biologicky rozložitelných organických látek, choroboplodných zárodků a toxických látek, a tím zajistit dodržování stanovených limitů k ochraně lidského zdraví a přírody (Riffat, 2012).

Odpadní vody tvoří přibližně z 90 % voda, ve které je obsažena směs znečišťujících látek (Demirbas a kol., 2017). Odpadní vody pocházejí z domácností, škol, restaurací, nemocnic a dalších – tyto označujeme jako komunální odpadní vody. Pokud odpadní vody vznikají v průmyslových závodech např. při výrobě léčiv, nesou označení průmyslové odpadní vody. Takto je možné dělit čistírny podle původu odpadních vod (Riffat, 2012).

Technologie ČOV je složena z dílčích čistících procesů, které na sebe navzájem navazují a tím umožňují kontinuální fungování procesu čištění. Způsob, jakým jsou jednotlivé procesy seskupeny, je ovlivněn zdroji znečištění, z kterých odpadní vody pochází, ale také provozními náklady, finančními možnostmi, mírou spolehlivosti a náročnosti a dalšími (Hendricks, 2010).

Pro fáze, ke kterým dochází při čištění odpadních vod, se nejčastěji užívá dělení na fázi mechanickou, biologickou, chemickou a případně též fyzikálně-chemickou. Nejčastěji se však v současné době používá čištění mechanicko-biologické (Kučerová a kol., 2010). Podle údajů zveřejněných Hydroekologickým informačním systémem VÚV TGM, v České republice převažují mechanicko-biologické aktivační čistírny a druhé nejčastější jsou mechanicko-biologické čistírny s biofiltrem (HEIS VÚV, dostupné online).

Složení znečišťujících látek v odpadní vodě je velmi rozmanité a liší se komunitu od komunity, přičemž odlišnosti spočívají především v množství nebo v koncentraci konkrétních látek v závislosti na zdroji. Obecné dělení znečišťujících látek je z hlediska chemického složení na organické a anorganické, z pohledu fyzikálního se dělí na usaditelné, plovoucí a koloidní. Z hlediska lidského zdraví se

obecně považují za nejvíce nebezpečné odpadní vody z domácností z toho důvodu, že lidské (i zvířecí) výkaly obsahují velké množství virů, bakterií a dalších organismů (Drinan a Spellman, 2012).

3.1 Mechanické čištění

První stupeň čištění odpadních vod v čistírně se často označuje jako fáze založená na usazování, neboť zde má tento proces zásadní význam. K usazování nicméně nedochází jen v rámci primárního, ale také během sekundárního čištění. Hrubé předčištění, které do této fáze čištění patří, představují všechny nebo pouze některé z následujících procesů: cezení - probíhá v česlích, drcení příliš velkých pevných objektů obsažených v odpadní vodě - v rozměňovacím zařízení, zachycení drobných částic typu písku - probíhá v lapácích písku. Samotné primární čištění se odehrává v usazovacích nádržích, které mají buď obdélníkový, nebo kruhový tvar (Drinan a Spellman, 2012).

3.1.1 Česle

Pro hrubé předčištění odpadních vod jsou základními a velmi důležitými zařízeními lapáky písku a česle. V česlích dochází k oddělení větších znečišťujících objektů od odpadní vody za účelem zamezení jejich vniknutí do čistícího zařízení. Jako příklady těchto větších objektů můžeme jmenovat různé hadry, papír, plasty, kovy atd. Česle všechny tyto předměty zachycují a tím předcházejí poškození zařízení čistírny – především ucpávání trysek a potrubí pro čerpání vody, které představují z hlediska údržby problém. Nejčastěji jsou česle vyrobeny z oceli. Rozlišujeme česle hrubé (rozstup mezi nimi je 20-60 mm) a česle jemné (rozstup je 10-20 mm) (Scholz, 2016). Česle jsou vytvořeny z rovnoběžných a rovnoměrně rozložených kovových mříží nebo mají podobu děrovaného síta, které je umístěno napříč ke kanálu, kterým je přiváděna odpadní voda. Česle tedy zajistí, že odpadní voda skrz mříže proteče, ale větší znečišťující objekty zůstanou zachycené na mřížích. Tyto zachycené shrabky je možné odstraňovat buď manuálně (česle umístěny pod úhlem 30° k usnadnění odstraňování shrabek), nebo mechanicky (pod úhlem 45-60°) a to tak často, aby nánosy nezpůsobily ucpání a odpadní voda mohla volně protékat (Drinan a Spellman, 2012). Za rok se v čistírně vyprodukuje přibližně 0,2 – 0,3 m³ shrabků na jednoho obyvatele z hrubých česlí a množství 5 – 10 m³ z česlí jemných (Hlavínek a kol., 2000).

3.1.2 Drtiče

Účelem těchto drtících zařízení je zmenšit příliš velké pevné předměty obsažené v odpadní vodě natolik, aby nehrozilo poškození zařízení čistírny. Drtící zařízení, kterým odpadní voda protéká, je tvořeno buď sítím, nebo děrovaným košem a dvěma noži - jeden z nožů rotuje nebo kmitá a druhý je nehybný. Velký předmět je tak činností nožů rozmělněn natolik, že je schopen protéct spolu s odpadní vodou do další čistící fáze (Drinan a Spellman, 2012). Výhodou je, že díky drtiči není potřeba odstraňovat shrabky (Scholz, 2016).

3.1.3 Lapáky písku

Pro zachycení anorganických částic, které jsou přitahovány větší gravitační silou než organická hmota, slouží v rámci hrubého předčištění lapáky písku. Při konstantní rychlosti proudění vody v rozmezí 200 až 400 mm/s dochází k usazování anorganických částic (Scholz, 2016), které mají velikost minimálně 0,2 mm a více (Hendricks, 2010). Mezi takové částice patří písek, štěrk, rozemletá zrnka kávy, úlomky skořápek od vajec a další hrubé částice, které se snadno a rychle usazují, pokud je proudění značně omezeno. Tyto objekty jsou navrhovány pro nejvyšší hodinový průtok a dobu zdržení okolo jedné minuty při tomto průtoku. Lapáky písku jsou obvykle mělké čtyřhranné nádrže, ve kterých je zařízení umělé provzdušňování za účelem udržení organických látek v suspenzi, a zatímco se anorganické částice usazují, ty organické pokračují do další fáze čištění. Písek nebo štěrk oddělený od vody v rámci tohoto procesu je ve většině případů ukládán na skládku (Hopcroft, 2014). K nutnosti odstraňování částic vede hned několik důvodů: prvním důvodem je zamezení obušování čistícího zařízení, a druhým předcházení usazování nánosů částic a následné ucpávání zařízení (Scholz, 2016). Klasickým typem lapáku písku je lapák s horizontálním průtokem, ale podle směru průtoku rozeznáváme i lapáky vertikální (Hlavínek a kol., 2000).

3.1.4 Usazovací nádrže

Při primárním čištění se odstraňuje z odpadních vod množství suspendovaných částic s využitím gravitační síly, jejímž působením dochází k usazení částic v usazovacích nádržích. Tato sedimentační metoda není příliš účinná, pokud jsou částice o průměru menším 50 μm . K účinnějšímu usazování

dojde při seskupení částic do skupin, čímž se zvětší jejich velikost a zároveň usazovací rychlost (Huang a Li, 2008).

Je-li primární čištění provozováno efektivním způsobem, je účinnost odstraňování suspendovaných látek průměrně od 40 % do 60 %. U organické hmoty je účinnost odstraňování nižší - pohybuje se v rozmezí od 30 % do 35 %. Důvodem je skutečnost, že je většina organických látek v odpadní vodě buď rozpuštěna, nebo rozptýlena ve formě jemných částic, a proto jsou tyto organické látky špatně usaditelné (Huang a Li, 2008). Většina organické hmoty z komunálních odpadních vod se nachází v suspendované formě a k jejímu odstranění se využívá separačních metod (Odegaard, 1992).

Usazovací nádrže mají různé tvary, podle kterých je můžeme dělit na pravoúhlé, kruhové, štěrbinové a lamelové (Pytl, 2012). Nejčastějšími jsou však pravoúhlé a kruhové, u kterých se ještě rozlišuje, zda mají průtok horizontální nebo vertikální (Scholz, 2016).

Do usazovací nádrže voda vtéká přes vtokový objekt, který vodu usměrňuje a rozděluje ji rovnoměrně na celou průtočnou plochu. U některých čistíren sem ústí také přebytečný kal pocházející z dosazovací nádrže (Pytl, 2012). U nověji navržených čistíren se od směšování kalů již upouští. Důvodem jsou nestejně vlastnosti obou kalů a fakt, že primární kal se lépe odděluje samotný (Hlavínek a kol., 2000). Kal vzniklý v usazovací nádrži z přivedeného přebytečného kalu a kalu primárního, se označuje jako tzv. směsný kal. Vlastní usazovací prostor v nádrži vodu zpomaluje natolik, aby kalové částice byly schopné usazovat se na dně. Ze dna je poté vytvořený kal stírán pomocí lišt připevněných na mostové konstrukci do kalové jímky, která na dno navazuje. Kal, usazený v kalové jímce, putuje jako zahuštěný primární kal buď k dalšímu zahuštění, nebo ke zpracování v rámci kalového hospodářství. Vyprazdňování kalové jímky by se při běžném provozu mělo uskutečnit alespoň jednou za pracovní směnu (Pytl, 2012).

Vyprodukovaný primární kal dosahuje hodnot 50 až 60 g nerozpuštěných látek na osobu za den. Vyčíslíme-li tuto hodnotu v procentech sušiny, pohybuje se primární kal v hodnotách přibližně od 4 do 6 % sušiny (Pytl, 2012).

3.1.5 Lapáky tuků

Tuky a například některé ropné látky obsažené v odpadní vodě je potřeba odstraňovat jiným způsobem. Jelikož je u těchto látek hustota menší než hustota vody a vztlaková síla převyšuje tu gravitační, pohybují se po povrchu vody. Této vlastnosti se využívá v tzv. Lapolu. V nádrži, kterou protéká voda, se zpomalí průtok natolik, aby tukové látky vypluly na povrch, z povrchu se odstraní a tuků zbavená voda odeče z nádrže (Hlavínek a kol., 2000). Při čištění městských odpadních vod se využívají velice ojediněle a to tehdy, pokud to vyžadují zvláštní důvody plynoucí z projektové přípravy čistírny. A pokud se jedná o odpadní vody průmyslové, platí, že nejvýhodnější je odstraňovat tuky přímo v průmyslových závodech (Chudoba a kol., 1991).

3.2 Biologické čištění

Tento stupeň čištění můžeme někdy najít pod označením druhý nebo sekundární stupeň čištění, jelikož je mu často předřazena primární sedimentace jakožto velmi efektivní metoda pro zachycení usaditelných látek (Hlavínek a kol., 2000). Biologické čištění v sobě tedy zahrnuje proces přeměny nebo zneškodnění látek kontaminujících vodu za pomoci mikroorganismů. Řadíme sem také procesy, při kterých se z odpadních vod odstraňuje dusík a fosfor (Riffat, 2012). Biologické čištění si získalo oblibu především tím, že je v porovnání s jinými alternativami levné a může se využít všude tam, kde mikroorganismy reagují se substrátem. Mezi mikroorganismy, které pomáhají rozkládat organickou hmotu v tomto stupni čištění, se řadí vířníci, prvoci, bakterie (z bakterií převládá *E. coli*) (Hendricks, 2010).

Současný proces biologického čištění se uskutečňuje na principu biooxidačních reakcí. Při těchto reakcích se značná část energie z odpadní vody uvolňuje ve formě oxidu uhličitého (Xiaoyuan a kol., 2019). U městských odpadních vod je substrát tvořen směsí organických látek, jako jsou cukry, tuky a bílkoviny. Následným produktem je v případě aerobní reakce oxid uhličitý spolu s vodou a nově vzniklými buňkami. Při reakci anaerobní vzniká metan, oxid uhličitý a nové buňky (Hendricks, 2010).

V rámci biologického čištění se nejčastěji používají technologie, které zahrnují využití aktivačních systémů, biofilmových reaktorů a stabilizačních nádrží (Hlavínek a kol., 2000).

Biologické aerobní čištění odpadních vod se uskutečňuje v reaktorech, ve kterých je biomasa buď tzv. přisedlá, nebo ve vznosu – tu označujeme jako aktivaci (Malý a Malá, 1996). Způsob sestavení bioreaktoru významně ovlivňuje děje, které v něm probíhají (Grady a kol., 2011).

Aby biomasa ve vznosu zůstala ve formě suspenze, musí být řádně promíchávána. Nejzákladnějším typem této skupiny bioreaktorů je míchací tank (tzv. stirred-tank reactor) s nepřetržitým průtokem. Skládá se z míchací nádoby, do které je přiváděna odpadní voda bohatá na znečišťující látky. Spolu s odpadní vodou jsou v nádobě rozptýleny mikroorganismy, které reagují se znečišťujícími látkami. Množství vody v tanku je konstantní a míchací zařízení je natolik účinné, aby zajistilo stejnou koncentraci zmíněných složek ve všech prostorách míchacího tanku. Jednotnost prostředí umožňuje udržovat biomasu v konstantním fyziologickém stavu (Grady a kol., 2011).

Jiným typem je bioreaktor s postupným dávkováním živin. Tento nemá na rozdíl od výše zmíněného nepřetržitý průtok a díky své flexibilitě nachází uplatnění tam, kde je průtok více či méně proměnlivý. V tomto případě je do nádoby vložena jen určitá dávka znečištěného materiálu, se kterou biomasa reaguje. S růstem mikroorganismů dochází zároveň ke změně podmínek v reaktoru. U reaktorů s biomasou ve vznosu se následně využívá procesu sedimentace nebo filtrace, aby se z odpadní vody před vypuštěním odstranila biomasa (Grady a kol., 2011).

Pro hodnocení aerobního biologického čištění zaměřujeme pozornost na hodnoty jako je BSK₅, CHSK, nerozpuštěné látky, dusík, fosfor a možné další látky obsažené v odpadní vodě (Malý a Malá, 1996).

3.2.1 Aktivační proces

Jeden z nejdůležitějších procesů v oblasti biologického čištění odpadních vod, který zaznamenal ve světě vzestup po druhé světové válce a který v současnosti převládá v České republice, se nazývá aktivační proces neboli zkráceně aktivace (Wanner, 2017). Jedná se o léty prověřenou technologii, kterou se později

inspirovaly technologie novější jako např. biofiltrace nebo membránové bioreaktory (Rossetti a kol., 2017).

Proces aktivace se odehrává ve dvou oddělených fázích – nejprve fáze provzdušňování v aktivační nádrži (jedná se o typ bioreaktoru), a následně usazování kalu v usazovací nádrži. Proces probíhá následovně: voda obsahující organické znečištění přiteče z primárního čištění do aktivační nádrže a smísí se s různými populacemi mikroorganismů, které se v nádrži vyskytují. Poté je do této směsi přidán vzduch, případně se někdy přidává jen čistý kyslík (Scholz, 2016), a to pomocí tlakového vzduchu nebo pomocí mechanických aerátorů (Chudoba a kol., 1991). Nepřetržité mísení v aktivační nádrži má mikroorganismům zajistit potřebný přísun potravy z organických látek a dále ještě vysokou koncentraci kyslíku (Scholz, 2016). Aby bylo čištění pomocí aktivovaného kalu účinné, je potřeba docílit u biomasy dobré flokulace (vločkování) a zahuštění. Pevný a hustý shluk vloček se následně lépe usazuje vlivem gravitace v sekundární usazovací nádrži, kde se aktivovaný kal odděluje od vyčištěné vody (Rossetti a kol., 2017). Většina aktivovaného kalu se vrací zpět do aktivační nádrže, aby v ní bylo zajištěno dostatečné množství mikroorganismů k řádnému fungování procesu (Scholz, 2016). V důsledku nepřetržité tvorby nové biomasy je třeba přebytečný aktivovaný kal v pravidelných intervalech odstraňovat (Chudoba a kol., 1991).

Většina bakterií produkuje na povrchu buněčné stěny extracelulární polymerní látky, jejichž vzájemná interakce hraje významnou roli při bioflokulaci v aktivovaném kalu. Polymerní látky zajišťují soudržnost uvnitř vloček aktivovaného kalu a jejich strukturální integritu. Polymery mají gelovou lepkavou konzistenci a vytvářejí síť, ve které jsou mikroorganismy spojeny (Sanin a kol., 2007).

Aktivovaný kal je tvořen z převážné části bakteriemi. Mezi nejčastější zástupce bakterií můžeme řadit například rod *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Micrococcus* a mnohé další. V aktivovaném kalu je dále možné najít bakterie nitrifikační, vláknité mikroorganismy, zástupce vyšších organismů jako jsou protozoa, vířníci a hlístice a z prvoků především *Peritricha* (Chudoba a kol., 1991).

3.2.2 Biofilmové reaktory

Stejně jako je tomu u procesu aktivace, i pro tento proces je zásadní činnost aerobních mikroorganismů společně s přítomností kyslíku (Malý a Malá, 1996). Mikroorganismy přisedlé biomasy vytváří vrstvu biofilmu na povrchu pevného materiálu (nosiče), přes který proudí odpadní voda. K zachycení nánosů biomasy, které se odlupují z pevného nosiče, se i zde následně využívá sedimentace nebo filtrace (Grady a kol., 2011). Pevné nosiče jsou nejčastěji vyrobeny z materiálů jako je PVC, polyetylen nebo polypropylen. Biofilm není homogenní - směrem od nosiče k vrstvě, která je v kontaktu s vodním prostředím, se zvyšuje množství kyslíku (Malý a Malá, 1996).

Oproti procesu aktivace jsou systémy s přisedlou kulturou výhodnější z důvodu lepšího přenosu kyslíku, vyšší koncentrace mikroorganismů a efektivnějšího odstraňování organických látek (Sombatsompop a kol., 2006). Kromě toho je výhodou ještě nižší produkce kalu v důsledku pomalejšího mikrobiálního nárůstu (Naz a kol., 2014).

Existuje několik druhů biofilmových reaktorů: zkrápěné biologické kolony (někdy nazývané jako biofiltry), ponořené biologické kolony, rotační biofilmové reaktory a kombinované reaktory. Z těchto jsou v současnosti nejčastější zkrápěné biologické kolony a diskové rotační reaktory (Malý a Malá, 1996).

3.2.3 Zkrápěné biologické kolony

Zkrápěnou biologickou kolonu tvoří otevřená betonová (může být i zděná) nádrž ve tvaru válce. Na roštovém dně uvnitř válce je rozložena pevná vrstva materiálu, na které mikroorganismy následně vytváří vrstvu biofilmu (Pytl, 2012). Po obvodu betonového pláště pod roštovým dnem je skrz vytvořené otvory zajištěno proudění vzduchu, neboť přítomnost kyslíku je nezbytná pro činnost mikroorganismů. Biofiltr funguje následovně: ze zkrápěcího zařízení přitéká znečištěná voda do 3-4 m vysoké náplně v nádrži (Malý a Malá, 1996). Náplň v nádrži obvykle tvoří kameny, štěrk nebo plasty, přes které voda shora dolů proteče a vytvoří vrstvu biofilmu na pevném nosiči na roštovém dně. V důsledku zesilování biofilmové vrstvy dochází k jejímu odlupování, přičemž tento materiál je součástí sekundárního kalu (tzv. kal z biofiltru) (Park a kol., 2018). Odsud voda odteče pod

úroveň roštového dna do dna pevného a následně putuje do dosazovací nádrže (Malý a Malá, 1996).

Z několika dřívějších výzkumů vyplývá, že trvá přibližně 3-60 dní, než se vytvoří taková vrstva přisedlé biomasy v bioreaktoru, která je schopna efektivního procesu čištění. Nicméně je možné tuto dobu urychlit pomocí aktivovaného kalu na filtračním médiu. V tomto případě dojde k urychlení na 24-36 hodin v závislosti na teplotě. Účinnost biofiltru se může poněkud lišit v závislosti na materiálu, který je jeho náplní. Pozornost zaměřme na gumu, polystyren, plast a kámen při teplotě 5-15 °C a 25-35 °C. Pro odstraňování organických látek při teplotě do 15 °C je nejefektivnější kamenný materiál (95,7 %), druhé místo patří plastu (90,9 %) a třetí je polystyren (90,7 %). Nejméně účinná je z těchto čtyř materiálů guma (86,4 %). Hodnoty se měřily při průtoku 80ml/min. Zvýšila-li se teplota na 25-35 °C, nejúčinnější pro odstraňování organických látek byla guma (94,8 %), kámen (94,7 %), plast (94,3 %) a nejméně účinný byl polystyren (91,4 %) (Naz a kol., 2015).

3.2.4 Rotační diskový reaktor

Tento typ bioreaktoru s přisedlou kulturou se využívá většinou v malých čistírnách odpadních vod (Hlavínek a kol., 2000). Rotační diskový reaktor je složený z otáčivé hřídele, na které jsou umístěny disky kruhového tvaru. V důsledku otáčení hřídele jsou disky po určité chvíli ponořené v odpadní vodě ve žlabu, kde se mikroorganismy setkávají s organickými látkami, po chvíli zase v kontaktu se vzduchem. Střídáním těchto fází se na povrchu disků vytvoří nánosy biofilmové vrstvy (Scholz, 2016).

Hloubka žlabu bývá obvykle 1,5 m a ve většině případů stačí k 40% pokrytí disků vodou. Hřídel by neměla být delší než 8,2 m. Pokud jde o materiál, z kterého jsou jednotlivé disky vyrobeny, používá se polyetylen s vysokou hustotou, PVC nebo polystyren. V minulosti jako materiál pro výrobu disků sloužilo i dřevo (Scholz, 2016). Průměr disků se pohybuje v rozmezí 0,5 až 3,5 metrů, tloušťka disků je 10 až 20 mm a na hřídeli jsou upevněné vedle sebe ve vzdálenosti 10 až 40 mm. Ve chvíli, kdy se na discích vytvoří přebytek biomasy, začne z nich v důsledku otáčení hřídele odpadávat do odtékající vody a k jejímu oddělení dojde následně v dosazovací nádrži (Malý a Malá, 1996).

3.2.5 Biologické anaerobní čištění

Anaerobní čištění odpadních vod se řadí taktéž k biologickému čištění, avšak na rozdíl od aerobního zde nefiguruje vzduch nebo přímo kyslík. Kyslík se však může vyskytovat ve sloučenině s dusíkem nebo sírou (Srinivas, 2008). Jedná se o nejčastěji využívanou metodu pro středně až silně koncentrované odpadní vody. Obliba této metody spočívá v nízkých nárocích na dodávání energie a v nízké produkci biomasy (Caruana a Olsen, 2012). Nevýhoda spočívá oproti aerobnímu procesu v nutnosti dodávat 2000-3000 mg CaCO_3/l ke zmírnění kyselosti, ke které dochází v důsledku vzniku CO_2 při rozkladu (Srinivas, 2008).

Tento druh čištění probíhá uvnitř anaerobních reaktorů (Dohányos, 1998) v teplotním rozmezí 35-37 °C, ale může být i vyšší či nižší. Porovnáme-li náklady vynaložené na anaerobní reaktor s reaktorem aerobním, zjistíme, že provoz anaerobního je levnější. Důvodem je skutečnost, že u anaerobního reaktoru nejsou potřebná zařízení pro údržbu a kontrolu, jelikož se proces řídí víceméně samostatně (Caruana a Olsen, 2012).

Různé druhy anaerobních bakterií bez přístupu kyslíku rozkládají organické znečišťující látky, přičemž při této činnosti vznikají jako produkty metan a oxid uhličitý – tzv. bioplyny. Množství reakcí, které zde probíhají, mají na starosti různé k tomu specializované bakterie (Srinivas, 2008). Bakterie vzájemně spolupracují tak, že produkt jedné skupiny představuje substrát pro skupinu druhou. Z tohoto důvodu je třeba dbát na to, aby v systému nedošlo k porušení rovnováhy, jelikož by to negativně ovlivnilo účinnost procesu (Dohányos, 1998).

Celkový anaerobní proces čištění je možné vysvětlit na jeho čtyřech stupních. V prvním kroku (hydrolýze) je nejprve třeba zajistit, aby se nerozpustné organické látky staly rozpustnými ve vodě a aby se větší organické látky zmenšily natolik, aby byly schopné snáze pronikat přes buněčnou stěnu mikroorganismů. Cílem je ulehčit mikroorganismům přijímání organických látek jako jsou lipidy, polysacharidy, proteiny. Následně proběhne hydrolýza organických látek za vzniku monomerů. Uhlík z monomerů v dalším stupni (acidogenezi) využijí bakterie jako zdroj energie pro vytvoření těkavých mastných kyselin a vedlejších produktů jako je např. amoniak nebo oxid uhličitý (Riffat, 2012). Ve třetím kroku (acetogenezi) se přeměňují organické kyseliny s více než třemi atomy uhlíku na kyselinu octovou a

vodík. Závěrečným stupněm je metanogeneze, ve které z kyseliny octové vzniká metan (Rao a kol., 2012).

3.3 Koagulace a flokulace

Mezi nejčastěji používané metody k odstranění suspendovaných částic z vody patří metoda koagulace a flokulace. Cíl koagulace spočívá ve snižování nebo neutralizování elektrického náboje na povrchu suspendovaných částic, které je vyvoláno přidáním koagulačního činidla. Částice s podobným elektrickým nábojem se ve vodě vzájemně odpuzují a v suspenzi se drží od sebe. Snižování elektrického náboje částic umožní van der Waalsovým silám seskupovat suspendované částice pomocí přitažlivých sil do mikrovloček, které se vytváří ve vodě za intenzivního promíchávání (Metcalf & Eddy, Inc., 1991). Koagulace typicky nastává v časovém úseku menším než 10 sekund (Crittenden a kol., 2012).

Flokulace je proces, při kterém dochází ke shlukování destabilizovaných částic (tj. takové částice, u kterých byl redukován elektrický povrchový náboj) a produktů srážení vytvořených přidáním koagulantů do větších částic – takzvaných vloček. Cílem je zlepšení následných separačních procesů v podobě usazování nebo filtrace. Hlavní výhodou přidávání flokulačních činidel (flokulantů) je vytvoření silnějších vloček. Flokulanty se však přidávají až poté, co jsou přidány činidla koagulační a částice jsou již destabilizované. K flokulaci dochází v časovém rozmezí od 20 do 45 minut (Crittenden a kol., 2012).

Flokulace se vyskytuje ve dvou různých podobách. První z nich je označována jako mikroflokulace (perikinetická flokulace nebo též Brownův pohyb) a molekuly ve vodě se při ní shlukují nahodile vlivem teploty. Druhá podoba flokulace je makroflokulace (orthokinetická flokulace), kde je shlukování částic vyvoláno mícháním částic ve vodě (Crittenden a kol., 2012).

Mezi látky, které se obvykle používají jako chemické koagulanty, řadíme: síran hlinitý $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$, chlorid železitý $[\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, síran železitý $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3]$, síran železnatý $[\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ a hydroxid vápenatý $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Pro zjištění optimálního množství koagulantů se běžně experimentálně provádí tzv. jar test (Ismail a kol., 2012).

Jar test – optimální množství koagulantů pro komunální ČOV

Doba rychlého míchání = 60 s, doba usazování = 30 min, rychlost míchání = 350 ot/min, pH = 6-6.5, teplota = 30 °C

Typ koagulantu	Chemický vzorec	Množství koagulantu (mg/l)	Odstraňování celkového množství suspendovaných látek (%)	Odstraňování BSK (%)
Síran hlinitý	[Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O]	60	77	53
Síran železnatý	[FeSO ₄ .7H ₂ O]	80	74	48
Síran železitý	[Fe ₂ (SO ₄) ₃]	60	77	48
Síran železitý + Síran železnatý	[Fe ₂ (SO ₄) ₃] + [FeSO ₄ .7H ₂ O]	60 + 20	86	50
Síran železnatý + hydroxid vápenatý	[FeSO ₄ .7H ₂ O] + [Ca(OH) ₂]	80 + 20	78	50

Obr. 1: Optimální množství koagulantů pro komunální ČOV (Ismail a kol., 2012).

4. Kaly

Kaly jsou nevyhnutelným vedlejším produktem sledu operací, které se využívají v čistírně k čištění odpadních vod (Demirbas a kol., 2017). Vytváří se v průběhu čištění primárního (fyzikálního/chemického), sekundárního (biologického) a případně také terciálního, které může navazovat jako doplnění sekundárního čištění. Znečišťující objekty (shrabky) oddělené při hrubém předčištění se za kal nepovažují (Magoarou, 1999). V rámci čištěných vod tvoří kaly 1-2 % z celkového objemu, avšak v tomto malém množství je zkoncentrováno 50-80 % z původního znečištění (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a). Kaly jsou tvořeny směsí různorodých organických a anorganických látek. Obvykle mají kaly polopevnou až řídkou konzistenci a předtím, než je možné kaly odstranit nebo dále využít, musí projít určitými úpravami (Demirbas a kol., 2017).

Z historického hlediska se odvětví kalového hospodářství stalo terčem zájmu až ve chvíli, kdy začala ubývat místa pro odkládání kalu, a celkové náklady vynaložené na tuto oblast rostly (Demirbas a kol., 2017). Je třeba poznamenat, že náklady spojené s provozem kalového hospodářství v současnosti dosahují až k 50 % z celkových provozních nákladů čistírny (Čechmánková a kol., 2017). Způsob nakládání s kaly, které jsou nevyhnutelným vedlejším produktem čištění odpadních vod, se odvíjí od množství a typu kalů (Scholz, 2016). Jednotlivé kaly se liší obsahem pevných látek v závislosti na charakteristice kalu, způsobu odstraňování a metodách nakládání (Park a kol., 2018). Podle toho, v jaké fázi procesu čištění odpadních vod byl kal vyprodukován, rozeznáváme následující druhy kalu (Scholz, 2016).

4.1 Primární kal

Primární kal vzniká při mechanickém čištění v usazovací nádrži a vyznačuje se vyšším obsahem organických látek, které pocházejí především z výkalů a zbytků jídla a je vysoce hnilivý. Čerstvý kal má šedou barvu a výrazný zápach, přičemž při dlouhodobějším skladování kalu bez přístupu kyslíku se intenzita zápalu ještě stupňuje (Scholz, 2016). Primární kal je v porovnání s kalem sekundárním více znečištěný organickými látkami a těžkými kovy. V důsledku jejich nízké

rozpuštěnosti ve vodě dochází k jejich odstraňování právě v primární usazovací nádrži (Angelidaki a Ahring, 1999).

S ohledem na vlastnosti je primární kal vhodný ke spalování. V čistírně o velikosti 500 000 ekvivalentních obyvatel (dále jen EO) se vyprodukuje 48 g primárního kalu na osobu za den, přičemž koncentrace nerozpuštěných látek představuje 4 % (Mininni a kol., 2004). Koncentrace organických látek se u kalu z komunálních odpadních vod pohybuje v rozsahu 60-80 % (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a). Obsah dusíku je 1-5 % a fosforu 0,6-2,8 % z obsahu sušiny. U primárního kalu může dojít ke zvýšení jeho produkce, pokud je odstraňování pevných látek ještě vylepšeno přidáním aktivovaného kalu nebo chemických látek, které podporují flokulaci (Kalavrouziotis, 2017).

4.2 Sekundární kal

Pod pojem sekundární kal řadíme kaly vzniklé ve fázi biologického čištění – tedy kal z biologické filtrace a přebytečný aktivovaný kal (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a). Sekundární kal se vyznačuje vyšším obsahem dusíku a fosforu, proto je u něho předpoklad následného využití v zemědělství (Mininni a kol., 2004). Obsah dusíku je 2,5-6 % a fosforu 1-6 % z obsahu sušiny (Metcalf & Eddy, Inc. a kol., 2013). V čistírně o velikosti 500 000 EO je produkce sekundárního kalu 27,11 g na osobu za den. V takovém kalu je koncentrace nerozpuštěných látek 1,1 % (Mininni a kol., 2004).

4.2.1 Kal z biologické filtrace

Kal z biologické filtrace vzniká v dosazovacích nádržích biologického filtru, které jsou nejčastěji umístěny za jednotku biofilmového reaktoru. Kal je tvořen pevnými látkami biologického původu, které odpadávají nebo jsou odtrženy z povrchu filtru. Lze tedy říci, že se jedná o čistý přírůstek biomasy ve filtrech. Množství vyprodukovaného kalu není v rámci roku stále stejné, jeho hodnoty se mění, přičemž nejvíce se ho vyprodukuje na jaře (Scholz, 2016). Byl proveden experiment, který měl zjistit charakteristiku kalu z biologické filtrace při měřeních v prosinci, březnu a červnu. Potvrdil, že nejvíce kalu se opravdu vyprodukovalo na jaře - v měsíci březnu. Měření obsahu organických látek v kalu, udávané v % dosáhlo v prosinci hodnot 73 %, v březnu 85,5 % a v červnu 80,5 %. Procento

pevných látek se pohybovalo v rozmezí 1 až 2 %. V porovnání s aktivovaným kalem (0,8-1,2 %) je v kalu z biologického filtru (1,1-2,3 %) vyšší množství pevných látek (Park a kol., 2018). Složení s vyšším obsahem organických látek způsobuje, stejně jako je tomu u primárního kalu, výraznější zápach (Scholz, 2016).

4.2.2 Přebytečný aktivovaný kal

Přebytečný aktivovaný kal je odebírán z aktivovaného kalu, který se vrací z usazovací nádrže zpět do aktivačního procesu a tvoří cca 8-10 % z množství vyprodukovaného za den. Přebytečný aktivovaný kal se skládá z vločkovitých pevných látek biologického původu, které ve značné míře vyžadují kyslík k dýchání (Scholz, 2016). Koncentrace organických látek se u kalu z komunálních odpadních vod pohybuje v rozsahu 60-75 % (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a).

4.3 Chemický kal

Ke vzniku chemického kalu dochází při procesech chemické koagulace a chemického srážení (Scholz, 2016). Ke srážení fosforu se v České republice na některých čistírnách používá síran železitý (Pytl, 2012). V obou případech se však jedná o procesy, které běžné čistírny odpadních vod málokdy používají. Ačkoliv jejich použití není příliš časté, představují nejekonomičtější prostředek, jak z odpadních vod odstraňovat fosfor. Tyto kaly obsahují zejména reakční produkty přidaných chemických látek a dalších příměsí, které mají být odstraněny (Scholz, 2016).

4.4 Kal z digesce

Kal z digesce je dalším typem kalu. Kal z digesce vzniká tehdy, když je kal primární nebo sekundární podroben procesu digesce (aerobní nebo anaerobní) za účelem jeho stabilizace (Baily, 2009). Tento kal je stabilní, neškodný, obsahuje nízké množství choroboplodných zárodků a je vhodný k použití na zemědělské půdě (Srinivas, 2008). Jako stabilizovaný materiál můžeme tento kal odvodňovat na otevřeném odkališti, aniž bychom tím způsobili výrazný nežádoucí zápach. Dobře stabilizovaný kal pocházející z anaerobní digesce má černou barvu a dehtový zápach (Scholz, 2016).

Druh kalu	Organické látky v sušině (%)	Obsah vody v kalu (%)	Zdroj kalu	Nakládání s kalem
Primární kal	48-80	93-97	Mechanické čištění – usazovací nádrž	spalování kompostování
Kal z biologické filtrace	65-75	94-99	Biologické čištění – dosazovací nádrže	Využití v zemědělství
Přebytečný aktivovaný kal	65-75	98-99,5	Biologické čištění – aktivační proces	Využití v zemědělství kompostování
Kal z digesce	30-60	96-99	Aerobní / anaerobní digesce	Přímá aplikace na půdu kompostování

Obr. 2: Přehled jednotlivých typů kalů (Minnini a kol., 2004; Baily, 2009; Riffat, 2012; Scholz, 2016).

Hlavní snahou při čištění komunálních odpadních vod je zkoncentrovat pevné látky představující asi 0,05 % a více objemu odpadních vod do kalů o obsahu pevných látek v rozsahu od 1 % do 10 %. Koncentrace kalu je určena odpařením obsahu vody z měřeného množství kalu a následným zvážením zbytku, který se vyjádří jako procento z hmotnosti původního vodnatého kalu (Scholz, 2016).

Podle údajů Českého statistického úřadu (ČSÚ) se v roce 2017 vyprodukovalo v České republice 178 077 tun sušiny kalů. V porovnání s čísly za roky 2005 až 2017 jde o nejvyšší hodnotu (Český statistický úřad, 2018).

5. Technologie zpracování kalů

Technologiemi zpracování a likvidace kalů se sledují následující cíle: stabilizace organických látek obsažených v kalu, zredukování množství kalu odstraněním části vody, zničení choroboplodných zárodků, shromažďování vedlejších produktů, které je možné využít nebo prodat (v praxi k tomu však dochází zřídka, výjimkou je produkce metanu) a likvidace kalů bezpečným a esteticky přípustným způsobem (Stopher a kol., 2006).

5.1 Zahušťování kalů

Zahušťováním kalu se sleduje zvýšení obsahu pevných látek, přičemž je potřeba odstranit přebytečnou vodu z kalu scezením a zkoncentrovat pevnou složku pomocí usazování (Crittenden a kol., 2012). Obsah pevných látek je takto zvýšen na 2-5 %. Snížení množství kalu rovněž znamená i snížení provozních nákladů v krocích následujících po zahušťování (Liu, 2014). K zahuštění kalu dochází v 96 % z celkového množství kalů, přičemž 52 % představuje strojní zahušťování, 33 % gravitační a zbylých 11 % připadá na kombinaci předchozích postupů (Čechmánková a kol., 2017).

Zahušťování a stejně tak odvodňování kalu nemá vliv na obsah léčiv a produktů osobní hygieny v kalu, jelikož se neodstraňuje sušina kalu – koncentrace před a po zahušťování se nemění (Mailler a kol., 2014).

Rozsah pozorovaných koncentrací v primárním a sekundárním kalu							
(v ng/g sušiny)							
	Analgetika	Antibiotika	Hormony	Psychiatrické léky	Antiseptika	Vonné látky	Neiontové povrchově aktivní látky
Primární kal	$3-10^4$	$5-4 \cdot 10^3$	$4-4 \cdot 10^2$	$5-2 \cdot 10^3$	$40-1.5 \cdot 10^4$	10^3-10^5	10^2
Sekundární kal	$1-10^3$	$10^{-1}-7 \cdot 10^4$	$10^{-1}-3 \cdot 10^2$	$1-6 \cdot 10^2$	$10^2-2 \cdot 10^4$	$10-10^3$	-

Obr. 3: Rozsah pozorovaných koncentrací v primárním a sekundárním kalu v ng/g sušiny (Verlicchi a Zambello, 2015).

5.1.1 Gravitační zahušťování

Gravitační zahušťování se uskutečňuje v nádrži kruhového tvaru (Crittenden a kol., 2012). Tato metoda je vhodná pro primární kal nebo kombinaci primárního a přebytečného aktivovaného kalu (směsný kal) (Riffat, 2012). Kal je přiveden do nádrže, kde se následně usazuje a houstne. Předtím, než se začne usazovat je lehce promíchán, čímž se v hmotě kalu vytvoří kanálky, kterými voda odteče a tím usnadní zahuštění. Poté je zahuštěný kal shrnut na dno nádrže (Crittenden a kol., 2012). Vrstva kalu na dně nádrže dosahuje hloubky od 0,5 m do 2,5 m, v teplejších měsících je hloubka nižší. Provozní proměnnou je tzv. sludge volume ratio - jedná se o podíl množství kalu v zahušťovací nádrži a množství zahuštěného kalu, které je denně odstraněno - dosahuje hodnot od 0,5 do 20 za den (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

5.1.2 Aerační flotace

Aerační flotace (známá též pod zkratkou DAF – Dissolved Air Flotation), jako další způsob zahušťování kalu, je vhodná především pro přebytečný aktivovaný kal (lehký a vločkovitý) i pro kal směsný (Riffat, 2012). Při flotaci proudí ze dna nádrže pod tlakem vzduch, jehož účelem je provzdušňovat kal. Velké množství vzduchových bublin se rozptýlí v kalu, připojí se k jeho částicím a následně je vynášejí na povrch nádrže. Vrstva takto vytvořená je z povrchu odstraněna sběrným zařízením (Liu, 2014).

5.1.3 Odstředování

Metoda odstředování se používá jak pro zahušťování, tak i odvodňování kalu. Princip spočívá v usazování pevných částic obsažených v kalu v důsledku působení odstředivé síly (Liu, 2014).

Celková koncentrace pevných látek v kalu po zahušťování (%)			
Typ kalu	Gravitační zahušťování	Aerační flotace	Odstředování
Primární kal	8-10	-	9-12
Přebytečný aktivovaný kal	1,5-2	3-5	5-7
Směsný kal	4-6	4-6	5-7

Obr. 4: Celková koncentrace pevných látek v kalu po zahušťování v % (Sanin a kol., 2011).

5.2 Stabilizace

Stabilizace kalů neboli digesce kalů je proces, při kterém se rozkládají organické látky na relativně stabilní konečné produkty. Tyto jsou značně redukovány v množství, jsou méně obtěžující, více mineralizované a husté konečné produkty. Digesce kalu je tedy prováděna z následujících důvodů: 1) znatelné snížení množství organických látek, 2) usnadnění odvodňování, 3) redukování patogenních látek, 4) získání užitečných konečných produktů jako je např. metan a 5) snížení celkového množství kalu. Rozeznáváme stabilizaci kalu biologickou, chemickou a fyzikální (Srinivas, 2008), avšak nejčastěji se setkáváme s dělením na aerobní digesci a anaerobní digesci (Ramírez a kol., 2008). Na konci procesu vzniká stabilizovaný kal, který je upravený takovým způsobem, že již nepodléhá biologickému rozkladu (Dohányos, 2006). Po stabilizaci kalu obvykle následuje odvodnění, aby se ještě více zmenšilo množství kalu (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

5.2.1 Anaerobní digesce

Celkově nejužívanějším procesem pro stabilizaci kalu je anaerobní digesce. Při anaerobní digesci je kal stabilizován prostřednictvím biologické degradace skupiny organických látek bez přístupu kyslíku. Nejběžnější teplotní fází pro digesci je ta mezofilní, ve které se teplota pohybuje mezi 32-35 °C. U termofilní fáze je teplota vyšší, a to 50-60 °C, nicméně z důvodu vysokých nároků na dodávanou energii se nepoužívá moc často, ačkoli je vysoce efektivní. V průběhu přeměny na metan, oxid uhličitý, vodu a rozpustný organický materiál dochází ke zničení cca 25-45 % pevných látek obsažených v surovém kalu (Vigneswaran a Kandasamy, 2009).

Anaerobní digesce se skládá ze dvou fází – zkapalňování a zplyňování. V první fázi jsou složitější organické látky rozloženy kyselinotvornými saprofytickými bakteriemi na těkavé mastné kyseliny s kratšími řetězci, jako je kyselina octová, kyselina máselná a kyselina propionová. Tyto jsou následně ve druhé fázi přeměněny na plyny pomocí metanotvorných bakterií. Digesce se odehrává ve vzduchotěsném reaktoru, do kterého je kal přiváděn průběžně nebo jen občas a následně je zde držen po různě dlouhé časové úseky (Srinivas, 2008). Doba zdržení je obvykle více než 20 dní. Hlavním nedostatkem je pomalý průběh biologické degradace. V důsledku nízké koncentrace rozpuštěných organických látek

v kalu je možné rozložit jen 30-50 % pevných látek, a to během velmi dlouhé doby (Chiu a kol., 1997).

Anaerobní stabilizace kalů nachází využití ve větších čistírnách (tj. velikost obvykle nad 30 000-50 000 EO). Jedná se především o čistírny s primární sedimentací, ale výjimkou nejsou případy, kdy se anaerobní stabilizace použije pouze pro přebytečný aktivovaný kal (Hartig, 2017). U této široce užívané technologie se značným přínosem pro udržitelné nakládání a pro zhodnocení kalu, se mimo jiné klade důraz na zvyšování množství a kvality bioplynu – tj. především vyšší obsah metanu v poměru k oxidu uhličitému, a dále ještě na optimalizaci procesu (Stamatelatou a Tsagarakis, 2015).

5.2.2 Aerobní digesce

Aerobní digesce je oxidativní mikrobiální proces stabilizace kalu. Spočívá v biologické přeměně organických látek za přítomnosti vzduchu, obvykle v otevřeném reaktoru. Princip je takový, že pokud mikroorganismy spotřebují dostupný substrát, začnou konzumovat svoji vlastní protoplazmu jako zdroj energie, čímž dojde k celkové redukci pevných látek. Buněčná tkáň je oxidována za vzniku oxidu uhličitého, vody a amoniaku (Riffat, 2012). Na 1 kg organické hmoty je obecně třeba dodat 1,42 kg kyslíku, a pokud je přítomen amoniak, množství se ještě zvyšuje. Biomasa působící při aerobní stabilizaci je téměř totožná s tou, která se vyskytuje v aktivačním procesu (Hlavínek a kol., 2000).

Tento typ digesce se týká zejména přebytečného aktivovaného kalu, směsi kalů z aktivačního procesu, biofiltru a primárního kalu a též kalu z menších čistíren, které užívají prodlouženou aeraci. Jen u 75-80 % buněčné tkáně dochází k oxidaci, zbylá část je inertní (neproběhne biodegradace). Běžná aerobní digesce probíhá při 20 °C, s dobou zdržení 10-12 dní, při zvýšení teploty na 45 °C se doba zdržení zkracuje na 3-4 dny. Při aerobní digesci vzniká teplo, které může být dále využito, jde tedy o reakci exotermickou (Srinivas, 2008). Aerobní stabilizace probíhá v menších čistírnách s kapacitou do 30 000 EO (Hartig, 2017).

Mezi hlavní výhody aerobní digesce řadíme relativní snadnost operace, nižší náklady a vhodnost pro kal bohatý na živiny (Metcalf & Eddy, Inc., 2003). Nevýhodou jsou vyšší náklady na energii spojené s dodáváním kyslíku, horší

mechanické odvodnění digestovaných částic a také značný vliv teploty, umístění, koncentrace dodávaného kalu nebo typu provzdušňování na proces (Riffat, 2012).

Jelikož tradiční jednofázová (anaerobní nebo aerobní) digesce ne vždy zajistí dostatečnou biodegradaci látek, může se jevit jako efektivní řešení digesce zkombinovat ze dvou fází (Tomei a kol., 2011).

Rozsah pozorovaných koncentrací v digestovaném kalu (v ng/g sušiny)						
Analgetika	Antibiotika	Hormony	Psychiatrické léky	Antiseptika	Vonné látky	Neiontové povrchové aktivní látky
4-10 ³	1-8 · 10 ³	1-10 ⁴	10 ⁻¹ -3 · 10 ³	10 ² -7 · 10 ⁴	10-8 · 10 ⁴	10-2 · 10 ⁴

Obr. 5: Rozsah pozorovaných koncentrací v digestovaném kalu (v ng/g sušiny) (Verlicchi a Zambello, 2015).

5.3 Odvodňování kalů

Odvodnění kalu je operace založená na zredukování množství vody obsažené v kalu za účelem přípravy kalu na následující procesy (Neyens a kol., 2002). Existují různé techniky pro odvodnění – některé z nich využívají přírodních sil (vypařování nebo perkolace), jiné jsou zajištěny strojně - mechanicky nebo tepelně (Liu, 2014). V současnosti převládá z ekonomických důvodů mechanický způsob odvodnění nad tepelným způsobem. Separční technologie nejvhodnější pro odvodňování kalů jsou: filtrační lisy, rotační bubnové filtry a odstředování. Ke zlepšení mechanického odvodňování se často předem přidávají do kalu koagulanty nebo flokulanty, které pomáhají shlukovat částice a tím zvětšovat jejich velikost (Wakeman, 2007). V čistírnách se hojně užívají pro svoji ekonomickou účinnost a snadné používání. Avšak praxe naznačuje, že současné odvodňování přebytečného aktivovaného kalu je stále ještě relativně slabé (Wei a kol., 2018). Stejně jako u zahušťování kalu i odvodňování neovlivňuje obsah léčiv a produktů osobní hygieny v kalu (Mailler a kol., 2014).

5.3.1 Filtrační lis

Filtrační lisy (tzv. kalolisy) bývají nejvíce preferované z výše uvedených možností odvodňování. Jsou složeny z určitého množství filtračních desek

přípevněných na postranním rámu nebo zavěšených na horním rámu. Obvyklé rozměry filtračních desek jsou 1,5 m x 1,5 m, ale objevují se i rozměry 2 m x 2 m a větší (Wakeman, 2007). Filtrační desky pokrývají filtrační plachetky. Při čerpání kalu mezi sebou desky vytvoří rozestupy, kterými dovnitř proteče kal a vyplní takto vzniklé komory mezi deskami. Vyvinutím tlaku přibližně 1-1,6 MPa jsou komory stlačeny a voda z kalu se odfiltruje skrz plachetky mimo kalolis. Uvolněním tlaku se odvodněný kal ve formě kalových koláčů vymaní působením gravitace z prostoru komor. Výhodou je prostorová nenáročnost, nevýhodou vyšší investiční náklady (Hlavínek a kol., 2000).

Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV kalolisem			
Typ kalu	Koncentrace pevných látek v kalu (%)	Koncentrace pevných látek v kalovém koláči (%)	Doba cyklu (h)
Surový primární + aktivovaný	3-8	45-50	2-2,5
Surový primární + aktivovaný + FeCl₃	5-8	40-45	3-4
Primární z digesce + aktivovaný + FeCl₃	6-8	40	3

Obr. 6: Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV kalolisem (Water Environment Federation, 1992).

5.3.2 Pásový lis

Odvodňování kalu pomocí pásového lisu zahrnuje tři kroky: prvním je přidání flokulantů do kalu, druhým je odvedení vody pomocí gravitace a třetím vyvinutí tlaku (Crittenden a kol., 2012). Pásový lis je představován dvěma pohybujícími se napnutými tkaninovými filtry (pásy). Vločkující kal je přiváděn na nižší pás – zde začíná odvodnění pomocí gravitace. Následně je kal na posuvném pásu přiveden do zóny, kde dochází k jeho intenzivnímu stlačení mezi horním a spodním pásem, které se pohybují směrem k sobě a takto vytvořený kalový koláč opouští pás (Wakeman, 2007).

Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV pásovým lisem			
Typ kalu	Koncentrace pevných látek v kalu (%)	Koncentrace pevných látek v kalovém koláči (%)	Dávkování srážedla (polyelektrolytu) (kg/t)
Surový primární	3-10	25-44	0,6-4,5
Surový aktivovaný	0,5-4	12-32	1-6
Surový primární + aktivovaný	3-6	20-35	0,6-5
Kal z aerobní digesce	3-9	12-30	0,8-5
Kal z anaerobní digesce	4-8	18-34	1,5-4,5

Obr. 7: Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV pásovým lisem (Spinosa, 1986).

5.3.3 Dekantační odstředivka

Odstředování kalu (tzv. dekantální odstředivka) probíhá v otáčivém bubnu válcového tvaru za vysoké rychlosti. Odstředivá síla způsobuje, že se suspendované částice obsažené ve vodě přemisťují ve směru od rotační osy v důsledku rozdílné hustoty vody a kalových částic (Muspratt a Miller, 2018). Otáčivý buben má dvě části - vnitřní (do této části je přiváděn kal) a vnější. Jeho obě části se točí stejným směrem, ovšem každá jinou rychlostí. Těžší částice se zachycují na vnějším bubnu a odsud jsou sunuty ven. Odstředěná voda je v důsledku přivádění nového kalu nepřetržitě odváděna skrz bubnové otvory do sběrače. Ze sběrače ji poté potrubí odvádí ven (Crittenden a kol., 2012).

Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV odstředováním			
Typ kalu	Koncentrace pevných látek v kalu (%)	Koncentrace pevných látek v kalovém koláči (%)	Dávkování flokulantu/koagulantu (kg/t)
Surový primární	5-8	25-36, 28-36	0,5-2,5, 0
Surový aktivovaný	0,5-3	4-12	5-7,5
Surový primární + aktivovaný	4-5	18-25	1,5-3,5
Primární kal z digesce + aktivovaný	2-4, 4-7	15-18, 17-21	3,5-5, 2-4

Obr. 8: Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV odstředováním (Spinosa, 1986).

5.3.4 Rotační bubnové filtry

Rotační bubnové filtry jsou zástupcem vakuové filtrace, která se ale zřídka využívá pro odvodnění komunálních kalů (vhodnější je pro některé typy kalů průmyslových). Důvodem jsou určitá provozní omezení – nepoužívají se tam, kde většina částic dosahuje velikosti menší než cca 5 μm . Nicméně jejich výhodou je nepřetržitý provoz a v podstatě téměř žádné zásahy obsluhy v průběhu běžného provozního cyklu (Wakeman, 2007).

5.4 Hygienizace

Hygienizace kalu je požadavkem na snížení množství choroboplodných zárodků obsažených v kalu na požadovanou úroveň. Funkci hygienizace může splňovat i metoda stabilizace kalu, avšak nemusí tomu tak vždy nutně být (Dohányos, 2006). Stabilizovaný kal je třeba před jeho dalším využitím (na zemědělské půdě) zbavit patogenních mikroorganismů (bakterie, viry, protozoa, hlísti), které by mohly být pro zdraví člověka nebezpečné (Arthurson, 2008). Metody, jejichž cíl se omezuje na zneškodnění choroboplodných zárodků, dělíme na fyzikální (využití teploty, radiace, ultrazvuku) a chemické (Hlavínek a kol., 2000). Hygienizace se uskutečňuje jen u 36,5 % čistíren, ale je jí podrobena 72,5 % z celkového množství kalů (Čechmánková a kol., 2017).

5.4.1 Pasterizace

Vystavení kalu vysoké teplotě po dobu minimálně 30 minut se nazývá proces pasterizace. Předpokládá se její předřazení před stabilizaci (především tu anaerobní), poté je schopna zastavit růst choroboplodných zárodků v kalu (Hlavínek a kol., 2000). Pasterizace má dva stupně zahřívání kalu. Nejprve se kal přehřeje na 50 °C předáním tepla z pasterizovaného kalu z pasterizační jednotky, poté dojde k zahřátí na finální teplotu 72-75 °C, které by kal neměl být vystaven déle než 45 minut. Tato technologie je plně automatizovaná (Zrubková, 2017).

5.4.2 Hygienizace radiací

Hygienizace, při které se kal ozařuje paprsky beta či gama se nazývá radiace. Výhodou této metody (a stejně tak metody pasterizace) je, že se kal následně lépe odvodňuje (Hlavínek a kol., 2000).

5.4.3 Úprava vápnem

Častou a z ekonomického hlediska výhodnou chemickou metodou hygienizace je úprava kalu vápnem (tzv. kalcinace). Množství páleného vápna odpovídající 10-30 % sušiny kalu je vpraveno do odvodněného kalu, kde dojde k reakci vody z kalu s vápnem za vzniku hydroxidu vápenatého a uvolněného tepla. Účinky hygienizace je možné zefektivnit zvýšením teploty na cca 50 °C a zvýšením pH na hodnotu 12 a více (Pytl, 2012).

Průtok a koncentrace kalu v různých stupních zpracování						
ČOV o velikosti 500 000 EO						
Typ kalu		Sušina kalu		Vodnatý kal		Průtok (t/den)
		Produkce (g/os·den)	Ztráta žíháním (% z celkového množství pevných látek)	Produkce (kg/ os·den)	Celkové množství pevných látek (hmotnostní zlomek)	
Surový kal	Primární	48	75	1,200	0,04	600
	Sekundární	27,11	75,06	2,543	0,01066	1271,7
	Směsný	75,11	75,02	3,743	0,02006	1871,7
Zahuštěný kal	Primární	48	75	0,600	0,08	300
	Sekundární	27,11	75,06	1,084	0,025	542,2
	Směsný	75,11	75,02	1,633	0,046	816,4
Digestovaný kal	Primární	30	60	0,576	0,0521	288,1
	Sekundární	21	67,81	1,078	0,0195	539,2
	Směsný	51	63,22	1,603	0,0318	801,5
Odvodněný kal	Primární	30	60	0,100	0,3124	48
	Sekundární	21	67,81	0,180	0,1169	89,9
	Směsný	51	63,22	0,270	0,1909	133,6

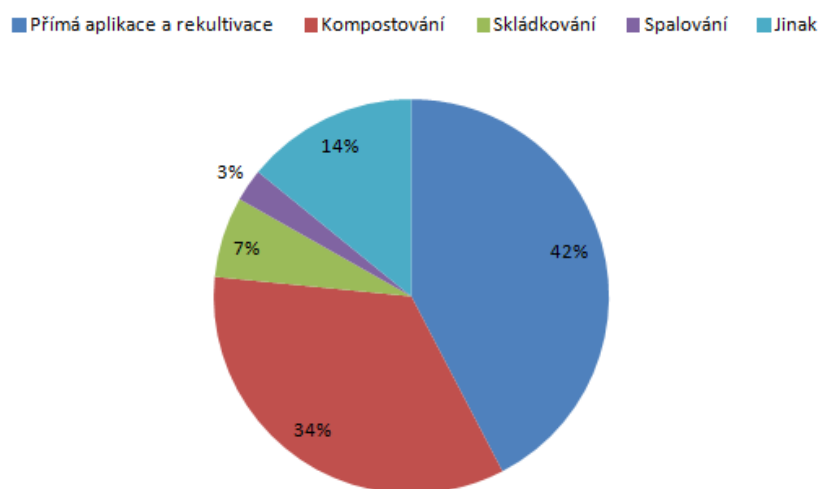
Obr. 9: Průtok a koncentrace kalu v různých stupních zpracování – hodnoty uváděné pro ČOV o velikosti 500 000 EO (Mininni a kol., 2004).

6. Nakládání s kaly

Mezi hlavní možnosti, jak finálně naložit s kaly z čistíren, patří uložení na zemědělskou půdu, kompostování, spalování a skládkování. Dle dat ČSÚ v České republice převažuje aplikace kalu na půdu a kompostování (Český statistický úřad, 2018). Pod označení „jinak“ obvykle spadá zajištění technického zabezpečení skládky pomocí kalu (Wanner, 2019).

Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění za rok 2017 v ČR					
Produkce kalů celkem (v t sušiny)	Způsoby zneškodnění kalů				
	Přímá aplikace a rekultivace	Kompostování	Skládkování	Spalování	Jinak
178 077	75 451	60 930	11 809	4 736	25 151

Obr. 10: Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění za rok 2017 v ČR (Český statistický úřad, 2018).



Obr. 11: Graf znázorňuje části z celku, které zaujímají jednotlivé způsoby pro zneškodnění kalů za rok 2017 v ČR (Český statistický úřad, 2018).

6.1 Využití kalů na zemědělské půdě

Přímá aplikace kalu s vysokým obsahem organických látek na půdu je nejdůležitější z metod pro nakládání s kalem, zejména u kalů pocházejících z malých a středních čistíren, kde je nízký obsah nebezpečných látek a které se nacházejí

poblíž místa, kam se má kal uložit (Spinosa, 2004). Metoda je preferovaná z toho důvodu, že může vést k relativně levnému kompletnímu znovu využití živin a organického uhlíku z kalu (Karagiannidis a kol., 2011). Využití v zemědělství vyžaduje specifický rozbor kalu a závisí na mnoha vnějších faktorech - např. fakt, že dohoda se zemědělcem je závislá čistě na souhlasu z jeho dobré vůle. V mnoha zemích je zakázáno používat kal tam, kde se pěstují potraviny, z důvodu možné kontaminace patogeny (Kacprzak a kol., 2017).

V současnosti nemají zemědělci velký zájem o aplikaci kalu na zemědělskou půdu z důvodu obav z možných administrativních překážek, proto u nich chybí ochota platit za využití kalu. Nabízela by se možnost, kdy by se naopak platilo zemědělcům místo odpadářským firmám za analýzu půdy a aplikaci kalu, čímž by se jejich zájem podpořil (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a).

Legislativně je tato oblast upravena vyhláškou č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Kaly, které prošly úpravou, musí být umístěny na půdu do 8 měsíců ode dne jejich úpravy, a nejpozději do 48 hodin od jejich rozprostření musí být zapraveny do půdy. Na jeden hektar půdy se smí použít maximálně 5 tun sušiny kalů. V případě přímé aplikace se vyžaduje obsah sušiny kalu alespoň 4 % (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění).

Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě (příloha č. 4 vyhlášky č. 437/2016 Sb.)				
Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Počet zkoušených vzorků při každé kontrole výstupu		Limitní hodnota (nález/ kolonie tvořící jednotku)
Salmonella spp.	Nález v 50 g	5		negativní
Escherichia coli nebo enterokoky	Kolonie tvořící jednotku v 1 gramu	5	4	$< 10^3$
			1	$< 5 \cdot 10^3$

Obr. 12: Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění).

Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (příloha č. 3 vyhlášky č. 437/2016 Sb.)	
Riziková látka	Maximální hodnoty koncentrací v kalech (mg/kg sušiny)
As - arzén	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb – olovo	200
Zn – zinek	2500
AOX – absorbovatelné organicky vázané halogeny	500
PCB – polychlorované bifenyly	0,6
PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky	10

Obr. 13: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění).

6.2 Spalování kalů

Spalování je metoda typická pro vyspělé země. Kal z čistírny může být spalován buď samostatně, nebo může docházet k jeho spoluspalování v elektrárnách, spalovnách odpadů nebo v cementárnách (Štásta a kol., 2006). Kal se spaluje při teplotách v rozmezí 850-950 °C. Nižší teploty se využívá k eliminaci zápachu, teplota nad 950 °C se už nedoporučuje (European Commission, 2005). Produktem spalování je popel – inertní materiál, který nepodléhá biodegradaci a je zbaven patogenů. Z tohoto důvodu může být bez obav ukládán na skládku. Neodporuje-li to legislativě, může být též součástí rekultivačních směsí a dále je možné jeho využití ve stavebnictví. (Pérez-Elvira a kol., 2006).

Výhodou spalování je značné zredukování množství kalu, zničení patogenů a potenciální využití energie. Naopak nevýhodou jsou vysoké náklady na provoz, možnost vzniku nebezpečného odpadu jako vedlejšího produktu a obavy ze znečištění ovzduší (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

6.3 Kompostování

Cílem kompostování je urychlit rozklad organických látek díky vysoké mikrobiální rozmanitosti a aktivitě (hlavně termofilní organismy), hojnému substrátu, měnícímu se pH a redoxním podmínkám (aerobní i anaerobní mikroprostředí) (Xia a kol., 2005). Ve většině případů je prostředí aerobní, jelikož to vede k lepšímu rozkladu látek a vyšší teplotě potřebné k odstranění patogenů. Kompostováním je možné zajistit stabilizaci kalu primárního, přebytečného aktivačního, digestovaného i odvodněného. Konečným produktem je humus, který může posloužit jako hnojivo pro zlepšení stavu půdy (Riffat, 2012). Na hnojiva, která pocházejí z čistíren odpadních vod - tedy kaly, se vztahuje vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva. Čistírenské kaly podle této vyhlášky podléhají limitům pro rizikové prvky v hnojivech (Vyhláška č. 474/2000 Sb., v platném znění).

Rozsah pozorovaných koncentrací v kompostovaném kalu (v ng/g sušiny)						
Analgetika	Antibiotika	Hormony	Psychiatrické léky	Antiseptika	Vonné látky	Neiontové povrchově aktivní látky
10^{-1} - 10^3	$8 \cdot 10^{-1}$ - $2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{-2}$ · 10^2	10^{-1} - $9 \cdot 10^2$	10^1 - $8 \cdot 10^3$	-	-

Obr. 14: Rozsah pozorovaných koncentrací v kompostovaném kalu v ng/g sušiny (Verlicchi a Zambello, 2015).

6.4 Skládkování

Současným trendem v evropských zemích včetně České republiky je odklon od ukládání kalů na skládky. Místo skládkování se upřednostňuje recyklace kalu a získání látek v něm obsažených, které je možné znovu využít (Wanner, 2019). V České republice je skládkování kalu legislativně zakázáno, nicméně i přesto stále ještě funguje (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a).

6.5 Pyrolýza

Pyrolýza je alternativním způsobem pro nakládání s kaly v případě, že kal nespĺňuje mikrobiální limity pro využití na zemědělské půdě (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015b). Jde o termochemický proces zpracování sušených kalů.

Umožňuje přeměnu biomasy a organických látek na materiály a chemikálie, které se dají následně zhodnotit. Tato technologie je však pro zpracování kalů stále málo obvyklá. Produktem pyrolýzy je bio-olej a uhlíkatý zbytek - biochar, který svým obsahem fosforu (6-8 % z hmotnosti popela) a uhlíku může zvýšit kvalitu půd. Kaly z čistíren nejsou zatím na rozdíl od jiné biomasy komoditou a za jejich zpracování se platí (Kos, 2015).

Analýza nakládání s kaly					
Metoda	Cena	Kapacita		Provozní náklady	Dostupnost na trhu
Využití na zemědělské půdě	150-400 Euro/t sušiny	Max. 5 tun sušiny/ha půdy		Průměrně cca 110-160 Euro/t sušiny U aplikace kompostovaného kalu průměrně cca 232 Euro/t sušiny	Dobře dostupné
Kompostování	250-600 Euro/t sušiny	Centrální kompostárna	71 390 t/rok	200-1000 Kč/t	Dobře dostupné
		Malá zařízení	cca 18 000 t/rok		
		Komunitní kompostárna	cca 3 910 t/rok		
Spalování	450-800 Euro/t sušiny	500 t/den		Pro danou kapacitu 1208 Kč/t	Špatně dostupné
Pyrolýza	Cca 858 Kč/t	500 t/den		Pro danou kapacitu 1056 Kč/t	Špatně dostupné

Obr. 15: Analýza nakládání s kaly (European Commission, 2002; Kalderis a kol., 2010; Ministerstvo životního prostředí ČR, 2016; ZERA, z. s., 2018).

Doprava kalů z čistíren, na kterých se nezpracovávají, na větší čistírny probíhá obvykle v cisternách o objemu 10 m³ a náklady na jejich dopravu dosahují cca 30-60 Kč/km. Další náklady jsou spojeny se zpracováním a následným nakládáním a pohybují se cca v rozmezí 150-350 Kč/m³. Kal, který na čistírně prošel procesem stabilizace a odvodnění si odpadářské firmy přebírají za cenu 450-700 Kč/t včetně dopravy (Ministerstvo životního prostředí ČR, 2015a).

Průměrné náklady na různé způsoby využití kalů v zemích EU	
Metoda	Náklady (EURO / tuna sušiny)
Využití na zemědělské půdě	-
Kompostování	310
Spalování	315
Skládání	255

Obr. 16: Průměrné náklady na různé způsoby využití kalů v zemích EU (Kacprzak a kol., 2017).

7. Kalové hospodářství ČOV Březnice

ČOV Březnice se nachází ve Středočeském kraji přibližně 19 km jižně od Příbrami. Vlastníkem je město Březnice, provozovatelem je společnost Vodovody a kanalizace Beroun, a.s. Čistírna se řadí mezi mechanicko-biologické s aerobní stabilizací kalu a s projektovaným počtem ekvivalentních obyvatel 8 500 EO. V roce 2019 bylo na čistírnu připojeno celkem 3 428 osob s trvalým pobytem ve městě (VAK Beroun, a.s., 2019).

Kvalita odpadních vod – ČOV Březnice		
Hodnoty	Na přítoku (t/rok)	Na odtoku (t/rok)
BSK ₅	182,50	7,85
CHSK _{Cr}	386,90	31,39
NL	127,75	7,85
N celk.	26,86	8,90
P celk.	3,07	1,57

Obr. 17: Kvalita odpadních vod na ČOV Březnice (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

Aktivovaný kal odtéká ze tří aktivačních nádrží do dvou dosazovacích nádrží kruhového tvaru o průměru 10,34 m a objemu 250 m³. Kal usazený na dně dosazovací nádrže je shrabován hrablem do technologické prohlubně a odsud je čerpadlem čerpán do předzahušťovací jímky nebo přímo do zahušťovací jímky kalu, v případě vratného kalu do regenerační nádrže, kde regeneruje předtím, než se vrátí do denitrifikace. Betonová čerpací stanice umístěná pod zemí mezi dosazovacími nádržemi obsahuje celkem 4 čerpadla typu Flygt NT3085.183MT – dvě pro čerpání přebytečného kalu a dvě pro čerpání vratného kalu do biologické části čištění (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

Pokud je kal načerpán do předzahušťovací jímky, dochází nejprve k jeho sedimentaci a k současnému zahuštění na 3% sušiny. Ze dna je poté takový kal čerpán čerpadlem PCM MR30 I4 přes trubkový směšovač, do kterého se dávkuje flokulant (SOKOFLOK 68), na pásový zahušťovač. Pásový zahušťovač PZ 1000 má výkon 5-15 m³/h a zajistí zahuštění kalu na kal s 3-7 % sušiny. Vzduch pro zahušťovač poskytuje kompresor Orlik PKS17/200. Z pásového zahušťovače odpadá kal do jímky zahuštěného kalu, kde je promíchán pomocí míchadla

s míchací lopatkou a přečerpán do uskladňovací nádrže kalu (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

Válcová uskladňovací nádrž kalu vyrobená z betonu je 6,4 m vysoká a má 12 m v průměru. Uvnitř nádrže je umístěn středobublinný aerační systém, který zajišťuje míchání a stabilizaci zahuštěného kalu. Vzduch do nádrže přivádí celkem 68 kusů nerezových provzdušňovacích roštů typu AME P. V této nádrži se dnem kónického tvaru dosahuje kal hloubky 5,6 m a je ze dna čerpán přes trubkový směšovač na pásový lis F 800 s výkonem 3-7 m³/h. V této fázi dosahuje kal sušiny cca 18 %. Z lisu dopadá kal na šnekový dopravník, kterým je přemístěn do zastřešeného meziskladu odvodněného kalu (kapacita do 100 tun kalu). V meziskladu také dochází manuálně k částečné hygienizaci vylisovaného kalu vápnem (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).



Obr. 18: Mezisklad vylisovaného kalu na ČOV Březnice (Wagnerová, 2020).

7.1 Nakládání s kalem na ČOV Březnice

Co se týče nakládání s kalem - veškerý kal vyprodukovaný na ČOV Březnice je v určitých časových intervalech odvážen oprávněnou osobou (odpadářskou firmou) K. R. K. Hájek s.r.o. Kal poté končí na kompostárně, kde se mísí s dalším biomateriálem. S touto osobou má čistírna uzavřenou smlouvu, podle které jí za odvoz kalu platí ujednanou částku. Konkrétní částka za odvoz odvodněných kalů z ČOV Březnice je 350 Kč/t bez DPH (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

Kaly na ČOV Březnice		
Rok	Množství vylišaného kalu (t)	Sušina kalu (t)
2019	1330	222
2018	1338	223
2017	1239	223
2016	1238	241
2015	1234	239

Obr. 19: Produkce kalů na ČOV Březnice v letech 2015-2019 (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

8. Kalové hospodářství ČOV Rožmitál pod Třemšínem

ČOV Rožmitál pod Třemšínem je mechanicko-biologická čistírna s anaerobní stabilizací kalu studeným vyhníváním. Množství přiváděných odpadních vod je 1676 m³/den. Čistírna umožňuje připojení pro 6 000 EO a nachází se ve vzdálenosti přibližně 10 km od ČOV Březnice. Stejně jako je tomu v případě březnické čistírny, vyčištěná voda odtéká do vodního toku Skalice. Vlastníkem a zároveň i provozovatelem je Město Rožmitál pod Třemšínem (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

Kvalita odpadních vod – ČOV Rožmitál pod Třemšínem		
Hodnoty	Na přítoku (t/rok)	Na odtoku (t/rok)
BSK ₅	46,24	1,62
CHSK _{Cr}	105,79	9,91
NL	34,53	2,30
N celk.	17,50	8,48
P celk.	2,54	0,39

Obr. 20: Kvalita odpadních vod na ČOV Rožmitál pod Třemšínem (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

Aktivovaný kal vznikající ve 2 aktivačních nádržích o objemu 1470 m³ (2x 735 m³) vtéká do 4 nerezových obdélníkových dosazovacích nádrží o objemu 500 m³ (4x 125 m³). Odsud je vratný kal odčerpáván zpět do aktivačního procesu a přebytečný aktivovaný kal je pomocí čerpadla typu SIGMA GFHU 80 čerpán do jímky kalu. Z kalové jímky je následně přiváděn do betonové uskladňovací nádrže o výšce 15,7 m a průměru 10 m, jejímž účelem je uskladnění částečně stabilizovaného kalu. K promíchávání kalu uvnitř nádrže slouží čerpadlo typu SIGMA GFHU 100 (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

Pomocí gravitace je z uskladňovací nádrže kal přepouštěn potrubím, do kterého je vřazen ještě macerátor NEMO M-Ovas S1, do zásobní homogenizační nádrže, kde se mísí pomocí míchadla. K zajištění účinnějšího odvodnění kalu je v rozpouštěcí nádrži o objemu 0,5 m³ připravován roztok 0,1% flokulantu (SOKOFLOK), který je dávkovacím čerpadlem přidáván do kalu. Poslední fází je čerpání kalu obohaceného o flokulant na sítopásový lis (kalolis) F800 NZ.

Vylisovaný kal padá z kalolisu na pásový dopravník a otvorem ve zdi je přepravován do venkovního kontejneru. Ke kalcinaci (vápnění) nedochází, jelikož dle vedení ČOV nemají k dispozici vhodné zařízení (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

8.1 Nakládání s kalem na ČOV Rožmitál p. Tř.

Existuje několik způsobů, jak čistírna v Rožmitále nakládá s vyprodukovaným kalem. Dle poskytnutých údajů, týkajících se kalové evidence čistírny, se nejčastěji jedná o kompostování a aplikaci kalů na zemědělskou půdu – kal pro aplikaci na půdu odebírá firma Almea s.r.o. Méně častý je odvoz kalů na kalové pole do Příbrami, neboť je to v porovnání s ostatními možnostmi z ekonomického hlediska nevýhodné. Malou část z vyprodukovaných kalů si odvezly také Technické služby města. S výjimkou odvozu kalu na kalové pole jsou ostatní možnosti nakládání bezúplatné. Konkrétní množství kalu, které připadá na jednotlivé způsoby nakládání v letech 2015-2019, upravuje tabulka níže (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

Kaly na ČOV Rožmitál pod Třemšínem		
Rok	Množství vyprodukovaného kalu (t)	Obsah sušiny (%)
2019	195	25
2018	240	17,50
2017	202	15
2016	262,50	14
2015	209	14,80

Obr. 21: Produkce kalů na ČOV Rožmitál pod Třemšínem v letech 2015-2019 (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

Nakládání s kalem na ČOV Rožmitál p. Tř. v letech 2015-2019				
	Kompostování	Zemědělská půda	Kalové pole Příbram	Technické služby města
2015	209 t	-	-	-
2016	224,5 t	-	-	38 t
2017	120 t	-	60 t	22 t
2018	-	240 t	-	-
2019	77 t	118 t	-	-

Obr. 22: Nakládání s kalem na ČOV Rožmitál pod Třemšínem v letech 2015-2019 (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).

Z obou zkoumaných čistíren byly poskytnuty dva laboratorní rozborů vzorků kalu z roku 2018 a 2019. Rozborů byly zaměřeny na vybrané rizikové látky a prvky, jejichž mezní hodnoty legislativně upravuje vyhláška č. 437/2016 Sb. Jak vyplývá z tabulky níže, nejvíce problematickým je na obou čistírnách prvek arzén, u něhož je nejvyšší přípustná koncentrace stanovena vyhláškou na 30 mg/kg sušiny. Tato limitní hodnota byla u vzorku ČOV Rožmitál z roku 2018 o necelé 4 mg překročena. U ostatních vzorků kalu, s výjimkou toho z ČOV Březnice z roku 2018, jsou hodnoty arzénu v kalu také vysoké a blíží se k povolenému maximu (27,4 a 28,2 mg/kg sušiny). Dále lze poukázat na to, že až na několik výjimek – nikl, AOX a PCB - jsou koncentrace rizikových látek a prvků na ČOV Březnice nižší než je tomu u ČOV Rožmitál. Kromě zmíněného arzénu splňují ostatní hodnoty vyhlášku, přičemž se žádný z prvků (látek) nepřibližuje k maximální limitní hranici (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění; Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020; Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

Porovnání mezních hodnot koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě dle vyhlášky č. 437/2016 Sb.					
Riziková látka	Maximální hodnoty koncentrací v kalech (mg/kg sušiny)	ČOV Březnice odběr kalu		ČOV Rožmitál p. Tř. odběr kalu	
		22. 11. 2018	23. 4. 2019	22. 10. 2018	8. 8. 2019
As - arzén	30	7,2	27,4	33,8	28,2
Cd – kadmium	5	0,4	0,4	1,73	1,62
Cr – chrom	200	27,4	19,9	29,3	36,2
Cu – měď	500	196	132	282	265
Hg – rtuť	4	0,39	0,38	1,18	1
Ni – nikl	100	20,3	16,3	19,2	19,4
Pb – olovo	200	25,9	23,4	45,4	41,8
Zn – zinek	2500	647	636	1070	1270
AOX – absorbovatelné organicky vázané halogeny	500	215	971	288	336
PCB – polychlorované bifenyly	0,6	0,14	0,215	0,115	<0,0002
PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky	10	1,11	0,955	2,275	2,637

Obr. 23: Porovnání mezních hodnot koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění; Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020; Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).

8.2 Ekonomické zhodnocení provozu kalového hospodářství

Klíčovou technologií při zpracování kalu na ČOV Březnice i ČOV Rožmitál pod Třemšínem je odvodňování kalu. Důležitost odvodňování spočívá v redukování množství kalu, které je úzce spojeno s ekonomickou stránkou věci. Vede ke snižování následných nákladů v kalovém hospodářství a případně též nákladů na dopravu kalu (Mangone a kol., 2018). Do nákladů spojených s odvodněním kalu se promítají jednak náklady na výstavbu a dále také provozní náklady. Přibližná výše těchto nákladů, která je zde uvedena, je níže vyčíslena na základě kapacity zpracování ve výši 550 tun sušiny/rok a údaje jsou uvedeny pro centrifugu nebo odvodňovací šnekový lis. Náklady na výstavbu mohou být tvořeny těmito položkami (Nielsen, 2015):

- Systém na odvodnění kalu (169 935 – 209 150 Euro)
- Budova pro odvodňování na ploše 35 - 40 m² (52 288 – 65 359 Euro)
- Zahušťovací nádrž o objemu 30 m³ (16 340 Euro)
- Vyrovňovací nádrž o objemu 60 – 70 m³ (23 529 Euro)
- Předúprava (32 680 Euro)
- Skladovací plocha s kapacitou 9měsíční produkce (235 294 Euro)
- Změna stávajícího systému (13 072 Euro)
- Nepředvídané výdaje – 10% (54 314 – 59 542 Euro)
- Celkem (597 451 – 654 967 Euro)

Pro porovnání - investiční náklady spojené s odvodňováním kalu pomocí centrifugy jsou pro kapacitu 500 EO 74 557 Euro/rok, pro 1000 EO 76 007 Euro/rok a pro 2000 EO 96 587 Euro/rok. Nejvýznamnější náklady zahrnují strojní zařízení a jeho instalaci (Uggetti a kol., 2010).

Do dílčích položek, na základě kterých byla vyčíslena přibližná celková hodnota provozních nákladů, patří především spotřeba elektrické energie a chemické

látky. Přehled všech položek, které byly vzaty v potaz při vyčíslení přibližné hodnoty provozních nákladů, je uveden v tabulce níže (Nielsen, 2015):

Provozní činnosti	Jednotková cena	Roční náklady
Polymerní flokulant	3 Euro/kg	35 948 Euro
Předúprava polymerního flokulantu	-	10 784 Euro
Elektrická energie	0,1 Euro/kwh	637 Euro
Hodinová sazba za práci personálu	39 Euro/hod	-
Práce, provoz zařízení	-	20 392 Euro
Údržba	-	6 536 – 13 072 Euro
Rozbor (4 vzorky)	392 Euro/vzorek	1 569 Euro
Vyprazdňování, přeprava a aplikace na půdu (2.000 - 2.750 m³)	33 Euro/m ³	71 895 – 89 804 Euro
Celkové náklady	-	147 761 – 172 206 Euro

Obr. 24: Provozní náklady pro centrifugu nebo odvodňovací šnekový lis při kapacitě zpracování 550 tun sušiny/rok (Nielsen, 2015).

Provozní náklady vynaložené na odvodňování centrifugou se zvyšují s rostoucí kapacitou a zahrnují (Uggetti a kol., 2010):

- osobní náklady (500 EO 2 256 Euro/rok; 1000 EO 4 512 Euro/rok; 2000 EO 5 716 Euro/rok),
- výměnu materiálu (500 EO 1 160 Euro/rok; 1000 EO 1 560 Euro/rok; 2000 EO 2 100 Euro/rok),
- náklady na elektrickou energii (500 EO 427 Euro/rok; 1000 EO 541 Euro/rok; 2000 EO 804 Euro/rok)
- a může být zahrnuta též další úprava, doprava a následné kompostování kalu (500 EO 2 839 Euro/rok; 1000 EO 4 786 Euro/rok, 2000 EO 8 976 Euro/rok).

Součet investičních a provozních nákladů činí pro kapacitu 500 EO 81 232 Euro/rok, pro kapacitu 1000 EO je to 87 406 Euro/rok a pro kapacitu 2000 EO celkové náklady vychází na 114 183 Euro/rok (Uggetti a kol., 2010).

9. Diskuze

Jak bylo v této práci zjištěno, většina kalů vyprodukovaná na čistírnách odpadních vod v České republice je uložena na zemědělskou půdu nebo kompostována. V současnosti se ve společnosti objevuje otázka, zda je takové využití kalů rozumné a mělo by se v něm nadále pokračovat, či zda by ho měly nahradit jiné vhodnější možnosti. Mezi odborníky na kalovou problematiku panují různé názory na tento stav.

Z pohledu Ing. Miroslava Kosa, CSc., MBA. představují současné čistírenské kaly značné nebezpečí vzhledem k tomu, že jsou v nich zkoncentrovány zdraví nebezpečné látky obsažené v odpadní vodě. Tyto látky se vyskytují zejména v podobě různých druhů mikropolutantů (Kos, 2017). Mikropolutanty jsou anorganické i organické. U prvně zmíněné skupiny (např. těžké kovy) je již k dispozici dostatek informací o jejich škodlivosti a jsou známy i možnosti, jak zabránit jejich přenosu do přírody, nejsou proto vnímány jako rizikové. Tímto se liší od široké skupiny organických mikropolutantů – nejčastěji zmiňované jsou endokrinní disruptory, prostředky na čištění a léčiva, které představují riziko z důvodu různorodých vlastností a nedostatku zjištěných informací (Matějů a kol., 2018).

Současné přístupy, které se využívají v této oblasti, považuje Ing. Kos za zastaralé a zcela nevyhovující současnému stavu. Zdůvodňuje to tím, že složení současného kalu se výrazně liší od kalu produkovaného v minulosti. Obecně vzato spatřuje největší problém u nakládání s kaly v nebezpečí zanesení škodlivých látek z kalu do přírody. (Kos, 2017) Za pravdu mu dávají výsledky vědeckých studií, ze kterých vyplývá, že běžně používané postupy pro čištění odpadních vod a úpravu kalů jsou v odstraňování mikropolutantů nedostatečné (Matějů a kol., 2018).

Legislativa ve vyhláškách pamatuje na úpravu limitních koncentrací rizikových látek a prvků v kalech, hlavní problém se však vyskytuje u antibiotik, hormonů a endokrinních disruptorů v kalech obsažených. Mimo jiné též flokulanty, které se přidávají za účelem lepších odvodňovacích vlastností kalu, mají svá negativa. U těchto látek je problematická jejich obtížná rozložitelnost a při aplikaci

na půdu jsou jednou z příčin její degradace. Na druhou stranu jsou v kalu obsaženy i látky užitečné zejména fosfor. (Kos, 2017)

Poněkud odlišný názor týkající se aplikace čistírenských kalů na půdu má Doc. Ing. Radim Vácha, Ph.D. Nejprve je třeba poznamenat, že se současné zemědělství potýká s nedostatkem organických látek v půdě. Zdrojem organických látek jsou mimo jiné i čistírenské kaly, které pro zemědělce představují levný způsob, jak půdu obohatit o cenné látky a organickou hmotu, pokud tedy splňují vyhláškou stanovené limity. Z tohoto úhlu pohledu jsou limity pro nebezpečné látky a prvky nastavené legislativou zcela dostatečné k ochraně zdraví. Vzhledem k prokázaným a převažujícím pozitivům by měly být kaly v zemědělství využívány i nadále, protože jsou bezpečné. (Vácha, 2017)

Budoucnost nakládání s kaly počítá s nutností získávání fosforu a energie z kalu. Získaná energie poslouží pro výrobu tepla a elektrická energie na pokrytí spotřeby v kalovém hospodářství. Přímá aplikace a kompostování by měly ustoupit do pozadí v zájmu ochrany zdraví. V zahraničí už se začaly pomalu zavádět nové technologie pro zpracování kalů – jednou z nich je termická hydrolýza. (Kos, 2017)

I přes uvedené pozitivní vlastnosti aplikace kalů na půdu se přikláním k prvnímu zmíněnému názoru, který na kal pohlíží jako na nebezpečný materiál z důvodu obsahu hormonů, antibiotik a endogenních disruptorů. Domnívám se, že z důvodu ochrany zdraví společnosti by se do budoucna mělo počítat s novými především termickými technologiemi, které zajistí velmi účinnou hygienizaci spolu se zneškodněním organických polutantů v kalu. Z termického zpracování by se navíc dala zužít energie a fosfor. Nicméně nové technologie vyžadují vysoké investice a vyšší provozní náklady a to bude pravděpodobně tou hlavní překážkou v pokroku v nakládání s kaly v České republice.

10. Závěr

Složení čistírenského kalu je silně ovlivněno složením odpadní vody, která je přiváděna na čistírnu odpadních vod, a ze které kal následně při čistících procesech vzniká. Z celkového množství odpadních vod tvoří kaly sice jen malé procento, ale podstatné je, že toto malé procento obsahuje vysokou, více než poloviční koncentraci původního znečištění. Následně je kal podroben takovým technologiím, které zajišťují snížení jeho celkového množství pomocí částečného odstranění vody obsažené v kalu – jedná se o proces zahušťování a odvodňování. Stabilizaci kalu (a jeho případnou další hygienizaci) se sleduje snížení organických látek a zredukování patogenních látek v kalu.

V práci byly představeny následné možnosti nakládání s kalem z hlediska jejich kladů, záporů a přibližných ekonomických nákladů. Nejlevnější metodou je přímá aplikace na zemědělskou půdu, následuje kompostování a nejdražší metodou je spalování. Z dostupných zdrojů bylo zjištěno, že v České republice se vyprodukovaný kal využívá z největší části pro přímou aplikaci na zemědělskou půdu a rekultivace a druhým nejčastějším využitím je kompostování. Naopak spalování představuje stále málo častý způsob využití. Pyrolýza čistírenských kalů je v současnosti metodou téměř ojedinělou, avšak v práci byla popsána jako možnost, která by mohla mít z hlediska budoucího nakládání jistý potenciál.

Skutečnost, že se přímá aplikace na půdu a kompostování využívá nejčastěji, se potvrdila i z údajů poskytnutých provozovateli čistíren v Březnici a v Rožmitále pod Třemšínem. U těchto dvou čistíren byly na základě poskytnutých informací porovnány jednotlivé kroky jejich kalového hospodářství, které se na těchto čistírnách liší. Čistírna v Březnici využívá aerobní stabilizaci kalu, zatímco čistírna v Rožmitále p. Tř. anaerobní stabilizaci kalu studeným vyhníváním. Dále byla uvedena konkrétní zařízení používaná v provozu a byly porovnány hodnoty vyprodukovaných kalů z těchto čistíren za roky 2015-2019. Na základě dostupné odborné literatury byly vyčísleny přibližné náklady spojené s technologií odvodňování kalu. Práce zanalyzovala současný stav nakládání s čistírenskými kaly v České republice.

11. Přehled literatury a použitých zdrojů

Odborné publikace

- Angelidaki I., Ahring B.K., 1999: Anaerobic digestion of sludge: focusing on degradation of the contained organic contaminants (online) [cit. 2019.11.22], dostupné z https://www.researchgate.net/publication/8146906_An_innovative_sludge_management_system_based_on_separation_of_primary_and_secondary_sludge_treatment.
- Baily R. E., 2009: Sludge: Types, Treatment Processes and Disposal (online) [cit. 2019.12.03], dostupné z <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=3020687&query=digested+sludge>.
- Caruana D.J., Olsen A.E., 2012: Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications (online) [cit. 2019.12.02], dostupné z <https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=3021213&query=Anaerobic+Digestion%3A+Processes%2C+Products+and+Applications+>.
- Crittenden J. C., Trussell R. R., Hand D. W., Howe K. J., Tchobanoglous G., 2012: MWH's Water Treatment: Principles and design (online) [cit. 2020.01.13], dostupné z <https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=817311>.
- Čechmánková J., Matějka J., Nobilis L., Maňhal J., Horváthová V., Skála J., 2017: Přehled technologií kalového hospodářství komunálních ČOV. Waste Forum 1. S. 24-32.
- Demirbas A., Edris G., Alalayah W., 2017: Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant (online) [cit. 2019.11.11], dostupné z <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2017.1283551>.
- Dohányos M., 1998: Anaerobní čistírenské technologie. NOEL 2000, Brno, 343 s.

- Dohányos M., 2006: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů (online) [cit. 2020.01.28], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>.
- Drinan J.E., Spellman F.R., 2012: Water and Wastewater Treatment: A Guide for the Nonengineering Professional (online) [cit. 2019.12.31], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=967997&query=primary+wastewater>>.
- Grady C. P. L., Daigger D. T., Love N.G., Filipe C.D.M., 2011: Biological Wastewater Treatment (online) [cit. 2019.11.24], dostupné z <<https://content.taylorfrancis.com/books/download?dac=C2009-0-11152-5&isbn=9781420009637&format=googlePreviewPdf>>.
- Hendricks D., 2010: Fundamentals of Water Treatment Unit Processes : Physical, Chemical, and Biological (online) [cit. 2019.11.22], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1446433&query=Fundamentals+of+water+treatment+unit+processes+%3A+Physical%2C+chemical%2C+and+biological>>.
- Hlavínek P., Mičín J., Prax P., 2000: Příručka stokování a čištění. NOEL 2000, Brno, 251 s.
- Hopcroft F., 2014: Wastewater Treatment Concepts and Practices (online) [cit. 2020.01.11], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1816350&query=grit+chamber+wastewater>>.
- Huang J. C., Li L., 2008: Enhanced primary wastewater treatment by sludge recycling (online) [cit. 2019.11.06], dostupné z <<https://doi.org/10.1080/10934520009376958>>.
- Chiu Y., Chang C., Lin J., Huang S., 1997: Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion (online) [cit. 2020.01.28], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=861780>>.
- Chudoba J. a kol., 1991: Biologické čištění odpadních vod. SNTL, Praha, 465 s.

- Ismail I. M., Fawzy A. S., Abdel-Monem N. M., Mahmoud M. H., El-Halwany M. A., 2012: Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater (online) [cit. 2020.01.14], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123211001214>>.
- Kacprzak M., Neczaj E., Fijałkowski K., Grobelak A., Grosser A., Worwag M., Rorat A., Brattebo H., Almås Å., Singh B. R., 2017: Sewage sludge disposal strategies for sustainable development (online) [cit. 2020.02.01], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117304322?via%3Dihub>>.
- Kalavrouziotis I.K., 2017: Wastewater and Biosolids Management (online) [cit. 2019.12.02], dostupné z <<https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=4884118&query=wastewater+and+biosolid+management>>.
- Kalderis D., Aivalioti M., Gidarakos E., 2010: Options for sustainable sewage sludge management in small wastewater treatment plants on islands: The case of Crete (online) [cit. 2020.02.12], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916410002596?via%3Dihub>>.
- Karagiannidis A., Samaras P., Kasampalis T., Perkoulidis G., Ziogas P., Zorpas A., 2011: Evaluation of sewage sludge production and utilization in Greece in the frame of integrated energy recovery (online) [cit. 2020.02.01], dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/221702130_Evaluation_of_sewage_sludge_production_and_utilization_in_Greece_in_the_frame_of_integrated_energy_recovery>.
- Liu S. X., 2014: Food and Agricultural Wastewater Utilization and Treatment (online) [cit. 2020.01.15], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1701393&query=Food+and+Agricultural+Wastewater+Utilization+and+Treatment>>.
- Magoarou P., 1999: Urban waste water in Europe - what about the sludge? (online) [cit. 2019.11.11], dostupné z

- <<https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/workshoppart1.pdf>>.
- Mailler R., Gasperi J., Chebbo G., Rocher V., 2014: Priority and emerging pollutants in sewage sludge and fate during sludge treatment (online) [cit. 2020.01.31], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715306100>>.
 - Malý J., Malá J., 1996: Chemie a technologie vody. NOEL 2000, Brno, 197 s.
 - Mangone F., Ferreira J., Ferrari A., Gutiérrez S., 2018: Modelling and optimization of a geotextile dewatering tubes process (online) [cit. 2020.03.10], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444642356502400>>.
 - Matějů L., Boščíková Z., Zimová M., 2018: Rizika a výhody při využití čistírenských kalů na zemědělské půdě (online) [cit. 2020.03.04], dostupné z <https://tretiruka.cz/files/200007753-071d008175/eOF_03_2018.pdf>.
 - Metcalf & Eddy, Inc., 1991: Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse (online) [cit. 2020.01.13], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860903000293>>.
 - Metcalf & Eddy, Inc., 2003: Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (online) [cit. 2020.01.15], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1446724&query=Fundamentals+of+Wastewater+Treatment+and+Engineering>>.
 - Metcalf & Eddy, Inc., Burton F. L., Tchobanoglous G., Tsuchihashi R., Stensel H.D., 2013: Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (online) [cit. 2019.12.02], dostupné z <<https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=4884118&query=wastewater+and+biosolid+management>>.
 - Mininni G., Braguglia C.M., Ramadori R., Tomei M.C., 2004: An innovative sludge management system based on separation of primary and secondary sludge treatment (online) [cit. 2019.11.22], dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/8146906_An_innovative_sludge_management_system_based_on_separation_of_primary_and_secondary_sludge_treatment>.

- Naz I., Seher S., Perveen I., Saroj D.P., Ahmed S., 2014: Physiological activities associated with biofilm growth in attached and suspended growth bioreactors under aerobic and anaerobic conditions (online) [cit. 2019.11.25], dostupné z <<https://www-tandfonline-com.infozdroje.czu.cz/doi/full/10.1080/09593330.2014.1003614>>.
- Naz I., Saroj D., Mumtaz S., Ali N., Ahmed S., 2015: Assessment of biological trickling filter systems with various packing materials for improved wastewater treatment (online) [cit. 2019.11.27], dostupné z <<https://www-tandfonline-com.infozdroje.czu.cz/doi/full/10.1080/09593330.2014.951400>>.
- Neyens E., Baeyens J., Weemaes M., De heyder B., 2002: Advanced biosolids treatment using H₂O₂-oxidation (online) [cit. 2020.01.15], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1701393&query=Food+and+Agricultural+Wastewater+Utilization+and+Treatment>>.
- Nielsen S., 2015: Economic assessment of sludge handling and environmental impact of sludge treatment in a reed bed system. Water Science & Technology Volume 71, Issue 9. S. 1286-1292.
- Odegaard, H., 1992: Norwegian Experiences with Chemical Treatment of Raw Wastewater (online) [cit. 2019.11.06], dostupné z <<https://doi.org/10.1080/10934520009376958>>.
- Park J., Tanner C., Craggs K., 2018: Assessment of sludge characteristics from a Biological Trickling filter (BTF) (online) [cit. 2019.11.27], dostupné z <<https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S2214714417307559>>.
- Pérez–Elvira S., I., Nieto Diez P., Fdz-Polanco F., 2006: Sludge minimisation technologies (online) [cit. 2020.02.04], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=3020687>>.
- Pytl V., 2012: Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. Medim, spol. s r.o., Libeznice, 209 s.
- Ramírez W. A., Domene X., Ortiz O., Alcaniz J. M., 2008: Toxic effects of digested, composted and thermally-dried sewage sludge on three plants

- (online) [cit. 2020.01.19], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=3018837>>.
- Rao D.G., Senthikumar R., Byrne J.A., Feroz S., 2012: Wastewater Treatment: Advanced Processes and Technologies (online) [cit. 2019.12.05], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=945474&query=anaerobic+wastewater+treatment>>.
 - Riffat R., 2012: Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering (online) [cit. 2019.11.22], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1446724&query=Fundamentals+of+Wastewater+Treatment+and+Engineering>>.
 - Rossetti S., Tandoi V., Wanner J., 2017: Activated Sludge Separation Problems: Theory, Control Measures, Practical Experiences (online) [cit. 2019.11.28], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=5043465&query=Activated+Sludge+Separation+Problems%3A+Theory%2C+Control+Measures%2C+Practical+Experiences>>.
 - Sanin F., Vatansever A., Turtin I., Kara F., Durmaz B., Sesay M., 2007: Operational Conditions of Activated Sludge: Influence on Flocculation and Dewaterability (online) [cit. 2019.12.02], dostupné z <<https://www-tandfonline-com.infozdroje.czu.cz/doi/pdf/10.1080/07373930600838009?needAccess=true>>.
 - Sanin F. D., Clarkson W.W., Vesilind P.A., 2011: Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges (online) [cit. 2019.01.15], dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/269867833_Optimization_of_the_treatment_and_disposal_of_sewage_sludge_in_the_district_of_Como_options_and_scenarios_assessment>.
 - Scholz M., 2016: Wetlands for Water Pollution Control (online) [cit. 2019.11.06], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636072000216?via%3DIihub>>.

- Sombatsompop K., Visvanathan C., Aim R.B., 2006: Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems (online) [cit. 2019.11.25], dostupné z <[https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S001191640601160X](https://www.sciencedirect.com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S001191640601160X)>.
- Spinosa L., 1986: Design and operation of dewatering equipment (online) [cit. 2020.01.17], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407001513>>.
- Spinosa L., 2004: EU Strategy and practice for sludge utilization in agriculture, disposal and landfilling (online) [cit. 2020.02.01], dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/221702130_Evaluation_of_sewage_sludge_production_and_utilization_in_Greece_in_the_frame_of_integrated_energy_recovery>.
- Srinivas T., 2008: Environmental Biotechnology (online) [cit. 2019.12.02], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=410373&query=Environmental+Biotechnology+>>.
- Stamatelatou K., Tsagarakis K. P., 2015: Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency (online) [cit. 2020.01.27], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=3425868>>.
- Stopher P. R., Stecher C., Scholz M., 2006: Wetland Systems to Control Urban Runoff: Quality and Future Directions (online) [cit. 2020.01.15], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=274256&query=sludge+hickening>>.
- Šťasta P., Boráň J., Bébar L., Stehlík P., Oral J., 2006: Thermal Processing of Sewage Sludge (online) [cit. 2020.01.31], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=3020687>>.
- Tomei M. C., Rita S., Mininni G., 2011: Performance of sequential anaerobic/aerobic digestion applied to municipal sewage sludge (online) [cit. 2020.01.27], dostupné z

- <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971100082X?via%3Dihub>>.
- Uggetti E., Ferrer I., Molist J., García J., 2010: Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands (online) [cit. 2020.03.20], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135410006597>>.
 - Verlicchi P., Zambello E., 2015: Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil - A critical review (online) [cit. 2020.01.31], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715306100>>.
 - Wakeman R. J., 2007: Separation technologies for sludge dewatering (online) [cit. 2020.01.15], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407001513>>.
 - Wanner J., 2017: Čištění odpadních vod v ČR – vývoj a současná situace (online) [cit. 2019.09.30], dostupné z <<http://vodnihospodarstvi.cz/cisteni-odpadnich-vod-cr/>>.
 - Wei H., Gao B., Ren J., Li A., Yang H., 2018: Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review (online) [cit. 2020.02.25], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418305724?via%3Dihub>>.
 - Xia K., Bhandari A., Das K., Pillar G., 2005: Occurrence and fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in biosolids (online) [cit. 2020.01.31], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715306100>>.
 - Xiaoyuan Z., Meng Z., Hang L., Jun G., Yu L., 2019: Environmental sustainability: a pressing challenge to biological sewage treatment processes (online) [cit. 2019.11.22], dostupné z <<https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S2468584419300133>>.

Legislativní zdroje

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

- Vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, v platném znění.

Internetové zdroje

- Arthurson V., 2008: Proper Sanitization of Sewage Sludge: a Critical Issue for a Sustainable Society (online) [cit. 2020.01.29], dostupné z <<https://aem.asm.org/content/74/17/5267>>.
- ČSÚ, ©2018: Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění (online) [cit. 2019.11.11], dostupné z <<https://www.czso.cz/csu/czso/3-zivotni-prostredi-zdsbcjzyh9>>.
- ČSÚ, ©2019: Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2018 (online) [cit. 2020.02.29], dostupné z <<https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2018>>.
- European Commission, ©2002: Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge (online) [cit. 2020.02.25], dostupné z <https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/sludge_disposal_4.pdf>.
- European Commission, ©2005: International Plant Protection Convention: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration (online) [cit. 2020.02.04], dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/reader.action?docID=3020687&ppg=143#>>.
- Hartig K., 2017: Problematika kalového hospodářství (online) [cit. 2020.01.19], dostupné z <<http://vodnihospodarstvi.cz/problematika-kaloveho-hospodarstvi/>>.
- HEIS VÚV, dostupné online: Tab. 1.: Přehled typů ČOV pro čištění komunálních odpadních vod v obcích ČR s více než 1000 fyzickými obyvateli (online) [cit. 2019.12.03], dostupné z <<https://heis.vuv.cz/data/spusteni/projekty/rkz/dokumenty/clanek/T1.htm>>.
- Kos M., 2015: Termochemické zpracování čistírenských kalů (online) [cit. 2020.02.09], dostupné z <http://www.cpga.cz/files/prednasky/1512_Kos-Termochem_zprac_kalu.pdf>.
- Kos M., 2017: Kaly a sedimenty (online) [cit. 2020.03.03], dostupné z <<http://vodnihospodarstvi.cz/kaly-a-E2%80%AFsedimenty/>>.

- Kos M., 2019: Aktuální názory na využívání kalů [cit. 2020.02.29], dostupné z <<https://www.prumyslovaekologie.cz/info/aktualni-nazory-na-vyuzivani-kalu>>.
- Kučerová R. a kol., 2010: Multimediální učební texty zaměřené na problematiku úpravy a čištění vody (online) [cit. 2019.07.31], dostupné z <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Radka_2010/mc.html>.
- Muspratt A., Miller A., 2018: Mechanical Dewatering for Fecal Sludge Treatment Applications Process & Technology Review (online) [cit. 2020.01.16], dostupné z <<https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/2946>>.
- MŽP, ©2015a: Optimalizace nakládání s kaly z komunálních čistíren odpadních vod – Analytická část (online) [cit. 2019.11.22], dostupné z <[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-Oddil_I_1_Analyticka%20cast-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-Oddil_I_1_Analyticka%20cast-20160810.pdf)>.
- MŽP, ©2015b: Optimalizace nakládání s kaly z komunálních čistíren odpadních vod – Návrhová část (online) [cit. 2020.02.09], dostupné z <[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-Oddil_III_Navrhova_cast-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-Oddil_III_Navrhova_cast-20160810.pdf)>.
- MŽP, ©2016: Analýza a vyhodnocení možnosti aplikace nových technologií k energetickému využití odpadů (online) [cit. 2020.02.09], dostupné z <[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-4_5_MZP_FIN-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_5_MZP_FIN-20160810.pdf)>.
- SOVAK ČR, ©2019: SOVAK ČR vítá novelu vyhlášky o použití upravených kalů na zemědělské půdě (online) [cit. 2020.02.29], dostupné z <<https://www.prumyslovaekologie.cz/info/sovak-cr-vita-novelu-vyhlasiky-o-pouziti-upravenych-kalu-na-zemedelske-pude>>.
- Vácha R., 2017: Kaly a sedimenty (online) [cit. 2020.03.03], dostupné z <<http://vodnihospodarstvi.cz/kaly-a%E2%80%AFsedimenty/>>.
- VAK Beroun, a.s., ©2019: Kanalizační řád stokové sítě města Březnice a osady Martinice (online) [cit. 2020.02.16], dostupné z <https://www.vakberoun.cz/documents/verejne/breznice_540013/kanalizacni_rad/kanalizacni-rad-breznice-2018.pdf>.

- Vigneswaran S., Kandasamy J., 2009: Sludge Treatment Technologies (online) [cit. 2020.01.19], dostupné z <<https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E6-144-15.pdf>>.
- Wanner F., 2019: Nakládání s čistírenskými kaly v České republice (online) [cit. 2020.02.09], dostupné z <<https://www.sovak.cz/sites/default/files/2019-11/SOVAK%20C4%8CR%20Studie%20nakl%C3%A1d%C3%A1n%C3%AD%20s%20C4%8Dist%C3%ADrensk%C3%BDmi%20kaly%20v%20C4%8CR%20FINAL.pdf>>.
- Water Environment Federation, ©1992: Operation and maintenance of sludge dewatering systems: manual of practice no. OM-8 (online) [cit. 2020.01.17], dostupné z <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407001513>>.
- ZERA, z. s., ©2018: Návrh technologických opatření využití především kompostáren (online) [cit. 2020.02.09], dostupné z <http://www.zeraagency.eu/dokumenty/007013/material_pro_ucastniky.pdf>.
- Zrubková M., 2017: An evaluation of the Efficiency of Different Hygienisation Methods (online) [cit. 2020.01.29], dostupné z <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/92/1/012079/pdf>>.

Ostatní zdroje

- Vodovody a kanalizace Beroun, a.s.
- Město Rožmitál pod Třemšínem

12. Seznam obrázků

- Obr. 1: Optimální množství koagulantů pro komunální ČOV (Ismail a kol., 2012).
- Obr. 2: Přehled jednotlivých typů kalů (Minnini a kol., 2004; Baily, 2009; Riffat, 2012; Scholz, 2016).
- Obr. 3: Rozsah pozorovaných koncentrací v primárním a sekundárním kalu v ng/g sušiny (Verlicchi a Zambello, 2015).
- Obr. 4: Celková koncentrace pevných látek v kalu po zahušťování v % (Sanin a kol., 2011).
- Obr. 5: Rozsah pozorovaných koncentrací v digestovaném kalu (v ng/g sušiny) (Verlicchi a Zambello, 2015).
- Obr. 6: Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV kaloliséem (Water Environment Federation, 1992).
- Obr. 7: Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV pásovým lisem (Spinosa, 1986).
- Obr. 8: Odvodňování některých kalů z komunálních ČOV odstředováním (Spinosa, 1986).
- Obr. 9: Průtok a koncentrace kalu v různých stupních zpracování – hodnoty uváděné pro ČOV o velikosti 500 000 EO (Mininni a kol., 2004).
- Obr. 10: Produkce kalů v ČOV a způsob jejich zneškodnění za rok 2017 v ČR (Český statistický úřad, 2018).
- Obr. 11: Graf znázorňuje části z celku, které zaujímají jednotlivé způsoby pro zneškodnění kalů za rok 2017 v ČR (Český statistický úřad, 2018).
- Obr. 12: Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění).
- Obr. 13: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění).
- Obr. 14: Rozsah pozorovaných koncentrací v kompostovaném kalu v ng/g sušiny (Verlicchi a Zambello, 2015).

- Obr. 15: Analýza nakládání s kaly (European Commission, 2002; Kalderis a kol., 2010; Ministerstvo životního prostředí ČR, 2016; ZERA, z. s., 2018).
- Obr. 16: Průměrné náklady na různé způsoby využití kalů v zemích EU (Kacprzak a kol., 2017).
- Obr. 17: Kvalita odpadních vod na ČOV Březnice (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).
- Obr. 18: Mezisklad vylisovaného kalu na ČOV Březnice (Wagnerová, 2020).
- Obr. 19: Produkce kalů na ČOV Březnice v letech 2015-2019 (Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).
- Obr. 20: Kvalita odpadních vod na ČOV Rožmitál pod Třemšínem (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).
- Obr. 21: Produkce kalů na ČOV Rožmitál pod Třemšínem v letech 2015-2019 (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).
- Obr. 22: Nakládání s kalem na ČOV Rožmitál pod Třemšínem v letech 2015-2019 (Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020).
- Obr. 23: Porovnání mezních hodnot koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. (Vyhláška č. 437/2016 Sb., v platném znění; Město Rožmitál pod Třemšínem, 2020; Vodovody a kanalizace Beroun, a.s., 2020).
- Obr. 24: Provozní náklady pro centrifugu nebo odvodňovací šnekový lis při kapacitě zpracování 550 tun sušiny/rok (Nielsen, 2015).

13. Přílohy



Obr. 1: Aktivační nádrž a uskladňovací nádrž v pozadí – ČOV Rožmitál p. Tř. (Wagnerová, 2020)



Obr. 2: Sítopásový lis F800 NZ – ČOV Rožmitál (Wagnerová, 2020)



Obr. 3: Dosazovací nádrž – ČOV Březnice (Wagnerová, 2020)



Obr. 4: Pásový zahušťovač PZ 1000 – ČOV Březnice (Wagnerová, 2020)



Obr. 5: Uskladňovací nádrž kalu – ČOV Břežnice (Wagnerová, 2020)



Obr. 6: Pásový lis F 800 – ČOV Břežnice (Wagnerová, 2020)