

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Vyhodnocení provozu sušárny kalů provozované v rámci
čistírny odpadních vod Karlovy Vary**

Bakalářská práce

Alice Josefiková

Veřejná správa v zemědělství a krajině

Vedoucí práce Ing. Pavel Švehla, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Vyhodnocení provozu sušárny kalů provozované v rámci čistírny odpadních vod Karlovy Vary jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury v závěru práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 2. 5. 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu práce Ing. Pavlu Švehlovi Ph.D. za poskytnuté konzultace, věcné připomínky a nápady. Dále bych ráda poděkovala své rodině, především mamince, za podporu při psaní.

Vyhodnocení provozu sušárny kalů provozované v rámci čistírny odpadních vod Karlovy Vary

Souhrn

Tato bakalářská práce se zabývá sušárnami kalů. Nejprve jsou v práci shrnuty základní informace o tom, jak probíhá čištění odpadních vod. Je zde popsán princip technologie čištění a vznik kalu, který je pro téma důležitým prvkem. Dále je text věnován kalu jako takovému. Specifikuje, co se s kalem děje v rámci kalového hospodářství a jaké jsou hlavní možnosti jeho zpracování od zahušťování, předúpravy, až po stabilizaci, odvodňování a hygienizaci. Poté je práce zaměřena na způsoby, kterými lze s kalem nakládat po jeho prvotním zpracování v rámci čistírny odpadních vod. Mezi tyto způsoby patří přímá aplikace kalu na půdu, kompostování, skládkování a spalování. Každá z těchto možností má své výhody a nevýhody, které jsou v práci specifikovány. U některých možností je však nutné kal nejprve upravit za pomoci sušárny, aby byl proces nakládání s kalem co nejvíce efektivní. Tak je tomu například u spalování či procesu pyrolýzy.

Zbývající část práce je věnována stěžejnímu tématu, a to sušení kalu. Jsou zde představeny jednotlivé typy sušáren využitelných pro zpracování kalu. Je diskutováno, jak je tato metoda zpracování kalu rozšířena v rámci Evropské unie a jaké nové možnosti v oblasti nakládání s kalem přináší. Samozřejmě jsou zde probrány jak pozitiva, tak negativa. Po této části následuje vyhodnocení provozu sušárny provozované v rámci čistírny odpadních vod v Karlových Varech, kde bylo na základě poskytnutých dat od provozovatele zjištěno, že proces sušení funguje dobře a výsledný produkt sušení, kterým je granulát, je kvalitní. Byl ovšem odhalen problém s neefektivním využitím granulátu, který je v současné době vyvážen na kompostárnu. Tato problematika byla blíže rozepsána a následně bylo také v závěru práce navrženo řešení stávající situace, a to vybudování spalovny v blízkosti sušárny. Ve spalovně by se dostalo výslednému granulátu adekvátního využití a získané teplo ze spalovny by se dalo využít při sušení kalu v sušárně. To by ve výsledku znamenalo zefektivnění celého procesu.

Klíčová slova: sušení, nakládání s kalem, odpadní vody, spalování, kompostování

The Evaluation of the Operation of the Drying Room Situated on Wastewater Treatment Plant Karlovy Vary

Summary

This bachelor's thesis deals with drying rooms useful for sludge treatment. Firstly, it deals with essential information about wastewater treatment processes. Technology of water treatment and sedimentation is described here, which is also an important component. Further, the text is dedicated to the sewage sludge as such. It is specified what is it the sludge. The main options for sludge processing as thickening, pre-modification, digestion, stabilization, drainage and hygienization are presented. Next the thesis focuses on different ways how handle with sludge after its initial processing within wastewater treatment facility. The sludge can be applied to soil, it can be composted, landfilled and incinerated. In some cases, the sludge has to be modified in a drying room, so that the process of dealing with the sludge is highly efficient. This is mainly when the sludge is incinerated or during pyrolysis process.

The rest of the thesis is dedicated to the pivotal topic and that is sludge drying. Different types of drying facilities are introduced here which can be used for sludge processing. It is argued, how the way of sludge processing is spread within the EU and what some novelties in this field are. Pros and cons are mentioned too. After this part, there is an evaluation of a drying facility that is operated by the Wastewater Treatment Plant Karlovy Vary. The conclusion of the study says, based on the provided data by the Wastewater Treatment Plant Karlovy Vary, that the final product of drying is high-quality granulate. However, the study has also revealed that the granulate is not used effectively and must be taken to a composting plant. This issue is developed later in the text and a solution is suggested as well. The solution is to construct an incinerator near the drying facility. The idea is to utilize the energy, gained by incineration of the granulate and use it for drying of the sludge in the drying facility. This poses the overall streamlining of the whole process.

Keywords: drying, sludge processing, wastewater treatment, incineration, composting

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíl práce	8
3	Čistírny odpadních vod	9
3.1	Princip technologie čištění odpadních vod	9
3.1.1	Mechanické čištění	9
3.1.2	Biologické čištění	10
3.1.2.1	Porovnání čištění vod za aerobních a anaerobních podmínek	10
3.1.3	Kalové hospodářství	12
3.2	Kaly z čištění komunálních odpadních vod	13
3.3	Možnosti zpracování čistírenských kalů	14
3.3.1	Zahušťování kalu	14
3.3.2	Předúprava kalu	14
3.3.3	Stabilizace kalu	15
3.3.4	Odvodňování kalu	16
3.3.5	Hygienizace kalu a finální zpracování	16
3.4	Nakládání s kalem z ČOV	17
3.5	Kvalita čistírenského kalu	20
4	Sušárny kalů na čistírnách odpadních vod	22
4.1	Druhy sušáren čistírenských kalů	24
4.1.1	Pásové sušárny	24
4.1.2	Fluidní sušárny	25
4.1.3	Solární sušárny	25
4.2	Využití vysušeného kalu	26
4.2.1	Spalování	26
4.2.2	Spalování v cementárenské peci	27
4.2.3	Pyrolýza	28
5	Sušárna kalů v Karlových Varech	28
5.1	Provoz čistírny odpadních vod v Karlových Varech	28
5.2	Kalové hospodářství na ČOV Karlovy Vary	29
5.3	Výstavba sušárny	29
5.4	Technické parametry sušárny	31
5.5	Princip technologie sušárny	31
6	Vyhodnocení provozu sušárny v Karlových Varech	33
6.1	Stanovení celkového obsahu sušiny vysušeného kalu	33
6.1.1	Porovnání obsahu sušiny ve vysušeném a odvodněném kalu	34

6.2	Stanovení rizikových prvků	37
6.2.1	Porovnání stanovení rizikových prvků ve vysušeném a odvodněném kalu	40
6.2.2	Porovnání stanovení rizikových prvků s ČOV Brno - Modřice.....	40
6.3	Výhřevnost vysušeného kalu.....	41
7	Závěr.....	42
8	Seznam literatury	44

1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je vyhodnocení provozu sušárny kalů provozované v rámci čistírny odpadních vod v Karlových Varech. Toto téma bylo zvoleno na základě osobní zkušenosti autorky s prací na ČOV v Karlových Varech a na základě zájmu o současnou problematiku nakládání s kalem jakožto odpadem. Nynější odpadová politika Evropské unie je proti ukládání odpadů na skládky a mezi cíle patří skládkování recyklovatelného odpadu eliminovat do roku 2025 a do roku 2030 by měly členské státy EU skládkování zcela opustit. Zároveň Ministerstvo životního prostředí ČR zpřísňuje podmínky úpravy kalů před jejich použitím v zemědělství a mikrobiální požadavky na organická hnojiva a substráty, při jejichž výrobě byly použity odpady z ČOV. Vzhledem k těmto skutečnostem je nutné hledat nové možnosti ve zpracování kalů z čistíren odpadních vod. Vysušením kalu s využitím sušárny se několik těchto nových možností otevírá.

Tato práce obsahuje celkem sedm kapitol. První část je zaměřena na obecný princip fungování čistírny odpadních vod a na odpady, které při čištění vznikají. Další část je věnována možnostem zpracování kalu, jsou diskutována jak jejich pozitiva, tak negativa a je zde nastíněna i problematika týkající se legislativy. Poté se již práce ubírá k provozu karlovarské čistírny odpadních vod, a to především k výstavbě a principu fungování sušárny kalu. Druhá polovina této bakalářské práce je věnována praktické části, ve které je vyhodnocena funkce sušárny, a to jednak s využitím výsledků analytických rozborů, které byly pro práci poskytnuty provozovatelem, ale také je zde uvedena diskuze, zda je zařazení sušárny v rámci ČOV v Karlových Varech vhodné, vzhledem k ekonomické stránce či dalšímu zpracování kalu po vysušení.

2 Cíl práce

Hlavním cílem práce bylo vytvořit podrobnou literární rešerši na téma zpracování čistírenských kalů s využitím jejich sušení. V praktické části poté bylo záměrem vyhodnotit provoz sušárny kalů na čistírně odpadních vod ve městě Karlovy Vary, která byla v nedávné době instalována, a to nejen z hlediska účinnosti vysušení kalu, ale také z pohledu celkové efektivity zařazení sušárny do provozu.

3 Čistírny odpadních vod

Tato kapitola je věnována čistírnám odpadních vod se zaměřením především na obecný princip technologie čištění odpadní vody a na odpady, které při čištění odpadních vod vznikají, a to proto, že kal, o kterém se v této práci z velké části hovoří, je jedním z nich. Jako první je nutné definovat pojem odpadní voda. Jedná se o směs odpadních vod původem z průmyslu, domácností, dešťové odpadní vody, za kterou jsou považovány splachy z povrchu či samotné srážky, které jsou znečištěny při průchodu atmosférou a nakonec vodu balastní, což je například podzemní voda, která se mimovolně zachytí v kanalizační síti (Švehla et. al. 2007). Odpadní voda přitékající do ČOV může obsahovat všechny čtyři zmíněné složky, či nikoliv. Při konstruování čistíren odpadních vod se potřebná kapacita pro odpadní vodu na dané čistírně vyjadřuje pomocí jednotky zvané ekvivalentní obyvatel (EO). Tato jednotka byla zavedena uměle a představuje produkci odpadní vody 150 l/den a znečištění 60 g BSK₅/den jedním obyvatelem (Hošková 2016).

3.1 Princip technologie čištění odpadních vod

Čištění odpadních vod má několik fází. První fází je mechanické čištění, kde dochází k odstranění největších nečistot a následuje sedimentace v usazovacích nádržích. Po mechanickém čištění přichází na řadu druhá fáze, kterou je biologické čištění. Biologické čištění zajišťuje odstranění převážně rozpuštěného organického znečištění, popřípadě i nutrientů, tedy dusíku a fosforu (Cronje et al. 2002, Pytl et al. 2004). Součástí provozu ČOV je dále takzvané kalové hospodářství, které zajišťuje aerobní nebo anaerobní stabilizaci kalů vyprodukovaných čistírnou (Pytl et al. 2004). Všechny fáze jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.

3.1.1 Mechanické čištění

V rámci mechanického čištění je na čistírnách odpadních vod nejprve důležité odstranit hrubé, makroskopické látky, jejichž přítomnost by mohla způsobit v dalších fázích čištění mechanické závady a zanášení objektů, především pak chrání čerpadla. Pro odstranění těchto hrubých nečistot a látek do velikosti 1 mm z vody se využívají česle, síta a jedná se v podstatě o proces předčištění. Tam, kde se však do čistírny mohou dostat i velké částice, jako jsou například úlomky cihel, šterk nebo kousky betonu z poškozených trub a šachet, se zřizují před hrubými česlemi ještě lapáky šterku. Ty mají ochranný účel, a to právě pro česle, které by mohly být částicemi šterku vážně poškozeny. Dle konstrukce lze lapáky šterku dělit na ručně vyklízené nebo strojně vyklízené (Bábíček et al. 2018). Dále jsou do procesu předčištění odpadní vody zařazeny lapáky písku, které slouží k zachytávání písku a minerálních částic, s takovou účinností, aby byla opět zajištěna ochrana dalších objektů a zařízení ČOV, jako jsou například čerpadla (Hlavínek et al. 2001). Lapáky písku lze rozdělit dle způsobu odstraňování písku na ruční nebo strojní. A dále dle směru průtoku písku na horizontální lapáky písku a vertikální lapáky písku. Mezi horizontální lapáky písku patří komorový lapák, šterbinový lapák a lapák písku komorový s kontrolovanou rychlostí. Mezi lapáky písku s takzvanou příčnou cirkulací se pak řadí vírový lapák, provzdušňovaný lapák a odstředivé lapáky.

Poté, co česle a síta zachytí hrubé nečistoty a látky, se z nich vytvoří shrabky, které padají do kontejneru nebo na transportní pás. Shrabky jsou často vodnaté, a proto je vhodné zbavit je přebytku vody a tím zmenšit jejich hmotnost i objem a v případě jejich následného spalování zvýšit spalnou hodnotu. Děje se tak lisováním v pístových lisech (Hlavínek et al. 2001). Odvodněné shrabky se pak dále zpracovávají již mimo ČOV, a to kompostováním, spalováním nebo skládkováním.

Následně probíhá odlučování lehkých částic. K látkám s hustotou menší než je hustota vody patří především ropné látky a tuky. Pro tyto účely slouží gravitační separátory tuků a olejů, koalescenční filtr či flotace.

Dalším procesem v rámci mechanického čištění je usazování, které patří mezi nejrozšířenější separační procesy. Separace tuhých částic je dána gravitací závisející na velikosti a tvaru částice a hustotě kapaliny. Při sedimentaci částic suspenze se rozlišuje prostá sedimentace, rušená sedimentace a zahušťování suspenze. K separaci tuhé fáze od kapaliny se používá většinou průtočných usazovacích nádrží, které dělíme na tři základní typy, a to pravouhlé nádrže s horizontálním průtokem, kruhové s horizontálním průtokem a usazovací nádrže s vertikálním průtokem. Nádrže s přerušovaným provozem a používané pro menší provozovny a tím i menší objemy vod, se nazývají dekadenní (Bindzar et al. 2009).

Dle zařazení v technologické lince poté rozlišujeme primární usazovací nádrž a sekundární dosazovací nádrž. V primární probíhá separace suspendovaných částic z odpadní vody a v sekundární usazovací nádrži dochází k separaci biologického kalu při biologickém čištění (Hlavínek et al. 2001).

3.1.2 Biologické čištění

Základním principem všech biologických čistírenských procesů jsou biochemické oxidačně redukční reakce. Rozhodujícím faktorem pro rozdělení těchto reakcí je konečný akceptor elektronů a s tím související hladiny oxidačně-redukčních potenciálů (Hlavínek et al. 2001).

Rozdělení biologických čistírenských procesů (Hlavínek et al. 2001):

1. oxická oblast (kyslíkatá): konečným akceptorem elektronů je rozpuštěný kyslík, probíhají v ní oxidace organických látek, nitrifikace,
2. anoxická oblast (bez kyslíkatá): rozpuštěný kyslík není přítomen, dusitanový a dusičnanový dusík slouží jako konečný akceptor elektronů, probíhá v ní denitrifikace,
3. anaerobní oblast: konečným akceptorem elektronů je vlastní organická látka, část molekuly se oxiduje a část redukuje, probíhá zde depolymerace polyfosfátů, desulfurace, anaerobní acidogeneze, methanogeneze.

3.1.2.1 Porovnání čištění vod za aerobních a anaerobních podmínek

Při čištění odpadních vod za aerobních podmínek se uplatňuje činnost aerobních mikroorganismů, které rozkládají organické látky působením svých enzymů oxidačními procesy za přítomnosti molekulárního kyslíku. Konečnými produkty tohoto procesu jsou CO_2 , H_2O a zpravidla amoniak (Hlavínek et al. 2001). Aktivním činidlem v tomto procesu je tedy směsná kultura mikroorganismů kultivovaná nejčastěji ve formě suspenze, kterou označujeme

také jako aktivovaný kal a celý proces probíhá v aktivační nádrži. Proces lze uskutečnit také ve formě nárůstu, neboli biofilmu, a proces čištění poté probíhá v takzvaných biofilmových reaktorech (Bindzar et al. 2009).

Na velkých ČOV se systém aktivačního procesu skládá z již zmíněné aktivační nádrže a dále z dosazovací nádrže. Do aktivační nádrže přitéká surová voda, kde se mísí s recirkulovaným neboli vratným kalem. Směs se intenzivně provzdušňuje pneumatickými nebo mechanickými aerátory. Z aktivační nádrže odtéká aktivační směs do dosazovací nádrže, kde dochází k oddělení aktivovaného kalu od biologicky vyčištěné vody. Jedná se tedy o separační jednotku, která funguje na podobném principu jako usazovací nádrže. Aktivovaný kal se tedy usazuje na dně dosazovací nádrže a vyčištěná voda odtéká do recipientu přímo nebo přes další čistící stupeň. Část kalu se z dosazovací nádrže vrací zpět do aktivace jako vratný kal k dosažení potřebné koncentrace mikroorganismů v aktivační nádrži. Zbývající (přebytečná) část kalu se zpracovává v kalovém hospodářství, protože mikroorganismy se v aktivačním procesu množí a je nutné přebytečnou biomasu ze systému odstraňovat (Bábiček et al. 2018). Tuto biomasu označujeme jako sekundární kal.

Aby čištění za aerobních podmínek mohlo proběhnout, je nutné zajistit základní požadavky pro tento proces, jako je dostatečný přívod kyslíku, přítomnost biogenních prvků, jejichž případný deficit musí být dotován, a potřebné množství mikroorganismů (Hlavínek et al. 2001). Kvalitativní a kvantitativní složení aktivovaného kalu se stabilizuje samovolně a závisí zejména na složení substrátu, na kterém byl aktivovaný kal vypěstován. Substrátem je zde myšlena přitékající odpadní voda (Bindzar et al. 2009).

Oproti tomu rozklad organických látek za anaerobních podmínek je výslednicí součinnosti několika mikrobiálních skupin, jejichž metabolické procesy na sebe navazují. Produkty metabolismu jedné skupiny jsou substrátem, neboli potravou, pro skupinu další. Proces je realizován v anaerobním reaktoru. Nevýhodou anaerobního čištění je, že není schopno dosáhnout tak nízkých koncentrací organických znečišťujících látek na odtoku z biologického reaktoru jako při použití aerobního čištění. Hlavní předností u anaerobní technologie je poté transformace a zušlechťování odpadních organických látek do energeticky bohatého bioplynu (Hlavínek et al. 2001).

Systém s aktivovaným kalem, který probíhá za aerobních podmínek, je nejběžnější formou biologického čištění na ČOV díky dobrému výkonu a vysoké účinnosti. Nutno ale podotknout, že také spotřebovává velké množství energie, představující více než 40 % celkové elektrické energie potřebné k provozu čistírny odpadních vod. Proto zařazením anaerobního čištění lze zlepšit celkovou energetickou bilanci ČOV, která vzniklý bioplyn může například využít jako palivo k udržování teploty vlastních biologických reaktorů a dále jako palivo pro motor kogenerační výroby tepla a elektřiny či jako palivo pro silniční dopravu. Energetická bilance pěti ČOV umístěných v Katalánsku odhalila, že v závislosti na konfiguraci zařízení a jeho provozu může být vyrobeným bioplynem dodáváno 39 až 76 % celkové elektrické energie spotřebované v ČOV (Silvestre et al. 2015).

3.1.3 Kalové hospodářství

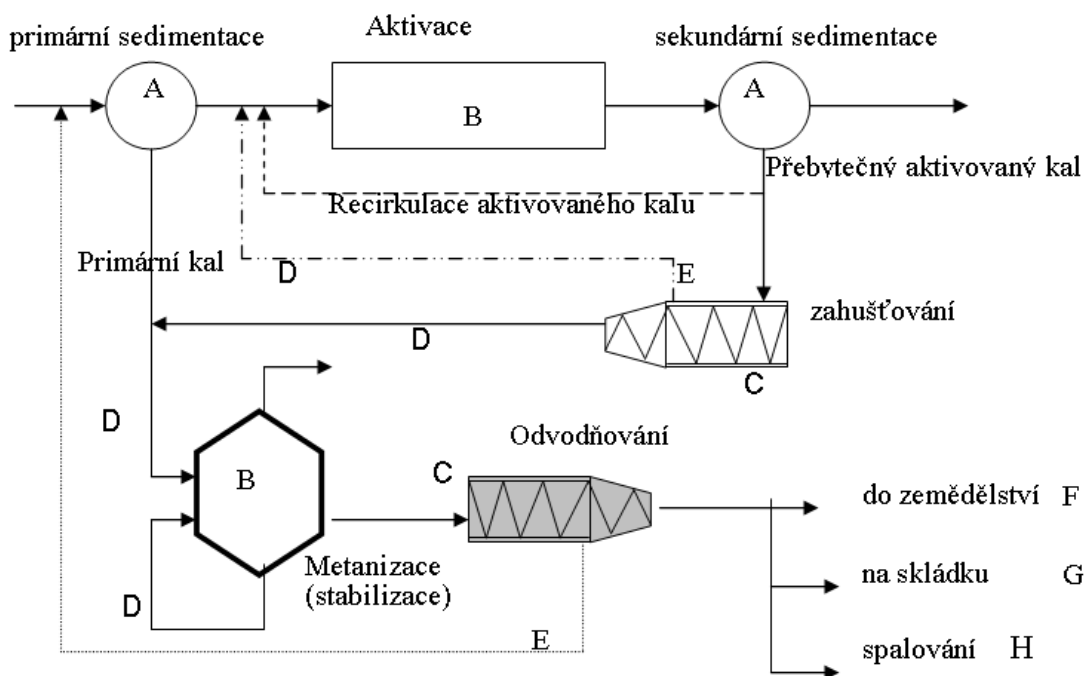
Poslední fází při čištění odpadních vod je kalové hospodářství, které zajišťuje aerobní nebo anaerobní stabilizaci kalů vyprodukovaných čistírnou (Pytl et al. 2004). Látky, které se z vody v předešlých fázích odstranily, jsou kumulovány v tzv. čistírenských kalech. Kal je tedy směs vody a pevných látek, oddělených z odpadní vody.

Kaly představují přibližně 1-2 % objemu čistěných vod, je v nich však zkoncentrováno až 50-80 % původního znečištění (Dohányos 2006).

Kal, který ještě nebyl stabilizován, nazýváme surový kal. Podle toho, odkud je ze systému odebírán, rozlišujeme kal primární, sekundární a terciální, přičemž terciální kal vzniká v důsledku chemického srážení (Hlavínek et al. 2001).

Primární kal se odděluje ze surové odpadní vody v usazovacích nádržích, kde probíhá primární sedimentace. Je převážně organické povahy a jeho složení je dáno především složením přitékající odpadní vody a poměry ve stokové síti. Sekundární kal, častěji označený jako přebytečný aktivovaný kal, je oddělován z biologického stupně čištění v dosazovací nádrži, kde probíhá sekundární sedimentace. Obsahuje nerozložené zbytky organických látek a přebytečnou biomasu, jeho složení je ovlivněno nejen složením surové vody, ale také použitým způsobem čištění. Oba typy kalů mají odlišné složení i vlastnosti a mohou být dále zpracovány odděleně nebo společně (Hlavínek et al. 2001).

Na obrázku č. 1 můžeme vidět základní schéma čistírny odpadních vod s kalovým hospodářstvím.



Obrázek č. 1 Základní schéma čistírny odpadních vod s kalovým hospodářstvím. Procesy: A – sedimentace, B – stabilizace, C – kondicionace, zahušťování a odvodňování, D – čerpání kalu, E – čerpání kalové vody, F, G, H – využití kalu (Dohányos 2006)

Množství kalů závisí především na množství a kvalitě čištěných odpadních vod a na použité technologii jejich čištění. Neexistuje žádná univerzální metoda pro zpracování, využití, eventuelně likvidaci čistírenských kalů, a tak rozdílnost přístupů k nakládání s čistírenskými kaly je značná (Kutil & Dohányos 2005).

Mezi základní požadavky moderního kalového hospodářství patří především mechanické zahušťování přebytečného aktivovaného kalu, jeho předúprava, anaerobní stabilizace kalu, odvodňování stabilizovaného kalu a jeho alternativní využívání v zemědělství, nebo termické zpracování s cílem maximálního využití energie (Dohányos 2006).

3.2 Kaly z čištění komunálních odpadních vod

Jak již bylo zmíněno, v průběhu procesu čištění odpadní vody vznikají celkem tři základní druhy odpadů. Nejdříve v rámci předčištění vznikají shrabky, písek a poté při primární a sekundární sedimentaci kal. Kal obsahuje látky rozpuštěné, koloidní a suspendované, které většinou převažují. Suspendované látky obsažené v kalu mohou být hydrofilní nebo hydrofobní, podle jejich vztahu k vodě. Povrch hydrofilních částic tvoří s molekulami vody poměrně pevné vazby, zatímco hydrofobní částice takovéto vazby netvoří. Tyto vlastnosti se promítají do zpracování kalu a závisí na nich schopnost kalu uvolňovat vodu. Čím více hydrofilních částic kal obsahuje, tím horší bude proces jeho zahušťování a odvodňování (Hlavínek et al. 2001). Předpokladem dobrých sedimentačních a zahušťovacích vlastností jsou také velké, pevné a kompaktní vločky aktivovaného kalu. Sedimentační vlastnosti aktivovaného kalu lze kvantifikovat následujícími způsoby.

Prvním způsobem je stanovení kalového indexu, značka KI, který je definován jako specifický objem usazeného aktivovaného kalu po 30 minutové sedimentaci v 1 l odměrném válci vztažený na koncentraci sušiny: $KI = V_{30} / X$ (Bindzar et al. 2009). Obecně lze říci, že hodnoty kalového indexu do 100 ml.g^{-1} indikují dobře sedimentující kal, při hodnotách vyšších než 200 ml.g^{-1} bude pravděpodobně docházet k bytění kalu a tvorbě vláknitých organismů. Vlákňité organismy zhoršují separační vlastnosti kalu (Hlavínek et al. 2001).

Druhým způsobem je určení zónové sedimentační rychlosti, ZSR. Ta je dána rychlostí pohybu rozhraní kal – supernatant, což je tekutina nad sedimentem, při sedimentačním testu a je odečítána z lineární části zahušťovací křivky, která je znázorňována jako výška rozhraní kal – supernatant H v čase. Tento parametr podává věrný obraz o průběhu sedimentace a zahušťování aktivovaného kalu v dosazovací nádrži (Bindzar et al. 2009).

Další základní charakteristikou kalu je obsah sušiny kalu, který se stanoví odpařením vody při teplotě $105 \text{ }^\circ\text{C}$ jako hmotnostní podíl p_s . V sušině kalu jsou zastoupeny dvě složky – organická a anorganická. Obsah sušiny i vody v kalu se obvykle vyjadřuje v procentech jako $100p_s + 100p_v = 100 \%$. Obsah sušiny primárního kalu odebíraného z prvního stupně bývá obvykle 2,5 %, to znamená, že obsah vody v kalu je 97,5 %. Obsah sušiny sekundárního kalu bývá pouze 0,5 – 1,0 %. Po stabilizaci a odvodnění má kal konzistenci podobnou zemině, obsah sušiny kalu je obvykle 20 – 50 %. Následným termickým zpracováním kalu lze dosáhnout více než 90 % sušiny kalu (Hlavínek et al. 2001).

Důležitou charakteristikou je také hygienické hledisko kalů, jelikož kal jako odpad podléhá zákonu o odpadech č. 541/2020 Sb., který vešel v platnost 23. 12. 2020. Konkrétně je nutné sledovat v kalu přítomnost indikátorových mikroorganismů a jejich limitní hodnoty, které stanovuje vyhláška č. 437/2016. Jako indikátorové organismy vyhláška uvádí *Enterokoky*, termotolerantní koliformní bakterie a *Salmonellu* sp. Blíže je hygienizace kalu popsána v následující kapitole č. 3.3.5.

3.3 Možnosti zpracování čistírenských kalů

Hlavními cíli zpracování kalu je redukce objemu kalu, redukce zápachu a možnost dalšího využití. Obecný postup zpracování kalů zahrnuje odebrání kalu ze systému, zahušťování kalu, předúpravu kalu, stabilizaci, případně hygienizaci kalu, odvodňování kalu a finální zpracování kalu (Hlavínek et al. 2001). Tento obecný postup však lze upravit do mnoha specifických variant dle podmínek ČOV. Složení kalu, jeho předúprava a nastavení odvodňovacího procesu ovlivňuje konečný obsah sušiny (Nielsen et al. 2019).

3.3.1 Zahušťování kalu

První fází obecného postupu pro zpracování kalů je zahušťování kalu. Jelikož se jedná o první etapu, dokáže ovlivnit veškeré další nakládání s kaly. V zásadě určuje investiční i provozní náklady kalového hospodářství, jako jsou rozměry nádrží nebo energie na čerpání. Při zahušťování dochází ke snížení objemového množství kalu tím, že se z něj odstraní část volné vody. Optimální obsah sušiny kalu po zahuštění se pohybuje mezi 5-6 %, kdy kal má ještě tekutou konzistenci, aby se dal čerpat k dalšímu zpracování (Hlavínek et al. 2001).

Zahušťování lze provádět za pomoci tří různých alternativ, a to gravitační metodou, flotací, nebo strojně. Gravitační zahušťování a strojní zahušťování je použitelné jak pro primární, tak sekundární kal či jejich směs. Zahuštění flotací, při kterém je potřeba dodávat vzduch ve formě jemných bublinek, se používá při zpracování sekundárního kalu (Bueno 2020).

3.3.2 Předúprava kalu

Pro zlepšení biologické rozložitelnosti kalů byla vyvinuta řada metod tzv. předúpravy kalu, jejichž společnou charakteristikou je dezintegrace. Dezintegrace je rozbití vloček a částic kalu. V důsledku rozpadu struktury kalu se podstatně urychlí anaerobní a aerobní biologický rozkladný proces. To má za následek zkrácení doby reakce a tím se sníží množství zbývajících nerozloženého materiálu a zlepšení odvoditelnosti materiálu (Žerava 2010).

Nejdůležitější efekty dezintegrace jsou (Žerava 2010):

- zvýšení rychlosti anaerobního rozkladu organických látek a tím zvýšení produkce bioplynu,
- snížení spotřeby flokulantu při odvodňování kalu,
- zlepšení obsahu sušiny při odvodňování,
- redukce přebytečného kalu a tím dosažení úspor na nákladech za likvidaci kalu,
- zlepšení celkové energetické bilance ČOV.

Tabulka č. 1 Základní rozdělení metod dezintegrace (Žerava 2010)

Mechanické	Fyzikální	Chemické	Biologické
Kulové mlýny	Zmrazování- rozmrazování	Kyselá hydrolýza	Enzymová lyze
Vysokotlaký homogenizátor	Osmotické šoky	Alkalická hydrolýza	
Ultrazvuk	Plazmové pulsy	Mokrá oxidace	Autolýza
Lyzátovací zahušťovací centrifuga	Termická dezintegrace	Ozonizace	

Nedávné studie také uvádí, že kromě předchozích benefitů, je pomocí metod dezintegrace možné snížit toxicitu kalu. Například, že kombinace anaerobního procesu a ozonizace kalu může snížit obsah přebytečného kalu, odstranit stopové organické látky, jako jsou antibiotika, a zároveň lze získat uvolněný fosfor z kalu (Qiang et al. 2015). Další studie porovnávala odstraňování toxicity kalu pomocí čtyř různých metod dezintegrace. Konkrétně zmrazení / rozmrazení, ultrazvuk, alkalicko-termální hydrolýzu a ozonizaci. Jako nejlepší metodu v závěru uvádí ultrazvuk, kdy se makromolekulární organické sloučeniny transformovaly na biologicky odbouratelné látky a zároveň bylo dosaženo cíle hlubokého odvodnění a snížení inhibice toxicity kalu na 64,3 % až 4,2 %. Sama studie však uvádí, že v budoucnu je nutné se zaměřit na energetické a ekonomické hledisko a proveditelnost metody ve velkém měřítku (Yang et al. 2021).

3.3.3 Stabilizace kalu

Stupeň stabilizace kalu se chápe jako míra jeho určitých vlastností vyjadřující vhodnost kalu pro daný způsob jeho využití. Ve stabilizovaném kalu neprobíhají již žádné intenzivní biologické pochody, které by mohly způsobit senzoričné a hygienické problémy. Stabilizovaný kal je nepáchnoucí, hygienicky nezávadný kal, který lze snadno odvodnit.

První metodou je anaerobní stabilizace kalu. Tato metoda je také často nazývána jako metanizace nebo vyhnívání, jelikož probíhá v anaerobních podmínkách prostřednictvím mikroorganismů, které rozkládají biologicky rozložitelné organické látky obsažené v surovém kalu. Jedná se o nejčastější metodu, která je používána na středních a velkých čistírnách. Je výhodná tím, že při ní dochází k transformaci organických látek na bioplyn, který lze využívat (Bindzar et al. 2009). Plyn obsahuje zhruba 60 – 70 % CH₄ a 30 – 35 % CO₂. Nevýhodou je však dlouhá doba zdržení kalu a horší kvalita kalové vody (Hlavínek et al. 2001). Proces anaerobní stabilizace probíhá v takzvané metanizační nádrži, zde se kaly zahřívají bez přístupu vzduchu a dochází k postupnému rozkladu organických látek. Přitom se vytváří již zmíněný bioplyn (www.vodakva.cz/cs/). Ten se z metanizačních nádrží odvádí do plynojemu a odtud se potom rozvádí k dalšímu zpracování, kdy nejefektivnější možností je využití bioplynu pro pohon spalovacích motorů spojených s agregátem na výrobu elektrické energie. Touto cestou je možné dodat alespoň část potřebné energie zpět do provozu ČOV. Podle

teploty rozlišujeme anaerobní stabilizaci v psychrofilních podmínkách (bez vyhřívání, teplota okolo 15 - 20 °C), v mesofilních podmínkách (teplota 30 – 40 °C) nebo v termofilních podmínkách (teplota 50 – 60 °C) (Švehla et al. 2007). V současné době se u nás v České republice ve většině případů provozuje anaerobní stabilizace mezofilně (Bindzar et al. 2009).

Dále lze provést aerobní stabilizaci kalů, při které se také využívá schopnosti mikroorganismů rozkládat biologicky rozložitelné organické látky v surovém kalu, s tím rozdílem, že zde celý proces probíhá za přístupu kyslíku. Organická hmota je zde oxidována na CO₂ a H₂O (Hlavínek et al. 2001). Tato metoda se využívá na malých čistírnách odpadních vod, jelikož kalové hospodářství s anaerobní stabilizací kalu je velice investičně náročnou stavbou a provoz metanizační nádrže by se tak z ekonomického hlediska nevyplatil. Kal je uskladňován v nádržích provzdušňovaných pomocí pneumatické aerace. Díky přerušovanému provozu aerace a pravidelnému odtahu kalové vody dochází postupně k zahušťování kalu (Švehla et al. 2007).

Posledním způsobem je chemická stabilizace, která spočívá ve zvýšení pH kalu na hodnotu alespoň 11,5, kdy dochází k ničení patogenních organismů (bakterií i virů), zatímco organické látky zůstanou nerozloženy. Ke zvýšení pH se nejčastěji využívá přídavku zásady, a to oxidu vápenatého nebo hydroxidu vápenatého (Hlavínek et al. 2001). Výhodou tohoto postupu je jeho jednoduchost a velmi dobrý hygienizační účinek, nevýhodou je zvýšení celkové sušiny kalu, který čistírna produkuje (Bindzar et al. 2009).

3.3.4 Odvodňování kalu

Po procesu stabilizace kalu přichází na řadu jeho odvodnění. Mezi technologie, které se využívají k mechanickému odvodňování, patří například odstředivky, pásové filtrační lisy či hydraulické filtrační lisy (Kocbek et al. 2020). Odvodnění lze provést také přirozeně na takzvaných kalových polích. Díky odvodnění kalu se zmenší jeho objem a tím se poté sníží také náklady na jeho likvidaci. Výsledkem odvodnění je tedy kal pevné konzistence s obsahem sušiny 20 – 50 % (Hlavínek et al. 2001).

3.3.5 Hygienizace kalu a finální zpracování

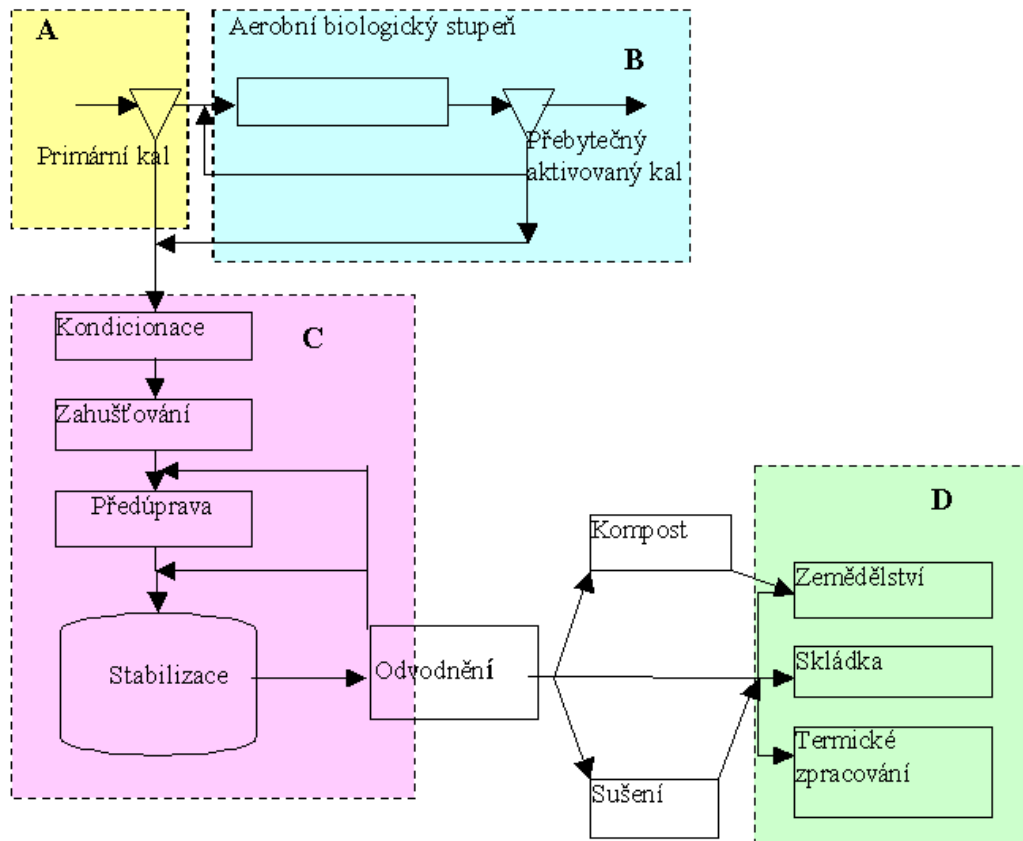
Za hygienizovaný se pokládá kal, který prošel takovou úpravou, že počty indikátorů patogenních mikroorganismů byly sníženy na požadovanou hodnotu (Kutil & Dohányos 2005). Před finálním zpracováním kalů je nutno zničit, nebo alespoň snížit, množství patogenních organismů na přijatelnou hodnotu podle jejich zamýšleného využití. Během čištění odpadních vod je většina chorobných zárodků zničena, přesto v nich určitá míra patogenních organismů přežívá (Hlavínek et al. 2001).

Jako potenciální patogeny se sledují především tyto skupiny mikroorganismů: termotolerantní kolidiformní bakterie, *Enterokoky* a *Salmonella* sp., vajíčka červů (helmintů) a *Enteroviry*. Pro bezpečnou aplikaci kalů do půdy jsou stanoveny závazné normy udávající množství mikroorganismů v jednom gramu sušiny kalu (Bindzar et al. 2009). Jak již bylo zmíněno, k určité přirozené hygienizaci dochází již během stabilizace kalu, kdy je stupeň hygienizace ovlivňován především teplotou a dobou zdržení kalu v prostorách metanizační nádrže. Dále také při odvodňování na kalových polích, termickém sušení či kompostování. Mezi metody hygienizace, které se zaměřují pouze na zneškodňování patogenů, patří metody

chemické i fyzikální. Fyzikální metody využívají teplotu, radiaci, ultrazvuk či mechanickou destrukci buněk mikroorganismů, chemické pak využívají účinků silných oxidačních činidel, jako je například chlor (Hlavínek et al. 2001).

Finálním zpracováním se poté rozumí spalování či skládkování kalu. Z hlediska ČOV je nejlepším řešením jeho další využití, například v zemědělství či jeho zakomponování do stavebních materiálů. A to z důvodu splnění požadavků zákona o odpadech, který ukládá odpady, pokud je to možné, přednostně využívat, nikoliv skládkovat.

Postupné zpracování kalů je znázorněno na obrázku č. 2.



Obrázek č. 2 Obecné schéma zpracování čistírenského kalu. A - Primární (mechanické) čištění - odstraňování suspendovaných látek, B - snižování produkce biomasy v aerobním biologickém stupni, C – kondicionace – chemická, termická nebo fyzikálně-chemická předúprava, např. přidavek flokulantů ke zlepšení odvodnitelnosti kalů, termická předúprava aktivovaného kalu a pod. (Kutil & Dohányos 2005) a další způsoby předúpravy a stabilizace kalů, D - metody využití a likvidace (Dohányos 2006)

3.4 Nakládání s kalem z ČOV

V České republice je oblast čistírenských kalů podepřena několika legislativními dokumenty, které řeší nejen otázky týkající se nakládání s kalem, ale také povinnosti původců odpadu, což jsou například provozovatelé čistíren odpadních vod a jiných zařízení a povinnosti oprávněných osob (Brožová 2018).

V následujících řádcích je shrnuta nejdůležitější legislativa, která se kalem zaobírá. Jako první je určitě třeba zmínit zákon o odpadech č. 541/2020 Sb., pod který kal jakožto odpad spadá. Jehož nové znění vešlo v účinnost teprve nedávno, a to 1. 1. 2021. V tomto zákonu nalezneme základní ustanovení, jako je například působnost zákona, základní definice týkající se všech druhů odpadů, na které se tento zákon vztahuje, povinnosti týkající se evidence a ohlašování či jaké poplatky jsou spojeny s ukládáním odpadu na skládku. Co se týká kalu, jsou zde uvedeny povinnosti při používání kalů na zemědělské půdě a dále se uvádí, že ministerstvo stanoví vyhláškou mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek v zemědělské půdě, mezní hodnoty koncentrací těžkých kovů, které smí být přidány do zemědělské půdy za období 10 let a nakonec stanoví podmínky pro analýzu kalů a půdy, včetně metod odběru vzorků. Poslední platnou vyhláškou stanovující tyto jednotlivé body, je vyhláška č. 437/2016 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady.

Na základě platné legislativy máme v současné době 5 základních možností, jak s kalem nakládat:

- přímá aplikace a rekultivace,
- kompostování,
- skládkování,
- spalování,
- jinak (zpravidla se jedná o uložení kalu na skládku ve formě technického zabezpečení skládky).

V tabulce č. 2 je shrnuta celková produkce kalů z ČOV v ČR a v Karlovarském kraji v letech 2015 – 2020 s uvedením způsobu nakládání.

Z uvedených dat je patrné, že celková produkce kalů v ČR, až na rok 2018, je poměrně stabilní, stejně tak v Karlovarském kraji. Jinak je tomu u nakládání, kdy v roce 2018 došlo k navýšení spalování čistírenských kalů, a to o celých 7 % poměrem k celkovému množství produkovaného kalu. V Karlovarském kraji z uvedených dat vidíme, že vůbec nedochází k přímé aplikaci kalů na zemědělskou půdu a likvidace kalů spalováním se zde začala využívat až v roce 2017. Spalováno je v kraji pouze zhruba 1,2 % z celkové produkce kalů.

Tabulka č. 2 Produkce a nakládání s kaly z ČOV v ČR a Karlovarském kraji v letech 2015 – 2020, údaje jsou uvedeny v tunách sušiny (ČSU)

Rok	Území, kraj	Kaly produkované v ČOV celkem	Způsob zneškodnění kalu				
			přímá aplikace a rekultivace	kompostování	skládkování	spalování	jinak
2019	Česká republika	196 967	90 663	63 462	16 869	15 206	10 767
	Karlovarský	3 959	0	1 541	1 086	55	1 277
2018	Česká republika	202 358	88 883	64 515	17 728	19 440	11 792
	Karlovarský	4 144	0	1 710	1 006	39	1 389
2017	Česká republika	178 077	75 451	60 930	11 809	4 736	25 151
	Karlovarský	4 197	0	1 817	1 212	53	1 115
2016	Česká republika	173 709	62 551	65 163	10 183	4 814	30 998
	Karlovarský	4 046	0	1 918	1 012	0	1 116
2015	Česká republika	172 997	63 061	67 065	6 513	2 167	34 191
	Karlovarský	4 429	0	1 778	1 248	0	1 403

Vyprodukované množství kalu a způsoby zvolené pro jeho následné zpracování se v jednotlivých státech liší. Například v Litvě dle statistických údajů k roku 2016 dosahuje vyprodukované množství 82 000 tun sušiny kalu za rok. Z toho je přibližně 60 % skládkováno ve skladovacích zařízeních a na skládkách, 14 % se využije v zemědělství a 26 % je kompostováno (Praspaliauskas & Pedišius 2017). V Itálii byla pro rok 2015 odhadnuta celková produkce přibližně na 395 000 tun sušiny za rok. Z tohoto množství je 9,9 % využito v zemědělství, 26,4 % je odesláno do závodů na výrobu kompostu, 5,6 % na výrobu hnojiva, 17,2 % se ukládá na skládky a 5,9 % je odvezeno do spalovacích zařízení. Zbylých 35 % je před využitím či likvidací odesláno do takzvaných externích kalových center k úpravě (Mininni et al. 2019).

Vzhledem k výrazným změnám v legislativě, které ovlivňují nakládání s čistírenskými kaly, provozovatelé i vlastníci ČOV stojí, či v nejbližším období budou stát, před zásadní otázkou, jakou cestou se v případě produkováných čistírenských kalů a nakládání s nimi vydat (Wanner 2019). Tyto změny jsou způsobeny problémem, který v oblasti nakládání s kalem, jakožto odpadem, vznikl v rámci celé Evropy, a to na základě omezení týkajících se ukládání a využití kalu. Tato omezení jsou však výsledkem několika nevyhnutelných trendů, jako je postupné snižování dostupnosti skládek pro ukládání biologicky rozložitelných odpadů, tedy i kalu, dále se uvádí zvýšený nesouhlas zemědělců s přímou aplikací kalu na půdu, stále přísnější normy stanovené pro obsah kovů v kalu a další hygienické parametry ze strany Evropské unie a zvyšování nákladů na likvidaci kalu mimo ČOV (Mininni et al. 2015). Dále je v tabulce č. 3 uvedeno postupné zvyšování poplatků za ukládání využitelného odpadu, mezi který je zařazen i kal, na skládky. Tento průběžný nárůst sazby v průběhu následujících let

uvádí zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech v příloze č. 9. Zároveň také narážíme na cíl EU, který byl zmíněn již v úvodu této práce, a to, že členské sáty by měly do roku 2030 od skládkování recyklovatelného odpadu zcela upustit.

Tabulka č. 3 Sazba pro jednotlivé dílčí základy poplatku za ukládání odpadu na skládku v Kč/t (Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech)

	Poplatkové období v roce									
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030 a dále
Dílčí základ poplatku za ukládání využitelných odpadů	800	900	1000	1250	1500	1600	1700	1800	1850	1850

3.5 Kvalita čistírenského kalu

Kvalita čistírenského kalu na výstupu z ČOV nám udává možnosti s jeho dalším nakládáním. Jedním z hlavních limitujících kritérií použití čistírenského kalu do zemědělství je obsah těžkých kovů. V ČR tuto problematiku upravuje vyhláška č. 437/2016 Sb. s účinností od 1. 1. 2017 do 1. 1. 2021. V době psaní této bakalářské práce nebylo ještě vydáno nové platné znění vyhlášky. S ohledem na změnu legislativy spočívající v zákazu skládkování neupravených odpadů a omezené aplikaci v zemědělství, je potřeba se připravit na nové technologické směry pro materiálovou transformaci čistírenského kalu (Raček et al. 2018).

Tabulka č. 4 Obsah rizikových prvků ve vzorcích kalů z ČOV v roce 2019 – ČR (mg/kg sušiny) (ÚKZÚZ)

ČR	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Průměr	10,1	2,51	60,1	246	1,48	23,7	67,6	1051
Minimum	2,59	0,5	13,7	93	0,44	0,75	16,9	467
Maximum	27,9	27,7	486	614	3,47	172	699	3715
Mezní hodnoty koncentrací v kalech (mg/kg sušiny dle vyhlášky 437/2016 Sb.)	30	5	200	500	4	100	200	2500

V rámci monitoringu kalů, který provádí Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně, byly kontrolní vzorky odebrány v roce 2019 na 40 vybraných ČOV. V tabulce č. 4 je provedeno porovnání zjištěných hodnot s mezními (maximálními) hodnotami, které musí splňovat kal využívaný v zemědělství.

Z uvedených dat je patrné, že zatímco průměrné hodnoty ze všech odebraných vzorků jsou u všech sledovaných parametrů v souladu s vyhláškou, maximální zjištěné hodnoty v rámci ročního monitoringu jsou překročeny hned u 6 parametrů, a to kadmia (Cd), chrómu (Cr), mědi (Cu), niklu (Ni), olova (Pb) a zinku (Zn).

V rámci kvality čistírenského kalu musíme ovšem zmínit i významný obsah hnojivých složek - dusík, fosfor, draslík, hořčík a vápník. Dalo by se říct, že díky obsahu těchto složek

budou velké možnosti ve využití čistírenského kalu jako hnojiva v zemědělství. Opak je ale pravdou. V současné době se sice některé živiny z kalu recyklují zpět do zemědělských půd přímou aplikací, obvykle po ošetření, kterým může být vápnění či kompostování. Tento postup přímé aplikace kalu na půdu má však své nevýhody. Těmi může být nevhodná konzistence kalu, omezená dostupnost živin a hlavním rizikem, které je nutné si uvědomovat, je riziko pro lidské zdraví vyplývající z přítomnosti patogenů, organických kontaminantů a již zmiňovaných těžkých kovů (Shaddel et al. 2019).

Dále je důležité si uvědomit, že současná legislativa se zabývá pouze limitováním obsahu těžkých kovů. Mezi další kontaminanty, které se mohou v kalech vyskytnout, patří organické polutanty či zbytky různých druhů léčiv, jako jsou například antibiotika či hormonální složky z antikoncepcí. Organickými polutanty, které se mohou vyskytovat v čistírenském kalu, jsou především polychlorované bifenylly, polycyklické aromatické uhlovodíky či absorbovatelné organicky vázané halogeny. Tyto látky se dostávají do odpadních vod v důsledku průmyslové činnosti, atmosférické depozice či z emisí a jejich nebezpečnost spočívá ve schopnosti kumulovat se v životním prostředí, jelikož půda má silnou retenční funkci (Hejlová 2006). Zbytky léčiv jsou obsaženy v odpadních vodách z nemocnic a samozřejmě se do kanalizací, a potažmo do kalu, dostávají z moči lidí. Důležité poznatky o tom, zda rostliny mohou přijímat léčiva a jejich metabolity, přináší práce profesorky Kodešové z České zemědělské univerzity. Jako příklad lze uvést studii, která se zaměřila na příjem vybraných léčiv rostlinami špenátu z kalu, který byl aplikován na půdu. Celkem bylo v kalu kvalifikováno 45 druhů léčiv, z toho nejvyšší koncentrace byly pozorovány u telmisartanu, který se používá k léčbě hypertenze, dále u antidepresiva zvaného sertralin či karbamazepin, což je analgetikum. Studie ve svém závěru uvádí následující: Čistírenské kaly, které se často používají při úpravách půdy, mohou být významným zdrojem kontaminantů (včetně farmak a jejich metabolitů) ukládaných do zemědělských půd, které se dále mohou akumulovat v rostlinách a potravinách. Tato studie prokázala, že karbamazepin a jeho metabolity se značně akumulovaly ve špenátových listech. Dále byla prokázána i akumulace sertralinu či telmisartanu, ten byl však přítomen pouze v kořenech (Kodešová et al. 2019).

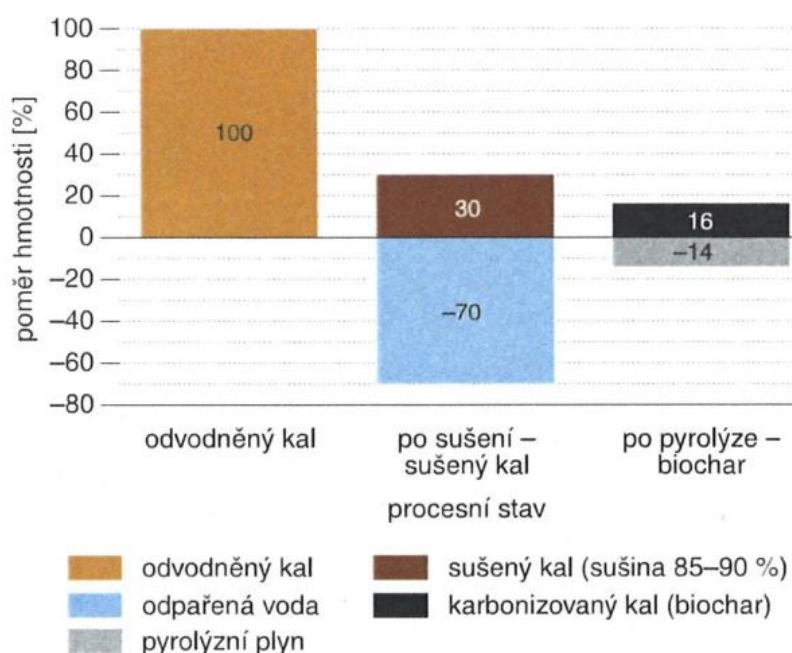
Stále větší obavy vzbuzuje v dnešní době také vznik a šíření rezistence na antibiotika. Rezistentní bakterie, označované zkratkou ARB z anglické výrazu antibiotic - resistant bacteria a rezistentní geny označované zkratkou ARG z výrazu antibiotic resistance genes byly nalezeny v různých sférách životního prostředí, včetně půdy či povrchové vody (Ben et al. 2017). Vysoké množství antibiotik se dostává také do odpadních vod, což může podporovat vznik rezistentních bakterií či genů (Barancheshme & Munir 2018), a právě proto jsou čistírny odpadních vod často považovány za jejich zásobárny. ARB a ARG byly široce detekovány na ČOV po celém světě a eliminace rezistence na antibiotika pomocí procesů čištění odpadních vod je obecně neúčinná. V důsledku toho může vypouštění nebo opětovné použití vod z ČOV vést k šíření těchto bakterií či genů do řek a půd, které jsou touto vodou zavlažovány (Ben et al. 2017). Opakované využití vody je stále více považováno za alternativní zdroj vody v zemích s jejím nedostatkem. Například se uvádí, že míra znovuvyužití vody v Pekingu vzrostla v roce 2015 na 63 % (Cui et al. 2020). Celkově tato problematika však nebyla dosud důkladně prozkoumána a dostupné informace jsou značně

omezené. Na druhé straně je třeba dále zkoumat faktory, které mohou významně ovlivnit šíření rezistence na antibiotika a problematiku nepodcenit, vzhledem k tomu, že světová zdravotnická organizace, WHO, šíření rezistence na antibiotika označila jako jednu ze tří nejzávažnějších hrozeb pro veřejné zdraví ve 21. století (Ben et al. 2017).

4 Sušárny kalů na čistírnách odpadních vod

Hlavním úkolem sušárny kalu je snížení hmotnosti kalu. Mechanicky odvodněný kal zpravidla obsahuje 20 – 30 % sušiny. Sušina odvodněného kalu je energeticky poměrně bohatá, ale čím více vody odvodněný kal obsahuje, tím se tato přednost ztrácí díky negativnímu účinku obsahu vody na energetickou bilanci při termickém zpracování. Poplatky za likvidaci kalu jsou kalkulovány na základě hmotnosti kalu. Pokud jde o spalování, pak poplatek závisí z velké části na kalorické hodnotě odvodněného kalu, tedy čím vlhčí kal, tím vyšší spalovací poplatek (Kos & Zwettler 2018).

Sušením kalu docílíme zvýšení sušiny až na cca 80 – 90 % a tím se výrazně sníží hmotnost kalu. Obrázek č. 3 ukazuje snížení hmotnosti kalu sušením na 30 % a dalším termickým zpracováním - pyrolýzou dokonce na 16 % původní hmotnosti. Pyrolýza je proces tepelné degradace biomasy za nepřítomnosti vzduchu, jehož produktem je takzvaný biochar, jedná se v podstatě o aktivní uhlí, proto název karbonizovaný kal (Jia et al. 2021).



Obrázek č. 3 Průběh snížení hmotnosti při sušení a termickém zpracování odvodněného kalu (Kos & Zwettler 2018)

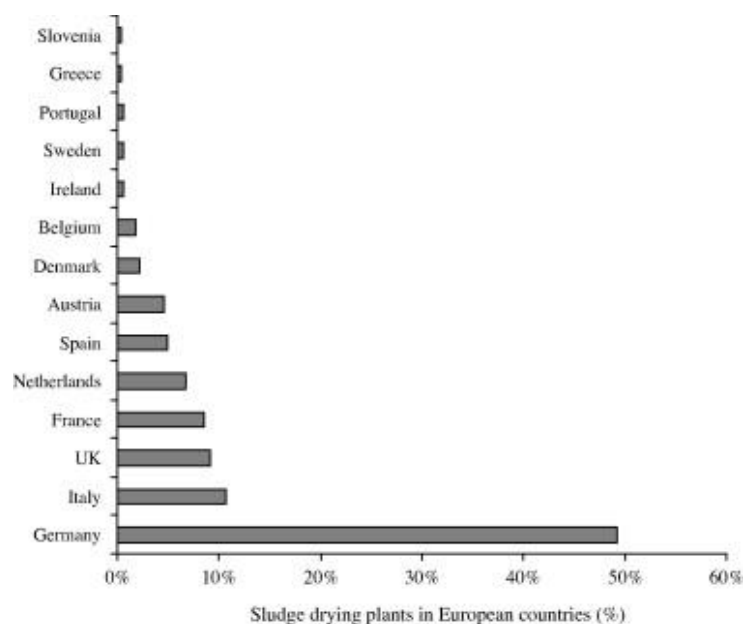
Dle Kose (2018) bude nutné v souvislosti s měnícími se požadavky na finální nakládání s čistírenskými kaly přistoupit k sušení kalů jako metodě, která otevírá možnosti pro transformaci kalů do formy energeticky nebo materiálově využitelné. Usušením kalů se odstraní významná část vody, což způsobí:

- významně se sníží náklady na odvoz kalu,
- sušený kal se stává velmi dobře skladovatelný (i dlouhodobě),
- v závislosti na způsobu sušení dochází k hygienizaci kalu,
- sušený kal je již spalitelný či termochemicky zpracovatelný,
- sušením je vytvořen nový „produkt“ – sušený kal, který obecně poskytuje rozsáhlé možnosti finálního využití kalů (Kos & Zwettler 2018).

Při výběru vhodného typu sušárny se posuzují technické a ekonomické parametry daného typu sušárny. Jedná se především o výši investičních nákladů, spolehlivost a délku servisních odstávek, bezpečnost provozu sušárny, počet referencí sušárny daného typu a dané velikosti, provozní náklady, včetně možnosti rekuperace tepla, možnost zapojení sušárny do systému využívání tepelné energie na ČOV, možnost využití externích zdrojů „odpadního“ tepla. Při plánování sušárny čistírenských kalů je vhodné propojit zdroje a spotřeby tepla mezi sušárnou a ČOV. Ne vždy je toto možné a často je nutná přestavba tepelného hospodářství ČOV. Do bilance tepla na ČOV se zahrnují údaje jako produkce bioplynu, složení bioplynu, objem surového kalu, teplo spotřebované na ohřev technologie, teplo spotřebované na ohřev budov a teploty na vstupu a výstupu z topné vody kalových výměníků. Plánování realizace sušárny je tak velmi individuální záležitostí, jelikož nikdy nenajdeme dvě shodné lokality se stejnou produkcí a potřebou tepla (Hartig 2017). Řešení problémů souvisejících se zpracováním kalu může představovat až 30 % celkových nákladů na provoz ČOV (Kocbek et al. 2020).

Velmi zajímavou myšlenkou v tomto ohledu může být propojení sušárny kalu a spalovny. Tímto způsobem by bylo možné zvýšit celkovou energetickou účinnost využitím tepla generovaného ve spalovně k sušení čistírenských kalů. Touto možností se zabývala studie zahrnující japonskou čistírnu odpadních vod a nedalekou spalovnu, vzdálenou 400 m. Výsledky ukázaly, že modelový scénář, kdy by se spojila spalovna a čistírna, snižuje celkové roční náklady o 35 % a celkové roční emise oxidu uhličitého o 1 % ve srovnání se současným stavem, kdy odpadní teplo ze spalovny zůstává nevyužito (Nakatsuka et al. 2020). Takovéto propojení se v současné době chystá také v České republice, a to konkrétně na čistírně odpadních vod Náchod. V rámci tamního projektu se akciová společnost Vodovody a kanalizace Náchod rozhodla pro vybudování sušárny odvodněného kalu a jeho následné spalování. Přebytkové teplo ze spalovny poté bude využito pro sušení kalu a vytápění přilehlé kancelářské budovy (www.vakna.cz).

Sušení kalu jako jedna z možných metod jeho zpracování se v zemích Evropské unie rozšířila teprve nedávno. Studie, která se v roce 2012 zabývala srovnáním metod, které se využívají k čištění a konečné likvidaci čistírenských kalů v evropských zemích, uvádí, že v roce 1995 bylo v EU provozováno 110 tepelných sušáren, následně byl v roce 1999 počet zvýšen na 370 sušících linek, přičemž k roku 2012 činil celkový počet 450 sušáren.



Obrázek č. 4 Distribuce zařízení na sušení kalu v evropských zemích (Kelessidis & Stasinakis 2012)

Obrázek č. 4 prozrazuje, že velká většina tepelných sušáren, téměř 50 % z nich, je provozována v Německu, následuje Itálie, Velká Británie a Francie. Mezi nejběžněji využívané typy sušáren patří rotační bubnová, pásová či sušárny s fluidním ložem (Kelessidis & Stasinakis 2012).

4.1 Druhy sušáren čistírenských kalů

Sušárny dělíme na dva základní typy: indukční a konvekční. U indukční sušárny, označované také jako kontaktní sušárna, je tepelná energie přenášena na kal vnitřním povrchem strojního zařízení. Tuto metodu používají diskové, lopatkové a tenkovrstvé sušárny. Naproti tomu u konvekční sušárny je teplo přenášeno plynným médiem (obvykle teplý vzduch) v přímém kontaktu s čistírenským kalem (Raček et al. 2018). Příkladem systémů s konvekčním typem sušení může být fluidní lože, rotační, pásové či bubnové sušárny (Yuan & Chu 2020).

V současnosti jsou nejčastěji používané fluidní a pásové sušárny odvodněných kalů. Alternativou pro strojní sušení kalů jsou solární sušárny kalů (Hartig 2017). Jako další slibná možnost se uvádí také sušení pomocí mikrovlnného záření (Kocbek et al. 2020), tato metoda byla využita například v Irsku (Kelessidis & Stasinakis 2012). Dobře pracující sušárna zvládne odpařit 1 tunu vody z kalu spotřebováním 930 kWh tepelné energie a dokáže pracovat až 8 000 provozních hodin za rok (Raček et al. 2018).

4.1.1 Pásové sušárny

Jak již bylo uvedeno výše, pásové sušárny využívají systém konvekčního sušení a dokáží vysušit odvodněný kal na obsah sušiny vyšší než 90 %.

U těchto typů sušáren je odvodněný čistírenský kal rozprostřen na pomalu se pohybující prodyšné pásy. Sušící plyn (nejčastěji ohřátý vzduch či spaliny) prochází skrz pás s kalem a dochází k sušení. V průběhu sušení nedochází k velkému fyzickému namáhání kalu, tolik se

tedy s kalem nemanipuluje, a proto částice prachu nevykazují v sušicím plynu velký podíl (Sirový 2011). Sušící vzduch může být ohříván v hořáku nebo může být přiváděn přes výparník pomocí technologie tepelných čerpadel. Yuan & Chu (2020) však uvádějí, že provozní teploty sušárny tepelným čerpadlem jsou nižší než u sušáren se spalováním, a proto je pravděpodobné, že doba sušení bude delší.

U pásových sušáren lze ovlivnit nejen množství přiváděného kalu, ale i množství dodávané tepelné energie a v neposlední řadě i rychlost dopravního pásu. V současné době se stále častěji využívají nízkoteplotní sušárny kalu, u kterých se udržuje konstantní teplota vzduchu.

4.1.2 Fluidní sušárny

Princip sušáren s fluidním ložem je založen na přivádění turbulentně proudícího vzduchu/plynu, dokud se nevytvoří fluidní lože. Tím jsou granule kalu drženy ve vznosu, čímž jsou intenzivně promíchávány. Teplota fluidního lože se pohybuje okolo 85 °C (Hartig 2017). Jako nevýhodu u tohoto typu sušárny lze uvést, že vysoušecí médium, tedy proudící vzduch, je čerpáno do atmosféry a vzhledem k tomu, že zde je kal v médiu intenzivně promícháván, může docházet ke znečišťování ovzduší. Je tedy nezbytná kontrola prachových částic na výstupu vzduchu ze sušárny (Yuan & Chu 2020).

4.1.3 Solární sušárny

Solární sušárny využívají k sušení kalu sluneční energii. Byly vyvinuty z kalových polí. Odvodněný kal je dopraven do skleníku, rozprostřen po podlaze a zdrojem tepla je sluneční energie (Hartig 2017). Rychlost sušení tedy závisí na intenzitě slunečního záření a kvůli tomu je tato metoda sušení v našem středoevropském regionu přijímána s určitou skepsí, protože z různých stran zaznívají pochybnosti nad účinností těchto systémů kvůli nedostatečné intenzitě slunečního záření (Raček et al. 2018). Naopak využití této obnovitelné energie, jejíž hlavní výhodou je, že není zpoplatněna, má potenciál například v Alžírsku, kde jsou rozsáhlé pouště a sluneční záření zde přesahuje v průběhu roku 2300 kWhm⁻² (Ameri et al. 2020).

Kolísání sušící kapacity je minimalizováno pomocí řízené ventilace a systému obracení kalu na podlaze skleníku. Intenzita ventilace je řízena na základě kontinuálního měření teploty a vlhkosti vzduchu venku a uvnitř skleníku. V zimních měsících může být provoz solární sušárny intenzifikován pomocí podlahového topení o tepelném výkonu 150 – 300 W/m². Hlavním zdrojem tepelné energie však zůstává sluneční záření (Hartig 2017). Solární sušárny dělíme na dva základy druhy, a to na typ s přímým a nepřímým způsobem zahřívání. U přímého zahřívání se sluneční záření využívá napřímo a paprsky působí ihned na kal přes průhledný materiál, kterým je kryta sušící komora. Tímto průhledným materiálem může být například sklo či polyetylenová deska (Singh & Gaur 2020). U nepřímého zahřívání nejsou kaly přímo vystaveny slunečnímu záření, ale vzduch ohříváný slunečním zářením v solárním kolektoru cirkuluje skrz ně (Ameri et al. 2020).

Provoz solární sušárny je ekonomický, ale výkon sušárny je přímo úměrný úhrnu slunečního záření. Proto plocha solární sušárny nesmí být zastíněna. Vzhledem k požadované ploše sušárny je nezbytné při plánovaném použití solární sušárny počítat s větším zábořem plochy na sušárnu v porovnání s ostatními metodami sušení kalů (Hartig 2017).

4.2 Využití vysušeného kalu

Sušení čistírenského kalu pro materiálovou transformaci se jeví z pohledu energetického využití nebo požadavků jiných technologií jako nevyhnutelný krok „předúpravy“. Procesy torefakce, spalování, zplyňování nebo pyrolýzy je vhodné kombinovat se sušením kalů u velkých a středně velkých ČOV (Raček et al. 2018).

Na 29. konferenci Kalů a odpady 2020 bylo prezentováno, že v případě materiálového využití čistírenských kalů lze předpokládat především důraz na recyklaci fosforu, který byl zařazen na seznam kritických surovin pro EU jako fosfátová hornina a fosfor, a to zejména z důvodů, že v EU nejsou žádná ložiska fosfátových hornin (kromě významných ložisek ve Finsku) a nutnosti dovozu produktů a meziproduktů na bázi fosforu z krajín jako Maroko, Rusko, Sýrie, Čína nebo Vietnam (Pohořelý et al. 2020).

Sušený čistírenský kal odpovídá z pohledu chemického složení heterogenitě vstupního odvodněného kalu a jeho fyzikální vlastnosti jsou ve značné míře ovlivněny zvolenou technologií sušení kalu. Výstupní sušený čistírenský kal se odlišuje především svými granulometrickými vlastnostmi. Na obrázku č. 5 je sušený kal z pásové konvenční sušárny, na obrázku č. 6 je sušený kal z kontaktní lopatkové sušárny (Raček et al. 2018).



Obrázek č. 5 Kal z pásové konvenční sušárny Obrázek č. 6 Kal z kontaktní lopatkové sušárny

Jak již bylo zmíněno, hlavním principem sušení kalu je výrazné snížení jeho hmotnosti v důsledku odstranění velkého množství vody. S takto upraveným kalem tedy můžeme v zásadě nakládat jako s odvodněným kalem. Případá tedy v úvahu například kompostování, ukládání na skládky či přímé použití na zemědělské půdě. V tomto případě však vyvstává otázka, zda je výhodné nejprve kal pracně vysoušet. Toto téma je blíže diskutováno v kapitole č. 6. Ovšem právě díky odstranění velkého množství vody a získáním vysokoprocenní sušiny se nám otevírají i další možnosti jeho zpracování, jako spalování či pyrolýza.

4.2.1 Spalování

Proces spalování čistírenských kalů je kvalifikován jako termochemické zpracování, které je využíváno ve velké míře například ve Švýcarsku, Nizozemsku a poslední dobou také v Německu.

Hlavními výhodami spalování proti jinému způsobu využití/odstranění jsou zejména (Pohořelý et al. 2020):

- význačné snížení hmotnosti a objemu kalu,
- úplná stabilizace a hygienizace kalu,
- destrukce prakticky veškerých organických látek a plastů,
- koncentrování fosforu v popelu,
- kombinovaná výroba užitného tepla/elektrické energie a popela bohatého na fosfor.

Nevýhody spalování kalu:

- ztráta biologicky rozložitelné organické hmoty a důležitých mikro a makro živin pro rostliny, mezi ty patří například dusík či fosfor (Eid et al. 2020),
- možná tvorba toxických emisí a znečišťujících látek, jako je oxid uhelný, oxidy dusíku, síry či polycyklických aromatických uhlovodíků (Vatachi 2019), u této nevýhody je však nutné podotknout, že tvorbu nežádoucích emisí lze účinně regulovat vysokou teplotou nad 850 °C při procesu spalování (Hao et al. 2020).

Výhřevnost suchého, anaerobně stabilizovaného čistírenského kalu činí 9 - 12 MJ/kg a odpovídá výhřevnosti méně kvalitního hnědého energetického uhlí (Pohořelý et al. 2015).

Je udáváno, že samospalitelnost surového kalu při obsahu 70 % organických látek v sušině nastává při odvodnění na více než 30 %, ovšem rozhodující je výhřevnost. Zkušenosti se spalováním mokré biomasy ukazují, že minimální výhřevnost nutná pro samostatnou spalitelnost paliva se pohybuje nad úrovní 7 MJ/kg. Právě nízká výhřevnost při vysoké vlhkosti je hlavní příčinou, proč se kal většinou nespaluje samostatně, ale přidává se k němu kvalitnější palivo. Pokud se u kalu nedosáhne odvodnění na sušinu 30 %, je nutné používat trvale přídatné palivo a pak se již nejedná o energetické využití směsného surového kalu (Kutil & Dohányos 2005).

4.2.2 Spalování v cementářenské peci

Tato metoda byla vyvinuta v Japonsku a má následující výhody (Dohányos 2006):

- úplné odstranění všech toxických organických látek v důsledku vysoké teploty vypalování (>1000°C),
- těžké kovy jsou vázány do cementářského slínku a nemohou být vyluhovány,
- úspora uhlí a surovin,
- snížení emisí CO₂,
- bezodpadové zpracování kalu.

Pro udržení dobrých vlastností cementu je možno sušeným kalem nahradit pouze 5 % používaného uhlí a použitý kal musí být vysušen na vysoký obsah sušiny, cca 95 % (Dohányos 2006).

Nevýhodou této metody je závislost na odběru kalu třetí osobou, což nemusí být dlouhodobé a v množství, které provozovatel ČOV potřebuje.

4.2.3 Pyrolýza

Pyrolýza je novým technologickým postupem zpracování čistírenských kalů za nepřítomnosti kyslíku při teplotě 800 - 1000 °C, při kterém probíhá chemická destrukce organických látek. Produkty pyrolýzy jsou plynné (oxid uhličitý, oxid uhelnatý, vodík, methan a další uhlovodíky), kapalné (kondenzát a vyšší uhlovodíky) a tuhý zbytek. Poměr kapalného a pevného produktu závisí na podmínkách a teplotě pyrolýzy (Dohányos 2006).

Nevýhodou této metody je produkce plynu, olejů a tuhého zbytku, který vyžaduje další zpracování a rovněž vyšší investiční náklady zařízení (Hartig 2014).

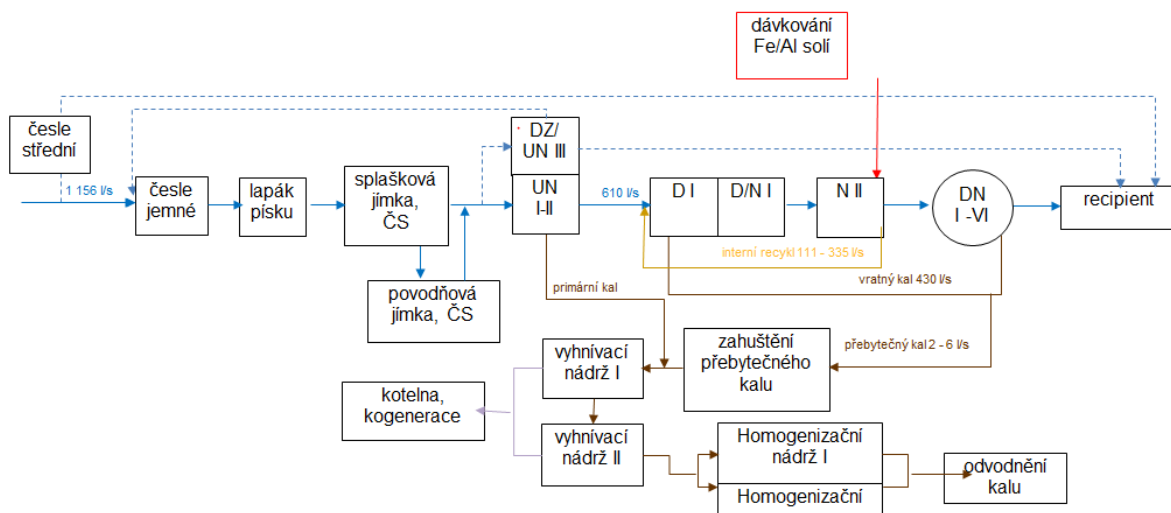
Všechny zde zmíněné konvenční metody tepelného zpracování kalu, jako je spalování, pyrolýza či zplynování, potřebují nevyhnutelně předsušení. To ovšem vyžaduje jak nemalé investiční náklady, tak určité náklady na samotný provoz sušárny. V současné době jsou proto zkoumány další metody zpracování, u kterých by předsušení nebylo třeba, jako například metoda hydrotermální karbonizace. U této metody totiž naopak obsah vody hraje důležitou a hlavně pozitivní roli. Jednak zvyšuje účinnost přenosu tepla a jednak se podílí na karbonizačních reakčních procesech, což usnadňuje hydrolýzu (Wang et al. 2019).

5 Sušárna kalů v Karlových Varech

5.1 Provoz čistírny odpadních vod v Karlových Varech

Čistírna odpadních vod Karlovy Vary - Drahovice je provozována akciovou společností Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, dále jen VODAKVA. Tato čistírna byla vystavěna již v letech 1961 až 1967 a od té doby prošla mnohými změnami a samozřejmě modernizací. Technologie čistírny je mechanicko-biologická s biologickým odstraňováním dusíku a chemickým srážením fosforu. Její projektová kapacita je 80 000 ekvivalentních obyvatel. Průměrný denní přítok dosahuje 24 000 m³ odpadních vod a vyčištěná voda je vypouštěna do řeky Ohře (www.vodakva.cz/cs/).

Čistírna je technologicky rozdělena na část mechanickou, biologickou a kalové hospodářství (obrázek č. 7).



Obrázek č. 7 Technologické schéma ČOV Karlovy Vary: ČS – čerpací stanice, DZ – dešťová zdrž, D – denitrifikace, D/N – variabilní denitrifikace nebo nitrifikace, DN – dosazovací nádrž, N - nitrifikace (Provozní řád vyjmenovaného stacionárního zdroje ovzduší Karlovy Vary 2016)

5.2 Kalové hospodářství na ČOV Karlovy Vary

Přebytečný kal z dosazovacích nádrží se nejdříve částečně zahušťuje ve flotační nádrži, případně pomocí zahušťovací odstředivky. Spolu s kalem z usazovacích nádrží se pak čerpá do dvou metanizačních nádrží. Po provedení anaerobní stabilizace se stabilizovaný kal dále odvádí do homogenizačních nádrží, kde se promíchává ponorným míchadlem, aby vznikla stejnorodá směs. Do homogenizační nádrže se také čerpá kal z jímky dovážených kalů, kam se svážejí kaly z okolních menších čistíren odpadních vod, které nemají vlastní kalové hospodářství (www.vodakva.cz/cs/).

Z homogenizačních nádrží se kal dále čerpá do odvodňovací linky, kterou tvoří tři odstředivky a nízkoteplotní pásová sušárna kalů. Ještě před odvodněním se do kalu dávkuje roztok flokulantu, konkrétně je použit SOKOFLOK 56 GP, který usnadní oddělení kalové vody od kalu. Na odstředivkách se kal odvodní na 23 až 27 % sušiny a poté se dopraví do dávkovacího sila. Pod silem je umístěno čerpadlo, které vytlačí kal ve formě špaget na pás sušárny. Zde se v šesti komorách suší pomocí horkého vzduchu. Suchý granulát, o obsahu sušiny cca 90 %, je vyvážen z čistírny k dalšímu využití, a to na kompostárnu Činov, kterou provozuje firma AVE CZ, odpadové hospodářství s.r.o. (www.vodakva.cz/cs/). Vzhledem k tomuto využití se nám opět objevuje otázka již zmíněná v kapitole č. 4. 2., a to, zda má v tomto případě smysl kal pracně vysušet. Diskuze k této problematice je blíže popsána v kapitole č. 6.

5.3 Výstavba sušárny

Stabilizovaný a odvodněný kal se v České republice nejčastěji ukládá do kompostů a do rekultivačních vrstev na skládkách komunálního odpadu, tak tomu je také na ČOV v Karlových Varech. Toto řešení je však do budoucna neudržitelné, vzhledem k tomu, že česká legislativa v souladu s evropskou požaduje výrazně snížit objem organických materiálů

ukládáných na skládky. Z tohoto důvodu se vodohospodářské sdružení obcí západních Čech za technické podpory provozní společnosti Vodárny a kanalizace Kalovy Vary rozhodlo využít na své největší čistírně v Karlových Varech – Drahovicích technologii nízkoteplotního sušení kalů.

Zpracování projektových prací bylo zahájeno v roce 2012 studií, která řešila technologické možnosti sušení kalů ve vazbě na jejich reálnou aplikovatelnost v podmínkách karlovarské ČOV. Vzhledem k tomu, že na ČOV byla k dispozici kapacitní kotelna, včetně kogenerační jednotky zajišťující ohřev vyhřívajících nádrží, bylo rozhodnuto o využití tohoto zdroje tepla pro sušení kalů. Tím došlo k definování teploty sušícího procesu a k návrhu využití nízkoteplotního principu sušení kalů (Frček & Drechsler 2017). Výběrovým řízením byl pak vybrán dodavatel sušárny, španělská firma STC Aquatec. V rámci výstavby sušárny a jejího napojení na stávající technologii, bylo také nezbytné provést stavební a technologické úpravy, včetně výstavby nové haly pro sušárnu. Na základě výběrového řízení byla pro tyto práce vybrána Stavební společnost Hubert, s.r.o.

Stavební povolení pro zahájení výstavby sušárny bylo vystaveno Krajským úřadem Karlovy Vary, odborem životního prostředí a zemědělství dne 29. 6. 2015. Povolení pro stavbu se týkalo následujících objektů. Haly pro sušení kalu, která byla přistavěna ke stávající hale odstředivek, dále čerpací stanice odpadních vod, chladicí vody, biofiltru pro čištění vzduchu, manipulační plochy kalu, propojovacího potrubí a rozvodů, zpevnění plochy, teplovodu a úprav ve stávající kotelně. Rozměry haly jsou 33,1 x 13,3 m, výška fasády 9,36 m. Ostatní související objekty jsou buď přízemní nebo podzemní. Zahájení zkušebního provozu sušárny kalu bylo oznámeno ke dni 26. 6. 2016.



Obrázek č. 8 Fotografie z procesu stavby sušárny na ČOV v Karlových Varech
(www.stavbykarlovarska.cz)



Obrázek č. 9 Fotografie dokončené sušárny na ČOV v Kalových Varech
(www.stavbykarlovarska.cz)

5.4 Technické parametry sušárny

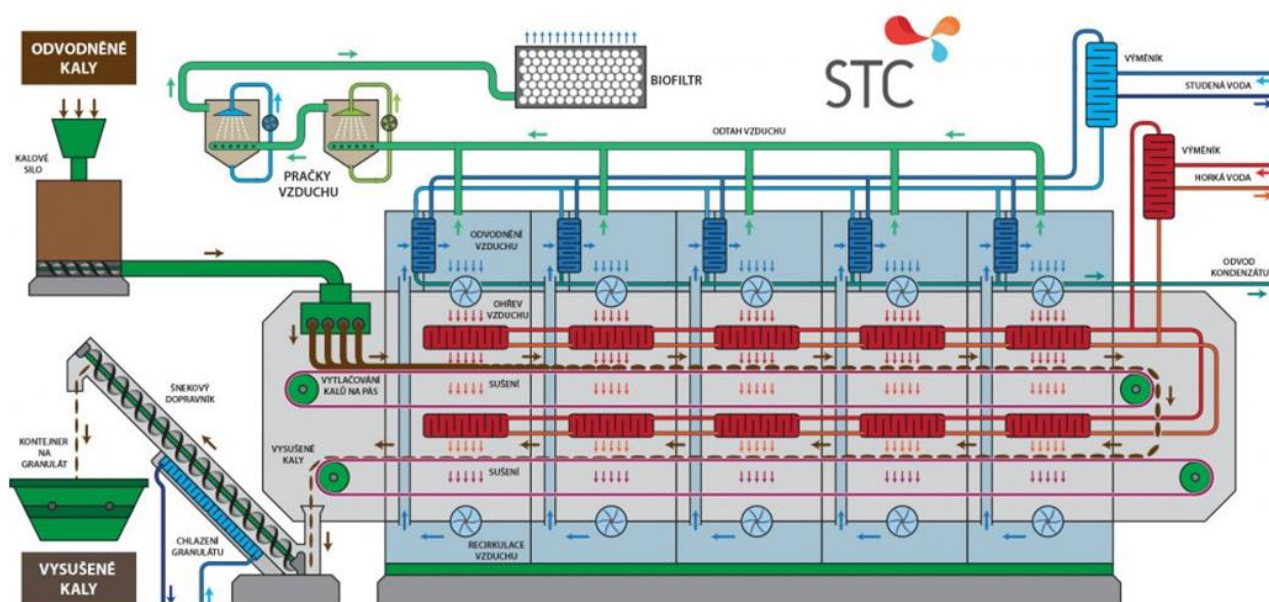
Projektované parametry sušení kalu jsou shrnuty v následující tabulce č. 5.

Tabulka č. 5 Projektované parametry sušení kalu (pozn. ouE = jednotka pro koncentraci prachových látek v ovzduší na m³) (Provozní řád vyjmenovaného stacionárního zdroje ovzduší Karlovy Vary 2016)

Kapacita (prostup odvodněného kalu sušárnou)	6 000 t/rok
Minimální provozní doba	8 000 h/rok
Minimální odpar vody	558 kg H ₂ O/h
Sušina výstupního kalu	> 90 % suš.
Spotřeba tepelné energie	< 0,90 kWh _{tep} ./kgH ₂ O
Spotřeba elektrické energie (celá linka)	< 0,14 kWh _{el} ./kgH ₂ O
Prašnost suchého kalu (vel. částic < 500 μm)	< 5 %
Teplota vysušeného kalu	< 40 °C
Sušící teplota	< 80 °C
Kvalita výstupního vzduchu	≤ 2 000 ouE/m ³

5.5 Princip technologie sušárny

Sušárna kalu z ČOV je konstruována a dimenzována pro 24 hodinový provoz při provozní době 8 000 hodin ročně a je tvořena konvektivní sušičkou / chladičem s jedním pásem. Dle výše zmíněného základního rozdělení jí lze zařadit mezi pásové sušárny.



Obrázek č. 10 Schéma technologie sušárny (www.vodakva.cz/cs/)

Jak můžeme vidět na schématu sušárny, odvodněný kal z ČOV se zavádí nejprve do dávkovacího sila kalu o objemu cca 25 m³. Sušení kalů probíhá na dvou posuvných páslech umístěných v sušičce nad sebou. Čerpadlem, instalovaným pod silem kalu, se kal z ČOV s cca 25 % sušiny přes granulovačí zařízení s automatickým čištěním matrice zavádí přímo do pásové sušičky ve formě tlustých provazců neboli špaget. Kal dále přechází do hlavního modulu, složeného z pěti sušících komor, kde dochází k samotnému procesu sušení. Horní pás s kalem se postupně posouvá přes jednotlivé komory. Na konci hlavního modulu je přiřazen návratový modul. Zde se kal z horního pásu přesype na spodní pás, kterým se vrací zpět do řídicího modulu přes jednotlivé sušící komory, kde dochází postupně k jeho finálnímu dosušení. V sušárně se pomocí ventilátorů cirkulačního vzduchu dosahuje optimálního proudění skrz vrstvu produktu v příslušné sušící komoře a sušení je prováděno při 80 °C. Do sušících komor se rozvádí horký vzduch pomocí tepelných výměníků. Zdrojem tepla pro ohřev vody do výměníků jsou dva plynové kotle, které doplňkově také využívají jako palivo bioplyn produkovaný při vyhřívání kalů. Poslední sušící komora slouží k chlazení produktu, zde se nasává čerstvý vzduch, resp. vzduch z okolního prostředí. Vysušený kal je poté odebírán ze spodní části řídicího modulu a šnekovým vodou chlazeným dopravníkem je expedován do kontejnerů a vyvážen na kompostárnu Činov.

Důležitá je také cirkulace vzduchu v sušárně. Sušička funguje jako uzavřený vzduchový okruh. Je však nezbytná určitá míra odvádění vzduchu, aby se předešlo hromadění látek, které se při procesu sušení odpařují, ale následně nekondenzují. Okruh pro odvod vzduchu také v sušičce udržuje mírný podtlak, aby nedocházelo k únikům plynu ze sušičky do okolního prostředí.

Cirkulace tedy funguje tak, že vzduch v komorách se nasýtí vypařenou vodou z kalu a poté proudí k vodním chladičům, kde se zchladí a voda zkondenzuje. Tento kondenzát je

odveden mimo sušičku a dále se vrací do technologického procesu čistírny. Odsátý vzduch ze sušičky obsahuje znečištění, které není kondenzovatelné, a proto se musí na kyselé pračce zneutralizovat a na vodní pračce dočistit. Tyto pračky jsou čističe, které fungují jako sprchy a neustále proud vzduchu ostříkují vodou. V chemickém čističi je kyselina, která reaguje se čpavkem ve vzduchu a dojde tedy k zneutralizování za tvorby solí a vody. Ve vodním čističi se vzduch očistí od zbytků kyseliny a zcela zvlhčený následně putuje do biofiltru (www.vsozc.cz/).

Biofiltr pracuje na bázi biologického procesu. Biomasa v biofiltru je vrstva rostlinné vlákniny, ve které žijí některé mikroorganismy a bakterie. Živí se rozkladem nekondenzovatelných chemických látek, které se odvádějí ze sušičky a které se rovnoměrně profukují skrze biomasu. Tímto procesem je odstraňován ze vzduchu zápach. Systém je velmi účinný, 95 – 98 %, pokud jsou dodrženy správné podmínky, co se týče teploty, vlhkosti a kyselosti, které potřebuje biomasa, aby prospívala.

Čištění vzduchu je také zajištěno ve skladu vysušeného kalu, kde je instalován podtlakový ventilační systém se separací prachových částic (www.vsozc.cz/).

6 Vyhodnocení provozu sušárny v Karlových Varech

Tato závěrečná kapitola bude zaměřena na vyhodnocení provozu sušárny na základě výsledků rozborů, které byly provedeny v posledních čtyřech letech 2017 - 2020. Rozbory kalů jsou prováděny v laboratoři úpravný vody v Březové u Karlových Varů.

6.1 Stanovení celkového obsahu sušiny vysušeného kalu

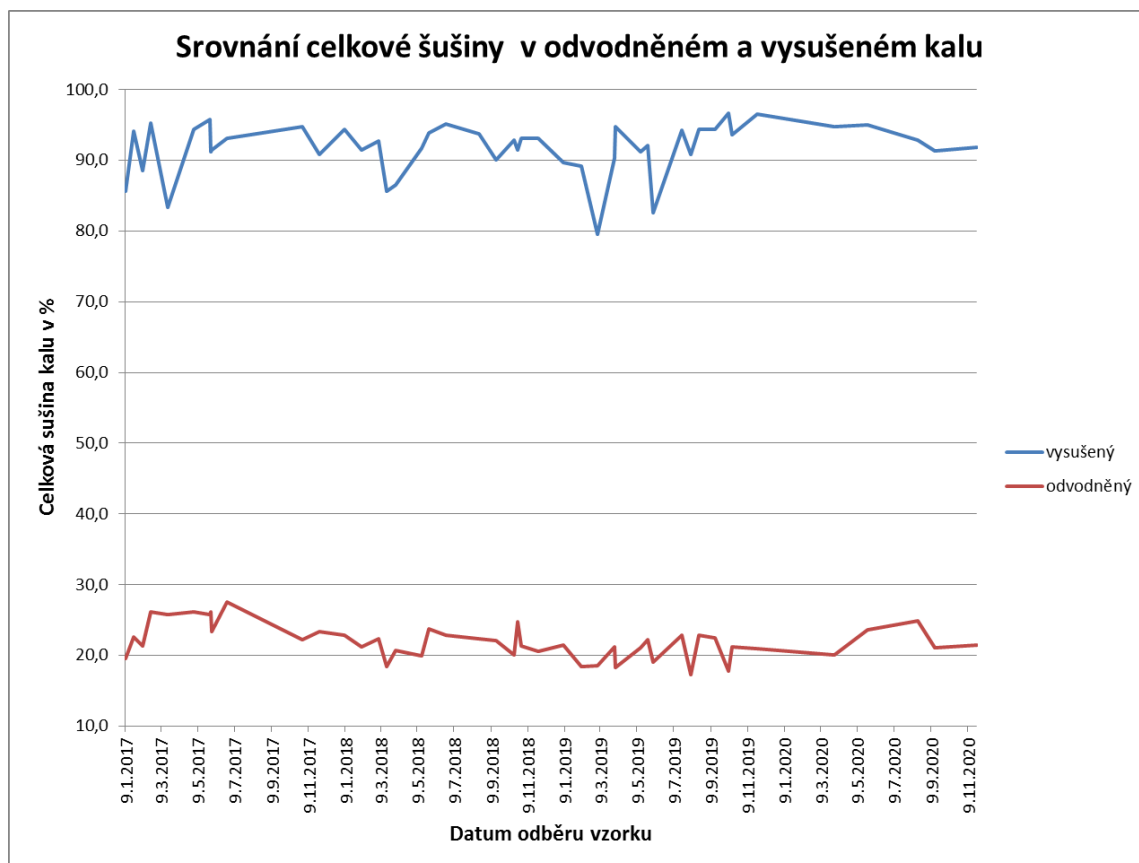
Jedná se o hlavní a nejdůležitější parametr při sledování správné funkce sušárny. Projektovaná sušina výstupního kalu garantuje hodnoty > 90 % sušiny. V tabulce č. 6 jsou uvedeny hodnoty celkové sušiny. Tento parametr sleduje provozovatel sušárny cca 1x za 14 dní a z uvedených hodnot vidíme, že garance minimálních 90 % sušiny je povětšinou dosahována. K největšímu výkyvu došlo v období 03 – 05/2018 a 01 – 03/2019. Podle získaných informací od provozovatele se v tomto období testovala možnost sušit kal na nižší sušinu při vyšším průtoku kalu. Zvýšila by se tím kapacita sušárny, a pokud by se dále kal nespaloval, tak by nižší sušina nevadila. Snaha byla dostat se na výstupní sušinu 70 %. Nicméně, tento postup provozu nakonec nepovolil dodavatel sušárny kvůli zárukám a případným reklamacím. Proto od toho provozovatel nakonec ustoupil.

Tabulka č. 6 Zjištěné procentuální hodnoty podílu sušiny v kalu ze vzorků odebraných na ČOV v Karlových Varech. Červeně jsou označeny hodnoty, kde nebylo dosaženo požadované minimum 90 % sušiny.

Datum odběru	Sušina celková (%)	Datum odběru	Sušina celková (%)	Datum odběru	Sušina celková (%)	Datum odběru	Sušina celková (%)
03.01.2017	89,8	08.01.2018	94,4	21.01.2019	94,8	20.01.2020	91,9
09.01.2017	85,6	22.01.2018	90,5	07.01.2019	89,7	03.02.2020	93,1
23.01.2017	94,1	05.02.2018	91,4	05.02.2019	89,2	17.02.2020	94,9
07.02.2017	88,6	19.02.2018	90,1	18.02.2019	91,4	16.03.2020	93,9
20.02.2017	95,3	05.03.2018	92,7	28.02.2019	87,5	31.03.2020	94,8
07.03.2017	93	19.03.2018	85,6	04.03.2019	79,6	14.04.2020	93,6
20.03.2017	83,4	03.04.2018	86,5	02.04.2019	90,3	27.04.2020	91,6
03.04.2017	94,4	17.04.2018	80,8	03.04.2019	94,7	13.05.2020	94,9
18.04.2017	95,9	04.05.2018	78,3	03.04.2019	94,9	25.05.2020	95
02.05.2017	94,4	16.05.2018	91,7	16.04.2019	95,6	22.06.2020	92,4
29.05.2017	95,8	28.05.2018	93,9	15.05.2019	91,2	09.07.2020	96,4
31.05.2017	91,2	11.06.2018	94	27.05.2019	92,1	08.06.2020	92,8
01.06.2017	91,5	25.06.2018	95,1	04.06.2019	82,6	17.08.2020	92,9
15.06.2017	95,1	12.07.2018	95,8	24.06.2019	96	03.09.2020	87,6
26.06.2017	93,1	06.08.2018	93,9	11.07.2019	95,2	14.09.2020	91,3
23.06.2017	90,1	20.08.2018	93,7	22.07.2019	94,3	30.09.2020	86,9
13.07.2017	94,1	06.09.2018	94	06.08.2019	90,8	12.10.2020	92,7
07.09.2017	90,7	17.09.2018	90,1	19.08.2019	94,4	20.10.2020	94,6
04.10.2017	97	17.10.2018	92,9	05.09.2019	96,7	23.11.2020	91,9
18.09.2017	95,6	22.10.2018	91,5	16.09.2019	94,4	10.11.2020	96
16.10.2017	94,3	08.11.2018	88,7	02.10.2019	93,4	07.12.2020	93
30.10.2017	94,8	29.10.2018	93,1	08.10.2019	96,6		
13.11.2017	86,5	26.11.2018	93,1	14.10.2019	93,6		
27.11.2017	90,8	10.12.2018	90,9	12.11.2019	94,9		
11.12.2017	92,8	12.12.2018	82,6	25.11.2019	96,5		
				09.12.2019	96,1		

6.1.1 Porovnání obsahu sušiny ve vysušeném a odvodněném kalu

Obsah sušiny v odvodněném kalu se za sledované období pohybuje v rozmezí 17,3 - 27,5 %, u vysušeného kalu je rozptyl hodnot 79,6 - 96,6 %. U vysušeného kalu byla zjištěna větší rozkolísanost výsledné sušiny, což bylo způsobeno provozními zkouškami (viz. Kapitola 6. 1.) (Obr. č. 11).



Obrázek č. 11 Porovnání celkového obsahu šušiny ve vysušeném a odvodněném kalu z ČOV Karlovy Vary

Vizuální rozdíl vysušeného a odvodněného kalu můžeme vidět na obrázku č. 12 a 13. Na první pohled je zřejmé, že výsledný granulát vysušeného kalu má zcela rozdílnou strukturu, díky které se s ním lépe manipuluje.



Obrázek č. 12 Odvodněný kal z ČOV v Karlových Varech (Foto: A. Josefíková, 11/2020)



Obrázek č. 13 Vysušený kal z ČOV v Karlových Varech (Foto: A. Josefíková, 11/2020)

Na obrázku č. 14 dále můžeme vidět porovnání objemu odvodněného a vysušeného kalu. V odměrce č. 1 je 1 kg odvodněného kalu, který po vysušení představuje 250 g vysušeného kalu, který vidíme v odměrce č. 2. Hmotnost kalu se vysušením snížila o 75 %. 1 kg odvodněného kalu představuje cca 1 000 ml, po vysušení tohoto množství se sníží objem na cca 600 ml, což činí snížení objemu o cca 40 %.



Obrázek č. 14 Porovnání hmotnosti a objemu odvodněného a vysušeného kalu (Foto: A. Josefíková, 3/2021)

6.2 Stanovení rizikových prvků

Jak již bylo v této práci zmíněno, velmi důležitým ukazatelem kvality kalu je obsah rizikových prvků. Tyto prvky se řadí mezi rizikové pro svůj negativní dopad na životní prostředí a lidské zdraví, proto vyhláška č. 437/2016 Sb. stanovuje limitní kritéria pro použití čistírenského kalu v zemědělství, kde by se prvky mohly dostat jednak do půdy a potažmo kontaminovat potraviny.

V tabulce č. 7 jsou uvedeny obsahy rizikových prvků zjištěné u vzorků sušeného kalu z ČOV v Karlových Varech. Při porovnání s limitními hodnotami, které stanovuje vyhláška, vidíme, že jsou překročeny limitní hodnoty pro arsen a olovo. Limitní hodnoty pro vyhlášku č. 437/2016 jsou uvedeny v kapitole č. 3.5.

Tabulka č. 7 Výsledky rozborů vysušeného kalu z ČOV v Karlových Varech. Červeně jsou označeny hodnoty, které překračují limitní hodnoty stanovené legislativou. Všechny hodnoty jsou v mg/kg.

Datum odběru	Arsen	Berylium	Kadmium	Kobalt	Chrom celkový	Měď'	Rtut'	Nikl	Olovo	Vanad	Zinek
02.05.2017	62,6	16,1	1,72	5,83	27,5	191	1,31	26,4	36,5	22,9	758
23.06.2017	17,0	2,24	1,64	6,05	31,9	160	1,10	28,0	33,1	20,8	699
30.10.2017	20,9	2,46	3,87	7,30	28,4	140	2,78	30,7	33,5	20,4	934
05.02.2018	13,3	2,48	1,32	6,52	19,5	100	0,72	18,1	34,4	21,8	556
04.05.2018	15,7	1,45	1,49	3,22	25,4	127	1,25	24,5	29,0	20,2	747
17.09.2018	87,4	14,4	1,56	5,72	31,9	216	1,89	26,4	40,9	26,5	966
22.10.2018	14,4	2,76	1,26	8,09	25,3	147	1,10	26,6	325,0	21,3	799
08.11.2018	16,0	2,76	1,23	6,82	26,9	138	1,37	25,0	59,4	22,2	762
05.02.2019	126	9,28	1,43	3,51	27,3	163	1,17	23,2	31,9	21,9	809
03.04.2019	119	12,6	1,26	5,21	32,4	200	1,09	28,0	104,0	32,7	887
04.06.2019	43,7	10,6	1,05	4,14	68,9	145	1,20	40,8	32,5	25,8	784
06.08.2019	38,7	5,56	4,48	5,01	101	246	0,85	56,0	50,1	19,8	924
08.10.2019	20,0	1,54	1,32	6,16	28,9	152	1,17	24,4	32,5	20,7	802
03.02.2020	39,3	7,05	1,50	6,39	68,9	201	1,32	41,5	40,7	24,4	947
22.06.2020	12,1	1,39	1,36	3,77	23,0	184	1,26	23,4	23,7	17,9	772
20.10.2020	41,5	7,04	2,70	5,96	32,4	190	0,98	33,3	39,4	24,1	818

Dle vyhlášky je limitní hodnota pro arsen stanovena na 30 mg/kg. Zde je hodnota překračována poměrně na pravidelné bázi, v roce 2019 dokonce až o 96 mg/kg. Z celkového počtu 16 odebraných vzorků byla limitní hodnota překročena celkem 7x. Dále je překročena limitní hodnota u olova, která je vyhláškou stanovena na 200 mg/kg, a to pouze u jednoho vzorku z listopadu roku 2018.

Překročená jedna limitní hodnota u olova je pravděpodobně ojedinělý výkyv, je možné, že se jedná i o statistickou (pravděpodobně laboratorní) chybu.

Obsah arsenu v odpadních vodách v Karlových Varech je velký problém. Arsen je součástí léčivých pramenů, které využívají lázeňské domy jako koupele. Tato voda je pak odváděna společně s běžnými splaškovými vodami na ČOV. Proto u tohoto parametru dochází k častému překročení limitních hodnot.

Ostatní hodnoty naměřené u zbylých rizikových prvků splňují stanovené limity.

Vzhledem k tomu, že vysušený kal je z karlovarské ČOV k dalšímu zpracování vyvážen na kompostárnu Činov, nevádí pravidelně zvýšené hodnoty arsenu. A to z toho důvodu, že kal je zde používán pouze jako jedna z více složek kompostu. Výsledný kompost tak splňuje požadavky na kvalitu a navíc je vše smluvně ošetřeno. Kompostárna by mohla vysušený kal odmítnout od čistírny převzít ve chvíli, kdy by jí používání kalu jakožto suroviny pro výrobu kompostu zhoršovalo vlastnosti výsledného kompostu. Pokud by provozovatel ČOV chtěl najít uplatnění pro vysušený kal na zemědělské půdě, dle vyhlášky by to nebylo možné, právě

z toho důvodu, že není splněn požadovaný limit stanovený pro arsen. Kompostování však také podléhá legislativě a ve znění zákona o hnojivech je kompost považován za hnojivo se všemi právními důsledky (Souček 2012). Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 271/2009 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva udává nejvyšší přípustné hodnoty rizikových látek v kompostech, které můžeme vidět zde v tabulce č. 8.

Tabulka č. 8 Limitní koncentrace vybraných rizikových prvků pro komposty dle vyhlášky MZ č. 271/2009 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva

Sledované látky	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Nejvyšší přípustné množství sledované látky v mg v 1 kg vysušeného vzorku suroviny	20	2	100	150	1	50	100	600

Pokud tyto limity porovnáme s limitními hodnotami, které jsou stanoveny pro použití čistírenského kalu do zemědělství v již několikrát zmiňované vyhlášce č. 437/2016 Sb., vidíme, že limity rizikových prvků pro výsledný kompost jsou ještě přísnější.

Dále je nutné zmínit vliv čistírenského kalu na celý proces kompostování. Pro to, aby proces správně fungoval, je třeba splnění základních požadavků, jako je například optimální složení směsi, především obsah dusíku a uhlíku. Poměr C:N u kalů z ČOV běžně dosahuje 6-16:1, což je pro kompostování nevyhovující, protože v čerstvém kompostu je nutný poměr 30-35:1. Tento nedostatek se však dá snadno vyřešit, a to tím, že se kal před zahájením procesu kompostování doplní o látky s vysokým poměrem C:N, jako je například drcená stromová kůra či dřevní štěpka. Dalším velmi důležitým požadavkem je vlhkost kompostu. Je nutné si uvědomit, že kal z ČOV lze brát pouze jako jednu ze složek kompostovací směsi (Souček 2012). Požadavek je takový, že kal musí být odvodněn pro kompostování na 18 – 30 % sušiny. V kapitole o odvodňování kalu je zmiňováno, že výsledkem procesu odvodnění může být kal o obsahu sušiny 20 – 30 %. Kal je tedy v karlovarské čistírně nejprve vysušen v sušárně a poté je odvezen k dalšímu zpracování na kompostárnu, která však obsah sušiny pohybující se až okolo 90 % vůbec nevyžaduje. Toto se jeví jako problém, který na karlovarské ČOV vznikl, a to ten, že zde, bohužel, není využit potenciál výsledného granulátu po sušení.

V České republice je v provozu další sušárna, a to na čistírně odpadních vod Brno Modřice. Zde se odvodněný kal o koncentraci sušiny 25 % buď odváží na kompostárnu nebo je čerpán do sušárny, kde se vyprodukuje kal o sušině cca 92 % (www.bvk.cz/). Důvodem pro zpracování čistírenského kalu v ČOV Modřice metodou sušení je dodávání takto vysušeného kalu do technologie výroby cementu. Spalováním vysušeného kalu se získává část energie pro značně energeticky náročnou technologii výroby cementu (Sirový 2011). Takto nastavený systém využití se vzhledem k zjištěným a výše zmíněným skutečnostem jeví jako mnohem lépe nastavený, než je tomu na karlovarské ČOV.

6.2.1 Porovnání stanovení rizikových prvků ve vysušeném a odvodněném kalu

V tabulce č. 9 je provedeno porovnání obsahu rizikových prvků ve vysušeném a odvodněném kalu. Pro toto srovnání byly vybrány vzorky vysušeného a odvodněného kalu, které byly odebrány ve stejný den.

Tabulka č. 9 Porovnání stanovení rizikových prvků ve vysušeném a odvodněném kalu. Všechny uvedené hodnoty jsou v mg/kg sušiny vzorku

Datum odběru	Materiál	Arsen	Berylium	Kadmium	Kobalt	Chrom celkový	Měď	Rtuť	Olovo	Vanad	Zinek
02.05.2017	odvodněný	17,1	4,43	1,37	4,67	21,4	111	0,76	31,6	18,2	514
02.05.2017	vysušený	62,6	16,1	1,72	5,83	27,5	191	1,31	36,5	22,9	758
30.10.2017	odvodněný	37,3	8,04	2,53	7,89	29,6	164	2,13	41,7	23,0	1430
30.10.2017	vysušený	20,9	2,46	3,87	7,30	28,4	140	2,78	33,5	20,4	934
05.02.2018	odvodněný	60,8	2,09	3,56	5,10	18,9	130	0,90	37,6	21,1	668
05.02.2018	vysušený	13,3	2,48	1,32	6,52	19,5	100	0,72	34,4	21,8	556
17.09.2018	odvodněný	89,6	14,5	1,53	5,83	31,9	218	1,93	41,0	27,2	937
17.09.2018	vysušený	87,4	14,4	1,56	5,72	31,9	216	1,89	40,9	26,5	966
22.10.2018	odvodněný	18,7	2,93	1,44	8,23	21,1	110	0,79	34,2	16,8	604
22.10.2018	vysušený	14,4	2,76	1,26	8,09	25,3	147	1,10	325,0	21,3	799
05.02.2019	odvodněný	105	7,38	1,56	3,83	28,2	162	1,14	34,8	25,3	789
05.02.2019	vysušený	126	9,28	1,43	3,51	27,3	163	1,17	31,9	21,9	809
03.04.2019	odvodněný	63,3	5,58	0,90	5,80	31,6	181	0,77	187,0	37,0	865
03.04.2019	vysušený	119	12,6	1,26	5,21	32,4	200	1,09	104,0	32,7	887
04.06.2019	odvodněný	34,5	6,72	0,71	3,72	69,0	104	1,04	30,1	24,4	702
04.06.2019	vysušený	43,7	10,6	1,05	4,14	68,9	145	1,20	32,5	25,8	784
06.08.2019	odvodněný	21,7	1,18	6,04	5,21	118	320	0,66	59,2	18,8	994
06.08.2019	vysušený	38,7	5,56	4,48	5,01	101	246	0,85	50,1	19,8	924
08.10.2019	odvodněný	23,8	2,06	1,48	4,86	29,3	177	1,28	36,1	21,8	893
08.10.2019	vysušený	20,0	1,54	1,32	6,16	28,9	152	1,17	32,5	20,7	802

Jak je z výsledných hodnot vidět, sušení není nástrojem pro odstraňování rizikových prvků a mezi výsledky vysušeného a odvodněného kalu není žádná souvislost. V některém případě jsou nižší koncentrace ve vysušeném kalu a některých zase naopak v odvodněném kalu. I když byly vzorky odebrány ve stejný den, tak vzhledem k době zdržení kalu v procesu odvodnění a následného sušení, která činí v průměru 8 – 10 hodin, je prakticky ve stejný čas odebrán vzorek jiného materiálu.

6.2.2 Porovnání stanovení rizikových prvků s ČOV Brno - Modřice

V tabulce č. 10 je uvedeno srovnání výsledků stanovených rizikových prvků pro vzorky vysušeného kalu ze sušárny provozované na čistírně odpadních vod Brno – Modřice s výsledky ze sušárny v Karlových Varech. V tabulce je uveden vždy zjištěný průměr pro daný prvek za rok 2019 a za rok 2020 v mg/kg sušiny.

Tabulka č. 10 Porovnání průměrných hodnot rizikových prvků v mg/kg sušiny vzorku (naměřené hodnoty byly poskytnuty od provozovatele ČOV Modřice a od provozovatele ČOV Karlovy Vary)

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
KV 2019	69,48	1,908	4,806	51,7	181,2	1,096	34,48	50,2	24,18	841,2
Brno 2019	1,19	0,795	4,95	116	206	1,56	44,5	17,8	16,7	868
KV 2020	30,97	1,85	5,37	41,43	191,67	1,19	32,73	34,6	22,13	845,67
Brno 2020	0,83	0,575	5,98	80	220	1,46	29,3	18	18,7	871

Z uvedených hodnot vyplývá, že zvýšené množství arsenu v Karlových Varech je opravdu ojedinělé. Na brněnské ČOV se průměrné množství zjištěného arsenu v kalu ani v nejmenším nepřibližuje povolenému limitu 30 mg/kg stanovenému vyhláškou č. 437. To tedy potvrzuje výše uvedenou informaci, že arsen je v Karlových Varech problematickým prvkem, zejména kvůli lázeňství. Výsledky zbylých hodnot jsou až na menší odchylky srovnatelné.

6.3 Výhřevnost vysušeného kalu

V roce 2018 byla provedena analýza výhřevnosti vysušeného kalu. Pro tuto analýzu bylo použito celkem 9 vzorků. Výsledky analýzy jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce č. 11.

Tabulka č. 11 Analýza výhřevnosti vysušeného kalu

vlastnost, veličina	jednotka	číslo vzorku									min.	max.	průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
vlhkost, W	% hm.	5,7	7,4	11,6	7,5	12,0	11,2	9,8	9,2	7,9	5,7	12,0	9,2
spalné teplo, Q_s^d	MJ.kg ⁻¹	12,6	11,6	14,2	12,9	13,0	13,5	13,2	13,5	13,6	11,6	14,2	13,1
výhřevnost, Q_v^d	MJ.kg ⁻¹	11,7	10,7	13,1	12,0	12,0	12,5	12,3	12,6	12,6	10,7	13,1	12,2
sypká hmotnost	g.dm ⁻³	354	364	338	369	411	429	429	391	426	338	429	390

Průměrná hodnota výhřevnosti zjištěná z analyzovaných vzorků je 12,2 MJ/kg, což odpovídá výhřevnosti méně kvalitního hnědého energetického uhlí. Pro porovnání výhřevnosti je možno uvést hodnotu naměřenou u vysušeného kalu na čistírně odpadních vod Brno – Modřice pro rok 2020, a to 11,8 MJ/kg, tato informace byla poskytnuta přímo provozovatelem. A dále výsledek zjištěné průměrné výhřevnosti z provedené experimentální studie v Polsku, a to 12,574 MJ/kg (Kijo – Kleczkowska et al. 2015). V kapitole č. 4.2.1. o spalování je uvedeno, že výhřevnost vysušeného anaerobně stabilizovaného kalu se pohybuje v rozmezí 9 – 12 MJ/kg (Pohořelý et al. 2015) a také, že nutná výhřevnost pro spalitelnost činí 7 MJ/kg (Kutil & Dohányos 2005). Tyto požadavky vysušený kal z Karlových Varů splňuje a zároveň obstál i v porovnání s výsledky z jiných sušáren.

Zajímavá je průměrná hodnota sypké hmotnosti, která činí 390 g/dm^3 . Pro názornost lze tuto vlastnost vysvětlit tak, že když nasypeme do válce o obsahu 1 l vysušený kal, bude toto množství vážit v průměru pouze 390 g, zatímco voda by vážila 1 000 g. Je to dáno hlavně typem výsledného produktu, kdy se jedná o malé, drobné válečky ne zcela pravidelného tvaru.

7 Závěr

Otázka, jak správně nakládat s kalem, je v současné době problémem pro mnohé země z celého světa. Kal obsahuje cenné živiny, jako je dusík, fosfor a další látky, či biologicky rozložitelnou organickou hmotu a z tohoto pohledu by mohl být ideálním hnojivem. Řešení tohoto problému však není tak jednoduché, jak se na první pohled může zdát. Možnosti, jak s kalem nakládat, komplikuje především současná legislativa stanovenými limity pro obsah rizikových prvků. Dále je ale také nutné brát v potaz riziko spojené s dalšími kontaminanty, kterými mohou být organické polutanty a různé druhy léčiv. Sledování obsahu těchto látek v kalu sice není podmíněno legislativou, ale hrozba spojená s léčivými, především antibiotiky, byla prokázána, a proto je nutné si tento fakt při případné aplikaci kalu na půdu plně uvědomovat. Mezi další důležité poznatky je třeba také zařadit ekonomickou stránku této problematiky. Zpracování kalu výrazně zasahuje do nákladů na provoz celé čistírny odpadních vod. Poplatky za ukládání kalu na skládku se budou v průběhu budoucích let neustále zvyšovat, a tím by rostly i celkové náklady na provoz čistírny.

Na základě těchto a dalších zjištěných informací je sušárna určitě vhodným způsobem, kterým lze na ČOV tuto situaci řešit. Nevýhodou je velká počáteční investice, tu však mohou vyvážit získané benefity a ušetřené finance v budoucnosti. Z tohoto hlediska je ale důležité zajistit pro výsledný granulát ze sušení adekvátní možnost zpracování, což se na karlovarské čistírně zatím nepodařilo.

Hlavním důvodem výstavby sušárny v Karlových Varech bylo docílit hygienické nezávadnosti kalu a celkově snížit jeho hmotnost. Toto je určitě plněno. K hygienizaci dochází vlivem vysokých teplot při procesu sušení, ke snížování hmotnosti v důsledku odstranění velkého podílu vody dochází také. Dále z výsledků provozu sušárny v Karlových Varech vyplývá, že proces sušení jako takový funguje optimálně. Výsledný produkt splňuje požadovanou hodnotu pro výhřevnost i pro obsah sušiny, aby mohl být spalován či zpracován v procesu pyrolýzy. Sušárna tak skutečně otevírá nové možnosti pro zpracování kalu. V Karlových Varech však odběratel toho typu není a z tohoto důvodu je kal odvážen na kompostárnu, pro jejíž účely by ale nemusel být vůbec sušen. Kompostárny však vyžadují hygienizaci kalu při jeho uložení, tento požadavek tedy provozovatel ČOV plní. Je ovšem jasné, že energetický potenciál produktu není využit a vyvstává otázka, zda zařazení sušárny do provozu ČOV v Karlových Varech bylo vhodné řešení. Určitě to bylo vhodné z hlediska zaručení již zmíněné hygienizace, která je tolik důležitá z hlediska legislativy. Pro využití energetického potenciálu není ale současný systém zpracování kalu patrně nastaven úplně ideálně. Mnohem lepší řešení z hlediska celkové efektivity a ekonomické stránky věci by mohlo spočívat ve spojení sušárny se spalovnou, kdy se jednak vysušenému kalu dostane požadovaného zpracování a za druhé lze energii získanou spalováním využít pro provoz sušárny. Toto spojení se nyní například realizuje na ČOV Náchod, ovšem obdobně by se o tomto řešení mohlo uvažovat v budoucnu i v Karlových Varech. Vybudování spalovny je samozřejmě značně nákladné. Investice by se ale mohla provozovateli v průběhu budoucích

let vrátit, a to díky ušetřeným nákladům na provozu sušárny. Otázkou však zůstává, zda by realizace stavby spalovny čistírenského kalu byla v lázeňském městě vůbec proveditelná.

Literární rešerše předložené bakalářské práce shrnuje známá fakta i nejnovější poznatky týkající se zpracování kalů i sušení. Při vyhodnocení provozu se podařilo získat přesné výsledky o účinnosti sušení v konkrétním provozu a zároveň ale také odhalit nedostatky v celkové efektivitě ohledně zařazení sušárny do provozu ČOV Karlovy Vary.

8 Seznam literatury

Ameri B., Hanini S., Boumahdi M. 2020. Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge. *Renewable Energy* (e147) DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.072.

Barancheshme F., Munir M. 2018. Strategies to Combat Antibiotic Resistance in the Wastewater Treatment Plants, *Frontiers in Microbiology* (e8) DOI: 10.3389/fmicb.2017.02603.

Bábíček R., et al. 2018. Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. Medim, spol s.r.o., Libeznice.

Ben W., Wang J., Cao R., Yang M., Zhang Y., Qiang Z. 2017. Distribution of antibiotic resistance in the effluents of ten municipal wastewater treatment plants in China and the effect of treatment processes. *Chemosphere* (e172) DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.041.

Bindzar Jan et al. 2009. Základy úpravy a čištění odpadních vod. VŠCHT, Praha.

Brněnské vodárny a kanalizace, a. s. 2005. Brněnské vodárny a kanalizace. Brněnské vodárny a kanalizace, a. s, Brno. Available from <https://www.bvk.cz/> (accessed únor 2021).

Brožová K. 2018. Využití čistírenských kalů na zemědělské půdě s ohledem na změnu legislativy [BSc. Thesis]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava.

Bueno R. de F. 2020. Coposition, Production, and Treatment of sewage sludge. *Sustainable Sewage Sludge Management and Resource Efficiency* (e1) DOI: 10.5772/intechopen.91665.

Cronje G. L., Beeharry A. O., Ekama G. A. Wentzel M. C. 2002. Active biomass in activated sludge mixed liquor (e36). *Water Research*. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00226-3.

Cui Q., Liu H., Yang H., Lu Y., Chen Z., Hu H. 2020. Bacterial removal performance and community changes during advanced treatment process: A case study at a full-scale water reclamation plant. *Science of The Total Environment* (e705) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135811.

Český statistický úřad. 2020. Český statistický úřad. Český statistický úřad, Praha. Available from <http://czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2019> (accessed leden 2021).

Dohányos M., Kutil J. 2005. CZ Biom. České sdružení pro biomasu, z.s. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu> (accessed prosinec 2020).

Dohányos M. 2006. CZ Biom. České sdružení pro biomasu, z.s. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu> (accessed prosinec 2020).

Eid M. E., Alamri A. M. S., Shaltout H. K., Galal M. T., Ahmed T. M., Brima I. E., Sewelam N. 2020. A sustainable food security approach: Controlled land application of sewage sludge recirculates nutrients to agricultural soils and enhances crop productivity. *Food and Energy Security* (e9) DOI: 10.1002/fes3.197.

Frček Z., Drechsler J. 2017. Sušení kalů na ČOV Karlovy Vary, Drahovice. *Slovak* 26:7-11.

Hao X., Chen Q., Loosdrecht M. C. M., Lia J., Jiang H. 2020. Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion. *Water Research* (e170) DOI: 10.1016/j.watres.2019.115298 0043-1354.

Hartig K. 2014. Čištění odpadních vod a stabilizace kalů s ohledem na spotřebu a produkci energie. 55-62 in *Tribun EU editor. Sborník přednášek a posterů z 26. konference KALY A ODPADY 2014.* Tribun EU s. r. o., Brno.

Hartig K. 2017. Problematika kalového hospodářství – sušení kalů. *Vodní hospodářství* 67:3-7.

Hejlová R. 2006. Hodnocení toxického a genotoxického potenciálu kalů z čistíren odpadních vod [MSc. Thesis]. Masarykova univerzita v Brně, Brno.

Hlavínek P., Mičín J., Prax P. 2001. Příručka stokování a čištění. NOEL, Brno.

Hošková H. 2016. Analýza výstavby čistírny odpadních vod v obci do dvou tisíc ekvivalentních obyvatel [BSc. Thesis]. České vysoké učení technické v Praze, Praha.

Jia, Y., Hu, Z., Ba, Y. 2021. Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* (e8) DOI: 10.1186/s40538-020-00205-4.

Kelessidis A., Stasinakis A. S. 2012. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management* (e32) DOI: 10.1016/j.wasman.2012.01.012.

Kijo-Kleczkowska A., Środa K., Kosowska-Golachowska M., Musiał T., Wolski K. 2015. Mechanisms and kinetics of granulated sewage sludge combustion. *Waste Management* (e46) DOI: 10.1016/j.wasman.2015.08.015.

Kocbek E., Garcia A. H., Hooijmans M. Ch., Mijatović I., Lah B., Brdjanovic D. 2020. Microwave treatment of municipal sewage sludge: Evaluation of the drying performance and energy demand of a pilot-scale microwave drying system. *Science of The Total Environment* (e742) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140541.

Kodešová R., Klement A., Golovko O., Fér M., Kočárek M., Nikodem A., Grabic R. 2019. Soil influences on uptake and transfer of pharmaceuticals from sewage sludge amended soils to spinach. *Journal of Environmental Management* (e250) DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109407.

Kos M., Zwettler O. 2018. Solární sušení kalu – klasická technologie v moderním provedení. *Sovak* 10:8-11.

Krajský úřad Karlovarského kraje, odbor životního prostředí a zemědělství. 2016. Kolaudační souhlas s užíváním stavby. Karlovy Vary. 3339/ZZ/16.

Mininni G., Blanch A. R., Lucena F. 2015. EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environmental Science and Pollution Research Res* (e22) DOI: 10.1007/s11356-014-3132-0.

Mininni G., Mauro E., Piccioli B., Colarullo G., Brandolini F., Giacomelli P. 2019. Production and characteristics of sewage sludge in Italy. *Water Science and Technology* (e79) DOI: 10.2166/wst.2019.064.

Ministerstvo zemědělství. 2009. Vyhláška, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů. Praha. 271.

Ministerstvo životního prostředí. 2016. Vyhláška o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady). Praha. 437.

Nakatsuka N., Kishita Y., Kurafuchi T., Akamatsu F. 2020. Integrating wastewater treatment and incineration plants for energy-efficient urban biomass utilization: A life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production* (e243) DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118448.

Nielsen R. V., Jensen M., Duus S. Ch. A., Christensen M. L. 2019. Critical moisture point of sludge and its link to vapour sorption and dewatering. *Chemosphere* (e236) DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.07.030.

Parlament České republiky. 2020. Zákon o odpadech. Praha. 541.

Pohořelý M. et. al. 2015. Třetí ruka. České ekologické manažerské centrum. Available from <https://www.tretiruka.cz/konference/archiv-tvip-2015/> (accessed říjen 2020).

Pohořelý M., Moško J., Hušek M. 2020. Spalování stabilizovaného čistírenského kalu. 32 – 36 in Bodík I., Hutňan M., Szabová P., editors. Zborník 29. konferencie s medzinárodnou účasťou Kaly a odpady 2020. Asociácia čistírenských expertov Slovenskej republiky, Slovensko.

Praspaliauskas M., Pedišius N. 2017. A review of sludge characteristics in Lithuania's wastewater treatment plants and perspectives of its usage in thermal processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (e67) DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.041.

Pytl V., et al. 2004. Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. SOVAK ČR, Líbeznice u Prahy.

Qiang Z., Wang L., Dong H., Qu J. 2015. Operation performance of an A/A/O process coupled with excess sludge ozonation and phosphorus recovery: A pilot-scale study. Chemical Engineering Journal (e268) DOI: 10.1016/j.cej.2015.01.054.

Raček J., Doskočil B., Ševčík J., Chorazy T., Hlavínek P. 2018. Vodárenský informační portál. Tomáš Kučera. Available from <https://vodovod.info> (accessed říjen 2020).

Shaddel S., Bakhtiary-Davijany H., Kabbe Ch., Dadgar F., Østerhus W. S. 2019. Sustainable Sewage Sludge Management: From Current Practices to Emerging Nutrient Recovery Technologies. Sustainability (e11) DOI: 10.3390/su11123435.

Silvestre G., Fernández B., Bonmatí A. 2015. Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. Energy Conversion and Management (e101) DOI: 10.1016/j.enconman.2015.05.033.

Singh P., Gaur K. M. 2020. Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (e42) DOI: 10.1080/15567036.2020.1806951.

Sirový M. 2011. Sušení čistírenských kalů – teorie a praxe [BSc. Thesis]. Vysoké učení technické v Brně, Brno.

Souček R. 2012. Možnosti kompostování kalu z ČOV [BSc. Thesis]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava.

Stavby Karlovarského kraje. 2016. Stavby Karlovarského kraje. Regionální stavební sdružení Karlovy Vary. Available from Sušárna kalů na čistírně odpadních vod Karlovy Vary | Stavby Karlovarského kraje (stavbykarlovarska.cz) (accessed říjen 2020).

Švehla P., Tlustoš P., Balík J. 2007. Odpadní vody. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. 2020. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Ministerstvo zemědělství. Available from Kontrola a monitoring cizorodých látek v potravních řetězcích v roce 2019 (ÚKZÚZ) (eagri.cz) (accessed prosinec 2020).

Vatachi N. 2019. Wastewater sludge to energy production. A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (e595) DOI: 10.1088/1757-899X/595/1/012053.

Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s. 2016. Vodohospodářské sdružení obcí západních Čech. Vodohospodářské sdružení obcí západních Čech. Available from <http://www.vsozc.cz/> (accessed červen 2020).

Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s. 2016. Provozní řád vyjmenovaného stacionárního zdroje ovzduší Karlovy Vary, Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., Karlovy Vary.

Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s. 2017. VODAKVA. Vodárny a kanalizace Karlovy Vary a.s. Available from <https://www.vodakva.cz/cs/> (accessed červen 2020).

Vodárny a kanalizace Náchod, a. s. 2020. Vodárny a kanalizace Náchod. Vodovody a kanalizace Náchod, a.s., Náchod. Available from <https://vakna.cz/> (accessed březem 2021).

Wang L., Chang Y., Li A. 2019. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (e108) DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.011.

Wanner F. 2019. Nakládání s čistírenskými kaly v České republice. SOVAK Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, 2019.

Yuan G., Chu K. H. 2020. Heat pump drying of industrial wastewater sludge. *Water Practice and Technology* (e15) DOI: 10.2166/wpt.2020.029.

Yang Y., Yang Ch., Wei X., Lu Q., Wang S., Chen X., Li Q., Wang Y. 2021. The release and removal of sludge toxicity by different disintegration methods. *Journal of Cleaner Production* (e278) DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123578.

Žerava Z. 2010. Vliv Termické dezintegrace kalu na další zpracování [MSc. Thesis]. Vysoké učení technické v Brně, Brno.