

Přehled technologií pro zpracování kalů a recyklaci fosforu (SS02030008-V15)

Verze 1, 19.12.2022

Konečný uživatel výsledků: **Ministerstvo životního prostředí**

Vršovická 1442/65

Praha 10, 100 10

Název projektu: Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost CEVOOH

Číslo projektu: CEVOOH SS02030008

Řešitel projektu: Česká informační agentura životního prostředí (CENIA)
Moskevská 1523/63, Praha 10, 101 00

Vypracoval: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství,
Ústav procesního inženýrství
Technická 2896/2, 616 69 Brno

Doba řešení: 2021 až 2026

Cíl projektu: Cílem projektu je vybudování dlouhodobě pracující, odborné, interdisciplinární, výzkumné základny tvořené klíčovými výzkumnými organizacemi disponujícími expertízou a odbornou kapacitou pro provádění výzkumu v oblasti odpadového a oběhového hospodářství v širších souvislostech. Centrum bude poskytovat Ministerstvu životního prostředí, dalším resortům, odborným platformám a dalším subjektům výsledky výzkumu, rozšiřování vědeckých poznatků a expertní podporu při tvorbě politik, strategií a regulací. Centrum tvořené konsorciem osmi výzkumných organizací a univerzit je zaměřeno na provádění výzkumu

v tematických oblastech souvisejících s přechodem České republiky z lineárního na cirkulární hospodářský model. Tento přechod vyžaduje výzkum v nových, dosud neřešených oblastech, jakými jsou například materiálové toky surovin, inovativní technologie zaměřené na minimalizaci použití primárních surovin ve výrobě, maximální materiálovou využitelnost a využívání odpadů, vedlejších produktů a meziproductů, ekodesign produktů, sledování a vyhodnocování nejen environmentálních, ale také sociálně-ekonomických procesů. Hlavními tematickými oblastmi, na které se Centrum v rámci své činnosti zaměří, jsou odpadové a oběhové hospodářství, monitoring a rozvoj nových monitorovacích nástrojů sledování přechodu k oběhovému hospodářství, včetně vývoje nových indikátorů, analýza životní cyklu výrobků, ekodesign, problematika kontaminace prostředí z hlediska technologií, nově se vyskytujících polutantů, využití nových metod a přístupů k identifikaci a odstranění znečištění, např. prostřednictvím dálkového průzkumu země. Neopominutelným tématem je také oblast environmentální bezpečnosti, prevence závažných havárií a tím související témata kybernetické bezpečnosti a společenské přijatelnosti environmentálně a technologicky podmíněných. Činnost Centra propojuje přírodovědné, technické a humanitní obory v jedné interdisciplinární platformě s cílem posunout ČR blíže k oběhovému hospodářství.

Informace o autorském týmu:

Hlavní řešitel projektu: **Mgr. Miroslav Havránek**
Garant výsledku: **Ing. Michal Šyc, Ph.D.**
Autorský kolektiv: **doc. Ing. Michael Pohořelý, Ph.D.**
Dr. Ing. Jaroslav Moško, Ph.D.
Ing. Matěj Hušek
Ing. Michal Šyc, Ph.D.

Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i.

Rozvojová 135, Praha 6 – Suchbátka

Česká republika, 165 00

<https://www.icpf.cas.cz/>

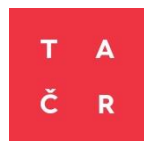


INSTITUTE
OF CHEMICAL
PROCESS
FUNDAMENTALS
OF THE ASCR

Garant MŽP: **Ing. Vlastimil Kotrč**

Další informace o výstupu:

Výstup byl vytvořen v rámci řešení projektu CEVOOH – Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost, jehož řešitelem byla Česká informační agentura životního prostředí (CENIA).



Projekt je podpořen Technologickou agenturou České republiky (TA ČR) v rámci 2. veřejné soutěže Programu na podporu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostředí pro život. SS02030008

Obsah

1	Uvedení do problematiky.....	5
2	Vybrané procesy zpracování čistírenských kalů.....	11
	Přímé zemědělské použití.....	11
	Kompostování.....	14
	Spalování.....	15
	Pyrolýza.....	17
3	Přehled zpracování ČK v Evropě.....	19
4	Analýza pozitiv a negativ.....	23
5	Nákladovost.....	27
6	Závěr.....	30
	Příloha – zpráva.....	31

Přehled způsobů nakládání s čistírenskými kaly

1 Uvedení do problematiky

Čistírenský kal je jedním z odpadů vznikajících na čistírnách odpadních vod (ČOV) během procesu čištění odpadní vody. V Katalogu odpadů je tento materiál (odpad) definován pod č. 19 08 05 Kaly z čištění komunálních odpadních vod (Vyhláška č. 8/2021 Sb.). V současné době je jeho problematika široce řešené téma, kdy je čím dál tím více diskutován a pozorován odklon od zemědělského využití^{1,2} směrem k termickému zpracování s využitím vzniklých produktů (popelu nebo pevného zbytku po pyrolýze /kalouhel/).

Nevyhnutelná produkce čistírenských kalů při čištění odpadních vod představuje výzvu pro provozovatele ČOV, municipality i stát (legislativa, limity polutantů, surovinová koncepce). Konvenční zpracování kalů aplikací na půdu ve formě hnojiva (přímé aplikace), pomocné půdní látky či kompostu, ačkoli se může zdát být rozumné, vyvolává obavy zejména kvůli znečišťujícím látkám přítomným v kalech (těžké kovy, organické polutanty, patogeny, mikroplasty a další). Tyto látky tak představují riziko nejen pro prostředí, kde jsou kaly aplikovány (půda, voda, flora), ale návazně i pro zdraví zvířat a lidí.

Celková produkce komunálního čistírenského kalu v Evropské unii (EU) přesahuje sedm milionů tun sušiny ročně (> 7,3 milionů tun sušiny v roce 2016³). Samotný kal neobsahuje pouze organickou hmotu a polutanty, ale i celou řadu dalších surovin, což z něj dělá slibnou surovinu pro jejich recyklaci. Jedná se například o fosfor, dusík, křemičité písky, minerální látky, soli železa nebo hliníku, či koncentráty těžkých kovů. Fosfor je v současné době prvkem, který je zařazený i na seznam kritických surovin EU (jako fosforit a fosfor)⁴ díky jeho důležitosti pro zemědělství, potravinářství i výrobní průmysl. Nicméně, jeho zdroje v EU jsou zanedbatelné a

¹ Moško, J. Modern Methods for Material and Energy Recovery from Sewage Sludge. Dizertační práce, VŠCHT Praha & Ghent University, Praha 2022.

² Hušek, M., Moško, J., Pohořelý, M., 2022. Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *Journal of Environmental Management*, 315, 115090. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115090>

³ EUROSTAT. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s)). Online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table?lang=en&category=env.env_wat.en_v_nwat (zobrazeno 29. 11. 2022).

⁴ Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability. *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*, COM/2020/474 final (2020).

celá EU včetně České republiky je závislá na jeho importu, ať už ve formě výrobků (hnojivo, H_3PO_4), nebo rudy. Vývoj ceny fosfátové rudy je v současné době neudržitelný (Obr. 1) a představuje problém pro zemědělce i výrobní sektor. Cena fosfátové rudy stoupla 2,5krát oproti roku 2021 a cca 5krát proti roku 2020.⁵ Protože je EU zcela závislá na dovozu fosforu, nelze očekávat dlouhodobé snížení, či stabilizaci cen fosforu. Naopak se fosfor může stát surovinou, která bude předmětem geopolitických sporů, jako je tomu u zemního plynu. Čistírenský kal bohatý na fosfor představuje určitou alternativu k řešení této situace. Jeho stabilní produkce a predikovatelný obsah fosforu z něj dělá klíč pro alespoň částečnou stabilizaci ceny a soběstačnost v případě, že je fosfor z čistírenského kalu získán v „čisté“ podobě, např. ve formě „technické“ kyseliny fosforečné.



Obr. 1 Cena fosfátové rudy, €/tuna (Phosphate rock (Morocco), 70% BPL)⁵

Čistírenský kal jako takový se obecně skládá převážně z vody, jejíž obsah se liší v závislosti na typu kalu a způsobu jeho zpracování; proto je nejvhodnější uvádět popis složení čistírenského kalu v sušině. Obsah fosforu v čistírenských kalech se uvádí v rozmezí 0,8–11 hm. % sušiny⁶,

⁵ Index mundi. Rock Phosphate Monthly Price - Euro per Metric Ton. <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=180¤cy=eur> (zobrazeno 29. 11. 2022).

⁶ Pathak, A., Dastidar, M. G., Sreekrishnan, T. R., 2009. Bioremediation of heavy metals from sewage sludge: a review. *Journal of Environmental Management*, 90, 2343-2353. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.005>

běžnější jsou však typické nižší obsahy v rozmezí 2–4 hm. % sušiny.^{7, 8, 9, 10} Fosfor v čistírenských kalech je přítomen v anorganických (např. fosforečnany nebo pyrofosforečnany) a organických složkách (např. monoestery ortofosforečnanů, diestery ortofosforečnanů),⁹ přičemž většina fosforu (> 60 %) v kalech je přítomna jako anorganický.¹¹ Anorganický fosfor v čistírenských kalech je obvykle přítomen ve formě fosforečnanů železa, hliníku a vápníku,^{7, 12} které jsou v půdním prostředí špatně rozpustné a uvolňování fosforu je tedy omezené.¹³ Kvůli tomu čistírenské kaly jako hnojivo uvolňují P poměrně pomalu, přičemž je třeba dále dbát na prevenci akumulace P v půdě vyplavováním fosforu z kalu, která by mohla mít nepříznivé environmentální dopady na povrchové a podzemní vody.¹⁴

Dusík, další ze základních živin, který je hnojivým prvkem, je v kalech přítomen většinou v rozmezí 2–6 hm. % sušiny.^{6, 7, 14, 15} Na rozdíl od fosforu je dusík v kalu převážně organického původu, jeho množství a formu je však obtížnější zobecnit vzhledem k silné závislosti na typu vody a úpravě kalu.¹⁶ Z hlediska hnojivé hodnoty dusíku v kalech závisí převážně na jeho dostupnosti pro rostliny, která je dána jeho formou. Prakticky jedinými rostlinám snadno dostupnými formami jsou anorganický $\text{NH}_4^+\text{-N}$ a $\text{NO}_3^-\text{-N}$. Z toho vyplývá, že použití kalů jako bezprostředního N hnojiva by nebylo výhodné, protože jeho efektivita by závisela na více

⁷ Zielinska, A., Oleszczuk, P., Charmas, B., Skubiszewska-Zieba, J., Pasieczna-Patkowska, S., 2015 Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.025>

⁸ Zhang, X., Yan, S., Tyagi, R. D., Surampalli, R., Valéro, J. R., 2014. Wastewater sludge as raw material for microbial oils production. *Applied Energy*, 135, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.078>

⁹ Qian, T. T., Jiang, H., 2014. Migration of phosphorus in sewage sludge during different thermal treatment processes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 1411-1419. <https://doi.org/10.1021/sc400476j>

¹⁰ Ronda, A., Gómez-Barea, A., Haro, P., de Almeida, V. F., Salinero, J., 2019. Elements partitioning during thermal conversion of sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 186, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.01.001>

¹¹ Sommers, L. E., Nelson, D. W., Yost, K. J., 1976. Variable nature of chemical composition of sewage sludges. *Journal of Environment Quality*, 5, 303-306. <https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500030017x>

¹² Zhang, B., Wang, L., Li, Y., 2019. Fractionation and identification of iron-phosphorus compounds in sewage sludge. *Chemosphere*, 223, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.052>

¹³ Perez Corona, M. E., van der Klundert, I., Verhoeven, J. T. A., 1996. Availability of organic and inorganic phosphorus compounds as phosphorus sources for carex species. *The New Phytologist*, 133, 225-231. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01889.x>

¹⁴ Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., Nelson, P. F., 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92, 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>

¹⁵ Jin, J., Li, Y., Zhang, J., Wu, S., Cao, Y., Liang, P., Zhang, J., Wong, M. H., Wang, M., Shan, S., Christie, P., 2016. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 320, 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>

¹⁶ Rappaport, B.D., Scott, J.D., Martens, D.C., Reneau, R.B., Simpson T.W., 1987. Availability and distribution of heavy metals, nitrogen, and phosphorus from sewage sludge in the plant-soil-water continuum. *Virginia Polytechnic Institute and State University - Virginia Water Resources Research Center - Bulletin*, 154. <http://hdl.handle.net/10919/46594>

faktorech (např. na typu půdy, pH, povětrnostních podmínkách, pěstovaných plodinách atd.), které ovlivňují komplexnost chemismu dusíku v půdě z hlediska mineralizace a nitrifikace a imobilizačních a denitrifikačních procesů. Samotné čistírenské kaly jako takové lze spíše využít jako střednědobé až dlouhodobé dusíkaté hnojivo.

Organický uhlík aplikovaný jako součást čistírenských kalů může zlepšit úrodnost půdy a její fyzikální, chemické a biologické vlastnosti, což lze s výhodou využít např. pro zlepšení kvality půdy v polosuchých regionech.^{17,18} Vzhledem k tomu, že obsah anorganického uhlíku v čistírenských kálech je minimální (1–4 hm. %, ¹¹ což lze přičíst uhličitánům), můžeme obsah organického uhlíku přiblížit celkovému obsahu uhlíku. Obsah uhlíku v sušině stabilizovaných čistírenských kalů se obecně pohybuje v širokém rozmezí přibližně 21–32 hm. %, ^{7, 14, 19, 20, 21, 22, 23} což je způsobeno různými technikami čištění odpadních vod a metodami stabilizace kalů, které ovlivňují především obsah popela nebo uvolňování uhlíku během stabilizace (např. přeměna na bioplyn při anaerobní fermentaci).

Tři výše uvedené složky čistírenského kalu předurčují jeho využití k hnojení (N, P) a zlepšení vlastností půdy (C). Kal obsahuje také třetí hlavní hnojivý prvek, draslík. Obsah K v kálech je

¹⁷ Shan, Y., Lv, M., Zuo, W., Tang, Z., Ding, C., Yu, Z., Shen, Z., Gu, C., Bai, Y., 2021. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. *Scientific Reports*, 11, 1402. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>

¹⁸ Soria, R., Ortega, R., Bastida, F., Miralles, I., 2021. Role of organic amendment application on soil quality, functionality and greenhouse emission in a limestone quarry from semiarid ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 164, 103925. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103925>

¹⁹ Moško, J., Pohořelý, M., Skoblia, S., Fajgar, R., Straka, P., Soukup, K., Beňo, Z., Farták, J., Bičáková, O., Jeremiáš, M., Šyc, M., Meers, E., 2021. Structural and chemical changes of sludge derived pyrolysis char prepared under different process temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105085. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105085>

²⁰ Pigoli, A., Zilio, M., Tambone, F., Mazzini, S., Schepis, M., Meers, E., Schoumans, O., Giordano, A., Adani, F., 2021. Thermophilic anaerobic digestion as suitable bioprocess producing organic and chemical renewable fertilizers: A full-scale approach. *Waste Management*, 124, 356-367. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.028>

²¹ Alves, B. S. Q., Zelaya, K. P. S., Colen, F., Frazão, L. A., Napoli, A., Parikh, S. J., Fernandes, L. A., 2021. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. *Pedosphere*, 31, 572-582. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60003-6)

²² Atienza-Martínez, M., Gea, G., Arauzo, J., Kersten, S. R. A., Kootstra, A. M. J., 2014. Phosphorus recovery from sewage sludge char ash. *Biomass and Bioenergy*, 65, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.058>

²³ Nowicki, L., Ledakowicz, S., 2014. Comprehensive characterization of thermal decomposition of sewage sludge by TG-MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.09.004>

však v porovnání s obsahem N a P nízký a kaly se obvykle nepovažují primárně za hnojivo s obsahem K. Obvyklý obsah K v kalu je v rozmezí 0,1–0,8 hm. % sušiny.^{10, 11, 22, 24, 25, 26}

Kromě prospěšných prvků či složek obsahují čistírenské kaly značné množství nečistot z čištěných odpadních vod, což předurčuje, aby se s čistírenskými kaly nakládalo spíše jako s odpadem. Nakládání s kaly je tedy třeba pečlivě zvážit, protože existuje riziko škodlivého vlivu těchto znečišťujících látek na flóru, faunu, životní prostředí a lidské zdraví.

Historicky největší obavy vzbuzují těžké kovy, které jsou na evropské úrovni částečně regulovány *směrnici Rady 86/278/EHS*²⁷ o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství. Směrnice však bere v úvahu pouze omezený počet kovů – Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn. Zastaralá směrnice plně nereprezentuje současné trendy v oblasti udržitelného oběhového hospodářství a bezpečného využívání čistírenských kalů v zemědělství (chybějící limity pro další těžké kovy, organické polutanty, mikroplasty nebo patogeny). V důsledku toho lze pozorovat, že některé státy EU, např. Německo, Dánsko, Česká republika, Slovinsko a Portugalsko, ve svých vyhláškách na národní úrovni uplatňují přísnější pravidla pro kvalitu čistírenských kalů, které mají být aplikovány na půdu. V poslední době se ve většině případů jedná hlavně o stanovení limitů na různé typy organických polutantů.^{2, 28}

Organické polutanty mohou mít karcinogenní nebo mutagenní účinky; dále mohou ovlivňovat endokrinní systém živých organismů. Tyto polutanty jsou jak domácího, tak průmyslového původu. Problematice organických polutantů a environmentálního dopadu při používání čistírenských kalů se rozsáhle věnuje nedávno vydaná studie Společného výzkumného střediska Evropská komise (JRC) na podporu rozvoje politiky týkající se směrnice o čistírenských kálech: Screening risk assessment of organic pollutants and environmental impacts from sewage sludge management - Study to support policy development on the Sewage

²⁴ Sousa, A. A. T. C., Figueiredo, C. C., 2015. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. *Biological Agriculture & Horticulture*, 32, 127-138. <https://doi.org/10.1080/01448765.2015.1093545>

²⁵ Liu, T. Z., Liu, B. Y., Zhang, W., 2014. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23, 271-275.

²⁶ Reed, G. P., Paterson, N. P., Zhuo, Y., Dugwell, D. R., Kandiyoti, R., 2005. Trace element distribution in sewage sludge gasification: source and temperature effects. *Energy & Fuels*, 19, 298-304. <https://doi.org/10.1021/ef049943y>

²⁷ SMĚRNICE RADY ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství. *Úřední věstník Evropské unie*, 181/6, 265-274.

²⁸ Hudcová, H., Vymazal, J., Rozkošný, M., 2019. Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union. *Soil and Water Research*, 14, 104-120. <https://doi.org/10.17221/36/2018-SWR>

Sludge Directive (86/278/EEC).²⁹ S ohledem na organické polutanty patří mezi hlavní výstupy zprávy několik sdělení:²⁹

- Screeningové posouzení rizik ukazuje, že organické kontaminanty představují riziko pro člověka i půdní organismy, pokud jsou přítomny v koncentracích obvyklých pro čistírenské kaly.
- U několika kontaminantů byla zjištěna řada chybějících údajů, což skresluje charakterizaci jejich rizik pomocí modelů. Nelze proto vyloučit, že potenciální rizika existují i u dalších látek.
- Zjistilo se, že člověk je pro hlavní organické kontaminanty zranitelnějším koncovým bodem než půdní organismy, protože nepřijatelné úrovně rizika pro člověka je dosaženo při nižším zatížení znečišťující látkou v důsledku bioakumulace v potravním řetězci.
- Pouze spalováním při vysokých teplotách lze účinně odstranit hlavní organické kontaminanty. Alternativním opatřením ke zmírnění rizik je nastavení parametrů kvality kalu a omezení množství aplikovaného kalu, nebo jejich kombinace.

U posledního zmíněného bodu je nutné poznamenat, že další termochemické způsoby zpracování kalu (pyrolýza, zplyňování, hydrotermální karbonizace) nebyly vzaty v úvahu z důvodu nedostatku dobře vyvinuté databáze znalostí a informací týkajících se odstraňování příslušných znečišťujících látek.²⁹

Kromě organických polutantů jsou v poslední době v mnoha oblastech široce diskutovaným tématem mikroplasty (částice menší než 5 mm). Kaly z čistíren odpadních vod zadržují většinu mikroplastů z odpadních vod,³⁰ což může být i >90 %^{31,32}. V souvislosti s mikroplasty panují obavy kvůli jejich škodlivému vlivu na biotu při požití a kvůli jejich schopnosti transportovat další kontaminanty.^{2,33}

²⁹ Huygens, D., García-Gutierrez, P., Orveillon, G., Schillaci, C., Delre, A., Orgiazzi, A., Wojda, P., Tonini, D., Egle, L., Jones, A., Pistocchi, A., Lugato E., 2022. Screening risk assessment of organic pollutants and environmental impacts from sewage sludge management - Study to support policy development on the Sewage Sludge Directive (86/278/EEC), *Publications Office of the European Union, Luxembourg*. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/541579>

³⁰ Ni, B.-J., Zhu, Z.-R., Li, W.-H., Yan, X., Wei, W., Xu, Q., Xia, Z., Dai, X., Sun, J., 2020. Microplastics mitigation in sewage sludge through pyrolysis: the role of pyrolysis temperature. *Environmental Science & Technology Letters*, 7, 961-967. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00740>

³¹ Edo, C., Gonzalez-Pleiter, M., Leganes, F., Fernandez-Pinas, F., Rosal, R., 2020. Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge. *Environmental Pollution*, 259, 113837. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113837>

³² Alavian Petroody, S. S., Hashemi, S. H., van Gestel, C. A. M., 2021. Transport and accumulation of microplastics through wastewater treatment sludge processes. *Chemosphere*, 278, 130471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130471>

³³ Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., Zeng, E. Y., 2018. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Research*, 142, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>

Podobně jako v případě organických polutantů mají mikroplasty (MP) v čistírenských kalech široký rozsah koncentrací: až desítky tisíc mikroplastových částic na kilogram sušiny kalu (v závislosti na metodice a velikosti analyzovaných MP).^{30, 31, 32, 33} Nejhojněji jsou zastoupeny částice polyethylenu a polypropylenu, ale v kalech jsou přítomny i další plasty, např. akryl, polyamid, polykarbonát, polystyren.^{30, 32}

Je tedy rozumné zvážit využití čistírenských kalů v zemědělství, ať už se jedná o přímou aplikaci do půdy, nebo výrobu hnojiv prostřednictvím kompostování kalu, kde by přínosy organického uhlíku a živin (jak je popsáno výše) pomohly zlepšit vlastnosti půdy. Při takovém použití kalu však existuje velké riziko znečištění půdy a podzemních vod širokým spektrem již dříve popsaných znečišťujících látek. Přestože se jedná o relativně levnou variantu likvidace čistírenských kalů, je třeba vlastnosti kalů – nejlépe obsah škodlivin – přísně regulovat a kontrolovat, aby mohly být použity pro aplikaci do půdy/kompostování, a to nejlépe nad rámec současných legislativních opatření. S ohledem na výše uvedené bude hlavním předmětem zprávy cílení na aktuální témata problematiky čistírenských kalů, a to na možnost recyklace/využití fosforu obsaženého v kalech a na odstraňování organických polutantů přítomných v čistírenských kalech. Řešením diskutované problematiky je zavedení principu předběžné opatrnosti, tj. postupný legislativní zákaz přímého využití kalů do zemědělské půdy a jako složkového materiálu kompostů.

2 Vybrané procesy zpracování čistírenských kalů

Přímé zemědělské použití

Aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu se na evropské úrovni řídí *směrnicí Rady 86/278/EHS*²⁷ a na české dále pak s přísnějšími opatřeními *Zákonem č. 541/2020 Sb. o odpadech a příslušné vyhlášky 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady*. Zmíněná legislativa stanovuje 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 postupy analýzy kalů a půdy, včetně metod odběru vzorků.

Hlavním cílem aplikace čistírenských kalů je zvýšení úrodnosti vnosem stopových prvků a živin do půdy.³⁴ Jedním z cílů aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu je dojít k úsporám na nákup minerálních/umělých hnojiv, které mají kaly částečně nahradit. S ohledem na

³⁴ Pavlas, M., Šomplák, R., Putna, O., Touš, M., Pluskal, J., Vítková, P., Urbánek, B., David Hrabina, Pačesová, T., Tenkrát, M., Zeroníková, I., Vodáček, J., Veverka, M., Maršíková, L., Čenský, J., 2020. Podklady pro oblast podpory odpadového a oběhového hospodářství OPŽP 2021–2027 - Zařízení na zpracování kalů z ČOV.

skutečnost, že hlavní hnojivové prvky (N a P) obsažené v kalech jsou převážně ve formách obtížně dostupných pro rostliny v čase aplikace (Kapitola 1), nelze uvažovat o kalech jako o efektivních hnojivech, ale spíše jako o dlouhodobé zásobě hnojivových prvků v půdě. Nicméně, s ohledem na relativně vysoký obsah organické hmoty obsažené v kalu, lze kaly s výhodou využívat ke zlepšení kvality půdy a k prevenci půdní eroze.³⁵

Na druhé straně je ovšem nutné zohledňovat obsah znečišťujících látek obsažených v kalech, jejichž přítomnost může vést k řadě environmentálních problémů s dopady na floru, faunu, a následně i na člověka. Znečišťující látky lze kategorizovat do několika hlavních skupin:

- těžké kovy,
- organické polutanty (PAU, PCB, PCDD/F, PFAS, AOX, hormonální látky, léčiva a jejich residua, a další),
- mikroplasty,
- mikrobiální znečištění (bakterie, viry, nižší houby a jejich spory a toxiny, nižší živočichové a jejich vajíčka).

Těžké kovy dostávající se do půdy společně s čistírenskými kaly se mohou v půdě akumulovat,^{36, 37} což může vést k redukci půdní bakteriální činnosti,³⁸ ke změně morfologie rostlin,³⁹ k sekundární akumulaci v rostlinách,⁴⁰ nebo k dalším důsledkům v případě opakovaného používání kalů na půdě.² Zda rostliny akumulují těžké kovy závisí na více faktorech jako např. koncentrace a typ kovu, pH půdy, typ půdy nebo druh rostliny.⁴¹ Aplikovaný výzkum těžkých kovů, stejně jako nanočástic, by se tak měl přesunout z laboratoře (květináčové testy) na zemědělskou půdu ošetřenou čistírenskými kaly, aby se prozkoumaly

³⁵ Ojeda, G., Alcaniz, J.M., Ortiz, O., 2003. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation and Development*, 14, 563–573. <https://doi.org/10.1002/ldr.580>

³⁶ He, Z.L., Yang, X.E., Stoffella, P.J., 2005. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 19, 125–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010>

³⁷ Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C., Chambers, B.J., 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of The Total Environment*, 311, 205–219. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00139-6)

³⁸ Sandaa, R.-A., Torsvik, V., Enger, Ø., Daae, F.L., Castberg, T., Hahn, D., 1999. Analysis of bacterial communities in heavy metal-contaminated soils at different levels of resolution. *FEMS Microbiology Ecology*, 30, 237–251. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1999.tb00652.x>

³⁹ Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., Sreekanth, T.V.M., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8, 199–216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>

⁴⁰ Singh, R.P., Agrawal, M., 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants. *Chemosphere*, 67, 2229–2240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.019>

⁴¹ Alloway, B.J., Jackson, A.P., 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludgeamended soils. *Science of The Total Environment*, 100, 151–176. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(91\)90377-Q](https://doi.org/10.1016/0048-9697(91)90377-Q)

účinky na lokální prostředí (rostliny, živočichy a mikroorganismy) a přenos kovů a nanočástic do rostlin a plodin v reálných podmínkách.²

Na rozdíl od problematiky těžkých kovů, organické polutanty v kalech jsou relativně novým tématem v odborné i neoborné veřejnosti. Kromě známých karcinogenních či mutagenních vlivů některých organických polutantů (především POP – persistentních organických polutantů /PFAS, PAH, PCB, a další/, u kterých je odbouratelnost v půdním prostředí nepravděpodobná), patří do této skupiny široké spektrum potenciálně toxických látek, jejichž chování, degradabilita, míra toxicnosti či přímo vliv na půdní prostředí a jeho bakterie a mikro- a makroorganismy je stále neznámé nebo neúplně prokázané. Z toho důvodu by měla být daná problematika nadále předmětem diskuzí a dalšího výzkumu a měl by být uplatněn princip předběžné opatrnosti.^{2, 29, 42}

Aplikací čistírenských kalů na půdu se mikroplasty stávají součástí půdy, mohou ovlivnit její vlastnosti, jsou dostupné rostlinám a živočichům nebo se mohou šířit do vodního ekosystému. Ve srovnání s problematikou mikroplastů ve vodním ekosystému, která je často diskutovaným tématem, kontaminace půdy mikroplasty a její důsledky nejsou příliš známé, ačkoli mikroplasty mohou být v půdě a kalech přítomny v nezanedbatelných dávkách a mohou být v půdě škodlivé částečně již kvůli své přítomnosti a částečně kvůli své schopnosti adsorbovat, přenášet a uvolňovat různé znečišťující látky.^{43, 44, 45}

S ohledem na vysoký obsah znečišťujících látek v kalu, včetně nejasnosti ohledně organických polutantů, rovněž Evropská unie přistupuje k otázce využití kalů jako hnojiva s opatrností v duchu principu předběžné opatrnosti. Dle nedávno vydaného *nařízení (EU) 2019/1009*⁴⁶ o hnojivových výrobcích EU byly kaly explicitně vyloučeny z kategorie složkových materiálů pro výrobu digestátu a kompostu, nelze je tedy využít k přípravě těchto hnojivých výrobků EU.

⁴² Semerád, J., Hatasová, N., Grasserová, A., Černá, T., Filipová, A., Hanč, A., Innemanová, P., Pivokonský, M., Cajthaml, T., 2020. Screening for 32 per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) including GenX in sludges from 43 WWTPs located in the Czech Republic - Evaluation of potential accumulation in vegetables after application of biosolids. *Chemosphere*, 261, 128018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128018>

⁴³ Chen, C.-Y., Lu, T.-H., Yang, Y.-F., Liao, C.-M., 2021. Marine mussel-based biomarkers as risk indicators to assess oceanic region-specific microplastics impact potential. *Ecological Indicators*, 120, 106915. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106915>

⁴⁴ Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., Geissen, V., 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>

⁴⁵ Gao, D., Li, X., Liu, H., 2020. Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. *Science of The Total Environment*, 742, 140355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140355>

⁴⁶ Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1009 ze dne 5. června 2019, kterým se stanoví pravidla pro dodávání hnojivých výrobků EU na trh a kterým se mění nařízení (ES) č. 1069/2009 a (ES) č. 1107/2009 a zrušuje nařízení (ES) č. 2003/2003 (Text s významem pro EHP). *Úřední věstník Evropské unie*, L 170, 1–114.

Nutno dodat, že v roce 2022 bylo nařízení upraveno nařízením (EU) 2021/2086⁴⁷ a (EU) 2021/2087⁴⁸, dle kterých je možné využívat čistírenské kaly k výrobě vysrážených fosforečných solí a jejich derivátů a termooxidačních materiálů (popely) a jejich derivátů, které budou dále využity k výrobě hnojivových výrobků EU. Nařízení (EU) 2019/1009⁴⁶ se ovšem týká výhradně hnojivových výrobků EU, tj. hnojivových výrobků obchodovatelných na úrovni EU, tedy používání kalů přímo k hnojivovým účelům na národní úrovni není tímto nařízením ovlivněno.

Kompostování

Dalším způsobem zpracování čistírenských kalů je kompostování, při němž se kaly před aplikací na zemědělskou půdu kompostují s jiným bioodpadem či biomasou. Kompostování je tradiční metoda aerobní biologické úpravy biologicky rozložitelných odpadů. Kvalita získaného kompostu vyžaduje mimo jiné nízký obsah znečišťujících látek, který může být obtížně dosažitelný, jelikož znečišťující látky obsažené v čistírenských kalech nejsou během kompostování téměř vůbec odstraněny. Zejména těžké kovy se v kompostu z čistírenských kalů akumulují a dostávají se s ním do půdy.^{49, 50} Kompostování rovněž působí jen omezeně na degradaci organických polutantů. PAE (polyaminoamide-epichlorohydrin) a PAU jsou částečně odstraněny na rozdíl od halogenovaných organických kontaminantů, jako jsou PCDD/F, PCB nebo PFAS, které v kompostu z čistírenských kalů zůstávají a jejichž koncentrace se může postupně zvyšovat s klesajícím množstvím organického materiálu (odpadu).^{29, 51} Použitím čistírenských kalů ke kompostování hrozí rovněž kontaminace půdy mikroplasty, které se v ní mohou hromadit (kumulovat) a přecházet do živočichů žijících v půdě, např. žížal,⁵² a následně i do jejich predátorů.

⁴⁷ Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2021/2086 ze dne 5. července 2021, kterým se mění přílohy II a IV nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1009 za účelem doplnění vysrážených fosforečných solí a jejich derivátů jako kategorie složkových materiálů v hnojivých výrobcích EU (Text s významem pro EHP). *Úřední věstník Evropské unie*, L427, 120-129.

⁴⁸ Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2021/2087 ze dne 6. července 2021, kterým se mění přílohy II, III a IV nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1009 za účelem doplnění termooxidačních materiálů a jejich derivátů jako kategorie složkových materiálů v hnojivých výrobcích EU (Text s významem pro EHP). *Úřední věstník Evropské unie*, L427, 130-139.

⁴⁹ Bowszys, T., Wierzbowska, J., Sternik, P., Busse, M.K., 2014. Effect of the application of sewage sludge compost on the content and leaching of zinc and copper from soils under agricultural use. *Journal of Ecological Engineering*, 16, 1-7. <https://doi.org/10.12911/22998993/580>

⁵⁰ Fang, W., Delapp, R.C., Kosson, D.S., van der Sloot, H.A., Liu, J., 2017. Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: percolation leaching tests with repeated additions of compost. *Chemosphere*, 169, 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.086>

⁵¹ Lü, H., Chen, X.-H., Mo, C.-H., Huang, Y.-H., He, M.-Y., Li, Y.-W., Feng, N.-X., Katsoyiannis, A., Cai, Q.-Y., 2021. Occurrence and dissipation mechanism of organic pollutants during the composting of sewage sludge: a critical review. *Bioresource Technology*, 328, 124847. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124847>

⁵² Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., Gao, P., 2020. An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. *Environmental Science & Technology*, 54, 4248-4255. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07905>

Jak bylo zmíněno výše, nebude možné využívat čistírenské kaly pro kompostování za účelem výroby hnojivových výrobků EU dle *nařízení (EU) 2019/1009*.⁴⁶ Zákaz používání čistírenských kalů pro výrobu hnojivových výrobků EU na bázi kompostu je dle názoru autorů správným krokem k vyšší ochraně životního prostředí, zejména s ohledem na omezenou schopnost degradovat/odstraňovat znečišťující látky procesem kompostování, kdy ve většině případů (těžké kovy, persistentní organické polutanty, mikroplasty) dochází jen k naředění „čistším“ odpadem (odpadem s nižší koncentrací těchto látek) a aplikace nízkých dávek kompostu s čistírenskými kaly pouze oddaluje riziko akumulace znečišťujících látek v půdě.²

Spalování

Spalování je termochemický proces rychlé oxidace materiálu za vysokých teplot, kdy dochází k uvolňování energie obsažené v palivu za vzniku produktů: popelu, tepla a spalin. V případě čistírenských kalů je nutné vzít v potaz vysoký obsah vody v palivu (70–80 hm. % pro anaerobně stabilizovaný, mechanicky/strojově odvodněný kal), který limituje spalování kalů za účelem získávání energie a komplikuje takovéto zpracování kalu. Pro řešení problému vysokého obsahu vody lze využít dvou přístupů:

- spolu-spalovat malé množství kalu s jinými výhřevnými palivy nebo odpady,
- kal upravit sušením.

S ohledem na recyklaci vzácných prvků, převážně fosforu, je žádané sušení kalu a následně jeho samostatné spalování (mono-spalování), jelikož spolu-spalováním kalu s jinými druhy paliv či odpady bude docházet k naředění fosforu ve výsledném popelu, a/nebo k jeho kontaminaci. Navíc, např. dávka kalu pro spolu-spalování s uhlím je příliš nízká, zejména z důvodu prevence kontaminace popela a současně proto, aby vzniklé spaliny nebyly znečištěné vysokým obsahem prekursorů plynných polutantů z kalu.²

Spalování kalů podléhá *směrnicím 2008/98/EC*⁵³ o odpadech a *2010/75/EU*⁵⁴ o průmyslových emisích, jelikož je kal klasifikován jako odpad. Dle daných směrnic má být spalování kalů prováděno tak, aby byl plyn vznikající při spalování odpadu po posledním vstřiku spalovacího vzduchu ohřát řízeným a stejnoměrným způsobem i za nejméně příznivých podmínek na dobu alespoň dvou sekund na teplotu alespoň 850 °C.⁵⁴ V současnosti jsou pro spalování čistírenských kalů využívány především fluidní kotle/parogenerátory, jejichž výhoda spočívá především v relativní jednoduchosti, absenci pohyblivých částí a vhodnosti pro spalování paliv

⁵³ Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic (Text s významem pro EHP). *Úřední věstník Evropské unie*, L312, 3-30.

⁵⁴ Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění) (přepřacované znění) (Text s významem pro EHP). *Úřední věstník Evropské unie*, L334, 17-119.

s nízkou výhřevností díky dobrému přenosu tepla horkou fluidní vrstvou. Nicméně, z důvodu vysokého obsahu dusíku, síry či halogenových prvků v kalu je prakticky nemožné docílit limitních hodnot plynných polutantů (NO_x, SO₂, PCDD/Fs, HCl, HF) pouhými primárními opatřeními, a je nutné vybavit technologii na spalování kalů extenzivní čistící tratí.⁵⁵

Kvalita popela ze spalování se určuje obsahem znečišťujících látek. Organické polutanty obsažené v kalu jsou procesem spalování efektivně odstraněny,^{29, 56} ovšem těžké kovy zejména zůstávají zakoncentrovány v popelu (kromě Hg, částečně Cd, Zn), nebo jsou uvolňovány do spalin (v plynné fázi; jako součást TZL) v závislosti na jejich druhu, množství, složení kalu a nastavení procesních podmínek (teplota, doba zdržení, oxidačně-redukční podmínky).^{57, 58, 59} Kromě těžkých kovů jsou v popelu rovněž zakoncentrovány hnojivové prvky, nejcennější fosfor, ale rovněž další jako Ca, Mg a další mikronutrienty, čímž by se nabízelo kal využívat přímo jako hnojivo. Nicméně, z důvodu obsahu těžkých kovů a z důvodu nízké biodostupnosti hlavních hnojivových prvků je vhodnější využívat popely po spalování kalů jako meziproduct – vstupní surovinu do procesu získávání fosforu, obdobně jak je tomu v případě fosfátové rudy používané pro výrobu hnojiv.^{2, 34} Stejným způsobem je uvažováno i na úrovni EU, kde se pro účely výroby hnojivových výrobků EU dle *nařízení (EU) 2019/1009*⁴⁶ předpokládá přepracování popelů ze spalování kalů na hnojivové výrobky. Přepracování popelů ze spalování kalů bylo předmětem studie STRUBIAS od JRC⁶⁰ sloužící jako podkladový materiál pro implementaci termooxidačních materiálů a jejich derivátů mezi složkové materiály pro výrobu hnojivových výrobků EU. Souhrn a popis stávajících i „zaniklých“ technologií pro zpracování popelů ze spalování čistírenských kalů, obecně dělí se na hydrometalurgické a pyrometalurgické procesy, lze podrobněji dohledat v obsáhlé studii JRC⁶⁰ a v aktuálnější verzi také v publikaci autorů této zprávy – Hušek et al.² V závislosti na použité technologii mohou být

⁵⁵ Moško, J., Pohořelý, M., Zach, B., Svoboda, K., Durda, T., Jeremiáš, M., Šyc, M., Václavková, Š., Skoblia, S., Beňo, Z., Brynda, J., 2018. Fluidized bed incineration of sewage sludge in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres. *Energy & Fuels*, 32, 2355-2365.

⁵⁶ Herzel, H., Krüger, O., Hermann, L., Adam, C., 2016. Sewage sludge ash - a promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Science of The Total Environment*, 542, 1136-1143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.059>

⁵⁷ Chanaka Udayanga, W.D., Veksha, A., Giannis, A., Lisak, G., Chang, V.W.-C., Lim, T.-T., 2018. Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge. *Fuel*, 226, 721-744. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.045>

⁵⁸ Elled, A.-L., Åmand, L.-E., Leckner, B., Andersson, B.-Å., 2007. The fate of trace elements in fluidised bed combustion of sewage sludge and wood. *Fuel*, 86, 843-852. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.014>

⁵⁹ Van de Velden, M., Dewil, R., Baeyens, J., Josson, L., Lanssens, P., 2008. The distribution of heavy metals during fluidized bed combustion of sludge (FBSC). *Journal Hazardous Materials*, 151, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.056>

⁶⁰ Huygens, D., Delgado Sancho, L., Saveyn, H.G.M., Tonini, D., Eder, P., 2019. Technical Proposals for Selected New Fertilising Materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009): Process and Quality Criteria, and Assessment of Environmental and Market Impacts for Precipitated Phosphate Salts & Derivates, Thermal Oxidation Materials & Derivates and Pyrolysis & Gasification Materials. *Publications Office of the European Union*, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/186684>

navíc kromě fosforu, kyseliny fosforečné či P hnojiv získávají i další různé materiály jako jsou železité nebo hlinité soli, sádra nebo oxid křemičitý.²

Pyrolýza

Pyrolýza čistírenského kalu je termický rozklad kalu za nepřítomnosti volného kyslíku, obvykle při teplotách mezi 300 a 900 °C. Vzhledem k nepřítomnosti oxidačního činidla (volný kyslík) neprochází prchavá hořlavina (uvolněné těkavé látky) řízeným rozkladem za vzniku spalin jako v případě spalování a produkty pyrolýzy tak lze řadit do tří skupin: pyrolýzní plyn (nekondenzující plyny), pyrolýzní kondenzát (kondenzát sestávající z organické frakce – oleje a anorganické frakce – vodní části obsahující určité množství ve vodě rozpustných organických látek) a kalouhel (lze také najít pojmenování jako sludge-char, biochar, biochar z čistírenských kalů, biouhel). Výtěžek těchto produktů je silně závislý na hlavních provozních parametrech, především na teplotě pyrolýzy, době setrvání kalu/kalouhlu a těkavých látek v reakční zóně (doba zdržení), rychlosti ohřevu a typu technologie. Obecně platí, že čím vyšší je teplota a doba zdržení, tím vyšší je výtěžek plynu a nižší výtěžek uhlíku, zatímco při nastavení vysoké rychlosti ohřevu s nízkou dobou setrvání těkavých látek v horké reakční zóně se přednostně vyrábí olej. Pyrolýzní plyn lze spalovat za účelem výroby energie (tepla), olej lze buď spalovat, nebo rafinovat za účelem výroby chemických látek a kalouhel lze rovněž použít ke spalování, jako adsorbent nebo jako půdní aditivum. Výroba oleje pyrolýzou ČK se jeví jako nejméně racionální možnost vzhledem k vysokému obsahu popela a polutantů, který vede k nízkým výnosům a vzhledem k obsahu složité organické biomasy ve srovnání s běžnou dřevní a zemědělskou biomasou. Složitost biomasy čistírenských kalů a poměrně heterogenní povaha čistírenských kalů by vedla k nízké kvalitě a komplexnímu složení oleje, který by bylo obtížné dále využít ve srovnání s olejem z běžné dřevní a zemědělské biomasy. Proto je jeho spalování před nebo po kondenzaci logické, technologicky i environmentálně nepřijatelnější možností.¹ V praxi se komerční technologie staví bez kondenzace kondenzátu, tj., primární pyrolýzní plyn se celý spaluje. V celé technologii se udržuje teplota plyných produktů pyrolýzy nad rosným bodem organické fáze, a tím i nad rosným bodem vody obsažené v plynu.

Pyrolýza čistírenských kalů nespadá legislativně přímo pod *směrnici 2010/75/EU*⁵⁴ jako je tomu v případě spalování čistírenských kalů. Ovšem vzhledem k následnému spalování produktů pyrolýzy, které se považují za odpad, je proces regulován též *směrnicí 2010/75/EU*⁵⁴.

Z těchto důvodů se pomalá pyrolýza (dlouhá doba zdržení) jeví jako optimální typ pyrolýzy čistírenských kalů. Během tohoto procesu je totiž upřednostněna tvorba pyrolýzního plynu a

kalouhlu bohatého na popel. Popel obsahuje fosfor, který lze recyklovat. Tento princip byl již využit v komerčních technologiích firem Pyreg GmbH⁶¹, Biogreen®⁶² nebo AquaGreen⁶³.

V zemědělství je kalouhel využíván jako pomocná půdní látka ke zlepšení úrodnosti půdy a fyzikálních vlastností půdy, jako je zadržování vody, propustnost pro drenáž, provzdušnění a struktura půdy.⁶⁴ Kalouhel je rovněž zdrojem fosforu a dusíku (na rozdíl od spalování část dusíku zůstává v kalouhlu), ovšem jejich biodostupnost je stejně jako v případě kalu či popela ze spalování kalu omezená.^{65, 66, 67} Přesto by měl být kladen důraz na složení čistírenského kalu před jeho zpracováním, protože těžké kovy (rovněž jako v popelu ze spalování) zůstávají v kalouhlu ve vyšších koncentracích.^{68, 69} Z tohoto důvodu je nutné vzít v potaz, že kaly s vyšším obsahem těžkých kovů nejsou vhodné pro výrobu kalouhlu.

Hlavní překážkou pro využívání kalouhlů jako půdních aditiv byl nejasný mechanismus odstraňování organických polutantů procesem pyrolýzy. To bylo jedním z hlavních důvodů, proč, na rozdíl od popelů ze spalování kalů, nebylo studií JRC⁶⁰ doporučeno povolit kalouhly jako složkové materiály pro výrobu hnojivových výrobků EU dle *nařízení (EU) 2019/1009*.⁴⁶ Zmíněná studie na základě nedostatku vědeckých důkazů rovněž doporučila odborné veřejnosti věnovat se problematice odstraňování organických polutantů, což by vedlo k přehodnocení zařazení kalouhlů na seznam složkových materiálů pro výrobu hnojivových výrobků EU.⁶⁰ Na rozdíl od zamítavého přístupu EU⁴⁶ k využívání kalouhlu jako hnojiva/půdního aditiva, řada členských států a států okolních již na základě současného stavu poznání (prokázání odstranění organických polutantů z kalu/kalouhlu procesem

⁶¹ PYREG GmbH Technology, pdf available online: <https://pyreg.com/our-technology-old/> (zobrazeno 4. 12. 2022)

⁶² Biogreen®, online: <https://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-applications/sludge-pyrolysis> (zobrazeno 4. 12. 2022)

⁶³ Aquagreen, online: <https://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-applications/sludge-pyrolysis> (zobrazeno 4. 12. 2022)

⁶⁴ Callegari, A., Capodaglio, A.G., 2018. Properties and beneficial uses of (Bio)Chars, with special attention to products from sewage sludge pyrolysis. *Resources*, 7, 20. <https://doi.org/10.3390/resources7010020>

⁶⁵ Buss, W., Bogush, A., Ignatyev, K., Mašek, O., 2020. Unlocking the fertilizer potential of waste-derived biochar. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, 12295–12303. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04336>

⁶⁶ Hossain, M.K., Strezov, V., Chan, K.Y., Ziolkowski, A., Nelson, P.F., 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>

⁶⁷ Liu, Q., Fang, Z., Liu, Yuan, Liu, Yangyang, Xu, Y., Ruan, X., Zhang, X., Cao, W., 2019. Phosphorus speciation and bioavailability of sewage sludge derived biochar amended with CaO. *Waste Management*, 87, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.045>

⁶⁸ Mancinelli, E., Baltrėnaitė, E., Baltrėnas, P., Paliulis, D., Passerini, G., 2016. Trace metals in biochars from biodegradable by-products of industrial processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 198. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2892-1>

⁶⁹ Zhang, Z., Ju, R., Zhou, H., Chen, H., 2021. Migration characteristics of heavy metals during sludge pyrolysis. *Waste Management*, 120, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.018>

pyrolýzy^{30, 70, 71, 72, 73}) legislativně zavedla možnosti jak využívat kalouhel pro aplikaci na půdu a stanovila podmínky výroby kalouhlu či přípustné limity znečišťujících látek v kalouhlu.⁷⁴ Konkrétně se jedná o Českou republiku, Švédsko, Dánsko, Estonsko, Norsko nebo Izrael.

V případě České republiky lze zmínit konkrétní příklad, kdy kalouhel produkovaný pyrolýzní jednotkou na ČOV Bohuslavice – Trutnov, jedinou svého druhu v České republice, zkolaudovanou 22. října 2021, byl certifikován jako pomocná půdní látka Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským (dále ÚKZÚZ) dne 7. března 2022. Komerční název kalouhlu je Karbofert T1.⁷⁵ Certifikací byla prokázána nezávadnost pro životní prostředí, splnění legislativních požadavků a přidaná hodnota pro půdu a rostliny. Na základě výše zmíněného dokumentu, místního šetření a splnění legislativních povinností vyplývajících ze zákona o odpadech 541/2021 Sb. byl dne 4. července 2022 Trutnovský biochar vyjmut krajským úřadem Královéhradeckého kraje z katalogu odpadů.

Závěrem je nutné zrekapitulovat, že řada vědeckých skupin a studií potvrzuje, že pyrolýzou kalů za vyšších teplot (> 500 °C) lze bezpečně odstraňovat organické polutanty z kalu.^{2, 74}

3 Přehled zpracování ČK v Evropě

Mezi hlavní způsoby využití/likvidace čistírenských kalů se řadí skládkování, aplikace do půdy (zemědělské využití), kompostování, spalování (mono-spalování a spolu-spalování) a pyrolýza, zatímco alternativními způsoby mohou být zplyňování, mokrá oxidace atd. Na Obr. 2 jsou zobrazeny podíly způsobů likvidace čistírenských kalů (% vyprodukovaných čistírenských kalů) v Evropě. Je třeba poznamenat, že údaje v databázi EUROSTAT nejsou za poslední roky

⁷⁰ Moško, J., Pohořelý, M., Cajthaml, T., Jeremiáš, M., Robles-Aguilar, A.A., Skoblia, S., Beňo, Z., Innemanová, P., Linhartová, L., Michalíková, K., Meers, E., 2021a. Effect of pyrolysis temperature on removal of organic pollutants present in anaerobically stabilized sewage sludge. *Chemosphere*, 265, 129082. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129082>

⁷¹ Buss, W., 2021. Pyrolysis solves the issue of organic contaminants in sewage sludge while retaining carbon-making the case for sewage sludge treatment via pyrolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9, 10048–10053. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03651>

⁷² Zielińska, A., Oleszczuk, P., 2015. The conversion of sewage sludge into biochar reduces polycyclic aromatic hydrocarbon content and ecotoxicity but increases trace metal content. *Biomass and Bioenergy* 75, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.019>

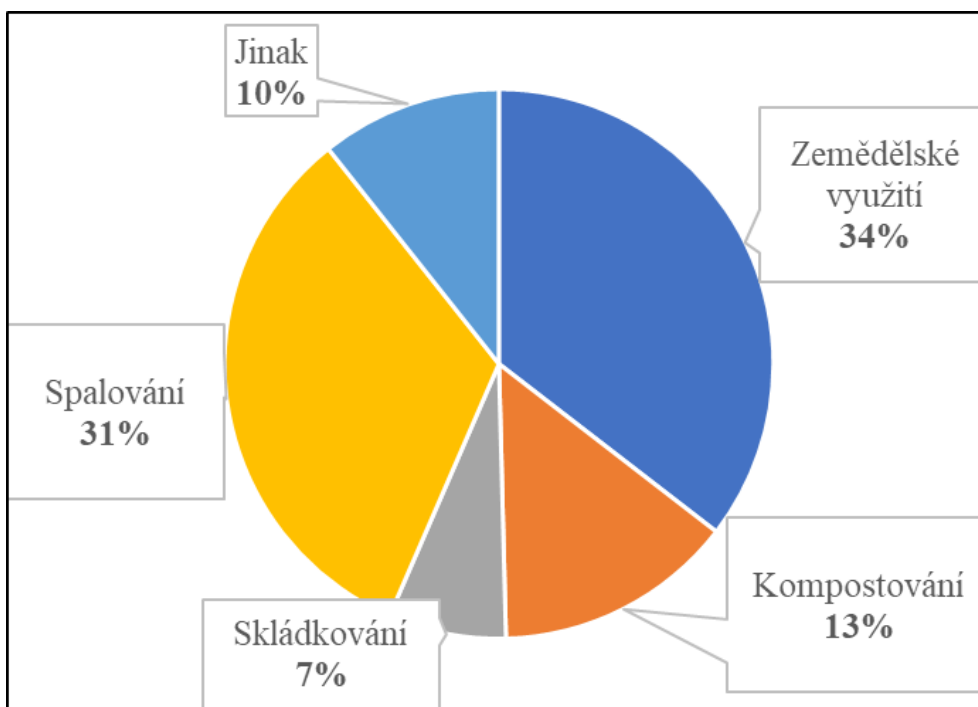
⁷³ Hoffman, T.C., Zitomer, D.H., McNamara, P.J., 2016. Pyrolysis of wastewater biosolids significantly reduces estrogenicity. *Journal of Hazardous Materials* 317, 579–584. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.088>

⁷⁴ European Sustainable Phosphorus Platform - ESPP SCOPE Newsletter special issue on BIOCHARS: Perspectives for pyrolysis of sewage sludges. Online: <https://phosphorusplatform.eu/scope-in-print/scopenewsletter/2250-november-2022-scope-144> (zobrazeno 4. 12. 2022)

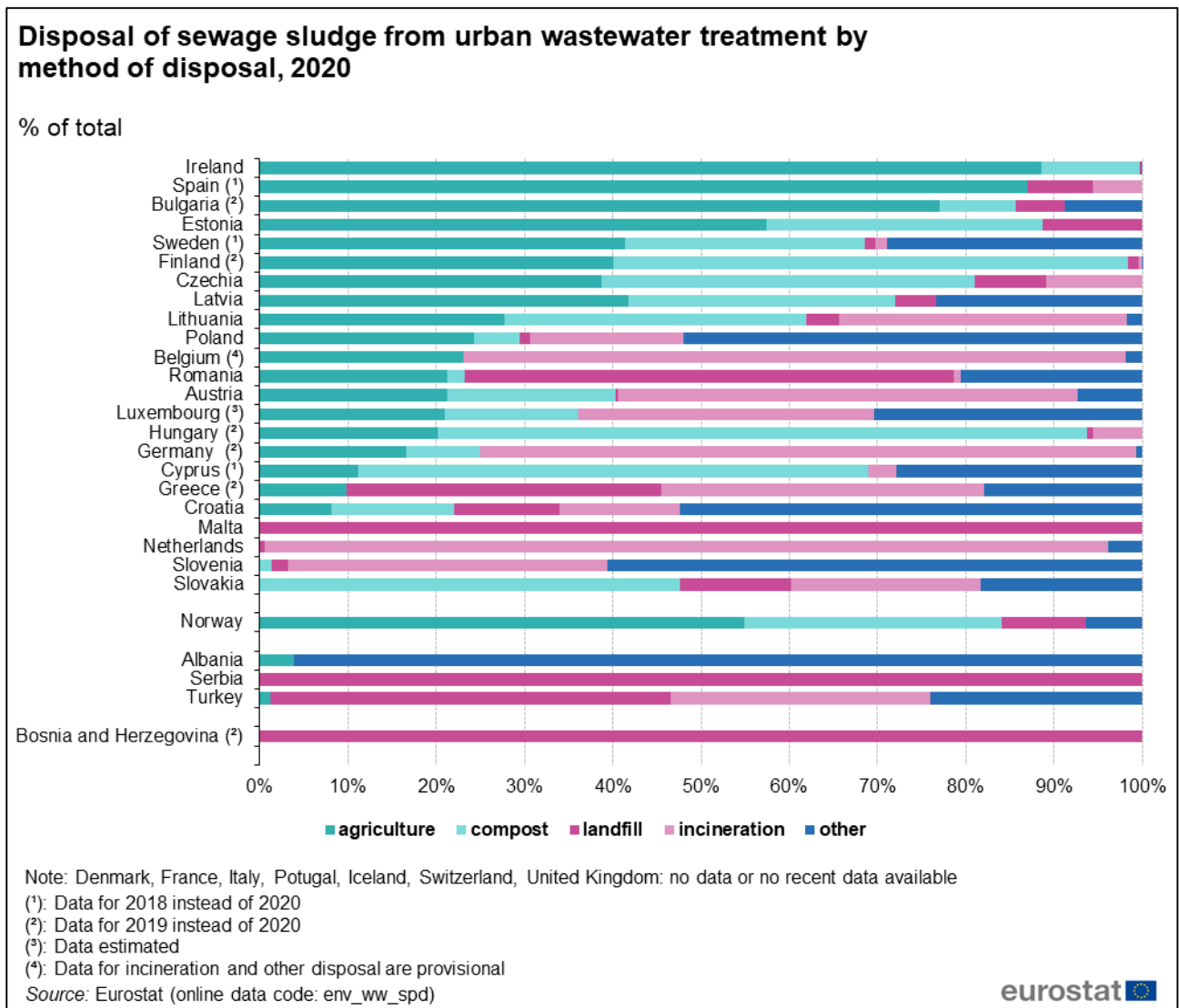
⁷⁵ Karbofert T1, pomocná půdní látka. Registr hnojiv. Online: <https://eagri.cz/public/app/eagriapp2/RHPub/Detail?guid=788acc00-815b-4b5e-af82-015d5f165f10> (zobrazeno 4. 12. 2022)

kompletní – z toho důvodu byl vybrán rok 2016, protože v něm byly nejúplnější údaje – a výsledná odchylka je způsobena 5% rozdílem v uváděném množství vyprodukovaného a odstraněného kalu. Přesto je tato statistika pro posouzení celkové situace nakládání s kaly v Evropě dostačující. Lze jasně vyzorovat, že v Evropě existují dva hlavní způsoby likvidace kalů – zemědělské využití a spalování, které dohromady tvoří více než 60 % využití/likvidace kalů. Můžeme však také pozorovat, že cca 7 % kalů se stále skládá.

Zpracování čistírenských kalů na území Evropské unie není nikterak jednotné. Jednotlivé členské státy implementují rozdílné přístupy ke svému kalovému hospodářství. EUROSTAT rovněž shromažďuje a publikuje data o produkci a nakládání s čistírenskými kaly v jednotlivých členských státech EU a okolních zemích v Evropě (např. Norsko, Albánie nebo Turecko) (Obr. 3). Data jsou vždy prezentována s určitým zpožděním (poslední jsou z roku 2020) a nejsou vždy kompletní. Nicméně lze pozorovat určité trendy: Seversko-baltské státy, Irsko, státy na území jižní a střední Evropy preferují stále aplikaci na zemědělskou půdu a kompostování, směrem na východ Evropy a na Maltě nepřestali kaly skládkovat, naopak v Německu, Belgii, Nizozemsku nebo Rakousku převládá spalování.



Obr. 2 Způsob využití/likvidace komunálních čistírenských kalů v Evropě^{1,3}



Obr. 3 Způsob využití/zneškodnění komunálních čistírenských kalů dle vybraných států Evropy⁷⁶

⁷⁶ EUROSTAT – Statistics Explained. Online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Figure_4 - Disposal of sewage sludge from urban wastewater treatment by method of disposal, 2020 %25 of total.png#file](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Figure_4_-_Disposal_of_sewage_sludge_from_urban_wastewater_treatment_by_method_of_disposal,_2020_%25_of_total.png#file) (zobrazeno 30. 11. 2022)

S ohledem na zpracování kalů byla nebo bude v některých státech – konkrétně Německo⁷⁷, Švýcarsko⁷⁸ a Rakousko (v přípravě)⁷⁹ – uložena povinnost recyklace fosforu z čistírenských kalů nebo popelů po spalování kalů, či samotná povinnost kaly spalovat. Bližší specifikace k povinnosti spalování kalů a recyklace fosforu jsou dostupné v příložených odkazech a dále rozebírané v předcházející zprávě projektu ze srpna 2022: *Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost – SS02030008: Legislativa pro nakládání s čistírenskými kaly ve vybraných státech Evropské unie – Německo, Rakousko, Francie.*⁸⁰, Příloha – zpráva

⁷⁷ AbfKlärV – Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/BJNR346510017.html (zobrazeno 1. 12. 2022)

⁷⁸ Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA). https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de#art_15 (zobrazeno 1. 12. 2022)

⁷⁹Verordnung Abfallverbrennungsverordnung 2022 – AVV 2022. <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/search/?trisaction=search.detail&year=2022&num=645> (zobrazeno 1. 12. 2022)

⁸⁰ Pohořelý, M., Hušek, M., Moško, J., Šyc, M., 2022. Legislativa pro nakládání s čistírenskými kaly ve vybraných státech Evropské unie – Německo, Rakousko, Francie. Zpráva projektu *Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost – SS02030008*.

4 Analýza pozitiv a negativ

Výhody, nevýhody, příležitosti a hrozby vybraných procesů zpracování čistírenských kalů jsou zobrazeny tabulkovou formou. V Tab. 1 je shrnuto přímé zemědělské využití, v Tab. 2 kompostování, v Tab. 3 spalování a v Tab. 4 pyrolýza.

Tab. 1 Přímé zemědělské použití

Pozitivní faktory	Negativní faktory
Výhody <ul style="list-style-type: none"> • Zlepšuje vlastnosti půdy (vnos organické hmoty) • Částečně nahrazuje použití minerálních hnojiv • Dlouhodobě ověřený způsob nakládání s kaly 	Nevýhody <ul style="list-style-type: none"> • Neodstraňuje těžké kovy • Neodstraňuje organické znečišťující látky • Neodstraňuje mikroplasty • Neodstraňuje patogeny • Fosfor pomalu rozpustný a biodostupný ve střednědobém horizontu • Dusík biodostupný ve střednědobém horizontu
Příležitosti <ul style="list-style-type: none"> • Zákonné povolení použití kalů v zemědělství • Nízká nákladovost 	Hrozby <ul style="list-style-type: none"> • Vnos a kumulace znečišťujících látek v půdě • Na základě principu předběžné opatrnosti hrozí odklon na EU úrovni • Rozšíření kanalizační sítě a zkvalitnění technologií čištění odpadních vod vyústí v kal zákonně nepoužitelný v zemědělství • Zpřísnění podmínek na kvalitu kalu • Konkurence dalších technologií • Odmítavý postoj obyvatelstva • Neřešení separace fosforu jako kritické komodity EU

Tab. 2 Kompostování

Pozitivní faktory	Negativní faktory
Výhody <ul style="list-style-type: none"> • Vnos a částečné zhodnocení organické hmoty a živin • Částečné odstraňování mikrobiálního znečištění a patogenů • Ověřená technologie 	Nevýhody <ul style="list-style-type: none"> • Neodstraňuje těžké kovy • Neodstraňuje organické znečišťující látky (jen ve velmi omezené míře) • Neodstraňuje mikroplasty • Fosfor pomalu rozpustný a biodostupný ve střednědobém horizontu • Dusík biodostupný ve střednědobém horizontu
Příležitosti <ul style="list-style-type: none"> • Zákonné povolení použití kalů do kompostů • Nízká nákladovost 	Hrozby <ul style="list-style-type: none"> • Nízký zájem o kompost obsahují kal • Zpřísnění podmínek na kvalitu kalu pro kompostování • Odmítavý postoj obyvatelstva

Tab. 3 Spalování

Pozitivní faktory	Negativní faktory
Výhody <ul style="list-style-type: none"> • Značné snížení objemu a hmoty kalu • Efektivní odstranění organických polutantů • Efektivní odstranění mikroplastů • Efektivní odstranění mikrobiálního znečištění • Ověřená technologie • Výroba elektrické energie a/nebo užitého tepla a vedlejšího energetického produktu v kvalitě vhodné pro získání fosforu, který je kritickou komoditou EU 	Nevýhody <ul style="list-style-type: none"> • Neodstraňuje těžké kovy (odstraňuje např. Hg, částečně Cd, Pb, Zn apod.) • Fosfor prakticky nerozpustný, tedy biologicky nedostupný, dostupný ve velmi dlouhodobém horizontu • Odstranění dusíku obsaženého v kalu • Nutné sušení odvodněného kalu • Vyšší investiční a provozní náklady v porovnání s přímým využitím kalů na zemědělské půdě a s kompostováním kalu
Příležitosti <ul style="list-style-type: none"> • Neplnění zpřísňujících se zákonných požadavků na využití kalů v zemědělství • Zákaz využívání kalů v zemědělství (jako např. ve Švýcarsku, částečně Německu a Rakousku) • Získávání fosforu, sloučenin železa, hliníku a jiných látek z popela po spalování • Podpora zpracování čistírenských kalů udržitelným způsobem • Spolupráce s municipalitami států s dlouhodobou zkušeností se spalováním kalů • Růst ceny fosforu 	Hrozby <ul style="list-style-type: none"> • Chybějící směrování kalové politiky ČR • Nedostatečná vytíženost zařízení • Nezájem o technologii • Špatná pověst spaloven • Zákonné povolení použití kalu v zemědělství či kompostováním

Tab. 4 Pyrolýza/karbonizace

Pozitivní faktory	Negativní faktory
Výhody <ul style="list-style-type: none"> • Značné snížení objemu a hmoty kalu • Odstraňuje organické polutanty (účinnost závisí na podmínkách procesu – pomalá pyrolýza za vysokých teplot) • Efektivní odstranění mikroplastů • Efektivní odstranění mikrobiálního znečištění • Částečné zachování dusíku obsaženého v kalu • Výroba užitečného tepla • Karbonizační produkt – kalouhel zlepšuje fyzikální vlastnosti půdy 	Nevýhody <ul style="list-style-type: none"> • Neodstraňuje těžké kovy (odstraňuje např. Hg, částečně Cd, Pb, Zn v závislosti na teplotě procesu) • Fosfor obtížně rozpustný a biodostupný v střednědobém / dlouhodobém horizontu • Nutné sušení odvodněného kalu • Vyšší investiční a provozní náklady v porovnání s přímým využitím kalů na zemědělské půdě a s kompostováním kalu
Příležitosti <ul style="list-style-type: none"> • Neplnění zpřísnujících se zákonných požadavků na využití kalů v zemědělství • Zákaz využívání kalů v zemědělství (jako např. ve Švýcarsku, částečně Německu a Rakousku) • Podpora zpracování čistírenských kalů udržitelným způsobem • Zvýšení povědomí zemědělců/municipalit o potenciálních výhodách využití kalouhlů • Legislativní povolení využívání kalouhlu na společném evropském trhu 	Hrozby <ul style="list-style-type: none"> • Chybějící směřování kalové politiky v ČR • Nedostatečná vytíženost zařízení • Nezájem o technologii • Chybějící poptávka po kalouhlu • Zákonné povolení použití kalu v zemědělství či kompostováním • Chybějící podpora ze strany odborné veřejnosti • Nevhodný vstupní kal – vysoký obsah těžkých kovů

5 Nákladovost

Nákladovost jednotlivých způsobů využití/odstranění kalů se odvíjí od jejich komplexnosti. Při přímém využití na zemědělské půdě a kompostování lze považovat za náklady zejména cenu za odběr kalu zpracovatelem (zemědělec, resp. kompostárna) a lze odhadovat, že náklady v obou případech budou porovnatelné. Ceny za odběr kalů do kompostáren se pohybují v řádech stovek korun za tunu, přibližně v rozmezí 600–1500,- Kč (bez DPH) za tunu odpadu.^{81, 82, 83, 84, 85} Za předpokladu využívání stabilizovaného, hygienizovaného kalu o obsahu sušiny 20 hm. %, lze tak uvažovat cenu 3000–7500,- Kč (bez DPH) za tunu sušiny kalu. V případě použití kalu přímo do půdy jsou poplatky i nižší, ale u nových, či obnovovaných kontraktů se předpokládá růst ceny na uvedené hodnoty. Další náklady v rámci takového odstraňování/využívání kalu jsou závislé na dopravě (vzdálenost, cena pohonných hmot) z ČOV na místo odstranění/využití kalu. Pro porovnání, v Německu se pohybuje cena za zemědělské využití kalu na úrovni 160–320,- € (≈ 4000–8000,- Kč) za tunu suchého kalu (Obsahu pevných látek v nefiltrovaném vzorku kalu nebo podíl celkových pevných látek v celkové hmotě kalu. Stanovuje se odpařením vody).⁸⁶

Zde je potřeba zdůraznit, že za ukládání kalu do půdy a do kompostů se platí (ČOV/„oprávněná“ firma), což prokazuje, že o kal jako hnojivo není reálně zájem, ale pouze za poplatek se takto neekologicky likviduje odpad!

V případě spalování a pyrolýzy je nutné vzít v potaz komplexnost technologií a náklady dále dělit mezi investiční a provozní náklady. Z logiky věci proto vyplývá, že náklady na odstraňování/využívání kalu těmito způsoby budou vyšší, než v případě aplikace na půdu nebo kompostování. Existují způsoby, jak cenu snížit, např. připojení jednotky do již fungující spalovny či ZEVO, při kterých dochází k ušetření využitím již existující čistící trati spalin. Níže jsou uvedeny příklady cen několika zařízení z Německa a Česka včetně odhadované ceny. Investiční náklady i náklady na zpracování kalů jsou v případě spalování vyšší v porovnání s aplikací na půdě a oproti kompostování kalů, s odhadem v Německu 280–480,- € (≈ 7000–

⁸¹ Kompostárna bioodpadů. Prostějov. Maloobchodní ceny. Online: <http://kompostarnaprostejov.cz/cenik.html> (zobrazeno 6. 12. 2022)

⁸² Marius Pedersen a.s. Online: <https://www.mariuspedersen.cz/file/edee/2022/01/cenik-shl-2022-kompostarna.pdf> (zobrazeno 6. 12. 2022)

⁸³ Kompostárna Jarošovice. Online: <https://www.kompostarna.com/aktualni-cenik/cenik-odpadu.html> (zobrazeno 6. 12. 2022)

⁸⁴ BOKOMP s.r.o. Buchlov. Online: <https://www.biokomp.cz/ke-stazeni.htm> (zobrazeno 6. 12. 2022)

⁸⁵ KOBRA Údlice s.r.o. Online: <http://www.kobra-udlice.cz/cenik-a-dokumenty.html> (zobrazeno 6. 12. 2022)

⁸⁶ Roskosch, A., Heidecke, P., 2019. SEWAGE SLUDGE DISPOSAL in the Federal Republic of Germany. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/sewage-sludge-disposal-in-the-federal-republic-of> (zobrazeno 6. 12. 2022)

12000,- Kč) za tunu suchého kalu (Obsahu pevných látek v nefiltrovaném vzorku kalu nebo podíl celkových pevných látek v celkové hmotě kalu. Stanovuje se odpařením vody).⁸⁶

Cena za likvidaci/využití kalu procesem spalování oproti přímému využití kalů do zemědělské půdy, respektive oproti kompostování kalů je v Německu cca o 50 % vyšší. V ČR není provozováno žádné zkolaudované zařízení na mono-spalování kalů, proto nelze uvést konkrétní hodnotu.

Mono-spalovna Rügen (Německo) – Tab. 5 – o kapacitě 2500 tun sušiny za rok (množství menší než množství kalů vyprodukovaných Karlovarským krajem dle ČSU⁸⁷), měla celkové náklady 11,3 mil. € (282,5 mil. Kč). Součástí stavby byla i výstavba čistírny odpadních vod a plynového hospodářství. Zároveň je v této spalovně čistírenských kalů spolu-spalována sebraná biomasa z přilehlých pláží (řasy). Roční objem spalovaných řas představuje cca 7 % z celkového objemu.

Tab. 5 Rozpočet – mono-spalovna Rügen (1 € = 25,0 Kč)⁸⁸

Služba	Náklady [€, netto]	Náklady [Kč, netto]
konstrukční kapacita	2 500 t.DM.rok ⁻¹	
stavební práce	2,7 Mil. €	67,5 Mil. Kč
úpravna kalu	2,0 Mil. €	50 Mil. Kč
kogenerační jednotka	0,3 Mil. €	7,5 Mil. Kč
spalovna (kotel)	3,6 Mil. €	90 Mil. Kč
vedení elektřiny	0,9 Mil. €	22,5 Mil. Kč
vnitřní infrastruktura a uvedení do provozu	1,8 Mil. €	45 Mil. Kč
celkově	11,3 Mil. €	282,5 Mil. Kč

Mono-spalovna Böblingen (Německo) – Tab. 6 – o kapacitě 26500 tun sušiny za rok (odpovídá přibližně množství kalů vyprodukovaných Moravskoslezským krajem dle ČSU⁸⁷), její předpokládaná cena v roce 2016 byla 45,0 mil. €.

⁸⁷ Český statistický úřad. Vodovody, kanalizace a vodní toky – 2021. Online: <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2021> (zobrazeno 7. 12. 2022)

⁸⁸ Franck, J., 2016. Neuplanung und Realisierung von Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen. Online: https://born-ermel.eu/files/bornermel/uploads/pdfs/Vortraege%20und%20Veranstaltungen/Born_Ermel_Praes_DWA_Kassel_2016_Franck.pdf (zobrazeno 6. 12. 2022)

Tab. 6 Náklady na výstavbu mono-spalovny v lokalitě Böblingen⁸⁹ (1 € = 25,0 Kč)

Mono-spalování čistírenských kalů konstrukční kapacita	Cena v € 100 000 t.rok ⁻¹ = 26 500 t.DM.rok ⁻¹	Cena v Kč
bunkr na ČK	2,8 Mil. €	70 Mil. Kč
ostatní části budovy	7,2 Mil. €	180 Mil. Kč
venkovní zařízení, příprava plochy a výstavba, infrastruktura	1,0 Mil. €	25 Mil. Kč
schvalování / plánování / dodatečné náklady	1,8 Mil. €	45 Mil. Kč
<i>celkové stavební náklady</i>	<i>12,8 Mil. €</i>	<i>320 Mil. Kč</i>
příjem kalu	2,8 Mil. €	70 Mil. Kč
sušení	4,0 Mil. €	100 Mil. Kč
stacionární fluidní kotel	2,8 Mil. €	70 Mil. Kč
výroba páry, výměník tepla v kotli	2,1 Mil. €	52,5 Mil. Kč
čištění spalin	5,1 Mil. €	127,5 Mil. Kč
pomocné systémy	1,2 Mil. €	30 Mil. Kč
schvalování / plánování / dodatečné náklady	3,2 Mil. €	80 Mil. Kč
měřicí, řídicí a regulační technologie	3,8 Mil. €	95 Mil. Kč
<i>celkové náklady strojního vybavení</i>	<i>25,0 Mil. €</i>	<i>625 Mil. Kč</i>
celkové náklady (netto)	37,8 Mil. €	945 Mil. Kč
celkové náklady (brutto)	45,0 Mil. €	1 125 Mil. Kč

V září roku 2020 byla uvedena na ČOV Bohuslavice-Trutnov do zkušebního provozu pyrolýzní jednotka včetně sušárny kalu. Technologická linka (sušárna ELIQUO + pyrolyzér PYREG) zabezpečuje roční zpracování 3700 t odvodněného čistírenského kalu na kalouhel. Celkové způsobilé výdaje činily 58,3 mil. Kč. Jednotka byla následně kolaudována v říjnu 2021⁹⁰ a kalouhel byl registrován jako pomocná půdní látka pod názvem Karbofert T1.⁷⁵ Na základě výše zmíněného dokumentu místního šetření a splnění legislativních povinností vyplývajících ze zákona o odpadech 541/2021 Sb. byl dne 4. července 2022 Trutnovský kalouhel vyjmut krajským úřadem Královéhradeckého kraje z katalogu odpadů. Trutnovský kalouhel plní legislativní požadavky stanovené v České republice a zásady cirkulární ekonomie.

⁸⁹ Rapf, M., Huber, H.-D., Neuerer, M., 2016. Klärschlammstudie RMHKW Böblingen - Studie über die Machbarkeit einer Mono-Klärschlammverbrennungsanlage am Standort des RMHKW Böblingen mit dem Ziel der Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungssasche. Technical Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24422.16960>

⁹⁰ Fuka, J., Kos, M., Pohorely, M., 2021. Sušení a pyrolýza na ČOV Trutnov – první výsledky zkušebního provozu. *Slovak* 30, 24–28.

6 Závěr

Zpráva pojednává o problematice využití a zpracování čistírenských kalů vybranými způsoby, které se jeví jako nejpravděpodobnější s výhledem do blízké a střednědobé budoucnosti. Konkrétně se jedná o přímé využití kalů do zemědělské půdy, kompostování kalů, spalování kalů a pyrolýzu kalů. Zpráva zhodnocuje primárně vliv jednotlivých způsobů zpracování kalů na aktuálně řešená a diskutovaná témata v oblasti kalového managementu – recyklace fosforu a odstraňování polutantů (primárně organických) obsažených v kalu.

S ohledem na ochranu životního prostředí a z důvodu prevence jeho znečištění používáním čistírenských kalů na půdách (uplatnění principu předběžné opatrnosti) a s ohledem na získávání fosforu jako kritické komodity EU ve zpracovatelné podobě, je dle názoru autorů nezbytné vytvořit podmínky pro zavedení thermochemických procesů pro zpracování kalů. Autoři doporučují legislativní úpravu zpracování kalů tak, jak bylo učiněno v sousedních krajinách, tj. v Německu a Rakousku, nebo dále ve Švýcarsku; a to i na úkor ztráty některých výhod plynoucích z využití kalů do půdy (přímé využití na zemědělskou půdu, kompost obsahující kal). Pro Českou republiku se dle názoru autorů nejlépe hodí kombinace Německého a Rakouského modelu. Legislativa je zpracována ve zprávě 1, viz příloha této zprávy.

Příloha – zpráva

Pohořelý, M., Hušek, M., Moško, J., Šyc, M., 2022. Legislativa pro nakládání s čistírenskými kaly ve vybraných státech Evropské unie – Německo, Rakousko, Francie. Zpráva projektu *Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost – SS02030008*.



**ÚSTAV
CHEMICKÝCH
PROCESŮ
AV ČR**

Legislativa pro nakládání s čistírenskými kaly ve vybraných státech Evropské unie

Německo, Rakousko, Francie

*Projekt: Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a
environmentální bezpečnost – SS02030008*

srpen 2022

doc. Ing. Michael Pohořelý, Ph.D.

Ing. Matěj Hušek

Dr. Ing. Jaroslav Moško, Ph.D.

Ing. Michal Šyc, Ph.D.

Čistírenské kaly obsahují organickou hmotu a některé nutrienty (P, N), ale spolu s těmito cennými látkami i řadu polutantů a patogenů. Na úrovni Evropské Unie jsou limity polutantů stanoveny Směrnicí Rady ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství¹. Směrnice 86/278/EHS limituje pouze obsah těžkých kovů v čistírenských kálech určených pro zemědělské použití. Pro organické polutanty a patogeny směrnice limity nestanovuje, zároveň limity pro těžké kovy nebyly od roku 1986 výrazným způsobem novelizovány.

Z důvodu neaktuálnosti, zvyšujícího se tlaku na ochranu životního prostředí a s příchodem nových trendů (např. znovuzískávání fosforu) se řada členských států EU rozhodla výrazným způsobem omezit/kontrolovat způsoby a množství čistírenských kalů aplikovaných na zemědělskou půdu. V případě některých členských států se postupně zavádí, případně zpřísnují, limity pro organické polutanty, patogeny a těžké kovy nad rámec Směrnice 86/278/EHS.

Tato zpráva se zabývá přístupem tří vybraných evropských států (Německo, Rakousko a Francie – dle zadání zaměstnanců MŽP) ke zpracování čistírenských kalů aplikovaných na zemědělskou půdu. V první části jsou shrnuty legislativní limity a porovnány s limity EU a ČR. Další části jsou věnovány popisu legislativy a hlubšímu pochopení jednotlivých opatření v kalové otázce u zájmových států.

¹ Směrnice Rady ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:31986L0278>)

1 Porovnání legislativních limitů

1.1 Limitní hodnoty anorganických a organických polutantů

Limitní hodnoty jednotlivých polutantů v čistírenských kalech určených pro zemědělskou aplikaci v zájmových státech se vzájemně liší a jejich přehled je uveden v Tabulka 1 (mimo Rakouska). Součástí Tabulka 1 je i porovnání s platnou legislativou EU a ČR. Limitní hodnoty pro použití čistírenských kalů na zemědělské půdě v Rakousku jsou uvedeny v Tabulka 2, z důvodu rozdílných limitů/přístupů v jednotlivých spolkových zemí.

Tabulka 1 Porovnání limitních hodnot pro čistírenské kaly používané na zemědělské půdě v zájmových zemích²

	Evropská unie Směrnice 86/278/EEC ¹	Německo AbfKlärV ³ , DüMV ⁴	Francie Arrêté du 08/01/98 ⁵	Česká republika Vyhláška 273/2021 Sb. ⁶
	mg.kg ⁻¹ _{DM}			
Cd	20–40	1,5	10	5
Cu	1 000–1 750	900	1 000	500
Ni	300–400	80	200	100
Pb	750–1 200	150	800	200
Zn	2 500–4 000	4 000	3 000	2 500
Hg	16–25	1	10	4
Cr	–	–	1 000	200
Cr ^{VI}	–	2	–	–
As	–	40	–	30
Tl	–	1	–	–
AOX	–	400	–	500
Suma Cr+Cu+Ni+Zn	–	–	4 000	–
PCB	–	0,1 ^(a)	0,8 ^(b)	0,6 ^(b)
PAH	–	–	–	10 ^(c)
benzo(a)pyren	–	1	2	–
fluoranthen	–	–	5	–
benzo(b)fluoranthen	–	–	2,5	–
PCDD/F ^(d)	–	30 ^(e)	–	–
PFAS	–	0,1 ^(f)	–	–
mikrobiální limit	NE	ANO	ANO	ANO

(a) pro každý kogener: 28, 52, 101, 138, 153, 180

(b) suma 7 kongenerů: 28+52+101+118+138+153+180

(c) suma antracenu, benzo(a) antracenu, benzo(b) fluoranthenu, benzo(k) fluoranthenu, benzo(a), pyrenu, benzo(ghi) perylenu, fenantrenu, fluoranthenu, chrysenu, indeno(1,2,3-cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu

(d) vyjádřeno ng TEQ.kg⁻¹_{DM}

(e) součet dioxinů a dl-PCB

(f) suma PFOA a PFOS

² Hušek, M., Moško, J., Pohořelý, M., 2022. Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. J. Environ. Manage. 315, 115090. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115090>

³ AbfKlärV – Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost, 2017, https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/BJNR346510017.html.

⁴ DüMV – Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln, 2012, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BJNR248200012.html.

⁵ Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées (Arrêté du 15 septembre 2020), <https://aida.ineris.fr/reglementation/arrete-080198-fixant-prescriptions-techniques-applicables-epandages-boues-sols>.

⁶ Vyhláška č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady, 2021. Ministerstvo životního prostředí.

Tabulka 2 Porovnání limitních hodnot pro čistírenské kaly používané na zemědělské půdě v Rakousku⁷

Rakousko	Dolní Rakousko		Horní Rakousko	Štýrsko	Burgenland	Vorarlbersko	Korutany				
	LGBI. 6160/2-0 ⁸		LGBI. Nr. 62/2006 ⁹	LGBI. Nr. 89/2007 ¹⁰	LGBI. Nr. 82/1991 ¹¹	LGBI.Nr. 41/1985 ¹² a 75/1997 ¹³	LGBI Nr 74/2000 ¹⁴				
	Třída I.	Třída II.			Třída I.	Třída II.	Třída B	Třída AB	Třída A	Třída I	
	mg.kg ⁻¹ DM										
Cd	1,5 ^(a)	2	5	2	2	10	4	2,5	2	1	0,7
Cu	60	300	400	300	300	500	500	300	300	150	70
Ni	50	60	80	60	60	100	100	80	60	60	25
Pb	100	100	400	100	100	500	150	150	150	150	45
Zn	200	1 500	1 600	1 200	1 000	2 000	1 800	1 800	1 200	500	200
Hg	1	2	7	2	2	10	4	2,5	2	0,7	0,4
Cr	100	70	400	70	100	500	300	100	70	70	70
AOX	–	500	500	500 ^(b)	–	–	–	–	–	500 ^(c)	–
PCB	–	–	–	–	–	–	0,2	–	–	1 ^(c)	–
PAH	–	–	–	6 ^(d)	–	–	–	–	–	6 ^(c)	–
PCDD/F ^(e)	–	–	–	–	–	–	100 ^(e)	–	–	50 ^(c)	–
microbiální limit	ANO		NE	ANO	ANO		NE	ANO		ANO	–

(a) při pH < 6 – 1 mg.kg⁻¹ DM

(b) u kalů nad 30 000 EO

(c) látky v této skupině mohou být vyšetřeny na příkaz úřadů, pokud existuje příčina nebo podezření

(d) PAH 16: suma naftalenu, acenaftylenu, acenaftenu, fluorenu, fenantrenu, antracenu, fluorantenu, pyrenu, benzo(a)antracenu, chrysenu, benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, benzo(a)pyrenu, dibenzo(a,h)antracenu, indeno(1,2,3-cd)pyrenu a benzo(g,h,i)perylenu.

(e) vypočteno jako toxické ekvivalenty PCDD v nanogramech na kg sušiny ng TEQ.kg⁻¹ DM

Vídeň¹⁵

- Rozmetání čistírenských kalů ve Vídni je zakázáno. Ze zákazu jsou vyňaty hygienicky nezávadné výrobky, které obsahují upravené čistírenské kaly a jejichž uvádění na trh, zejména jako hnojiva, kompost nebo zemina, je povoleno podle federálních předpisů.

Tyrolsko¹⁶

- Rozmetání čistírenských kalů a produktů obsahujících čistírenské kaly na zemědělské půdě je zakázáno.

⁷ Hušek, M., Moško, J., Pohorelý, M., 2022. Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. J. Environ. Manage. 315, 115090. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115090>

⁸ Landesrecht konsolidiert Niederösterreich: Gesamte Rechtsvorschrift für NÖ Klärschlammverordnung, Fassung vom 27.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrNO&Gesetzesnummer=20001009>.

⁹ Landesrecht konsolidiert Oberösterreich: Gesamte Rechtsvorschrift für Oö. Klärschlammverordnung 2006, Fassung vom 27.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LROO&Gesetzesnummer=20000418>.

¹⁰ Landesrecht konsolidiert Steiermark: Gesamte Rechtsvorschrift für Steiermärkische Klärschlammverordnung 2007, Fassung vom 27.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrStmk&Gesetzesnummer=20000867>.

¹¹ Landesrecht konsolidiert Burgenland: Gesamte Rechtsvorschrift für Bgld. Klärschlamm- und Müllkompostverordnung, Fassung vom 28.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrBgd&Gesetzesnummer=10000264>.

¹² Landesrecht konsolidiert Vorarlberg: Gesamte Rechtsvorschrift für Klärschlammgesetz, Fassung vom 31.12.2018, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrVbg&Gesetzesnummer=20000541&FassungVom=2018-12-31>.

¹³ Landesrecht konsolidiert Vorarlberg: Gesamte Rechtsvorschrift für Klärschlammverordnung, Fassung vom 31.12.2018, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrVbg&Gesetzesnummer=20000542&FassungVom=2018-12-31>.

¹⁴ Landesrecht konsolidiert Kärnten: Gesamte Rechtsvorschrift für Kärntner Klärschlamm- und Kompostverordnung - K-KKV, Fassung vom 28.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrK&Gesetzesnummer=20000166>.

¹⁵ Landesrecht konsolidiert Wien: Gesamte Rechtsvorschrift für Verbot der Ausbringung von Klärschlamm, Fassung vom 28.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrW&Gesetzesnummer=20000239>.

¹⁶ Landesrecht konsolidiert Tirol: Gesamte Rechtsvorschrift für Feldschutzgesetz 2000, Tiroler, Fassung vom 28.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrT&Gesetzesnummer=20000058>.

Salzburg¹⁷

- Používání čistírenských kalů a směsí čistírenských kalů na půdu je zakázáno. Tento zákaz neplatí pro obsah septiku smíchaný se zemědělskou odpadní vodou a dezinfikovaným skladováním po dobu nejméně tří měsíců nebo čistírenský kal z domovních odpadních vod z vlastního hospodářství, pokud jsou splněny požadavky dle Salzburškého stavebního zákonu nebo pro čistírenské kaly a směsi čistírenských kalů z čistíren odpadních vod pro jednotlivé objekty v extrémních lokalitách.

1.2 Limitní hodnoty pro mikrobiálních znečištění

Kalová Směrnice 86/278/EHS limity pro mikrobiální znečištění nestanovuje. Nad rámec této směrnice Německo, Francie, Rakousko (mimo Horní Rakousko a Vorarlbersko) i Česká republika své limity stanovili.

Německo⁴

- salmonela bez nálezu v 50 g vzorku.

Francie⁵

- salmonela < 8 MPN^{*}/10 g sušiny,
^{*}metody nejpravděpodobnějšího počtu
- enterovirus < 3 NPPUC^{**}/10 g DM,
^{**}nejpravděpodobnější počet cytopatogenních jednotek
- vejce helmintů (počet a životaschopnost) < 3/10 g sušiny.

Rakousko

Vídeň¹⁵, Tyrolsko¹⁶, Salzburg¹⁷

- používání kalů na zemědělské půdě je zakázáno.

Horní Rakousko, Vorarlbersko

- nemají stanovené limity.

Dolní Rakousko⁸

- nelze prokázat více než 1000 enterobakterií v 1 g kalu,
- salmonela není detekována v 1 g kalu,
- nejsou přítomna žádná vajíčka červů nebezpečná pro zvířata a lidi.

Štýrsko¹⁰

- salmonela není detekována v 1 g kalu,
- nejsou přítomna žádná vajíčka infekčních červů v 1 g kalu,
- není zjištěno více než 100 KTJ escherichia coli v 1 g kalu.

Burgenland¹¹

- nelze zjistit více než 1 000 enterobakterií v 1 g kalu,
- salmonela není detekována v 1 g kalu,
- nejsou přítomna žádná vajíčka infekčních červů.

Korutany¹⁴

- nesmí být zjistitelných více než 1000 enterobakterií v 1 g kalu,
- salmonela nesmí být detekovatelná v 1 g kalu.

¹⁷ Landesrecht konsolidiert Salzburg: Gesamte Rechtsvorschrift für Klärschlamm-Bodenschutzverordnung, Fassung vom 28.06.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrSbg&Gesetzesnummer=20000210>.

Česká republika

- vyhláška 273/2021 Sb.⁶
 - salmonella nesmí být detekovatelná v 50 g kalu,
 - escherichia coli nebo enterokoky
 - 5 vzorků
 - ve 4 případech méně než 10^3 KTJ v 1 gramu,
 - v 1 případě méně než $5 \cdot 10^3$ KTJ v 1 gramu,
- staré limity platné do 31.12.2022 dle vyhlášky č. 437/2016 Sb.¹⁸
 - kal kategorie I.
 - salmonella nesmí být detekovatelná v 1 g kalu při 5 vzorcích,
 - termotolerantní koliformní bakterie méně než 10^3 KTJ v 1 gramu sušiny při 5 vzorcích,
 - enterokoky méně než 10^3 KTJ v 1 gramu sušiny při 5 vzorcích,
 - kal kategorie II.
 - termotolerantní koliformní bakterie $10^3 - 10^6$ KTJ v 1 gramu sušiny při 5 vzorcích,
 - enterokoky $10^3 - 10^6$ KTJ v 1 gramu sušiny při 5 vzorcích.

1.3 Aplikační limity čistírenských kalů

Použití čistírenských kalů na zemědělské půdě není omezeno pouze hodnotami polutantů, ale i maximálním aplikačním množstvím.

Německo³

- během **3 kalendářních let** lze do půdy aplikovat nebo zavést nejvýše **5 t_{DM}.ha⁻¹**. Bez ohledu na větu 1 je v případě krajinářských opatření povolena jednorázová aplikace nebo zapravení v množství do 10 t_{DM}.ha⁻¹ na půdu nebo do půdy, pokud nedošlo k žádné aplikaci nebo příspěvku.

Francie⁵

- nejvýše 3 kg DM na metr čtvereční po dobu 10 let tj. **30 t_{DM}.ha⁻¹ po dobu 10 let.**

Česká republika⁶

- **na 1 ha** lze aplikovat **nejvýše 5 t_{DM}**; pokud použité kaly obsahují méně než polovinu limitního množství každé ze sledovaných rizikových látek a prvků, může množství kalů dosáhnout 10 t sušiny kalů na 1 ha. **Po dobu 3 let** následujících po použití upravených kalů nesmí být na dotčených dílech půdního bloku použity žádné další kaly; to platí pro celý díl půdního bloku, i když bylo použito upravených kalů provedeno jen na jeho části.

Rakousko

*Dolní Rakousko*⁸

- **Za 12 měsíců** je možné aplikovat **3 t_{DM}.ha⁻¹**. Kaly I. třídy, je možné aplikovat neomezeně, pokud je dodržena platná legislativa.

¹⁸ Vyhláška č. 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě

Horní Rakousko^{9, 19}

- **během 3 let** lze na půdu rozptýlit celkem **10 t_{DM}.ha⁻¹** čistírenského kalu. V případě rozmetání čistírenských kalů, jejichž obsah mědi nebo zinku nepřekračuje limitní hodnotu stanovenou vyhláškou o více než 50 %, musí být toto aplikační množství sníženo úměrně k přebytku nebo případně k poměru vyššího přebytek,
- s přihlédnutím k aplikačnímu množství lze do půdy aplikovat nejvýše 50 m³ čistírenského kalu o obsahu sušiny nižší než 35 % na hektar a rok,
- nedochází k překročení maximálního zatížení v g.ha⁻¹ (Tabulka 3).

Štýrsko¹⁰

- na ornou půdu lze na **jednu aplikaci** aplikovat **maximálně 50 m³.ha⁻¹**, druhá aplikace je možná v případě dostatečného vyschnutí, zhutnění a nepřekročení maximálního zatížení v g.ha⁻¹ (Tabulka 3).

Burgenland¹¹

- roční zátěž dusíkem aplikovaná na **zemědělskou půdu** prostřednictvím čistírenských kalů a/nebo odpadních kompostů **nesmí překročit maximálně 175 kg čistého dusíku na hektar a rok**, v případě půdy bez zeleného pokryvu a 210 kg čistého dusíku na hektar a rok v případě půdy se zeleným pokryvem včetně trvalých travních porostů nebo se střídáním plodin náročných na dusík,
- nesmí dojít k překročení maximálního zatížení v g.ha⁻¹ (Tabulka 3).

Vorlabersko¹³

- v průběhu **2 let** lze použít hnojivo z kalů z čistíren odpadních vod s množstvím fosforečnanů v přepočtu na **P₂O₅ nejvýše 160 kg.ha⁻¹**.

Korutany¹⁴

- maximální aplikační dávka je stanovena třídou kalu: **4,8 (T_B), 6 (T_{AB}), 8 (T_A), 10 (T_I) t_{DM}.ha⁻¹.2a**,
- v průběhu **2 let** může být aplikován biogenní odpadní materiál s množstvím fosforečnanů, vypočteným jako celkový obsah P₂O₅, **nejvýše 160 kg.ha⁻¹**.

Tabulka 3 Maximální přípustné zatížení z aplikace čistírenských kalů^{10,11,14,20,21}

Spolková země	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	Cd	Hg
	g.ha ⁻¹						
Horní Rakousko	1 200	360	300	400	100	6	1,5
Štýrsko							
zemědělská půda	3 000	750	175	250	150	5	5
pastviny	1 500	375	88	125	125	2,5	2,5
Burgenland							
zemědělská půda	5 000	1 250	1 250	1 250	250	25	25
louky a pastviny	2 500	625	625	625	125	13	13
Korutany	4 500	1 800	350	600	300	6	6

¹⁹ Landesrecht konsolidiert Oberösterreich: Gesamte Rechtsvorschrift für Oö. Bodenschutzgesetz 1991, Fassung vom 05.07.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LROO&Gesetzesnummer=10000318>.

²⁰ MANFRED, Clara, Christina HARTMANN a Christoph SCHEFFKNECHT. Klärschlamm und Boden: Eintrag von Spurenstoffen auf landwirtschaftlich genutzte Böden [online]. In: . Bregenz: Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg, 2016 [cit. 2022-07-05]. <https://vorarlberg.at/documents/302033/472528/Eintrag+von+Spurenstoffen+auf+landwirtschaftlich+gen%C3%BCtzt+B%C3%B6den.pdf/9517b6c0-c879-adeb-d234-67ef1b906b59>.

²¹ Landesrecht konsolidiert Oberösterreich: Gesamte Rechtsvorschrift für Oö. Bodengrenzwerte-Verordnung 2006, Fassung vom 05.07.2022, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LROO&Gesetzesnummer=20000409>.

2 Přehled statistik a legislativních omezení

2.1 Německo^{22,23,24,25}

2.1.1 Množství zpracovaných kalů

Způsob zpracování německých čistírenských kalů se od roku 2010 postupně proměňuje. Materiálové využití kleslo o 49% za 10 let primárně na úkor termického zpracování a nižší produkce kalu (vyšší redukce množství na ČOV). Termické zpracování z blíže nespecifikované kategorie se více rozlišuje (konkretizuje). Největší nárůst lze přisoudit mono-spalování, které zpracovalo v roce 2019 – 28 % z celkového množství čistírenských kalů.

Tabulka 4 Zpracování čistírenských kalů na území Německa v letech 2010–2019^{22,23,24,25,26}

Rok		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Způsob využití		t.DM.rok ⁻¹									
materiálové využití	v zemědělství	566 295	567 187	541 935	484 464	470 882	427 736	423 497	311 905	280 325	287 484
	rekultivace nebo kompostování	259 312	254 402	235 439	203 712	216 148	190 127	169 439	171 633	122 615	58 597
	jiné materiálové využití	58 052	61 106	58 107	60 692	35 386	33 547	31 064	32 620	33 206	87 642
	suma	883 659	882 695	835 481	748 868	722 416	651 410	624 000	516 158	436 146	433 723
termické zpracování	mono-spalování				230 581	425 108	432 516	460 411	478 493	496 463	490 141
	spolu-spalování				250 326	400 115	446 871	615 928	648 108	761 959	768 961
	blíže nespecifikováno	1 003 749	1 067 431	1 008 830	553 864	252 707	269 292	66 554	63 555	36 766	34 144
	suma				1 034 771	1 077 930	1 148 679	1 142 893	1 190 156	1 295 188	1 293 246
jiné využití		–	–	–	4 232	2 642	2 998	6 293	6 871	15 896	13 120
suma celkově		1 887 408	1 950 126	1 844 311	1 787 871	1 802 988	1 803 087	1 773 186	1 713 185	1 747 230	1 740 089

2.1.2 Legislativa upravující nakládání s čistírenskými kaly (mimo obsah polutantů)

Z důvodu nemožnosti zabránění výskytu polutantů v čistírenských kalech (těžké kovy, organické polutanty) není v Německu čistírenský kal považován za bezpečné hnojivo, což se odráží v Kalovém nařízení 2017 (AbfKlärV³). Toto nařízení upravuje nejen limity pro obsah polutantů (Kapitola 1), ale i možnosti způsobů nakládání pro provozovatele ČOV v závislosti na počtu ekvivalentních obyvatel. Součástí Kalového nařízení je i povinnost zavést do budoucna recyklaci fosforu obsaženého v čistírenských kalech. Recyklace fosforu bude povinná pro všechny ČOV, jejíž kal obsahuje více jak 2 % (20 g) fosforu na kilogram sušiny

²² Pohořelý M., Moško J., Šyc. M., Václavková Š, Skoblia S., Beňo Z., Svoboda k.: Materiálové a energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu. Sborník přednášek a posterů z 28. konference KALY A ODPADY 2018, pp. 29-38. Brno: Tribun EU, 2018 - s. 29-38. ISBN 978-80-263-1408-0.

²³ Pohořelý M. Materiálové a energetické využití stabilizovaného čistírenského kalu, prezentace MŽP, květen 2018.

²⁴ Pohořelý M., Moško, J., Hušek, M. Spalování stabilizovaného čistírenského kalu. Zborník 29. konferencie s medzinárodnou účasťou KALY A ODPADY 2020. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2020 - (Bodík, I.; Hutňan, M.; Szabová, P.), s. 32- 36. ISBN 978-80-973196-1-8.

²⁵ Pohořelý M., Moško J., Hušek M. Spalování stabilizovaného čistírenského kalu pro recyklaci fosforu – náhled do Evropy. Sovak. 2020, 29(6), 12-18.

²⁶ Environment: Water management. Destatis [online]. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2022 [cit. 2022-07-04]. https://www.destatis.de/EN/Themes/Society-Environment/Environment/Water-Management/_node.html

čistírenského kalu. Povinnosti pro provozovatele ČOV vyplývající z kalového nařízení jsou shrnuty v Tabulka 5.^{3,27}

Tabulka 5 Přehled změn v kalové legislativě pro nakládání s čistírenskými kaly v Německu^{3,27}

ČOV	do 50 000 EO	nad 50 000 EO	nad 100 000 EO
nyní	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití možné 	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití možné 	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití možné
2023	<ul style="list-style-type: none"> analyzovat množství fosforu v produkovaném kalu nahlášení plánovaného opatření recyklace P (regenerace, zemědělské využití, jiné nakládání) 		
od 2029	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití možné (jako recyklace P) povinná recyklace P 	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití možné (jako recyklace P) povinná recyklace P 	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití není možné povinná recyklace P
Od 2032	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití možné (jako recyklace P) povinná recyklace P 	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití není možné povinná recyklace P 	<ul style="list-style-type: none"> zemědělské využití není možné povinná recyklace P

Zvyšující se standardy ochrany životního prostředí a uvědomění si nutnosti získávání fosforu, donutili německou legislativu zpřísnit možnosti používání čistírenských kalů na zemědělské půdě. Do roku 2023 mají za povinnost všechny provozy analyzovat kal na obsah fosforu. Pokud množství přesáhne 2 % P v kg sušiny, musí ČOV zajistit jeho budoucí regeneraci. Pro čistírny do 50 000 EO bude nadále možné kaly umísťovat na zemědělskou půdu a tím P regenerovat. Pro provozy nad 100 000 EO a 50 000 EO nebude možné od roku 2029 resp. 2032 zemědělské využití. Kal z těchto provozů bude muset být zpracován některou z technologií umožňujících P-recovery (srážení P v kalu, mono-spalování a zpracování popelů v úpravně apod.). Pokud budou čistírenské kaly obsahovat méně než 2 % P je možné jejich spolu-spalování.^{22, 23, 24, 25}

²⁷ Prezentace Andrea Roskosch, Implementation of Germany's 2017 P-recycling regulation, ESPC4 – 4th European Sustainable Phosphorus Conference, 20 – 22 June 2022, Vienna Austria.

2.2 Rakousko^{22, 23, 24, 25}

2.2.1 Množství zpracovaných kalů

Způsoby a množství zpracovaných čistírenských kalů v Rakousku se po mnohá léta příliš nemění (Tabulka 6). Významnou změnu zaznamenalo pouze skládkování, které kleslo z 8 % na méně 0,2 %. Na blíže nespecifikované termické využití připadá dlouhodobě o něco méně než 50 %. V roce 2019 pouze 21 % čistírenských kalů bylo použito přímo na zemědělské půdě. Nezanedbatelnou skupinu tvoří i jiné využití, v roce 2019 – 33 %, do kterého se řadí kompostování.^{25,28}

Tabulka 6 Zpracování čistírenských kalů na území Rakouska v letech 2010–2019^{25,28}

Rok		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Způsob využití		t.DM.rok ⁻¹									
materiálové využití	v zemědělství	44 358	–	39 940	–	39 626	–	48 313	–	48 170	49 700
	skládkování	20 837	–	13 619	–	3 206	–	63	–	262	390
	suma	65 195	–	53 559	–	42 832	–	48 376	–	48 432	50 090
termické zpracování	blíže nespecifikováno	114 571	–	138 560	–	118 465	–	127 248	–	126 193	106 570
jiné využití		83 039	–	74 188	–	77 747	–	62 315	–	59 855	76 890
suma celkově		262 805	–	266 307	–	239 044	–	237 939	–	234 480	233 550

2.2.2 Legislativa upravující nakládání s čistírenskými kalů (mimo obsah polutantů)²⁹

Přestože se dlouhodobě způsoby a množství nakládání s čistírenským kalem neměnilo, lze do budoucna předpokládat radikální změny a to z důvodu obsahu přítomných polutantů. V současné době je připravována novelizace Vyhlášky o spalování odpadů (Abfallverbrennungsverordnung), jejíž schválení lze předpokládat ve znění:

- od 1. ledna 2030 bude povinné:
 - spalování kalů pro všechny ČOV s více jak 20 000 EO,
 - zpětné získávání 80 % P z popílku (≈ 72 % přítékajícího P),
 - alternativně: zpětné získávání 60 % přítékajícího P v místě ČOV,
 - se současnými technologiemi není dosažitelné,
 - vybízí k dalším inovacím.

²⁸ Sewage sludge production and disposal, Eurostat, 2022, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00030/default/line?lang=en>

²⁹ Prezentace Arabel Amann, Towards a National Phosphorus Recycling Policy in Austria, 4th European Sustainable Phosphorus Conference 2022 (ESPC4), 20th of June, 2022, Vienna

3 Francie

3.1 Množství zpracovaných kalů

Ucelená data o zpracování čistírenských kalů ve Francii jsou k dispozici na stránkách Ministerstva pro ekologickou transformaci³⁰ nebo Eurostatu. Po potřeby této zprávy byla použita zjednodušená dat, která jsou dostupná skrz Eurostat²⁸ (Tabulka 7). Z těchto dat lze vyčíst značnou převahu materiálového využití ($\approx 75\%$) nad termickým zpracováním ($\approx 18\%$). U materiálového využití dlouhodobě převažovala přímá aplikace kalů na zemědělskou půdu, postupně ale docházelo k poklesu na úkor kompostování a v roce 2017 bylo více kalů kompostováno než přímo aplikováno.

Pzn.

Na stránkách Ministerstva pro ekologickou transformaci³¹ jsou dostupné data k jednotlivým ČOV ve Francii <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/data.php>. Tyto data obsahují více jak 80 položek ke každé ČOV, včetně informace o množství EO, průtoků, zpracování kalů, plnění povinností, typů recipientů nebo zvláštních opatření. Tyto stránky představují transparentní, dostupný zdroj informací pro kontrolní orgány, laickou i odpornou veřejnost v oblasti ČOV. Takovéto stránky obsahující dostupná data a informace k ČOV v České republice chybí.

Tabulka 7 Zpracování čistírenských kalů na území Francie v letech 2010–2017²⁸

Rok		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Způsob využití		t.DM.rok ¹									
materiálové využití	v zemědělství	424 000	443 000	417 000	369 000	421 000	378 000	351 000	299 000	–	–
	kompostování	197 000	253 000	245 000	244 000	305 000	278 000	287 000	318 000	–	–
	skládkování	43 000	46 000	42 000	31 000	31 000	8 000	6 000	13 000	–	–
	suma	664 000	742 000	704 000	644 000	757 000	664 000	644 000	630 000	–	–
termické zpracování	blíže nespecifikováno	181 000	199 000	208 000	161 000	171 000	138 000	136 000	149 000	–	–
	jiné využití	23 000	33 000	38 000	22 000	58 000	31 000	21 000	30 000	–	–
suma celkově		868 000	974 000	950 000	827 000	986 000	833 000	801 000	809 000	–	–

3.1.1 Legislativa upravující nakládání s čistírenskými kaly (mimo obsah polutantů)

Francouzská legislativa v současné době necílí na postupný zákaz využívání čistírenských kalů na zemědělské půdě a P-recovery jako Rakousko nebo Německo. Nastavené legislativní hodnoty (Tabulka 1) jsou o něco benevolentnější než limitní hodnoty pro německé či české kaly, zvláště u těžkých kovů v podobě Cd, Hg nebo Pb.

Přestože se materiálové využití v zemědělství ve formě přímé aplikace, či kompostu těší ve Francii velké oblibě, začínají se objevovat hlasy pro zpřísnění podmínek a vyšší ochranu životního prostředí.

³⁰ Téléchargement des données. Ministère de la Transition écologique [online]. Paříž: Ministère de la Transition écologique, c2022, 2022 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/#/>

³¹ Interactive des données des statistiques. Ministère de la Transition écologique [online]. Paříž: Ministère de la Transition écologique, c2022, 2022 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/data.php>

Například:

- AMORCE
 - Enquête sur la valorisation des boues d'épuration (Průzkum týkající se obnovy kalů z čistění odpadních vod)
 - přímá aplikace na půdu se stává problematická – nedostatek odběratelů,
 - vzrůstá obliba kompostů.³²
- Le Centre AntiPoison Animal et Environnemental de l'Ouest (Západní centrum pro otravy zvířat a životního prostředí (CAPAE-Ouest))
 - Les boues de station d'épuration (Kal z čistění odpadních vod) –
 - upozornění a rizika spojená s přítomností patogenů, organických a anorganických polutantů).³³
- notre-planete.info (naše planeta.info)
 - Pourquoi les terres agricoles européennes sont polluées par des microplastiques? (Proč je evropská zemědělská půda znečištěná mikroplasty?)
 - problematika šíření mikroplastů přes aplikaci čistírenských kalů.³⁴

4 Závěr

Přístupy jednotlivých zájmových zemí i samotné Evropské unie se liší. Čistírenský kal je zdroj živin a organické hmoty, ale nesmí se zapomenou na přítomnost velkého množství různých kontaminantů jako jsou těžké kovy, patogeny nebo celá škála organických polutantů (např. PAU, PCB, PFAS, léčiva, endokrinní distributory nebo mikroplasty ...). Ne pro všechny tyto látky existují platné limity, přesto jsou v kalu obsažené. Státy jako Rakousko nebo Německo se z důvodu předběžné opatrnosti (vyšší ochrany životního prostředí) rozhodli postupně omezovat množství kalů, které je legislativně možné aplikovat na zemědělskou půdou. Aby nedošlo ke ztrátám živin, zavazují provozovatele hledat možnosti recyklace fosforu, ať ze samotného kalu nebo vzniklého popelu po mono-spalování. Technologie na P-recovery zažívají v současné době vědeckotechnický boom, naplňují předpoklady cirkulární ekonomiky a představují naději pro evropské hospodářství, které je v tuto dobu z 99 % závislé na dovozu fosforu z nestabilních regionů.

³² Enquête sur la valorisation des boues d'épuration. VILLEURBANNE: AMORCE, 2019.

³³ Les boues de station d'épuration. CAPAE-Ouest [online]. CAPAE-Ouest, c2022 [cit. 2022-07-05]. <https://www.centre-antipoison-environnemental.com/boues-station-epuration.html>

³⁴ LIMES, SINE. Pourquoi les terres agricoles européennes sont polluées par des microplastiques?. *Notre-planete.info* [online]. notre-planete.info, 2022 [cit. 2022-07-05], <https://www.notre-planete.info/actualites/4935-terres-agricoles-boues-epuration-microplastiques>.