

Porovnání obsahu a biologické dostupnosti fosforu ve vybraných čistírenských kalech

Comparison of the content and bioavailability of phosphorus in selected sewage sludges

Daniel Pliska¹, Dominik Matýsek², Jiří Wanner³

INFORMACE O ČLÁNKU

DOI 10.35933/ENTECHO.2022.002

HISTORIE

Datum doručení: 22. 4. 2022

Datum revize: 10. 8. 2022

Datum akceptace: 16. 8. 2022

AFILACE

Ústav technologie vody a prostředí
VŠCHT Praha

Technická 5, 166 28 Praha 6

¹ email: pliskad@vscht.cz

ORCID ID 0000-0001-6305-4485

² email: matysekd@vscht.cz

ORCID ID 0000-0002-9760-5641

³ email: jiri.wanner@vscht.cz

ORCID ID 0000-0003-0788-995X

KLÍČOVÁ SLOVA

Fosfor; čistírenský kal; Mehlich III; biologická dostupnost fosforu

KEYWORDS

Phosphorus; sewage sludge; Mehlich III; phosphorus bioavailability

ABSTRAKT

Současná společnost cílí na minimalizaci či recyklaci odpadů. Můžeme recyklovat plasty, sklo nebo v přeneseném smyslu přírodní zdroje, které jsou konečné. K těmto neobnovitelným zdrojům patří také fosfor. Fosfor je pro člověka nepostradatelný, protože jej využívá především pro hnojení zemědělských polí. Bez něj by produkce potravy byla značně nižší a nebylo by možné uživit současnou populaci lidí. Fosfor je na pole nejčastěji dodáván v průmyslových hnojivech, obsahující také dusík a draslík. Jejich alternativou jsou různé odpadní proudy, jako je hnůj nebo čistírenské kaly. Kaly jsou svým složením do jisté míry podobné hnojivům. Kromě jiných parametrů je u nich potřeba vyhodnotit jejich obsah biologicky dostupného fosforu. Pro tento účel byla zkoumána původně půdní metoda pro vyluh a následné stanovení fosforu využívající roztok Mehlich III. Zkoumány byly různé typy kalu (biologický, biologicko-chemický a chemický) v porovnání se standardy fosforečnanů, které se v kalech nejčastěji vyskytují. Biologická dostupnost fosforu ve zkoumaných kalech byla podobná, nejvyšší byla v kalu biologicko-chemickém.

ABSTRACT

Today's society aims to minimize or recycle waste. We can recycle plastics, glass or, figuratively speaking, natural resources that are finite. Phosphorus is one of the non-renewable resources. Phosphorus is essential for humans because it is used to fertilize agricultural fields. Without it, food production would be considerably lower and it would not be possible to feed such a huge population of people. Phosphorus is most often supplied to the field in industrial fertilizers, which also contain nitrogen and potassium. Alternative fertilizers are various waste streams such as manure or sewage sludge. The composition of the sludge is, to some extent, similar to fertilizers. Among other parameters, it is necessary to evaluate their content of bioavailable phosphorus. For this purpose, the original soil method for leaching and subsequent determination of phosphorus using Mehlich III solution was investigated. Different types of sludge (biological, biochemical and chemical) were investigated in comparison with phosphate standards, which occur most frequently in sludge. The bioavailability of phosphorus in the examined sludges was quite similar compared to each other; it was the highest in the biochemical sludge.

1 Úvod

Moderní společnost se stále více pokouší efektivně využívat svých zdrojů a snižovat objemy odpadních proudů (Yu et al., 2021), případně jejich vznikům zabránit (Nižetič et al., 2019). Proto se z mnoha odpadních proudů stávají alternativní zdroje různých důležitých, až kritických surovin. Ke kritickým surovinám patří také fosfátová hornina (Santos et al., 2021). Fosfor jakožto makrobiogenní prvek je nedílnou součástí metabolických drah rostlin, např. fotosyntézy, respirace, atd. (Khan et al., 2010) i živočichů včetně člověka (Arnout a Nagels, 2016). Lidské tělo není schopné si fosfor syntetizovat, a proto jej musí získávat ze své potravy. Se stále narůstající lidskou populací je tak nutné produkci potravin podpořit (Braak et al., 2016). Z toho důvodu se v zemědělství na pole aplikují nejrůznější hnojiva doplňující v různých formách hlavně dusík, draslík a fosfor. Fosfor je pro výrobu fosfátových hnojiv získáván z fosfátových hornin – apatitů (Linderholm et al.,

2012). Vzhledem k tomu, že cyklus fosforu neprobíhá skrze atmosféru, oproti například stejně důležitému dusíku, je fosfor v krátkodobém měřítku považován za neobnovitelný zdroj (Braak et al., 2016). Jak ovšem zmiňuje značné množství autorů (Ali a Kim, 2016; Monea et al., 2020; Quist-Jensen et al., 2018; Rossi et al., 2018; Sano et al., 2012), docházející zásoby fosfátových hornin vedou k potřebě nalezení jejich nových zdrojů.

K odpadním proudům bohatým na fosfor patří například hnůj, kejda nebo odpadní voda. Hnůj je pro zúrodnění zemědělských polí používán desítky let právě kvůli jeho obsahu fosforu, dusíku, draslíku a organických látek. Kde však často dochází k nenávratným ztrátám fosforu, jsou odpadní vody či zpracování potravin. Například recyklace fosforu z odpadních vod je vcelku náročná, protože se zde nachází ve velmi zředěné koncentraci. Pro odstranění fosforu z odpadních vod je možné použít dvou metod. První z nich je biologické odstraňování

fosforu za použití procesu aktivovaného kalu. Další možností je odstraňovat jej pomocí srážení solemi železa, hliníku (Arnout a Nagels, 2016) či vápníku (Braak et al., 2016). Pro odstranění fosforu je možné využít také kombinaci biologických a chemických metod. Při odstraňování fosforu z odpadních vod dochází k jeho zakoncentrování v přebytečném kalu (Arnout a Nagels, 2016; Braak et al., 2016). Vznikají tak tři různé typy kalu: čistě biologický, biologicko-chemický (ze simultánního srážení) a čistě chemický (z terciárního dočištění). Aplikace čistírenského kalu na pole je obecně považována za prakticky nejlepší možnost využití látek v něm obsažených. Kal obsahuje značné množství dusíku, fosforu a draslíku, a také organických látek vhodných pro obohacování zemědělské půdy (Donatello a Cheeseman, 2013). Distribuce forem fosforu (intracelulární nebo minerální) v kalu je závislá na použitém procesu čištění. Fosfor zachycený v kalu, pokud je v minerální formě (tedy vysrážený), je však pro rostliny těžko dostupný (Braak et al., 2016). V kalu rovněž dochází k zachycení těžkých kovů např. kadmium, olovo nebo rtuť (Lindberg et al., 2007). Obavy kromě akumulace těžkých kovů v půdě vzbuzuje také možný přenos patogenů přítomných v kalu. Kvůli těmto důvodům může být použití kalu pro potřeby hnojení nežádoucí, nevhodné či přímo zakázané (Donatello a Cheeseman, 2013). Proto jsou nadále studovány další způsoby recyklace, které těžké kovy během procesu získávání fosforu odstraní. Příkladem takového procesu je spalování kalu a získání fosforu ze vzniklého popílku jako kyseliny fosforečné (Donatello a Cheeseman, 2013) nebo struvitu (Arnout a Nagels, 2016; Xu et al., 2012).

Jelikož množství vyprodukovaného a využitého kalu v jednotlivých letech na území ČR neklesá (viz graf na Obr. 1), nezdá se, že by se od jeho použití v brzké době upouštělo (EUROSTAT, 2022). Proto by bylo vhodné, aby existovala metoda pro určení vhodnosti daného kalu s ohledem na biologickou dostupnost fosforu pro rostliny. Tato práce se zabývá porovnáním obsahu fosforu a jeho biologické dostupnosti pro jednotlivé typy kalu pouze po jejich usušení a namletí. Kvůli neexistujícím normám pro stanovení biologické dostupnosti fosforu v čistírenském kalu v České republice bylo nutné převzít metodu z jiného oboru. Vzhledem k použití fosforu primárně pro výrobu hnojiv, kde se využívá až 80 % vytěžených fosfátů (Shu et al., 2006), bylo příhodné hledat alternativy v metodách používaných pro půdy. Z toho důvodu byla převzata metoda pro stanovení rozpustného fosforu v půdě vycházející z článku autora Mehlich (1984).

2 Experimentální část

2.1 Vzorky kalů a jejich předúprava

Čistírenské kaly byly získány z mechanicko-biologických čistíren odpadních vod. Kaly byly odebrány z aktivace se simultánním srážením pomocí Fe^{3+} solí (BCH – biologicko-chemický), terciárního dočištění

srážením Fe^{3+} solemi (CH – chemický) a aktivace bez simultánního srážení (se zvýšeným biologickým odstraňováním fosforu, tzv. EBPR – odstraňování fosforu pouze biologickým procesem). Vzorky kalu byly před vlastními experimenty zahušťovány v dvoulitrových válcích. Po odstranění supernatantu byla přebytečná voda obsažená v kalu odpařena, kal byl vysušen při 105 °C a namlet.

2.2 Výluh dle Mehlich (1984) roztokem Mehlich III

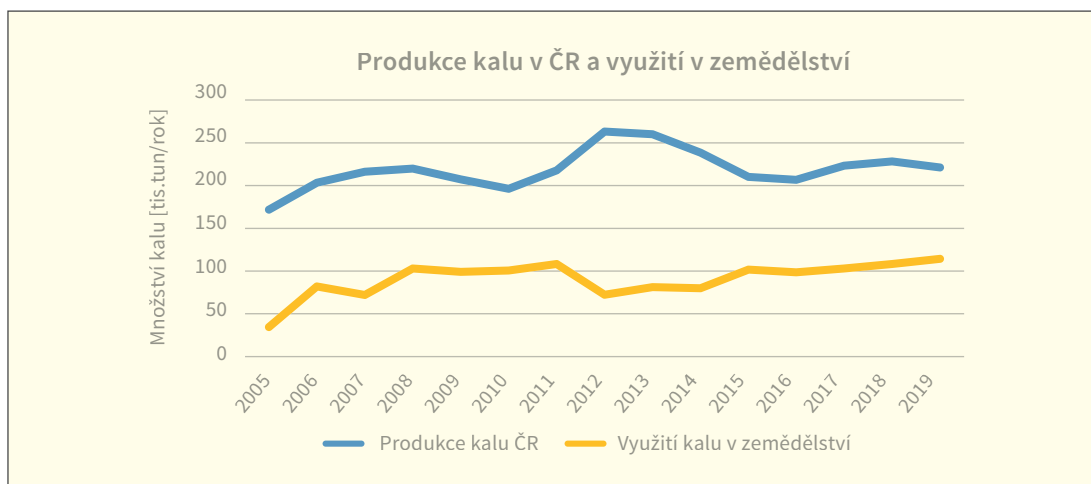
Biologická dostupnost fosforu z jednotlivých vzorků kalů byla stanovena optimalizovanou metodou vycházející z Mehlicha (1984). Roztoky připravené pro extrakci byly uchovávány v plastových nádobách při laboratorní teplotě. Pro přípravu extrakčního roztoku bylo třeba připravit zásobní roztok fluoridu amonného s Chelatonem III. Do 100ml odměrné baňky bylo přidáno asi 70 ml destilované vody, do které bylo následně přidáno 13,9 g fluoridu amonného a 7,4 g disodné soli kyseliny ethylendiamintetraoctové (Chelaton III). Po rozpuštění byla baňka doplněna po rysku.

Extrakční roztok Mehlich III byl připraven rozpuštěním 20 g dusičnanu amonného v 800 ml destilované vody. K této směsi byly přidány 4 ml zásobního roztoku, 11,5 ml koncentrované kyseliny octové a 0,825 ml kyseliny dusičné (65% w/w). Po převedení do 1 000 ml odměrné baňky byl objem doplněn po rysku.

Pro extrakci bylo do polyethylenové Erlenmeyerovy baňky o objemu 250 ml naváženo 0,1–0,2 g vzorku vysušeného kalu. Poté bylo do nádoby přidáno 100 ml extrakčního činidla Mehlich III. Uzavřená nádoba byla umístěna na třepačku po dobu 10 minut (250 ot/min). Po uplynutí této doby byla suspenze ihned zfiltrována. V případě, že filtrát nebyl čirý, byla filtrace zopakována. Extrahovaný fosforečnanový fosfor byl následně stanoven podle normy ČSN EN ISO 6878 (757465): Spektrofotometrické stanovení rozpuštěných orthofosforečnanů.

2.3 Mineralizace vzorků kalu

Aby bylo možné porovnat celkové množství fosforu ve vzorku kalu a určit tak procentuální množství biologicky dostupného fosforu, bylo nutné provést mineralizaci vzorků. Vzorky kalu (s maximální navázkou 0,5 g) byly umístěny do mineralizační patrony a následně bylo přidáno 28 ml lučavky královské. Patrony byly umístěny do stojanu pod zpětnými chladiči. Tato směs byla ponechána 18 hodin v kontaktu a následně byla směs zahřívána na teplotu 130 °C po dobu 2 hodin. Po ochlazení a odvětrání NO_x vzniklých při reakci byla směs zfiltrována přes kyselinovzdorný filtrační papír. Filtrát byl jímán do 100ml odměrných baněk a následně doplněn destilovanou vodou po rysku. Ve filtrátu byla následně stanovena koncentrace fosforečnanového fosforu podle normy ČSN EN ISO 6878 (757465): Spektrofotometrické stanovení rozpuštěných orthofosforečnanů.



Obr. 1: Produkce kalu a jeho využití v zemědělství v České republice v rozsahu let 2005–2019 (EUROSTAT, 2022)

3 Výsledky

V rámci této práce byly analyzovány různé typy kalů. Při testech byly použity vzorky kalu chemického (označeného jako CH1), biologického (EBPR, označeného B1) a biologicko-chemického (označeného jako BCH1, BCH2 a BCH3). Navážky vzorků byly oproti množství uvedeném Mehlichem (1984) zmenšeny, aby nebylo nutné výrazně ředit získaný extrakt a bylo možné jej dobře filtrovat. Pro uvedené experimenty byl získán jeden vzorek biologického a jeden vzorek chemického kalu, a tři vzorky kalu biologicko-chemického, odebrané v odlišné dny. V **Tab. 1** jsou uvedeny výsledky pokusů s vybranými fosforečnanovými standardy ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, AlPO_4 , $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) a se vzorky různých typů kalů.

Tab. 1: Výsledky vyluhovacích pokusů s roztokem Mehlich III a mineralizace vzorků kalu (příp. vypočteného množství fosforečnanového fosforu u jednotlivých standardů)

Vzorek	Mehlich III – biologicky dostupný fosfor	Výpočet / Mineralizace
	P- PO_4^{3-} [mg/g sušiny]	
$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	52,7	166
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	86,0	99,8
AlPO_4	111	254
$\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	35,1	139
CH1 kal	25,6	40,7
BCH1 kal	15,5	48,2
BCH2 kal	17,5	26,3
BCH3 kal	19,6	30,4
B1 kal	13,6	26,8

Jsou zde také uvedené výsledky mineralizace kalů a vypočtené hodnoty teoretického množství fosforečnanového fosforu v jednotlivých standardech. Při pokusech byly použity fosforečnanové standardy železité (dva různé, s rozdílnou hydratací), hlinité a vápenaté. Vybrány byly standardy právě těchto sloučenin, protože se v čistírenském kalu (při použití technologie srážení fosforu) vyskytují nejčastěji. Tyto standardy byly použity pro porovnání s reálnými vzorky kalů, kde se tyto sloučeniny v menší míře a čistotě vyskytují. Na **Obr. 2a,b** je pak možné vidět relativní množství fosforečnanového fosforu ve vzorcích kalu a standardů v porovnání s celkovým množstvím získaným při mineralizaci. Standardy byly porovnány navzájem mezi sebou a je možné vidět, že největší množství biologicky dostupného fosforu se na-

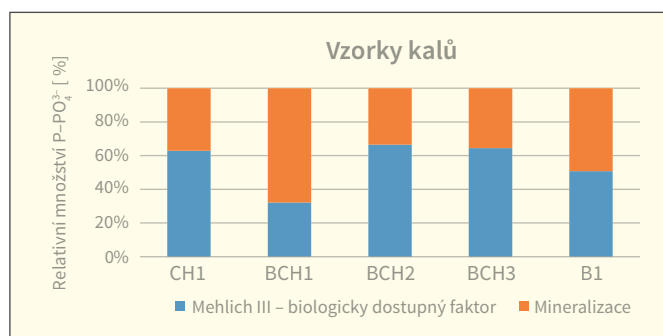
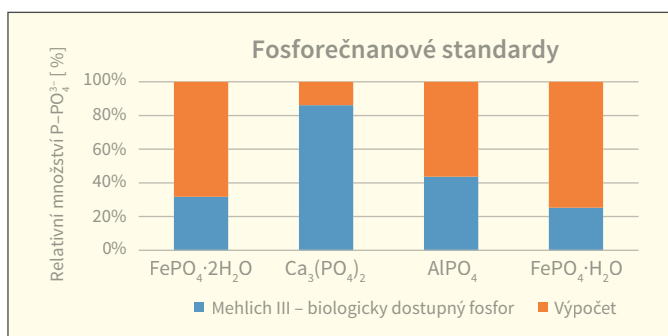
chází ve fosforečnanu vápenatém. V reálných vzorcích kalu je podle výsledků nejvíce biologicky dostupného fosforu v kalech biologicko-chemických.

4 Diskuze

Při pokusech bylo použito pět vzorků kalu a čtyři různé standardy. Nejlépe biologicky dostupný fosfor byl ve vzorku fosforečnanu vápenatého, a to až 85 %. Ten je také složením molekuly nejvíce podobný apatitům, které jsou běžně využívány pro výrobu fosfátových hnojiv. Pokud by jej nebylo možné přímo použít na pole z důvodu nižší rozpustnosti než u běžných fosfátových hnojiv, bylo by možné využít tuto sloučeninu jako vstupní materiál pro výrobu superfosfátu. Dále se ukázalo, že fosfor vázaný s hliníkem (fosforečnanem hlinitým) je lépe dostupný než se železem, i když oproti fosforečnanu vápenatému obsahuje dostupného fosforu asi o polovinu méně. Nejhůře na tom jsou fosforečnany železité, u kterých se ukazuje vliv hydratace na dostupnost fosforu. Z grafu je patrné, že více biologicky dostupného fosforu obsahují fosforečnany železa, které krystalizují v dihydrátové formě zatímco tetrahydrátová forma těchto solí obsahuje daleko méně biologicky dostupného fosforu. V případě, že by tyto poznatky byly aplikovány na jednotlivé vzorky kalů z ČOV, je jasné, že stupeň vysušení kalu může hrát značnou roli v dostupnosti fosforu. Z pokusů se standardy je patrné, že významný vliv na biologickou dostupnost fosforu z aktivovaného kalu bude mít především volba koagulantu, který se využívá na jeho odstranění z odpadní vody.

Ze vzorků kalu se nejlépe jeví kal biologicko-chemický, který ve dvou ze tří případů převyšuje kal chemický i biologický. Biologicko-chemický kal BCH1 se značně lišil procentuálním zastoupením biologicky dostupného fosforu od zbylých dvou vzorků, a to zřejmě změnami na čistírenské lince v době odběru. Z pohledu množství dostupného fosforu by to tedy znamenalo, že biologicko-chemický kal je nevhodnější pro zemědělské využití. Tento kal však obsahuje vyšší množství železa. I přes to, že železo není toxické, docházelo by pravděpodobně v horizontu několika let k jeho hromadění v půdě. Vyhláška č. 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě v aktuálním znění však nikterak nelimituje množství železa v upravených kalech při aplikaci na půdu. Překvapivě podobné množství dostupného fosforu obsahuje také kal chemický, ten však obsahuje ještě větší množství železa a pravděpodobně i jiných kovů. Proto by tento kal byl vhodný spíše pro jiný způsob zpracování, jako je výluh silnými protolyty s následnou separací fosforu, železa a dalších kovů. Kal z ČOV, která provozuje biologický stupeň odstraňování fosforu, obsahuje nižší koncentraci kovů vázaných s fosforem. Tento biologický kal obsahuje značné množství organických látek a daleko nižší obsah kovů, narozdíl od chemického kalu získaného terciárním srážením na odtoku z ČOV. Tento kal obsahuje značné množství organických látek a zanedbatelné množství kovů. Při experimentech u něj byla zjištěna nejnižší biologická dostupnost, ale rozdíl od ostatních typů kalů činil

Obr. 2: a) Graf poměru biologicky dostupného fosforu a vypočteného množství fosforu v daném standardu, b) Graf poměru biologicky dostupného fosforu a celkového množství fosforu ve vzorcích kalu po mineralizaci



asi 10–15 %. Vzhledem k absenci dávkování jakéhokoli koagulantu či jiných chemikálií je to rozdíl téměř zanedbatelný. Takové množství totiž bylo dosaženo pouhým střídáním kultivačních podmínek. Znamenalo by to tedy, že se vlastnosti biologického kalu mohou vyrovnat nebo dokonce převyšovat vlastnosti dvou zbylých typů kalů s vyšším obsahem biologicky dostupného fosforu.

Vzorky kalů byly také porovnány se standardy. U vzorků biologicko-chemických kalů je možné tvrdit, že fosfor je částečně zachycen ve sraženinách se železem a vápníkem. Vzorek chemického kalu obsahoval sraženin s vápníkem ještě nepatrně méně. Díky těmto zjištěním by bylo možné z pohledu obsahu fosforu alespoň odhadovat složení kalu, v jakých vazbách se fosfor nachází (anorganické fosforečnany nebo organické polyfosfáty) a tak posoudit jeho vhodnost pro použití v zemědělství.

5 Závěr

Z výsledků získaných při experimentech vyplývá, že nejvyšší obsah biologicky dostupného fosforu je v kalech pocházejících z kombinované technologie, a to v biologicko-chemických kalech. Dostupnost fosforu u biologického, chemického ani biologicko-chemického kalu se od sebe výrazně nelišila. Je ovšem potřeba uvědomit si, jaká bude preference koncového zákazníka (tzn. zemědělce). Při porovnání výsledků experimentů s fosforečnanovými standardy byla potvrzena různá biologická dostupnost fosforu. Tyto experimenty také pomáhají odhadnout, v jakých sloučeninách se fosfor v kalu pravděpodobně vyskytuje. Trend aplikace kalů na zemědělskou půdu v České republice rozhodně neustupuje. V Evropské unii je aplikace kalu na půdu v některých státech již zakázána a je možné, že si tento zákaz najde cestu i do ČR. Před aplikací tohoto zákazu je nutno podrobně zhodnotit všechna pozitiva i rizika aplikace čistírenských kalů do půdy. Přesto jsou tyto poznatky relevantní i pro budoucnost, protože v rozvojových zemích teprve teď dochází k řešení problematiky v oblasti čištění odpadních vod a nakládání s kalem. Při budoucích experimentech by bylo vhodné se věnovat biologické dostupnosti fosforu v kalech s jinou úpravou, než je sušení následované mletím.

5.1 Poděkování

Tento výstup vznikl v rámci projektu Specifického vysokoškolského výzkumu – projekt č. A1_FTOP_2022_003.

6 Literatura

- Ali, T. U.; Kim, D.-J., 2016. Phosphorus extraction and sludge dissolution by acid and alkali treatments of polyaluminum chloride (PAC) treated wastewater sludge. *Bioresource Technology, Special Issue on Bioenergy, Bioproducts and Environmental Sustainability* 217, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.017>
- Arnout, S.; Nagels, E., 2016. Modelling thermal phosphorus recovery from sewage sludge ash. *Calphad, Christopher W. Bale Symposium - Thermodynamic Applications, Optimizations and Simulations in High Temperature Processes* 55, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.06.008>
- Braak, E.; Auby, S.; Piveteau, S.; Guilayn, F.; Daumer, M.-L., 2016. Phosphorus recycling potential assessment by a biological test applied to wastewater sludge. *Environmental Technology* 37(11), 1398–1407. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1116612>
- Donatello, S.; Cheeseman, C. R., 2013. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Management* 33(11), 2328–2340. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.024>

- EUROSTAT, 2022. Sewage sludge production and disposal. [cit. 28.04.2022]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/8095fe86-fb97-4457-9ac6-587b63dd3089?lang=en>
- Khan, M. S.; Zaidi, A.; Ahemad, M.; Oves, M.; Wani, P. A., 2010. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – current perspective. *Archives of Agronomy and Soil Science* 56(1), 73–98. <https://doi.org/10.1080/03650340902806469>
- Lindberg, S.; Landberg, T.; Greger, M., 2007. Cadmium uptake and interaction with phytochelatins in wheat protoplasts. *Plant Physiology and Biochemistry* 45(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.01.001>
- Linderholm, K.; Tillman, A.-M.; Mattsson, J. E., 2012. Life cycle assessment of phosphorus alternatives for Swedish agriculture. *Resources, Conservation and Recycling* 66, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.04.006>
- Mehlich, A., 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15(12), 1409–1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Monea, M. C.; Löhr, D. K.; Meyer, C.; Preyl, V.; Xiao, J.; Steinmetz, H.; Schönberger, H.; Drenkova-Tuhtan, A., 2020. Comparing the leaching behavior of phosphorus, aluminum and iron from post-precipitated tertiary sludge and anaerobically digested sewage sludge aiming at phosphorus recovery. *Journal of Cleaner Production* 247, 119129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119129>
- Nižetić, S.; Djilali, N.; Papadopoulou, A.; Rodrigues, J. J. P. C., 2019. Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management. *Journal of Cleaner Production* 231, 565–591. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.397>
- Quist-Jensen, C. A.; Wybrandt, L.; Løkkegaard, H.; Antonsen, S. B.; Jensen, H. C.; Nielsen, A. H.; Christensen, M. L., 2018. Acidification and recovery of phosphorus from digested and non-digested sludge. *Water Research* 146, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.035>
- Rossi, L.; Reuna, S.; Fred, T.; Heinonen, M., 2018. RAVITA Technology – new innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery. *Water Science and Technology* 78(12), 2511–2517. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.011>
- Sano, A.; Kanomata, M.; Inoue, H.; Sugiura, N.; Xu, K.-Q.; Inamori, Y., 2012. Extraction of raw sewage sludge containing iron phosphate for phosphorus recovery. *Chemosphere* 89(10), 1243–1247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.07.043>
- Santos, A. F.; Almeida, P. V.; Alvarenga, P.; Gando-Ferreira, L. M.; Quina, M. J., 2021. From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries. *Chemosphere* 284, 131258. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131258>
- Shu, L.; Schneider, P.; Jegatheesan, V.; Johnson, J., 2006. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology* 97(17), 2211–2216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.005>
- Xu, H.; He, P.; Gu, W.; Wang, G.; Shao, L., 2012. Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Sciences* 24(8), 1533–1538. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60969-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60969-8)
- Yu, K. H.; Zhang, Y.; Li, D.; Montenegro-Marin, C. E.; Kumar, P. M., 2021. Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review* 86, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106492>