

# KAL nad ZLATO

Apríl 2023



INŠTITÚT  
CIRKULÁRNEJ  
EKONOMIKY

Obsah

ABSTRAKT .....	3
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>4</b>
1.1 Cieľ, rozsah a metodológia reportu .....	5
1.1.1 Štruktúra reportu .....	5
1.1.2 Metodológia .....	5
1.2 Terminológia .....	6
<b>2. VZNIK KALU A JEHO SPRACOVANIE NA ČOV .....</b>	<b>6</b>
2.1 Popis technológie čistenia odpadových vôd .....	7
2.1.1 Predčistenie a primárny stupeň čistenia odpadovej vody .....	7
2.1.2 Sekundárny stupeň čistenia odpadovej vody .....	8
2.1.3 Terciárny stupeň čistenia odpadovej vody .....	8
2.2 Spracovanie kalu na ČOV .....	9
<b>3. FINÁLNE ZHODNOTENIE ČISTIARENSKÝCH KALOV .....</b>	<b>11</b>
3.1 Spaľovanie .....	12
3.1.1 Výhody a limitácie .....	13
3.1.2 Produkty .....	13
3.1.3 Legislatíva .....	13
3.2 Pyrolýza .....	14
3.2.1 Výhody a limitácie .....	14
3.2.2 Produkty .....	14
3.2.3 Legislatíva .....	15
3.3 Anaeróbna digescia (na bioplynových staniciach) .....	15
3.3.1 Výhody a limitácie .....	15
3.3.2 Produkty .....	16
3.3.3 Legislatíva .....	17
3.4 Kompostovanie .....	18
3.4.1 Výhody a limitácie .....	18
3.4.2 Produkty .....	19
3.4.3 Legislatíva .....	19
3.5 Priama aplikácia do pôdy .....	20
3.5.1 Výhody a limitácie .....	20
3.5.2 Charakteristika kalu pri priamej aplikácii na pôdu .....	21
3.5.3 Legislatíva .....	21
<b>4. KAL V ŽIVOTNOM PROSTREDÍ .....</b>	<b>22</b>
4.1 Zneškodnenie mikropolutantov z kalu .....	22
4.2 Mikropolutanty a životné prostredie .....	23
4.2.1 Vplyv ťažkých kovov, farmaceutík a mikroplastov na pôdu a životné prostredie .....	23
4.2.2 Keď riedenie nie je riešenie .....	23
4.3 Inšpirácia zo zahraničia: certifikácia REVAQ .....	24
4.4 Analýza kalov na Slovensku .....	25
<b>5. ZÁVER / DISKUSIA .....</b>	<b>26</b>
ZDROJE .....	28

## ABSTRAKT

Čistiarenské kaly ako vedľajší produkt čistenia odpadovej vody obsahujú cenné živiny (fosfor, dusík, draslík a iné) a organickú hmotu, vďaka čomu sa v súčasnej dobe stávajú opakovanou mantrou uzatvárania materiálových a biologických cyklov v obehovom hospodárstve. Živiny, ktoré sa v kale nachádzajú, môžu byť totiž prinavrátené do pôdy, čo by našej spoločnosti umožnilo uzavrieť ďalší z otvorených cyklov živín a zároveň sa priblížiť k udržateľnejšej poľnohospodárskej produkcii. Kal z pohľadu obsahu živín teda môžeme nazvať zlatom, ale aj tu platí: „Nie je všetko zlato, čo sa blyští.“ Kaly môžu obsahovať aj látky škodlivé pre pôdu a životné prostredie, ako napríklad farmaceutiká, mikroplasty, ťažké kovy a ďalšie. Bežne používané technológie tieto prípadné polutanty nevedia v dostatočnej miere odstrániť, a preto sú pri zvažovaní aplikácie kalov na pôdu rozhodujúce faktory ako pôvod kalu (komunálne vody, priemyselné vody a i.), spôsob jeho spracovania na čistiarni odpadových vôd a spôsob jeho finálneho zhodnotenia.

Kal je najčastejšie zhodnocovaný spaľovaním, pyrolýzou, anaeróbnou digesciou na bioplynových staniciach, kompostovaním a priamou aplikáciou na pôdu. S ohľadom na využitie jeho potenciálu, z týchto možností najlepšie vychádza aplikácia kalu na pôdu – či už priama, alebo nepriama formou digestátu z bioplynových staníc alebo kompostu. Je však potrebné brať do úvahy riziko spojené s polutantmi, ktoré môžu byť prítomné vo výsledných produktoch zhodnocovacieho procesu kalu, obzvlášť z dôvodu, že v súčasnosti mnohé z nich nie sú sledované. Pre posun k efektívnejšej a bezpečnejšej recyklácii živín z kalov v slovenských podmienkach môže byť prínosné (i) rozšírenie zoznamu polutantov sledovaných v kaloch, (ii) vytvorenie systému certifikácie kalov, do ktorého budú zapojené všetky relevantné strany, a (iii) prechodné zhodnocovanie kontaminovaného kalu spaľovaním alebo pyrolýzou, pokiaľ nenájdeme lepšie riešenia.

## 1. ÚVOD

Otočíme kohútikom a z batérie nám tečie pitná voda. Umývame ňou riad a odpadová voda odteká cez rúry niekam ďalej. Sprchujeme sa a v odtoku sa strácajú naše nečistoty. Splachujeme toaletu a všetko zázračne mizne preč. Tieto „miesta preč“, kam odpadová voda väčšinou odchádza, sú čistiarne odpadových vôd. Na ČOV, ako ich nazývame, čistíme odpadovú vodu od nečistôt v nej, aby sme vodu mohli bezpečne vypustiť späť do prírody (do vodných tokov) alebo ju znovu využiť. Čistenie splaškových, komunálnych a priemyselných odpadových vôd je zásadné ako pre zdravie ľudí, tak aj pre zdravie nášho životného prostredia.

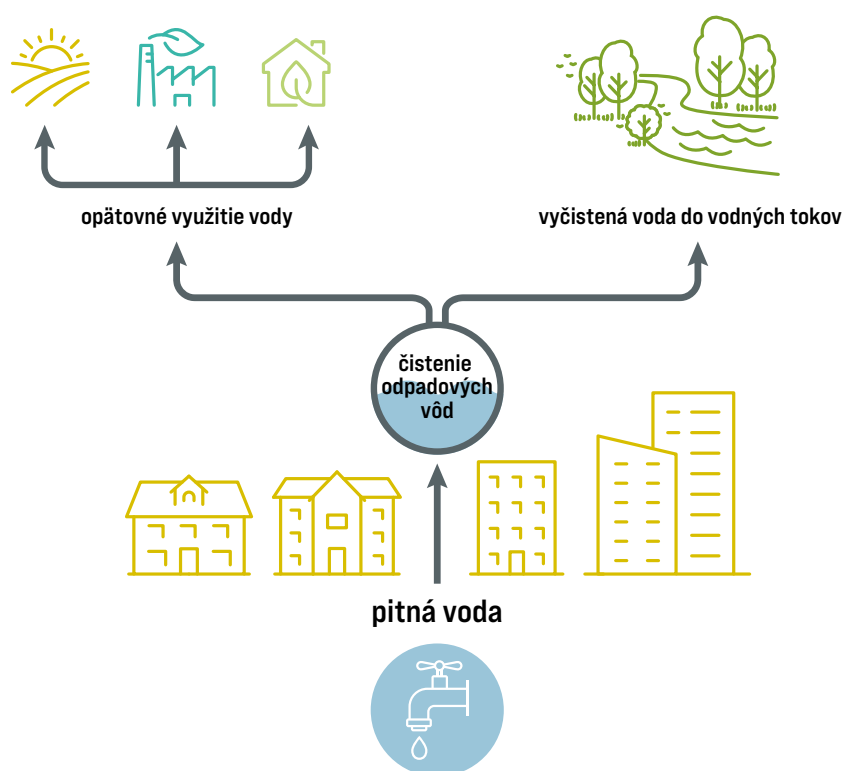


Schéma Odpadová voda

Pri debate o odpadovej vode však často opomíname čistiarenský kal, ktorý je bohatý na živiny a môže mať rôzne využitie v poľnohospodárstve a energetike. Z pohľadu cirkulárnej ekonomiky a cirkulárneho biohospodárstva je najlepšie využitie čistiarenského kalu jeho aplikácia na pôdu. Živiny, ktoré sa v kale nachádzajú, môžu byť totiž prinavrátené do pôdy, čo by našej spoločnosti umožnilo uzavrieť ďalší z otvorených cyklov živín a zároveň sa priblížiť k udržateľnejšej poľnohospodárskej produkcii. Ide o najdôležitejšie prvky, ktoré poľnohospodárstvo využíva na hnojenie – napr. dusík či fosfor. A zároveň znižujeme závislosť od produkcie a spotreby syntetických hnojív, ktorých výroba je pri dusíkových hnojivách energeticky náročná a pri ťažbe fosforu záťažou pre životné prostredie.

**V tomto kontexte Slovensko nezaostáva. Podľa štatistík Výskumného ústavu vodného hospodárstva sme v roku 2021 zhodnotili v pôdnych procesoch cca 68 % čistiarenského kalu (výroba kompostu, rekultivácia skládok a iných plôch, výroba pestovateľských substrátov a pod.) a približne 23 % sme zhodnotili energeticky (napr. výroba bioplynu) [Kozáková et al., 2022]. Zvyšných 9 % kalov skončilo nezhodnotených: na skládkach či dočasne uskladnených na čistiarnach odpadových vôd.**

Zhodnocovanie čistiarenského kalu v pôde má však jeden zásadný environmentálny problém. Kal často obsahuje aj tzv. mikropolutanty, znečisťujúce látky, ktoré nevieme v dostatočnej miere zachytiť klasickými technológiami na čistiarniach odpadových vôd a ktoré nie sú monitorované a legislatívne limitované. Konkrétne môže ísť napríklad o pesticídy, hormóny, rôzne látky narúšajúce endokrinný systém organizmov (endokrinné disruptory), liečivá, mikroplasty a ďalšie známe aj ešte neobjavené problémové látky. V súčasnosti nie sú k dispozícii všetky informácie o konkrétnych dôsledkoch a vplyve na jednotlivé zložky životného prostredia.

Na jednej strane je teda čistiarenský kal významným zdrojom živín, ktoré chceme prinavrátiť do pôdy, na strane druhej je však znečistený mikropolutantmi, ktoré môžu po aplikácii kalu do pôdy škodiť životu v nej a v dlhodobom horizonte ju potenciálne znehodnotiť. Ako by sme sa teda k nemu mali správať? A aká by mala byť naša dlhodobá vízia nakladania s kalom?

## 1.1 CIEĽ, ROZSAH A METODOLÓGIA REPORTU

V tomto reporte sumarizujeme základné informácie o kale z čistiární odpadových vôd, v kontexte jeho najefektívnejšieho možného využitia v biohospodárstve. Keďže ide o dôležitú tému, ktorá doteraz nebola komplexne spracovaná netechnickým jazykom, časť reportu venujeme aj jednoduchému a čo najzrozumiteľnejšiemu úvodu do problematiky čistiarenských kalov – popisu toho, čo je to kal, ako vzniká a ako je možné ho spracovať. Vo zvyšku reportu následne popisujeme možnosti využitia spracovaného kalu v rôznych sektoroch hospodárstva a výzvy spojené s jeho vracaním do životného prostredia.

Kladíme si za cieľ vysvetliť, ako vieme aktuálne najefektívnejšie využívať čistiarenský kal, v kontexte plnenia cieľov Európskej zelenej dohody, cirkulárnej ekonomiky a ochrany životného prostredia. Taktiež chceme zrozumiteľným jazykom popísať a vyhodnotiť súčasný stav nakladania s kalom na Slovensku a popísať možnosti využitia kalu ako zdroja živín, jeho výhody aj problémy, ktoré sú s ním spojené. Report je určený pre všetkých, ktorí majú záujem porozumieť téme nakladania s kalmi a získať informácie o možnej aplikácii kalov a produktov ich spracovania na pôdu. Autori mali snahu vytvoriť dokument aj pre poľnohospodárov, ktorí sú jednou z koncoviek pri zhodnocovaní kalov.

Mimo rozsahu tohto reportu je téma vplyvu technológií kalového hospodárstva ČOV na výstupnú kvalitu kalov (po stránke živín, patogénnych organizmov a polutantov). Taktiež sa v reporte venujeme znečisteniu kalu 3 kategóriami mikropolutantov: ťažkými kovmi, farmaceutikami a mikroplastmi. Budúce rozšírenie tohto reportu o ďalšie kategórie mikropolutantov, ako napríklad hormóny, pesticídy, výrobky osobnej starostlivosti a iné, môže byť prínosom pre dodatočné zvýšenie informovanosti ľudí, ktorí s čistiarenskými kalmi prichádzajú do kontaktu.

### 1.1.1 Štruktúra reportu

V prvej kapitole popisujeme technológiu čistenia odpadovej vody, vznik čistiarenského kalu a rôzne alternatívy spracovania kalu v rámci čistiární odpadových vôd. V druhej kapitole sa zameriavame na zhodnocovanie kalu, porovnávame Slovensko s inými európskymi krajinami a popisujeme jednotlivé možnosti zhodnocovania kalu. A v poslednej kapitole rozoberáme tému mikropolutantov v kale ako jednu z hlavných prekážok, ktoré nám bránia efektívne zhodnotiť čistiarenský kal.

### 1.1.2 Metodológia

Pri príprave tohto reportu sme využili sekundárne zdroje, medzi inými akademické publikácie (učebnice, zborníky, publikácie v odborných časopisoch a i.), prípadové štúdie či analýzy slovenských a európskych inštitúcií. Informácie sme zbierali aj priamo od slovenských odborníkov na témy čistiární odpadových vôd, kalového hospodárstva a vyu-

žitia kalov v biohospodárstve – komunikovali sme s prevádzkovateľmi ČOV, technológmi ČOV, expertmi na odpadové hospodárstvo a pracovníkmi Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

## 1.2 TERMINOLÓGIA

**Aeróbný proces** – proces, ktorý si vyžaduje prístup kyslíka alebo vzduchu

**Anaeróbný proces** – proces, ktorý prebieha bez prístupu kyslíka alebo vzduchu

**(Dnové) sedimenty** – iné pomenovanie pre čistiarenský kal, angl. biosolids

**Hygienizácia kalu** – proces, pri ktorom sa odstraňujú alebo významne redukujú patogénne organizmy v kale

**Mikropolutanty** – vo všeobecnosti sú to látky, ktoré znečisťujú životné prostredie. Sú charakteristické tým, že sú malé a že sa často objavujú iba v malých množstvách, čo komplikuje ich detekciu

**Organická hmota** – hmota zložená z organických látok (látok založených na uhlíku), ktorú nachádzame v prírode, na súši aj vo vode. Ide napríklad o výlučky živých organizmov či pozostatky mŕtvych rastlín, živočíchov a mikroorganizmov

**Patogénne organizmy** – vo všeobecnosti akékoľvek organizmy, ktoré spôsobujú ľudské choroby

## 2. VZNIK KALU A JEHO SPRACOVANIE NA ČOV



ČOV Stará Turá

Čistiarenský kal vzniká pri čistení odpadových vôd, pričom doňho prechádza cca 50 – 80 % znečistenia odpadovej vody (Samešová et al., 2014). Kal má tekutú a pevnú zložku. Na začiatku je charakteristický vysokým podielom vody, no jeho následným spracovaním v rámci čistiarne odpadových vôd vodu postupne odstraňujeme. **Pevná zložka kalu predstavuje bohatý zdroj organickej hmoty, základných živín (dusík, fosfor) a stopových prvkov, ale môžeme v nej nájsť aj rôzne patogénne organizmy a mikropolutanty.** Zloženie pevnej časti kalu ovplyvňuje najmä kvalita a zloženie odpadovej vody prichádzajúcej na čistiarne odpadových vôd a samotné technológie, ktoré využívame pri čistení odpadovej vody a v kalovom hospodárstve.

## 2.1 POPIS TECHNOLOGIE ČISTENIA ODPADOVÝCH VÔD

Čistenie odpadovej vody prebieha na tzv. čistiarnach odpadových vôd. ČOV sú komplexné systémy, ktorých hlavným cieľom je čistenie odpadovej vody vzájomne prepojenými fyzikálnymi, chemickými a biologickými procesmi a reakciami. Odpadová voda (OV) prechádza najmä dvoma stupňami čistenia – primárnym a sekundárnym. Napriek tomu, že na Slovensku sa objavuje prevažne dvojstupňové čistenie vôd, nájdeme aj ČOV, ktoré sú doplnené terciárnym dočistením.

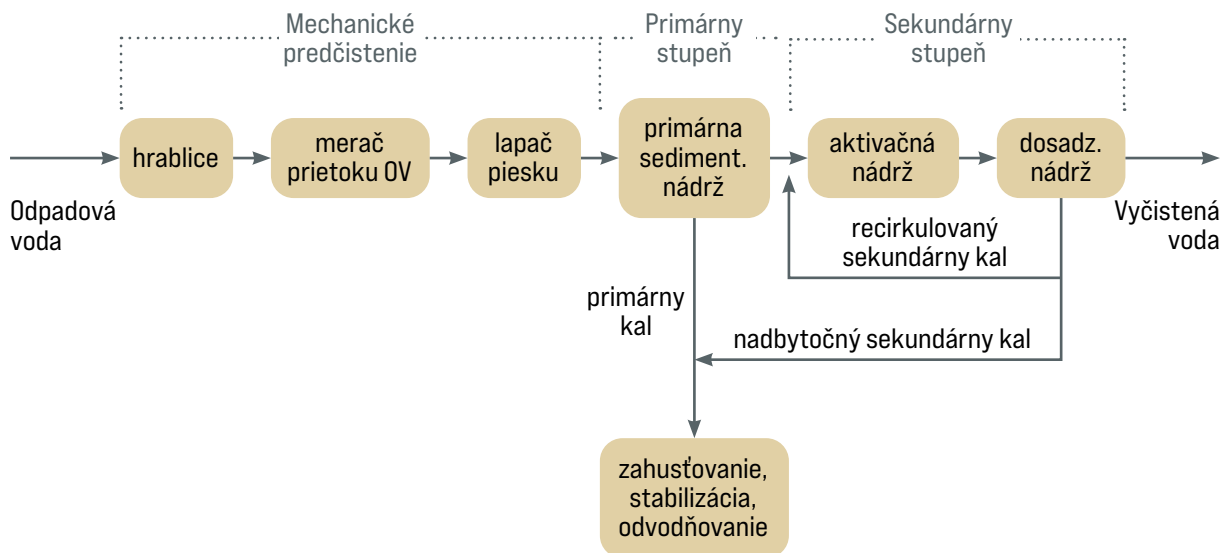


Schéma Fungovanie ČOV

### 2.1.1 Predčistenie a primárny stupeň čistenia odpadovej vody



ČOV Stará Turá

Prvý, primárny stupeň predstavuje mechanické predčistenie OV, kde prebieha odstraňovanie hrubých nečistôt, a zároveň je jeho úlohou ochrana ďalších strojných častí ČOV. Na mechanickom čistení sa podieľajú lapače štrku (záchyt hrubých a ťažkých nerozpustných predmetov), hrablice (ochrana strojného zariadenia a zachytávanie odpadu plávajúceho na hladine OV) a lapače piesku (oddelenie a odstránenie piesku). Nakoniec sú využívané primárne usadzovacie nádrže, ktorých úlohou je usadzovanie kalu vznikajúceho v tomto stupni (primárneho kalu) a jeho následné odvedenie do kalového hospodárstva. OV, ktorá prešla mechanickým predčistením a bola zbavená tuhého znečistenia, pokračuje ďalej do sekundárneho stupňa.

### 2.1.2 Sekundárny stupeň čistenia odpadovej vody



ČOV Stará Turá

Druhý, sekundárny stupeň je biologickým stupňom a jeho úlohou je pomocou mikroorganizmov odstrániť organické znečistenie v OV. Tento stupeň zahŕňa aktivačnú nádrž (odstránenie zvyšku nerozpustných látok a prevažnej časti rozpustného znečistenia) a dosadzovaciu nádrž (sekundárny kal je usádzaný na jej dne). Takto vyčistená OV je vypúšťaná do povrchových vôd, ako sú rieky či potoky (tzv. recipient). V tomto stupni čistenia OV sa jedna časť kalu z konca sekundárneho stupňa (z dosadzovacej nádrže) prečerpá späť na začiatok (do aktivačnej nádrže) a prebytočný kal pokračuje na ďalšie spracovanie v kalovom hospodárstve.

### 2.1.3 Terciárny stupeň čistenia odpadovej vody

Tretí, terciárny stupeň predstavuje pokročilejšiu a prísnejšiu úroveň čistenia OV. Primárne a sekundárne čistenie zvyčajne zabezpečuje, že OV je dostatočne čistá na vypustenie do životného prostredia. Terciárne čistenie môže následne dosiahnuť takú úroveň čistenia vody, aby bola voda bezpečná aj na opätovné použitie v procesoch náročných na kvalitu vody alebo dokonca, aby sa dala využiť ako pitná voda. Terciárne čistenie je prospešné aj v prípadoch, keď ČOV musia vypúšťať vodu do citlivých vodných ekosystémov, príp. keď je OV na prítoku na ČOV značne znečistená mikropolutantmi. Takáto vysoká úroveň čistenia vody sa dosahuje pridaním dodatočných čistiarenských procesov,



ako napr. ozonácie, UV žiarenia, reverznej osmózy, nanofiltrácie a iných. Tieto dodatočné procesy v terciárnom stupni môžu byť efektívne aj pri odstraňovaní mikropolutantov z odpadovej vody (de Boer et al., 2022), no v tomto momente sú často príliš nákladné. Taktiež žiadna z týchto technológií neodstráni všetky mikropolutanty, a preto výberu technológie musí vždy predchádzať analýza OV a pochopenie toho, čo chceme čistiť. Čo sa týka čistiarenskeho kalu, terciárny stupeň spravidla nemá vplyv na zvýšenie kvality kalu – cieľom terciárneho čistenia odpadovej vody je totiž maximálne dočistenie vody tesne pred vypustením z ČOV, takže už potom, čo kal vznikol.

## 2.2 SPRACOVANIE KALU NA ČOV

Okrem čistenia odpadovej vody (jedno-, dvoj- alebo trojstupňovo) sa ČOV starajú aj o základné spracovanie čistiarenskeho kalu. Túto aktivitu ČOV nazývame kalové hospodárstvo. V kalovom hospodárstve sa najčastejšie stretávajú primárny kal, ktorý vznikol pri mechanickom predčistení OV (primárny stupeň), a sekundárny kal, ktorý vystupuje z biologického čistenia OV (sekundárny stupeň), a spolu ich spracovávame s cieľom zjednodušiť finálne zhodnotenie kalu.

Aby sme tento cieľ dosiahli, v rámci kalového hospodárstva na ČOV sa sústreďujeme najmä na:

- zastavenie samovoľného rozkladu organickej hmoty v kale (čím tiež odstraňujeme zápach),
- zníženie množstva patogénnych organizmov, príp. ich úplné odstránenie (tzv. hygienizácia),
- zníženie množstva kalu, hlavne tekutej zložky.

V kontexte spracovania kalu sa často hovorí aj o tzv. stabilizácii kalu. Stabilizovaný kal je kal, ktorý bol do dostatočnej miery zbavený sledovaných patogénnych organizmov a ktorý v bežných podmienkach už iba minimálne zapácha (bol značne spomalený jeho samovoľný rozklad).



T+T Žilina – kompoboxy

V rámci kalového hospodárstva na ČOV sú využívané rôzne technológie a spôsoby spracovania kalu. Medzi aktuálne najrozšírenejšie patria (i) kondicionovanie, zahusťovanie a odvodňovanie, (ii) sušenie, (iii) stabilizácia vápnením, (iv) anaeróbna stabilizácia a (v) aeróbna stabilizácia. Cieľom kondicionovania, zahusťovania a odvodňovania kalu je zmenšiť jeho objem, aby jeho následné spracovanie vyžadovalo menej energie, menej technológií, menej priestoru, a teda bolo aj menej nákladné. Kal je taktiež možné sušiť, čím značne zmenšíme jeho objem, ale taktiež zabezpečíme jeho hygienickú neškodnosť (zničenie patogénnych organizmov) a dobrú spáliteľnosť. Pri stabilizácii vápnením do kalu pridávame pálené alebo hasené vápno, ktoré spôsobujú zvýšenie pH zmesi na hodnotu 12 a viac, čím dochádza k značnej likvidácii patogénnych organizmov. Výhodami vápnenia sú relatívne nízke náklady, efektívne ničenie patogénnych organizmov a v prípade páleného vápna aj zmenšenie objemu. Anaeróbna stabilizácia je proces, ktorý prebieha v špeciálnych vyhnivacích nádržiach prostredníctvom anaeróbnych mikroorganizmov, ktoré bez prístupu kyslíka rozkladajú organickú hmotu v kale. Výhodou tohto procesu je, že jeho vedľajším produktom je aj bioplyn, ktorý vie ČOV využiť ako palivo a znížiť tak prevádzkové náklady. Podobne ako anaeróbna, aj aeróbna stabilizácia využíva mikroorganizmy na rozklad organickej hmoty v kaloch. V prípade aeróbnej stabilizácie však kal prevzdušňujeme alebo pridávame kyslík, čím vytvárame priaznivé prostredie pre aeróbne mikroorganizmy, ktoré kyslík potrebujú pre svoj život. Tento spôsob stabilizácie sa najčastejšie využíva na ČOV, kde anaeróbna stabilizácia nie je dobrým riešením; napríklad na malých ČOV, ktoré neprodukurujú dostatok kalu a nevytvárajú tak podmienky pre efektívnu anaeróbnu stabilizáciu.

**Akú technológiu a aký postup v kalovom hospodárstve zvolíme, do veľkej miery ovplyvňuje zloženie samotného kalu – čo do obsahu živín, to do obsahu polutantov v ňom.** Dobrým príkladom je porovnanie kalu, ktorý prešiel sušením, a kalu, ktorý bol aeróbne stabilizovaný. Kým sušením sa v kale patogénne organizmy úplne eliminujú, pri aeróbnej stabilizácii môže byť kal stabilizovaný iba čiastočne a patogénne organizmy v ňom stále môžu byť prítomné v relatívne veľkých množstvách.

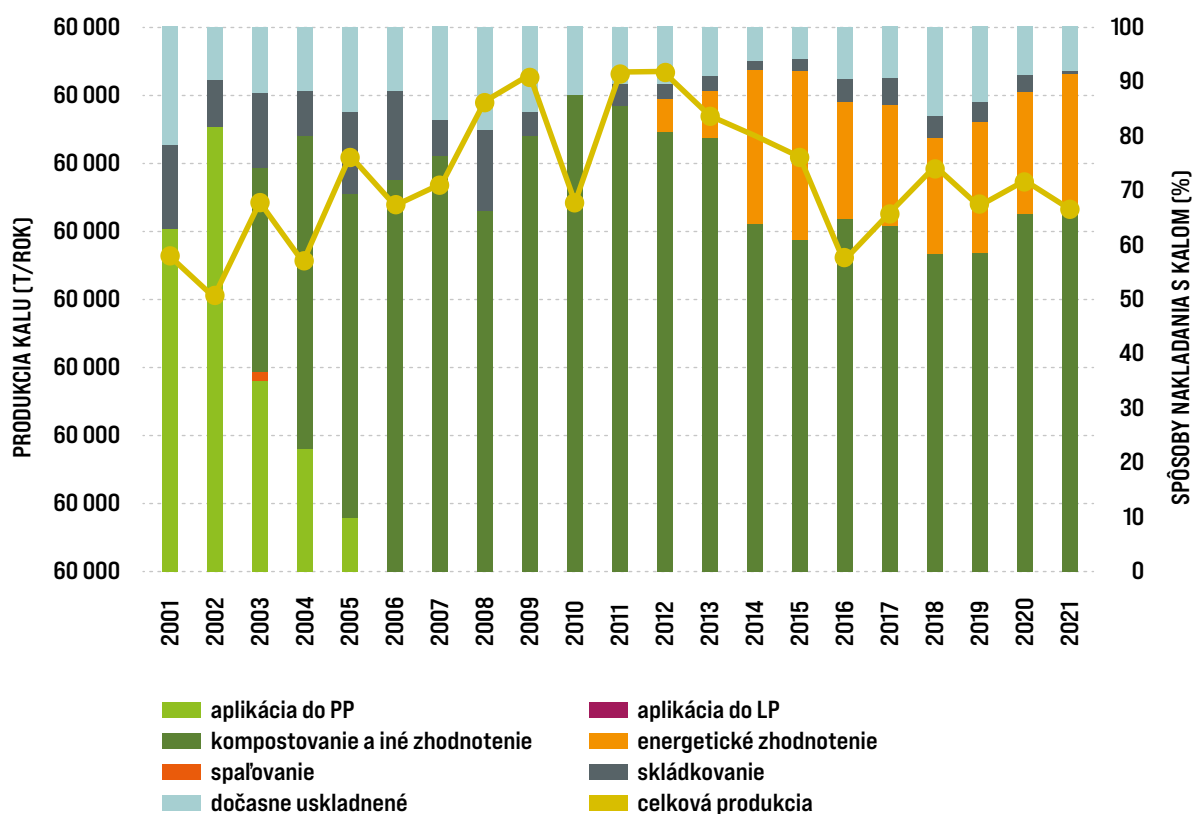


T+T Žilina – komposty

### 3. FINÁLNE ZHODNOTENIE ČISTIARENSKÝCH KALOV

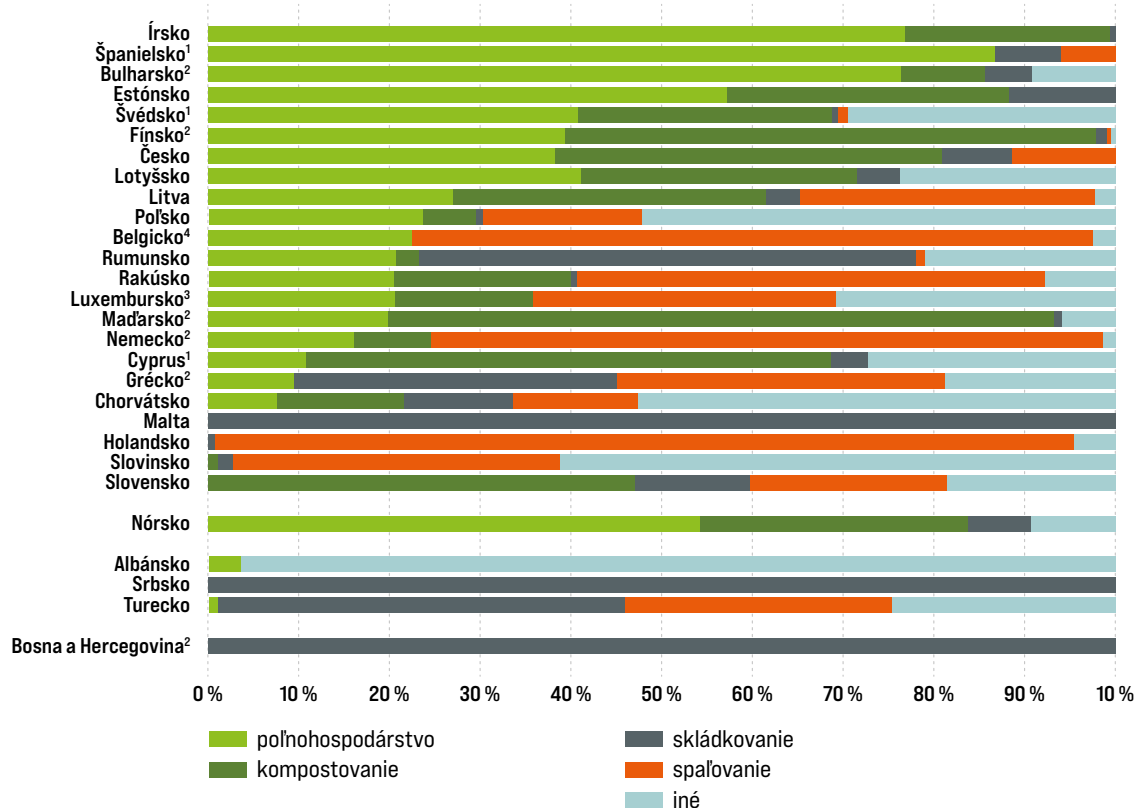
Zvolené technológie v kalovom hospodárstve v mnohých prípadoch predurčujú, ako môže byť stabilizovaný kal efektívne zhodnotený. Z toho vyplýva, že konkrétne technológie v kalovom hospodárstve volíme jednak na základe charakteristiky odpadovej vody pri vstupe na ČOV, ale taktiež na základe toho, ako chceme nakoniec kal zhodnotiť.

Podľa Kozáková et al. (2022) a štatistik Výskumného ústavu vodného hospodárstva za posledných 20 rokov na slovenských komunálnych ČOV ročne produkujeme cca 50 000 – 60 000 ton (sušiny) kalu. V rokoch 2001 a 2002 sa na Slovensku kal prioritne aplikoval priamo do pôdy, no v nasledujúcich rokoch sa podľa štatistik tento spôsob zhodnotenia kalu znížil až na dnešnú nulu. Kompostovanie sa postupne dostávalo do popredia a od roku 2006 je najrozšírenejším spôsobom zhodnocovania kalov. V roku 2014 sa začalo výraznejšie presadzovať energetické zhodnocovanie kalov, ktoré sa v posledných rokoch ustálilo na hodnote cca 21 – 23 % z celkovej produkcie kalov. Okrem kompostovania a energetického zhodnocovania kal z komunálnych ČOV tiež v menšej miere dočasne uskladňujeme a skládkujeme. Dáta pre zhodnocovanie kalu z priemyselných ČOV nie sú známe ani pre Slovensko, ani pre EÚ.



Graf Produkcia kalov z komunálnych ČOV a nakladanie s ním na Slovensku – roky 2001–2021

V krajinách EÚ sledujeme rôzne spôsoby nakladania s kalmi aj v závislosti od lokálnych podmienok (Kozáková et al., 2022). Podľa štatistik Eurostatu (n. d.) v roku 2020 aplikovali do pôd viac ako 50 % ročnej produkcie kalov z komunálnych ČOV iba štyri krajiny: Estónsko, Bulharsko, Španielsko a Írsko. Viac ako 50 % ročnej produkcie kalov z komunálnych ČOV kompostovali tri krajiny: Cyprus, Fínsko a Maďarsko. V Rakúsku, Nemecku, Belgicku a Holandsku zase viac ako polovicu kalov zneškodnili spaľovaním. Skládkovanie kalu z komunálnych ČOV je v EÚ na ústupe, pričom v roku 2020 skládali viac ako 50 % celkovej produkcie kalu iba dve krajiny: Malta a Rumunsko.



Graf Nakladanie s kalom z komunálnych ČOV v Európe – rok 2020

V skratke by sa nakladanie s kalom v Európe dalo zhrnúť tak, že v krajinách, kde je legislatíva prísnejšia, ho zneškodňujú spalovaním, energeticky zhodnocujú alebo kompostujú. Na druhej strane v krajinách, kde je legislatíva voľnejšia, volia ľudia čo najlacnejšie riešenia – priamu aplikáciu do pôdy či skládkovanie. Ako sa však tieto možnosti zhodnotenia od seba líšia? Aké sú ich produkty, výhody a limitácie? Týmto témam sa venujeme vo zvyšku kapitoly.

### 3.1 SPALOVANIE

Spalovanie je tepelná úprava odpadov s prístupom kyslíka, ktorou možno získať (obnoviteľnú) energiu. Týmto spôsobom môžeme zhodnocovať aj čistiarenský kal. Pri spalovaní sa organické látky v čistiarenskom kale spalujú s nadmerným množstvom kyslíka pri teplotách nad 750 °C a ako hlavný plyn sa uvoľňuje CO<sup>2</sup> spolu s ďalšími plynmi (napr. NO<sub>x</sub>). Hlavnými výstupnými produktmi spalovania kalu sú popolček a teplo. Tento proces znižuje hmotnosť a objem kalu, bezpečne v ňom ničí mikropolutanty (okrem ťažkých kovov) a patogénne organizmy a dokážeme z neho získať energiu. Väčšinou však potrebujeme väčšie množstvo energie na vysušenie kalu, aby sme vôbec mohli pristúpiť k spalovaniu (Geffertová & Geffert, 2011).

Kal môžeme tiež spaľovať spolu s inými palivami, napríklad v elektrárňach, spaľovniach alebo cementárňach, s cieľom nahradiť konvenčné palivá. Avšak či spálený samostatne, alebo spolu s inými palivami, spálený kal stratil cenné živiny, ktoré by sme mohli prinavrátiť do pôdy (s výnimkou fosforu, ktorý vieme z popolčeka nákladným spôsobom získať).

### 3.1.1 Výhody a limitácie

Výhody:

- Skoro maximálne zníženie objemu kalu.
- Zničenie patogénnych organizmov a farmaceutík.
- Značné zničenie mikroplastov, aj keď nejaké môžu v popolčeku zostať aj po spálení (Cydzyk-Kwiatkowska et al., 2022).
- Možné získavanie (obnoviteľnej) energie.
- Úplné odstránenie zápachu.

Limitácie:

- Kaly z ČOV s vysokou vlhkosťou počas spaľovania spôsobujú problémy, ako je oneskorenie vznietenia, rozdielna teplota a znížená teplota (Hoang et al., 2022). Kaly je preto optimálne pred spaľovaním značne odvodniť a následne často aj dodatočne vysušiť, čo znamená náklady navyše. Najmä z toho dôvodu má väčšinou spaľovanie kalov negatívnu energetickú bilanciu (Geffertová & Geffert, 2011).
- Zo živín, ktoré sú dôležité v poľnohospodárstve, vieme zo spáleného kalu získať iba fosfor. Ostatné živiny pri spaľovaní strácame.
- Spaľovanie môže produkovať emisie nebezpečných plynov (dioxíny, furány, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, HF a i.).
- Popolček môže obsahovať potenciálne toxické látky, čo sťažuje jeho finálne zhodnotenie, príp. zneškodnenie.

### 3.1.2 Produkty

#### Energia

Čistiarenský kal môže byť považovaný za obnoviteľný zdroj energie. Problémom pri získavaní energie z kalu je, že ho potrebujeme značne vysušiť, čím najprv miňame energiu, aby sme ju následne mohli spaľovaním získať. Podľa Geffertovej & Gefferta (2011, s. 96) tak „vo väčšine prípadov spaľovanie čistiarenských kalov vychádza so zápornou energetickou bilanciou“. Výhodou získavania energie zo spaľovania čistiarenských kalov však je, že pritom vznikajú podstatne nižšie emisie skleníkových plynov ako pri výrobe energie z fosílnych palív – pri rovnakom množstve vyrobenej energie produkuje kal o 58 % menej emisií ako zemný plyn a o 80 % menej emisií ako čierne uhlie a vykurovací olej (Đurđević et al., 2019).

#### Popolček

Vzniknutý popolček zo spaľovania čistiarenskeho kalu môže obsahovať rôzne využiteľné látky ako napr. fosfor, ale aj nebezpečné látky, ktoré predstavujú hrozbu pre životné prostredie. Organické znečisťujúce látky sú spaľovaním zničené, no ťažké kovy v popolčeku zostávajú alebo, ak ich nezachytíme, sa uvoľňujú do ovzdušia (napr. toxické Pb, Cd), v závislosti od ich druhu a množstva, zloženia kalu a nastavenia procesu (Hušek et al., 2022). Práve z tohto dôvodu je dôležité zachovať správny postup jeho zhodnocovania a zneškodňovania. Po odstránení ťažkých kovov z popola možno zvyšný popol opätovne použiť na viaceré účely, vo všeobecnosti však platí, že ak sa ho rozhodneme spracovať, väčšinou je to s cieľom získavania fosforu. Proces získavania fosforu z popolčeka je však v tomto momente nákladnejší ako ťažba fosforu v prírode. Popolček taktiež využívame ako prísadu do rôznych stavebných materiálov, ako sú tehly či cement (Hušek et al., 2022).

### 3.1.3 Legislatíva

Proces spaľovania čistiarenských kalov sa riadi zákonom o odpade, na základe ktorého sa považuje za energetické zhodnocovanie odpadov činnosťou R1 – Využitie najmä ako palivo alebo na získavanie energie iným spôsobom, pokiaľ je vzniknutá energia ďalej využitá.

## 3.2 PYROLÝZA

V procese pyrolýzy sa čistiarenské kaly spracúvajú zvyčajne pri teplotách nad 350 °C bez prístupu kyslíka s cieľom získať tzv. biochar (kalové uhlie), pyrolýzny kondenzát (obsahujúci bioolej) a plyn. Bioolej a plyn využívame väčšinou na výrobu energie. Biochar je v pevnej forme a môžeme ho využiť v elektrárňach, teplárňach alebo v poľnohospodárstve. Vo všeobecnosti pyrolýza značne znižuje hmotnosť a objem kalu, bezpečne v ňom ničí patogénne organizmy a veľkú väčšinu mikropolutantov a dokážeme z neho získať pôdne doplnky vo forme biocharu, spolu s energiou vo forme biooleja a plynu.

Výhodou pyrolýzy je, že pri využití správneho postupu dokáže do veľkej miery imobilizovať ťažké kovy v čistiarenskom kale (Lu et al., 2016; Wang et al., 2021a), čo znamená, že aj keď v biochare ťažké kovy z kalu zostanú, po jeho aplikácii na pôdu naň budú dobre viazané; jednak nebudú putovať ďalej po prírode (napr. pôsobením dažďov), jednak ich rastliny a živočíchy v pôde nedokážu ľahko prijať. Vysoká teplota, ktorá sa dosiahne počas pyrolýzy kalu, je tiež schopná zničiť farmaceutiká prítomné v kale (Mercl et al., 2021; Stenzel et al., 2019; Moško et al., 2021), ale nemusí zneškodniť perzistentnejšie organické polutanty (Hoang et al., 2022). Rovnako sa pyrolýzou pri dostatočne vysokej teplote zbavíme aj veľkého množstva mikroplastov, hoci je možné, že nejaké v ňom predsa len zostanú (Ni et al., 2020).

### 3.2.1 Výhody a limitácie

Výhody:

- Výrazné zníženie objemu a hmotnosti kalu.
- Zničenie patogénnych organizmov a farmaceutík.
- Značné zničenie mikroplastov, aj keď nejaké môžu v produktoch pyrolýzy stále zostať.
- Značné stabilizovanie ťažkých kovov z kalu.
- Oproti spaľovaniu menšie nežiaduce emisie plynov škodlivých pre životné prostredie.
- Možné získavanie energie z produktov pyrolýzy.
- Úplné odstránenie zápachu.

Limitácie:

- Zo živín, ktoré boli pôvodne v kale a ktoré sú dôležité v poľnohospodárstve, síce časť zostáva v biochare, no pyrolýzou sa stávajú menej prístupné pre rastliny a organizmy v pôde. To znamená ich veľmi pomalé uvoľňovanie, a teda nepraktickosť biocharu ako hnojiva. Možný a veľmi zaujímavý potenciál môže byť v biochare ako nosiči anorganických hnojív (Wang et al., 2022).
- Počas procesu pyrolýzy môže vznikáť decht a pevné zvyšky môžu obsahovať toxické prvky (Hoang et al., 2022), čo môže pri nesprávnom zneškodňovaní spôsobiť environmentálne problémy.

### 3.2.2 Produkty

#### Biochar

Biochar je jediným pevným produktom pyrolýzy. Svojimi adsorpčnými vlastnosťami je tento materiál podobný aktívnemu uhlíu (Ševčík, 2020). Biochar má vysokú pórovitosť, širokú mikroštruktúru, vysoký obsah živín, účinnú schopnosť zadržiavať vodu, zlepšuje fyzikálne vlastnosti pôdy, a preto sa používa ako pôdny doplnok (Goldan et al., 2022). Biochar môže byť zdrojom fosforu, dusíka či draslíka, ale má pomalú až strednú rýchlosť ich uvoľňovania (v závislosti napríklad od konkrétnej teploty pyrolýzy). V biochare je taktiež veľké množstvo ťažko rozložiteľného uhlíka, ktoré sa po aplikácii do pôdy rozkladá iba pomaly. Práve z toho dôvodu sa v súčasnosti biochar prezentuje ako jeden zo spôsobov, ako zvýšiť množstvo uhlíka v pôde a mitigovať tak klimatickú zmenu. Biochar môžeme tiež použiť ako účinný

prostriedok na odstránenie ťažkých kovov z kontaminovaných pôd, pretože ich biochar vie imobilizovať (Wang et al., 2021b).

### Bioolej

Biooleje, známe aj pod názvami pyrolýzne oleje či pyrolýzne kvapaliny, sú zvyčajne tmavohnedé kvapaliny s charakteristickým dymovým zápachom. Bioolej je viaczožková zmes, ktorej kľúčovými stavebnými zložkami sú biomasy celulózy, hemicelulózy a lignínu (Czernik, 2004). Bioolej je možné využiť ako palivo do kotlov a pecí, do dieselových motorov alebo do plynových turbín na produkciu tepla či elektriny. Vedci taktiež skúmajú využitie biooleja ako prípravku na zlepšenie kvality pôdy, príp. na zvýšenie účinku hnojív (Fernandez-Akarregi et al., 2010).

### Plyn

Plyn (taktiež nazývaný „syntézny plyn“ alebo „synplyn“) z pyrolýzy kalov sa skladá najmä z oxidu uhoľnatého, oxidu uhličitého, metánu a plynného vodíka, ktoré vieme premeniť na energiu. Dôležitým využitím tohto plynu je jeho použitie ako suroviny na výrobu chemikálií. Môže sa používať aj ako náhrada zemného plynu alebo iných fosílnych palív v rôznych priemyselných procesoch, napríklad pri výrobe cementu, ocele či energie. Novým využitím syntézneho plynu je aj priame poháňanie vodíkových palivových článkov; vodík je jednoducho zachytený z plynu a rafinovaný na použitie v palivových článkoch (Wang et al., 2020).

### 3.2.3 Legislatíva

Proces pyrolýzy čistiarenských kalov sa riadi zákonom o odpade, na základe ktorého sa považuje za zhodnocovanie R3 – Recyklácia alebo spätné získavanie organických látok, ktoré nie sú používané ako rozpúšťadlá (vrátane kompostovania a iných biologických transformačných procesov).

## 3.3 ANAERÓBNA DIGESCIA (NA BIOPLYNOVÝCH STANICIACH)

Anaeróbna digestcia nám umožňuje čistiarenský kal energeticky zhodnotiť v bioplynových staniciach. Technicky z kalu na bioplynovej stanici vyrábame bioplyn a anaeróbne rozložený kal (digestát). V praxi však čistiarenský kal v bioplynovej stanici miešame s ďalšími tokmi organického odpadu (napr. rastlinné zvyšky a iné materiály bohaté na organický uhlík), pretože kal sám osebe neobsahuje dostatok organického materiálu na efektívne energetické zhodnocovanie (Hušek et al., 2022).

Existujú dva typy anaeróbnej digestcie, definované na základe prevádzkových teplôt – mezofilná (35 – 40 °C) a termofilná (55 – 60 °C). Hoci druhá z nich dosahuje lepšie výsledky z hľadiska výťažnosti bioplynu a redukcie patogénnych organizmov, konvenčná mezofilná fermentácia je stále uprednostňovaná vo väčšine komerčných anaeróbnych fermentorov z dôvodu niektorých technických a ekonomických výhod.

### 3.3.1 Výhody a limitácie

Výhody:

- Jedným z produktov procesu je bioplyn, ktorý môžeme využívať na výrobu tepla a elektrickej energie.
- Digestát (resp. separát a fugát) je často do veľkej miery zbavený patogénnymi organizmami (obzvlášť z termofilnej anaeróbnej digestcie, pretože prebieha pri vyššej teplote), relatívne málo zapácha a môže byť využitý ako hnojivo či pôdny kondicionér na zlepšenie kvality pôdy.

Limitácie:

- Aby bol proces anaeróbnej digescie efektívny, kal vo veľkej väčšine prípadov musíme miešať s iným organickým materiálom – obvykle ho teda nevieme touto metódou spracúvať samostatne.
- Anaeróbna digescia sama osebe imobilizuje ťažké kovy iba čiastočne, ak pred ňou alebo po nej nepridáme do procesu ďalšie kroky smerujúce k lepšiemu viazaniu ťažkých kovov do stabilnejších foriem, ako napr. prídanie biocharu či dodatočné hydrotermálne spracovanie (Li et al., 2022a).
- Anaeróbna digescia môže čiastočne znížiť množstvo mikroplastov (Mahon et al., 2017) aj farmaceutík (Bastos et al., 2020), no je dôležité dodať, že výskum tejto témy je iba na začiatku.
- Výsledný produkt, ktorý je aplikovateľný na pole (digestát alebo separát/fugát), zbavujeme organickej hmoty tým, že ju premieňame na bioplyn.



Bioplynová stanica Tvrdošín

### 3.3.2 Produkty

Anaeróbna digescia je chemicko-biologický proces, ktorý premieňa organické látky v kale na bioplyn v anaeróbnom prostredí (bez prístupu kyslíka). Okrem bioplynu vzniká počas tohto procesu aj anaeróbne rozložený kal (digestát) s významným agronomickým potenciálom (Hušek et al., 2022). V niektorých prípadoch je digestát následne mechanicky oddelený, pričom vzniká tzv. separát (pevná časť) a tzv. fugát (kvapalná časť) (Kováčiková, 2018).

#### Bioplyn

V závislosti od procesov a vstupných surovín na bioplynovej stanici môže mať získaný bioplyn rôzny obsah, resp. kvalitu. Typickým zložením bioplynu je najmä metán (cca 55 – 70 %) a oxid uhličitý (cca 30 – 45 %) s malým množstvom ďalších zložiek, ako sú  $H_2S$ ,  $N_2$  alebo siloxány. Energetická hodnota bioplynu sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí 6 – 6,5 kWh/m<sup>3</sup> a závisí od koncentrácie metánu v bioplyne; čím je koncentrácia metánu vyššia, tým je vyššia výhrevnosť bioplynu (Mukawa et al., 2022). Metán v bioplyne sa taktiež čoraz viac považuje za obnoviteľný zdroj energie, ktorý sa môže využívať napr. ako biopalivo na výrobu tepla a elektriny.



Anaeróbná digestcia potravinového odpadu spolu s čistiarenským kalom môže zvyšovať stabilitu procesu anaeróbnej digestcie, čím sa zvyšuje tvorba bioplynu (Morales-Polo et al., 2018). Mnohé štúdie poukazujú na zvýšenie produkcie bioplynu pri vyhŕňaní čistiarenského kalu spolu s iným organickým materiálom (Nikiema et al., 2022).

### **Digestát (ako celok)**

Digestát (známy aj ako „anaeróbny digestát“) obsahuje vysoký podiel využiteľného amónneho dusíka a ďalších základných živín, čím je pre poľnohospodárov výhodnou alternatívou ku konvenčným minerálnym hnojivám. Digestát sa zvyčajne vyrába „ako celok“ (kal s obsahom sušiny približne 5 %), ale môže sa rozdeliť na pevnú (separát) a kvapalnú časť (fugát) (Wrap, 2016). Rozdelenie digestátu na separát a fugát ponúka množstvo výhod, a to najmä z hľadiska lepšej manipulácie, skladovania a aplikácie na pôdu.

Základným predpokladom priamej aplikácie digestátu alebo jeho využitia na hnojenie plodín je obsah sušiny, ktorý by nemal byť nižší ako 10 % (digestát s nízkym obsahom sušiny obsahuje malé množstvá živín a môže upchávať pôdne kapiláry). Redšie digestáty je potrebné ďalej separovať na pevnú a tekutú zložku, príp. ich možno využiť pri výrobe kompostu.

### **Separát (pevná časť digestátu)**

Separát je možné využiť ako surovinu pri výrobe hnojív (komposty, sušené výrobky), substrátov a alternatívnych palív alebo ako podstielku (steliivo). V separáte je výrazne koncentrovaná organická hmota, dusík, fosfor, horčík a draslík (Kováčiková, 2018). Vyznačuje sa väčšou stabilitou, a teda pomalším sprístupňovaním živín rastlinám v pôde. Experimenty so separátom naznačujú, že je vhodné ho využívať na zlepšovanie kvality pôdy (Egene et al., 2021), ale aj ako čiastočnú náhradu za minerálne hnojivá (Maucieri et al., 2017).

### **Fugát (kvapalná časť digestátu)**

Fugát predstavuje hnojivo, ktorého uvoľňovanie dusíka do pôdy (resp. sprístupňovanie rastlinám) je rýchlejšie. Fugát tiež obsahuje vysoký podiel amoniakálneho dusíka, ktorý je rastlinami dobre využiteľný (Kováčiková, 2018). Okrem využitia fugátu ako organického hnojiva je niekedy vrátený naspäť do technológie bioplynovej stanice na opätovné spracovanie.

### **3.3.3 Legislatíva**

Na to, aby bioplynová stanica mohla spracovávať čistiarenský kal, potrebuje podľa zákona súhlas na prevádzkovanie svojho zariadenia na zhodnocovanie odpadov, ktorý obsahuje aj súhlas práve na spracovanie čistiarenského kalu. Samotná aplikácia výsledných produktov anaeróbnej digestcie sa riadi zákonom o hnojivách. Digestát je z legislatívneho hľadiska definovaný ako sekundárny zdroj živín. Producent musí mať povolenie na používanie digestátu ešte pred jeho prvou aplikáciou. V povolení sú uvedené aj podmienky aplikácie, ktoré je potrebné dodržiavať. Rovnako je povinnosťou producenta aj vedenie evidencie a zasielanie ročného hlásenie o množstve/zložení sekundárneho zdroja živín, množstve/zložení vyprodukovaného a zapracovaného čistiarenského kalu. Popísané limitné hodnoty pre hnojivá, ako aj podmienky odberu vzoriek sú popísané vo vyhláske.

Problematiku využitia digestátu z čistiarenského kalu v poľnohospodárstve tiež rieši nariadenie EÚ o hnojivách. Nariadenie zavádza obmedzenia týkajúce sa používania kalov z čistiarní odpadových vôd v hnojivách v EÚ. Hnojivá obsahujúce digestáty vyrobené z kalov z komunálnych čistiarní odpadových vôd od júla 2022 nemôžu získať certifikáciu CE a predávať sa tak na trhu EÚ (Hušek et al., 2022). Obmedzenie sa síce netýka vnútroštátnych trhov a obchodovania na nich, ale ukazuje víziu Európskeho parlamentu a Rady EÚ v nakladaní s kalmi. Tento krok je podľa

Cucina et al. (2021) založený najmä na vysokom riziku kontaminácie kalov pochádzajúcich z čistenia komunálnych odpadových vôd patogénnymi organizmami, mikroplastmi, ťažkými kovmi a organickými mikropolutantmi.

### 3.4 KOMPOSTOVANIE

Kompostovanie je druh aeróbnej digescie, pri ktorej biologický odpad nechávame rozkladať mikroorganizmami za prístupu vzduchu. Najčastejšie sa proces kompostovania zabezpečuje formou prekopávania, kedy materiál pravidelne mechanicky otáčame, aby sme zabezpečili rovnomerné rozloženie organických materiálov a dostatočný kontakt so vzduchom. Teplotu procesu je optimálne udržiavať v rozmedzí cca 55 až 65 °C a vlhkosť na úrovni cca 35 až 65 %, aby rozklad prebiehal primeranou rýchlosťou a aby sme zničili patogénne organizmy (Judd, 2021). Tento proces trvá často mesiace, v závislosti od podmienok.

Čistiarenský kal z ČOV je žiaduce kombinovať aj s inými odpadovými materiálmi, pretože samostatne zväčša nemá optimálne zloženie na kompostovanie (napr. môže mať príliš vysoký obsah vody). Aby sme teda vyrobili vhodný materiál na kompostovanie, kal často miešame napríklad s drevnou štiepkou, so slamou či zeleným odpadom.



*Kompostáreň Lužianky*

#### 3.4.1 Výhody a limitácie

Výhody:

- Značné zníženie objemu kalu.
- Pri dodržaní správnych postupov významne redukuje patogénne organizmy (López-González et al., 2021) aj farmaceutiká (Haiba et al., 2016).

- Správne vyrobený kompost z kalu môžeme použiť ako hnojivo alebo pôdny kondicionér (zlepšenie kvality pôdy).
- Technologicky menej náročný proces (nižšie investičné a prevádzkové náklady).

Limitácie:

- Relatívne dlhé trvanie procesu.
- Rovnako ako v prípade anaeróbnej digescie, aj v prípade kompostovania je optimálne kal miešať s iným organickým materiálom (napr. s drewnou štiepkou, so slamou, s bioodpadom a pod.) – obvykle ho teda nevieme kompostovať samostatne.
- Kompostovanie efektívne neimobilizuje ťažké kovy (Božym & Siemiątkowski, 2018), ak do procesu neprídame ďalšie kroky, ktoré s týmto problémom môžu pomôcť, ako napr. pridanie kaolínu, druhu hliny, na stabilizáciu ťažkých kovov (Chiang et al., 2001).
- Na tom, či kompostovanie degraduje mikroplasty, zatiaľ nie je vo vedeckej komunite zhoda (Gómez & Michel, 2013; Zafar et al., 2013), ale aktuálne prevláda názor, že nedegraduje (Li et al., 2022b; Mahon et al., 2017).
- Pri kompostovaní unikajú plyny (napr. oxid uhličitý či amoniak), ktoré nijako nezhodnocujeme, pričom s niektorými môže byť spojený aj nepríjemný zápach. Využitím správnych postupov, napr. miešaním kalu s biologicky rozložiteľným komunálnym odpadom v žiaducom pomere, však môžeme zápach značne zredukovať.
- Aj keď je tento proces menej náročný na technológie, je potrebné dodržiavať správne postupy. V opačnom prípade nepríde k správne mu vyzretiu kompostu, čo môže mať za následok napr. nedostatočnú hygienizáciu kompostovaného kalu, ale tiež – v prípade aplikácie nevyzretého kompostu do pôdy – konkurenčný boj medzi kompostujúcimi mikroorganizmami a rastlinami o živiny v pôde.

### 3.4.2 Produkty

#### Kompost

Hnojenie kalovým kompostom zlepšuje chemické vlastnosti pôdy. Takéto zlepšenia zahŕňajú zvýšenie koncentrácie organickej hmoty, živín a mikrobiálnej biomasy, ako aj zlepšenie fyzikálnych vlastností, ako je kapacita zadržiavania vody. Tieto vlastnosti môžu byť užitočné aj pri regenerácii degradovaných pôd (Božym et al., 2018).

### 3.4.3 Legislatíva

Aplikácia výsledného produktu kompostovania – kompostu – sa riadi zákonom o hnojivách. Producent musí mať povolenie na používanie kompostu ešte pred jeho prvou aplikáciou. V povolení sú uvedené aj podmienky aplikácie, ktoré je potrebné dodržiavať. Rovnako je povinnosťou producenta vedenie evidencie a zasielanie ročného hlásenie o množstve/zložení kompostu, množstve/zložení vyprodukovaného a zapracovaného čistiarenského kalu. Na kompostovanie je použiteľná najširšia škála materiálov, teda aj čistiarenského kalu, ktoré svojimi vlastnosťami vyhovujú STN 46 5735 – Priemyselné komposty. Tá stanovuje najvyššie prípustné množstvo stopových toxických prvkov v kompostovateľných odpadoch a v kompostoch, ako aj charakteristiky tzv. priemyselného kompostu.

Problematiku kompostovania čistiarenského kalu tiež rieši nariadenie EÚ o hnojivách. Nariadenie zavádza obmedzenia týkajúce sa používania kalov z čistiarní odpadových vôd v hnojivách v EÚ. Hnojivá obsahujúce komposty vyrobené z kalov z komunálnych čistiarní odpadových vôd od júla 2022 nemôžu získať certifikáciu CE a predávať sa tak na trhu EÚ (Hušek et al., 2022). Obmedzenie sa síce netýka vnútroštátnych trhov a obchodovania na nich, ale ukazuje víziu Európskeho parlamentu a Rady EÚ v nakladaní s kalmi. Tento krok je podľa Cucina et al. (2021) založený najmä na

vysokom riziku kontaminácie kalov pochádzajúcich z čistenia komunálnych odpadových vôd patogénnymi organizmami, mikroplastmi, ťažkými kovmi a organickými mikropolutantmi.

### 3.5 PRIAMA APLIKÁCIA DO PÔDY



Na poľnohospodársku pôdu je možné aplikovať iba kal, ktorý je upravený (prešiel anaeróbnou/aeróbnou stabilizáciou, stabilizáciou vápnením alebo inou stabilizáciou, prípadne tepelnou úpravou či dlhodobým skladovaním). Využitie kalov priamou aplikáciou na pôdy je najdostupnejšia a najlacnejšia metóda, pokiaľ sú splnené všetky predpísané limity koncentrácií jednotlivých sledovaných látok (Žerava, 2008). V prípade, že máme k dispozícii nekontaminovaný a hygienicky neškodný kal (bez mikropolutantov či patogénnych organizmov), jeho priama aplikácia na pôdu je všeobecne považovaná za jeden z najvhodnejších spôsobov, ako naplno využiť potenciál kalu.

#### 3.5.1 Výhody a limitácie

Výhody:

- Maximálne využitie potenciálu kalu ako hnojiva a pôdneho doplnku.
- Technologicky, odborne a finančne nenáročný proces, bez potreby budovania dodatočnej infraštruktúry.

Limitácie:

- Na rozdiel od kalu, ktorý bol dodatočne spracovaný (spáľovaním, pyrolýzou, na bioplynovej stanici či kompostovaním), pri kale určenom na priamu aplikáciu je vysoká pravdepodobnosť, že prešiel iba minimálnym nutným spracovaním s cieľom stabilizácie. To znamená vyššie riziko prenosu patogénnych organizmov z kalu na zvieratá a človeka, ako aj vyššie riziko kontaminácie pôdy farmaceutikami, ťažkými kovmi alebo mikroplastmi.

- Značný zápach v prípade, že kal nie je dostatočne stabilizovaný pred aplikáciou na pôdu.
- V prípade, že kal nie je zbavený vody pred aplikáciou na pole, má veľký objem a jeho aplikácia je komplikovanejšia a nákladnejšia ako pri produktoch ostatných možností jeho zhodnotenia.
- Kal vzniká celoročne, ale na pole ho môžeme aplikovať iba v určenom období.
- Obsah živín v kale sa môže značne líšiť od várky k várke, čo môže poľnohospodárom komplikovať manažment živín v pôde.

### 3.5.2 Charakteristika kalu pri priamej aplikácii na pôdu

Vo všeobecnosti je kal považovaný za veľmi dobré hnojivo a pôdny kondicionér. Obsahuje vysoký podiel dusíka a fosforu, spolu s draslíkom a ďalšími živinami, vo forme, v ktorej sú ľahko prístupné rastlinám. Experimenty tiež ukazujú, že aplikácia kalu na pôdu môže stimulovať mikrobiálnu aktivitu v pôde, enzýmy a pôdnu respiráciu (Mikula et al., 2022), môže tiež zlepšiť pôdnu mikroštruktúru, umožniť vytvorenie väčšieho množstva biopórov (Simões-Mota et al., 2022) či zlepšiť stabilitu pôdnych agregátov (Annabi et al., 2011). Aké konkrétne z týchto a ďalších pozitívnych vplyvov na pôdu čistiarenský kal má, do veľkej miery závisí od jeho obsahu a predošlého spracovania v rámci ČOV.

### 3.5.3 Legislatíva

Aby bolo možné čistiarenské kaly aplikovať do pôdy, je potrebné spĺňať zákon, ktorý určuje podmienky aplikácie, zákazy a povinnosti producenta a odberateľa čistiarenského kalu, kontroly a sankcie. Tento zákon vymedzuje aj požiadavky na sledovanie rizikových látok a ich koncentrácií, ktorých medzné hodnoty nesmú byť v pôde prevyšené ani po aplikácii kalu do pôdy. Sledované indikátory, ako sú chemické zloženie, obsah organických látok, hodnoty pH, obsah ťažkých kovov, mikrobiológia a pod., závisia aj od štruktúry pôdy, drenážneho systému, hydrogeologických a meteorologických podmienok a prijatých agrotechnických opatrení (Sámešová, 2012) (Torma et al., 2010). V prípade aplikácie čistiarenského kalu na pôdy je potrebné jeho dávkovanie započítať do bilancie živín v súlade so zákonom. Jednorazová dávka, rovnako celkové množstvo aplikovaného kalu nesmie prekročiť hranicu 15 ton sušiny/ha v priebehu piatich po sebe nasledujúcich rokov. Pri aplikácii je dôležité kontrolovať aj celkové množstvo dusíka, ktoré nesmie prevýšiť 75 % dávky potrebnej na vyhnojenie pestovanej poľnohospodárskej plodiny.

Legislatíva teda priamu aplikáciu čistiarenského kalu na pôdu technicky umožňuje, avšak oficiálne štatistiky Výskumného ústavu vodného hospodárstva hovoria, že na Slovensku kal do pôdy neaplikujeme vôbec (0 ton) (Kozáková et al., 2022). Pravdepodobným dôvodom pre tieto dáta sú striktné nastavené legislatívne pravidlá aplikácie kalu na pôdu (povinné podmienky, analýzy, monitoring a reporting), ktoré od tejto alternatívy odrádzajú aj producentov kalu, aj potenciálnych odberateľov kalu.

## 4. KAL V ŽIVOTNOM PROSTREDÍ

V predošlej kapitole sme sa pri jednotlivých metódach zhodnocovania kalu opakovane vracali k problému jeho znečistenia mikropolutantmi. Tento problém je obzvlášť dôležité sledovať, keď čistiarenský kal chceme aplikovať na pôdu, ktorá je integrálnou súčasťou životného prostredia; či už je to aplikácia priama, alebo nepriama vo forme kompostu alebo digestátu. V prípade kompostu a digestátu, ktoré obsahujú kal z komunálnych čistiarní odpadových vôd, ich dokonca Európsky parlament nariadením vylúčil z celoeurópskej certifikácie hnojív, čím jasne signalizuje obavu zo znečisťujúcich látok v kale a ich ďalšieho pôsobenia v pôde. Mikropolutanty z čistiarenských kalov môžu jednak znehodnotiť našu pôdu, ale taktiež narúšať ďalšie ekosystémy, ak sú do nich neskôr odnesené (napríklad vodou pri zavlažovaní či daždi, príp. inak). Jednotlivé ekosystémy sú silno prepojené, takže pravdepodobnosť, že prípadné kontaminanty v pôde sa nebudú presúvať do riek, lesov, živočíchov či rastlín, je veľmi malá. Kedy a aký veľký negatívny vplyv na tieto ekosystémy a jednotlivé organizmy v nich kontaminanty nakoniec budú mať, nie je pri mnohých mikropolutantoch zatiaľ známe. Existuje široká paleta mikropolutantov (vrátane pesticídov, hormónov alebo výrobkov osobnej starostlivosti), ale v tejto kapitole sa pozrieme detailnejšie na tri kategórie: ťažké kovy, farmaceutiká a mikroplasty.

### 4.1 ZNEŠKODNENIE MIKROPOLUTANTOV Z KALU

Bežne rozšírené technológie ČOV, ktoré spracúvajú čistiarenský kal, sa sústreďujú najmä na ničenie patogénnych organizmov v kale, elimináciu jeho zápachu a znižovanie jeho objemu. Z výskumu síce vieme, že klasické technológie v kalovom hospodárstve ČOV čiastočne mikropolutanty môžu eliminovať, ale nie dostatočne.

Napríklad v prípade, že sa v kale nachádzajú ťažké kovy, vápnenie spôsobuje ich čiastočnú imobilizáciu (Zhang et al., 2017), kedy sa ťažké kovy transformujú do stabilnejších foriem, znižujúc ich pohyb po prírode (sú silnejšie viazané a neznečisťujú tak ľahko životné prostredie) a znižujúc schopnosť organizmov v tejto forme ich prijať. K čiastočnej imobilizácii ťažkých kovov prichádza aj pri anaeróbnej stabilizácii (Zdeb et al., 2020). Treba však dodať, že imobilizácia môže byť iba dočasná a vplyvom prírodných podmienok môže dôjsť k opätovnej „aktivácii“ týchto ťažkých kovov. V prípade farmaceutík v čistiarenskom kale však vápnenie nemá veľký vplyv na ich zneškodnenie – v tomto prípade vyzerá byť napríklad anaeróbna digestcia lepším riešením (Bastos et al., 2020). Na základe výsledkov Bastos et al. (2020) sa dá usúdiť, že čím viac kal spracujeme a čím je dlhšie jeho „zrenie“, tým viac farmaceutík by malo byť rozložených. V kontexte rôznych technológií spracovania a množstva výsledných farmaceutík v kale to teda znamená: kompostovanie (najdlhšie zrenie) < anaeróbna digestcia < vápnenie (najkratšie zrenie). Čo sa týka mikroplastov, žiadna z bežne používaných technológií v kalovom hospodárstve ich neeliminuje (Li et al., 2022b; Mahon et al., 2017).

Veľa nových technológií, ktoré priamo ničia, prípadne stabilizujú mikropolutanty v kale, sú často ešte len v štádiu skúmania a bude trvať istý čas, kým sa dostanú do praxe. V prípade ťažkých kovov to môže byť pridávanie rôznych prísad do kalu v procese jeho spracovania v kalovom hospodárstve, napr. pridanie kaolínu, druhu hlíny, či rôznych hornín do kalu môže prispieť k stabilizácii ťažkých kovov v nich (Chiang et al., 2001; Wang et al., 2017). Farmaceutiká napríklad vedci úspešne eliminovali pridaním húb/plesní a iných mikroorganizmov (Rodríguez-Rodríguez et al., 2012). Čo sa týka eliminácie mikroplastov, v tejto téme sme na úplnom začiatku. Vedci však už úspešne otestovali väčšiu mieru zachytávania mikroplastov ešte počas čistenia vody, predtým ako sa dostanú do kalov (Edo et al., 2019), ale aj využitie enzýmov, ktoré údajne dokázali odseparovať 87 % mikroplastov, aby tie boli následne baktériami rozložené (Hernández, 2021), či použitie filtrácie na oddelenie mikroplastov od kalu (Rhein et al., 2022).

## 4.2 MIKROPOLUTANTY A ŽIVOTNÉ PROSTREDIE

Ak sa rozhodneme aplikovať čistiarenský kal na pôdu (priamo či nepriamo), je dôležité mať na pamäti možné riziká. Vo všeobecnosti pri mikropolutantoch ide o toxické pôsobenie na životné prostredie či živé organizmy (ekotoxická) a emisie skleníkových plynov (Ivanová et al., 2018).

### 4.2.1 Vplyv ťažkých kovov, farmaceutík a mikroplastov na pôdu a životné prostredie

Ťažké kovy, ktoré kaly môžu obsahovať, sa môžu v pôde hromadiť a viesť k zníženiu množstva prospešných pôdnych baktérií, zmene štruktúry rastlín alebo sekundárnej akumulácii v rastlinách (Hušek et al., 2022). To, či rastliny akumulujú ťažké kovy z kalov, závisí od koncentrácie a typu kovu, pH pôdy alebo druhu rastliny (Hušek et al., 2022).

Farmaceutiká z kalov ovplyvňujú pH pôdy (Carter et al., 2016) a mikrobiálnu aktivitu – napr. baktérie pri aplikácii kalu s antibiotikami na pôdu v krátkodobom horizonte hynú, no po čase získavajú rezistenciu a ich množstvá sa vracajú na pôvodnú úroveň (Bolesta et al., 2022; Urra et al., 2019). Táto nadobudnutá rezistencia baktérií voči antibiotikám však môže byť v konečnom dôsledku nebezpečná pre ľudí. Farmaceutiká sa taktiež z pôdy presúvajú: do rastlín, ktoré ich prijímajú spolu so živinami z pôdy, ale aj do podzemných alebo povrchových vôd v okolí. Po tom, čo ich rastliny prijímajú, sa v nich farmaceutiká kumulujú (Madikizela et al., 2018) – v súčasnosti však nie je možné povedať, či prieniky farmaceutík do rastlín, ktoré konzumujú ľudia alebo zvieratá, vedú aj k nežiaducim zdravotným účinkom. Pri vyplavení farmaceutík z pôd do okolitých vôd môžu predstavovať riziko pre vodné organizmy, ale aj pre ľudí, kontamináciou zdrojov pitnej vody.

A nakoniec, mikroplasty. Podľa odhadov Lofty et al. (2022) ročne dostávame do pôdy v Európe prostredníctvom kalov 31 000 – 42 000 ton mikroplastov. Tieto čísla sú obzvlášť závažné v kontexte výsledkov nedávneho experimentu o schopnosti mikroplastov pretrvávajúť v pôde – Weber et al. (2022) zistili, že aj 34 rokov po poslednej aplikácii kalu na pole v ňom mikroplasty zostávajú a ďalej sa rozšávajú. Po aplikácii čistiarenskeho kalu na pôdy sa mikroplasty často stávajú jej súčasťou a pravdepodobne ovplyvňujú aj kvalitu pôdy; môžu zhoršovať stabilitu pôdnych agregátov a meniť mikrobiálnu aktivitu (Liang et al., 2021) či zvyšovať pH (Zhao et al., 2021). Výskum vplyvu mikroplastov na pôdu je však iba na začiatku a zatiaľ nepriniesol definitívne závery.

### 4.2.2 Keď riedenie nie je riešenie

Hlavná teória pri obmedzovaní ľudského znečistenia životného prostredia je tzv. riedenie je riešenie (angl. the solution to pollution is dilution). Pokiaľ sme žili v malých komunitách a neexistoval priemysel, jednoducho sme náš biologicky rozložiteľný odpad dali do prírody (napr. do riek či zahrabali do pôdy) a tá sa s ním poradila. Keď sa ľudské obydľia rozrastali, začalo byť znečistenie príliš veľa a stanovili sme si limity, s ktorými by si príroda mala poradiť; limity na znečistenie živinami (dusíkom či fosforom), ale aj limity na znečistenie ťažkými kovmi či patogénnymi organizmami. Štúdie na zvieratách nám totiž ukazovali, že tieto látky v dostatočne malých koncentráciách predstavujú pre životné prostredie a organizmy v ňom minimálne až žiadne riziko. Preto sa stalo riedenie polutantov vo vodných tokoch či v prípade kalov na poliach veľmi efektívnou metódou zbavovania sa ich. Táto teória má však v praxi viacero nedostatkov. Hlavným je, že niektoré polutanty, napríklad farmaceutiká, škodia organizmom v životnom prostredí aj v absolútne minimálnych množstvách (parts per billion až parts per trillion) (Gauthier & Vijayan, 2020). V takých prípadoch by riedenie nemalo prichádzať do úvahy a našim dlhodobým cieľom by malo byť tieto látky striktnie regulovať a do životného prostredia vôbec nevypúšťať. Za spomenutie stojí aj ďalší nedostatok teórie riedenia ako riešenia, ktorý sa týka akumulácie ťažko degradovateľných látok v životnom prostredí. Napríklad mikroplasty totiž vo voľnej

prírode degradujú veľmi pomaly (dekády a dlhšie) a majú tendenciu sa akumulovať a škodiť tak organizmom vo vode (Cunningham et al., 2022). V prípade mnohých mikropolutantov by teda riešením nemalo byť riedenie, ale regulácia.

#### 4.3 Inšpirácia zo zahraničia: certifikácia REVAQ

V roku 2008 vo Švédsku vznikla dobrovoľná certifikácia čistiarní odpadových vôd, nazývaná REVAQ, s cieľom minimalizovať znečistenie švédskych pôd kalmi a v dlhodobom horizonte kontinuálne zlepšovať kvalitu kalov. Tento projekt je jediný svojho druhu v Európe a je spojenou iniciatívou Asociácie pre švédsku vodu a odpadovú vodu (Svenskt Vatten), Federácie švédskych farmárov (LRF), Švédskej potravinárskej federácie (Livsmedelsföretagen) a Švédskej federácie potravinového retailu (Svensk Dagligvaruhandel), v úzkej spolupráci so Švédskou agentúrou na ochranu životného prostredia (Naturvårdsverket). V roku 2015 bolo viac ako 50 % švédskej populácie napojenej na ČOV s certifikáciou REVAQ (Persson et al., 2015).

REVAQ vznikol z potreby zvýrazniť benefity (priamej či nepriamej) aplikácie kalov na pôdu ako efektívneho spôsobu prinavrátenia živín do poľnohospodárskej pôdy. Mnohí poľnohospodári a potravinári boli k hnojeniu kalom skeptickí a obávali sa znehodnotenia pôdy a prenosu polutantov do potravín. Preto boli ich národné organizácie prizvané k spoluzaloženiu certifikačného systému REVAQ, ktorý by problém znečistenia kalov dôkladne monitoroval a kontroloval. Výhodou tohto systému je, že keďže ide o projekt, do ktorého sú zapojení všetci relevantní stakeholderi, prirodzene prichádza k spolupráci na kontinuálnom zlepšovaní tohto systému. Štátna správa, komunálna správa, poľnohospodári, potravinári, retail, ale aj vodohospodári či ochranári môžu spoločne prichádzať s iniciatívami, aby z kalov odstránili nežiaduce polutanty, ktoré sú v danom momente pre nich prioritou.

REVAQ certifikuje priamo čistiarne odpadových vôd, pričom hlavné oblasti, na ktoré sa zameriava, sú:

- ČOV musí aktívne pracovať na kontinuálnom zlepšovaní kvality odpadovej vody, ktorá prichádza na ČOV, čím sa prirodzene zlepšuje aj kvalita kalu, resp. jeho použiteľnosť v poľnohospodárstve.
- Kal musí byť hygienizovaný jednou z presne definovaných metód, aby bolo zabránené presunu patogénnych organizmov na poľnohospodárske pôdy.
- Analýza a kontrola znečistenia kalu. V roku 2012 bolo v rámci certifikácie kontrolovaných 60 stopových prvkov (vrátane ťažkých kovov) a viaceré patogénne organizmy. Pri esenciálnych stopových prvkoch nastavili hranicu akumulačného tempa v poľnohospodárskych pôdach na 0,2 % za rok (l'Ons et al., 2012), čo znamená, že pri maximálnej povolenej aplikácii kalov na pôdy by sa hodnoty týchto prvkov v pôdach zvýšili na dvojnásobok po cca 350 rokoch. Pri konkrétnych ťažkých kovoch, ktoré sú vo Švédsku problém, ako napr. kadmium, nastavili cieľ nulovej akumulácie po roku 2025. Rovnako je v prípade aplikácie kalu na pôdu nulová tolerancia na obsah salmonely, aby zabránili akejkoľvek kontaminácii pôd a rastlín touto baktériou.
- Všetky strany majú rýchly a jednoduchý prístup k informáciám o konkrétnych aktivitách ČOV spojených so zlepšovaním kvality kalu, ale aj o finálnom použití kalov z ČOV. Je možné dosledovať, kde a kedy bol kal vyrobený, aj kde, kedy a ako bol finálne zhodnotený. Do reportingu je teda zapojená nielen ČOV, ale tiež poľnohospodár, ktorý kal aplikuje – ten musí napríklad do systému vložiť aj dáta o tom, aké plodiny na kale pestujú.

Certifikácia REVAQ sa nevenuje všetkým mikropolutantom, o ktorých sme hovorili v tejto kapitole, ale ukazuje jednu z ciest, ako sa vieme ku kvalitnejšiemu kalu priblížiť; implementovaním systematickej, transparentnej a na merateľné výsledky orientovanej spolupráce medzi všetkými relevantnými stakeholdermi. Vo Švédsku to vedie k postupnému budovaniu dôvery, znižovaniu množstva kontaminantov v kale a zvyšovaniu množstva recyklovaných živín a organickej hmoty (Persson et al., 2015).



#### 4.4 ANALÝZA KALOV NA SLOVENSKU

Na Slovensku musí byť vyprodukovaný kal na ČOV podľa zákona pravidelne analyzovaný s cieľom zistenia jeho vlastností a obsahu rizikových látok. Tieto analýzy musia obsahovať:

- obsah sušiny a organického podielu,
- hodnotu pH,
- celkový obsah dusíka, fosforu, draslíka a horčíka,
- obsah 8 ťažkých kovov (arzén, kadmium, chróm, meď, ortuť, nikel, olovo a zinok),
- a 2 mikrobiologické parametre (termotolerantné koliformné baktérie a fekálne streptokoky).

## 5. ZÁVER / DISKUSIA

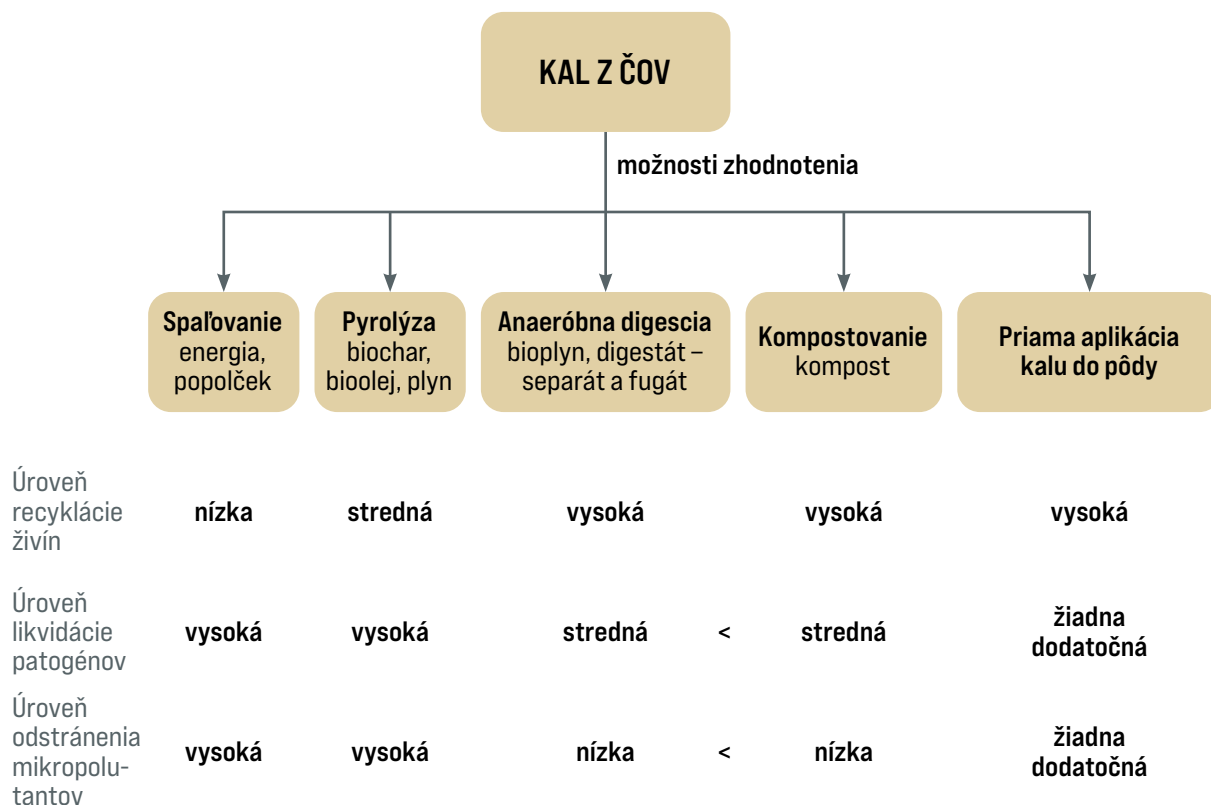


Schéma Porovnanie aktuálnych možností zhodnocovania kalov

V rámci tohto reportu sme sa pozreli na to, ako čistiarenský kal vzniká, ako ho na čistiarniach odpadových vôd stabilizujeme na ďalšie použitie, aké máme možnosti jeho finálneho zhodnotenia a aké problémy sú spojené s jeho aplikáciou na pôdu. Na základe našich zistení navrhujeme opustiť časté dichotomické rozmyšľanie o využití kalu (v zmysle „kal je zlý“ alebo „kal je dobrý“) a pozrieť sa na situáciu komplexne, s jasnou dlhodobou víziou. Čistiarenský kal môže byť významným zdrojom živín pre poľnohospodárov, no v mnohých prípadoch je kontaminovaný. Aplikácia kalu na pôdu môže znamenať optimálnu recykláciu živín pre spoločnosť a životné prostredie, krok smerom k udržateľnému poľnohospodárstvu, ale aj zníženie nákladov na hnojivá pre poľnohospodárov. Aplikácia kontaminovaného kalu na pôdu však môže v dlhodobom horizonte znamenať znehodnotenie tejto pôdy a z toho vyplývajúce zníženie hodnoty majetku jej vlastníkov, príp. aj znečistenie životného prostredia.

Jednoduché riešenie by bolo čistiarenské kaly en bloc onálepkovať ako problematické a všetky ich spaľovať (pozri príklad Holandska), s vedomím, že síce stratíme väčšinu živín, ktoré obsahujú, ale aspoň si neznehodnotíme pôdu a životné prostredie. To je napokon aj aktuálna vízia Európskeho parlamentu a Európskej rady, ktoré v roku 2022 vyhlásili kompost a digestát s obsahom kalu z komunálnych ČOV z európskej certifikácie hnojív; čím vyslali jasný signál, že s aplikáciou kalov do pôd v dohľadnej dobe nepočítajú. Toto riešenie však nie je v súlade s princípmi cirkulárnej ekonomiky či udržateľného poľnohospodárstva a ani nás nestimuluje inovovať a hľadať nové, lepšie riešenia. Práve naopak, spaľovanie kalu podprahovo prezentuje problém ako vyriešený, aj keď sme správne riešenie ešte nenašli.

Optimálna vízia pre zhodnocovanie čistiarenskeho kalu by mala podnecovať a inšpirovať vedcov, firmy, vodohospodárov, poľnohospodárov, ochranárov, štátnu a komunálnu správu, ale aj jednotlivcov a domácnosti, aby spoločne inovovali, hľadali riešenia k zníženiu záťaže ľudskej činnosti na vody a pôdy, aby diskutovali o rizikách a benefitoch

kalov, a aby spolu hľadali cestu, ako efektívne a bezpečne zhodnocovať stále väčšiu časť kalov. Týmto reportom si kladieme za cieľ prispieť do diskusie na tému zhodnocovania kalov na Slovensku. Naše zistenia podporujú víziu nakladania s čistiarenskými kalmi berúcu do úvahy ochranu životného prostredia a ochranu hodnoty našich pôd, ale aj cieľ prinavrátiť živiny z kalu do pôdy a priblížiť sa tak k udržateľnejšej poľnohospodárskej produkcii, a dali by sa zhrnúť do troch bodov:

### **1. Monitoring, prevencia, výskum a vývoj**

Jeden z prvých krokov, ktorý nám umožní získať potrebné vstupné informácie na ďalšie rozhodnutia, je rozšíriť zoznam polutantov sledovaných v kaloch na všetky relevantné makro- a mikropolutanty. Tento krok nám umožní maximálne obsiahnuť mieru znečistenia kalu, na základe čoho môžeme následne vyvíjať ďalšie aktivity: ako napríklad spoluprácu s priemyslom či domácnosťami na znižovaní kontaminácie či financovanie výskumu a vývoja v oblasti nových biodegradovateľných látok a nových technológií na dekontamináciu kalu. Taktiež nám umožní dať poľnohospodárom jasnú informáciu, či konkrétnu várku kalu aplikovať alebo neaplikovať na pôdu.

### **2. Certifikácia kalu**

Kal, ktorý nie je kontaminovaný, by sme jednoznačne mali aplikovať na pôdu (priamo či nepriamo ako kompost alebo digestát). Jeden zo spôsobov, ako tento kal identifikovať, ponúka švédsko certifikácia REVAQ (pozri 4.3 Inšpirácia zo zahraničia: certifikácia REVAQ), ktorá dokázala spojiť štátnu a komunálnu správu, vodohospodárov, poľnohospodárov aj potravinárov, aby spolu kontinuálne hľadali riešenia, ako čo najviac živín z kalu prinavrátiť do pôdy.

### **3. Kým nemáme lepšie riešenia, kontaminovaný kal nekompromisne zhodnocujeme spaľovaním alebo pyrolýzou**

Akokoľvek ekonomicky výhodné je pre poľnohospodárov a správcov ostatných pôd aplikovať kontaminovaný kal na pôdu, v tomto momente nie je možné odhadnúť, aký majú polutanty z kalu vplyv na životné prostredie a do akej miery kontaminanty z kalu v dlhodobom horizonte znižujú (aj ekonomickú) hodnotu pôdy. Z tohto pohľadu môže byť potenciálny risk príliš vysoký. Kým odpovede na tieto otázky nepoznáme a kým nenájdeme lepšie riešenia, pre spoločnosť, životné prostredie aj vlastníkov pôd zostáva najvýhodnejšie kontaminovaný kal neaplikovať na pôdu, ale zhodnocovať spaľovaním či pyrolýzou.

Ak sa Slovensko rozhodne využívanie kalov a ich zhodnocovanie zaradiť do cieľov obehového hospodárstva, musí sa vydať cestou aplikácie kalu a produktov z jeho spracovania na pôdu. Avšak táto cesta je náročná a vyžaduje si inovatívnosť a financie na zavádzanie nových procesov zneškodňovania a eliminácie mikropolutantov v nich. Cesta spaľovania je kratšou a rýchlejšou cestou, ktorá však vedie k nenávratnej strate živín a potrebe poľnohospodárov získavať nové hnojivá energeticky a environmentálne náročnými spôsobmi. Vyššie uvedené body môžu prispieť k maximálne bezpečnej recyklácii živín z čistiarenských kalov a ku kontinuálnemu zlepšovaniu ich zhodnocovania na Slovensku. Vyžaduje si to zapojenie všetkých relevantných stakeholderov do procesu zhodnocovania čistiarenských kalov, definovanie jasnej vízie a cesty, ako sa k nej dostaneme, investovanie do výskumu a vývoja nových technológií na elimináciu polutantov v kaloch a financovanie striktnejšieho monitoringu kvality kalov. Kľúčovou ingredienciou je však vôľa vytvoriť na Slovensku systém nakladania s kalmi, ktorý bude bezpečný, transparentný a efektívny.

## ZDROJE

- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., & Houot, S. (2011). Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), pp. 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.005>
- Bastos, M. C., Soubrand, M., Le Guet, T., Le Floch, É., Joussein, E., Baudu, M., & Casellas, M. (2020). Occurrence, fate and environmental risk assessment of pharmaceutical compounds in soils amended with organic wastes. *Geoderma* 375, 114498. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114498>
- Bolesta, W., Głodniok, M., & Styszko, K. (2022). From Sewage Sludge to the Soil—Transfer of Pharmaceuticals: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10246. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph191610246>
- Bożym, M., & Siemiątkowski, G. (2018). Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018; 25(34): 34332–34342. <https://doi.org/10.1007%2Fs11356-018-3335-x>
- Carter, L. J., Ryan, J. J., & Boxall, A. B. A. (2016). Effects of soil properties on the uptake of pharmaceuticals into earthworms. *Environmental Pollution*, 213, pp. 922–931. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.044>
- Chiang, K. Y., Yoi, S. D., Lin, H. N., & Wang, K. S. (2001). Stabilization of heavy metals in sewage sludge composting process. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 44(10), 95–100. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0591>
- Cucina, M., De Nisi, P., Sordi, S., & Adani, F. (2021). Sewage Sludge as N-Fertilizers for Crop Production Enabling the Circular Bioeconomy in Agriculture: A Challenge for the New EU Regulation 1009/2019. *Sustainability* 2021, 13(23), 13165; <https://doi.org/10.3390/su132313165>
- Cunningham, E. M., Ehlers, S. M., Kiriakoulakis, K., Schuchert, P., Jones, N. H., Kregting, L., Woodall, L. C., & Dick, J. T. A. (2022). The accumulation of microplastic pollution in a commercially important fishing ground. *Sci Rep* 12, 4217. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08203-2>
- Cydzik-Kwiatkowska, A., Milojevic, N., & Jachimowicz, P. (2022). The fate of microplastic in sludge management systems. *Sci. Total Environ*. 157466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157466>
- Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. *Energy & Fuels* 2004, 18, 590–598. <https://doi.org/10.1021/ef034067u>
- de Boer, S., González-Rodríguez, J. Conde, J. J., & Moreira, M. T. (2022). Benchmarking tertiary water treatments for the removal of micro-pollutants and pathogens based on operational and sustainability criteria. *Journal of Water Process Engineering*, Volume 46, 102587, ISSN 2214-7144. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102587>
- Đurđević, D., Blecich, P., & Jurić, Ž. (2019). Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. *Energies* 2019, 12, 1927. <https://doi.org/10.3390/en12101927>
- Edo, C., González-Pleiter, M., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., & Rosal, R. (2019). Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge. *Environ. Pollut.*, 259, 113837. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113837>
- Egene, C. E., Sigurnjak, I., Regelink, I. C., Schoumans, O. F., Adani, F., Michels, E., Sleutel, S., Tack, F. M. G., & Meers, E. (2021). Solid fraction of separated digestate as soil improver: implications for soil fertility and carbon sequestration. *J Soils Sediments* 21, 678–688. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02792-z>
- Eurostat. (n. d.). Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s)). Získané 29. decembra 2022 z [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table?lang=en&category=env.env\\_wat.env\\_nwat](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table?lang=en&category=env.env_wat.env_nwat)
- Fernandez-Akarregi, A. R., Makibar, J., & Cueva, F., Brañas, J., del Campo, P., Piskorz, J., Miranda-Apodaca, J., Robredo, A., Pérez Lopéz, U., Lacuesta, M., Muñoz-Rueda, A., & Mena-Petite, A. (2010). High Quality Fertilizers Based on Biomass Pyrolysis Bio-Oil and Char [Prezentácia na konferencii]. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, France. <https://doi.org/10.5071/18thEUBCE2010-VP2.723>
- Gauthier, P. T., & Vijayan, M. M. (2020). Municipal wastewater effluent exposure disrupts early development, larval behavior, and stress response in zebrafish. *Environmental Pollution*, 259, 113757. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113757>
- Geffertová, J., & Geffert, A. (2011). Energetický potenciál vybraných odpadov s obsahom biomasy. *ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN*, 53(1): 93–99. Získané 30. decembra 2022 z [https://dftuzvo.sk/sites/default/files/12-1-11-geffertova-geffert\\_0.pdf](https://dftuzvo.sk/sites/default/files/12-1-11-geffertova-geffert_0.pdf)
- Goldan, E., Nedeff, V., Barsan, N., Culea, M., Tomozei, C., Panainte-Lehadus, M., & Mosnegutu, E. (2022). Evaluation of the Use of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment—A Review. *Sustainability* 2022, 14, 5309. <https://doi.org/10.3390/su14095309>
- Gómez, E. F., & Michel, F. C. (2013). Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. *Polym. Degrad. Stab.*, 98 (12), pp. 2583–2591. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018>
- Haiba, E., Nei, L., Ivask, M., Peda, J., Jarvis, J., Lillenberg, M., Kipper, K., & Herodes, K. (2016). Sewage sludge composting and fate of pharmaceutical residues – recent studies in Estonia. *Agronomy Research* 14(5), pp. 1583–1600. Získané 3. januára 2023 z [https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2016/10/BSE2016\\_368\\_Haiba.pdf](https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2016/10/BSE2016_368_Haiba.pdf)
- Hernández, S. D. (2021). Applying enzymes for microplastic degradation in sewage sludge. Získané 31. decembra 2022 z <https://www.enzycle.eu/enzymes-for-microplastic-degradation/>
- Hoang, S. A., Bolan, N., Madhubashani, A. M. P., Vithanage, M., Perera, V., Wijesekara, H., Wang, H., Srivastava, P., Kirkham, M. B., Mickan, B. S., Rinklebe, J., & Siddique, K. H. M. (2022). Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: A review, *Environmental Pollution*. 293. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118564>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115090>
- l'Ons, D., Mattsson, A., Davidsson, F., & Mattsson, J. (2012, 19. – 21. november). REVAQ – the Swedish certification system for sludge application to land – Experiences at the Rya WWTP in Gothenburg and challenges for the future [Prezentácia na konferencii]. 17th European Biosolids and Organic Resources Conference. Získané 31. decembra 2022 z <https://conferences.aquaenviro.co.uk/wp-content/uploads/sites/7/2015/07/6-lOns-D.-Gryaab-AB.pdf>
- Ivanová, L., Mackulák, T., Grabic, T., Golovko, O., Koba, O., Vojs Staňová, A., Szabová, P., Grenčíková, A., & Bodík, I. (2018). Pharmaceuticals and illicit drugs – A new threat to the application of sewage sludge in agriculture. *Science of the Total Environment*, 634, 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.001>
- Judd, S. (2020). Sludge treatment – composting. Získané 23. decembra 2022 z <https://www.sludgeprocessing.com/aerobic-digestion/sludge-composting/>
- Kováčiková, Z., Vargová, V., & Michalec, M. (2018). Využitie druhotného produktu z bioplynových staníc vo výžive trávnych porastov. Získané 23. decembra 2022 z <http://vutphp.sk/wp-content/uploads/Vyuzitie-druhotneho-produktu-z-bioplynovych-panic.pdf>
- Kozáková, K., Czöldorová M., & Semanová, D. (2022, 19. – 21. október). Produkcia kalov z komunálnych ČOV v SR [Prezentácia na konferencii]. 12. bienálna konferencia s medzinárodnou účasťou ODPADOVÉ VODY 2022, Vysoké Tatry, Slovensko.
- Li, C., Li, J., Xie, S., Zhang, G., Pan, L., Wang, R., Wang, G., Pan, X., Wang, Y., Angelidaki, I. (2022a). Enhancement of heavy metal immobilization in sewage sludge biochar by combining alkaline hydrothermal treatment and pyrolysis. *J. Clean. Prod.*, 369, 133325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133325>
- Li, X., Liu, H., Wang, L., Guo, H., Zhang, J., & Gao, D. (2022b). Effects of typical sludge treatment on microplastics in China—Characteristics, abundance and micro-morphological evidence. *Science of The Total Environment*, 826, 154206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154206>
- Liang, Y., Lehmann, A., Yang, G., Leifheit, E. F., & Rillig, M. C. (2021). Effects of Microplastic Fibers on Soil Aggregation and Enzyme Activities Are Organic Matter Dependent. *Front. Environ. Sci.* 9:650155. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.650155>
- Lofty, J., Muhawenimana, V., Wilson, C. A. M. E., & Ouro, P. (2022). Microplastics removal from a primary settler tank in a wastewater treatment plant and estimations of contamination onto European agricultural land via sewage sludge recycling. *Environmental Pollution*, 304, 119198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119198>
- López-González, J. A., Estrella-González, M. J., Lerma-Moliz, R., Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., & López, M. J. (2021). Industrial Composting of Sewage Sludge: Study of the Bacteriome, Sanitation, and Antibiotic-Resistant Strains. *Front. Microbiol.*, 12, 784071. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.784071>
- Lu, T., Yuan, H., Wang, Y., Huang, H., & Chen, Y. (2016). Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge. *J Mater Cycles Waste Manag* 18, 725–733. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0366-y>
- Mahon, A. M., O'Connell, B., Healy, M. G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R., & Morrison, L. (2017). Microplastics in sewage sludge: effects of treatment. *Environ. Sci. Technol.*, 51, pp. 810–818. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04048>
- Mackulák, T., Škulcová, A., Belišová, N., Horáková, I., Žabka, D., Semerád, M., Vojs Staňová, A., & Brandeburová, P. (2019). Liečivá a drogy – environmentálny problém?. *Chemické Listy* 113, 654–661. Získané 23. decembra 2022 z <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3487>
- Madikizela, L. M., Ncube, S., & Chimuka, L. (2018). Uptake of pharmaceuticals by plants grown under hydroponic conditions and natural occurring plant species: A review. *Science of the Total Environment*, 636, pp. 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.297>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Caruso, C., Sambo, P., & Borin, M. (2017). Effects of digestate solid fraction fertilisation on yield and soil carbon dioxide emission in a horticulture succession. *Italian Journal of Agronomy*, 12(2). <https://doi.org/10.4081/ija.2017.800>
- Mercl, F., Košnář, Z., Maršík, P., Vojtišek, M., Dušek, J., Száková, J., & Tlustoš, P. (2021). Pyrolysis of Biosolids as an Effective Tool to Reduce the Uptake of Pharmaceuticals by Plants. *J. Hazard. Mater.* 2021, 405, 124278. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124278>
- Mikula, K., Gersz, A., Witek-Krowiak, A., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., & Chojnacka, K. (2022). Chapter 3 - Agrochemicals in view of circular economy. *Smart Agrochemicals for Sustainable Agriculture: Academic Press*, pp. 57–80. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817036-6.00004-2>
- Morales-Polo, C., Del Mar Cledera-Castro, M., & Soria, B. Y. M. (2018). Reviewing the Anaerobic Digestion of Food Waste: From Waste Generation and Anaerobic Process to Its Perspectives. *Appl. Sci.* 2018, 8(10), 1804. <https://doi.org/10.3390/app8101804>
- Moško, J., Pohořelý, M., Cajthaml, T., Jeremiáš, M., Robles-Aguilar, A. A., Skoblia, S., Beňo, Z., Innemanová, P., Linhartová, L., Michalíková, K., & Meers, E. (2021). 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>
- Mukawa, J., Pająk, T., Rzepecki, T., & Banaś, M. (2022). Energy Potential of Biogas from Sewage Sludge after Thermal Hydrolysis and Digestion. *Energies* 2022, 15, 5255. <https://doi.org/10.3390/en15145255>
- Ni, B., Zhu, Z., Li, W., 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(12), 961–967. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00740>
- Nikiema, M., Barsan, N., Maiga, Y., Somda, M. K., Mosnegutu, E., Quattara, C. A. T., Dianou, D., Traore, A. S., Nedeff, V., & Quattara, A. S. (2022). Optimization of Biogas Production from Sewage Sludge: Impact of Combination with Bovine Dung and Leachate from Municipal Organic Waste. *Sustainability* 2022, 14(8), 4380. <https://doi.org/10.3390/su14084380>

- Persson, T., Svensson, M., & Finnson, A. (2015). REVAQ certified wastewater treatment plants in Sweden for improved quality of recycled digestate nutrients. *Získané 30. decembra 2022 z [https://www.iebioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/REVAQ\\_CAse\\_study\\_A4\\_1.pdf](https://www.iebioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/REVAQ_CAse_study_A4_1.pdf)*
- Rhein, F., Nirschl, H., & Kaegi, R. (2022). Separation of Microplastic Particles from Sewage Sludge Extracts Using Magnetic Seeded Filtration. *Water Research X*, 17, 100155. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2022.100155>
- Rodríguez-Rodríguez, C. E., Jelić, A., Pereira, M. A., Sousa, D. Z., Petrović, M., Alves, M. M., Barceló, D., Caminal, G., & Vicent, T. (2012). Bio-augmentation of sewage sludge with *Trametes versicolor* in solid-phase biopiles produces degradation of pharmaceuticals and affects microbial communities. *Environ Sci Technol* 46(21):12012–12020. <https://doi.org/10.1021/es301788n>
- Samešová, D. (2012). Heavy Metals in Sewage Sludge. *Životné prostredie*, 46, 5, p. 232 – 236. Získané 23. decembra 2022 z [http://publikacie.uke.sav.sk/sites/default/files/2012\\_5\\_232\\_236\\_samesova.pdf](http://publikacie.uke.sav.sk/sites/default/files/2012_5_232_236_samesova.pdf)
- Samešová, D., & Ďuricová, A. (2014). Analýza využitia čistiarenskeho kalu. Manažérstvo životného prostredia. 148-153. Získané 23. decembra 2022 z [https://www.sszp.eu/wp-content/uploads/2014\\_conference\\_MaZP\\_p-148\\_Samesova-Duricova.pdf](https://www.sszp.eu/wp-content/uploads/2014_conference_MaZP_p-148_Samesova-Duricova.pdf)
- Simões-Mota, A., Virto, I., & Poch, R. M. (2022). Effects of long-term sewage sludge application to a calcareous soil structure. *Soil Use and Management*, 38, 1693–1704. <https://doi.org/10.1111/sum.12838>
- Stenzel, F., Jung, R., Wiesgickl, S., Dexheimer, K., Eissing, M., & Mundt, M. (2019). Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen. Získané 31. decembra 2022 z [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-29\\_texte\\_31-2019\\_arzneimittelrueckstaende-klarschlamm\\_v2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-29_texte_31-2019_arzneimittelrueckstaende-klarschlamm_v2.pdf)
- Ševčík, J. (2020). Příprava čistírenských kalů pro proces pyrolyzy. Získané 23. decembra 2022 z <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/196829/final-thesis.pdf?sequence=-1>
- Torma, S., Marinova, S., & Dimitrov, P. (2010). Čistiarenské kaly a ich potenciálne využitie v poľnohospodárskej praxi. *Waste Forum* (4), 324-330. Získané 23. decembra 2022 z [http://www.wasteforum.cz/cisla/WF\\_4\\_2010.pdf](http://www.wasteforum.cz/cisla/WF_4_2010.pdf)
- Urra, J., Alkorta, I., Mijangos, I., Epelde, L., & Garbisu, C. (2019). Application of sewage sludge to agricultural soil increases the abundance of antibiotic resistance genes without altering the composition of prokaryotic communities. *Science of the Total Environment*, 647, pp. 1410-1420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.092>
- Wang, J., Fu, R., & Xu, Z. (2017). Stabilization of heavy metals in municipal sewage sludge by freeze-thaw treatment with a blend of diatomite, FeSO<sub>4</sub>, and Ca(OH)<sub>2</sub>. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(8), pp. 847-853. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1281175>
- Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167>
- Wang, Z., Burra, K. G., Zhang, M., Li, X., He, X., Lei, T., & Gupta, A. K. (2020). Syngas evolution and energy efficiency in CO<sub>2</sub>-assisted gasification of pine bark. *Applied Energy* (269), 114996. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114996>
- Wang, Z., Liu, S., Liu, K., Ji, S., Wang, M., & Shu, X. (2021a). Effect of temperature on pyrolysis of sewage sludge: biochar properties and environmental risks from heavy metals. *E3S Web of Conferences* 237, 01040. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123701040>
- Wang, Z., Shen, R., Ji, S., Xie, L., & Zhang, H. (2021b). Effects of biochar derived from sewage sludge and sewage sludge/cotton stalks on the immobilization and phytoavailability of Pb, Cu, and Zn in sandy loam soil. *Journal of Hazardous Materials* (419), 126468. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126468>
- Weber, C. J., Santowski, A., & Chiffard, P. (2022). Investigating the dispersal of macro- and microplastics on agricultural fields 30 years after sewage sludge application. *Sci Rep* 12, 6401. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10294-w>
- Wrap (2016). Digestate and compost use in agriculture. Good practice guidance for agricultural contractors. Získané 23. decembra 2022 z <https://www.farmingforabetterclimate.org/downloads/digestate-and-compost-use-in-agriculture-a-good-practice-guide-for-agri-contractors/>
- Zafar, U., Houlden, A., & Robson, G. (2013). Fungal communities associated with the biodegradation of polyester polyurethane buried under compost at different temperatures
- *Appl. Environ. Microbiol.*, 79 (23) (2013), pp. 7313-7324, <https://doi.org/10.1128/AEM.02536-13>
- Žerava, Z. (2008). Čistírenské kaly – súčasnosť a budúcnosť. Získané 23. decembra 2022 z <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/25212/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Zdeb, M., Pawłowska, M., & Pacan, J. (2020). The Influence of Anaerobic Digestion on Selected Heavy Metals Fractionation in Sewage Sludge. *Journal of Ecological Engineering*, 21(3), 27-35. <https://doi.org/10.12911/22998993/118302>
- Zhang, X., Wang, X., & Wang, D. (2017). Immobilization of Heavy Metals in Sewage Sludge during Land Application Process in China: A Review. *Sustainability*, 9(11), 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su9112020>
- Zhao, T., Lozano, Y. M., & Rillig, M. C. (2021). Microplastics Increase Soil pH and Decrease Microbial Activities as a Function of Microplastic Shape, Polymer Type, and Exposure Time. *Front. Environ. Sci.* 9:675803. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.675803>

**Autori a autorky publikácie:**

Michael Matis (INCIEN)

Michaela Majerová (INCIEN)

Petra Csefalvayová (INCIEN)

**Jazyková korektúra:** Jana Vicenová

**Grafická úprava:** Sashi

BRATISLAVA 2023

Publikáciu zostavil Inštitút cirkulárnej ekonomiky, o. z.

Publikácia vznikla vďaka podpore Zeleného vzdelávacieho fondu.

Projekt je realizovaný s finančnou podporou Zeleného vzdelávacieho fondu formou dotácie z Environmentálneho fondu 2022.

ZELENÝ  
VZDELÁVACÍ  
FOND | GREEN  
EDUCATION  
FUND



**KAL**  
nad **ZLATO**





