

Bio

Ročník 35 • Číslo 2/2025

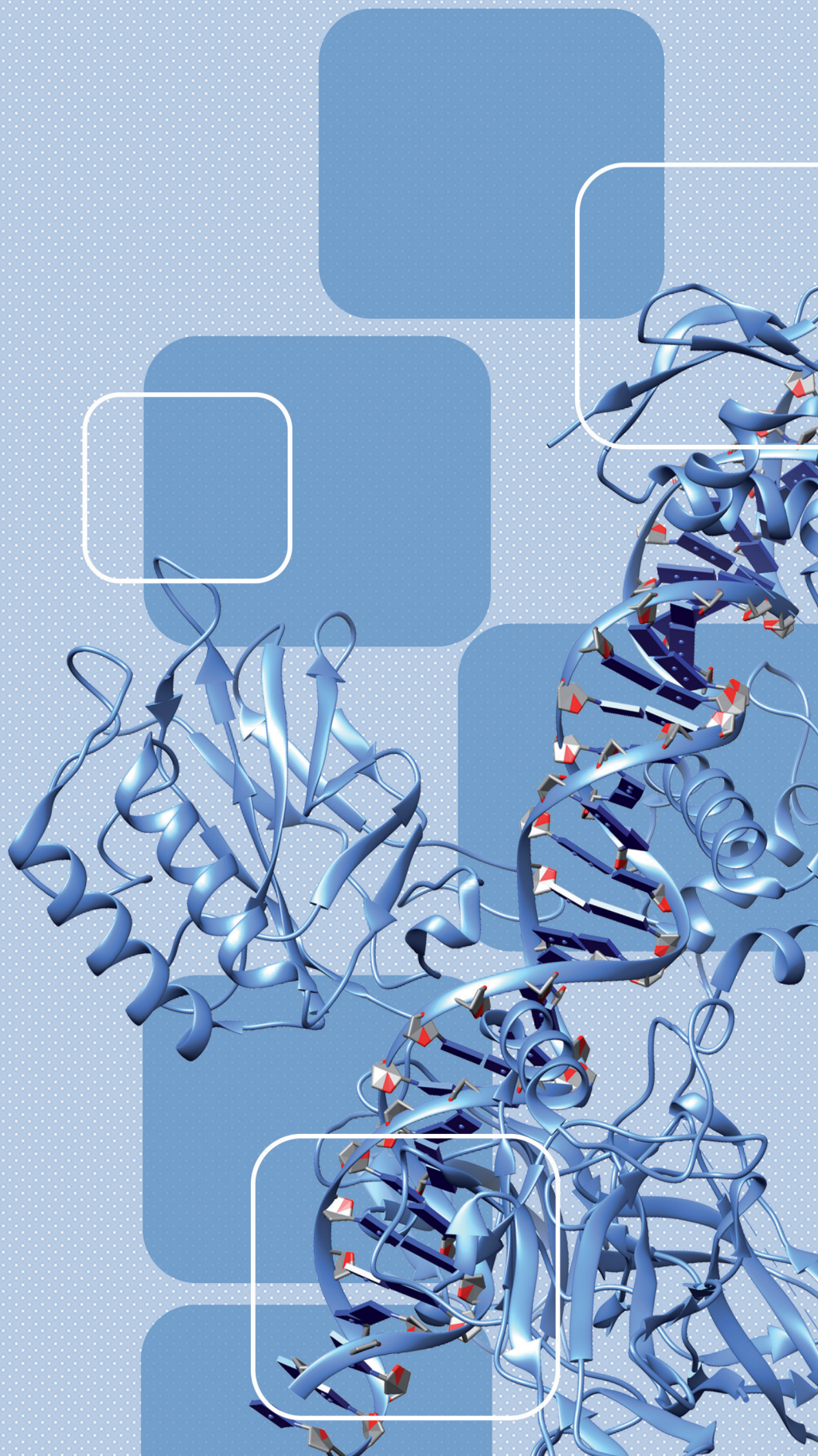
prospect

**BULLETIN
BIOTECHNOLOGICKÉ
SPOLEČNOSTI**

zakládajícího člena
Českého svazu
vědeckotechnických
společností (ČSVTS)

a

člena „European
Federation
of Biotechnology“
(EFB)



Bio prospect

Society address: University of Chemistry and Technology, Technická 3, 166 28 Prague 6, Czech Republic.
Tel.: 420-220 443 151, fax: 420-233 334 769, e-mail: danka.pokorna@vscht.cz, IČO 00570397,
account No.: 19534-061/0100 Komerční banka Praha 6, Dejvická 52, SWIFT CODE: COMBCZTPP

Czech Republic Regional Branch Office as a bridge between European Federation of Biotechnology and Czech Biotechnology Society is located in the Centre of the Region Hana for Biotechnological and Agricultural Research, Šlechtitelů 21, 783 71 Olomouc, Czech Republic

BULLETIN OF CZECH BIOTECHNOLOGY SOCIETY

**founding member of the Czech Association of Scientific
and Technical Societies – <http://en.csvts.cz>**

**and
member of European Federation of Biotechnology
<http://www.efbiotechnology.org>**

Bioprospect, the bulletin of the Biotechnology Society is a journal intended to inform the society members about the most recent developments in this field. The bulletin should supply the vitally important knowledge directly to those who need it and to those who are able to use it properly. In accordance with the rules of the Society, the Bulletin also deals with both theoretical and practical questions of biotechnology. Articles will be published informing about the newest theoretical findings, but many planned papers are devoted to fully practical topics. In Czech Republic there is a growing gap between basic research and production. It is extremely important to reverse as soon as possible the process of further opening of the scissors, and we hope the Bulletin will help in this struggle by promoting both research and practice in our biotechnology. The Bulletin should facilitate the exchange and targeted delivery of information. The editorial board welcome advertisements of products such as chemicals, diagnostics, equipment and apparatus, which have already appeared

on the Czech market, or are projected, enter it. Services, free R&D or production facilities can also be advertised. The editorial board, together with the executive committee of the Biotechnology Society, hope that maybe some information published in the Bulletin, or some new contacts based on it, will give birth to new cooperation with domestic or foreign research teams, to collaborations, joint ventures or strategic alliances providing access to expertise and financing in international markets.

The editorial board invites all of You, who are involved in the field called biotechnology, and who are seeking contacts in Czech Republic, to advertise in the Bulletin BIOPROSPECT, which is mailed directly to more than one and a half thousand Czech biotechnologists.

For more information contacts the editorial board or directly:

Assoc. Prof. Dana Pokorna, PhD
UCT Prague
+420 220 443 151

ÚVODEM

Dostává se Vám do ruky 2. číslo letošního Bioprospectu, které je zaměřeno na kontrolu potravin a na oblast životního prostředí.

Naší snahou je v Bioprospectu uveřejňovat články z nejširších oblastí biotechnologií, což můžete ovlivnit i vy, čtenáři tohoto bulletinu. Vaším právem, jako člena Biotechnologické společnosti, je mimo jiné do něj přispívat. Zamyslete se proto, prosím, nad tématy z vašeho oboru, kterými byste mohli obohatit ostatní čtenáře Bioprospectu a zvýšit úroveň tohoto recenzovaného časopisu.

Pokyny pro autory jsou uveřejněny v každém čísle Bioprospectu.

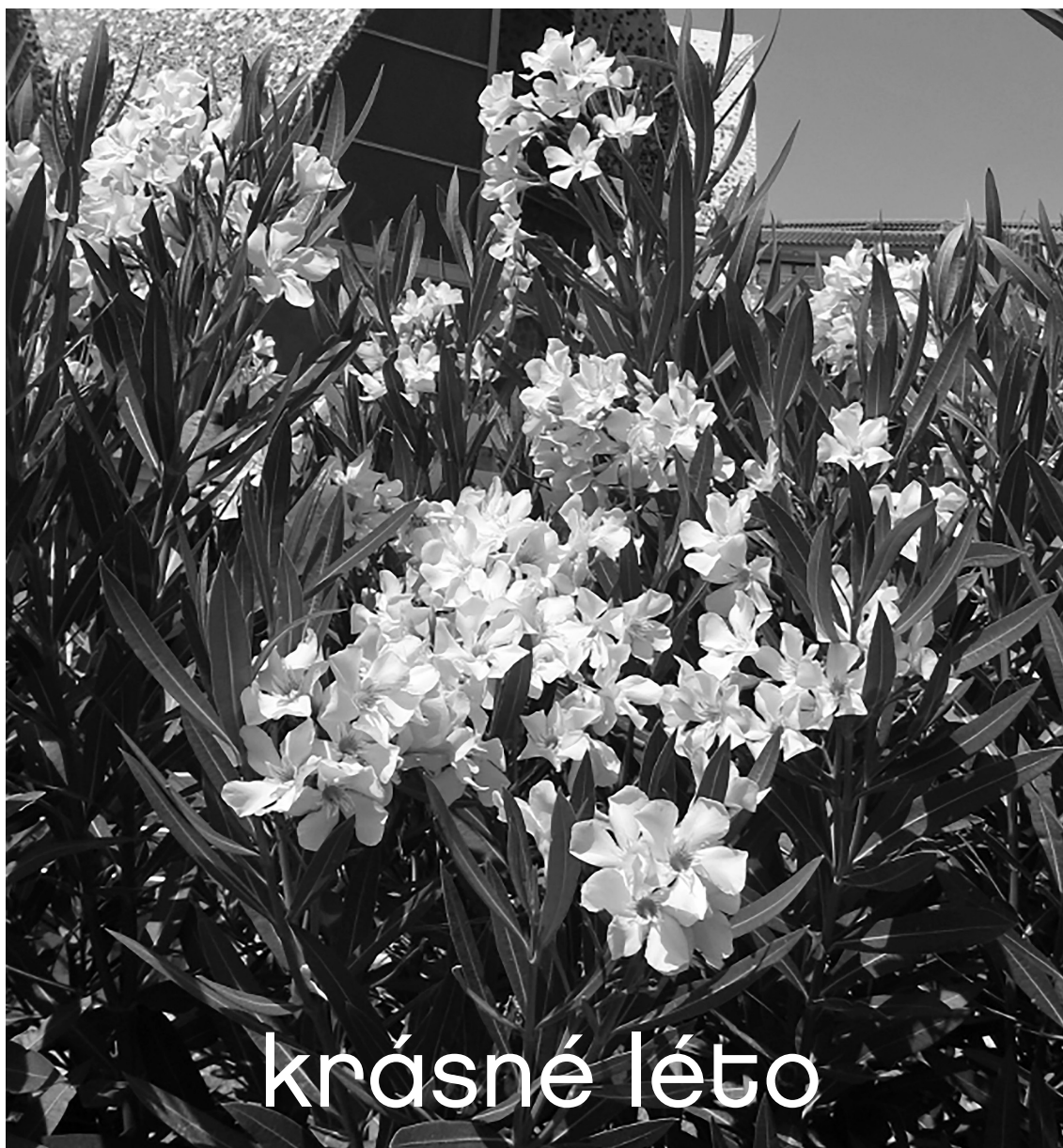
Vaše příspěvky, prosím, zasílejte na adresu
Danka.Pokorna@vscht.cz.

Se srdečnými pozdravy

Vaši

Jan Káš, Dana Pokorná
a kolektiv redakce Bioprospectu

**Všem čtenářům a autorům Bioprospectu přejeme krásné léto
a po prázdninách se těšíme na vaše články.**



PROTEÍNY AKO NÁSTROJ NA SPOĽAHLIVÚ IDENTIFIKÁCIU A KVANTIFIKÁCIU MÄSA V POTRAVINOVEJ KONTROLE

Katarína Harčariková

Ústav biochemie a mikrobiologie, Fakulta potravinářské a biochemické technologie,
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze;
bjalonck@vscht.cz

Úvod

Produkcia a falšovanie mäsa

Identifikácia druhov mäsa a kontrola jeho pravosti, predstavujú v súčasnej dobe významnú tému v oblasti bezpečnosti potravín. Rastúci počet prípadov falšovania mäsa, dokumentovaný v posledných desaťročiach, vyvolal po celom svete tlak zo strany spotrebiteľov na dôslednejšie a zrozumiteľnejšie označovanie mäsových výrobkov. Typickými príkladmi falšovania sú zmena kvalitnejších a drahších druhov mäsa za lacnejšie alternatívy, ako napríklad výmena hovädzieho mäsa za konské či bravčové alebo baraniny za bravčové. Bežným spôsobom falšovania je aj pridávanie nedeklarovaných rastlinných proteínov do mäsových výrobkov, ako sú fašírky alebo párky (Chaora et al., 2022). Falšovanie mäsa je závažné nielen z ekonomického hľadiska, ale aj kvôli náboženstvu či zdravotným obmedzeniam. Prítomnosť nedeklarovaných druhov mäsa v potravinách môže viesť k porušeniu náboženských zásad alebo alergickým reakciám, a tak k strate dôvery zo strany spotrebiteľov. Podľa štúdií sa falšovanie najčastejšie vyskytuje pri mletých a tepelne upravených produktoch, kde je vizuálna identifikácia prakticky nemožná (AYAZ et al., 2006). Závažným prípadom bola tzv. "Konská aféra" v roku 2013, keď sa v Európe zistilo, že produkty označené ako hovädzie mäso, obsahovali aj konské mäso. Tieto produkty boli následne distribuované po celej EÚ (Doroudian et al., 2024). Ďalším známym prípadom bola otrava klenbuterolom, kde 15 ľudí ochorelo po konzumácii kontaminovaného mäsa (Brambilla et al., 2000). Klenbuterol je syntetická látka, ktorá patrí medzi β 2-adrenergické agonisti. Pôvodne sa používal ako liek na liečbu dýchacích problémov, pretože uvoľňuje hladké svaly v dýchacích cestách a tak uľahčuje dýchanie. V produkcii mäsa sa však nelegálne používa ako rastový stimulátor, pretože podporuje rast svalovej hmoty a znižuje podiel tuku v tele zvierat (Velasco-Bejarano et al., 2020). Vyšetrenie potvrdilo extrémne vysoké hladiny tejto látky v pečeni zvierat a neskôr aj v moči pacientov, čo poukázalo na riziko nelegálneho používania rastových stimulantov v živočíšnej výrobe (Brambilla et al., 2000).

Svetová produkcia mäsa v posledných rokoch dosahuje hodnotu 360–370 miliónov ton ročne, pričom medziročný nárast je 1–2 %. Najväčší rast produkcie je evidovaný v Ázii a Južnej Amerike. Naopak Európa zaznamenáva pokles, kde v roku 2022 produkcia hovädzieho mäsa v Európskej únii klesla o 2,5 %, produkcia bravčového o 5,6 % a produkcia hydinového mäsa zostala približne rovnaká. V roku 2023 došlo v Českej republike k poklesu produkcie všetkých hlavných dru-

hov mäsa, pričom žiadny z nich nepokrýva domácu spotrebu. Krajina je preto závislá od dovozu, najmä pri bravčovom mäse, kde dovoz tvorí až 55 % spotreby (Kameník, 2024).

Prípady falšovania mäsa sa však nevyskytujú len vo svete. Česká Štátna zemедělská a potravinářská inspekce (SZPI) v roku 2019 odhalila konzervy poľského pôvodu s nižším obsahom mäsa, ako deklaroval výrobca. Ďalší prípad zistil podiel mäsa v kuracích párkoch len 74,1 % namiesto uvádzaných 84 % (*Štátní zemědělská a potravinářská inspekce (SZPI) zjistila kuřecí párky z dovozu falšované nižším obsahem masa*, n.d.). V Číne v rokoch 2012 až 2021 bola vytvorená rozsiahla databáza prípadov falšovania mäsa, ktorá zahŕňala takmer 2000 zaznamenaných incidentov na celom svete. Analýza týchto dát poukázala na prítomnosť nelegálnych prísad, falošné označovania a falšovania pôvodu. Podvody sa týkajú nielen domácej produkcie, ale aj dovážaného mäsa – najmä z Brazílie, USA a Austrálie (Li et al., 2023). Falšovanie mäsa je celosvetový problém, ktorý si vyžaduje aktívne riešenie. Kľúčovú úlohu pritom zohráva využívanie dostupných analytických techník na jeho spoľahlivé odhalenie a prevenciu.

Chemické zloženie mäsa

Mäso je komplexná potravina zložené z rôznych látok. Najväčšie zastúpenie má **voda**, ktorá zvyčajne tvorí približne 70–75 % (Sebranek et al., 2024). Vysokým obsahom vody sa mäso stáva potravinou, ktorá rýchlo podlieha skaze, pretože vytvára vhodné prostredie pre rast mikroorganizmov a tým obmedzuje jeho životnosť. Vlhkosť má vplyv aj na farbu, štruktúru a chuť mäsa (Williams, 2007). Druhou významnou zložkou, ktorá tvorí mäsa sú **bielkoviny**. Tie tvoria priemerne 19 % mäsa, ale líšia sa v závislosti od druhu a stavu zvierťa, napríklad kuracie prsia obsahujú až 34,5 % bielkovín, zatiaľ čo kačacie mäso približne 12,3 % (Marangoni et al., 2015; Sebranek et al., 2024). Väčšinu bielkovín v svalovine mäsa predstavujú tzv. myofibrilárne proteíny, ktoré tvoria okolo 60 % všetkých svalových bielkovín a sú zodpovedné za kontrakciu svalov. Hlavným proteínom tejto skupiny je myozín, ktorý tvorí až 43 % myofibrilárnych proteínov a približne 26 % celkových bielkovín svalov. Ďalšími významnými bielkovinami sú aktín, titín, tropomyozín a troponín, ktoré sa podieľajú na mechanizme kontrakcie a stabilite svalovej štruktúry. Okrem nich sú v svalovine prítomné aj sarkoplazmatické proteíny, to sú napr. enzýmy, myoglobín. Tie tvoria približne 29 % bielkovín, a stroma proteíny (6 %), predovšetkým kolagén. Kolagén je významný svojou štruktúrnou funkciou a pri tepelnej úprave sa mení na želatínu, čím ovplyvňuje senzorické vlastnosti mäsa.

Elastín a retikulín patria medzi ďalšie menej zastúpené stroma proteíny, no sú významné pre svoju odolnosť voči degradácii (Belitz & Grosch, 2013). Ďalšou látkou, ktorá má väčšie rozpätie a závisí na druhu zvieratá sú **tuky** (Sebranek et al., 2024). Obsiahnutý tuk v mäse je známy ako triglyceridy, čo sú estery troch reťazcov mastných kyselín a alkoholu glycerol. Mäso obsahuje tukové tkanivá, čiže tukové bunky naplnené lipidmi, ktoré majú rôzne množstvo tuku. V mäse obsah tuku funguje ako zásoba energie, ochranná výplň v koži a okolo orgánov, najmä srdca a obličiek, ako aj ako izolácia proti stratám telesnej teploty. Obsah tuku v jatočných telách zvierat sa pohybuje od 8 do 20 %. Vyššie percento tuku je prítomné len v bravčovom mäse (Ahmad et al., 2018). Medzi mastné kyseliny obsiahnuté v mäse patria nenasýtené mastné kyseliny ako kyselina olejová (C-18:1), linolová (C-18:2), linolénová (C-18:3) a arachidónová (C-20:4). Tie sú nevyhnutnými zložkami mitochondrií, bunkovej steny a iných aktívnych metabolických miest. Kyselina linolénová (C-18:3) patrí medzi omega-3 mastné kyseliny, rovnako ako kyselina eikozapentaénová (EPA, C-20:5) a kyselina dokosahexaénová (DHA, C-22:6), ktoré sú tiež zastúpené v mäse. Zatiaľ čo linolénová kyselina sa prirodzene vyskytuje najmä v listovej zelenine a EPA s DHA sú typické pre ryby a rybí olej. Napriek tomu môže mäso zvierat kŕmených trávou, prispieť k príjmu omega-3 mastných kyselín, ktoré sú dôležité pre zdravie srdca a vývoj nervového systému (Woods & Fearon, 2009). Nízke zastúpenie majú v mäse aj **sacharidy**, keďže mäso nie je ich hlavným zdrojom. V svalovine sa nachádzajú len v malom množstve, pričom najdôležitejším sacharidom je glykogén, čo je zásobná forma glukózy v tele zvierat. Po porážke sa glykogén v svaloch rozkladá na kyselinu mliečnu, čo ovplyvňuje pH mäsa a jeho kvalitu (napr. farbu, jemnosť a trvanlivosť) (Hui et al., 2001). Zo **stopových prvkov** obsahuje mäso najmä železo, zinok a selén, ktoré podporujú imunitu a krvotvorbu. Vnútornosti ako pečeň a obličky obsahujú výrazne viac týchto minerálov než svalovina. Mäso zároveň poskytuje dôležité **vitamíny** skupiny B – tiamín, riboflavín, niacín, B6 a B12 – ktoré sú kľúčové pre metabolizmus a nervový systém. Vitamín B12 sa nachádza výlučne v živočíšnych potravinách. Pri tepelnej úprave však dochádza k značným stratám vitamínov, najmä tiamínu. Z vitamínov rozpustných v tukoch je mäso zdrojom vitamínov A, D a K, pričom najviac sa ich nachádza v pečeni. Mäso tak predstavuje komplexnú potravinu s významným prínosom pre výživu (Ahmad et al., 2018). Zloženie mäsa je rozhodujúce pre určenie jeho kvality, nutričnej hodnoty a vhodnosti pre rôzne kulinárske a spracovateľské aplikácie.

Identifikácia živočíšneho pôvodu mäsa

Identifikácia živočíšnych druhov v mäse a v mäsovcích výrobkoch je dôležitá z hľadiska bezpečnosti potravín, kontroly kvality, náboženstva či možnej alergie na určitý druh mäsa (Montowska & Fornal, 2017a). Medzi množstvom dostupných analytických metód sa najčastejšie využívajú metódy založené na DNA či proteínoch, ktoré sú citlivé a presné.

K metódam založených na **DNA** patrí najmä polymerázová reťazová reakcia (PCR) (Alikord et al., 2018). **PCR** je metóda, ktorá slúži na amplifikáciu špecifických úsekov DNA. Proces zahŕňa tri hlavné kroky, a to denaturáciu DNA pri vysokých teplotách, nasadenie primerov (annealing) pri nižšej teplote a následnú elongáciu čiže predĺženie nového reťazca pomocou DNA polymerázy pri optimálnej teplote (najčastejšie 72 °C). Vďaka cyklickému opakovaniu týchto fáz môže PCR za krátky čas vygenerovať miliardy kópií cieľovej DNA sekvencie (Shah, 2019). PCR je citlivá a rýchla technika, no, jej použitie pri analýze zmiešaných mäsových výrobkov môže byť problematické, hlavne ak sa rozlišujú geneticky príbuzné druhy, a to môže mať za následok nesprávnu identifikáciu. Ďalším problémom môže byť aj potenciálna degradácia DNA vo vysoko spracovaných produktoch, ktorá môže negatívne ovplyvniť účinnosť PCR analýzy (Soman et al., 2020). Ako analyzovaná molekula sa využíva aj mitochondriálna DNA (mtDNA). Dôvodom prečo sa využíva je jej vyšší počet kópií v bunkách, jej druhovo špecifickému charakteru a stabilite počas spracovania. Napriek výhodám má aj obmedzenia, a to rozdiely v počte kópií medzi tkanivami a druhmi čo môže ovplyvniť presnosť kvantifikácie (Alikord et al., 2018). Na identifikáciu mäsa sa používajú rôzne PCR techniky, ktoré sa líšia podľa účelu analýzy. **Multiplexná PCR** umožňuje detegovať viac živočíšnych druhov súčasne v jednej reakcii a to pomocou druhovo špecifických primerov, ktoré sa naviažu na konkrétne sekvencie DNA. Medzi výhody tejto metódy patrí jej citlivosť a spoľahlivosť. Obzvlášť je vhodná pri kontrole zložení mäsových výrobkov s viacerými zložkami (Matsunaga et al., 1998). Ďalšou metódou je **RAPD-PCR** (Random amplified polymorphic DNA), kde sa na amplifikáciu špecifických segmentov DNA použijú náhodné primery, ktoré sú krátkymi sekvenciami nukleotidov a viažu sa na komplementárne sekvencie v templáte DNA. Náhodnosť primerov umožňuje amplifikáciu rôznych oblastí v genóme, čo vedie k identifikácii každého druhu (Mane et al., 2008). **PCR-RFLP** (Restriction fragment length polymorphism) kombinuje PCR so štiepením DNA reštrikčnými enzýmami. Výsledné fragmenty sa separujú elektroforézou, čím sa získa druhovo špecifický „otlačok“ DNA. Výhodou tejto metódy je jednoduchosť, nízke náklady a použiteľnosť pre surové aj tepelne upravené mäso. Celkovo je však táto metóda obmedzená, pretože je schopná vykonať identifikáciu iba na reštrikčnom mieste zvoleného enzýmu, aj keď sa mnoho ďalších oblastí líši v celom géne (Alikord et al., 2018). **QPCR** (Quantitative PCR) je kvantitatívna metóda. Umožňuje sledovať amplifikáciu DNA počas každého cyklu PCR v reálnom čase. Používajú sa fluorescenčné farbiva. To umožňuje presné stanovenie prítomnosti a množstva druhovo špecifickej DNA aj v spracovaných a zmiešaných vzorkách. Môže byť použitý pri rutinnej detekcii a kvantifikácii živočíšnych druhov (Ballin et al., 2009; Okuma & Hellberg, 2015). Ďalšie významné metódy identifikácie druhov mäsa v reálnom čase boli **TaqMan** a **SYBR-green**. Pri porovnaní medzi metódami TaqMan a SYBR-Green v kvantitatívnej PCR sa odhaľujú odlišné výhody a aplikácie pre každú techniku. TaqMan používa špecifickú sondu, ktorá sa viaže

na cieľovú DNA testovaných druhov mäsa a poskytuje vysokú špecifickosť a citlivosť. SYBR-Green používa fluorescenčné farbivo, ktoré sa viaže na dvojvláknovú DNA. Ako PCR postupuje a vytvára sa viac DNA, množstvo SYBR-Green naviazanej na DNA sa zvyšuje, čo vedie k zvýšeniu fluorescence. Túto fluorescenciu je možné merať v reálnom čase, čo umožňuje kvantifikáciu DNA prítomnej vo vzorke. Tým, že sa SYBR-Green viaže na rôzne časti DNA môže viesť k nešpecifickým signálom (Lakzadeh et al., 2016; Porzahmat Shirvan et al., 2020). Záverečnými metódami identifikácie mäsa pomocou DNA, ktoré budú v tomto článku spomenuté, sú **ddPCR** (Droplet digital PCR) a **dPCR** (Digital PCR). Tieto metódy predstavujú najmodernejšie prístupy, ktoré umožňujú absolútnu kvantifikáciu DNA bez potreby štandardnej kalibrácie. Vzorka DNA sa rozdelí na tisíce reakčných častí a PCR amplifikácia templátových molekúl prebieha v každej jednotlivéj časti. Táto technológia dosahuje extrémne vysokú citlivosť a umožňuje detekciu veľmi nízkych koncentrácií DNA (až 0,001 %). Hlavný rozdiel medzi dPCR a ddPCR spočíva v spôsobe rozdelenia vzorky. Zatiaľ čo tradičná dPCR používa menej precízne metódy delenia, ddPCR generuje tisíce kvapiek emulzie, z ktorých každá slúži ako samostatná reakčná komora, čo vedie k presnejšej a spoľahlivejšej kvantifikácii DNA, najmä pri nízkych koncentráciách (Alikord et al., 2018; Jearapong, 2014).

Významnú a často využívanú skupinu metód na identifikáciu druhov mäsa tvoria aj techniky založené na analýze **proteínov**. Tieto metódy sú charakteristické vysokou citlivosťou a schopnosťou rozlišovať medzi živočíšnymi druhmi na základe ich proteínového zloženia (Alikord et al., 2018). Jednou z najstarších využívaných techník je elektroforéza, konkrétne **SDS-PAGE** (Sodium dodecyl sulfate–polyacrylamide gel electrophoresis), ktorá separuje proteíny na základe ich molekulovej hmotnosti. Používa sa na rozpustné bielkoviny, najmä sarkoplazmatické bielkoviny, a aplikuje sa pri mäse v surovom stave. Nevýhodami tejto metódy sú nízka spoľahlivosť, nedostatočná citlivosť, náročná interpretácia gélov a interferencia faktorov vrátane stupňa tepelného spracovania a techník farbenia (Alikord et al., 2018; Lee & Lee, 1988). Presnejšou alternatívou je **IEF** (Isoelectric focusing), ktoré oddeľuje proteíny podľa ich izoelektrického bodu (pI). IEF umožňuje identifikáciu druhov v mäsových zmesiach s presnosťou približne 10 %. Je schopná identifikovať živočíšne druhy v surovom či varenom mäse. Nevýhodou tejto metódy je, že nedokáže rozlíšiť medzi blízko príbuznými druhmi, ako sú ovce a kozy, hovädzí dobytok a byvoly, kone a somáre (Mackie et al., 2000; Slattey & Sinclair, 1983). **2-DE** (Two-dimensional gel electrophoresis) predstavuje techniku, ktorá umožňuje separáciu tisícov proteínov. Je kombináciou izoelektrického zaostrovania (IEF) a SDS-PAGE, kde prvej dimenzii sa proteíny triedia najprv podľa izoelektrického bodu a v druhej dimenzii podľa molekulovej hmotnosti. 2-DE umožňuje analyzovať komplexné zmesi, oddeľovať proteíny od kontaminantov či porovnávať proteínové profily medzi druhmi. Nevýhodami sú kvalitatívna povaha metódy a obmedzená účinnosť pri identifikácii proteínov s hmotnosťou pod 10 kDa a nad 60 kDa (Alikord et al., 2018; Vostriko-

va et al., 2017). **CE** (Capillary electrophoresis) kombinuje elektroforetické a chromatografické princípy. Hoci je CE dostatočne citlivá na analýzu proteínov, jej praktické využitie pri identifikácii falšovania mäsa je obmedzené kvôli náročnému vybaveniu (Recio et al., 2001). Imunologické metódy, ako **ELISA** (Enzyme-linked immunosorbent assay), patria medzi najčastejšie techniky na detekciu živočíšnych bielkovín vďaka vysokej citlivosti a špecifickosti. Na identifikáciu druhov mäsa sa využívajú druhovo špecifické protilátky. Monoklonálne protilátky (MABs) sú preferované pre svoju stabilitu, presnosť a neobmedzenú dostupnosť. Komerčné ELISA súpravy umožňujú detekciu mäsa rôznych druhov, a to v surovom aj tepelne spracovanom stave (Alikord et al., 2018; Konstantinou, 2017; Recio et al., 2001). **LC** (Liquid chromatography), najmä vo forme **HPLC** (High-performance liquid chromatography), patrí medzi základné nástroje pri stanovení profilov proteínov, peptidov a aminokyselín, čím sa efektívne využíva pri identifikácii živočíšnych druhov v potravinách (Alikord et al., 2018). Vysoká citlivosť a presnosť, aj pre spracované mäsové výrobky, robia z HPLC spoľahlivú analytickú techniku. Samotný princíp LC je založený na separácii analyzovaných látok na základe ich fyzikálno-chemických vlastností, ako sú náboj, hydrofóbnosť, afinita, rozpustnosť či molekulová hmotnosť v interakcii medzi mobilnou a stacionárnou fázou v analytickej kolóne, čo vedie k ich individuálnemu rozlíšeniu v chromatograme (Samanidou, 2015). Na základe tohto princípu bola vyvinutá pokročilejšia technika – **LC-MS** (Liquid chromatography-mass spectrometry), ktorá kombinuje výhody LC s vysokou špecifickosťou a citlivosťou MS (Guan & Zhong, 2017; Windarsih et al., 2022a). Hmotnostná spektrometria umožňuje identifikovať a kvantifikovať molekuly na základe pomeru ich hmotnosti k náboju (m/z), pričom analyzované ióny sú najprv generované ionizáciou vzorky, následne separované v analyzátore a detegované. Prístroj pozostáva zo štyroch hlavných častí: zavedenie vzorky, ionizácia, hmotnostný analyzátor a detektor, pričom najčastejšie je prepojený s chromatografiou, ktorá zabezpečuje postupný vstup zložiek vzorky do spektrometra (Serdar, 2017). Táto kombinácia umožňuje nielen spoľahlivú identifikáciu živočíšnych druhov, ale aj detekciu prítomnosti cudzích proteínov a kvantifikáciu jednotlivých zložiek, čo má významný prínos pri odhaľovaní falšovania a overovaní autenticity mäsových výrobkov (Guan & Zhong, 2017; Windarsih et al., 2022a).

Hoci sú DNA metódy ako PCR mimoriadne citlivé a schopné detegovať aj stopy genetického materiálu, ich účinnosť môže byť výrazne ovplyvnená degradačnými procesmi spôsobenými tepelným alebo chemickým spracovaním. Naopak, primárna štruktúra proteínov vykazuje vyššiu stabilitu voči tepelnému spracovaniu, čo umožňuje ich detekciu aj v spracovaných výrobkoch, kde môže byť DNA už značne poškodená (Wang et al., 2018). Techniky založené na hmotnostnej spektrometrii, ako LC-MS/MS, umožňujú spoľahlivú identifikáciu druhovo špecifických peptidových markerov a zároveň kvantifikáciu zložiek aj pri nízkych koncentráciách. Významnou výhodou proteínových prístupov je ich aplikovateľnosť na široké spektrum vzoriek vrátane vareného

mäsa, želatíny, kreviet či koženého tovaru (Stachniuk et al., 2021). Navyše, proteínová analýza pomocou LC-MS/MS umožňuje multiplexnú detekciu a autentifikáciu aj pri komplexných viacložkových výrobkoch (Watson et al., 2015). Proteínové techniky ako ELISA či spektrometrická proteomika sú dobre etablované, rýchle a často nevyžadujú tak nákladnú a časovo náročnú extrakciu ako DNA (Stachniuk et al., 2021). Preto pri identifikácii živočíšnych druhov v spracovaných potravinách, kde môže byť DNA degradovaná, predstavuje proteínová analýza spoľahlivú a praktickú alternatívu.

Kvantifikácia mäsa

Kvantifikácia proteínov je kľúčovým nástrojom modernej proteomiky a svoje miesto si našla v mnohých oblastiach výskumu a praxe. Zatiaľ čo v minulosti bola hmotnostná spektrometria využívaná najmä na kvalitatívnu identifikáciu proteínov, dnes ju možno využiť aj na presné kvantitatívne analýzy. Pri kontrole kvality potravín a overovania autenticity sa kvantifikácia proteínov stáva nenahraditeľným nástrojom, ktorý umožňuje presné určenie podielu mäsa v mäsových výrobkoch, aj v prípadoch, kde dochádza k degradácii DNA alebo iných biologických polymérov, čím sa tradičné genetické metódy stávajú neúčinné. Práve preto sa metódy kvantitatívnej proteomiky stali kľúčovým prístupom v riešení otázok falšovania mäsových produktov (Zhu et al., 2010). Z hľadiska postupu je možné rozdeliť kvantitatívne prístupy na dve hlavné skupiny, a to značkové (label-based) a nezačkové (label-free) metódy (Windarsih et al., 2022b). **Značkové techniky** využívajú stabilné izotopové alebo chemické značky, ktoré sú inkorporované do štruktúry peptidov, a tým umožňujú ich jednoznačné rozlíšenie na základe rozdielu v molekulovej hmotnosti (Chen & Yates, 2007). **AQUA** (Absolute quantification), ktorá je jednou z najpoužívanejších label-based metód, využíva izotopovo značené syntetické peptidy ako interné štandardy. Tieto peptidy sú identické s cieľovými analyzovanými peptidmi, no obsahujú ťažké izotopy (napr. ^{13}C alebo ^{15}N), vďaka čomu sú v spektre ľahko rozlíšiteľné. V kombinácii s režimom multiple reaction monitoring (MRM) alebo single reaction monitoring (SRM) dosahuje AQUA mimoriadne vysokú presnosť a spoľahlivosť kvantifikácie, a to aj v zložitých potravinových vzorkách (Mallick & Kuster, 2010). Okrem metódy AQUA existujú aj iné label-based metódy. **SILAC** (Stable isotope labeling by amino acids in cell culture) je založený na kultivácii buniek v médiách obsahujúcich izotopovo značené aminokyseliny. Tie sa počas proteosyntézy inkorporujú do novo syntetizovaných proteínov, čo umožňuje ich priame porovnanie medzi rôznymi experimentálnymi podmienkami. Metódy ako **iTRAQ** (Isobaric tags for relative and absolute quantification) a **TMT** (Tandem mass tags) využívajú izobarické značky, ktoré umožňujú multiplexovanú analýzu, čiže súčasnú kvantifikáciu viacerých, zvyčajne 4 až 10, vzoriek v jednom MS experimente. Vďaka tomu sú obzvlášť vhodné na vysokopriepustné analýzy s veľkým množstvom biologických alebo potravinových vzoriek (Anand et al., 2017; Mallick & Kuster, 2010). K ďalším známym značkovacím technikám patrí **ICAT** (Isotope-coded affinity tags), ktorá značí určité aminokyselinové zvyšky

(najčastejšie cysteín) a umožňuje selektívne obohatenie a kvantifikáciu cieľových proteínov. V niektorých prípadoch sa využíva aj dimetylové značenie, ktoré predstavuje jednoduchý a cenovo efektívny spôsob chemickej modifikácie peptidov (Montowska & Fornal, 2017b). Hlavnými výhodami label-based prístupov sú ich vysoká presnosť, reprodukovateľnosť a citlivosť (Windarsih et al., 2022b). Na druhej strane, metódy založené na značení majú aj svoje nevýhody. Ich hlavným obmedzením sú vysoké náklady spojené s nákupom izotopovo značených látok, náročná príprava vzoriek a potreba špecializovaného softvérového vybavenia. Okrem toho sú menej vhodné pri analýze veľkého počtu proteínov alebo vzoriek, kde je použitie značiek technicky alebo ekonomicky nepraktické (Montowska & Fornal, 2017b). Ako reakcia na tieto obmedzenia sa v posledných rokoch výrazne rozšírili **neznačkové**, tzv. label-free prístupy, ktoré nevyžadujú žiadne chemické modifikácie vzoriek. Tieto techniky sú založené na priamej analýze jednotlivých vzoriek pomocou LC-MS/MS, pričom kvantitatívne porovnanie sa uskutočňuje buď na základe intenzity chromatografických pík (tzv. peak intensity), alebo na základe počtu fragmentačných spektier (spectral counting), ktoré boli priradené konkrétnym proteínom (Dowle et al., 2016). **Peak intensity** vychádza z toho, že čím silnejší je signál v spektre, tým viac daného peptidu sa vo vzorke nachádza. Aby boli výsledky spoľahlivé, je však potrebné zabezpečiť stabilný chod LC-MS systému, správne porovnať jednotlivé merania a použiť softvér, ktorý presne zarovná píky a pomôže s ich štatistickým vyhodnotením. (Cappadona et al., 2012). **Spectral counting** je alternatívny prístup, ktorý predpokladá, že čím viac je daný proteín prítomný vo vzorke, tým viac vznikne naštiepených peptidov, ktoré budú následne identifikované počas MS/MS analýzy, a tým vyšší bude aj počet zaznamenaných spektier. Tento spôsob je menej náročný na výpočtové spracovanie, no vyznačuje sa nižšou presnosťou a je náchylný na skreslenie v prípade prítomnosti zdieľaných peptidov medzi rôznymi proteínmi (Hoehenwarter & Wienkoop, 2010).

Label-free prístupy sa ukázali ako mimoriadne efektívne najmä pri analýze komplexných proteínových zmesí, kde sa často uplatňujú v kombinácii s vysoko-rozlišovacou tandemovou hmotnostnou spektrometriou (LC-MS/MS). Tieto metódy si získali významné postavenie v aplikáciách zameraných na analýzu potravín, kde umožňujú kvantifikovať nielen druhovo špecifické proteíny, ale aj detegovať prítomnosť menej hodnotných prísad, ako sú spojivové tkanivá, krvná plazma, mliečne proteíny či dokonca vnútornosti. Tieto zložky sú často využívané ako lacnejšie náhrady kvalitného svalového tkaniva, a ich identifikácia a kvantifikácia má zásadný význam pre ochranu spotrebiteľa a dodržiavanie legislatívnych noriem (Claydon et al., 2015; Montowska & Fornal, 2017b). Jedným z najspoľahlivejších prístupov v kvantifikácii mäsových zložiek je detekcia druhovo špecifických peptidových markerov pochádzajúcich z bielkovín ako myoglobín, myozín, tropomyozín, GAPDH a beta-enoláza. Tieto bielkoviny možno spoľahlivo detegovať aj po tepelnom spracovaní, čo z nich robí ideálne biomarkery pre analýzu

hotových výrobkov. Príklady ich úspešného využitia možno nájsť v štúdiách, ktoré sa zamerali na kvantifikáciu hovädzieho a bravčového mäsa v omáčkach typu Bolognese, sušenej šunke alebo iných komplexných výrobkoch (Montowska & Spychaj, 2018; Prandi et al., 2017; Sarah et al., 2016). Vzhľadom na význam kvantifikácie v potravinárskej praxi sa neustále rozvíjajú aj nové nástroje a softvérové platformy pre spracovanie údajov z LC-MS. Medzi najznámejšie **open-source** riešenia patria MaxQuant, OpenMS a MsInspect, ktoré umožňujú nielen extrakciu signálu, ale aj jeho normalizáciu, zarovnanie chromatografických profilov, štatistické porovnanie skupín a vizualizáciu výsledkov. V prípade potreby absolútnej kvantifikácie sa čoraz častejšie využívajú algoritmy ako emPAI (Exponentially modified protein abundance Index) a APEX (Absolute protein expression), ktoré počítajú s pravdepodobnosťou detekcie jednotlivých peptidov a zohľadňujú rozdiely v ich ionizačnom správaní (Montowska & Fornal, 2017b).

Dá sa povedať, že kvantifikácia proteínov pomocou moderných techník hmotnostnej spektrometrie sa stala dôležitým nástrojom v analytickej praxi, najmä tam, kde je potrebné presné stanovenie obsahu biologických zložiek v zmesiach.

Záver

Falšovanie mäsa predstavuje vážny celosvetový problém, ktorý má dopad nielen na ekonomiku, ale aj na dôveru spotrebiteľa voči výrobcom potravín. Okrem

Literatúra

Chaora, N. S. et al.: A 16 s next generation sequencing based molecular and bioinformatics pipeline to identify processed meat products contamination and mislabelling. *Animals*, 12(4): 416, doi: 10.3390/ani12040416, (2022).

Ayaz, Y. et al.: Detection of species in meat and meat products using enzyme-linked immunosorbent assay. *J. Muscle Foods*, 17(2), 214–220, doi: 10.1111/j.1745-4573.2006.00046.x, (2006).

Doroudian, M. et al.: Identification of meat adulteration in minced meat samples labeled as beef and mutton in Tehran stores using duplex PCR. *Food Sci. Nutr.*, 12(10), 7504–7511, doi: 10.1002/fsn3.4351, (2024).

Brambilla, G. et al.: Clinical and pharmacological profile in a clenbuterol epidemic poisoning of contaminated beef meat in Italy. *Toxicol. Lett.*, 114(1–3), 47–53, doi: 10.1016/S0378-4274(99)00270-2, (2000).

Velasco-Bejarano, B. et al.: Quantification and stereochemical composition of R-(–) and S-(+)-clenbuterol enantiomers in bovine urine by liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *J. Anal. Toxicol.*, 44(3), 237–244, doi: 10.1093/jat/bkz087, (2020).

Kameník, J.: Aktuální produkce masa: Svět, EU, ČR / Meat production: World, EU, Czech Republic. In: *Sborník L. konference o jakosti potravin a potravinových surovin / Book of the 50th food quality and safety conference*, Mendel University in Brno, 154–159, doi: 10.11118/978-80-7509-996-9-0154, (2024).

narušenia tejto dôvery ide aj o otázky náboženské a zdravotné – niektoré náboženstvá konzumáciu určitých druhov mäsa zakazujú a nedeklarované zložky môžu viesť k závažným alergickým reakciám. Hoci dnes existuje množstvo analytických metód, ktoré umožňujú odhaliť druhové zloženie mäsových výrobkov, väčšina z nich majú svoje obmedzenia. Výrazný potenciál v tejto oblasti ukazujú metódy založené na proteóme, ktoré vďaka svojej vyššej stabilite poskytujú spoľahlivé výsledky aj pri tepelne upravených produktoch. Osobitne sa osvedčila technika LC-MS/MS, ktorá umožňuje nielen presnú identifikáciu druhovo špecifických proteínov, ale aj ich kvantifikáciu. Využívajú sa pritom buď značkové metódy, ktoré sú síce vysoko presné, no nákladné a personálne náročné, alebo neznáchané prístupy, ktoré predstavujú prístupnejšiu a perspektívnu alternatívu v bežnej laboratórnej praxi.

Podakovanie

Tento výstup vznikol v rámci projektu Specifického vysokoškolského výzkumu – projekt č. A1_FPB2_2025_001.

Státní zemědělská a potravinářská inspekce. “SZPI zjišťovala kuřecí párky z dovozu falšované nižším obsahem masa”. Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.szpi.gov.cz/clanek/szpi-zjistila-kureci-parky-z-dovozu-falsovane-nizsim-obsahem-masa.aspx>.

Li, X. et al.: Meat food fraud risk in Chinese markets 2012–2021. *npj Sci. Food*, 7(1), 1–11, doi: 10.1038/s41538-023-00189-z, (2023).

Sebranek, J. G. et al.: Raw material composition analysis. In *Encyclopedia of Meat Sciences (Third edition)*, Elsevier, 361–369, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00016-8>, (2024).

Williams, P.: Nutritional composition of red meat. *Nutr. Diet.*, 64, S113–S119, <https://doi.org/10.1111/j.1747-0080.2007.00197.x>, (2007).

Marangoni, F. et al.: Role of poultry meat in a balanced diet aimed at maintaining health and wellbeing: an Italian consensus document. *Food Nutr. Res.*, 59(1), 27606, (2015).

Belitz, H.D. et al.: *Food Chemistry*. Springer science & business media, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7>, (2013).

Ahmad, R. S. et al.: Nutritional composition of meat. *Meat Sci. and Nutr.*, 61, 61–75, doi: 10.5772/intechopen.77045, (2018).

Woods, V. B. et al.: Dietary sources of unsaturated fatty acids for animals and their transfer into meat, milk and

- eggs: a review. *Livest. Sci.*, 126(1–3), 1–20, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.07.002>, (2009).
- Hui, Y. H. et al.: *Meat Science and Applications*, CRC Press, (2001).
- Montowska, M. et al. Label-free quantification of meat proteins for evaluation of species composition of processed meat products. *Food Chem.*, 237, 1092–1100, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.06.059, (2017).
- Alikord, M. et al.: Species identification and animal authentication in meat products: a review. *J. Food Meas. Charact.*, 12(1), 145–155, doi: 10.1007/S11694-017-9625-Z/FIGURES/2, (2018).
- Shah, N. J.: Polymerase chain reaction. In *Introduction to Basics of Pharmacology and Toxicology*, 395–397, doi: 10.1007/978-981-32-9779-1_31, (2019).
- Soman, M. et al.: Detecting mislabelling in meat products using PCR–FINS. *J. Food Sci. Technol.*, 57(11), 4286–4292, doi: 10.1007/s13197-020-04641-w, (2020).
- Matsunaga, T. et al.: Determination of mitochondrial cytochrome b gene sequence for red deer (*Cervus elaphus*) and the differentiation of closely related deer meats. *Meat Sci.*, 49(4), 379–385, [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(97\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(97)00145-9), (1998).
- Mane, B. G. et al.: Differentiation of meat species by means of polymerase chain reaction technique. *Int. J. Food Saf. Nutr. Public Health*, 1(1), 51, doi: 10.1504/IJFSNP.2008.018855, (2008).
- Ballin, N. Z. et al.: Species determination—can we detect and quantify meat adulteration? *Meat Sci.*, 83(2), 165–174, (2009).
- Okuma, T. A. et al.: Identification of meat species in pet foods using a real-time polymerase chain reaction (PCR) assay. *Food control*, 50, 9–17, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.08.017> (2015).
- Lakzadeh, L. et al.: Quantitative detection of chicken meat routine mislabeling in emulsion type sausages and burgers by SYBR green real time PCR assay. *Iran Agric. Res.*, 35(1), 49–54, (2016).
- Porzahmat Shirvan, S. et al.: TaqMan real-time PCR: a reliable method to detect meat species. *J. Food Bioprocess Eng.*, 3(2), 116–120, (2020).
- Jearapong, N.: Droplet digital polymerase chain reaction: a novel method for absolute quantification of the target DNA. *J. Sci. Technol. Mahasarakham Univ.*, 33(5), 518, (2014).
- Lee, J.H. et al.: Electrophoretic pattern of specific proteins in meat products. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 20(1), 34–39, (1988).
- Mackie, I. et al.: Species identification of smoked and gravad fish products by sodium dodecylsulphate polyacrylamide gel electrophoresis, urea isoelectric focusing and native isoelectric focusing: a collaborative study. *Food Chem.*, 71(1), 1–7, (2000).
- Slattery, W. J. et al.: Differentiation of meat according to species by the electrophoretic separation of muscle lactate dehydrogenase and esterase isoenzymes and isoelectric focusing of soluble muscle proteins. *Aust. Vet. J.*, 60(2), 47–51, (1983).
- Vostrikova, N. L. et al.: Determination of muscular tissue proteins by 2D electrophoresis and time-of-flight mass spectrometry. *J. Anal. Chem.*, 72(10), 1102–1112, doi: 10.1134/S1061934817100173, (2017).
- Recio, I. et al.: Capillary electrophoresis for the analysis of food proteins of animal origin. *Electrophoresis*, 22(8), 1489–1502, [https://doi.org/10.1002/1522-2683\(200105\)22:8<1489:AID-ELPS1489>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1522-2683(200105)22:8<1489:AID-ELPS1489>3.0.CO;2-G), (2001).
- Konstantinou, G. N.: Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). In *Food Allergens: Methods and Protocols*, Springer, 79–94, doi: 10.1007/978-1-4939-6925-8_7, (2017).
- Samanidou, V. F.: Basic LC method development and optimization. *Anal. Sep. Sci.*, 25–42, doi: 10.1002/9783527678129.assep002, (2015).
- Windarsih, A. et al.: Detection of pork in beef meatballs using LC-HRMS based untargeted metabolomics and chemometrics for halal authentication. *Molecules*, 27(23), 8325, doi: 10.3390/molecules27238325, (2022).
- Guan, Y. et al.: Encapsulation of ferulic acid ethyl ester in caseinate to suppress off-flavor formation in UHT milk. *Food chem.*, 237, 532–537, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.05.140, (2017).
- Serdar, M.: The mass spectrometer: how it works?. *Turk. J. Occup. Environ. Med. Saf.*, 2(1), 97, (2017).
- Wang, G.J. et al.: Peptide biomarkers identified by LC–MS in processed meats of five animal species. *J. Food Compos. Anal.*, 73, 47–54, doi: 10.1016/j.jfca.2018.07.004, (2018).
- Stachniuk, A. et al.: Liquid chromatography–mass spectrometry bottom-up proteomic methods in animal species analysis of processed meat for food authentication and the detection of adulterations. *Mass Spectrom. Rev.*, 40(1), 3–30, doi: 10.1002/mas.21605, (2021).
- Watson, A. D. et al.: Meat authentication via multiple reaction monitoring mass spectrometry of myoglobin peptides. *Anal. Chem.*, 87(20), 10315–10322, (2015).
- Zhu, W. et al.: Mass spectrometry-based label-free quantitative proteomics. *J. Biomed. Biotechnol.*, 2010, 1–6, doi: 10.1155/2010/840518, (2010).
- Windarsih, A. et al.: Detection of pork in beef meatballs using LC-HRMS based untargeted metabolomics and chemometrics for halal authentication. *Molecules*, 27(23), 8325, doi: 10.3390/MOLECULES27238325/S1, (2022).
- Chen, E. I. et al.: Cancer proteomics by quantitative shotgun proteomics. *Mol. Oncol.*, 1(2), 144–159, doi: 10.1016/J.MOLONC.2007.05.001, (2007).

Literatúra (pokračovanie)

Mallick, P. et al.: Proteomics: a pragmatic perspective. *Nat. Biotechnol.*, 28(7), 695–709, doi: 10.1038/nbt.1658, (2010).

Anand, S. et al.: Label-based and label-free strategies for protein quantitation. In *Proteome Bioinformatics*, 31–43, doi: 10.1007/978-1-4939-6740-7_4, (2017).

Montowska, M. et al.: Label-free quantification of meat proteins for evaluation of species composition of processed meat products. *Food Chem.*, 237, 1092–1100, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.06.059, (2017).

Dowle, A. A. et al.: Comparing the diagnostic classification accuracy of iTRAQ, peak-area, spectral-counting, and emPAI methods for relative quantification in expression proteomics. *J. Proteome Res.*, 15(10), 3550–3562, doi: 10.1021/ACS.JPROTEOME.6B00308/SUPPL_FILE/PR6B00308_SI_007.XLSX, (2016).

Cappadona, S. et al.: Current challenges in software solutions for mass spectrometry-based quantitative proteomics. *Amino Acids*, 43(3), 1087–1108, doi: 10.1007/S00726-012-1289-8, (2012).

Hoehenwarter, W. et al.: Spectral counting robust on high mass accuracy mass spectrometers. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 24(24), 3609–3614, doi: 10.1002/RCM.4818, (2010).

Claydon, A. J. et al.: Identification of novel peptides for horse meat speciation in highly processed foodstuffs. *Food Addit. Contam.: part A*, 32(10), 1718–1729, doi: 10.1080/19440049.2015.1075256, (2015).

Prandi, B. et al.: Mass spectrometry quantification of beef and pork meat in highly processed food: application on Bolognese sauce. *Food Control*, 74, 61–69, doi: 10.1016/J.FOODCONT.2016.11.032, (2017).

Sarah, S. A. et al.: LC-QTOF-MS identification of porcine-specific peptide in heat treated pork identifies candidate markers for meat species determination. *Food Chem.*, 199, 157–164, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2015.11.121, (2016).

Montowska, M. et al.: Quantification of species-specific meat proteins in cooked and smoked sausages using infusion mass spectrometry. *J. Food Sci. Technol.*, 55(12), 4984–4993, (2018).

Súhrn

V dnešnej dobe je dôležité vedieť, čo naozaj jeme – najmä pri mäsových výrobkoch, kde sa čoraz častejšie objavujú prípady falšovania. Správna identifikácia a určenie množstva mäsa v produktoch pomáha odhaliť nepoctivé praktiky, chrániť zdravie spotrebiteľov a zároveň budovať dôveru voči výrobcovi. Jednou z najspoľahlivejších metód, ako to dosiahnuť, je analýza proteínov. Najmä technika LC-MS/MS (kvapalinová chromatografia spojená s hmotnostnou spektrometriou) sa ukazuje ako veľmi presný a citlivý nástroj, ktorý dokáže odhaliť aj malé množstvá mäsa, a to aj v zložitých alebo tepelne spracovaných potravinách. Vďaka tomu sa proteínové metódy stávajú čoraz dôležitejšou súčasťou potravinovej kontroly.

Kľúčové slová: mäso, falšovanie, proteíny, LC-MS/MS, kvantifikácia

Summary

Knowing what we really eat is more important than ever – especially when it comes to meat products, where cases of fraud are still a concern. Being able to identify what kind of meat is present, and in what quantity, helps prevent dishonest practices, protects consumer health, and supports trust in the food industry. One of the most reliable ways to achieve this is through protein analysis. Techniques based on LC-MS/MS (liquid chromatography coupled with mass spectrometry) stand out for their high accuracy and sensitivity. They can detect even small amounts of specific meat types, even in complex or processed foods. That's why protein-based methods are becoming a key part of modern food quality control and authenticity testing.

Keywords: meat, adulteration, proteins, LC-MS/MS, quantification

VIROVÍ PŮVODCI GASTROENTERITIDY V OBĚHOVÉM VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ: OSUD NA ČOV A ÚPRAVNÁCH VODY

Margita Řezáčová¹, Anna Košinová*¹, Robert Kvaček², Kamila Zdeňková³, Jana Říhová Ambrožová¹, Vojtěch Kouba*¹

¹ Ústav technologie vody a prostředí, VŠCHT Praha, Technická 5, Praha 6, 166 28

² Pražské vodovody a kanalizace, a. s., Ke Kablu 971, 102 00 Praha 10

³ Ústav biochemie a mikrobiologie, VŠCHT Praha, Technická 5, Praha 6, 166 28

Anna.Kosinova@vscht.cz, Vojtech.Kouba@vscht.cz Kouba.Vojta@gmail.com

Úvod

Onemocnění virovou gastroenteritidou provázejí příznaky jako průjem, bolest břicha a zvracení. V některých případech ale může vést i k život ohrožující dehydrataci organismu (King et al., 2003; Shane et al., 2017). Mezi virové původce gastroenteritidy se řadí enterické viry jako adenoviry, noroviry nebo rotaviry. Se stolicí infikovaného jedince viry pronikají do odpadní vody (OV) (Špačková, 2023). Při znovuvyužívání vyčištěné odpadní vody nebo využití recipientu dotovaného odtokem z čistíren odpadních vod (ČOV) jako zdroje surové vody pro úpravný vod (ÚV) se mohou při nedostatečné úpravě vody dostat do pitné vody, čímž může být ohroženo lidské zdraví (Yan et al., 2024). Jedním z možných způsobů nákazy je totiž právě požití nebo kontakt s viry kontaminovanou vodou. Světová zdravotnická organizace uvádí, že kvůli znečištěné vodě v rozvojových zemích umírá každý rok na světě až jeden milion lidí (W.H.O., 2021). Rizika spojená s výskytem těchto virů by proto neměla být ve vodním hospodářství opomíjena.

V tomto článku jsou popsány zdroje vnosu a výskyt enterických virů v antropogenním vodním cyklu, tedy ve stokových sítích, na ČOV, v recipientech a povrchových vodách obecně, v technologii ÚV a v distribučních sítích. Dále diskutujeme, jak jejich výskyt ve vodách minimalizovat.

Virová gastroenteritida a viroví původci gastroenteritidy

Virová gastroenteritida je akutní infekční onemocnění způsobené zejména rotaviry, noroviry, adenoviry a astroviry. Viry se přenášejí fekálně-orální cestou, kontaminovanou vodou, potravinami nebo přímým kontaktem. Onemocnění se projevuje zvracením, průjmy, nevolností a dehydratací. U zdravých osob odezní bez následků, ale u dětí, seniorů a jedinců s oslabenou imunitou může být průběh závažnější. Léčba spočívá především v rehydrataci a doplnění živin (King et al., 2003; Shane et al., 2017).

Podle dat Státního zdravotního ústavu se sídlem v Praze (SZÚ) bylo v letech 2018 – 2022 hlášeno 43 720 případů virové gastroenteritidy, přičemž nejčastějšími původci byly rotaviry, noroviry a adenoviry. Většina nálezů v České republice souvisí s kontaktem s nakaženým jedincem, nevhodně upravenými potravinami nebo nedostatečnými hygienickými návyky. Požití kontaminované vody je dle zdokumentovaných případů způsobem méně častým, avšak v případě mimo-

řádných situacích – epidemiích – jde o způsob významný. Největší epidemie byla zaznamenána v roce 2015 v Praze při havárii vodovodního řádu (11 000 případů). K další události došlo v roce 2019 v Pardubickém kraji v důsledku kontaminace pitné vody nebo v roce 2022 v Libereckém kraji (Špačková, 2023).

Viry jsou částice tvořené RNA nebo DNA a kapsidou, některé mají lipidový obal. Rozmnožují se pouze v hostitelských buňkách a liší se strukturou genomu (ssRNA, dsRNA, ssDNA, dsDNA), obalem a druhem hostitele (Koonin et al., 2021). Hlavními původci virové gastroenteritidy (diagnóza s kódem A08) jsou podle SZÚ, který vychází z hlášených případů, rotaviry (51 %), noroviry (31 %) a adenoviry (12,5 %) (Špačková, 2023). Rotaviry jsou neobalené dsRNA viry s vícevrstvou kapsidou o velikosti 60 – 100 nm a délce genomu 18,5 – 19,0 kb (Desselberger, 2014; Pesavento et al., 2006). Noroviry jsou neobalené ssRNA viry, přičemž jejich délka genomu činí cca 7 700 bazí (Bhavanam et al., 2020; Ji et al., 2020). Adenoviry jsou neobalené dsDNA viry o průměru 95 nm a s velikostí genomu asi 26 – 45 kb (Kajon et al., 2019; Quintero-Ochoa et al., 2019).

Výskyt virů ve vodním hospodářství

Jak ukazuje Obrázek 1, ke kontaminaci vody může docházet při vnosu odpadní vody do prostředí (úniku nevyčištěné odpadní vody), splachy ze zemědělské půdy nebo přímým kontaktem vody s infikovaným jedincem. Potom, co je voda kontaminována, jsou viry unášeny a mohou se tak vyskytovat na místech, kde člověk přichází do kontaktu s vodou, a ohrozit veřejné zdraví (Yan et al., 2024). V rámci antropogenního vodního cyklu představují lidské i zvířecí střeční viry zdravotní riziko, a to i ve velmi malém množství ve velkém objemu vody (Vivier et al., 2004). Podle La Rosa et al. (2012) mají enterické viry velmi nízké infekční dávky (10 – 100 virionů) a ve vodním prostředí jsou díky absenci lipidového obalu vysoce stabilní. V následujících kapitolách jsou diskutovány výskyt a koncentrace enterických virů v odpadních, povrchových, podzemních a pitných vodách.

Stokové sítě, čištění odpadních vod a kalové hospodářství

Nejběžnějším zdrojem virové kontaminace u odpadních vod jsou fekálie nebo zvratky infikovaných jedinců, které jsou stokovou sítí z domácností nebo ne-

mocnic transportovány na ČOV (Ibrahim et al., 2021). Prez et al. (2015) uvádí, že stolice infikovaného jedince může obsahovat až $10^5 - 10^{11}$ enterických virů v gramu fekálií. Dále Zhou et al. (2025) uvádí, že norovirus, tedy jeden z hlavních původců gastroenteritidy, se v nevyčištěné nemocniční odpadní vodě může vyskytovat v koncentracích $10^6 - 10^8$ kopií cílového genu/l (dále uváděno jen jako kopií/l). Podle Yan et al. (2024) jsou enterické viry schopné v odpadní vodě zůstat aktivní až 61 dní a v městské odpadní vodě ve stokových sítích může koncentrace adenovirů dosahovat až $5,6 \times 10^2$ až $1,6 \times 10^8$ kopií/l, norovirů až $6,9 \times 10^2 - 4,7 \times 10^6$ kopií/l a rotavirů až $1,8 \times 10^3 - 8,9 \times 10^6$ kopií/l.

Na ČOV se koncentrace virů v OV mohou redukovat pomocí separačních a inaktivačních procesů. Během primárního čištění mohou být fyzikálně-mechanickými procesy odstraněny především viry, které jsou adsorbovány na pevných částicích a společně se zbytkem suspenze sedimentují (Cao et al., 2010). V lapácích písku nebo usazovacích nádržích je podle dostupné literatury možné odstranit např. 0,3 log přítomných adenovirů a 0,7 log enterovirů (výstupní koncentrace norovirů v průběhu roku mezi $1 \times 10^4 - 1 \times 10^8$ kopií/l) (Nordgren et al., 2009). V aktivačních nádržích jsou viry odstraňovány sorpcí na aktivovaný kal a inaktivací (Foladori et al., 2022; Yang et al., 2022). Na polioviru ukázali Kim and Unno (1996), že tyto viry byly sorbovány na vločky kalu a též odstraněny konzumací např. protozoa nebo metazoa. Podle Simmons et al. (2011) bylo v membránovém bioreaktoru odstraněno až 5,5 log adenovirů, 5,1 log enterovirů a 3,9 log norovirů. Dále mohou být viry během aktivačního procesu odstraňovány pomocí separace na membráně v membránových bioreaktorech (velikost pórů $0,04 \mu\text{m}$ s 60-98 % účinností) (vstupní koncentrace adenovirů, enterovirů a norovirů: $5,2 \times 10^8$; $1,1 \times 10^7$ a $2,8 \times 10^5$ virů/l, výstupní koncentrace adenovirů, enterovirů a norovirů: $2,7 \times 10^3$; $7,8 \times 10^1$ a $1,2 \times 10^1$ virů/l) (Simmons et al., 2011). I tak mohou koncentrace adenovirů na odtoku z aktivační nádrže dosahovat až $1,0 \times 10^6 - 3,7 \times 10^8$ kopií/l (Elmahdy et al., 2019).

Následné kvartérní (někdy označované i jako terciární) čištění odpadních vod, zahrnující chloraci, ozonaci, UV záření nebo filtraci, vede k dalšímu snížení koncentrace virů a jejich inaktivaci. Vlivem dezinfekce dochází k narušení kapsidy a nukleových kyselin (Fuzawa et al., 2019). Zařazení filtrace s přídavkem flokulantu zachytí podle Shirasaki et al. (2010) až 3 log přítomných norovirů. I přes zařazení technologických procesů inaktivujících viry (např. dezinfekce, pokročilé oxidační procesy, filtrace) přechází odtokem z ČOV do povrchových vod $10^4 - 10^5$ kopií/l neodstraněných virů (Yan et al., 2024). Příkladem zavedení dezinfekce může být situace v Mnichově, kdy museli po opakovaném překročení limitů mikrobiologických ukazatelů (*Escherichia coli* a intestinální enterokoky) ve vodách ke koupání podle směrnice EU 2006/7/ES a výsledcích potvrzujících přítomnost enterických virů zavést opatření pro snížení mikrobiologického zatížení řeky Isar. Na šesti ČOV před městem byly nainstalovány jednotky pro dezinfekci UV zářením, čímž se zvýšila bezpečnost pro rekreační aktivity. Konkrétní údaje o koncentracích virů ale nejsou dostupné (Hornung, 2008; Popp, 2005; Popp et al., 2004).

Ke vnosu virů do prostředí může z ČOV docházet i skrze kalové hospodářství. Adenoviry v zahuštěném kalu vstupujícím do vyhnívacích nádrží mohou dosahovat koncentrace až $1,3 \times 10^8 - 1,7 \times 10^8$ kopií/l (Assis et al., 2017). K odstraňování virů zde dochází díky hydrolytickým enzymům. Účinnost odstranění může být dále prohloubena zařazením termické hydrolyzy; pozitivní vliv na odstranění má vyšší teplota a silně zásadité prostředí (hodnota $\text{pH} > 11$) (Huang et al., 2024; Ward, 1981). Wong et al. (2010) však uvádějí, že i v odvodněném stabilizovaném kalu po fermentaci lze detekovat enterické viry ve velmi nízkých koncentracích (konkrétní koncentrace neuvádí). Autoři neuvádějí konkrétní druh kalu, dá se předpokládat, že se jedná o přebytečný kal. Použití nedostatečně hygienicky stabilizovaného kalu v zemědělství může vést ke kontaminaci povrchových nebo podzemních vod a riziku infekce populace (Gholipour et al., 2022). Další rizika kontaminace povrchových vod spojená se zemědělskou činností budou popsána v kapitole 3. 2. Kromě anaerobní stabilizace se pro zpracování kalu z komunálních ČOV využívá také kompostování (aerobní biologický rozkladný proces), které může být při nesprávné manipulaci také zdrojem vnosu virů do prostředí (Nocarová, 2025).

Povrchové vody a podzemní vody

Kontaminaci povrchové vody může zapříčinit vyčištěná OV z ČOV či odlehčená OV (Demeter et al., 2021). Při velmi silných deštích je překročena kapacita kombinovaných stokových sítí a akumulačních nádrží, i technologií ČOV. Naředená OV proto posléze odlehčovacími přepady odtéká do recipientu, např. řeky. Ve studii Rodriguez et al. (2012) v období častých srážek docházelo kvůli využití přepadů u kombinované stokové sítě k nárůstu koncentrací virů kultivovatelných na PLC/PRF/5 buněčné linii a nukleových kyselin norovirů a adenovirů v recipientu. Jedním z možných řešení pro nakládání s OV je intenzivně prosazovaná výstavba oddílné stokové sítě, kde nedochází k ředění OV vodou dešťovou. Rodriguez et al. (2012) ukázali, že recipienty vyčištěné OV z oddílné kanalizace skutečně během dešťů obsahovaly nižší koncentrace virů než recipienty ovlivněné jednotnou kanalizací.

Kontaminovat vodu mohou také splachy ze zemědělských půd a farem, kde jsou zdrojem enterických virů především výkaly infikovaných zvířat. Vzorky povrchové vody odebrané v blízkosti několika farem v Brazílii potvrzují přítomnost adenovirů až ve 40 % vzorků (de Oliveira et al., 2012). Dalšími příčinami virové kontaminace povrchové vody může být také nelegální vypouštění OV, lidská rekreační činnost (pláže, chatové oblasti), exkrementy infikovaných domácích zvířat, zasakování odpadních vod do podzemních vod nebo jiná náhodná přímá kontaminace. V přírodních vodních tocích (řeka, jezero) jsou viry sice naředené nebo se mohou usadit adsorbované na pevných částicích, ale při příznivých podmínkách zůstávají nenarušené (Yan et al., 2024). Podle Prevost et al. (2015) může vzorek říční vody ve městě obsahovat až $10^2 - 10^3$ kopií/l enterických virů. Nejčastějšími viry v říčních vodách byly

v této studii adenoviry, rotaviry a noroviry. Na výskyt virů v povrchových vodách mohou mít vliv i přítomné mikroplasty, které mohou nesorbované viry transportovat a prodloužit dobu jejich infekčnosti (Lu et al., 2022).

Zasakováním vody obsahující viry může docházet také ke kontaminaci podzemních vod. Může se jednat zejména o oblasti v blízkosti farem nebo zemědělských půd (Costeira et al., 2019). Podzemní voda je podle světové zdravotnické organizace zdrojem pitné vody až pro 50 % světové populace (W.H.O., 2021). Virová kontaminace vodonosné vrstvy tak může mít zásadní vliv na lokální hospodaření s vodou a její kvalitu (Tran et al., 2015). Na pravděpodobnost výskytu virů v podzemní vodě mají vliv nejen vlastnosti virových částic (velikost, náboj, hydrofobicita), ale také vlastnosti podloží. Vliv na výskyt virů má zejména tloušťka vrstvy nezpevněných materiálů ve skalním podloží, pórovitost, heterogenita materiálů, zrnitost a směr a rychlost proudění podzemní vody. V puklinách hornin se tvoří široké kolektory, ve kterých se mohou viry akumulovat. Nízká teplota podzemní vody a pomalá rychlost jejího proudění vytváří vhodné podmínky pro jejich transport. Dále se viry v podzemních vodách mohou vázat na povrch hornin (Allen et al., 2017). Borchardt et al. (2023) dále zjistili, že viry se mohou nacházet i ve velmi hlubokých vrtech obklopených ze všech stran izolátory. V této studii nedezinfikovaná podzemní voda odebraná přímo z vrtu obsahovala v průměru 0,1 kopii/l adenovirů a 0,5 kopii/l enterovirů. Při použití UV záření před vstupem do distribuční sítě koncentrace klesly na 0,02 kopii/l adenovirů, 0,01 kopii/l enterovirů. Dále při velkých povodních v Itálii v roce 2014 došlo ke vnosu virů do podzemní vody. Ve vodě ve studni bylo detekováno např. až $5,1 \times 10^4$ kopii/l enterovirů, což výrazně přesahuje minimální infekční dávku (Masciopinto et al., 2019). Užívání neupravené podzemní vody k pitným účelům s sebou tedy může nést riziko nákazy, nicméně použití UV záření toto riziko výrazně redukuje (Borchardt et al., 2023).

Ke vnosu nevyčištěné OV do prostředí může také dojít při extrémních povodních, jako tomu bylo např. v Ostravě při povodních na podzim roku 2024. Několikadenní silné přívalové deště způsobily hydraulické přetížení technologie i odlehčovacích prvků ČOV. V době kulminace řeky Odry zároveň docházelo k rozlívání řeky do areálu ČOV a došlo k vyplavení vody z primárních a sekundárních usazovacích nádrží a následně kompletnímu zatopení usazovacích i dosazovacích nádrží. Z nádrží byla tak do okolí vyplavena nejen nevyčištěná OV a usazený nebo dosazený kal, ale i vysoce infekční materiál jako např. shrabky z česlí. ČOV musela být na několik měsíců odstavena (k obnovení plného výkonu technologií došlo až po 10 měsících) a nevyčištěná OV se tak dostávala do prostředí. Provozovatelé dokázali zachytit pouze velké nečistoty díky improvizovaně nainstalovaným klecím. Kontaminaci by mohly zapříčinit i povodněmi způsobené závady na technologické lince, které měly dlouhodobé následky (např. praskliny v potrubí) (Žárský, 2025).

Úprava vody, distribuční sítě a epidemie spojené s haváriemi vodohospodářské infrastruktury

Vyhláška stanovující hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a rozsah kontroly pitné vody pomocí stanovení mikrobiologického ukazatele – somatických kolifágů říká: „*Tento ukazatel se stanoví, pokud z posouzení a řízení rizik v systému zásobování pitnou vodou vyplývá, že se somatické kolifágy mohou v surové vodě vyskytovat. Je-li zjištěna přítomnost v surové vodě v koncentraci >50 PTJ/100 ml, měl by se rozbor provést po všech krocích úpravy, aby bylo možné určit hodnotu log odstranění prostřednictvím existujících bariér a posoudit, zda je riziko průniku patogenních virů skrze úpravu dostatečně pod kontrolou.*“ (Vyhláška č. 252/2004 Sb.). Na ÚV se mohou enterické viry vyskytovat především v jímané surové vodě (např. až $2,9 \times 10^3 - 3,4 \times 10^4$ kopií/l adenovirů, $9,3 \times 10^3 - 10 \times 10^4$ enterovirů) (Mackowiak et al., 2018). Shi et al. (2021) uvádí, že surová voda může obsahovat až $1,4 \times 10^6$ enterovirů. Přímou na ÚV dochází postupně ke snížení koncentrace virů během celého procesu zahrnujícího koagulaci, sedimentaci, filtraci, ale především vefinální fázi při zařazení pokročilých oxidačních procesů, popř. chlórace. Celým procesem ÚV může být odstraněno až 3,1 log norovirů. (Yan et al., 2024).

V rozvinutém světě včetně ČR dochází ke kontaminaci pitné vody v distribuční síti pouze ve zcela výjimečných případech, především v důsledku havárií a poškození distribučního řadu. Ve zprávě z konference Zdraví a životní prostředí 2015 se uvádí, že na území České republiky mezi lety 1959 – 2015 propuklo v důsledku kontaminace vody viry a bakteriemi 15 epidemií, přičemž 5 z nich mělo za příčinu enterické viry (Kožíšek, 2015). V roce 2019 byla poté zaznamenána epidemie v obci Polička, kde byly v pitné vodě v distribuční síti detekovány noroviry původem z odlehčené odpadní vody kontaminující zdroj surové vody viz Tabulka 1 (Špačková, 2023). Dále bylo v nedávné době zaznamenáno několik menších epidemií, u kterých jsme ve veřejných zdrojích hygienických stanic nebyli schopni dohledat počet potvrzených případů. V roce 2023 nebyly v důsledku kontaminace vodou zaznamenány v dostupných zprávách žádné epidemie (SZÚ, 2024).

Tabulka 1 ukazuje, že největší českou zaznamenanou epidemií byla Dejvická havárie v roce 2015 s 11 000 potvrzenými případy (Kožíšek, 2015). Ke kontaminaci pitné vody došlo v místě křížení distribuční sítě s kanalizací, která zde byla položena v roce 1960, přičemž potrubí kanalizace vedlo nad úroveň vodovodního potrubí. *Tuto skutečnost je třeba vnímat jako atypickou, jelikož v ČR se vodovodní potrubí standardně umísťuje nad odpadní potrubí právě kvůli zamezení možné kontaminace.* K havárii došlo z důvodu souběhu několika skutečností, a to netěsnosti stokové sítě v důsledku jejího stáří, netěsnosti vodovodního řadu z důvodu havárie a to praskliny materiálu a zejména proto, že vodovodní potrubí bylo vypuštěno kvůli opravě. *Ve standardním stavu je totiž vodovodní potrubí proti vnější kontaminaci bráněno tím, že uvnitř řadu je vyšší tlak než v jeho okolí, což zamezuje vnějším částicím průniku*

Tab. 1: Přehled epidemií s kódem diagnózy A08* v letech 1959-2019, které propukly v důsledku kontaminace vody.

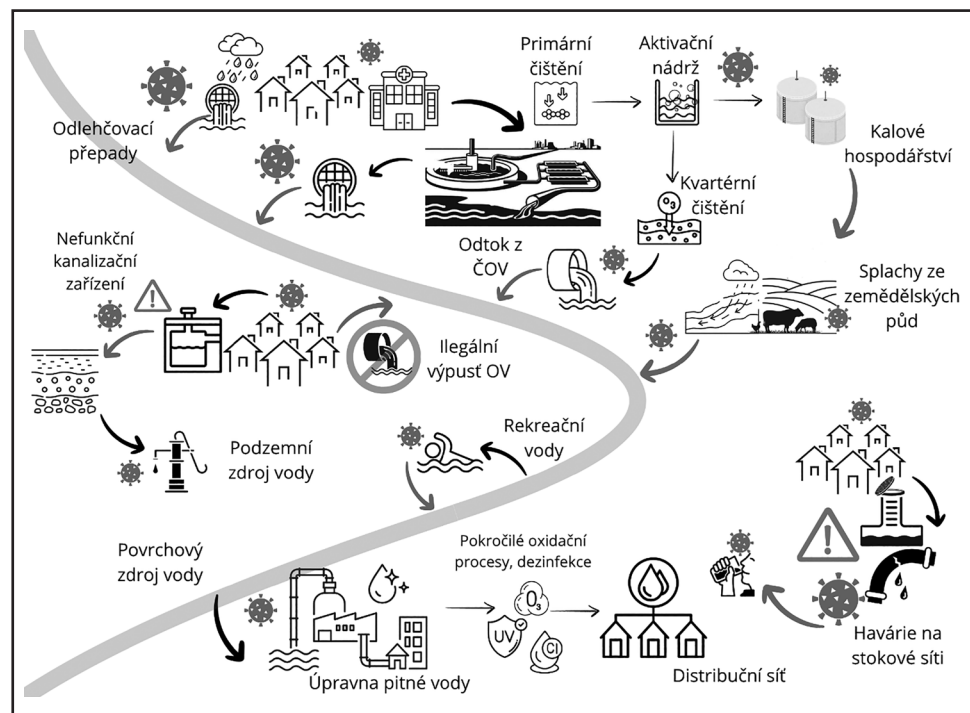
Rok propuknutí	Místo epidemie	Počet potvrzených případů	Virový původce GE, diagnóza	Reference
1987	Benátky nad Jizerou (Středočeský kraj)	349	Rotaviry (A08.0)	(Kožíšek, 2015)
1997	Polička (Pardubický kraj)	560	Neidentifikováno	
2003	Lomnice nad Popelkou (Liberecký kraj)	132	Neidentifikováno	
2015	Praha – Dejvice	11 000	Noroviry (A08.1)	
2015	Nový Bor (Liberecký kraj)	1 500	Noroviry (A08.1)	
2019	Pomezí, Polička (Pardubický kraj)	245 (odhad 4 000 infikovaných)	Noroviry (A08.1)	(Špačková, 2023)
2021	Pardubický kraj	neuvedeno	Neidentifikováno	(SZÚ, 2022)
2021	Kraj Vysočina	neuvedeno	Neidentifikováno	(SZÚ, 2022)
2022	Liberecký kraj	neuvedeno	Noroviry (A08.1)	(SZÚ, 2023)
2022	Pardubický kraj	neuvedeno	Neidentifikováno	

* A08 je označení diagnózy virové gastroenteritidy (GE), Rotavirové GE (A08.0), Norovirové GE (A08.1.), Adenovirové GE (A08.2), dále mezi ně patří „Jiné virové enteritidy“ a „Virové střevní infekce nespecifikované (agens neurčeno)“ Špačková, M. 2023 Nejčastější virové střevní nákazy v České republice v letech 2018-2022 a jejich základní epidemiologické charakteristiky, SZÚ, Praha.

do potrubí. Po několikadenním vyšetřování byly elektronovým mikroskopem detekovány noroviry v koncentracích 10 – 20 částic na 1 ml, což výrazně přesahuje minimální infekční dávku viru (Kožíšek, 2016).

Ve světovém měřítku jsou epidemie zapříčiněné virovou nebo jinou kontaminací běžné především v rozvojových a nejméně rozvinutých zemích, kde je kvalita vody na velmi nízké úrovni (Gibson, 2014). Svě-

tová zdravotnická organizace uvádí ve zprávě UN-Water, 2021: Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all, že „ročně zemře na průměrná onemocnění v důsledku požití nebo užití kontaminované vody až 1 milion lidí.“ SZÚ uvádí, že v Evropě v roce 2001 zemřelo v důsledku mikrobiologické kontaminace pitné vody 13,5 tisíce dětí ve věku do 14 let (Kožíšek et al., 2007). Konkrétní studie z rozvojových zemí



Obr. 1: Výskyt virových původců gastroenteritidy v antropogenním vodním cyklu.

uvádí rutinní pozitivní detekci enterických virů v upravené pitné vodě např. v Nepálu a v Rio de Janeiro. V pitné vodě v Nepálu byly detekovány enteroviry až v 9 %, rotaviry v 5 % a noroviry a adenoviry ve 4 % vzorků (Tandukar et al., 2019). V průměru v této studii koncentrace enterických virů ve vodovodech dosahovala $7,9 \times 10^3$ kopií/l. Ve studii Miagostovich et al. (2020) v Rio de Janeiro vzorek pitné vody z distribuční sítě obsahoval $2,2 \times 10^3$ kopií/l adenovirů, $8,7 \times 10^6$ kopií/l rotavirů a $9,4 \times 10^5$ kopií/l norovirů, jedná se však o oblast s vysokým rizikem kontaminace pitné vody únikem odpadních vod ze stokové sítě, což potvrzují i Tandukar et al. (2020).

Výzvy pro oběhové vodní hospodářství

Z dostupné literatury vyplývá, že enterické viry byly již detekovány ve všech druzích vod, které jsou součástí antropogenního vodního cyklu, a ve všech stupních úpravy i čištění vody. Při čištění odpadních vod v prostředí i při úpravě vody dochází k odstraňování virů řadou mechanismů, ať už separací nebo degradací. Viry na ČOV nejsou odstraněny kompletně a infekční částice mohou zůstat ve vodním prostředí. Jako nejstabilnější enterický virus uvádějí Girón-Guzmán et al. (2025) lidský adenovirus, který byl ve vzorku vody odebrané na odtoku z ČOV detekován infekční i po 98 dnech (při skladování vzorku při teplotě 6 °C). Jednou z výzev proto je detekce patogenních virů v různých typech matric vodního hospodářství, a to i při velmi nízkých koncentracích odpovídajících infekčním dávkám, které mohou ohrozit lidské zdraví. Cílem je tímto způsobem doplnit stávající metody monitorování, zahrnující stanovení indikátorových somatických kolifágů. Tyto nové přístupy je třeba nejen zavést do běžné praxe, ale postupně také začlenit do legislativy. Nedílnou součástí dalšího výzkumu by mělo být i zkoumání vlivu různých faktorů, jako jsou teplota nebo pH, na přežívání těchto virů ve vodním prostředí (Yan et al., 2024).

Zatímco v rozvojových zemích je výskyt virových původců gastroenteritidy pro vodohospodáře kritickou výzvou, ve vyspělém světě včetně ČR kvůli nim k ohrožení lidského zdraví dochází ve výjimečných případech kvůli kontaminaci nedostatečně upraveného zdroje vody nebo při souběhu několika nepravděpodobných faktorů, byť se závažnými důsledky. Pro eliminaci virové kontaminace povrchových vod je klíčové i nadále omezovat vnos a zasakování nevyčištěné, případně nedostatečně vyčištěné, OV do prostředí, např. zaváděním oddílných stokových sítí i větší informovaností veřejnosti o rizicích nelegální vypusti odpadních vod do prostředí. Dále

důležité je lépe popsat a případně odstraňování virů ve stávajících procesech ČOV, a to včetně kvarterních stupňů navržených pro odstraňování mikropolutantů, a dále i na ÚV. Pozornost by též měla být věnována redukci splachů ze zemědělství, a hygienizaci čistírenských kalů užívaných jako hnojiva v zemědělství.

Závěr

Vzhledem k nedokonalému odstranění virových původců gastroenteritidy na ČOV se tyto viry mohou vyskytovat i v povrchových vodách, a tedy i ve zdrojích surové vody pro ÚV. Ze studií také vyplývá, že na výskytu těchto virů v povrchových vodách se podílí významně i odlehčovací přepady, které do recipientu vnášejí nevyčištěnou odpadní vodu ze stokové sítě. Méně detailně je popsán osud enterických virů na ÚV, nicméně dostupné studie ukazují jejich odstranění pomocí např. ozonizace či chlorace. Navazující výzkum by se měl zaměřit na zamezení vnosu virových částic do prostředí a lépe popsat jejich odstranění v procesech ÚV. To vše především kvůli situacím, kdy vyčištěná odpadní voda tvoří významnou část povrchové vody, popřípadě surové vody pro ÚV. Tímto zredukujeme rizika ohrožení veřejného zdraví v důsledku kontaminace virovými původci gastroenteritidy.

Poděkování

Tento příspěvek byl financován z projektu TAČR SS07020223 „Metody nové generace pro vysoce citlivou a rychlou detekci fekálního znečištění a antibiotické rezistence pro podporu oběhového vodního hospodářství“. Autoři též děkují kolegům z Ústavu technologie vody a prostředí VŠCHT Praha (prof. Ing. Václav Janda, CSc. a Dr. Ing. Pavla Šmejkalová) za cenné komentáře na první verzi článku.

Literatura

Allen, A.S., Borchardt, M.A., Kieke, B.A., Dunfield, K.E. and Parker, B.L. 2017. Virus occurrence in private and public wells in a fractured dolostone aquifer in Canada. *Hydrogeology Journal* 25(4), 1117-1136.

Assis, A.S.F., Otenio, M.H., Drumond, B.P., Fumian, T.M., Miagostovich, M.P. and da Rosa e Silva, M.L. 2017. Optimization of the skimmed-milk flocculation method for recovery of adenovirus from sludge. *Science of The Total Environment* 583, 163-168.

Bhavanam, S., Freedman, S., Lee, B., Zhuo, R., Qiu, Y., Chui, L., Xie, J., Ali, S., Vanderkooi, O. and Pang, X. 2020. Differences in Illness Severity among Circulating Norovirus Genotypes in a Large Pediatric Cohort with Acute Gastroenteritis. *Microorganisms* 8(12), 1873.

Borchardt, M.A., Kieke, B.A., Jr., Spencer, S.K., Lambertini, E., Burch, T.R. and Loge, F.J. 2023. Community intervention trial for estimating risk of acute gastrointestinal illness from groundwater-supplied non-disinfected drinking water. *Journal of Water and Health* 21(9), 1209-1227.

Cao, H., Tsai, F.T.-C. and Rusch, K.A. 2010. Salinity and Soluble Organic Matter on Virus Sorption in Sand and Soil Columns. *Groundwater* 48(1), 42-52.

Costeira, R., Doherty, R., Allen, C.C.R., Larkin, M.J. and Kulakov, L.A. 2019. Analysis of viral and bacterial communities in groundwater associated with contaminated land. *Science of The Total Environment* 656, 1413-1426.

de Oliveira, L.K., Fleck, J.D., Comerlato, J., Kluge, M., Bergamaschi, B., Fabres, R.B., da Luz, R.B., da Silva, J.V.d.S., Rodrigues, M.T., Genro, J.L., Staggemeier, R., Baldasso, N. and Spilki, F.R. 2012. Enteric viruses in water samples from Brazilian dairy farms. *Agricultural Water Management* 111, 34-39.

Demeter, K., Derx, J., Komma, J., Parajka, J., Schijven, J., Sommer, R., Cervero-Aragó, S., Lindner, G., Zoufal-Hruza, C.M., Linke, R., Savio, D., Ixenmaier, S.K., Kirschner, A.K.T., Kromp, H., Blaschke, A.P. and Farnleitner, A.H. 2021. Modelling the interplay of future changes and wastewater management measures on the microbiological river water quality considering safe drinking

Literatura (pokračování)

- water production. *Science of The Total Environment* 768, 144278.
- Desselberger, U. 2014. Rotaviruses. *Virus Research* 190, 75-96.
- Elmahdy, E.M., Ahmed, N.I., Shaheen, M.N.F., Mohamed, E.-C.B. and Loutfy, S.A. 2019. Molecular detection of human adenovirus in urban wastewater in Egypt and among children suffering from acute gastroenteritis. *Journal of Water and Health* 17(2), 287-294.
- Foladori, P., Cutrupi, F., Cadonna, M. and Manara, S. 2022. Coronaviruses and SARS-CoV-2 in sewerage and their removal: Step by step in wastewater treatment plants. *Environmental Research* 207, 112204.
- Fuzawa, M., Araud, E., Li, J., Shisler, J.L. and Nguyen, T.H. 2019. Free Chlorine Disinfection Mechanisms of Rotaviruses and Human Norovirus Surrogate Tulane Virus Attached to Fresh Produce Surfaces. *Environmental Science & Technology* 53(20), 11999–12006.
- Gholipour, S., Ghalhari, M.R., Nikaeen, M., Rabbani, D., Pakzad, P. and Miranzadeh, M.B. 2022. Occurrence of viruses in sewage sludge: A systematic review. *Science of The Total Environment* 824, 153886.
- Gibson, K.E. 2014. Viral pathogens in water: occurrence, public health impact, and available control strategies. *Current Opinion in Virology* 4, 50-57.
- Girón-Guzmán, I., Falcó, I., Cuevas-Ferrando, E., Ballesteros, S., Barranquero, R. and Sánchez, G. 2025. Survival of viruses in water microcosms. *Science of The Total Environment* 963, 178416.
- Hornung, D. 2008. A ray of hope for the Isar. *Water and Wastewater International* 23(4), 20-22.
- Huang, B., Chen, B., Xie, X., Li, Z., Hou, X., Yang, E., Hu, L., Luan, T. and Yuan, K. 2024. Uncovering effects of anaerobic digestion process on viral communities in activated sludges using viromic approaches. *Chemical Engineering Journal* 496, 153964.
- Ibrahim, Y., Ouda, M., Kadadou, D., Banat, F., Naddeo, V., Alsafar, H., Yousef, A.F., Barceló, D. and Hasan, S.W. 2021. Detection and removal of waterborne enteric viruses from wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4), 105613.
- Ji, L., Hu, G., Xu, D., Wu, X., Fu, Y. and Chen, L. 2020. Molecular epidemiology and changes in genotype diversity of norovirus infections in acute gastroenteritis patients in Huzhou, China, 2018. *Journal of Medical Virology* 92(12), 3173-3178.
- Kajon, A.E., Weinberg, J.B. and Spindler, K.R. 2019. *Adenoviruses*, Elsevier.
- Kim, T.-D. and Unno, H. 1996. The roles of microbes in the removal and inactivation of viruses in a biological wastewater treatment system. *Water Science and Technology* 33(10), 243-250.
- King, C.K., Glass, R., Bresee, J.S. and Duggan, C. 2003. Managing acute gastroenteritis among children: oral rehydration, maintenance, and nutritional therapy. *MMWR Recommendations and Reports* 52(Rr-16), 1-16.
- Koonin, E.V., Krupovic, M. and Agol, V.I. 2021. The Baltimore Classification of Viruses 50 Years Later: How Does It Stand in the Light of Virus Evolution? *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 85(3), e0005321.
- Kožíšek, F. 2015. Byla dejvická epidemie největší v české historii?, *Konference Zdraví a životní prostředí* 6. – 8. 10 2015, Milovy.
- Kožíšek, F. 2016. Dejvická havárie a epidemie nebyla náhoda – Příčiny a průběh dejvické epidemie v květnu 2015, pp. 2-6.
- Kožíšek, F., Kos, J. and Pummann, P. 2007. Hygienické minimum pro pracovníky ve vodárenství, *Státní zdravotní ústav, Praha, Praha*.
- La Rosa, G., Fratini, M., Della Libera, S., Iaconelli, M. and Muscillo, M. 2012. Emerging and potentially emerging viruses in water environments. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita* 48(4), 397-406.
- Lu, J., Yu, Z., Ngiam, L. and Guo, J. 2022. Microplastics as potential carriers of viruses could prolong virus survival and infectivity. *Water Research* 225, 119115.
- Mackowiak, M., Leifels, M., Hamza, I.A., Jurzik, L. and Wingender, J. 2018. Distribution of *Escherichia coli*, coliphages and enteric viruses in water, epilithic biofilms and sediments of an urban river in Germany. *Science of The Total Environment* 626, 650-659.
- Masciopinto, C., De Giglio, O., Scarscia, M., Fortunato, F., La Rosa, G., Suffredini, E., Pazzani, C., Prato, R. and Montagna, M.T. 2019. Human health risk assessment for the occurrence of enteric viruses in drinking water from wells: Role of flood runoff injections. *Science of The Total Environment* 666, 559-571.
- Miagostovich, M.P., Rocha, M.S., Dos Reis, F.B., Sampaio, M.S., De Saldanha Da Gama Gracie Carrijo, R., Malta, F.C., Rodrigues, J., Genuino, A., Ribeiro Da Silva Assis, M., Fumian, T.M. and Barrocas, P. R.G. 2020. Gastroenteric Viruses Detection in a Drinking Water Distribution-to-Consumption System in a Low-Income Community in Rio de Janeiro. *Food and Environmental Virology* 12(2), 130-136.
- Nocarová, M. 2025. Legislativa pro transpozici odpadu do produktu, *Konference Nové metody a postupy při provozování ČOV* 8.–9. 4. 2025, Seč.
- Nordgren, J., Matussek, A., Mattsson, A., Svensson, L. and Lindgren, P. -E. 2009. Prevalence of norovirus and factors influencing virus concentrations during one year in a full-scale wastewater treatment plant. *Water Research* 43(4), 1117-1125.
- Pesavento, J.B., Crawford, S.E., Estes, M.K. and Venkataram Prasad, B.V. 2006. Rotavirus proteins: Structure and assembly. *Current Topics in Microbiology and Immunology* 309, 189-219.

Literatura (pokračování)

- Popp, W. 2005 Überprüfung der Abtötung bzw. Inaktivierung ausgewählter Krankheitserreger in Abwasser durch UV-Strahlung im Vergleich zur Reduktion von Fäkalindikatorbakterien und Untersuchungen zur Wiederverkeimung, pp. 26-28, Bayerische Landesamt für Umwelt.
- Popp, W., Huber, S. and Kexel, S. 2004. Abwasserdeinfektion zur Verbesserung der Badegewässerqualität an der Oberen Isar. *Wasser und Abfall* 6, 14-18.
- Prevost, B., Lucas, F.S., Goncalves, A., Richard, F., Moulin, L. and Wurtzer, S. 2015. Large scale survey of enteric viruses in river and waste water underlines the health status of the local population. *Environment International* 79, 42-50.
- Prez, V.E., Gil, P. I., Temprana, C.F., Cuadrado, P. R., Martínez, L.C., Giordano, M.O., Masachessi, G., Isa, M.B., Ré, V.E., Paván, J.V., Nates, S.V. and Barril, P. A. 2015. Quantification of human infection risk caused by rotavirus in surface waters from Córdoba, Argentina. *Science of The Total Environment* 538, 220-229.
- Quintero-Ochoa, G., Romero-Argüelles, R., Aviles-Hernández, A., Cejudo-Flores, M., Calleja-García, P., Domínguez-Gámez, M., Cantú-Bernal, S., Icedo-García, R., Soñanez-Organis, J., Rosas-Rodríguez, J., Romo-Saenz, C., Tamez-Guerra, P., Flores-Mendoza, L. and González-Ochoa, G. 2019. Viral agents of gastroenteritis and their correlation with clinical symptoms in rotavirus-vaccinated children. *Infection, Genetics and Evolution* 73, 190-196.
- Rodriguez, R., Gundy, P. and Rijal, G. 2012. The Impact of Combined Sewage Overflows on the Viral Contamination of Receiving Waters. *Food and environmental virology* 4, 34-40.
- Shane, A.L., Mody, R.K., Crump, J.A., Tarr, P. I., Steiner, T.S., Kotloff, K., Langley, J.M., Wanke, C., Warren, C.A., Cheng, A.C., Cantey, J. and Pickering, L.K. 2017. 2017 Infectious Diseases Society of America Clinical Practice Guidelines for the Diagnosis and Management of Infectious Diarrhea. *Clinical Infectious Diseases* 65(12), e45-e80.
- Shi, D., Ma, H., Miao, J., Liu, W., Yang, D., Qiu, Z., Shen, Z., Yin, J., Yang, Z., Wang, H., Li, H., Chen, Z., Li, J. and Jin, M. 2021. Levels of human Rotaviruses and Noroviruses GII in urban rivers running through the city mirror their infection prevalence in populations. *Science of The Total Environment* 754, 142203.
- Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Oshiba, A. and Ohno, K. 2010. Estimation of norovirus removal performance in a coagulation-rapid sand filtration process by using recombinant norovirus VLPs. *Water Research* 44(5), 1307-1316.
- Simmons, F.J., Kuo, D.H.W. and Xagorarakis, I. 2011. Removal of human enteric viruses by a full-scale membrane bioreactor during municipal wastewater processing. *Water Research* 45(9), 2739-2750.
- SZÚ 2022 Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2021, Státní zdravotní ústav, Praha.
- SZÚ 2023 Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2022, Státní zdravotní ústav, Praha.
- SZÚ 2024 Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2023, Státní zdravotní ústav, Praha.
- Špačková, M. 2023 Nejčastější virové střevní nákazy v České republice v letech 2018-2022 a jejich základní epidemiologické charakteristiky, SZÚ, Praha.
- Tandukar, S., Sherchan, S.P. and Haramoto, E. 2020. Reduction of Pathogenic and Indicator Viruses at a Drinking Water Treatment Plant in Southern Louisiana, USA. *Food and Environmental Virology* 12(3), 269-273.
- Tandukar, S., Sherchand, J.B., Karki, S., Malla, B., Ghaju Shrestha, R., Bhandari, D., Thakali, O. and Haramoto, E. 2019. Co-Infection by Waterborne Enteric Viruses in Children with Gastroenteritis in Nepal. *Healthcare* 7(1), 9.
- Tran, N.H., Gin, K.Y.-H. and Ngo, H.H. 2015. Fecal pollution source tracking toolbox for identification, evaluation and characterization of fecal contamination in receiving urban surface waters and groundwater. *Science of The Total Environment* 538, 38-57.
- Vivier, J.C., Ehlers, M.M. and Grabow, W.O.K. 2004. Detection of enteroviruses in treated drinking water. *Water Research* 38(11), 2699-2705.
- W.H.O. 2021 Summary Progress Update 2021: SDG 6 – water and sanitation for all, Geneva, Switzerland.
- Ward, R.L. (1981) *Viruses and Wastewater Treatment*. Goddard, M. and Butler, M. (eds), pp. 65-77, Pergamon.
- Wong, K., Onan, B.M. and Xagorarakis, I. 2010. Quantification of enteric viruses, pathogen indicators, and salmonella bacteria in class B anaerobically digested biosolids by culture and molecular methods. *Applied and Environmental Microbiology* 76(19), 6441-6448.
- Yan, C., Liu, L., Zhang, T., Hu, Y., Pan, H. and Cui, C. 2024. A comprehensive review on human enteric viruses in water: Detection methods, occurrence, and microbial risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 480, 136373.
- Yang, W., Cai, C. and Dai, X. 2022. Interactions between virus surrogates and sewage sludge vary by viral analyte: Recovery, persistence, and sorption. *Water Research* 210, 117995.
- Zhou, X., Li, Q., Shi, Z., Lu, W., Shu, C., Zhu, J. and Wu, Y. 2025. Assessing the prevalence of human enteric viruses in hospital wastewater to evaluate the effectiveness of wastewater treatment systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 289, 117488.
- Žárský, D. 2025 Dopady povodně na ÚČOV Ostrava a postup zprovoznění, Konference Nové metody a postupy při provozování ČOV 8.–9. 4. 2025, Seč.

Souhrn

Kontaminace pitných vod původci virové gastroenteritidy (př. noroviry, rotaviry, adenoviry) představuje ve vodním hospodářství výzvu, zejména při ochraně zdrojů surové vody a dezinfekci pitné vody. V této práci mapujeme výskyt a možnosti odstraňování virových původců gastroenteritidy v oběhovém vodním hospodářství s cílem omezit riziko ohrožení veřejného zdraví v důsledku virové kontaminace. Enterické viry se do odpadních vod dostávají stolicí infikovaných jedinců. Při konvenčním mechanicko-biologickém čištění odpadních vod jsou odstraňovány jen částečně a společně s viry v odlehčených odpadních vodách mohou pronikat až do zdrojů surové vody pro úpravný vod. Během procesů úpravy vody dochází ke snižování jejich množství, zejména díky pokročilým oxidačním procesům a dezinfekci. Zatímco v rozvojových zemích je přítomnost těchto virů v distribučních sítích běžná a dlouhodobá, v České republice je jejich výskyt zaznamenáván pouze výjimečně, a to při haváriích, například v Praze v roce 2015 nebo v Libereckém kraji v roce 2022. Z důvodu snížení potenciálních rizik při úpravě vody je vhodné sledovat míru znečištění viry v celém antropogenním vodním cyklu a zamezit únikům nevyčištěné odpadní vody do prostředí.

Klíčová slova: viroví původci gastroenteritidy, vodní hospodářství, virová kontaminace

Summary

Contamination of drinking water by viral agents of gastroenteritis (e.g., norovirus, rotavirus, adenovirus) poses a challenge for water management, especially in protecting the freshwater resources and water disinfection. Mapping the occurrence of these viral pathogens within the anthropogenic water cycle can help reduce the risk to public health resulting from viral contamination. Enteric viruses are excreted in the feces of infected individuals and enter the wastewater. During conventional mechanical-biological wastewater treatment, the excreted viruses are removed only partially and, together with viruses in overflow discharges, may reach raw water sources for drinking water production. During water treatment processes, their concentrations are reduced, especially by advanced oxidation processes and disinfection. The presence of these viruses in distribution systems has been documented even in the Czech Republic during incidents (e.g., Prague 2015, Liberec region 2022) and is a persistent issue in developing countries. Therefore, it is essential to monitor viral contamination throughout the entire anthropogenic water cycle and to prevent the release of untreated wastewater into the environment.

Key words: viral agents of gastroenteritis, water management, viral contamination

POTENCIÁL NANOMATERIÁLŮ DOPOVANÉHO OXIDU CERITÉHO ODSTRAŇOVAT REZIDUA LÉČIV A OSTATNÍ MIKTOPOLUTANTY

Vítězslav Mík¹, Petra Šnoblová², Vilém Bartůněk², Jana Bartáčková¹, Lucie Pokorná¹

¹ Ústav technologie vody a prostředí, VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Dejvice

² Ústav anorganické chemie, VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Dejvice

Lucie.Pokorna@vscht.cz

Úvod

Znečištění vodních ekosystémů farmaceutickými látkami a dalšími mikropolutanty, představuje významnou hrozbu pro vodní organismy a lidské zdraví. Zejména přítomnost antibiotik a jejich metabolitů se v posledních letech ukazuje jako jeden z emergentních environmentálních problémů. Antibiotika, která jsou široce využívána v medicíně, zemědělství a například i veterinářství, nejsou po podání organismem plně absorbována a metabolizována. Značné množství těchto látek tak vstupuje do životního prostředí, kde se akumulují a kvůli své perzistenci přetrvávají.

Přestože vývoj antibiotik sehrál v historii klíčovou roli v řadě medicínských aplikací, jejich rozsáhlé nadužívání a mnohdy nevhodné předepisování vedou k rozvoji bakteriální antibiotické rezistence. Antibiotické přípravky, které byly dříve účinné proti řadě bakteriálním onemocněním, postupně ztrácejí svou funkci. S růstem světové populace a rostoucí poptávkou po antibiotikách se očekává značné zhoršování tohoto problému.

Již v současnosti dochází k velkému výskytu smrtelných onemocnění způsobených bakteriální rezistencí vůči antibiotikům a dá se očekávat, že se do roku 2050 tento počet zvýší až na desítky miliónů (Uddin et al., 2021). Nutnost odstraňování antibiotik z životního prostředí se tedy stala jednou z největších výzev současného výzkumu v oblasti ochrany vody a veřejného zdraví.

Stávající technologie pro čištění odpadních vod nejsou primárně navrženy tak, aby účinně odstraňovaly zbytky léčiv a ostatní zástupce mikropolutantů. Proto v posledních letech probíhá intenzivní výzkum nových, efektivních a ekonomicky přijatelných metod pro odstraňování těchto látek. Mezi aktuálně běžně používané metody v tzv. terciárním čištění odpadních vod patří například adsorpce na aktivní uhlí, membránové procesy, pokročilé oxidační procesy nebo elektrokoagulace.

V kontextu sorpce a katalytické degradace se v poslední době řada studií zaměřuje na nanotechnologie, konkrétně na nanomateriály na bázi oxidu ceritého. Studie, kterou v roce 2023 publikovala Anju Gupta a kol. (2023), uvádí, že materiály na bázi nanočástic oxidu ceritého mohou být velmi dobrými adsorbenty antibiotik. Nicméně, doposud získané informace však nevyčázejí z dostatečného množství dat.

Osud a výskyt antibiotik v životním prostředí

Antibiotika jsou široce používána k léčbě infekčních onemocnění bakteriálního i virového původu. Uplatnění nacházejí také ve veterinárním sektoru, akvakultuře a zemědělství, kde slouží k podpoře růstu a zlepšení kvality potravin (Salma et al., 2025; Conde-Cid et al., 2018). S přetrvávajícím růstem světové populace roste

i poptávka po výrobě antibiotik. Mezi lety 2000 a 2015 vzrostla spotřeba antibiotik o 65 % a předpokládá se, že do roku 2030 se může zvýšit až o 200 % (Klein et al., 2018).

Významná část podaných antibiotik není lidským tělem plně absorbována a nedochází k jejich úplné mikrobiologické degradaci (Fan et al., 2025). Odhaduje se, že přibližně 70 % podaných antibiotik není lidským metabolismem využito (Gupta et al., 2023). Antibiotika se tak mohou dostávat do životního prostředí močí a exkrementy ve splaškových odpadních vodách, povrchovým odtokem nebo odtokem vyčištěné odpadní vody (Fan et al., 2025).

Přítomnost antibiotik v životním prostředí představuje vážné ohrožení lidského zdraví i ekosystému. Zejména nízké koncentrace perzistentních antibiotických přípravků mohou přispívat k rozvoji genů antibiotické rezistence (Jia et al., 2023).

Většina čistíren odpadních vod není navržena tak, aby dokázala tyto polutanty z vody efektivně odstranit (Khasawneh et al., 2021). Uvádí se, že pouze 40 % celosvětově zkoumaných městských čistíren odpadních vod obsahovalo v roce 2021 ve své technologické lince pokročilé čistící procesy a terciární úpravy, které zahrnují například ozonizaci, chloraci nebo UV dezinfekci (Khasawneh et al., 2021). Z tohoto důvodu jsou odtoky z čistíren odpadních vod považovány za jedny z nejvýznamnějších bodových zdrojů antibiotik v životním prostředí. Koncentrace antibiotik ve vyčištěné odpadní vodě se pohybuje od 0,01 do 5,6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Omufere et al., 2022). V nemocničních odtocích dosahují koncentrace ještě vyšších hodnot, například od 0,1 do 18 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Dinh et al., 2017) či dokonce až od 39 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Ahmad et al., 2012). Mezi nejčastěji detekovaná antibiotika v odpadních vodách patří amoxicilin, ciprofloxacin, ofloxacin, sulfamethoxazol a makrolidová antibiotika (Adhikari et al., 2024; Omufere et al., 2022; Mokni et al., 2022).

Sorpce

Adsorpční technologie se široce využívají při čištění odpadních a úpravě pitných vod k odstranění široké škály polutantů. Účinnost adsorpce závisí na charakteru funkčních skupin polutantu, vlastnostech povrchu a pórovité struktuře adsorbentu, pH, salinitě, fyzikálně-chemických vlastnostech prostředí a adsorbentu (Nugraha et al., 2025) nebo na polaritě a přítomnosti ostatních látek v odpadní vodě. S rostoucí teplotou adsorpce klesá a větší množství přítomných látek kolem adsorbované molekuly může vést ke kompetici s ostatními látkami.

Materiály běžně používané jako adsorbenty antibiotik při úpravě odpadních a pitných vod zahrnují aktivní uhlí (v granulované nebo práškovité formě), zeolity, silikagel a jiné materiály. (Nugraha et al., 2025). Regenerace konvenčních adsorbentů je mnohdy poměrně obtížná, jejich výroba je nákladná a jejich použití má řadu limitací (Mangla et al., 2022).

Na druhou stranu, nekonvenční adsorbenty, jako je například biochar, jíl, biopolymery, kovově-organické zesíťované materiály, mikrořasy a další kompozitní ad-

sorbenty (Crini, 2005), jsou vhodnější k modifikacím, snadněji se obnovuje jejich sorpční schopnost, jejich výroba vyžaduje méně energie a často dosahují i vyšší adsorpční účinnosti než tradiční materiály (Mangla et al., 2022).

V poslední době je v oblasti nekonvenčních adsorbentů značná pozornost věnována nano-adsorbentům. Mezi ně patří například uhlíkové nanostruktury, dvou-rozměrné materiály, jako jsou karbidy a nitridy kovů nebo dopovaný oxid ceričitý. (Gupta et al., 2023)

Sorpce na oxid ceričitý

Nanomateriály na bázi oxidu ceriitého jsou díky své vysoké chemické stabilitě, nízké toxicitě (Fauzi et al., 2022) a jedinečným povrchovým vlastnostem široce využívány v mnoha oblastech, jako je například sorpce antibiotik (Gupta et al., 2023), odstraňování organických barviv (Sienkiewicz et al., 2024) a adsorpce těžkých kovů z vodního prostředí (Kuncham et al., 2017). Mimo jiné představují významný pokrok v čištění různých průmyslových odpadních vod a dalších vodních zdrojů (Kuncham et al., 2017).

Vlastnosti a použití oxidu ceriitého

Oxid ceričitý má kubickou krystalovou strukturu a patří do prostorové skupiny $Fm\bar{3}m$. Kationty ceru mohou snadno přecházet mezi oxidačními stavy Ce^{3+} a Ce^{4+} . Tato schopnost vytváří v krystalové mřížce oxidu ceriitého kyslíkové vakance a umožňuje vysoký katalytický potenciál (Xu et al., 2024). S poklesem velikosti částic do nanorozměrů se mění jejich vlastnosti. Částice s velikostí v řádech nanometrů vykazují zlepšenou katalytickou aktivitu a lepší elektrické i optické vlastnosti (Gu a Meng, 2007).

Nanostruktury oxidu ceriitého se využívají například v katalýze nebo v biomedicíně (Xu et al., 2024). Dále se přidávají do skleněných materiálů za účelem snížení absorpce ultrafialového a viditelného záření a omezení jiných efektů způsobujících poškození materiálu. Tyto vlastnosti se uplatňují např. při zlepšování samozabarvovacích optických čoček (Baccaro et al., 2015). Další možný způsob využití oxidu ceriitého spočívá v adsorpci a katalytickém rozkladu environmentálních polutantů (Skrbek et al., 2020).

Dopování krystalické mřížky oxidu ceriitého

Díky schopnosti ceru přecházet mezi oxidačními stavy Ce^{3+} a Ce^{4+} a přítomnosti kyslíkových vakancí v mřížce oxidu ceriitého je možné do krystalové struktury zavádět další prvky (dopanty). Chemické vlastnosti umožňující změny oxidačního stavu cerových kationtů činí oxid ceričitý vhodným materiálem pro dopování různými prvky. Tato úprava zlepšuje jeho vlastnosti pro různé aplikace. V současnosti se dopované materiály na bázi oxidu ceriitého využívají v katalýze, energetickém sektoru, při čištění vody a v dalších oblastech. Jako dopanty nanomateriálů na bázi ceru mohou být použity kovové, polokovové i nekovové prvky. (Abdulwahab et al., 2023; Xu et al., 2017)

Dopanty mohou zlepšovat katalytické a jiné fyzikálně-chemické vlastnosti nanomateriálu (Gong et al., 2020). Prvky z s1 a s2 skupiny mohou dokonce způsobit biocidní vlastnosti cerových nanomateriálů (Abdulwahab et al., 2023).

Závěr

Nanomateriály na bázi oxidu ceričitého vykazují značný potenciál pro odstraňování reziduí léčiv a dalších polutantů z vodního prostředí. Mezi jejich hlavní přednosti

patří vysoká chemická stabilita, nízká toxicita a schopnost sorpce i katalytické degradace sorbovaných látek. Díky jedinečné struktuře oxidu ceričitého a možnosti dopování jeho krystalické mřížky různými prvky lze řadu těchto vlastností zlepšit. Tyto materiály tak mohou představovat perspektivní alternativu ke stávajícím technologiím čištění vody od přítomných mikropolutantů. K plnému využití jejich potenciálu je však nezbytný další výzkum za reálných provozních podmínek.

Literatura

Abdulwahab, K.O., Khan, M.M. and Jennings, J.R. 2023. Doped Ceria Nanomaterials: Preparation, Properties, and Uses. *ACS Omega* 8(34), 30802-30823.

Adhikari, S., Lee, H.H. and Kim, D.-H. 2024. 'Primary' antibiotics in wastewater treatment plants. *iScience* 27(9), 110789.

Ahmad, M., Khan, A.U., Wahid, A., Ali Butt, Z., Farhan, M. and Ahmad, F. 2012. Role of hospital effluents in the contribution of antibiotics and antibiotic resistant bacteria to the aquatic environment. *Pakistan J. Nutrition* 11(12), 1177-1182.

Baccaro, S., Cemmi, A., Di Sarcina, I. and Menchini, F. 2015. Gamma rays effects on the optical properties of Cerium-doped glasses. *Int. J. Appl. Glass Sci.* 6(3), 295-301.

Conde-Cid, M., Fernández-Calviño, D., Nóvoa-Muñoz, J.C., Arias-Estévez, M., Díaz-Raviña, M., Núñez-Delgado, A., Fernández-Sanjurjo, M.J. and Álvarez-Rodríguez, E. 2018. Degradation of sulfadiazine, sulfachloropyridazine and sulfamethazine in aqueous media. *J. Environ. Manage.* 228, 239-248.

Crini, G. 2005. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Progress in Polymer Science* 30(1), 38-70.

Dinh, Q., Moreau-Guigon, E., Labadie, P., Alliot, F., Teil, M.-J., Blanchard, M., Eurin, J. and Chevreuil, M. 2017. Fate of antibiotics from hospital and domestic sources in a sewage network. *Sci.Tot. Environ.* 575, 758-766.

Fan, D., Zhang, Y., Sun, S., Zhang, B., Liang, M., Xu, J. and Wang, L. 2025. Occurrence, spatial distribution, source apportionment, and risk assessment of antibiotics in Yangtze river surface water. *Emerging Contaminants* 11(1), 100437.

Fauzi, A.A., Jalil, A.A., Hassan, N.S., Aziz, F.F.A., Azami, M.S., Hussain, I., Saravanan, R. and Vo, D.V.N. 2022. A critical review on relationship of CeO₂-based photocatalyst towards mechanistic degradation of organic pollutant. *Chemosphere* 286, 131651.

Gong, K., Zhou, K. and Yu, B. 2020. Superior thermal and fire safety performances of epoxy-based composites with phosphorus-doped cerium oxide nanosheets. *Appl. Surf. Sci.* 504, 144314.

Gu, L. and Meng, G. 2007. Powder synthesis and characterization of nanocrystalline CeO₂ via the combustion processes. *Material. Res. Bull.* 42(7), 1323-1331.

Gupta, A., Kumar Verma, M. and Kumar, R. 2023. A critical review for antibiotic removal from aqueous medium using ceria-based nanostructures. *Materials Today: Proceedings*.

Jia, W.-L., Song, C., He, L.-Y., Wang, B., Gao, F.-Z., Zhang, M. and Ying, G.-G. 2023. Antibiotics in soil and water: Occurrence, fate, and risk. *Curr. Opinion Environ. Sci. & Health* 32, 100437.

Khasawneh, O.F.S. and Palaniandy, P. 2021. Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants. *Proc.Safe. Environ. Protect.* 150, 532-556.

Klein, E.Y., Van Boeckel, T.P., Martinez, E.M., Pant, S., Gandra, S., Levin, S.A., Goossens, H. and Laxminarayan, R. 2018. Global increase and geographic convergence in antibiotic consumption between 2000 and 2015. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(15), E3463- E3470.

Kuncham, K., Nair, S., Durani, S. and Bose, R. 2017. Efficient removal of uranium(VI) from aqueous medium using ceria nanocrystals: an adsorption behavioural study. *J. Radioanal. Nuclear Chem.* 313(1), 101-112.

Mangla, D., Annu, Sharma, A. and Ikram, S. 2022. Critical review on adsorptive removal of antibiotics: Present situation, challenges and future perspective. *J. Hazard. Mater.* 425, 127946.

Mokni, S., Tlili, M., Jedidi, N. and Hassen, A. 2022. Applicability of electrocoagulation process to the treatment of Ofloxacin and Chloramphenicol in aqueous media: Removal mechanism and antibacterial activity. *J. Water Proc. Eng.* 49, 103080.

Nugraha, M.W., Kim, S., Roddick, F., Xie, Z. and Fan, L. 2025. A review of the recent advancements in adsorption technology for removing antibiotics from hospital wastewater. *J. Water Proc. Eng.* 70, 106960.

Omuferen, L.O., Maseko, B. and Olowoyo, J.O. 2022. Occurrence of antibiotics in wastewater from hospital and convectional wastewater treatment plants and their impact on the effluent receiving rivers: current knowledge between 2010 and 2019. *Environ.Monitor. Asses.* 194(4), 306.

Literatura (pokračování)

Salma, U., Nishimura, Y., Tokumura, M., Hossain, A., Watanabe, K., Noro, K., Raknuzzaman, M., Amagai, T. and Makino, M. 2025. Occurrence, seasonal variation, and environmental risk of multiclass antibiotics in the urban surface water of the Buriganga River, Bangladesh. *Chemosphere* 370, 143956.

Sienkiewicz, A., Chrzanowska, A. and Kierys, A. 2024. Highly Porous Ceria as an Adsorbent for Removing Artificial Dyes. *Water. Environ. Proc.* 11(1), 3.

Skrbek, K., Bartůněk, V., Lojka, M., Sedmidubský, D. and Jankovský, O. 2020. Synthesis and Characterization of the Properties of Ceria Nanoparticles with Tunable Particle Size for the Decomposition of Chlorinated Pesticides. *Appl. Sci.* 10(15), 5224.

T.M., Chakraborty, A.J., Khusro, A., Zidan, B.M.R.M., Mitra, S., Emran, T.B., Dhama, K., Ripon, M.K.H., Gajdacs, M., Sahibzada, M.U.K., Hossain, M.J. and Koirala, N. 2021. Antibiotic resistance in microbes: History, mechanisms, therapeutic strategies and future prospects. *J. Infect. Public Health* 14(12), 1750-1766.

Xu, B., Zhang, Q., Yuan, S., Liu, S., Zhang, M. and Ohno, T. 2017. Synthesis and photocatalytic performance of yttrium-doped CeO₂ with a hollow sphere structure. *Catalysis Today* 281, 135- 143.

Xu, Y., Zhou, Y., Li, Y., Liu, Y. and Ding, Z. 2024. Advances in cerium dioxide nanomaterials: Synthesis strategies, property modulation, and multifunctional applications. *J. Environ.Chem. Eng.* 113719.

Souhrn

Znečištění vod farmaceutickými látkami a jinými mikropolutanty představuje významnou hrozbu pro životní prostředí i lidské zdraví. Tradiční čistírný odpadních vod nejsou navrženy tak, aby tyto látky účinně odstraňovaly, a proto roste zájem o nové technologie. Jedním z perspektivních řešení je využití nanomateriálů na bázi dopovaného oxidu ceričitého. Díky své vysoké chemické stabilitě, nízké toxicitě a schopnosti sorpce i katalytické degradace patří mezi slibné materiály pro odstraňování antibiotik a dalších kontaminantů z vody. Dopování krystalické mřížky ceru různými prvky navíc umožňuje zlepšit jeho vlastnosti a rozšířit aplikační potenciál. Přestože předběžné laboratorní výsledky ukazují vysokou účinnost těchto materiálů, je nutné provést další výzkum v reálných provozních podmínkách pro jejich praktické využití.

Klíčová slova: nanomateriály, oxid ceričitý, dopování, antibiotika, sorpce, voda

Summary

Pharmaceutical residues and other micropollutants in water present a growing environmental and public health concern. As conventional wastewater treatment technologies often fail to remove these substances effectively, research has increasingly focused on innovative materials like doped cerium oxide nanomaterials. These materials offer high chemical stability, low toxicity, and both sorptive and catalytic capabilities, making them promising candidates for removing antibiotics and other pollutants from aquatic environments. Doping the cerium oxide structure with various elements further enhances its performance and widens its range of applications. While lab results are promising, further research under real-world conditions is essential to fully realize their potential in water treatment practices.

Keywords: nanomaterials, cerium oxide, doping, antibiotics, sorption, water

OBSAH

Úvodem	17
Harčariková K.: Proteiny ako nástroj na spoľahlivú identifikáciu a kvantifikáciu mäsa v potravinovej kontrole	18
Řezáčová M., Košinová A., Kvaček R., Zdeňková K., Říhová Ambrožová J., Kouba V.: Viroví původci gastroenteritidy v oběhovém vodním hospodářství: osud na ČOV a úpravnách vody	25
Mík V., Šnobllová P., Bartůněk V., Bartáček J., Pokorná L.: Potenciál nanomateriálů dopovaného oxidu ceriitého odstraňovat reziduál léčiv a ostatní mikropolutanty	32

CONTENT

Editorial	17
Harčariková K.: Proteins as tool for reliable identification and quantification of meat in food inspection	18
Řezáčová M., Košinová A., Kvaček R., Zdeňková K., Říhová Ambrožová J., Kouba V.: Viral agents of gastroenteritis in circulating water management: fate at WWTPs and water treatment plants	25
Mík V., Šnobllová P., Bartůněk V., Bartáček J., Pokorná L.: Potential of cerium dioxide-doped nanomaterials to remove drug residues and other micropollutants	32

REDAKČNÍ RADA

doc. Ing. Dana Pokorná, CSc., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6 (vedoucí redaktor)
doc. Ing. Petra Lipovová, Ph.D., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6 (redaktor)
prof. Ing. Jan Káš, DrSc., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6 (redaktor)
doc. Ing. Pavel Ulbrich, Ph.D., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6 (redaktor)
Ing. Michaela Marková, Ph.D., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6 (redaktor)
doc. RNDr. Petr Skládal, CSc., Ústav biochemie, PŘF MU v Brně, Kamenice 753/5, Bohunice, 601 77 Brno (redaktor)
doc. RNDr. Marek Petřivalský, Ph.D., Katedra biochemie, PŘF Palackého univerzity, Šlechtitelů 11, 783 71 Olomouc (redaktor)
doc. Ing. Radovan Bílek, CSc., Endokrinologický ústav, Národní 8, 116 94 Praha 1
prof. Ing. Alena Čejková, CSc., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6
prof. Ing. Ladislav Fukal, CSc., VŠCHT Praha, Technická 3, 166 28 Praha 6
Ing. Jan Kopečný, DrSc., Ústav živočišné fyziologie a genetiky, AV ČR, v.v.i., Videňská 1083, Praha 4
doc. RNDr. Jana Pěkníková, Ph.D., Biotechnologický ústav AV ČR, v.v.i., Průmyslová 59/5, Vestec, 252 42 Jesenice

POKYNY PRO AUTORY

Rukopis musí být opatřen plným jménem autorů, jejich pracovištěm a e-mailovými adresami. Text se předkládá jako soubor MS Word (doc, docx, rtf) ve formátu jednoduchého řádkování písmem fontu Arial o velikosti 11. Rozsah není při dodržení správné publikační praxe omezen.

Článek má tyto části: Název práce, jména autorů a pracoviště, e-mailová adresa autora, úvod, vlastní text členěný do kapitol, závěr, příp. poděkování, citace literatury, český souhrn a klíčová slova a anglický souhrn a klíčová slova. Odkazy na literaturu jsou uváděny ve formě Author-Date v příslušném místě textu, včetně tabulek a obrázků (McKnight et al. 2022). V seznamu literatury jsou potom uváděny v abecedním pořadí. Zkratky časopisů se používají podle zvyklosti Chemical Abstract Service Source Index.

Příklady citací: Horgan AM, Moore JD, Noble JE, et al.: *Trends Biotechnol.* 28, 485 (2010).

Lowestein KA: *Silicones. A Story of Research.* Wiley, New York 2006.

Fujiki M (2008): Helix generation, amplification, switching, and memory of chromophoric polymers.

In: *Amplification of Chirality, Topics in Current Chemistry* 248 (Soai K ed.), Springer, Berlin, 119–201.

Novák Z: Disertační práce, VŠCHT Praha 2008.

<http://www.fs.fed.us/research/>, staženo 3. září 2011.

Tabulky se označují arabskými číslicemi (příklad formátu **Tab. 1:**). Každá tabulka je opatřena názvem a popisem umístěným nad tabulkou. Obrázky se číslují arabskými číslicemi (příklad formátu **Obr. 1:**). Každý obrázek musí být opatřen legendou, která jej činí jednoznačně srozumitelným (tj. bez nutnosti hledat nezbytné informace v textu). Obrázky nevracíte do textu rukopisu, ale zasílejte je samostatně v některém z běžných formátů např. tif, jpg (rozlišení 300 dpi).

Rukopisy je třeba zaslat e-mailem na adresu jan.kas@vscht.cz nebo na Danka.Pokorna@vscht.cz. Bližší informace naleznete na <http://bts.vscht.cz>.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The manuscript must be provided with the full name of authors, the institutions name and with e-mail addresses. Text is presented in a MS Word (doc, docx, rtf) format, single line spacing, font Arial, font size 11. The size is not restricted.

The article contains the following sections: title, authors and institutions, e-mail address of the corresponding author, introduction, text divided into chapters, conclusions, references, summary and keywords in English, summary and keywords in Czech. References to the literature are referenced in Author-Date form at the appropriate point in the text, including tables and figures (McKnight et al. 2022). They are then listed in alphabetical order in the reference list. Journal abbreviations are used according to Chemical Abstract Service Source Index convention.

Examples: Horgan AM, Moore JD, Noble JE, et al.: *Trends Biotechnol.* 28, 485 (2010).

Lowestein KA: *Silicones. A Story of Research.* Wiley, New York 2006.

Fujiki M (2008): Helix generation, amplification, switching, and memory of chromophoric polymers.

In: *Amplification of Chirality, Topics in Current Chemistry* 248 (Soai K ed.), Springer, Berlin, 119–201.

Novák Z.: Diploma thesis, UCT Prague 2008.

<http://www.fs.fed.us/research/>, downloaded 1st September 2011.

Tables are identified by Arabic numerals (example format **Tab. 1:**). Each table is provided with a name and description placed above the table. Pictures are numbered in Arabic numerals (example format **Fig. 1:**). Each image must be provided with a legend. Pictures should be sent separately in a common format such as tif, jpg (resolution 300 dpi). Manuscripts should be sent to the e-mail address jan.kas@vscht.cz or Danka.Pokorna@vscht.cz. More information can be found on <http://bts.vscht.cz>.

BIOPROSPECT

Vydavatel:
BIOTECHNOLOGICKÁ SPOLEČNOST
Technická 3
166 28 Praha 6
IČ: 00570397

Zapsán do evidence periodického tisku a bylo mu přiděleno evidenční číslo:
MK ČR E 19409

Zařazen do Seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik
vydáváných v ČR

Tiskne:
VENICE Praha, s.r.o.
Za Hanspaulkou 13/875
160 00 Praha 6

ISSN 1210-1737 (Print)
ISSN 2570-8910 (Online) – <http://bts.vscht.cz/bioprospect.html>

Neprodejné – jen pro členy Biotechnologických společností.

Stránky biotechnologické společnosti (<http://bts.vscht.cz>)
jsou archivovány Národní knihovnou ČR (www.webarchiv.cz).