

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Ochrana životního prostředí (B0521A030006)

Studijní obor: B-OZP (0521RA030006)



Kateřina Weberová

Drogy v komunálních odpadních vodách a jejich odstraňování
Drugs in municipal wastewaters and their removal

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jana Načeradská, Ph.D.

Praha, 2024

Charles University
Faculty of Science

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci zpracovala samostatně a náležitě uvedla veškeré informační zdroje a odbornou literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla využita jako podklad k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 29. dubna 2024.

Poděkování

Ráda bych poděkovala své školitelce RNDr. Janě Načeradské, Ph.D., za odborné poznámky a konzultace při psaní této bakalářské práce, za čas, trpělivost a vstřícné vedení, díky kterému jsem práci dokončila. Děkuji Bc. Jiřímu Chuchlíkovi za přečtení každé kapitoly a pomoc s kreslením chemických vzorců. Poděkování patří také mé rodině za podporu při psaní této práce.

Abstrakt

Tato rešeršní bakalářská práce se zabývá drogami v odpadních vodách a jejich odstraňováním v čistírnách odpadních vod. Detailně se práce zaměřuje na čtyři psychoaktivní látky, kterými jsou tetrahydrokanabinol, extáze (MDMA), kokain a metamfetamin, a jejich nejběžněji sledované metabolity. Práce podává přehled o jejich přítomnosti ve vodním prostředí a v odpadních vodách na nátoku do čistíren odpadních vod. V povrchové vodě se látky nachází v jednotkách až stovkách nanogramů na litr. Koncentrace drog na nátoku do čistíren se běžně pohybují v hodnotách desítek až stovek nanogramů na litr, při jejich zvýšené konzumaci hodnoty dosahují několika tisíců nanogramů na litr. Práce se dále zabývá účinností odstraňování vybraných látek a jejich metabolitů v různých fázích čištění odpadních vod. Zjištění naznačují, že primární fáze je významná pro tetrahydrokanabinol, pro ostatní látky méně. Tetrahydrokanabinol a jeho metabolity jsou, na rozdíl od ostatních zkoumaných látek, lipofilní a dochází k jejich sorpci na pevnou fázi odpadní vody. Vysoké koncentrace kanabinoidů jsou vázány v čistírenském kalu, kde mohou přetrvávat v nižších koncentracích i po jeho zpracování v kalovém hospodářství. Může tak následným využitím zpracovaného kalu jako hnojiva docházet k průniku kanabinoidů do životního prostředí. Sekundární biologická fáze čištění je klíčová pro eliminaci všech zmíněných látek. Průměrná účinnost odstranění vybraných drog po sekundární fázi čištění dosahuje pro většinu látek, kromě MDMA, 75 % a více. Terciární fáze čištění zvyšuje účinnost odstranění všech látek na průměrnou hodnotu přesahující 85 %, s výjimkou MDMA. Nejvyšší účinnosti jsou pozorovány pro odstranění amfetaminu, o něco nižší hodnoty v případě metamfetaminu. Kokain je odstraňován s vyšší účinností než jeho hlavní metabolit benzoylekgonin. Benzoylekgonin se v odpadní vodě vyskytuje ve vyšších koncentracích než kokain a je stabilnější. Kokain se může na tento metabolit rozpadat i v průběhu čištění. Nejnižší účinnost odstranění ve všech fázích čištění je pozorována pro MDMA. Důvodem jeho nízké degradace a vysoké stability v odpadních vodách může být jeho chemická struktura. Studie zaměřující se na odůvodnění nízkého odstraňování MDMA v čistírně odpadních vod chybí. Další mezerou v poznání problematiky drog v odpadních vodách je nedostatek studií zaměřujících se na efektivitu konkrétních technologií terciárního stupně čištění. Studie také sledují pouze nízký počet látek a málokdy i společně s jejich příslušnými metabolity. Metody odběru vzorků i následný postup při jejich vyhodnocování se v jednotlivých studiích liší a výsledné hodnoty tak nemusí být dobře porovnatelné. Dále chybí studie popisující biodegradabilitu psychoaktivních látek, která by mohla být pro jejich chování v čistírnách odpadních vod zásadní.

Klíčová slova

nelegální drogy, odpadní voda, čistírna odpadních vod, metamfetamin, kokain, MDMA, konopné látky

Abstract

This research bachelor's thesis focuses on the occurrence of illicit drugs in municipal wastewaters and their removal in wastewater treatment plants. The thesis focuses in detail on four psychoactive substances, which are tetrahydrocannabinol, MDMA, cocaine and methamphetamine, and their most commonly monitored metabolites. The work provides an overview of their presence in the aquatic environment and in wastewaters at the influent to wastewater treatment plants. In surface water, substances are found in concentrations up to hundreds of nanograms per liter. Concentrations of drugs at the influent to wastewater treatment plants normally range from tens to hundreds of nanograms per liter, with increased consumption reaching several thousand nanograms per liter. The thesis also focuses to efficiency of removal of selected psychoactive substances and their main metabolites during different stages of wastewater treatment. The findings indicate that the primary treatment is significant for tetrahydrocannabinol, less so for other substances. Tetrahydrocannabinol and its metabolites, in contrast to the other investigated substances, are lipophilic and their sorption occurs on the solid phase of wastewater. High concentrations of cannabinoids occur in sewage sludge, where they can persist in lower concentrations even after its processing in sludge treatment. The subsequent reuse of processed sludge as fertilizer can lead to the presence of cannabinoids into the environment. The secondary biological treatment is a key to the elimination of all the mentioned psychoactive substances. The average removal efficiency of selected drugs after the secondary treatment reaches 75 % or more for most substances. The tertiary treatment increases the removal efficiency of all substances to an average value exceeding 85 %, with the exception of MDMA. The highest efficiencies are observed for the removal of amphetamine, slightly lower values of methamphetamine. Cocaine is eliminated with higher efficiency than its main metabolite benzoylecgonine. Benzoylecgonine occurs in higher concentrations in wastewater than cocaine and is more stable. Cocaine can also break down into this metabolite during treatment process. The lowest removal efficiency in all treatment stages is observed for MDMA. The reason for its low degradation and high stability in wastewater may be its chemical structure. Studies focusing on the reasons of low removal of MDMA during treatment process are lacking. Another gap in the knowledge of the issue is the lack of studies focusing on the effectiveness of specific tertiary treatment technologies. Studies also only investigate at a small number of illicit drugs and rarely together with their respective metabolites. The sampling methods and procedure for their evaluation are different in individual studies, and the results may not be easily comparable. Furthermore, there is a lack of studies describing the biodegradability of psychoactive substances, which could be essential for their behavior in wastewater treatment plants.

Key words

illicit drugs, wastewater, wastewater treatment plant, methamphetamine, cocaine, MDMA, cannabinoids

Seznam zkratk

AMP – amfetamin

BE – benzoylekgonin

CAS – konvenční proces aktivovaného kalu, z angl. conventional activated sludge

COC – kokain

COE – kokaethylen

ČOV – čistírna odpadních vod

EDDP – 2-ethylidene-1,5-dimethyl-3,3-diphenylpyrrolidine

EMCDDA – Evropské monitorovací centrum pro drogy a drogovou závislost, z angl. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction

EME – ekgonin methylester

HHA – 3,4-dihydroxyamfetamin

HHMA – 3,4-dihydroxymetamfetamin

HMA – 4-hydroxy-3-methoxyamfetamin

HMMA – 4-hydroxy-3-methoxymetamfetamin

IFAS – systém aktivovaného kalu s pevným ložem, z angl. integrated fixed film activated sludge

IUPAC – Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii, z angl. International Union of Pure and Applied Chemistry

LC-MS/MS – kapalinová chromatografie s tandemovou hmotnostní spektrometrií, z angl. liquid chromatography with tandem mass spectrometry

LOD – limit detekce

LOQ – limit kvantifikace

MA – metamfetamin

MBBR – systém biofilmového reaktoru s pohyblivým lůžkem, z angl. moving bed biofilm reactor

MBR – membránové bioreaktory, z angl. membrane bioreactor

MDA – 3,4-methylendioxyamfetamin

MDMA – 3,4-methylendioxymetamfetamin

NEPH – norefedrin

NOR – norkokain

NORBE – norbenzoylekgonin

OD – oxidační příkopy, z angl. oxidation ditches

POCIS – pasivní vzorkovače, z angl. polar organic chemical integrative sampler

p-OHAMP – para-hydroxyamfetamin

p-OHMA – para-hydroxymetamfetamin

RBC – rotační biologický reaktor, z angl. rotating biological contactor

SBR – reaktor pro sekvenční zpracování dávek, z angl. sequencing batch reactor

SCORE – Sewage analysis CORe group Europe

SPE – extrakce na pevnou fázi, z angl. solid phase extraction

TF – systém skrápěných filtrů, z angl. trickling filters

THC – delta-9-tetrahydrokanabinol

THCA – delta-9-tetrahydrokanabinolová kyselina

THC-COOH – delta-9-tetrahydrokanabinol-karboxylová kyselina

THC-COOH-Glu – delta-9-tetrahydrokanabinol-11-octová kyselina-glukuronid

THC-Glu – delta-9-tetrahydrokanabinol-glukuronid

UASB – anaerobní reaktor s granulovanou biomasou se vzestupným průtokem vody, z angl. up-flow anaerobic sludge blanket

UNODC – Úřad OSN pro drogy a kriminalitu, z angl. United Nations Office on Drugs and Crime

WHO – Světová zdravotnická organizace, z angl. World Health Organization

11-OH-THC – 11-hydroxy-delta-9-tetrahydrokanabinol

Obsah

1	Úvod a cíl práce.....	9
2	Drogy jako mikropolutanty životního prostředí	10
3	Definice a popis drog	13
3.1	Klasifikace drog.....	13
3.2	Tetrahydrokanabinol	16
3.3	Metamfetamin.....	17
3.4	MDMA.....	18
3.5	Kokain.....	20
4	Spotřeba drog v České republice a v Evropě.....	21
5	Drogy v komunálních odpadních vodách.....	24
5.1	Zdroje drog v odpadních vodách	26
5.2	Metody stanovení drog v odpadních vodách	26
5.3	Stabilita drog v odpadních vodách.....	27
5.4	Změny koncentrace drog v odpadní vodě během týdne.....	28
6	Drogy v čistírně odpadních vod a účinnost jejich odstraňování.....	30
6.1	Mechanická fáze čištění odpadní vody	31
6.2	Biologická fáze čištění odpadní vody	34
6.3	Terciární fáze čištění odpadní vody	39
6.4	Porovnání tří fází čištění v účinnosti odstraňování drog.....	44
7	Závěr.....	47
8	Seznam literatury.....	50
9	Seznam obrázků	62
10	Seznam tabulek	63

1 Úvod a cíl práce

Psychoaktivní látky představují jednu ze skupin mikropolutantů životního prostředí. Je možné je detekovat ve vodní složce životního prostředí, v půdě a městském vzduchu (Pal et al. 2013). Koncentrace psychoaktivních látek v povrchové a podzemní vodě mohou dosahovat až stovek nanogramů na litr (Jurado et al. 2012) (Castiglioni et al. 2013). Nižší koncentrace lze naměřit i v pitné vodě, kde mohou potenciálně působit na lidské zdraví (Pal et al. 2013). Není jasné, v jakých všech svých formách se tyto látky mohou v prostředí nacházet, či jaké mohou tvořit směsi. Vliv psychoaktivních látek na ekosystémy není jasně popsán a je možné vycházet pouze z omezeného počtu studií (Krishnan et al. 2023). Konzumace drog v posledních letech stoupá a na trhu se objevují nové syntetické látky (EMCDDA 2023). Hlavním zdrojem psychoaktivních látek pro vodní prostředí jsou odpadní vody. Do odpadní vody se drogy dostávají s močí a stolicí ve formě primární látky a příslušných metabolitů. Odpadní vody jsou zpracovány v čistírnách odpadních vod, kde prochází třemi stupni čištění. Látky nejsou v čistírně eliminovány dokonale a jejich koncentrace na odtoku z čistírny závisí na účinnosti jejich odstranění v jednotlivých stupních čištění (Baker a Kasprzyk-Hordern 2011). Vliv na účinnost odstranění drog a jejich metabolitů z odpadní vody má jejich chemická struktura, biodegradabilita a technologické řešení jednotlivých stupňů čištění (Evgenidou et al. 2015).

Cílem této práce je podat přehled o koncentracích vybraných drog a jejich metabolitů v odpadních vodách, zhodnotit jejich odstraňování v rámci čistíren odpadních vod a porovnat efektivitu primárního, sekundárního a terciárního stupně čištění pro jednotlivé vybrané látky. Práce se zaměřuje na čtyři z nejčastěji užívaných nelegálních návykových látek, kterými jsou tetrahydrokanabinol (THC), kokain (COC), metamfetamin (MA) a 3,4-methylenedioxy-N-methamfetamin (MDMA) a jejich nejsledovanější metabolity.

2 Drogy jako mikropolutanty životního prostředí

Psychoaktivní látky, jindy nazývané drogy, se řadí mezi mikropolutanty životního prostředí. Jako mikropolutanty označujeme chemické látky antropogenního původu, které se nepřírozně vyskytují ve stopových koncentracích v životním prostředí. Chování těchto látek se liší v závislosti na jejich chemické struktuře. Mohou i v malém množství představovat riziko pro životní prostředí a člověka. Mikropolutanty se v literatuře dělí do několika skupin. Významnými skupinami jsou pesticidy, léčiva a produkty osobní péče, endokrinní disruptory, persistentní organické polutanty a mikroplasty. Drogy se často řadí do stejné skupiny jako léčiva (Zaffar Hasmhi et al. 2022).

Do životního prostředí se drogy dostávají různými způsoby. Obecněji řečeno jsou zdrojem obydlená území s velkým počtem obyvatel, kde dochází k nakládání s těmito látkami, a tedy i jejich průniku do prostředí. Konkrétním zdrojem pak je odpadní voda, která i přes zpracování v čistírně, které může být různě efektivní, látky obsahuje a přenáší je do říčních toků. Nakládáním s čistírenskými kaly může docházet k průniku látek do půdy a při konzumaci drog kouřením také do vzduchu (Pal et al. 2013) (Mastroianni et al. 2013).

Potvrzení velmi nízkých hladin kokainu, delta-9-tetrahydrokanabinolu, heroinu, amfetaminů a dalších látek v městském vzduchu nabízí přehledový článek z roku 2013. Hodnoty se pohybovaly mezi pikogramy a nižšími nanogramy v metru krychlovém vzduchu (Pal et al. 2013). V portugalském městě Ermesinde bylo v roce 2006 v období svátků Notte Bianca ve venkovním vzduchu centra města naměřeno 148 pg.m^{-3} kokainu (Cecinato et al. 2008). V italském Římě v roce 2008 se nacházelo ve vzduchu velkého městského parku průměrně 74 pg.m^{-3} delta-9-tetrahydrokanabinolu (Balducci et al. 2009). V roce 2016 byla stanovena koncentrace kokainu ve venkovním městském vzduchu Londýna, Stockholmu a Amsterdamu v rozmezí $20 - 330 \text{ pg.m}^{-3}$ (Krishnan et al. 2023).

Množství studií zabývajících se přítomností drog v půdním prostředí je omezené. Přehledový článek z roku 2023 shromažďující informace z 16 dostupných odborných studií udává průměrné koncentrace psychoaktivních látek v sedimentech a půdách. Nejvyšší průměrné koncentrace v jednotkách nanogramů analytu na gram vzorku byly stanoveny pro delta-9-tetrahydrokanabinol, 110 ng.g^{-1} . Dále pak 30 ng.g^{-1} pro ekgonin methylester, metabolit kokainu, a dalších látek (Santana-Viera et al. 2023). Více než analýze samotných půd je věnována pozornost analýze čistírenských kalů, ze kterých hrozí potenciální kontaminace půdy. Studie analyzující vzorky kalu z patnácti různých španělských městských čistíren detekovala průměrně 138 ng.g^{-1} delta-9-tetrahydrokanabinolu v sušině kalu, většina dalších drog se pohybovala v jednotkách ng.g^{-1} v sušině kalu (Mastroianni et al. 2013).

Nejvíce zasaženou složkou prostředí je povrchová voda, která je příjemcem přečištěné odpadní vody. Přehledový článek z roku 2013 shrnoval data o koncentracích kokainu, benzoylekgoninu, norkokainu, kokaethylenu, metadonu, EDDP, morfinu, delta-9-tetrahydrokanabinolu, amfetaminu,

metamfetaminu, MDA a MDMA v povrchové vodě. Měření probíhala v řekách Itálie, Španělska, Belgie, UK, Irsko, Švýcarsko, USA a Německo a uskutečnila se v rozmezí let 2004 až 2010. Vzorky pocházely z různých částí řeky, od horního toku po ústí. Často byl místem odběru přítok vodního zdroje do úpravní pitné vody. Jednalo se o lokality s různým antropogenním vlivem, na škále od větších měst po národní parky. Drogy se v tocích nacházely v koncentracích nanogramů na litr. Například v Itálii na soutoku řeky Lambro a Pád bylo v roce 2006 naměřeno 2,1 ng.L⁻¹ metamfetaminu, 1,1 ng.L⁻¹ MDMA, 15 ng.L⁻¹ kokainu a 3,7 ng.L⁻¹ delta-9-tetrahydrokanabinolu (Pal et al. 2013). Příklady naměřených koncentrací psychoaktivních látek v řekách světa shrnuje tabulka č.1. Znečištěná může být i podzemní voda. Dle dat naměřených v Barceloně v průběhu roku 2010 byla stanovena koncentrace drog v tamní podzemní vodě v rozmezí nízkých nanogramů na litr, nejvíce bylo metadonu, 7,4 ng.L⁻¹ a kokainu 3,8 ng.L⁻¹ (Jurado et al. 2012). Přítomností drog v hluboké podzemní vodě se zabývala i novější studie z roku 2018, kde během dvouletého monitoringu vodního cyklu urbanizovaného území italského Milána byla stanovena průměrná koncentrace kokainu na 0,8 ng.L⁻¹ (Castiglioni et al. 2018). Ve čtyřech desítkách španělských měst a dalších městech napříč Evropou byly naměřeny koncentrace kokainu, metadonu, EDDP, benzoylekgoninu a kokaethylenu v desetinách nanogramů na litr také v pitné kohoutkové vodě (Pal et al. 2013).

Problémem je jak konstantní zátěž dostávající se do vodního prostředí denně z výpustí městské odpadní vody, tak i jednorázové velké zátěže způsobené typicky festivaly, kde dochází ke zvýšené konzumaci drog, a tedy i jejich exkreci do prostředí. Po víkendovém festivalu poblíž anglické řeky Whitelake dosáhly koncentrace MDMA ve vodním toku 322 ng.L⁻¹, koncentrace benzoylekgoninu 192 ng.L⁻¹ a kokainu 12 ng.L⁻¹. Zejména u MDMA se jedná o hodnotu, která je z ekotoxikologického hlediska nebezpečná (Aberg et al. 2022).

Je důležité si uvědomit, že drogy se v prostředí nachází ve složitých směsích, které mohou mít různé chování a dopady (Krishnan et al. 2023). Přestože jsou koncentrace malé, je třeba věnovat problematice pozornost, protože o dlouhodobém chování a dopadech konkrétních směsí návykových látek a jejich reziduí v různých složkách životního prostředí víme málo. Především chybí z mého pohledu dostatek dat o přítomnosti a chování psychoaktivních látek v půdě, kam se mohou dostávat z vodního prostředí, či přímo využitím znečištěného kalu, a mohou tak potenciálně ovlivňovat půdní ekosystémy. Vlivu a mapování výskytu ve vodním prostředí je věnována větší pozornost, ale stále ne dostatečná.

Tabulka 1 – Příklady koncentrací vybraných drog v povrchových vodách světa

země	místo odběru	analyty	rozsah c [ng.L ⁻¹]	rok odběru	zdroj
USA	řeky Clarks, Bee Creek	benzoylekgonin	2,4–14,2	říj. 2017	(Skees et al. 2018)
		methadon	2,4–17,8		
		metamfetamin	2,7–86,4		
	řeka Las Vegas Wash	benzoylekgonin	8–41	bře. – kvě. 2022	(Sims et al. 2024)
		MDMA	3,5–2118		
		metamfetamin	13,7–194		
Čína	36 severních řek	metamfetamin	<0,1–42,0	zář. 2015	(Wang et al. 2016)
		ketamin	<0,05–4,5		
UK	5 řek na území hrabství Suffolk	MDMA	4,4–8,2	čvc. 2018	(Miller et al. 2019)
		benzoylekgonin	0,3–60,7		
		ketamin	42,3–205		
Brazílie	16 řek ve státě São Paulo	kokain	6–62	úno. – bře. zář. – říj. 2014	(Campestrini a Jardim 2017)
		benzoylekgonin	10–1019		
Španělsko	řeky Llobregat, Guadalquivir, Ebro and Jucar	THC	17,0*	2010/2011	(Mastroianni et al. 2016)
		morfin	0,8–21,9		
		efedrin	1,0–144,0		
		MDMA	3,1–56,8		
Chorvatsko	Sava River, Záhřeb	morfin	14–28	kvě. 2022	(Ivankovic et al. 2023)
		benzoylekgonin	18–44		
Švýcarsko	jezera Thun, Brienz a Biel	benzoylekgonin	0,3–2,4	úno. 2010	(Berset et al. 2010)
		methadon	1,1–2,5		
Česká republika	17 českých řek	Metamfetamin	1,9–277	čvn. – srp. 2012	(Fedorova et al. 2014)
		MDMA	0,8–11		

*V rámci měření byla detekována pouze jedna hodnota, tedy není uveden rozsah

3 Definice a popis drog

Pojem droga lze definovat více způsoby a v literatuře se jeho význam může lišit v závislosti na kontextu. V mé práci jej lze vnímat jako synonymum k pojmu psychoaktivní látka, tedy látka, která ovlivňuje vnímání a mění duševní procesy. Návykové látky jsou pak psychoaktivní látky, na kterých může vzniknout závislost. Ještě užším pojmem jsou nelegální návykové látky či ilegální drogy, tedy psychoaktivní látky jejichž uchováváním, předáváním, prodejem a výrobou se dostáváme do rozporu se zákonem (WHO 1994) (Kalina 2001).

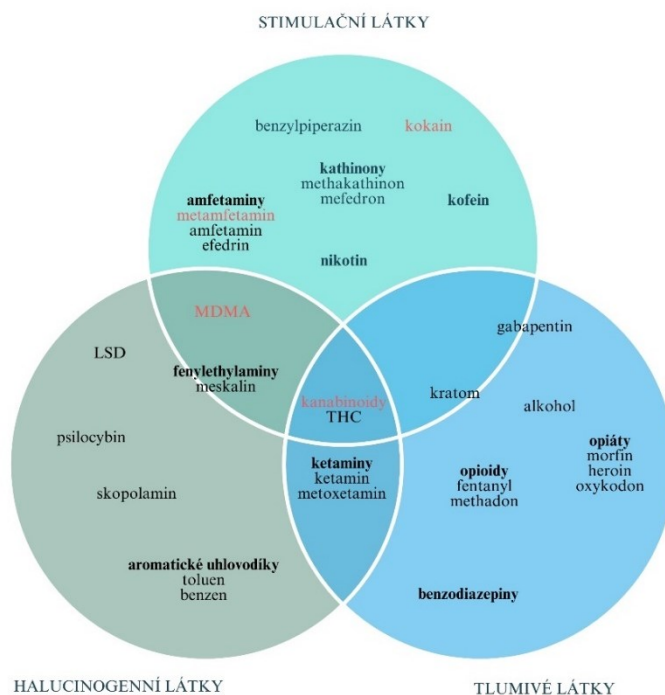
Na mezinárodní úrovni je klíčovým dokumentem vymezujícím se ke škodlivosti psychoaktivních látek Jednotná úmluva OSN o omamných látkách z roku 1961 (United Nations 1961). V roce 1971 přibyla Úmluva o psychotropních látkách a v roce 1988 Úmluva OSN proti nedovolenému obchodu s omamnými a psychotropními látkami (United Nations 1971) (United Nations 1988).

Legislativa ČR vymezuje seznam návykových látek, který je definován v nařízení vlády č. 463/2013 Sb. (ČESKO 2013). Seznam byl v roce 2022 a 2023 dvakrát novelizován a rozšířen celkem o 285 nových psychoaktivních látek. Nakládání s návykovými látkami upravuje zákon č. 167/1998 Sb., o návykových látkách a je doplňován zákonem č. 65/2017 Sb., o ochraně zdraví před škodlivými účinky návykových látek (ČESKO 1998) (ČESKO 2017).

3.1 Klasifikace drog

Klasifikace psychoaktivních látek je složitá a neexistuje žádné mezinárodní jednotné dělení. Na problematiku můžeme nahlížet z více úhlů a stanovovat si různá kritéria. Často využívaným kritériem k rozdělení psychoaktivních látek je jejich farmakologický účinek na lidské tělo a vnímání. Počet skupin se v literatuře různí, a i nadnárodní organizace jako EMCDDA, UNODC a WHO se v počtu definovaných skupin a jejich obsahu rozcházejí.

Do své práce jsem vybrala nejčastější klasifikaci dělící drogy do tří skupin, kterými jsou stimulační látky, halucinogenní látky a tlumivé látky. Tyto skupiny se navzájem prolínají. Je časté, že jedna látka na organismus působí například jak tlumivě, tak halucinogenně, jako je to například u ketaminů. Obrázek č.1 představuje diagram zařazení konkrétních psychoaktivních látek do těchto skupin a zobrazuje vzájemnou provázanost. Červenou barvou jsou zvýrazněny látky, na které se v práci zaměřuji. Všechny spadají do skupiny stimulantů, MDMA s překryvem s halucinogeny a konopné látky jsou umístěny na průniku všech tří skupin (Kalina 2015). Někdy je přidávána ještě čtvrtá skupina, kterou představují antipsychotické látky (GCDP 2019).



Obrázek č. 1 Klasifikace psychoaktivních návykových látek dle účinku na lidský organismus a vnímání. Zdroj dat: (Adley et al. 2023) (Kalina 2015) (GCDP 2019)

Dalšími typy klasifikace je dělení drog dle jejich původu na přírodní, syntetické a semisyntetické, nebo dle legality. Legální drogy můžeme dále dělit na léčiva zneužitá mimo lékařský předpis a volně konzumované návykové látky jako je tabák, kofein či alkohol. Nelegální drogy jsou definovány v různých státech tamními zákony vycházejícími ze tří mezinárodních úmluv OSN z let 1961, 1971 a 1988 uvedených výše v textu (Zapata et al. 2021).

Všechny výše uvedené klasifikace však nejsou z pohledu této práce ideální, protože dostatečně nevyovídají o chemické struktuře, která je pro pochopení chování těchto látek v prostředí zásadní. Struktura a fyzikálně chemické vlastnosti látky jsou určující pro vznik metabolitů a tedy formu, v jaké droga lidské tělo opouští a dostává se do odpadní vody a je zásadní pro efektivitu odstranění látky či jejího metabolitu v čistírně (Evgenidou et al. 2015).

Autoři odborného článku z roku 2021 se pokusili navrhnout rozdělení psychoaktivních látek výhradně dle jejich chemické struktury. Rozdělení navrhli na základě známých struktur definovaných ve vědecké literatuře a uváděných napříč institucemi zabývajícími se drogami. Jde tedy o výsledek snahy tyto informace sumarizovat, zpřehlednit, vymezit jasné skupiny a docílit tak jednotnosti a možnosti informace dále využít napříč vědeckými obory. Výsledek je prezentován v tabulce č. 2. Drogy jsou zde rozděleny do čtyřech fundamentálních skupin, kterými jsou I. polycyklické uhlovodíky, II. aminy, III. alkoholy a ethery a IV. ostatní látky. Každá ze čtyř skupin obsahuje jednu a více podskupin, přičemž drtivá většina psychoaktivních látek spadá do hlavní skupiny aminů (Zapata et al. 2021).

Tabulka 2 – klasifikace psychoaktivních látek dle chemické struktury, převzato, upraveno, zdroj: (Zapata et al. 2021)

polycyklické naphthylmethylindenes					
uhlovodíky					
aminy	<i>arylakylaminy</i>	fenethylaminy	alfa	amfetaminy	
			substituované	diarylethylenaminy	
			fenethylaminy	2-aminoindany	
			beta	kathinony	
			substituované		
			fenethylaminy		
			fenyl	dialkyloxy-fenethylaminy	
			substituované	methylenedioxy-fenethylaminy	
			fenethylaminy	benzofuran-ethylaminy	
				benzodifuran-ethylaminy	
				difenylheptanaminy	
				arylcyklohexylaminy	fenylcyklohexylaminy
					aminocyklohexylbenzamidy
				thiambuteny	
<i>heterocyklické aminy</i>	heteromonocyklické aminy	pyrroly	naftoylpyrroly		
		pyrrolidiny			
		pyrazoly			
		imidazoly			
		piperidiny	fenylpiperidiny		
			fentanyly	fenethylfentanyly	
		piperaziny			
		heteropolycyklické aminy	benzodiazepiny		
			indoly	indolealkylaminy	tryptaminy & tryptamin
				obsahující alkaloidy	psilocin & deriváty
					mitragynin (kratom) & deriváty
					lysergamidy
				aminoalkylindoly	
			arylalkylindoly	naftylmethylindoly	
	carbonylindoles	naftoylindoly			
		fenacethylindoly			
		benzoylindoly			
		adamantoylindoly			
		tetramethylcyklopropanoylindoly			
		indolekarboxilové estery			

			indolekarboxyamidy
			indazoly
			benzimidazoly
			karbazoly
			xanthiny
			bridged Tropanovou strukturu obsahující alkaloidy
			azapolycyklické sloučeniny
			Morfinovou skupinu obsahující alkaloidy
alkoholy	<i>fenoly &</i>	cyklohexylfenoly / cyklohexylfenylethery	
a ethery	<i>fenolické sloučeniny</i>	dibenzopyranové alkoholy/ethery	THC obsahující kanabinoidy
ostatní látky			

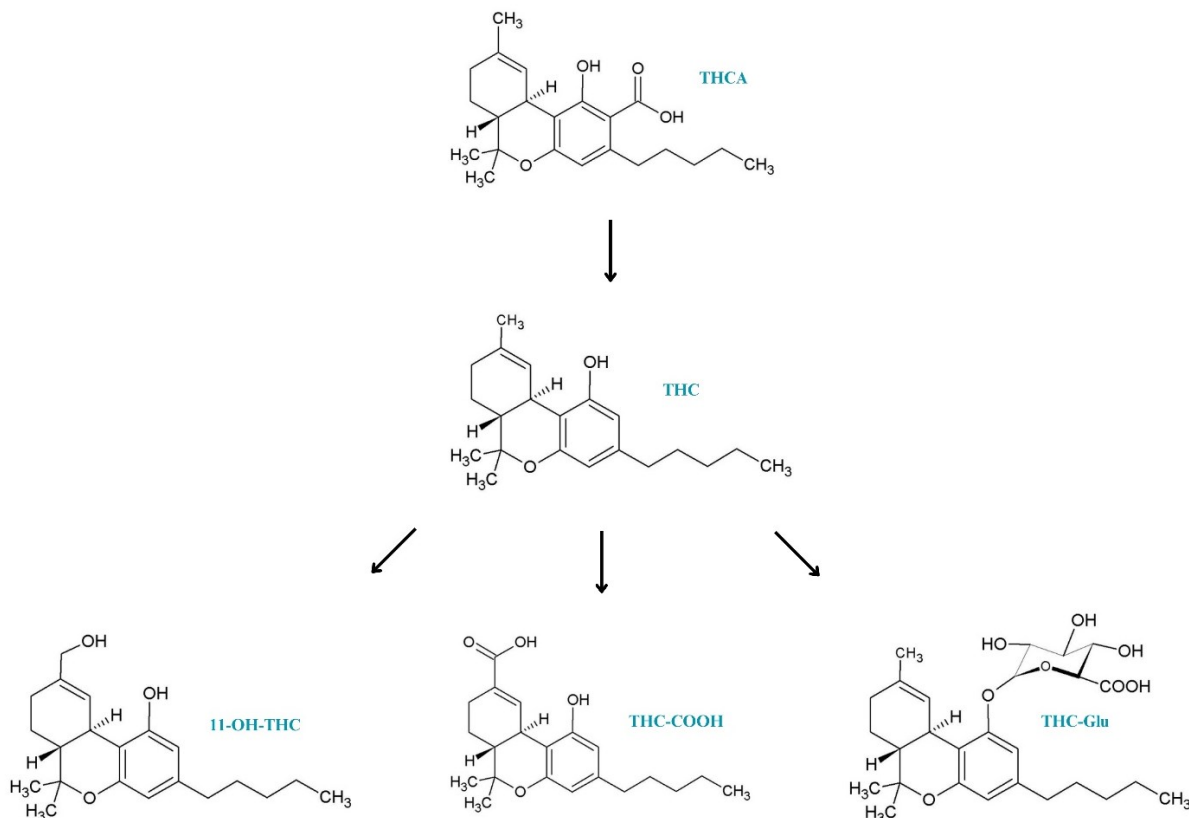
Jednotlivých psychoaktivních látek je mnoho a strukturně jsou velmi složité. Pro svou práci jsem si vybrala čtyři návykové látky a jejich nejsledovanější metabolity, kterým se věnuji podrobně. Těmito látkami jsou tetrahydrokanabinol (THC) společně se svým hlavním metabolitem, kterým je 11-nor-delta-9-tetrahydrokanabinol-karboxylová kyselina (THC-COOH), 3,4-methylendioxy-N-metamfetamin (MDMA), kokain (COC) a jeho metabolit benzoylekgonin (BE), a metamfetamin (MA) a jeho metabolit amfetamin (AMP). Byly vybrány, protože jde o nejčastěji konzumované drogy, které jsou známé desítky let a je na ně soustředěna pozornost odborné i laické veřejnosti. MDMA, kokain a metamfetamin se dle rozdělení v tabulce řadí mezi aminy, tetrahydrokanabinol je součástí skupiny alkoholů a etherů vycházejících ze struktury dibenzopyranu. MDMA a metamfetamin se konkrétněji řadí mezi amfetaminy a kokain je součástí skupiny tropanových alkaloidů (Zapata et al. 2021).

3.2 Tetrahydrokanabinol

Tetrahydrokanabinol se řadí mezi přírodní látky pocházející z rostliny konopí, které se nazývají kanabinoidy. Jde o skupinu čítající více než šedesát látek (Shevyrin a Morzherin 2015). Nejvýznamnějším psychoaktivním kanabinoidem je již zmíněný delta-9-tetrahydrokanabinol (THC), který se v rostlině nachází ve své neaktivní kyselé formě, delta-9-tetrahydrokanabinolové kyselině (THCA). Pokud je tato neaktivní kyselá forma dekarboxylována, což se může stát vlivem tepla, světla, za využití ethanolu či lipidů, dojde k přechodu látky do neutrální psychoaktivní formy. Tato změna nastává i při konzumaci drogy kouřením či jiným způsobem požití a lze poté pozorovat změny vnímání (Kalina 2015) (Sirikantaramas et al. 2005). V těle se THC metabolizuje na několik produktů, které lze stanovit z lidské moči, slin či krve. Nejčastějšími metabolickými produkty jsou kyselina 11-nor-delta-9-tetrahydrokanabinol-karboxylová (THC-COOH), 11-hydroxy-delta-9-tetrahydrokanabinol (11-OH-THC) a delta-9-THC-glukuronid (THC-Glu). THC-COOH se může metabolizovat dále na delta-9-tetrahydrokanabinol-11-octovou kyselinu

glukuronid (THC-COOH-Glu), ze které se však při nejčastěji využívané analýze zahrnující hydrolyzu glukuronid uvolňuje za vzniku THC-COOH. Obrázek č. 2 zobrazuje strukturu tetrahydrokanabinolu, jeho metabolitů i prekursoru (Busardò et al. 2021).

Metabolity se společně s lidskou močí dostávají do odpadních vod, jejichž analýzou lze zpětně odvodit konzumaci kanabinoidů v dané oblasti. Nejčastěji sledovaným biomarkerem pro stanovení tetrahydrokanabinolu ve vzorku odpadní vody je THC-COOH, který je v odpadní vodě ze všech metabolitů nejstabilnější (Causanilles et al. 2017).



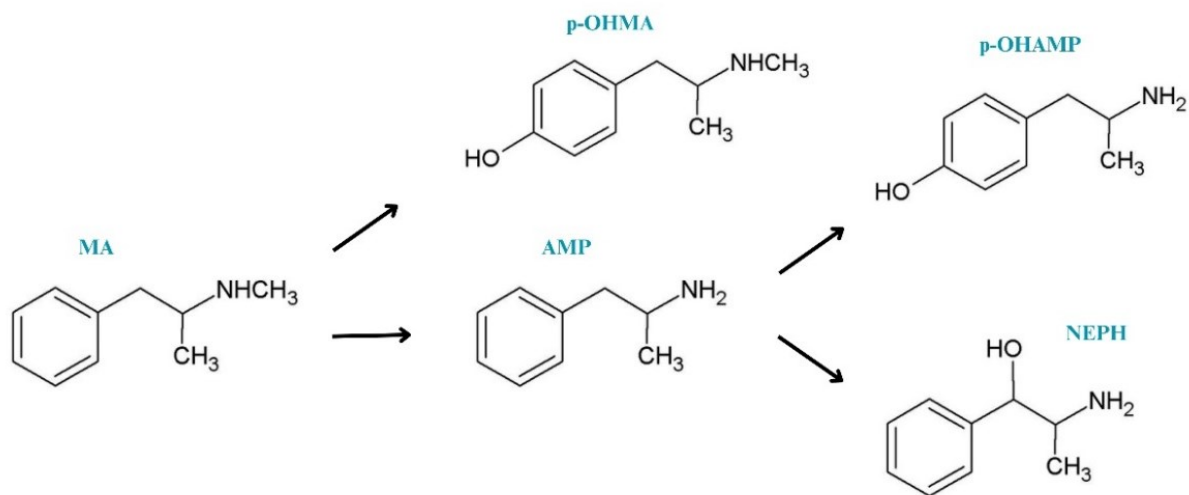
Obrázek č.2 Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů THC, zdroj: (Busardò et al. 2021)

3.3 Metamfetamin

Metamfetamin je jednou ze světově nejneužívanějších stimulačních drog ze skupiny fenethylaminů, v ČR hovorově označován jako pervitin. Celý systematický název dle IUPAC zní (2S)-N-methyl-1-fenylpropan-2-amin. Po konzumaci v lidském organismu zvyšuje hladinu dopaminu, noradrenalinu či serotoninu a dochází k nabuzení organismu a celkovému zvýšení výkonnosti (Kalina 2015). Hlavními metabolity metamfetaminu (MA), které lze stanovit ze vzorku moče, krve, slin či jiné biologické matrice, jsou amfetamin (AMP) a para-hydroxymetamfetamin (p-OHMA). Typů metabolitů je více, těmto dvěma je věnována největší pozornost. AMP se může dále metabolizovat typicky na para-hydroxyamfetamin (p-OHAMP), norefedrin (NEPH) a další formy. Struktura

metamfetaminu a některých jeho metabolitů je zobrazena na obrázku č. 3 (Takayama et al. 2003) (Li et al. 2010).

Do odpadní vody se metamfetamin dostává jako součást lidské moči. Při konzumaci metamfetaminu se z těla vylučuje v nezměněné formě přibližně 40 % zkonsumované látky a zbytek ve formě výše jmenovaných metabolitů (Li et al. 2010). Větší množství studií je zaměřeno kromě samotné detekce návykových látek i na sledování přítomnosti jejich konkrétních enantiomerů ve vzorku odpadní vody. Příkladem lze uvést amfetamin, který je jako nelegální droga nejčastěji produkován ve formě své racemické směsi obou optických izomerů, zatímco metamfetamin ve formě S(+) enantiomeru, který má silnější psychoaktivní účinky než jeho R(-) enantiomer. Lze tak z poměru přítomných enantiomerů amfetaminu ve vzorku odhadovat, zda se jedná o amfetamin vzniklý jako produkt metabolismu metamfetaminu, či o amfetamin pocházející z jeho přímé konzumace jako drogy. Tato informace může být cenná při epidemiologických studiích psychoaktivních látek. Význam má také sledovat poměry metabolizovaných a primárních forem látky. Při vysokém poměru nemetabolizované formy metamfetaminu k jeho metabolitům lze předpokládat, že znečištění nemá původ pouze v konzumaci, ale může jít o znečištění způsobené větším množstvím surové drogy, například při tajné likvidaci nelegální laboratoře (Gao et al. 2018) (Xu et al. 2017).



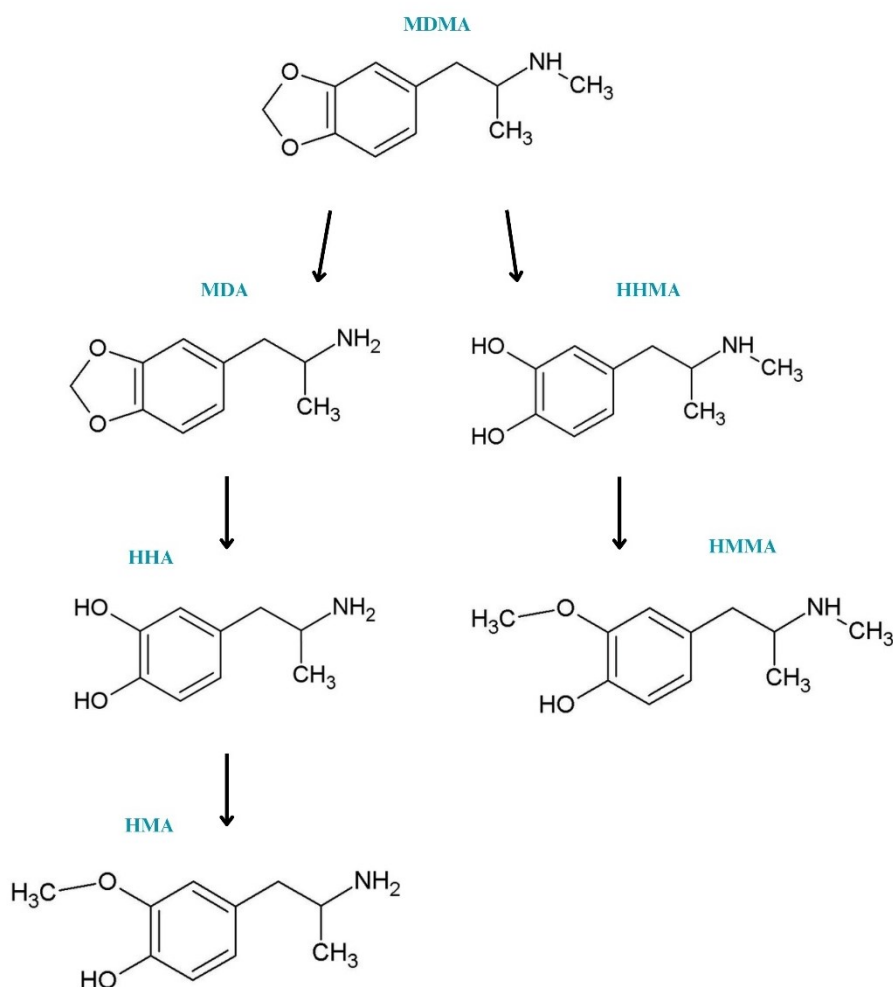
Obrázek č.3 Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů MA, zdroj: (Gao et al. 2018)

3.4 MDMA

Extáze je velmi často zneužívanou stimulační drogou, která se řadí stejně jako metamfetamin do skupiny fenethylaminů. Pojem extáze je využíván v ČR, mezinárodně se droga označuje zkratkou MDMA. Tato zkratka vychází ze systematického názvu chemické sloučeniny, který zní 3,4-methylenedioxy-N-metamfetamin. Konzumace je typicky spojená s hudebními či tanečními akcemi. Po požití droga v lidském organismu ovlivňuje hladinu řady hormonů jako jsou serotonin, dopamin a noradrenalin a dochází tak k pocitu nabuzení, euforické náladě či zvýšení empatie (Kalina 2015).

Metabolity MDMA stanovitelné z lidské moči jsou 4-hydroxy-3-methoxymetamfetamin (HMMA), 3,4-methylenedioxyamfetamin (MDA), 4-hydroxy-3-methoxyamfetamin (HMA), 3,4-dihydroxymetamfetamin (HHMA) a 3,4-dihydroxyamfetamin (HHA) (Lanz et al. 1997). Podobně jako u metamfetaminu, i zde hraje roli, o jaký enantiomer se jedná. MDMA se nejčastěji vyrábí ve formě racemické směsi, přičemž rychleji a ve vyšší míře se metabolizuje S(+) enantiomer (Lo Faro et al. 2024).

V literatuře se různí informace, které z metabolitů se v moči vyskytují v největším množství a lze je tak považovat za hlavní. Dle publikace, která seskupila data ze sedmi různých studií, je průměrné hmotnostní zastoupení metabolitů v moči k původní hmotnosti dávky asi 22,5 % nezměněného MDMA, 19 % HMMA, 18,2 % HHMA, 1,8 % MDA a 1,2 % HMA (Gracia-Lor et al. 2016). HHMA je však v odpadní vodě méně stabilní než ostatní metabolity, a proto se jako nejvhodnější metabolit k měření v odpadní vodě jeví samotné MDMA doplněné o měření HMMA (González-Mariño et al. 2017).

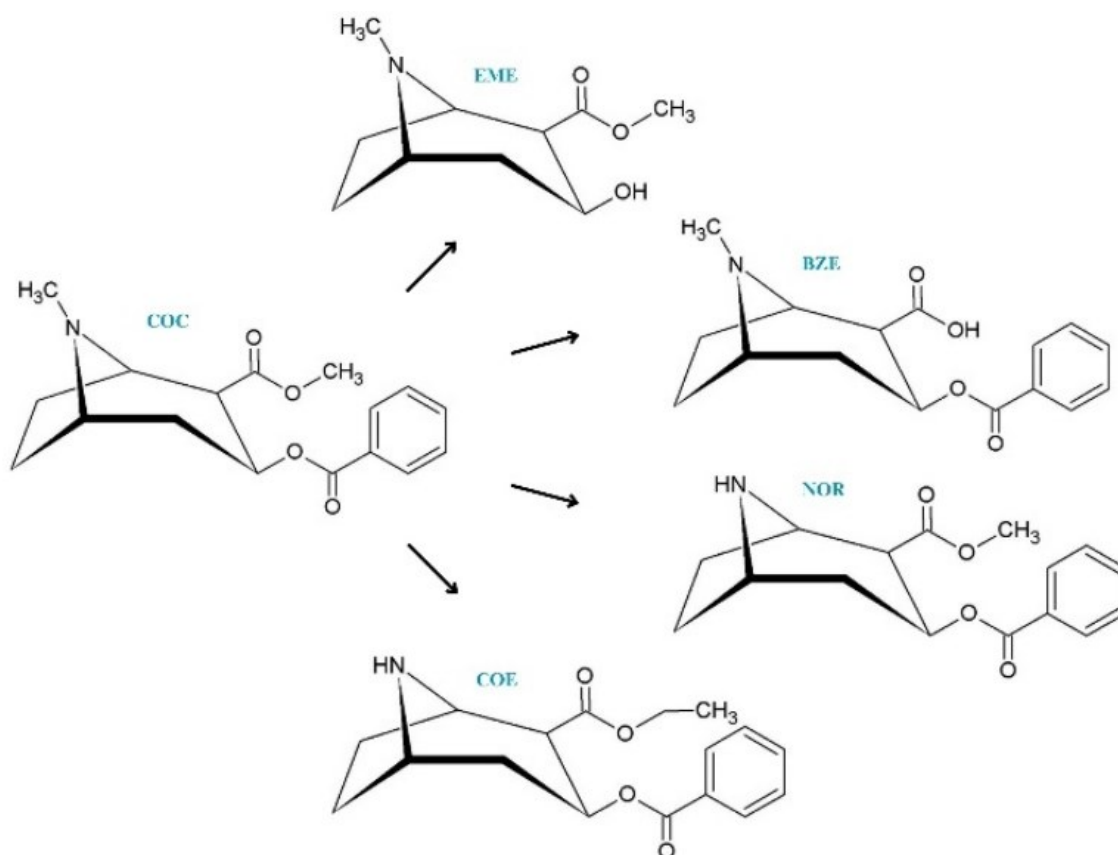


Obrázek č.4 Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů MDMA, zdroj: (Lo Faro et al. 2024)

3.5 Kokain

Kokain je třetí drogou řadící se mezi stimulační psychoaktivní látky, které se v práci blíže věnuji. Mechanismus působení je, stejně jako u metamfetaminu a extáze, založen na ovlivnění hladin serotoninu, dopaminu a noradrenalinu, kdy dochází k jejich nadměrnému vylučování. Účinky se dostavují pár minut po požití, zvyšuje se bdělost, urychluje se myšlení a dochází k pocitu sebedůvěry a euforie. Na základě chemické struktury se kokain řadí mezi tropanové alkaloidy a získává se z jihoamerického keře *Erythroxylum coca Lam* (Kalina a kol. 2003).

Primárním metabolitem kokainu (COC) je benzoylekgonin (BE), který se také velmi často využívá jako ukazatel při stanovení spotřeby drog z odpadní vody i jako důkaz konzumace drogy stanovený z lidské moči či jiných biologických matric. Je v odpadní vodě stabilnější než ostatní metabolity kokainu a kokain se na něj postupně přeměňuje i po vyloučení z těla (van Nuijs et al. 2012). Dalšími metabolity jsou ekgonin methylester (EME), norkokain (NOR) a kokaethylen (COE). Struktura metabolitů je znázorněna na obrázku č.5. Nejvýznamnější hmotnostní procento z konzumované dávky kokainu zastává benzoylekgonin, asi 45 %, druhý je ekgonin methylester, který činí asi 40 % z dávky. Kokain v nezměněné formě zaujímá asi 1-9 %, v závislosti na pH moči (Castiglioni et al. 2011).



Obrázek č.5 Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů kokainu, převzato, upraveno, zdroj: (Janicka et al. 2010)

4 Spotřeba drog v České republice a v Evropě

Nejužívanější drogou světa jsou konopné látky. Dle odhadů OSN v roce 2021 konopí zneužilo 219 milionů lidí, dále odhadem 36 milionů lidí zneužilo amfetaminy, 22 milionů kokain a 20 milionů látky typu extáze. Celosvětově spotřeba psychoaktivních látek stoupá a na trhu se objevuje stále více nových syntetických drog, které je třeba sledovat a včas diskutovat možná řešení (UNODC 2023).

Mezi nejčastější přístupy získávání dat potřebných k odhadu konzumace drog se řadí analýza odpadních vod, zpracování dat z populačních průzkumů či sledování množství zadržených látek. Porovnáním těchto navzájem se doplňujících metod lze získat ucelenější představu o stávající situaci (Baz-Lomba et al. 2016).

V rámci Evropského monitorovacího centra pro drogy a drogovou závislost, dále v textu EMCDDA, již od roku 2011 funguje projektová skupina SCORE, díky které dochází ke standardizaci přístupů využívaných pro analýzu odpadních vod a koordinaci mezinárodních studií. EMCDDA na základě dat ze 120 měst ze 37 zemí, které jsou do projektu zapojeny, každoročně vydává zprávu shrnující současnou drogovou situaci v Evropě. Za ČR se účastní Výzkumný ústav vodohospodářský v Praze (Chomynová et al. 2023).

Tabulka č. 3 shrnuje výsledky projektu SCORE pro šest vybraných evropských měst v letech 2013, 2018, 2021 a 2022. Města byla vybrána na základě délky zapojení do projektu a aktivních let, ve kterých probíhalo měření. Měření probíhá vždy během jednoho týdne mezi březnem a dubnem a jedná se o 24hodinové slévané vzorky odpadní vody odebírané na nátok do ČOV. Analýza a způsob nakládání se vzorky jsou definovány protokolem SCORE, doporučenými stanovovanými látkami jsou kokain jako jeho metabolit benzoylekgonin (BE), amfetamin, metamfetamin (ME), MDMA a hlavní metabolit konopí THC-COOH. Většina účastníků projektu provádí analýzu pomocí kapalinové chromatografie spojené s tandemovou hmotnostní spektrometrií (LC-MS/MS). Výsledné hodnoty jsou získány ze stanovené koncentrace vztahované k dennímu průtoku. Údaje jsou vyjádřeny v miligramech látky připadající na tisíc obyvatel za jeden den (Castiglioni et al. 2013) (SCORE 2021) (EMCDDA 2023).

Tabulka 3 - množství vybraných nelegálních drog v odpadních vodách evropských měst (zdroj dat: EMCDDA, 2023)

THC-COOH (mg/1000 ob/den)				
	2013	2018	2021	2022
Praha	79,63	–	91,03	112,38
Lisabon	–	117,67	101,77	129,91
Barcelona	126,09	230,82	–	151,1
Amsterdam	–	264,22	157,64	169,39
Záhřeb	63,01	120,03	132,9	96,34
Milano	24,91	31,44	42,98	53,33

ME (mg/1000 ob/den)				
	2013	2018	2021	2022
Praha	326,6	–	328,77	628,65
Lisabon	0	1,85	7,91	9,78
Barcelona	26,51	47,88	62,13	56,09
Amsterdam	5,24	28,58	38,18	39,96
Záhřeb	–	0	0	0
Milano	5,93	12,93	12,67	9,7

MDMA (mg/1000 ob/den)				
	2013	2018	2021	2022
Praha	21,9	–	26,6	51,44
Lisabon	4,85	49,35	48,68	121,79
Barcelona	31,41	46,77	25,43	45,53
Amsterdam	89,25	182,97	125	182,32
Záhřeb	9,45	29,83	28,26	26,86
Milano	–	–	–	–

BE (mg/1000 ob/den)				
	2013	2018	2021	2022
Praha	51,45	–	239,83	513,4
Lisabon	106,82	454,53	500,48	731,95
Barcelona	537,98	733,19	665,38	622,26
Amsterdam	393	932,36	886,83	1142,42
Záhřeb	80,03	234,54	548,62	401,19
Milano	233,17	362,19	385,29	390,11

*Jedná se o průměrné hodnoty z celého týdenního měření. Hodnoty pod mezí stanovitelnosti jsou označeny nulou,

** (–) = roky, ve kterých měření neprobíhalo.

Z tabulky lze vyzorovat, že koncentrace drog v odpadní vodě se ve většině sledovaných měst v období 2013-2022 zvyšují, nebo se pohybují kolem podobných hodnot. Ke snižování dochází v ojedinělých případech, příkladem může být pokles koncentrací THC-COOH v Amsterdamu mezi lety 2018 a 2021. Lze určit ohniska výskytu některých látek, například v případě metamfetaminu, jehož výroba i spotřeba se soustředí do České republiky. V Lisabonu je naopak obsah metamfetaminu v odpadních vodách nízký, ale je zde poměrně velké množství MDMA a konopí. V Amsterdamu bylo naměřeno velké množství kokainu a MDMA. Obecně tabulka potvrzuje evropský trend narůstajícího zneužívání stimulačních drog a konopných látek.

Dle nejnovější každoroční zprávy o nelegálních drogách v České republice byly nejčastěji zachycenou drogou v ČR v rámci trestního a přestupkového řízení v posledních devíti letech konopné látky, poté pervitin. V roce 2022 se jednalo o 6733 záchytů zahrnujících sušinu konopí, rostlinu konopí nebo hašiš. Druhou nejčastěji zajištěnou drogou byl pervitin s 2558 záchyty, dále pak extáze se 258 záchyty a kokain se 215 záchyty téhož roku (Chomynová et al. 2023). Rozsáhlá populační studie z roku 2021 realizovaná na reprezentativním vzorku obyvatel ČR starších patnácti let se zaměřovala na rozsah užívání legálních a nelegálních návykových látek v obecné populaci. Studie byla provedena Národním monitorovacím střediskem pro drogy a drogovou závislost. Vybranými závěry bylo, že 8,6 % populace nad patnáct let užilo konopné látky v posledních 12 měsících,

tedy v období roku 2020, z toho celkem 207 tis. osob spadá do kategorie vysokého rizika vzniku problémů spojených s jejich užíváním, z nichž 18 tis. osob užívá konopí denně. Dále 1,4 % populace nad patnáct let v posledním roce užila MDMA, 0,7 % kokain a 0,7 % také amfetaminy (Chomynová et al. 2021). Nejvíce se spotřeba kokainu a MDMA v ČR soustředí do hlavního města, což potvrzují i výsledky analýzy odpadních vod v roce 2023 z již diskutovaného projektu SCORE. v Praze byla stanovena spotřeba návykových látek v mg/1000ob/den na 104 pro konopí, 456 pro kokain, 320 pro metamfetamin a 40 MDMA. V Plzni byla průměrná denní spotřeba konopí na obyvatele 114 mg, což byla nejvyšší hodnota ze sledovaných měst. V případě metamfetaminu byla na prvním místě Ostrava, kde byla průměrná denní spotřeba stanovena na 614 mg/1000ob/den. Měření probíhalo také v Českých Budějovicích, Brně a Karlových Varech (EMCDDA 2023).

Spotřeba návykových látek stoupá, různé látky podléhají v jednotlivých státech různým regulacím a neexistuje žádný jednotný celosvětový systém, který by zachycoval a popisoval situaci objektivně a v reálném čase. V Evropě se postupně rozrůstá počet států a měst zapojujících se do projektu SCORE, bylo by dobré v tom pokračovat, rozšířit počet sledovaných typů látek a četnost měření. Spojením monitoringu odpadní vody, sledováním záchytů, prováděním populačních studií a dalších metod můžeme získat přehled o situaci a nastavit včas efektivní regulace a řešení.

5 Drogy v komunálních odpadních vodách

Ke konci dvacátého století začalo vznikat větší množství studií zabývajících se rezidui léčiv v odpadních vodách, efektivitou jejich odstraňování v ČOV a jejich přítomností v povrchových vodách (Heberer 2002) (Ternes 1998).

Později se přidaly zmínky o přítomnosti nelegálních drog v odpadní a povrchové vodě a studie zaměřující se přímo na tuto problematiku. Koncentrace drog v odpadních vodách z různých studií shrnuje tabulka č. 4, studie jsou seřazeny dle data publikace. Jednou z prvních byla studie z roku 2005 v rámci které byl ze vzorků přitékající odpadní vody na čtyři čistírny ve středně velkých italských městech Cagliari, Latina, Cuneo, a Varese a vody řeky Pád stanovován kokain a jeho metabolit BE. Obě látky byly nalezeny ve všech vzorcích, průměrné koncentrace v řece Pád dosahovaly hodnot $1,2 \text{ ng.L}^{-1}$ kokainu a 25 ng.L^{-1} BE a průměrné koncentrace z čistíren odpadních vod 80 ng.L^{-1} kokainu a 550 ng.L^{-1} BE. Různý poměr mezi kokainem a metabolitem v řece a v čistírně může naznačovat odlišnou efektivitu odstraňování látek v ČOV či rozdílné chování látek v prostředí (Zuccato et al. 2005).

V rámci studie z roku 2011, zaměřující se na již velmi širokou skupinu drog v odpadní vodě přitékající na sedm ČOV v Anglii, byly stanoveny na dvou čistírnách neobvykle vysoké koncentrace amfetaminu, které ovlivnily i hodnotu průměrné koncentrace, která je velmi vysoká. Příčina takového množství v odpadní vodě nebyla identifikována, avšak někdy může taková situace nastat, pokud dojde k nárazové likvidaci většího množství nelegální drogy, jak již bylo v mé práci zmíněno (Baker et al. 2011). Studie z roku 2023 prováděná v ČOV v Brně potvrdila velkou spotřebu metamfetaminu v ČR, která je zde velmi vysoká již několik let, vyšší než ve zbytku Evropy (Carnevale Miino et al. 2023). Velké koncentrace byly naměřeny i v sousedním Slovensku (Žabka et al. 2023).

V rámci studií byl nejčastěji sledovanou látkou, na kterou se soustředí tato práce, kokain a jeho metabolit benzoylekgonin. Nejméně často pak THC-COOH, což je pravděpodobně tím, že konopné látky jsou náchylnější k uchování a manipulaci při analýze a mají specifické fyzikálně-chemické vlastnosti. Je časté, že se na ně studie přímo specializují, nebo je nezahrnují a směřují pozornost na stimulační drogy, či jiné skupiny návykových látek.

Tabulka 4 – Příklady koncentrací [ng.L⁻¹] vybraných drog a jejich metabolitů měřených na nátok do čistíren odpadních vod

(počet ČOV)	data	THC-COOH	MA	AMP	MDMA	COC	BE	zdroj
(4) Itálie	p.	–	–	–	–	80	550	(Zuccato et al. 2005)
(15) Španělsko	r.	23,5 – 402	–	–	–	–	–	(Rosa Boleda et al. 2009)
(7) Anglie	p.	–	2	829,6	39	70,9	243	(Baker et al. 2011)
(1) Anglie	p.	–	<LK	–	43	430	1247	(Petrie et al. 2016)
(1) Itálie	p.	104,7	<LK	–	<LK	81,1	235,1	(Cosenza et al. 2018)
(8) Čína	r.	–	1,2 – 51,6	1,4 – 10,3	<LD – 0,6	0,2 – 0,8	<LD – 0,2	(Deng et al. 2020)
(1) Řecko	r.	80,3 – 171,9	<LD	<LD	<LD – 48,2	–	84,0 – 202,2	(Christophoridis et al. 2021)
(1) Polsko	p.	–	<LK	124,6	39,5	70,0	57,9	(Styszko et al. 2021)
(5) Španělsko	r.	–	<LD – 54	7 – 2 331	<LK – 374	–	–	(Estévez-Danta et al. 2021)
(2) Slovensko	p.	165	805	91	16	62	87	(Žabka et al. 2023)
(1) ČR	p.	–	2130	–	100	90	480	(Carnevale Miino et al. 2023)
(3) Austrálie	m.	–	390/950/653	30/187/290	–	<LD/86/<LK	–	(Restrepo-Vieira et al. 2024)

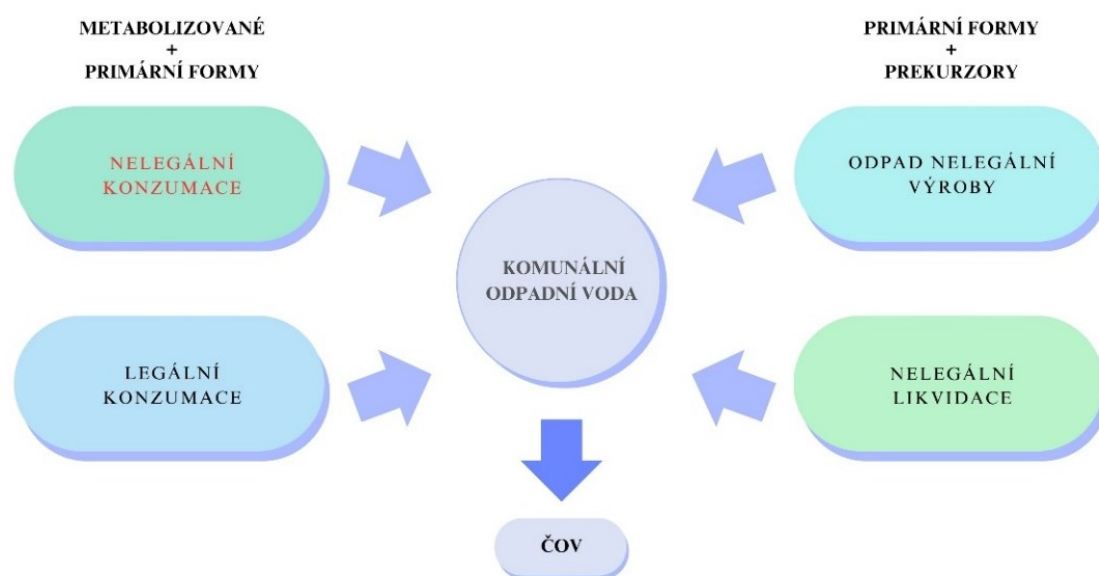
*Data: p. (průměr koncentrací), r. (rozsah koncentrací), m. (medián koncentrací) <LD (limit detekce), <LK (limit kvantifikace), – (neměřeno), studie jsou seřazeny dle roku publikace

V současnosti se drogám v odpadních vodách věnuje stále větší pozornost, a to hlavně z pohledu epidemiologie, kdy je sledována konzumace těchto látek populací a dochází ke zpětné kalkulaci požitých dávek či celkovému mapování trhu. Příkladem aplikace epidemiologického přístupu k odpadním vodám je i výše popisovaný projekt SCORE. Velké množství studií se věnuje také výskytu drog v prostředí, převážně v povrchové vodě, kdy je předmětem pozorování již životní prostředí jako takové, a ne odhad spotřeby drog populací. Na oba zmíněné typy studií byla zaměřena úvodní část mé práce. Studií, jejichž hlavním tématem je technologie čištění a porovnávání její efektivity při odstraňování drog, je o něco méně, detailně budou diskutovány v dalších částech mé práce.

5.1 Zdroje drog v odpadních vodách

Znečištění je vázáno na obydlená území a centrem jsou velká města a jejich čistírny. Dominantním zdrojem reziduí drog v komunální odpadní vodě je lidská moč a stolice, tedy splašky, které obsahují metabolizované i primární formy konzumovaných psychoaktivních látek (Van Nuijs et al. 2011). Dalšími méně významnými zdroji těchto látek v odpadních vodách je přímý odpad z nelegálních laboratoří, varen či skladů drog, typicky se jedná o amfetaminy. Takový zdroj znečištění je možné zaznamenat při pozorování vysoké koncentrace primární formy látky, výskytu určitého optického izomeru nebo typických prekurzorů využívaných k výrobě. Nemetabolizované jsou také nezkonsumované dávky dostávající se do kanalizace jako odpad jednotlivce. Přibývá studií soustředících se na stanovení konkrétních enantiomerů psychoaktivních látek, protože díky znalosti zdroje lze přesněji odhadnout spotřebu zkonsumovaných drog v populaci (Emke et al. 2014) (Xu et al. 2017) (Estévez-Danta et al. 2021).

Některé metabolity mohou pocházet z konzumace legálně předepsaných léků, příkladem mohou být kanabinoidy, nebo také amfetamin a metamfetamin. Ty mohou být metabolitem některých léků na léčbu deprese, ADHD či Parkinsonovy choroby (Verovšek et al. 2022). Obrázek č. 6 graficky znázorňuje výše uvedené zdroje znečištění.



Obrázek č.6 Zdroje znečištění komunální odpadní vody nelegálními psychoaktivními látkami

5.2 Metody stanovení drog v odpadních vodách

Základní metodou využívanou k analýze odpadních vod je kapalinová chromatografie s tandemovou hmotnostní spektrometrií (LC-MS/MS) využívající trojitě kvadrupóly. Tato analytická metoda umožňuje stanovit látky ze vzorku i ve velmi nízkých koncentracích, a to i ve složitých směsích. Principem metody je sledování přechodu prekurzorového a produktového iontu daného analytu. Nejdříve dochází k separaci analytů pomocí kapalinové chromatografie, poté k jejich

převedení na ionty, například využitím elektrospreje. Ionty jsou vedeny do prvního kvadrupólu, který propustí prekurzorový iont, ten je poté fragmentován v kolizní cele za vzniku produktových iontů. Produktové ionty jsou vedeny do třetího kvadrupólu, kterým projde pouze námi specifikovaný iont, určen na detektoru iontů (Castiglioni et al. 2013) (Restrepo-Vieira et al. 2022) (Wu et al. 2022).

Prvním krokem analýzy odpadních vod je odběr vzorků, který se provádí často na nátoku čistírný odpadních vod, na výpusti již přečištěné vody nebo na obou místech, podle toho, jaká data je třeba získat. Typicky se jedná o 24hodinové slévané vzorky, odebírané například po 20 minutách. Finální vzorek pak zachycuje průměrnou koncentraci za celých 24 hodin a je připraven k další analýze. Pokud je cílem získat informaci o určité koncentraci v jednom okamžiku, je vhodné odebrat jeden vzorek a pokračovat analýzou (Borova et al. 2014) (Castiglioni et al. 2013). Vzhledem k tomu, že koncentrace drog se v odpadní vodě pohybují v jednotkách $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ nebo dokonce $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, bývá dalším krokem prekoncentrování vzorku technikou extrakce na pevnou fázi (SPE), což umožní dosažení nižších limitů kvantifikace (LOQ) a limitů detekce (LOD), a tedy citlivost analýzy. SPE metoda je časově náročná a vyžaduje další vybavení a může být zdrojem nechtěných nepřesností v měření. Variantou může být automatizovaná online-SPE technologie, která proces urychluje. Díky postupujícímu rozvoji instrumentace LC-MS metod je jednou z nejnovějších alternativ technologie přímého nástřiku vzorku bez jakékoliv prekoncentrace. Jejím využitím je možné ušetřit čas, finance a co nejvíce minimalizovat nepřesnosti měření (López-García et al. 2018) (Restrepo-Vieira et al. 2022) (Simarro-Gimeno et al. 2023).

Technologie a instrumentace vhodná k analýze stopových a ultra stopových analytů v komplexních vzorcích, jakým je odpadní voda či jiné matrice, se neustále vyvíjí. Využitím těchto metod ke stanovení návykových látek a dalších mikropolutantů v prostředí je možné získat přesnější představu o situaci. Nabízí se možnost pravidelného testování, které momentálně probíhá spíše nárazově v rámci odborných studií.

5.3 Stabilita drog v odpadních vodách

Návykové látky vykazují v odpadní vodě různou stabilitu, tedy dochází k jejich degradaci již během transportu stokovou sítí. Stabilita je ovlivněna jak charakterem látky samotné, tak aktuálními fyzikálně chemickými vlastnostmi vody, jako je pH či teplota. Lze pozorovat, že degradace látek se zvyšuje s vyšší teplotou odpadní vody (Gheorghe et al. 2008) (van Nuijs et al. 2012) (Ramin et al. 2018). Vliv na rychlost degradace má i stav stokové sítě jako takové, roli hraje přítomnost biofilmů, které mohou chemickou přeměnu některých látek urychlovat (Thai et al. 2014). Článek shrnující data o stabilitě látek a jejich metabolitů v odpadní vodě z více než padesáti studií udává, že nízkou stabilitu v odpadních vodách vykazuje kokain. Rychlé degradaci podléhá i heroin, 6-monoacetyl-morfin či ekgonin methylester. Vysokou stabilitu v odpadní vodě vykazuje metamfetamin, dále pak MDMA, včetně svých metabolitů (McCall et al. 2016). Některé látky mohou

v čase v odpadní vodě přibývat, což je způsobeno jejich formováním z jiných látek, které se na ně rozpadají. Typicky k tomu dochází v případě benzoylekgoninu, který vzniká degradací kokainu (van Nuijs et al. 2012). Znalost stability sledovaných látek v konkrétních podmínkách stokového systému se stává velmi důležitou informací při zpětném odhadování spotřeby drog. Simulovat tak komplexní prostředí, jako je stoková síť, je však v laboratorních podmínkách náročné. Je třeba nastavit správně postupy zpětného dopočítávání pro různé kombinace teploty, pH, průtoku a zohlednit i další faktory jako je zmíněná interakce s biofilmy.

V rámci této práce je znalost stability látek v odpadní vodě přínosná, protože tak lze předpokládat, které látky se budou v čistírně odstraňovat lépe než jiné a v jakých fyzikálně-chemických podmínkách degradují lépe, například za vyšší teploty. Dále pak můžeme zkoumat, zda látky, které jsou stabilní v odpadní vodě budou stabilní i ve vodní složce životního prostředí, což se potenciálně může stát environmentálním problémem.

5.4 Změny koncentrace drog v odpadní vodě během týdne

Drogy v komunálních odpadních vodách představují kontinuální zátěž, avšak koncentrace jednotlivých látek se během týdne mění. Hlavním trendem je zvýšení konzumace stimulačních drog ve víkendových dnech v rámci tanečních a společenských akcí probíhajících typicky v pátek a v sobotu večer (Krizman-Matasic et al. 2019). Studie z roku 2022 sledující tyto trendy s využitím analýzy odpadních vod v Amsterdamu potvrdila, že MDMA a kokainu se o víkendu konzumuje až o 41 % a 26 % více než oběhem všedních dnů (ter Laak et al. 2022). Výrazné jednorázové zvýšení koncentrace může být způsobeno velkou událostí, která s sebou nese riziko velké konzumace návykových látek. Jedná se hlavně o hudební festivaly, které bývají pořádány ve městě, ale často také na odlehlejších místě mimo hustě obydlené území. Tato území nejsou na takovou zátěž připravena a může častěji docházet k únikům přímo do životního prostředí, nejen do stokové sítě. Studie z roku 2020 porovnávala koncentrace drog na nátoky do městské čistírny pro 30 000 obyvatel mimo hudební festival a v průběhu týdenního festivalu, který navštívilo až 50 000 lidí. Během akce dosahovaly koncentrace pro vybrané látky hodnot $1\,031\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ THC-COOH, $844\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ MDMA a $1\,348\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ BE. V týdnu mimo akci pak $469\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ THC-COOH, $64\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ MDMA a $739\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ BE (Benaglia et al. 2020). Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, důvodem jednorázově zvýšené koncentrace může být také likvidace velkého objemu odpadu či samotné drogy z nelegální laboratoře, pěstírny a podobně (Xu et al. 2017).

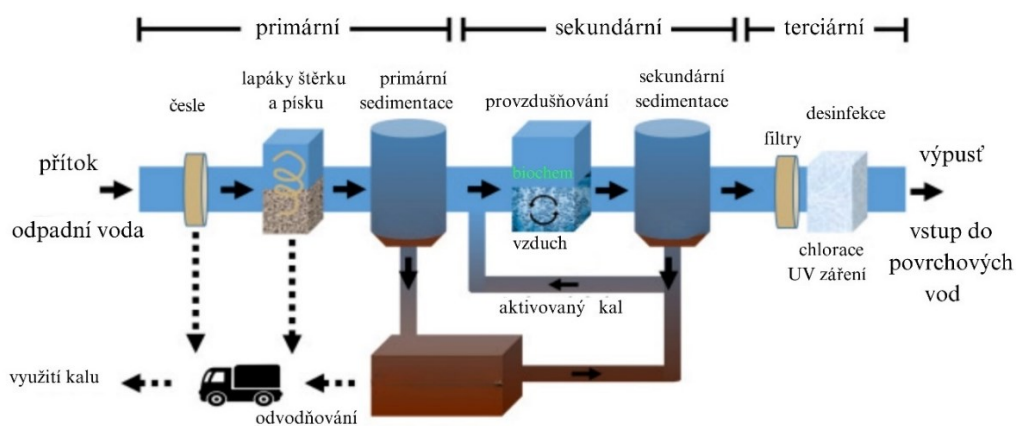
Dle dat v tabulce č. 4 i výsledků studií uvedených výše, je jasné, že koncentrace drog v odpadních vodách mohou být proměnlivé a mohou se měnit v rámci týdnů z jednotek až na nižší tisíce nanogramů na litr. Je proto vhodné provádět studie, zaměřující se na delší časový úsek odebrání vzorků, díky jejichž vyhodnocení je možné dobře posoudit, s jakým množstvím látky se daná ČOV musí průměrně vypořádávat a v jakém rozsahu se hodnoty koncentrací pohybují. Není tedy možné

porovnávat hodnoty koncentrací na nátoku do ČOV a výpustě z ČOV, pokud byly vzorky odebírány v navzájem si neodpovídajícím čase.

6 Drogy v čistírně odpadních vod a účinnost jejich odstraňování

Nelegální návykové látky se v rámci znečištěné odpadní vody dostávají do čistíren odpadních vod, kde dochází k jejich odstraňování, a to s různou efektivitou. Účinnost, s jakou bude látka z odpadní vody odstraněna, závisí na více faktorech. Jedním z nich je technologie dané čistírny (Evgenidou et al. 2015).

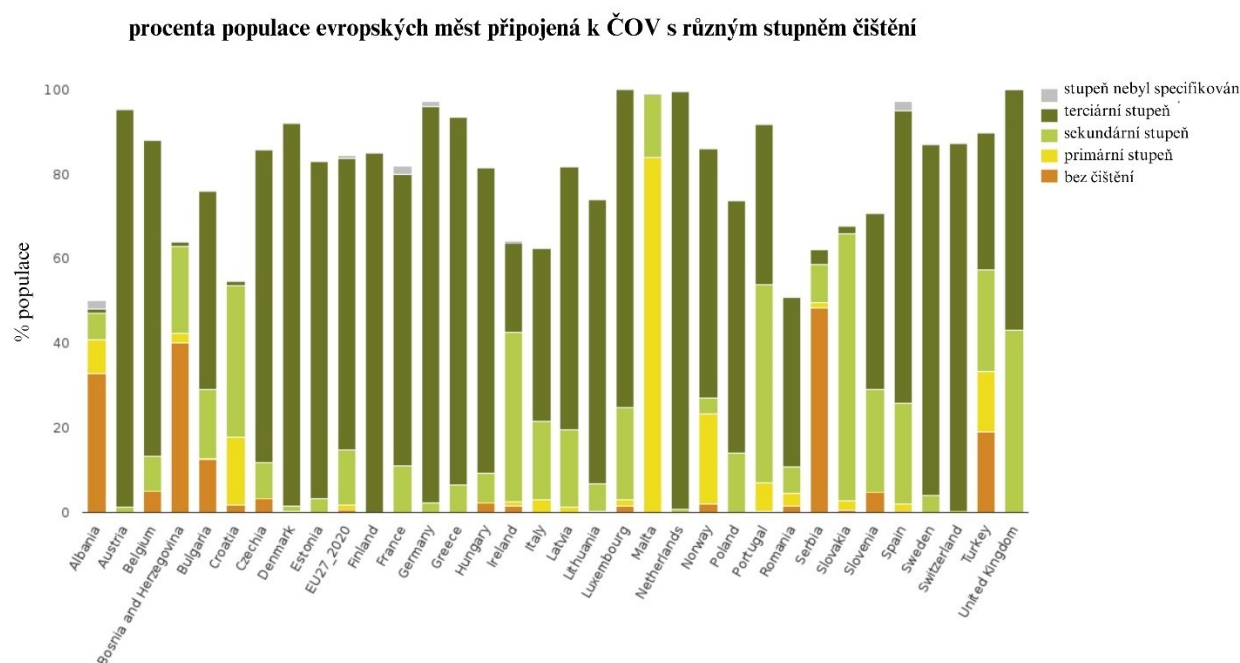
Proces čištění odpadní vody se dělí na několik stupňů. Primární fází je mechanické čištění, jehož cílem je odstranění hrubých nečistot. Využívají se česle, lapáky štěrku a písku, odlučovače tuku a další specializovaná zařízení, která odseparují větší pevné nečistoty. Důležité jsou usazovací nádrže, kde dochází k sedimentaci hrubých nečistot působením gravitační síly a jejich oddělení od odpadní vody, která je vedena do dalšího stupně čištění. Sekundární fází je biologické čištění, v rámci kterého dochází k rozkladu znečišťujících látek biochemickými procesy. Mikrobiální organismy jsou v systému přítomny ve formě aktivovaného kalu. Součástí sekundární fáze jsou dosazovací nádrže, kde dochází k separaci aktivovaného kalu od přečištěné vody, která může být přiváděna do terciární fáze čištění. Terciární fáze může zahrnovat veškeré další úpravy jako je dodatečné odstraňování dusíku či fosforu, dezinfekce využitím chlóru, dezinfekce UV zářením či sorpce na aktivní uhlí (Dohányos 2007) (Chudoba et al. 1991). Základní schéma čistírny o třech stupních čištění je zobrazen na obrázku č. 7 (Martín-Pozo et al. 2022).



Obrázek č.7 Schéma čistírny odpadních vod se třemi stupni čištění, převzato, upraveno, zdroj: (Martín-Pozo et al. 2022)

Čistírny odpadních vod mohou obsahovat různý počet stupňů čištění a tím dosahovat různé úrovně čistoty zpracovávané odpadní vody. Obrázek č. 8 zobrazuje procento obyvatel jednotlivých evropských zemí dle jejich připojení k čistírně odpadních vod s různým stupněm čištění, k roku 2017. Většina evropských zemí drtivou většinu tamní populace připojuje na čistírny se sekundárním stupněm čištění, z větší části zahrnující i terciární stupeň. Balkánské země terciární stupeň čištění využívají méně. V Albánii, Bosně a Hercegovině a Srbsku je dokonce nadpoloviční většina populace připojena na stokový systém bez jakékoliv fáze čištění. Naopak ve Finsku, Nizozemsku či Švýcarsku čistírny téměř vždy obsahují všechny tři stupně čištění. V ČR je více než 73 % obyvatel připojeno na čistírny

se třemi stupni čištění, 8 % je obsluhováno čistírnami s primárním a sekundárním stupněm. Dva stupně čištění mají nejčastěji malé čistírny, které nemusí splňovat limit pro odstranění fosforu (EEA 2020).



Obrázek č. 8 procento populace evropských zemí dle jejich připojení k ČOV s různým počtem stupňů čištění k roku 2017., převzato, upraveno, zdroj: (EEA 2020)

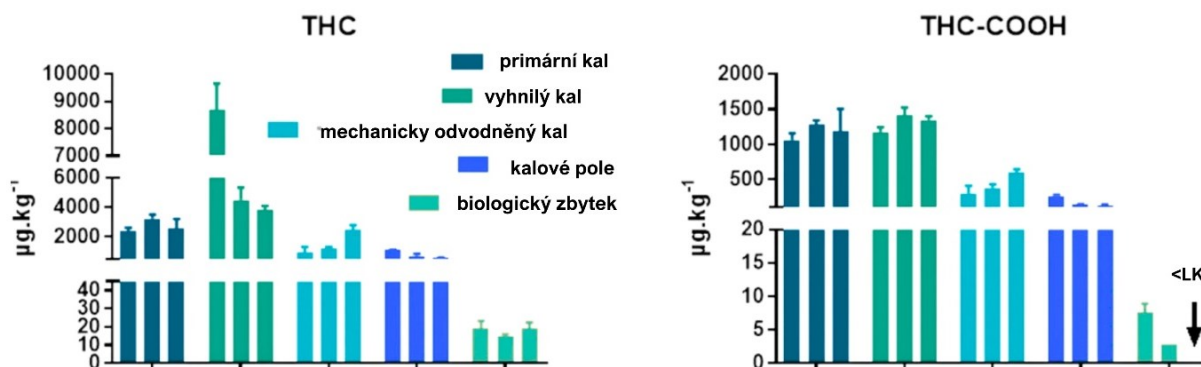
6.1 Mechanická fáze čištění odpadní vody

Primární fáze čištění je různě účinná pro rozdílné typy látek. K jejich eliminaci v této fázi dochází, zejména pokud se sorbují na pevné částice, které jsou separovány po sedimentaci v usazovací nádrži. Jsou-li mikropolutanty lipofilní, může docházet k jejich významnější sorpci či navázání na tuk přítomný v odpadní vodě, se kterým jsou odstraněny odlučovači tuku (Carballa et al. 2005) (Stasinakis et al. 2013). Některé látky mohou vykazovat zápornou efektivitu odstranění v mechanické fázi, tedy jejich koncentrace se po přečištění zvýší. Taková situace může nastat důsledkem uvolňování látky z pevného materiálu, například lidské stolice (Choi et al. 2022). Studií zaměřujících se na drogy v primární fázi čištění, nebo alespoň zahrnující látky ze skupiny drog je méně a bylo by třeba se více věnovat chování těchto látek a jejich měření.

THC je lipofilní povahy a dochází proto k jeho významné sorpci na pevné částice v odpadní vodě a na tukovou fázi. Studie z roku 2022 analyzovala kapalnou a pevnou fázi surové odpadní vody. Výsledky ukázaly, že 90 % THC ve vzorku se nacházelo v pevné fázi, pro THC-COOH bylo naměřeno 42 % v pevné fázi a pro THC-OH 69 % (Campos-Mañas et al. 2022).

Významná část konopných látek je tak z odpadní vody eliminována již v mechanickém stupni čištění a je vázána do primárního čistírenského kalu. V rámci studie z roku 2021, prováděné v australské městské čistírně, bylo analyzováno pět vzorků čistírenského kalu. Prvním vzorkem byl

primární kal odebraný po sedimentaci v usazovací nádrži, druhým byl vyhnílý kal, odebraný po procesu anaerobní stabilizace, a tedy již smíchaný primární kal se sekundárním přebytečným kalem. Studovaná čistírna využívala pro část kalu mechanické odvodnění, pro druhou část pomalejší odvodňování na kalových polích. Třetím vzorkem byl tedy mechanicky odvodněný vyhnílý kal, čtvrtým vyhnílý kal odvodněný metodou kalového pole. Pátým vzorkem byl biologický zbytek, tedy finálně zpracovaný kal připravený k využití například jako hnojivo. Všechny vzorky byly vysušeny a bylo v nich stanoveno 50 druhů kanabinoidů, včetně THC a jeho metabolitů. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku č. 9, kde jsou vyjádřeny jako mikrogramy analytu připadající na kilogram vysušeného vzorku kalu. Hmotnostní podíl THC ve vyhnílém kalu stoupl, což může být způsobeno zpětným rozpadem či transformací metabolitů na mateřskou sloučeninu. Důvodem nárůstu může být také to, že během vyhnívání kalu dochází k rozkladu i jiných organických látek, v něm přítomných, a tedy poměr THC vůči ostatním látkám v kalu stoupá. Viditelný pokles hmotnostního obsahu THC a THC-COOH lze pozorovat mezi druhým vzorkem a třetím a čtvrtým vzorkem. To naznačuje, že odvodnění kalu by mohlo mít na degradaci těchto látek pozitivní vliv. Pokles byl výraznější při odvodnění v kalovém poli, což je proces trvající delší dobu než mechanické odvodnění, kde byl pozorován nižší pokles. Tato skutečnost by mohla znamenat, že významným faktorem je doba zadržení a tyto látky se rozkládají kontinuálně samovolně. Nejvýznamnější pokles je pozorován mezi třetím a čtvrtým vzorkem v porovnání s pátým vzorkem. Tento pokles naznačuje, že nejvyšší degradaci způsobuje finální úprava kalu na biologický agregát, která zahrnuje skladování po dobu až tří let ve speciálních skladech a vystavení přirozenému UV záření (Pandopulos et al. 2021).



Obrázek č. 9 Obsah THC a THC-COOH v mikrogramech připadajících na kilogram vysušeného vzorku kalu, upraveno, zdroj: (Pandopulos et al. 2021)

* zobrazeny výsledky pro tři vzorky z pěti fází zpracování kalu

Studie z roku 2015 zahrnovala měření koncentrací drog v odpadní vodě na nátoky a odtoky do mechanické fáze. Efektivita odstranění byla v této fázi pro THC-COOH 57 %, metamfetamin byl odstraněn ze 37 %, amfetamin ze 46 %, benzoylgonin z 8 %, kokain vykazoval zápornou hodnotu odstranění -5 %, MDMA až -16 %. Tato studie je jediná nalezená, která se soustředila jak

na THC-COOH, tak na ostatní vybrané drogy v primární fázi čištění. Byly měřeny i koncentrace v dalších fázích, které jsou uvedeny v dalších kapitolách této práce (Mackuľak et al. 2015). Ostatní drogy, na které se zaměřuje tato práce, jsou na rozdíl od konopných látek hydrofilní povahy a v mechanickém stupni jsou odstraňovány méně. Odborná studie stanovující efektivitu odstraňování stimulačních drog v ČOV stanovila účinnost primární fáze čištění na 0 % pro kokain, 6 % pro BE, 10 % pro metamfetamin, 2 % pro amfetamin, 2 % pro MDMA a 2 % pro efedrin. Uvedená efektivita byla vypočítána z průměrných koncentrací vzorků sebraných metodou pasivních vzorkovačů POCIS (Rodayan et al. 2014). Nízkou efektivitu odstranění metamfetaminu v primární fázi potvrzuje i studie z roku 2022, v rámci které se jeho průměrná koncentrace před mechanickým čištěním se snížila z 31 ng.L⁻¹ na 27 ng.L⁻¹ po čištění (Wang et al. 2022). Některé studie vykazují vyšší hodnoty účinnosti. Například studie měřící koncentrace drog na nátoky a odtoky kanadské ČOV sestávají pouze z primárního stupně čištění. Průměrná efektivita odstranění během týdne byla stanovena na 18 % pro metamfetamin, 34 % pro MDMA, 21 % pro BE a 29 % pro kokain (Metcalf et al. 2010). V práci není uvedeno, o jakou čistírnu se jmenovitě jedná a nelze tak z jiných zdrojů ověřit, zda dochází pouze k čisté mechanické sedimentaci. Pravděpodobné vysvětlení vyšší efektivity by mohlo být takové, že je během mechanického čištění využíváno navíc čištění chemické, a to přidavkem flokulantu či koagulantu do usazovací nádrže, zvláště když daná čistírna žádný další stupeň čištění nemá. Jiná studie z roku 2014 udává přibližnou efektivitu primární fáze dokonce 70 % pro kokain a 50 % pro BE. Pro metamfetamin byla stanovena záporná hodnota -120 % a pro MDMA -40 %. Záporné hodnoty jsou autory vysvětleny údajným rozpadem jiných metabolitů na tyto látky, například glukuronidových konjugátů (Subedi a Kannan 2014).

Z mého pohledu může být rozdílná výsledná efektivita odstranění drog v rámci výše zmíněných studií ovlivněna metodou odebrání vzorku. Například výše zmíněná studie z roku 2014 odebírala vzorky ze stejné ČOV více způsoby a porovnávala, zda se výsledky liší. Výsledky vzorkovačů POCIS a kompozitních vzorků byly srovnatelné, výsledky z jednorázově odebraných vzorků vykazovaly o jednotky nižší hodnoty efektivity, které častěji šli až do záporných hodnot (Rodayan et al. 2014). Nejvíce studií využívá metodu kompozitních vzorků (Metcalf et al. 2010) (Subedi a Kannan 2014). Jednorázově odebrané vzorky také nesou riziko, že se během momentu odebrání vyskytne nestandardně vysoká koncentrace analytu, nebo naopak nestandardně nízká, a dojde tak ke zkreslení výsledné efektivity odstranění. Naopak kompozitní vzorky tento problém eliminují. Jejich nevýhodou může být delší čas mezi odběrem a analýzou, kdy může docházet k samovolné degradaci látek v odebraném vzorku a zkreslení výsledků analýzy (McCall et al. 2016). Také záleží, kolik vzorků bylo odebráno a kolik z nich bylo možné kvantifikovat a využít k výpočtu efektivity. Některé studie berou v potaz dobu zadržení odpadní vody v čistírně, která může výsledný výpočet zpřesnit (Rodayan et al. 2014). Velký vliv pak může mít samotná technologie primárního čištění, kdy různé varianty jednotlivých zařízení mohou vykazovat obecně různou efektivitu mechanického

čištění, a tedy i různou efektivitu odstranění drog a jiných mikropolutantů. Příkladem lze uvést odstraňování tuků pomocí flotace, kdy je proces účinnější, čím menší bubliny vzduchu o větším množství je dané zařízení schopno tvořit (Nikfar et al. 2023). Může tak dojít k dokonalejší eliminaci tuků a tím i polutantů na ně sorbovaných, jako je THC. Záleží také na aktuálních podmínkách, ve kterých se čistírna nachází. Pokud se například vlivem dešťů zvýší průtok odpadní vody tak, že sedimentace v primární fázi není dostatečně efektivní, je možné přidat do nádrže koagulační a flokulační činidlo a tím dosáhnout vyšší efektivity. Dojde tak k zachytávání či sorpci psychoaktivních látek v agregátech vzniklých koagulací a flokulací a ke zvýšení efektivity jejich odstranění (López-Vinent et al. 2021).

Primární fáze čištění je pro odstranění metamfetaminu, MDMA a kokainu méně významná, větší význam je pozorován pro odstranění konopných látek. Hlavním důvodem se jeví hydrofilní povaha molekul stimulačních drog, která způsobuje jejich vyšší neochotu sorbovat se na pevné částice, se kterými by mohly sedimentovat v primární fázi čištění. Stimulační drogy tak zůstávají rozpuštěné v odpadní vodě a podléhají vyšší degradaci až v dalších fázích čištění. Spojením chemického a mechanického čištění v primární fázi přidáním flokulačního a koagulačního činidla se může jejich eliminace zefektivnit. Naopak hydrofobní lipofilní povaha THC je příčinou jeho ochoty sorbovat se a sedimentovat a také se zachytávat v odstraňovaných v tucích a olejích. Výsledky výše zmíněných studií naznačují, že odstranění THC a jeho metabolitů by mohlo být do určité míry závislé na efektivitě odstraňování tuků a olejů z odpadní vody. Důsledkem zmíněných chemických vlastností THC a jeho metabolitů pak jsou vysoké koncentrace kanabinoidů v čistírenském kalu. Výše zmíněná studie ukázala, že při dalším zpracování kalu obsahujícího koncentrace kanabinoidů dochází ke snižování jejich koncentrací. K nejvýznamnějšímu snížení dochází při delším skladování odvodněného vyhnílého kalu, ale ani poté nejsou dle studie koncentrace nulové. Tyto výsledky naznačují, že v případě THC proto může být větším zdrojem znečištění životního prostředí čistírenský kal než přečištěná odpadní voda. Může tak docházet k ohrožení půdní složky prostředí. Bylo by třeba uskutečnit více studií analyzujících půdu, která přišla do styku s kaly a pozorovat, jaký vliv tato skutečnost má na kvalitu půdy a půdní faunu a flóru.

6.2 Biologická fáze čištění odpadní vody

Sekundární fáze čištění odpadních vod je založena na využití aktivovaného kalu, díky kterému dochází k biochemickým, oxidačně-redukčním procesům vedoucím k eliminaci nečistot z odpadní vody. Účinnost této fáze závisí na biologické rozložitelnosti znečišťujících organických látek. Biologické čištění je z hlediska technologie zpracování odpadních vod zásadní a je v současné době standardním krokem pro většinu čistíren. Aktivovaný kal je složen z mikroorganismů, s převahou bakterií. Vyskytují se v něm v menším množství také houby, plísně, kvasinky, prvoci a vláknité mikroorganismy. Nerozpuštěné znečišťující látky se na organismy sorbují za vzniku vloček a jsou dále štěpeny. Rozpuštěné látky mohou být organismy přímo vstřebány, či štěpeny a poté vstřebány.

Biologické čištění může probíhat aerobně nebo anaerobně a je uskutečňováno za využití různých technologií. Aerobní systémy jsou charakteristické provzdušňováním směsi v aktivační nádrži, kdy se stává finálním akceptorem elektronů z biochemických reakcí kyslík. Lze je rozdělit na ty, které využívají mikrobiální kulturu způsobem vsazování a na ty, které pracují s mikrobiálním biofilmem. Anaerobní systémy fungují bez přístupu vzduchu a akceptorem elektronů jsou samotné organické látky. Vedlejším produktem je v rámci anaerobních systémů bioplyn, který je využíván jako palivo (Dohányos 2007) (Chudoba et al. 1991) (Cheremisinoff 2002).

Běžně využívaným aerobním systémem je konvenční proces aktivovaného kalu (CAS) (Jones et al. 2001). Obdobnou variantou jsou membránové bioreaktory (MBR), které obsahují navíc instalované membrány pro mikro až ultra filtraci (Restrepo-Vieira et al. 2024). Jednoduchým technologickým řešením jsou oxidační příkopy (OD), tato varianta je vhodná pro malé komunální ČOV (Ambrožová 2007). Odlišným technologickým řešením je systém biofilmového reaktoru s pohyblivým lůžkem (MBBR), biofilm může obsahovat vnější aerobní vrstvu a vnitřní anaerobní vrstvu a je tak možné efektivně odstraňovat i dusíkaté látky (Safwat 2018). Další možností je systém skrápěných filtrů (TF), kdy je odpadní voda rozstříkována na filtr obsahující mikrobiální nárost (Cheremisinoff 2002). Mezi nejčastější anaerobní systémy se řadí anaerobní rotační diskový reaktor (ARBC), který je specifický pohyblivostí náplně. Odlišný je anaerobní reaktor s granulovanou biomasou se vzestupným průtokem vody (UASB), kde se mikrobiální organismy spojují v útvarech, granulích (Dohányos 2007). Technologií je více a mohou být i navzájem kombinovány.

Účinnost odstranění látek sledovaných v této práci v biologické fázi čištění odpadních vod zkoumalo několik studií, například (Nefau et al. 2013) (Repice et al. 2013) (Baker a et al. 2013) (Rodayan et al. 2014) (Verovšek et al. 2023) (Di Marcantonio et al. 2023) (Restrepo-Vieira et al. 2024). Jejich výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 5. Studie z roku 2024 srovnávala efektivitu odstraňování vybraných psychoaktivních látek ze tří čistíren s různou biologickou technologií čištění. Efektivita byla stanovena z průměrných koncentrací látek naměřených na nátoku do ČOV a odtoku ze sekundární fáze čištění, tedy se zahrnutím primární fáze. Nejvyšší efektivita byla pozorována pro MBR systém. Amfetamin byl ve všech třech ČOV odstraněn ze 100 %, tedy naměřené hodnoty na odtoku byly pod limitem detekce (Restrepo-Vieira et al. 2024). Studie z roku 2013 analyzovala koncentrace drog ve dvaceti pěti různých francouzských čistírnách na nátoku a odtoku. Do tabulky byly vybrány výsledky pro tři čistírny sestávající z primárního a různého sekundárního stupně, efektivita byla spočtena z průměrných koncentrací naměřených ve všedních dnech (Nefau et al. 2013). Jiná studie ze stejného roku prováděla analýzu na třech ČOV se systémem CAS a třech ČOV se systémem TF v Anglii. V rámci studie byly jednoznačně efektivnější CAS technologie. Kromě látek uvedených v tabulce studie zahrnula i další metabolity MDMA, kterými byly MDA, MDEA, dále metabolity kokainu COE a NOR a prekurzor metamfetaminu NEPH. MDEA byla vždy pod limitem detekce, pro MDA efektivita nebyla počítána, protože frekvence detekce

ve vzorcích byla pouze 5 %. Efektivita odstranění metabolitů kokainu byla pro COE a NOR 25 % a 21 % TF systémem a 68 % a 42 % CAS systémem. Pro prekurzor metamfetaminu NEPH byla stanovena efektivita vyšší než 86 % pro oba systémy (Baker et al. 2013). Novější studie z roku 2023 vykazovala podobné výsledky pro jednotlivé technologie, kdy se jako nejefektivnější jevil systém MBR, poté CAS a na třetím místě MBBR. Průměrná hodnota efektivit ze tří systémů je uvedena v tabulce (Verovšek et al. 2023). Studie, zabývající se drogami a léčivými v ČOV v italské Veroně využívající CAS systém, stanovila vysokou průměrnou účinnost odstranění BE, přes 90 %, vysoká byla i účinnost pro odstranění ostatních látek v rámci studie. Účinnost byla spočtena z průměrných koncentrací nátoky a odtoku z čistírny za patnáct dní měření. Jako důvod vysoké efektivitě systému autoři uvedli velmi dobrou kvalitu kalu s dostatečně rozvinutou metabolicky aktivní mikrobiální biomasou (Repice et al. 2013).

Tabulka č. 5 – Efektivita odstranění vybraných drog a jejich metabolitů v ČOV s různou sekundární fází čištění

sekundární fáze	THC-COOH	MA	AMP	MDMA	COC	BE	zdroj
CAS	86 %	ND	ND	ND	66 %	47 %	(Nefau et al. 2013)
	–	88 %	100 %	–	77 %	–	(Restrepo-Vieira et al. 2024)
	–	100 %	99 %	19 %	91 %	81 %	(Baker et al. 2013)
	–	82 %	90 %	54 %	90 %	85 %	(Rodayan et al. 2014)
	–	NK	NK	–	–	91 %	(Repice et al. 2013)
	56 %	96 %	97 %	42 %	82 %	72 %	(Mackulak et al. 2015)
MBR	–	94 %	100 %	–	ND	–	(Restrepo-Vieira et al. 2024)
	92 %	ND	ND	ND	100 %	62 %	(Nefau et al. 2013)
	52 %	71 %	ND	–	98 %	98 %	(Di Marcantonio et al. 2023)
OD	–	84 %	100 %	–	ND	–	(Restrepo-Vieira et al. 2024)
TF	–	60 %	89 %	13 %	37 %	27 %	(Baker et al. 2013)
	78 %	ND	ND	ND	20 %	26 %	(Nefau et al. 2013)
CAS/MBR/MBBR	98 %	51 %	97 %	47 %	97 %	94 %	(Verovšek et al. 2023)

*efektivita je spočítána z hodnot na nátoku do ČOV a odtoku ze sekundární fáze čištění, tedy se zahrnutím primární fáze

** (CAS) = konvenční proces aktivovaného kalu, (MBR) = membránový bioreaktor, (TF) = systém skrápěných filtrů, (OD) = oxidační příkopy, (MBBR) = biofilmový reaktor s pohyblivým lůžkem

*** (ND) = nebylo detekováno, (NK) = nebylo kvantifikováno, (–) = nebylo měřeno

**** THC-COOH, MA (metamfetamin), AMP (amfetamin), MDMA (extáze), COC (kokain), BE (benzoylekgonin)

Podobně jako v kapitole o mechanické fázi, i zde se v rámci studií lišila metoda odběru vzorků, která může mít vliv na výslednou hodnotu efektivity. Například studie z Anglie zvolila postup jednorázového odebrání vzorku nátoka a odtoku každý měsíc v roce (Baker et al. 2013). Další studie volily nejčastěji odebrání směsného vzorku pravidelných intervalech během dvaceti čtyř hodin. Z takového vzorku lze stanovit průměrnou koncentraci vypovídající o celém dni, během kterého měření probíhalo (Nefau et al. 2013) (Repice et al. 2013) (Verovšek et al. 2023).

Efektivitu odstranění může ovlivňovat i doba zdržení kalu v rámci daného systému čištění. Pokud je tato doba příliš krátká, nedojde k dostatečnému vývoji a namnožení mikroorganismů odpovědných za biodegradaci drog. Souvislost mezi stářím kalu a efektivitou odstranění velmi zdůrazňuje již zmiňovaná studie z roku 2024. Zde byla nejefektivnější technologie MBR, jejíž doba zdržení kalu byla okolo třiceti dní, v CAS okolo osmi dní a v OD asi dvacet dní (Restrepo-Vieira et al. 2024). Vliv může mít i doba zdržení odpadní vody v sekundárním stupni čištění. Pokud je tato doba příliš krátká, není dostatek času k biodegradaci všech znečišťujících látek, protože odpadní voda reaktor opustí příliš brzy (Ladu a Xiwu 2014). Rozdílné hodnoty účinnosti v rámci jedné čistírny mohou být způsobeny kondicí kalu, který vždy nemá ideální parametry.

Komplikace jako neflokulující či zbytnělý aktivovaný kal způsobují obecně nižší efektivitu čištění odpadní vody (Cheremisinoff 2002). Lze předpokládat, že se tak sníží i efektivita pro odstranění drog a ostatních mikropolutantů.

Efektivita odstranění jednotlivých látek se napříč studii mění. Nejčastěji používané aktivační systémy (CAS) mají u většiny látek poměrně vysoké účinnosti odstranění. S výjimkou MDMA a metabolitu kokainu BE průměrné efektivita odstranění pro všechny látky tímto systémem přesahovaly 77 %. Dobré výsledky byly pozorovány také pro systém membránových bioreaktorů (MBR), v rámci kterého je vysoké účinnosti dosaženo spojením aktivace a mechanické filtrace. Nejnižší účinnost na základě výše uvedených studií mají systémy skrápěných filtrů (TF), jejichž využitím se špatně odstraňoval kromě MDMA i kokain a benzoylekgonin, průměrná hodnota jejich odstranění nepřesáhla 37 %. Samotný proces mikrobiálního rozkladu psychoaktivních látek není dobře popsán. Studie měří koncentrace na nátoky a odtoky ČOV pouze u několika základních látek a jejich metabolitů, nikoliv však látky v různých fázích jejich mikrobiálního rozkladu. Studie se také věnují pouze malému výběru užívaných drog a často se stanovují současně s léčivými, na které se směřuje větší pozornost. Nejčastěji sledované látky ze skupiny drog v dostupných studiích byly amfetamin a metamfetamin. Obě látky byly z odpadní vody eliminovány s vysokou účinností. Více než polovina uvedených hodnot účinnosti odstranění metamfetaminu přesahovala 80 %. V případě amfetaminu bylo vždy dosaženo vyšší hodnoty účinnosti než 89 %. Často byla sledována také koncentrace kokainu a jeho metabolitu BE, kdy téměř vždy bylo efektivnější odstranění kokainu než jeho metabolitu, který se tak jeví stabilnější. Z psychoaktivních látek, na které se soustředí tato práce, se jeví jako nejproblémovější k odstranění MDMA, které bylo ve všech systémech odstraňováno s nejnižší efektivitou v porovnání s ostatními látkami, účinnost nepřesáhla 54 %. Koncentrace THC-COOH a MDMA, což jsou látky, jejichž chování se v ČOV napříč studii mění nejvýznamněji, byly sledovány nejméně často. Měla by jim být věnována větší pozornost.

Biologický stupeň je velmi zásadní a ve většině případů efektivita dosahuje více než 70 %, což je velký rozdíl oproti mechanickému stupni čištění, kde většina hodnot nepřesáhla 35 % a docházelo ve výsledku i k záporným hodnotám efektivity. Z hlediska technologie se nejčastěji využívaný systém CAS potvrzuje jako dostatečně efektivní, dobré výsledky poskytují také modernější MBR systémy, zatímco horší efektivitu vykazují TF systémy. S nejvyšší účinností byl odstraňován amfetamin a s nejnižší MDMA. Mohla by zde hrát roli biologická rozložitelnost jednotlivých drog, která je různá pravděpodobně v závislosti na jejich chemické struktuře. Je možné, že chemická struktura MDMA je stabilnější než u ostatních zkoumaných látek a je tak odolnější k mikrobiálnímu rozkladu v prostředí odpadní vody.

6.3 Terciární fáze čištění odpadní vody

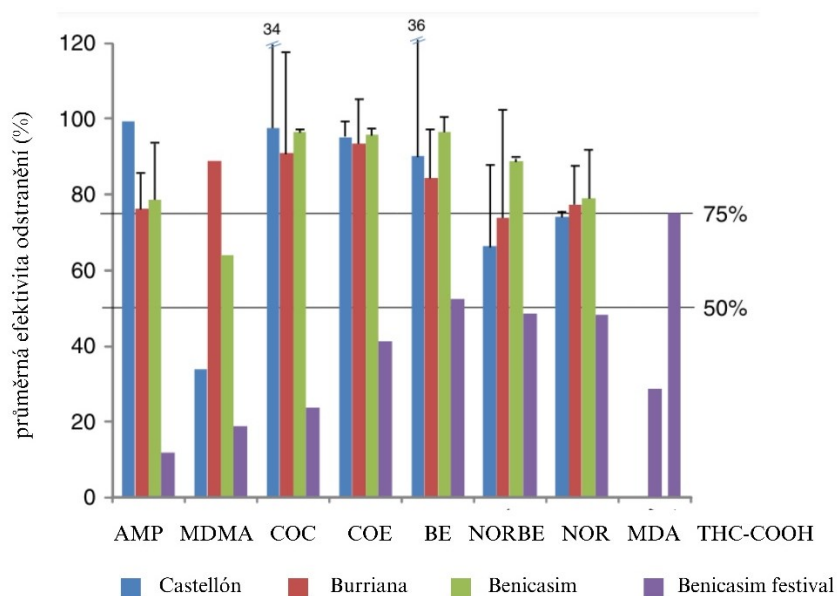
Terciární fáze zahrnuje veškeré další úpravy nad rámec mechanické a biologické fáze. Bývá zařazena za účelem dodatečného odstranění dusíku či fosforu, se záměrem dezinfekce, zvýšení efektivity odstranění mikropolutantů nebo separace suspendovaných částic. Pro odstranění fosforu se využívá chemické čištění přidávkem koagulačního a flokulačního činidla. Tento proces je možné zajistit i během sekundární fáze, záleží na konkrétní čistírně (López-Vinent et al. 2021) (Cheremisinoff 2002). Dezinfekce může být uskutečněna využitím chlóru, UV záření či ozonizace. K separaci částic může být využita písková filtrace, membránová filtrace nebo speciální mikrofiltrace a ultrafiltrace. Dalšími technologiemi je například sorpce na aktivní uhlí, filtrace využitím rostlin a další metody (Gómez et al. 2007) (Benáková et al. 2021) (Yang et al. 2021).

Většina studií zabývajících se odstraňováním drog a jejich metabolitů z odpadní vody se zabývá jejich odstraněním v rámci celé čistírny odpadních vod. Nelze u nich tedy odlišit, k jaké úrovni odstranění došlo v jednotlivých fázích čištění, a tedy i v terciárním stupni. Menší počet studií sleduje účinnost odstranění drog a jejich metabolitů pouze v rámci terciární fáze nebo v rámci jednotlivých fází čištění (Mackuľak et al. 2015) (Yadav et al. 2019) (Di Marcantonio et al. 2021).

Studie z roku 2015 se zabývala možností využití alternativního terciárního čištění vodními rostlinami procesem rhizofiltrace. Tato studie je jedna z mála studií, které sledují odstraňování drog v rámci každého stupně zvlášť, tedy i efektivitu samotného terciárního stupně. Ostatní studie spíše sledují odstraňování v rámci celé čistírny, tedy včetně terciárního stupně. Výzkum byl prováděn v městské ČOV v Bratislavě. Bylo testováno více druhů rostlin, jako nejučinnější se jevila rostlina *Iris pseudacorus*, tedy kosatec žlutý. Čistírna využívala systém CAS. Byly srovnány koncentrace drog na odtoku z čistírny bez využití rhizofiltrace s koncentrací po jejím zařazení. Pro MA hodnota klesla z 30 na 4,4 ng.L⁻¹ po rhizofiltraci. Jeho původní koncentrace na nátok do čistírny byla 763 ng.L⁻¹. Koncentrace BE na nátok byla 65 ng.L⁻¹, na odtoku 18 ng.L⁻¹ a po rhizofiltraci se snížila na 3,3 ng.L⁻¹. Ostatní drogy byly v rámci této studie na odtoku pod limitem kvantifikace (Mackuľak et al. 2015). Kořenové čištění se ukázalo pro dočištění MA a BE jako efektivní a jedná se tak o zajímavý alternativní přístup k terciární fázi čištění, vedle chemických a fyzikálních metod.

Studie z roku 2014, prováděná ve Španělsku, porovnávala městské čistírny s biologickým stupněm CAS a různou technologií terciárního čištění z hlediska odstraňování amfetaminu, MDMA, kokainu, benzoyllegoninu, norbenzoyllegoninu, MDA a THC-COOH. První ČOV, nacházející se ve městě Benicasim, aplikovala dodatečné srážení fosforu a odstranění dusíku. Druhá ČOV, nacházející se ve městě Burriana, prováděla dezinfekci chlorem a třetí ČOV, obsluhující město Castellón, aplikovala dodatečnou fyzikální úpravu, která nebyla blíže specifikována. Jak ukazuje obrázek č. 10, efektivity odstranění psychoaktivních látek byly srovnatelné, největší rozdíl mezi zkoumanými čistírnami byl pozorován v případě odstraňování MDMA. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo v ČOV

Burriana, která aplikovala dezinfekci chlórem, kde byla MDMA eliminována z 90 %. Zajímavým poznatkem této studie je porovnání efektivity první čistírny v období hudebního festivalu a mimo festival, který probíhal v období měření. Celková účinnost čištění se během festivalu snížila, a to pro všechny látky. Autoři uvádí, že celkové snížení bylo pravděpodobně důsledkem velkého nárůstu počtu osob v menším městě Benicasim, v době festivalu. Došlo tak pravděpodobně k přetížení čistírny, a systém již nebyl tak efektivní, jako za normálního stavu. Zároveň návštěvníci akce konzumovali více drog, než konzumuje běžná populace, a to v krátkém časovém intervalu. Do prostředí se tak dostalo mnohem více reziduí psychoaktivních látek než obvykle. V případě MDMA bylo během běžného týdne na odtoku z ČOV naměřeno 0,6 g.týden⁻¹ a během festivalu až 406 g.týden⁻¹ (Bijlsma et al. 2014). Myslím si, že tento pozorovaný jev je alarmující a bylo by vhodné ověřit, zda k takovému snížení efektivity čištění menších ČOV při nadměrném zatížení vlivem obdobných společenských akcí dochází pravidelně.



Obrázek č. 10 Průměrné efektivity odstranění drog v různých ČOV s třemi stupni čištění, převzato, upraveno, zdroj: (Bijlsma et al. 2014)

* AMP (amfetamin), MDMA (extáze), COC (kokain), BE (benzoylekgonin), NORBE (norbenzoylekgonin), MDA, THC-COOH

V tabulce č. 6 jsou uvedeny výsledky dalších studií, které se zabývaly stanovením drog na nátok a odtoku čistíren se třemi stupni čištění. Tabulka obsahuje jak studie, které měřily koncentrace na nátok a odtoku do ČOV o třech stupních, tak studie, které měřily v průběhu mezi jednotlivými fázemi. Pokud probíhalo i průběžné měření, výsledky jsou okomentovány v následujícím odstavci. Některé práce uvádí koncentrace drog na nátok a odtoku ČOV v jednotkách miligramů na litr, jiné prezentují výsledky jako hmotnostní zatížení na nátok a odtoku ČOV za jeden den. Tedy počítají koncentraci násobenou průtokem v době odebrání vzorku. V tabulce jsou uvedeny také hodnoty efektivity, s jakou byly dané čistírny jednotlivé látky schopny eliminovat. Je třeba zmínit, že veškeré hodnoty diskutované v této kapitole jsou porovnatelné pouze do určité míry. Výsledky jsou

zatížené různým přístupem autorů k odběru vzorků, nakládáním se vzorky a limitem detekce využívaných metod stanovení, jak již bylo diskutováno v předchozích kapitolách. Někteří autoři efektivitu počítají z hodnot hmotnostního zatížení drogami na nátok a odtok (Yadav et al. 2019). V jiných případech bývá stanovena z průměrné koncentrace na nátok a odtok, což může výsledky zkreslit, zejména pokud je rozptýl naměřených hodnot koncentrací, ze kterých byl průměr stanoven, velmi široký. Často se stává, že jsou hodnoty na odtoku pod limitem detekce či kvantifikace a efektivita tak bývá stanovena na 100 %, přestože tomu tak reálně být nemusí (Andrés-Costa et al. 2014) (Baalbaki et al. 2016). Pro představu odstranitelnosti jsou však tyto informace dostačující.

Studie z roku 2011 prováděla měření drog na nátok a odtok čistírny ve městě Tampa. Odběry byly prováděny v průběhu konání velké sportovní akce, kdy byla očekávána vyšší konzumace drog. Byly odebrány 24hodinové slévané vzorky s intervalem 30 minut. Výsledky v tabulce jsou uvedeny v gramech analytu na den měření. Téměř všechny látky byly po vyčištění pod limitem detekce, s výjimkou MDMA, které bylo odstraněno s účinností 72 %. Autoři vyšší resistenci MDMA přisuzují jeho složitější chemické struktuře (Gerrity et al. 2011). Studie z roku 2019, prováděná v několika australských čistírnách, porovnávala účinnost různých kombinací sekundární a terciární fáze. Průměrná efektivita byla stanovena z hmotnostních zatížení látkami na nátok a odtok za jeden den měření. Studie porovnávala také účinnost čistírny s CAS systémem bez chlorace a čistírny s CAS systémem s chlorací. Bylo pozorováno, že účinnost pro MA zůstala u obou systémů stejná, 89 %. Pro BE se snížila z 95 % na 82 % po chloraci, což je možné vysvětlit transformací kokainu na jeho metabolity během čištění, avšak autoři tento pokles nijak nekomentují. Rozdíl byl pozorován i v případě MDMA, kde účinnost systému bez chlorace byla 54 % a s chlorací 68 %. Výsledky ČOV s chlorací jsou uvedeny také v tabulce č. 6. Jako nejméně účinný se v rámci studie projevil systém SBR s UV dezinfekcí. Hodnoty efektivit byly neobvykle nízké, autoři uvádí, že hlavním problémem této čistírny byla absence primární sedimentace, malý objem mikrobiální biomasy v reaktoru a výrazný zákal vody na odtoku. Právě přítomnost zákalu pravděpodobně snížila účinnost UV dezinfekce. Nejvyšší účinnost byla pozorována při využití systému IFAS a následné chlorace (Yadav et al. 2019). Studie z roku 2014 sledovala odstranění širší škály látek ve španělských čistírnách s navzájem si podobným technologickým uspořádáním. Účinnost odstranění se mezi dvěma pozorovanými čistírnami více lišila pouze u MDMA, které vykazovalo odstranění 32 % v první čistírně a 51 % ve druhé čistírně. Tento rozdíl nebyl autory nijak vysvětlen, bylo pouze konstatováno, že MDMA se obecně odstraňovalo s nižší efektivitou než ostatní drogy (Andrés-Costa et al. 2014). Studie z roku 2021 sledovala efektivitu odstranění látek v italské ČOV s několika technologickými procesy probíhajícími v rámci terciární fáze. Významných koncentrací na nátok do této čistírny dosahoval kokain a BE a průměrná efektivita odstranění v čistírně přesahovala 98 %. THC-COOH a MA na nátok nepřesáhly limit detekce. V rámci studie byly odebrány vzorky i v průběhu čištění.

Efektivita odstranění kokainu a BE po biologické fázi čištění dosahovala pro obě látky více než 97 %, tedy terciární čištění zde nebylo zásadní (Di Marcantonio et al. 2021). V rámci studie z roku 2016 byla pozorována efektivita pískového filtru pro odstranění MA a BE. Průměrná koncentrace MA byla na nátok do filtru 23 ng.L^{-1} , na odtoku se koncentrace snížila pod limit detekce, který byl pro tuto látku $1,4 \text{ ng.L}^{-1}$. Průměrná koncentrace BE po přečištění pískovým filtrem klesla z 50 na 47 ng.L^{-1} . AMP byl již před pískovou filtrací pod limitem detekce, COC též. Zásadní byla degradace v biologickém stupni, kdy většina sledovaných látek byla odstraněna z více než 80 % (Baalbaki et al. 2016).

Tabulka č. 6 Efektivita odstranění drog v terciární fázi čištění a jejich koncentrace na nátoky a odtoky ČOV

lokace ČOV	systém sekundární fáze	systém terciární fáze	látka	průměrná koncentrace na nátoky [ng.L ⁻¹]	průměrná koncentrace na odtoku [ng.L ⁻¹]	efektivita odstranění látky	zdroj
* USA, Tampa	CAS + srážení fosforu	filtrace, UV	MA	806	<LD	100 %	(Gerrity et al. 2011)
			AMP	114	<LD	100 %	
			COC	294	<LD	100 %	
			BE	718	<LD	100 %	
			MDMA	106	30	72 %	
Austrálie ČOV1	CAS	chlorace	MA	3638	675	89 %	
			MDMA	62	35	68 %	
			BE	124	34	82 %	
Austrálie ČOV2	SBR	UV	MA	2448	622	76 %	(Yadav et al. 2019)
			MDMA	43	28	42 %	
			BE	154	117	42 %	
Austrálie ČOV3	IFAS	chlorace	MA	2399	387	96 %	
			MDMA	74	24	89 %	
			BE	210	82	87 %	
Španělsko, Valencie Pinedo I.	CAS	koagulace flokulace filtrace	THC-COOH	222	<LD	100 %	(Andrés-Costa et al. 2014)
			MA	4,7	<LD	100 %	
			AMP	39,8	<LD	100 %	
			COC	748,5	<LD	100 %	
			BE	1356	58,3	96 %	
Španělsko, Valencie Quart-Benager	CAS + srážení fosforu	koagulace flokulace	THC-COOH	484,9	<LD	100 %	
			MA	4,3	<LD	100 %	
			AMP	59,7	<LD	100 %	
			COC	1696	<LD	100 %	
			BE	3050	158	95 %	
** Itálie, Lazio	CAS	pískový filtr	COC	260	<10	98 %	(Di Marcantonio et al. 2021)
		UV, chlorace	BE	2470	20	99 %	
Canada, Guelph	CAS + RBC	chlorace	MA	300	<LD	100 %	(Baalbaki et al. 2016)
		pískový filtr	AMP	101	<LD	100 %	
			COC	361	<LD	100 %	
			BE	524	47	91 %	

* průměrné koncentrace studie jsou uvedeny v jednotkách g.den⁻¹

** uvedeny jsou mediány koncentrace

*** (CAS) systém aktivovaného kalu, (SBR) reaktor pro sekvenční zpracování dávek, (RBC) rotační biologický reaktor, (IFAS) systém aktivovaného kalu s pevným ložem

**** THC-COOH, MA (metamfetamin), AMP (amfetamin), MDMA (extáze), COC (kokain), BE (benzoylgonin)

Ze studií uvedených v tabulce lze pozorovat vysokou účinnost při odstraňování amfetaminu a kokainu, kdy ve většině případů byla jejich koncentrace na odtoku pod limitem detekce a účinnost

tak byla stanovena na 100 %. O něco nižší účinnosti jsou pozorovány v případě metamfetaminu a benzoylekgoninu, kdy se hodnoty pohybovaly kolem 90 %. Jak ukazují poznatky uvedené v předchozích kapitolách, většina THC a část jeho metabolitů se odstraňuje už v mechanickém čištění, další část v biologickém a po čištění v terciární fázi již hodnoty účinnosti dosahovaly 100 %. Nejnížší hodnoty jsou pozorovány v případě MDMA, kde se účinnosti velmi lišily a nebylo dosaženo vyšší hodnoty než 89 %. Dezinfekce chlórem se jeví účinnější pro odstranění MDMA v porovnání s ostatními sledovanými látkami. Nevýhodou této metody může být vznik tzv. vedlejších produktů dezinfekce vznikajících reakcí organických látek s chlórem (Yadav et al. 2019). Některé z těchto sloučenin jsou toxické anebo karcinogenní a mohou pak představovat větší riziko než původní látka. Reakce drog probíhající při dezinfekci chlórem však nejsou dostatečně popsány a bylo by třeba se této tematice věnovat. Dezinfekce UV zářením se jeví jako účinná metoda dočištění pro všechny pozorované látky. Nevýhodou může být, že při nedokonalém oddělení suspendovaných částic v předcházejících stupních čištění může dojít k přetrvávajícímu zákalu i v terciární fázi, který brání průchodu UV záření (Yadav et al. 2019). Dobré výsledky poskytovaly také systémy s chemickým čištěním a různými druhy filtrace.

Porovnání terciárních metod mezi sebou je složité, protože většina čistíren kombinuje více technologií zároveň. Některé studie nezkoumaly odstraňování drog a jejich metabolitů v rámci jednotlivých fází čištění. Hodnoty koncentrací psychoaktivních látek jsou často již před terciárním čištěním velmi nízké a snadno se po dočištění dostanou pod limit detekce, a tedy nelze dobře jednotlivé technologie porovnat. Záleží také kde se čistírna nachází a jaké látky jsou v dané zemi nejvíce konzumovány. Nejvíce konzumované látky pak bývají cílem pozorování odborných studií. Nejvíce dat je dostupných ohledně kokainu a benzoylekgoninu, kterým se věnují téměř všechny studie zahrnující drogy. Žádná z metod terciárního čištění se nejeví jako bezvýznamná, ale žádná také neposkytuje obecně výrazně lepší výsledky než ostatní metody. Nejlepším možným přístupem je dle mého názoru kombinace více technologií zároveň. Bylo by dobré vyvíjet snahu o individuální přístup k jednotlivým čistírnám a aplikovat technologická řešení v rámci jejich možností. K získání přehledu o situacích na jednotlivých čistírnách by bylo možné dosáhnout pravidelným monitoringem a sjednoceným přístupem při vyhodnocování naměřených hodnot. Dále by měla být věnována větší pozornost rizikovým událostem, jako jsou hudební festivaly, a v případě potřeby na očekávanou zvýšenou zátěž reagovat. Vhodnou reakcí by mohlo být zavedení dodatečného terciárního čištění, které by mohlo být spuštěno v případě potřeby.

6.4 Porovnání tří fází čištění v účinnosti odstraňování drog

V tabulce č. 7 je uvedena minimální, maximální a průměrná hodnota účinnosti jednotlivých fází pro vybrané drogy a jejich metabolity. Hodnoty byly určeny z výsledků studií uvedených a diskutovaných v předchozích kapitolách.

THC-COOH bylo měřeno na nátoku a odtoku z primární fáze pouze u jedné studie, samotné THC v žádné. Důvodem, proč THC nebývá v rámci studií sledujících koncentrace drog v odpadní vodě měřeno, je jeho vysoká míra přeměny na hlavní metabolit THC-COOH v lidském těle a jeho koncentrace v odpadní vodě bývají vyšší než koncentrace primární formy látky. Studie se shodují, že dochází k významné sorpci lipofilních molekul THC a jeho metabolitů na pevnou složku znečištění (Pandopulos et al. 2021) (Nefau et al. 2013). Lze proto předpokládat, že mechanické procesy, probíhající v primární fázi, vedou k odstranění významné části znečištění těmito látkami. Mikrobiální procesy, probíhající v sekundární fázi čištění, jsou schopny eliminovat zbylé THC-COOH velmi dobře a během terciární fáze čištění může být odstraněna tato látka úplně (Andrés-Costa et al. 2014) (Verovšek et al. 2023).

Metamfetamin je v primární fázi eliminován pouze s nízkou účinností, může docházet i ke zpětnému uvolňování či transformaci primární formy látky z jejích metabolitů a koncentrace se může zvyšovat. Tento proces je pravděpodobně příčinou záporné hodnoty efektivity jeho odstranění, která je uvedena jako minimální -120% (Subedi a Kannan 2014) (Restrepo-Vieira et al. 2024). Záporná hodnota nebyla brána v úvahu při určení průměrné efektivity, protože byla příliš odlehlá. Sekundární fáze je pro odstranění metamfetaminu účinnější, její hodnota závisí na typu biologického systému. Dobré výsledky poskytují MBR a CAS systémy. Terciární fáze může být velmi účinná, ale není tomu tak vždy, na rozdíl od kokainu, amfetaminu a THC-COOH, kdy efektivita terciárního čištění dosahovala pravidelně vysokých hodnot.

Amfetamin byl v primární fázi eliminován také s nízkou efektivitou, což odpovídá jeho hydrofilní povaze, a tedy neochotě k sorpci (Skees et al. 2018). Na rozdíl od metamfetaminu vykazoval v rámci všech studií dobré výsledky odstranění v sekundární a terciární fázi. Ve výsledku efektivita jeho odstranění dosahovala téměř vždy 100% . Je otázkou, zda došlo opravdu k jeho degradaci, nebo pouze k transformaci na jiné metabolity, které nebyly měřeny (Estévez-Danta et al. 2021).

Vysoké hodnoty efektivity odstranění byly stanoveny také pro kokain, a to i v primární fázi, oproti ostatním látkám. Důvodem dle mého názoru nebyla jeho sorpce a sedimentace, protože stejně jako ostatní látky, kromě kanabinoidů, se nachází spíše v kapalně fázi odpadní vody (Metcalf et al. 2010). Příčinou snižování jeho koncentrace byla pravděpodobně jeho nestabilita a rychlá degradace na příslušné metabolity (van Nuijs et al. 2012). Po přečištění v rámci sekundární a terciární fáze již bývá jeho koncentrace nízká a efektivita dosahuje maximálních hodnot.

Nižší hodnoty efektivity byly pozorovány v případě metabolitu kokainu benzoylekgoninu. Benzoylekgonin téměř vždy dosahuje vyšších koncentrací na nátok i odtoku ČOV než kokain (Di Marcantonio et al. 2021) (Andrés-Costa et al. 2014). V primární fázi bývá eliminován s vyšší účinností než metamfetamin a MDMA. Stejně jako u ostatních látek je pro jeho odstraňování zásadní

sekundární fáze čištění. V rámci terciární fáze bývá dosaženo ještě lepších výsledků. Benzoylekgonin je společně s MDMA látkou, která je nejčastěji na odtoku z čistírny nad limitem detekce.

Nejnižší efektivita ve všech stupních čištění byla stanovena pro MDMA. V rámci studií nebyl uveden žádný konkrétní důvod tohoto jevu. Nejčastěji bývá horší odstranění MDMA dáváno do souvislosti s jeho chemickou strukturou. Strukturně se podobá metamfetaminu, obsahuje navíc funkční skupinu R-O-CH₂-O-R', která by mohla být klíčová v pochopení chování této látky v čistírně. Je možné, že je v odpadní vodě stabilnější, než ostatní látky a tím pádem nepodléhá snadno degradaci. Stejně jako metamfetamin, amfetamin, kokain a benzoylekgonin je hydrofilní povahy a nachází se hlavně v kapalně fázi odpadní vody, a má nízkou tendenci k adsorpci na pevné částice (Bijlsma et al. 2014) (Gerrity et al. 2011). MDMA je také specifické zvýšením jeho konzumace o víkendových dnech a společenských akcích, a tedy i zvýšením jeho koncentrací v odpadní vodě (ter Laak et al. 2022). Bylo by třeba věnovat této látce větší pozornost a přesněji popsat důvody její odolnosti v rámci procesu čištění. Bylo by dobré sledovat, zda MDMA vykazuje odolnost i vůči degradaci v životním prostředí a zda by mohlo představovat větší riziko pro ekosystémy a člověka než ostatní zkoumané látky.

Tabulka č. 7 Minimální, maximální a průměrná hodnota účinnosti jednotlivých fází pro vybrané drogy a jejich metabolity

	THC-COOH	MA	AMP	MDMA	COC	BE
primární fáze	57 %, významná sorpce	-120-37 % (19 %)	2-48 % (24 %)	-40-34 % (18 %)	-5-70 % (33 %)	6-50 % (21 %)
sekundární fáze	52-98 % (77 %)	51-100 % (81 %)	89-100 % (97 %)	13-54 % (35 %)	20-100 % (76 %)	26-98 % (68 %)
terciární fáze	100 %	76-100 % (94 %)	100 %	32-89 % (59 %)	98-100 % (100 %)	42-100 % (87 %)

7 Závěr

Bakalářské práce byla zaměřena na přítomnost vybraných psychoaktivních látek v odpadních vodách a efektivitu jejich odstraňování v čistírnách odpadních vod. Vybranými látkami byl tetrahydrokanabinol (THC) a jeho hlavní metabolit THC-COOH, metamfetamin (MA) a jeho metabolit amfetamin (AMP), extáze (MDMA), kokain (COC) a jeho metabolit benzoylekgonin (BE).

Drogy a jejich rezidua je možné detekovat v povrchové i podzemní vodě, v půdě a v městském vzduchu. Hlavní zasaženou složkou životního prostředí je povrchová voda, kde hodnoty koncentrace drog dosahují jednotek, stovek a výjimečně tisíců nanogramů na litr.

Hlavním zdrojem znečištění psychoaktivními látkami jsou komunální odpadní vody, kam se drogy a jejich metabolity dostávají s močí a stolicí konzumentů, případně jako odpad z nelegálních laboratoří. Koncentrace na nátok do čistíren odpadních vod se pohybují v hodnotách desítek až stovek nanogramů na litr, při zvýšené konzumaci drog mohou hodnoty dosahovat několika tisíců nanogramů na litr. Koncentrace se zvyšují o víkendy, nebo v závislosti na konání festivalů a jiných rizikových akcí. Nejvíce dat je dostupných ohledně kokainu a jeho metabolitu benzoylekgoninu, kterým se věnují téměř všechny studie sledující drogy v odpadních vodách. Důvodem by mohla být jeho celoevropsky vysoká konzumace, vlivem které jsou jeho koncentrace v odpadní vodě málokdy pod limitem detekce.

Účinnost odstranění různých drog a jejich metabolitů z odpadní vody se liší. Z dostupných studií bylo zjištěno, že mechanická fáze čištění odpadních vod není zásadní pro hydrofilní látky, kterými jsou metamfetamin, MDMA, kokain a jejich metabolity. Důvodem může být jejich nízká sorpce na pevné částice v odpadní vodě, které jsou odstraňovány v primární fázi. MDMA a metamfetamin v některých případech vykazovaly záporné hodnoty účinnosti odstranění v primární fázi čištění. Tyto hodnoty byly vysvětleny jako důsledek rozpadu či transformace jejich metabolitů na primární formu látky. Nejvýznamnější se primární fáze jeví pro odstranění THC a jeho metabolitů. THC, THC-COOH a ostatní metabolity mají hydrofobní lipofilní charakter, což je důvodem jejich vysoké sorpce na pevnou fázi odpadní vody. Jejich lipofilita může zapříčinit také hromadění v tucích a olejích, separovaných z odpadní vody v mechanické fázi. Významnou sorpci kanabinoidů na pevnou fázi potvrzují jejich vysoké koncentrace v čistírenském kalu. Během dalšího zpracování čistírenského kalu dochází ke snížení jejich koncentrací, nejvýznamněji během delšího skladování odvodněného vyhnílého kalu, ale ani poté nejsou koncentrace kanabinoidů nulové. To může naznačovat, že větším zdrojem znečištění životního prostředí THC a jeho metabolity než přečištěná odpadní voda by mohl být čistírenský kal, který se dále využívá jako hnojivo.

Sekundární biologická fáze čištění se jeví pro většinu sledovaných látek jako klíčová. Průměrná účinnost odstranění většiny vybraných drog z odpadní vody po přečištění v primární a sekundární fázi byla napříč studiemi vyšší než 75 %. Nejvyšších hodnot dosahovala pro amfetamin,

kteřý byl již v biologické fázi eliminován z 97 %. Je otázkou, zda nedochází k jeho transformaci na jiné metabolity, které nebývají v rámci studií měřeny, nebo opravdu podléhá téměř úplnému rozkladu. Metamfetamin byl eliminován s průměrnou účinností přes 80 %. Kokain a jeho metabolit benzoylekgonin vykazují v sekundární fázi čištění dobrou účinnost odstranění. Průměrná účinnost odstranění kokainu v biologické fázi byla 76 % a benzoylekgoninu 68 %. Vyšší hodnoty byly naměřeny pro kokain, což odpovídá jeho nižší stabilitě v odpadních vodách oproti benzoylekgoninu, na který se může postupně rozpadat i v odpadní vodě. Účinnost odstranění THC-COOH v sekundární fázi byla 77 %. V odpadní vodě bývá tento metabolit sledován místo samotného THC, protože je stabilnější a THC se na něj po konzumaci z velké části přeměňuje. Jeho koncentrace v odpadní vodě jsou proto vyšší než koncentrace samotného THC. Nejnižší hodnota účinnosti v sekundární fázi čištění byla pozorována pro MDMA, činila pouze 35 %. Důvodem by mohla být jeho nízká biodegradabilita, která se odvíjí od chemické struktury této látky. MDMA se strukturně podobá metamfetaminu, jehož odstranění v odpadní vodě probíhá výrazně lépe. MDMA má navíc skupinu R-O-CH₂-O-R', která by mohla stabilitu způsobovat, avšak k podpoření této hypotézy nebyla nalezena žádná studie. Účinnost odstranění drog v biologické fázi se může lišit v závislosti na využití technologii. Nejlepší výsledky byly pozorovány při využití membránových bioreaktorů (MBR) a konvenčních systémů aktivovaného kalu (CAS). Nižší efektivitu poskytovaly systémy skrápěných filtrů (TF) a biofilmových reaktorů s pohyblivým lůžkem (MBBR). Vliv na aktuální účinnost biologické fáze má také stav a kvalita mikrobiálních organismů v aktivovaném kalu. Dalšími faktory, které účinnost odstranění drog v této fázi ovlivňují je stáří kalu a doba jeho kontaktu s odpadní vodou.

Využitím terciární fáze čištění se průměrná účinnost odstranění všech látek zvýšila v případě amfetaminu, kokainu a THC-COOH dosahovala až 100 %. Efektivita odstranění metamfetaminu a benzoylekgoninu byla také vysoká, ale na rozdíl od jmenovaných tří látek častěji docházelo k naměření jejich koncentrací na výpusti čistíren, a to v hodnotách desítek až stovek nanogramů na liter. Nejnižší efektivita odstranění po přečištění ve třech fázích byla pozorována pro MDMA, účinnost dosahovala průměrně hodnoty 62 %. Porovnání účinnosti jednotlivých technologických řešení terciární fáze čištění je složité. Čistírny velmi často kombinují více technologií zároveň a stanovují účinnosti z naměřených hodnot koncentrací na nátok a odtoku odpadní vody z čistírny, nikoliv mezi jednotlivými procesy. Žádná z metod terciárního čištění nebyla pro odstranění drog bezvýznamná, ale žádná také nevykazovala výrazně lepší účinnost než ostatní metody. Jako nejlepší řešení by mohla být snaha o individuální přístup k jednotlivým čistírnám a aplikace technologických řešení terciární fáze v rámci jejich možností.

Odstranění drog v jednotlivých fázích čištění se ukázalo jako velmi komplexní problematika. I přes velký počet nalezených studií není snadné probíhající procesy popsat. Důvodem je, že většina z nich se zabývá měřením drog na nátok do čistíren odpadních vod s cílem stanovení jejich spotřeby v populaci, tzv. epidemiologický přístup k odpadním vodám. Pokud je cílem měření efektivita

odstranění a sledování odtoku z čistírny, nebývá dostatečně rozebrána účinnost jednotlivých fází. Studie sledují nízký počet látek a málokdy i společně s jejich příslušnými metabolity. Metody odběru vzorků i následný postup při jejich vyhodnocování se v jednotlivých studiích liší a hodnoty tak nemusí být porovnatelné. Dále chybí studie popisující biodegradabilitu psychoaktivních látek, díky kterým by bylo možné lépe pochopit nízké či vysoké účinnosti odstranění vybraných drog v jednotlivých fázích čištění. V budoucnu by bylo dobré věnovat pozornost širší škále zneužívaných drog, včetně nových syntetických látek, kterých se objevuje na trhu stále více. Díky častějšímu měření by bylo možné na aktuální koncentrace na nátoky včas reagovat a nastavit technologická řešení čistíren tak, aby se co nejvíce zamezilo průniku těchto látek do životního prostředí.

Existuje několik studií popisujících dopady těchto látek na vodní ekosystémy (Fontes et al. 2020). Mohou způsobovat poškození DNA, proteinů a lipidů vodních organismů (Binelli et al. 2012). U ryb byla pozorována změna chování a změna hladin mozkových monoaminů (Kyzar et al. 2013). Dále byla pozorována změna pohyblivosti raků a negativní účinek na vývoj larev mořských ježků (Imeh-Nathaniel et al. 2017) (da Silva Souza et al. 2019). Studií je málo a bylo by třeba věnovat dopadům těchto mikropolutantů větší pozornost.

8 Seznam literatury

ABERG, Dan, Daniel CHAPLIN, Chris FREEMAN, Bela PAIZS a Christian DUNN, 2022. The environmental release and ecosystem risks of illicit drugs during Glastonbury Festival. *Environmental Research* [online]. **204**, 112061 [vid. 2024-03-01]. ISSN 00139351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2021.112061

ADLEY, Mark, Guy JONES a Fiona MEASHAM, 2023. Jump-starting the conversation about harm reduction: making sense of drug effects. *Drugs: Education, Prevention and Policy* [online]. **30**(4), 347–360 [vid. 2024-03-06]. ISSN 0968-7637, 1465-3370. Dostupné z: doi:10.1080/09687637.2021.2013774

AMBROŽOVÁ, 2007. *Jana Říhová Ambrožová: Encyklopedie hydrobiologie VŠCHT* [online] [vid. 2024-04-17]. Dostupné z: https://e-learning.vscht.cz/knihy/uid_es-006/ebook.html?p=O012

ANDRÉS-COSTA, María Jesús, Nuria RUBIO-LÓPEZ, María MORALES SUÁREZ-VARELA a Yolanda PICO, 2014. Occurrence and removal of drugs of abuse in Wastewater Treatment Plants of Valencia (Spain). *Environmental Pollution* [online]. **194**, 152–162 [vid. 2024-04-21]. ISSN 0269-7491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2014.07.019

BAALBAKI, Zeina, Tamanna SULTANA, Thomas MAERE, Peter A. VANROLLEGHEM, Chris D. METCALFE a Viviane YARGEAU, 2016. Fate and mass balance of contaminants of emerging concern during wastewater treatment determined using the fractionated approach. *Science of The Total Environment* [online]. **573**, 1147–1158 [vid. 2024-04-22]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.08.073

BAKER, David R. a ET AL., 2013. Spatial and temporal occurrence of pharmaceuticals and illicit drugs in the aqueous environment and during wastewater treatment: New developments. *Science of The Total Environment* [online]. **454–455**, 442–456 [vid. 2024-04-18]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.03.043

BAKER, David R. a Barbara KASPRZYK-HORDERN, 2011. Multi-residue analysis of drugs of abuse in wastewater and surface water by solid-phase extraction and liquid chromatography–positive electrospray ionisation tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* [online]. **1218**(12), 1620–1631 [vid. 2024-04-09]. ISSN 0021-9673. Dostupné z: doi:10.1016/j.chroma.2011.01.060

BALDUCCI, C., G. NERVEGNA a A. CECINATO, 2009. Evaluation of principal cannabinoids in airborne particulates. *Analytica Chimica Acta* [online]. **641**(1), 89–94 [vid. 2024-04-06]. ISSN 0003-2670. Dostupné z: doi:10.1016/j.aca.2009.03.037

BAZ-LOMBA, Jose Antonio, Stefania SALVATORE, Emma GRACIA-LOR, Richard BADE, Sara CASTIGLIONI, Erika CASTRIGNANÒ, Ana CAUSANILLES, Felix HERNANDEZ, Barbara KASPRZYK-HORDERN, Juliet KINYUA, Ann-Kathrin MCCALL, Alexander VAN NUIJS, Christoph ORT, Benedek G. PLÓSZ, Pedram RAMIN, Malcolm REID, Nikolaos I. ROUSIS, Yeonsuk RYU, Pim DE VOOGT, Jorgen BRAMNESS a Kevin THOMAS, 2016. Comparison of pharmaceutical, illicit drug, alcohol, nicotine and caffeine levels in wastewater with sale, seizure and consumption data for 8 European cities. *BMC Public Health* [online]. **16**(1), 1035 [vid. 2024-02-05]. ISSN 1471-2458. Dostupné z: doi:10.1186/s12889-016-3686-5

BENAGLIA, Lisa, Robin UDRISARD, Anne BANNWARTH, Aline GIBSON, Frederic BÉEN, Foon Yin LAI, Pierre ESSEIVA a Olivier DELÉMONT, 2020. Testing wastewater from a music festival in Switzerland to assess illicit drug use. *Forensic Science International* [online]. **309**, 110148 [vid. 2024-04-11]. ISSN 0379-0738. Dostupné z: doi:10.1016/j.forsciint.2020.110148

BENÁKOVÁ, Andrea, Eliška VOBECKÁ, Martin PEČENKA, Jana ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ a Jiří WANNER, 2021. Změna mikrobiálního společenství při terciárním čištění odpadních vod. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [online]. **63**(1), 24–32 [vid. 2024-04-21]. ISSN 0322–8916, 1805-6555. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2021/02/zmena-mikrobialniho-spolecenstvi-pri-terciarnim-cistenim-odpadnich-vod/>

BERSET, Jean-Daniel, Rudolf BRENNEISEN a Christoph MATHIEU, 2010. Analysis of illicit and illicit drugs in waste, surface and lake water samples using large volume direct injection high performance liquid chromatography – Electrospray tandem mass spectrometry (HPLC–MS/MS). *Chemosphere* [online]. **81**(7), 859–866 [vid. 2024-04-07]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: [doi:10.1016/j.chemosphere.2010.08.011](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.08.011)

BIJLSMA, Lubertus, Roque SERRANO, Carlos FERRER, Isabel TORMOS a Félix HERNÁNDEZ, 2014. Occurrence and behavior of illicit drugs and metabolites in sewage water from the Spanish Mediterranean coast (Valencia region). *Science of The Total Environment* [online]. **487**, 703–709 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00489697. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2013.11.131](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.131)

BINELLI, A., A. PEDRIALI, C. RIVA a M. PAROLINI, 2012. Illicit drugs as new environmental pollutants: Cyto-genotoxic effects of cocaine on the biological model *Dreissena polymorpha*. *Chemosphere* [online]. **86**(9), 906–911 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00456535. Dostupné z: [doi:10.1016/j.chemosphere.2011.10.056](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.056)

BOROVA, Viola L., Niki C. MARAGOU, Pablo GAGO-FERRERO, Constantinos PISTOS a Nikolaos S. THOMAIDIS, 2014. Highly sensitive determination of 68 psychoactive pharmaceuticals, illicit drugs, and related human metabolites in wastewater by liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* [online]. **406**(17), 4273–4285 [vid. 2024-04-08]. ISSN 1618-2650. Dostupné z: [doi:10.1007/s00216-014-7819-3](https://doi.org/10.1007/s00216-014-7819-3)

BUSARDÒ, Francesco Paolo, Ana Pilar PÉREZ-ACEVEDO, Roberta PACIFICI, Giulio MANNOCCI, Massimo GOTTARDI, Esther PAPASEIT, Clara PÉREZ-MAÑÁ, Soraya MARTIN, Lourdes POYATOS, Simona PICHINI a Magí FARRÉ, 2021. Disposition of Phytocannabinoids, Their Acidic Precursors and Their Metabolites in Biological Matrices of Healthy Individuals Treated with Vaporized Medical Cannabis. *Pharmaceuticals* [online]. **14**(1), 59 [vid. 2024-03-16]. ISSN 1424-8247. Dostupné z: [doi:10.3390/ph14010059](https://doi.org/10.3390/ph14010059)

CAMPESTRINI, Iolana a Wilson F. JARDIM, 2017. Occurrence of cocaine and benzoylecgonine in drinking and source water in the São Paulo State region, Brazil. *Science of The Total Environment* [online]. **576**, 374–380 [vid. 2024-04-07]. ISSN 00489697. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.089](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.089)

CAMPOS-MAÑAS, Marina Celia, Natan VAN WICHELEN, Adrian COVACI, Alexander L. N. VAN NUIJS, Christoph ORT, Frederic BÉEN, Sara CASTIGLIONI, Félix HERNÁNDEZ a Lubertus BIJLSMA, 2022. Analytical investigation of cannabis biomarkers in raw urban wastewater to refine consumption estimates. *Water Research* [online]. **223**, 119020 [vid. 2024-04-14]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: [doi:10.1016/j.watres.2022.119020](https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119020)

CARBALLA, Marta, Francisco OMIL a Juan M. LEMA, 2005. Removal of cosmetic ingredients and pharmaceuticals in sewage primary treatment. *Water Research* [online]. **39**(19), 4790–4796 [vid. 2024-04-14]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: [doi:10.1016/j.watres.2005.09.018](https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.018)

CARNEVALE MIINO, Marco, Tomáš MACSEK, Taťána HALEŠOVÁ, Tomáš CHORAZY a Petr HLAVÍNEK, 2023. Pharmaceutical and narcotics monitoring in Brno wastewater system and estimation of seasonal effect on the abuse of illicit drugs by a wastewater-based epidemiology approach. *Science of The Total Environment* [online]. **891**, 164386 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00489697. Dostupné z: [doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164386](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164386)

CASTIGLIONI, Sara, Renzo BAGNATI, Manuela MELIS, Deepika PANAWENNAGE, Paul CHIARELLI, Roberto FANELLI a Ettore ZUCCATO, 2011. Identification of cocaine and its metabolites in urban wastewater and comparison with the human excretion profile in urine. *Water Research* [online]. **45**(16), 5141–5150 [vid. 2024-03-24]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2011.07.017

CASTIGLIONI, Sara, Lubertus BIJLSMA, Adrian COVACI, Erik EMKE, Félix HERNÁNDEZ, Malcolm REID, Christoph ORT, Kevin V. THOMAS, Alexander L. N. VAN NUIJS, Pim DE VOOGT a Ettore ZUCCATO, 2013. Evaluation of Uncertainties Associated with the Determination of Community Drug Use through the Measurement of Sewage Drug Biomarkers. *Environmental Science & Technology* [online]. **47**(3), 1452–1460 [vid. 2024-03-02]. ISSN 0013-936X, 1520-5851. Dostupné z: doi:10.1021/es302722f

CASTIGLIONI, Sara, Enrico DAVOLI, Francesco RIVA, Marinella PALMIOTTO, Paolo CAMPORINI, Angela MANENTI a Ettore ZUCCATO, 2018. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy. *Water Research* [online]. **131**, 287–298 [vid. 2024-02-14]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.12.047

CAUSANILLES, Ana, Jose Antonio BAZ-LOMBA, Daniel A. BURGARD, Erik EMKE, Iria GONZÁLEZ-MARIÑO, Ivona KRIZMAN-MATASIC, Angela LI, Arndís S. C. LÖVE, Ann Kathrin MCCALL, Rosa MONTES, Alexander L. N. VAN NUIJS, Christoph ORT, José B. QUINTANA, Ivan SENTA, Senka TERZIC, Félix HERNANDEZ, Pim DE VOOGT a Lubertus BIJLSMA, 2017. Improving wastewater-based epidemiology to estimate cannabis use: focus on the initial aspects of the analytical procedure. *Analytica Chimica Acta* [online]. **988**, 27–33 [vid. 2024-03-16]. ISSN 0003-2670. Dostupné z: doi:10.1016/j.aca.2017.08.011

CECINATO, Angelo, Catia BALDUCCI, Graziano NERVEGNA, Giorgio TAGLIACOZZO a Ivo ALLEGRINI, 2008. Ambient air quality and drug aftermaths of the Notte Bianca (White Night) holidays in Rome. *Journal of Environmental Monitoring* [online]. **11**(1), 200–204 [vid. 2024-04-06]. ISSN 1464-0333. Dostupné z: doi:10.1039/B805070H

COSENZA, Alida, Carmelo Massimo MAIDA, Donatella PISCIONIERI, Serena FANARA, Francesca DI GAUDIO a Gaspare VIVIANI, 2018. Occurrence of illicit drugs in two wastewater treatment plants in the South of Italy. *Chemosphere* [online]. **198**, 377–385 [vid. 2024-04-09]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2018.01.158

ČESKO, 1998. *Zákon č. 167/1998 Sb. Zákon o návykových látkách a o změně některých dalších zákonů* [online]. 1998. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1998-167>

ČESKO, 2013. *Nariženi vlády č. 463/2013 Sb. Nariženi vlády o seznamech návykových látek* [online]. 2013. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2013-463>

ČESKO, 2017. *Zákon č. 65/2017 Sb. Zákon o ochraně zdraví před škodlivými účinky návykových látek* [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-65>

DA SILVA SOUZA, Lorena, Fabio Hermes PUSCEDDU, Fernando Sanzi CORTEZ, Manoela Romano DE ORTE, Alessandra Aloise SEABRA, Augusto CESAR, Daniel Araki RIBEIRO, Tomás Angel DEL VALLS CASILLAS a Camilo Dias Seabra PEREIRA, 2019. Harmful effects of cocaine byproduct in the reproduction of sea urchin in different ocean acidification scenarios. *Chemosphere* [online]. **236**, 124284 [vid. 2024-04-28]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2019.07.015

DENG, Yanghui, Changsheng GUO, Heng ZHANG, Xingxing YIN, Like CHEN, Daishe WU a Jian XU, 2020. Occurrence and removal of illicit drugs in different wastewater treatment plants with

different treatment techniques. *ENVIRONMENTAL SCIENCES EUROPE* [online]. **32**(1), 28 [vid. 2024-04-10]. ISSN 2190-4707, 2190-4715. Dostupné z: doi:10.1186/s12302-020-00304-x

DI MARCANTONIO, Camilla, Agostina CHIAVOLA, Valentina GIOIA, Simone LEONI, Giancarlo CECCHINI, Alessandro FRUGIS, Claudia CECI, Massimo SPIZZIRRI a Maria Rosaria BONI, 2023. A step forward on site-specific environmental risk assessment and insight into the main influencing factors of CECs removal from wastewater. *Journal of Environmental Management* [online]. **325**, 116541 [vid. 2024-04-21]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2022.116541

DI MARCANTONIO, Camilla, Agostina CHIAVOLA, Silvia PADERI, Valentina GIOIA, Marco MANCINI, Tommaso CALCHETTI, Alessandro FRUGIS, Simone LEONI, Giancarlo CECCHINI, Massimo SPIZZIRRI a Maria Rosaria BONI, 2021. Evaluation of removal of illicit drugs, pharmaceuticals and caffeine in a wastewater reclamation plant and related health risk for non-potable applications. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. **152**, 391–403 [vid. 2024-04-22]. ISSN 0957-5820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2021.06.024

DOHÁNYOS, Michal, 2007. *Čištění odpadních vod*. 2. vyd. Praha: VŠCHT. ISBN 978-80-7080-619-7.

EEA, 2020. *Urban waste water collection and treatment in Europe, 2017 — European Environment Agency* [online] [vid. 2024-04-19]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/urban-waste-water-treatment-in-europe#tab-chart_1

EMCDDA, 2023. Wastewater analysis and drugs — a European multi-city study. *European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction* [online]. Dostupné z: https://www.emcdda.europa.eu/publications/html/pods/waste-water-analysis_en

EMKE, Erik, Sian EVANS, Barbara KASPRZYK-HORDERN a Pim DE VOOGT, 2014. Enantiomer profiling of high loads of amphetamine and MDMA in communal sewage: A Dutch perspective. *Science of The Total Environment* [online]. **487**, 666–672 [vid. 2024-03-27]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.11.043

ESTÉVEZ-DANTA, Andrea, Rosa MONTES, Lubertus BIJLSMA, Rafael CELA, Alberto CELMA, Iria GONZÁLEZ-MARIÑO, Manuel MIRÓ, Vanessa GUTMANN, Unai Pérez DE SAN ROMÁN-LANDA, Ailette PRIETO, Mireia VENTURA, Rosario RODIL a José Benito QUINTANA, 2021. Source identification of amphetamine-like stimulants in Spanish wastewater through enantiomeric profiling. *Water Research* [online]. **206**, 117719 [vid. 2024-03-27]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2021.117719

EVGENIDOU, Eleni N., Ioannis K. KONSTANTINOOU a Dimitra A. LAMBROPOULOU, 2015. Occurrence and removal of transformation products of PPCPs and illicit drugs in wastewaters: A review. *Science of The Total Environment* [online]. **505**, 905–926 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.021

FEDOROVA, G., T. RANDAK, O. GOLOVKO, V. KODES, K. GRABICOVA a R. GRABIC, 2014. A passive sampling method for detecting analgesics, psycholeptics, antidepressants and illicit drugs in aquatic environments in the Czech Republic. *Science of The Total Environment* [online]. **487**, 681–687 [vid. 2024-04-07]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.091

FONTES, Mayana Karoline, Luciane Alves MARANHÃO a Camilo Dias Seabra PEREIRA, 2020. Review on the occurrence and biological effects of illicit drugs in aquatic ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. **27**(25), 30998–31034 [vid. 2023-12-27]. ISSN 0944-1344, 1614-7499. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-020-08375-2

GAO, Jianfa, Zeqiong XU, Xiqing LI, Jake W. O'BRIEN, Peter N. CULSHAW, Kevin V. THOMAS, Benjamin J. TSCHARKE, Jochen F. MUELLER a Phong K. THAI, 2018. Enantiomeric profiling of amphetamine and methamphetamine in wastewater: A 7-year study in regional and urban Queensland, Australia. *Science of The Total Environment* [online]. **643**, 827–834 [vid. 2024-03-20]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.242

GCDP, 2019. *Classification of psychoactive substances – when science was left behind (2019)*. B.m.: Global Commission on Drug Policy.

GERRITY, Daniel, Rebecca A. TRENHOLM a Shane A. SNYDER, 2011. Temporal variability of pharmaceuticals and illicit drugs in wastewater and the effects of a major sporting event. *Water Research* [online]. **45**(17), 5399–5411. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2011.07.020

GHEORGHE, Adriana, Alexander VAN NUIJS, Bert PECCEU, Lieven BERVOETS, Philippe JORENS, Ronny BLUST, Hugo NEELS a Adrian COVACI, 2008. Analysis of cocaine and its principal metabolites in waste and surface water using solid-phase extraction and liquid chromatography-ion trap tandem mass spectrometry. *Analytical and bioanalytical chemistry* [online]. **391**, 1309–19. Dostupné z: doi:10.1007/s00216-007-1754-5

GÓMEZ, M., F. PLAZA, G. GARRALÓN, J. PÉREZ a M. . A. GÓMEZ, 2007. A comparative study of tertiary wastewater treatment by physico-chemical-UV process and macrofiltration-ultrafiltration technologies. *Desalination* [online]. **202**(1), Wastewater Reclamation and Reuse for Sustainability, 369–376 [vid. 2024-04-21]. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2005.12.076

GONZÁLEZ-MARIÑO, Iria, Ettore ZUCCATO, Miquel M. SANTOS a Sara CASTIGLIONI, 2017. Monitoring MDMA metabolites in urban wastewater as novel biomarkers of consumption. *Water Research* [online]. **115**, 1–8 [vid. 2024-03-22]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.01.063

GRACIA-LOR, Emma, Ettore ZUCCATO a Sara CASTIGLIONI, 2016. Refining correction factors for back-calculation of illicit drug use. *Science of The Total Environment* [online]. **573**, 1648–1659 [vid. 2024-03-22]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.179

HEBERER, Thomas, 2002. Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. *Toxicology Letters* [online]. **131**(1–2), 5–17 [vid. 2024-02-13]. ISSN 03784274. Dostupné z: doi:10.1016/S0378-4274(02)00041-3

CHEREMISINOFF, Nicholas P., 2002. *Handbook of water and wastewater treatment technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-7498-0.

CHOI, Sangki, Hoonsik YOON, Heejong SON, Changdong SEO, Kyunga KIM, Yunho LEE a Young Mo KIM, 2022. Removal efficiency of organic micropollutants in successive wastewater treatment steps in a full-scale wastewater treatment plant: Bench-scale application of tertiary treatment processes to improve removal of organic micropollutants persisting after secondary treatment. *Chemosphere* [online]. **288**, 132629 [vid. 2024-04-14]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2021.132629

CHOMYNOVÁ, P., MRAVČÍK, V, 2021. *Národní výzkum užívání návykových látek 2020* [online]. Praha: Národní monitorovací středisko pro drogy a závislosti [vid. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://www.drogy-info.cz/publikace/zaostreno-na-drogy/2021-zaostreno/05-21-narodni-vyzkum-uzivani-navykovych-latek-2020/>

CHOMYNOVÁ, Pavla, Kateřina GROHMANNOVÁ, Tereza ČERNÍKOVÁ, Daniel GALANDÁK, Eva FRANKOVÁ a Jiří VOPRAVIL, 2023. *Zpráva o nelegálních drogách v České republice 2023*

[online]. Praha: Úřad vlády České republiky. Dostupné z: https://www.drogy-info.cz/data/obj_files/33917/1244/Zpr%C3%A1va%20o%20neleg%C3%A1ln%C3%ADch%20drog%C3%A1ch%20v%20C4%8CR%202023_fin.pdf

CHRISTOPHORIDIS, Christophoros, Sofia VELOUTSOU, Elena MITSIKA, Constantinos K. ZACHARIS, Christina CHRISTIA, Nikolaos RAIKOS a Konstantinos FYTIANOS, 2021. Determination of illicit drugs and psychoactive pharmaceuticals in wastewater from the area of Thessaloniki (Greece) using LC-MS/MS: estimation of drug consumption. *ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT* [online]. **193**(5), 249 [vid. 2024-04-10]. ISSN 0167-6369, 1573-2959. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-021-09035-9

CHUDOBA, Jan, Michal DOHÁNYOS a Jiří WANNER, 1991. *Biologické čištění odpadních vod*. B.m.: SNTL. ISBN 978-80-03-00611-3.

IMEH-NATHANIEL, Adebobola, Natalia RINCON, Vasiliki Bessie ORFANAKOS, Leanne BRECHTEL, Leah WORMACK, Erika RICHARDSON, Robert HUBER a Thomas I. NATHANIEL, 2017. Effects of chronic cocaine, morphine and methamphetamine on the mobility, immobility and stereotyped behaviors in crayfish. *Behavioural Brain Research* [online]. **332**, 120–125 [vid. 2024-04-28]. ISSN 0166-4328. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbr.2017.05.069

IVANKOVIC, Klauđija, Karlo JAMBROSIC, Iva MIKAC, Damir KAPETANOVIC, Marijan AHEL a Senka TERZIC, 2023. Multiclass determination of drug residues in water and fish for bioaccumulation potential assessment. *Talanta* [online]. **264**, 124762 [vid. 2024-04-07]. ISSN 0039-9140. Dostupné z: doi:10.1016/j.talanta.2023.124762

JANICKA, Monika, Agata KOT-WASIK a Jacek NAMIEŚNIK, 2010. Analytical procedures for determination of cocaine and its metabolites in biological samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* [online]. **29**(3), 209–224 [vid. 2024-03-24]. ISSN 0165-9936. Dostupné z: doi:10.1016/j.trac.2009.12.005

JONES, O. A. H., N. VOULVOULIS a J. N. LESTER, 2001. Human Pharmaceuticals in the Aquatic Environment a Review. *Environmental Technology* [online]. **22**(12), 1383–1394 [vid. 2024-04-17]. ISSN 0959-3330. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2001.11090873

JURADO, Anna, Nicola MASTROIANNI, Enric VÀZQUEZ-SUÑÉ, Jesus CARRERA, Isabel TUBAU, Estanislao PUJADES, Cristina POSTIGO, Miren López DE ALDA a Damià BARCELÓ, 2012. Drugs of abuse in urban groundwater. A case study: Barcelona. *Science of The Total Environment* [online]. **424**, 280–288 [vid. 2024-02-29]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2012.02.074

KALINA A KOL., Kamil, 2003. *Drogy a drogové závislosti I. mezioborový přístup* [online]. 1. vyd. B.m.: Úřad vlády české republiky. ISBN 80-86734-05-6. Dostupné z: https://www.drogy-info.cz/data/obj_files/1648/742/drogy_a_drog_zavislosti_dil1.pdf

KALINA, Kamil, 2001. *Mezioborový glosář pojmů z oblasti drog a drogových závislostí*. Praha: Filia nova. ISBN 978-80-238-8014-4.

KALINA, Kamil, 2015. *Klinická adiktologie*. Vydání 1. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-247-4331-8.

KRISHNAN, R. Yedhu, S. MANIKANDAN, R. SUBBAIYA, M. BIRUNTHA, R. BALACHANDAR a N. KARMEGAM, 2023. Origin, transport and ecological risk assessment of illicit drugs in the environment – A review. *Chemosphere* [online]. **311**, 137091 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2022.137091

KRIZMAN-MATASIC, Ivona, Ivan SENTA, Petra KOSTANJEVECKI, Marijan AHEL a Senka TERZIC, 2019. Long-term monitoring of drug consumption patterns in a large-sized European city using wastewater-based epidemiology: Comparison of two sampling schemes for the assessment of multiannual trends. *Science of The Total Environment* [online]. **647**, 474–485 [vid. 2024-04-11]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.441

KYZAR, Evan, Adam Michael STEWART, Samuel LANDSMAN, Christopher COLLINS, Michael GEBHARDT, Kyle ROBINSON a Allan V. KALUEFF, 2013. Behavioral effects of bidirectional modulators of brain monoamines reserpine and d-amphetamine in zebrafish. *Brain Research* [online]. **1527**, 108–116 [vid. 2024-04-28]. ISSN 0006-8993. Dostupné z: doi:10.1016/j.brainres.2013.06.033

LADU, John a Lu XIWU, 2014. Effect of Hydraulic Retention Time and Wastewater Temperature on Treatment Efficiency of Upflow Anaerobic Filter Treating Campus Domestic Wastewater. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* [online]. **7**, 1184–1190. Dostupné z: doi:10.19026/rjaset.7.403

LANZ, Matthias, Rudolf BRENNEISEN a Wolfgang THORMANN, 1997. Enantioselective determination of 3,4-methylene-dioxymethamphetamine and two of its metabolites in human urine by cyclodextrin-modified capillary zone electrophoresis. *ELECTROPHORESIS* [online]. **18**(6), 1035–1043 [vid. 2024-03-21]. ISSN 1522-2683. Dostupné z: doi:10.1002/elps.1150180628

LI, Linghui, Tom EVERHART, Peyton JACOB III, Reese JONES a John MENDELSON, 2010. Stereoselectivity in the human metabolism of methamphetamine. *British Journal of Clinical Pharmacology* [online]. **69**(2), 187–192 [vid. 2024-03-20]. ISSN 1365-2125. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2125.2009.03576.x

LO FARO, Alfredo Fabrizio, Giorgia SPREGA, Diletta BERADINELLI, Anastasio TINI, Lourdes POYATOS, Esther PAPASEIT, Paolo BERRETTA, Alessandro DI GIORGI, Magì FARRE, Nino TAKAISHVILI, Tivadar FARKAS, Francesco Paolo BUSARDÒ a Bezhana CHANKVETADZE, 2024. Development of enantioselective high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the quantitative determination of 3,4-methylenedioxy-methamphetamine (MDMA) and its phase-1 metabolites in human biological fluids. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* [online]. **238**, 115768 [vid. 2024-03-20]. ISSN 0731-7085. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpba.2023.115768

LÓPEZ-GARCÍA, Ester, Nicola MASTROIANNI, Cristina POSTIGO, Damià BARCELÓ a Miren LÓPEZ DE ALDA, 2018. A fully automated approach for the analysis of 37 psychoactive substances in raw wastewater based on on-line solid phase extraction-liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* [online]. **1576**, 80–89 [vid. 2024-04-08]. ISSN 0021-9673. Dostupné z: doi:10.1016/j.chroma.2018.09.038

LÓPEZ-VINENT, Núria, Alberto CRUZ-ALCALDE, Soliu O. GANIYU, Shailesh SABLE, Selamawit Ashagre MESSELE, Dustin LILLICO, James STAFFORD, Carme SANS, Jaime GIMÉNEZ, Santiago ESPLUGAS a Mohamed GAMAL EL-DIN, 2021. Coagulation-flocculation followed by catalytic ozonation processes for enhanced primary treatment during wet weather conditions. *Journal of Environmental Management* [online]. **283**, 111975 [vid. 2024-04-20]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2021.111975

MACKULAK, Tomáš, Michal MOSNÝ, Jaroslav ŠKUBÁK, Roman GRABIC a Lucia BIROŠOVÁ, 2015. Fate of psychoactive compounds in wastewater treatment plant and the possibility of their degradation using aquatic plants. *Environmental Toxicology and Pharmacology* [online]. **39**(2), 969–973 [vid. 2024-04-23]. ISSN 1382-6689. Dostupné z: doi:10.1016/j.etap.2015.02.018

MARTÍN-POZO, Laura, María del Carmen GÓMEZ-REGALADO, María Teresa GARCÍA-CÓRCOLES a Alberto ZAFRA-GÓMEZ, 2022. Chapter 16 - Removal of quinolone antibiotics from

wastewaters and sewage sludge. In: Hemen SARMA, Delfina C. DOMINGUEZ a Wen-Yee LEE, ed. *Emerging Contaminants in the Environment* [online]. B.m.: Elsevier, s. 381–406 [vid. 2024-04-17]. ISBN 978-0-323-85160-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85160-2.00015-9

MASTROIANNI, Nicola, Maria Jose BLEDA, Miren LÓPEZ DE ALDA a Damià BARCELÓ, 2016. Occurrence of drugs of abuse in surface water from four Spanish river basins: Spatial and temporal variations and environmental risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* [online]. **316**, 134–142 [vid. 2023-12-27]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2016.05.025

MASTROIANNI, Nicola, Cristina POSTIGO, Miren Lopez DE ALDA a Damia BARCELO, 2013. Illicit and abused drugs in sewage sludge: Method optimization and occurrence. *Journal of Chromatography A* [online]. **1322**, 29–37 [vid. 2024-02-14]. ISSN 00219673. Dostupné z: doi:10.1016/j.chroma.2013.10.078

MCCALL, Ann-Kathrin, Richard BADE, Juliet KINYUA, Foon Yin LAI, Phong K. THAI, Adrian COVACI, Lubertus BIJLSMA, Alexander L. N. VAN NUIJS a Christoph ORT, 2016. Critical review on the stability of illicit drugs in sewers and wastewater samples. *Water Research* [online]. **88**, 933–947 [vid. 2024-04-07]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2015.10.040

METCALFE, Chris, Kathryn TINDALE, Hongxia LI, Angela RODAYAN a Viviane YARGEAU, 2010. Illicit drugs in Canadian municipal wastewater and estimates of community drug use. *Environmental Pollution* [online]. **158**(10), 3179–3185 [vid. 2024-04-15]. ISSN 0269-7491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2010.07.002

MILLER, Thomas H., Keng Tiong NG, Samuel T. BURY, Sophie E. BURY, Nicolas R. BURY a Leon P. BARRON, 2019. Biomonitoring of pesticides, pharmaceuticals and illicit drugs in a freshwater invertebrate to estimate toxic or effect pressure. *Environment International* [online]. **129**, 595–606 [vid. 2024-04-07]. ISSN 01604120. Dostupné z: doi:10.1016/j.envint.2019.04.038

NEFAU, Thomas, Sara KAROLAK, Luis CASTILLO, Véronique BOIREAU a Yves LEVI, 2013. Presence of illicit drugs and metabolites in influents and effluents of 25 sewage water treatment plants and map of drug consumption in France. *Science of The Total Environment* [online]. **461–462**, 712–722 [vid. 2024-04-18]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.05.038

NIKFAR, Mohamad Hosein, Hesam PARSAEIAN, Ali AMANI TEHRANI, Alireza KOUHESTANI, Hamidreza MASOUMI ISFAHANI a Alireza BAZARGAN, 2023. A two-stage dissolved air flotation saturator configuration for significant microbubble improvement. *Environmental Technology* [online]. **44**(9), 1228–1237 [vid. 2024-04-20]. ISSN 0959-3330. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2021.1999335

PAL, Raktim, Mallavarapu MEGHARAJ, K. Paul KIRKBRIDE a Ravi NAIDU, 2013. Illicit drugs and the environment — A review. *Science of The Total Environment* [online]. **463–464**, 1079–1092 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2012.05.086

PANDOPULOS, Aaron J., Bradley S. SIMPSON, Richard BADE, Jake W. O'BRIEN, Meena K. YADAV, Jason M. WHITE a Cobus GERBER, 2021. A method and its application to determine the amount of cannabinoids in sewage sludge and biosolids. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. **28**(42), 59652–59664 [vid. 2024-04-14]. ISSN 1614-7499. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-021-14921-3

RAMIN, Pedram, Fabio POLESEL, Andreas Libonati BROCK a Benedek Gy. PLÓSZ, 2018. The impact of temperature on the transformation of illicit drug biomarkers in wastewater. *Science of The Total Environment* [online]. **644**, 1612–1616 [vid. 2024-03-28]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.307

REPICE, Carla, Mario Dal GRANDE, Roberto MAGGI a Roberta PEDRAZZANI, 2013. Licit and illicit drugs in a wastewater treatment plant in Verona, Italy. *Science of The Total Environment* [online]. **463–464**, 27–34 [vid. 2024-04-21]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.05.045

RESTREPO-VIEIRA, Luis H, Francesco BUSETTI, Kathryn L LINGE a Cynthia A JOLL, 2022. Development and validation of a direct injection liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the analysis of illicit drugs and psychopharmaceuticals in wastewater. *Journal of Chromatography A* [online]. **1685**, 463562 [vid. 2024-04-08]. ISSN 0021-9673. Dostupné z: doi:10.1016/j.chroma.2022.463562

RESTREPO-VIEIRA, Luis, Kathryn L. LINGE, Francesco BUSETTI a Cynthia A. JOLL, 2024. Removal mechanisms of illicit and psychoactive drugs in different wastewater treatment processes. *Environmental Science: Water Research & Technology* [online]. **10(4)**, 847–859 [vid. 2024-04-07]. ISSN 2053-1400, 2053-1419. Dostupné z: doi:10.1039/D3EW00673E

RODAYAN, Angela, Marius MAJEWSKY a Viviane YARGEAU, 2014. Impact of approach used to determine removal levels of drugs of abuse during wastewater treatment. *Science of The Total Environment* [online]. **487**, 731–739 [vid. 2024-04-14]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2014.03.080

SAFWAT, Safwat M., 2018. Performance of moving bed biofilm reactor using effective microorganisms. *Journal of Cleaner Production* [online]. **185**, 723–731 [vid. 2024-04-17]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.041

SANTANA-VIERA, Sergio, Marina G. PINTADO-HERRERA, Zoraida SOSA-FERRERA a José Juan SANTANA-RODRÍGUEZ, 2023. Analysis of psychoactive substances and metabolites in sludges, soils, sediments and biota: a review. *Environmental Chemistry Letters* [online]. **21(4)**, 2311–2335 [vid. 2023-12-27]. ISSN 1610-3653, 1610-3661. Dostupné z: doi:10.1007/s10311-023-01586-2

SCORE, 2021. Yearly monitoring. *score-network.eu* [online]. Dostupné z: <https://score-network.eu/monitoring/>

SHEVYRIN, V. A. a Yu. Yu. MORZHERIN, 2015. Cannabinoids: structures, effects, and classification. *Russian Chemical Bulletin* [online]. **64(6)**, 1249–1266 [vid. 2024-03-14]. ISSN 1066-5285, 1573-9171. Dostupné z: doi:10.1007/s11172-015-1008-1

SIMARRO-GIMENO, Claudia, Borja GARLITO, Elena PITARCH a Félix HERNÁNDEZ, 2023. Evaluation of direct sample injection as a fast, no-sample handling, approach for the LC-MS/MS monitoring of pharmaceuticals in different water matrices. *Microchemical Journal* [online]. **193**, 108985 [vid. 2024-04-08]. ISSN 0026-265X. Dostupné z: doi:10.1016/j.microc.2023.108985

SIMS, D. B., J. R. MONK, M. C. GARNER, A. C. HUDSON, J. E. KELLER, C. AGUAIZA, K. LINDLEY, D. WOLDETSADIK a A. C. BUCH, 2024. Occurrence, source, and ecological risk of pharmaceuticals and illicit drugs in surface water in Las Vegas, USA. *International Journal of Environmental Science and Technology* [online]. [vid. 2024-04-07]. ISSN 1735-1472, 1735-2630. Dostupné z: doi:10.1007/s13762-024-05522-x

SIRIKANTARAMAS, Supaart, Futoshi TAURA, Yumi TANAKA, Yu ISHIKAWA, Satoshi MORIMOTO a Yukihiro SHOYAMA, 2005. Tetrahydrocannabinolic acid synthase, the enzyme controlling marijuana psychoactivity, is secreted into the storage cavity of the glandular trichomes. *Plant & Cell Physiology* [online]. **46(9)**, 1578–1582. ISSN 0032-0781. Dostupné z: doi:10.1093/pcp/pci166

SKEES, Allie J., Katelyn S. FOPPE, Bommanna LOGANATHAN a Bikram SUBEDI, 2018. Contamination profiles, mass loadings, and sewage epidemiology of neuropsychiatric and illicit drugs in wastewater and river waters from a community in the Midwestern United States. *Science of The Total Environment* [online]. **631–632**, 1457–1464 [vid. 2024-04-07]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.060

STASINAKIS, Athanasios S., Nikolaos S. THOMAIDIS, Olga S. ARVANITI, Alexandros G. ASIMAKOPOULOS, Vasilios G. SAMARAS, Akinranti AJIBOLA, Daniel MAMAIŠ a Themistokles D. LEKKAS, 2013. Contribution of primary and secondary treatment on the removal of benzothiazoles, benzotriazoles, endocrine disruptors, pharmaceuticals and perfluorinated compounds in a sewage treatment plant. *Science of The Total Environment* [online]. **463–464**, 1067–1075 [vid. 2024-04-14]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.06.087

STYSZKO, Katarzyna, Kathryn PROCTOR, Erika CASTRIGNANÒ a Barbara KASPRZYK-HORDERN, 2021. Occurrence of pharmaceutical residues, personal care products, lifestyle chemicals, illicit drugs and metabolites in wastewater and receiving surface waters of Krakow agglomeration in South Poland. *Science of The Total Environment* [online]. **768**, 144360 [vid. 2024-04-10]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144360

SUBEDI, Bikram a Kurunthachalam KANNAN, 2014. Mass Loading and Removal of Select Illicit Drugs in Two Wastewater Treatment Plants in New York State and Estimation of Illicit Drug Usage in Communities through Wastewater Analysis. *Environmental Science & Technology* [online]. **48**(12), 6661–6670 [vid. 2024-04-15]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es501709a

TAKAYAMA, Nariaki, Reiko IIO, Seishi TANAKA, Satoshi CHINAKA a Kazuichi HAYAKAWA, 2003. Analysis of methamphetamine and its metabolites in hair. *Biomedical Chromatography* [online]. **17**(2–3), 74–82 [vid. 2024-03-19]. ISSN 1099-0801. Dostupné z: doi:10.1002/bmc.225

TER LAAK, Thomas L., Erik EMKE, Annemieke BENSCHOP, Ton NABBEN a Frederic BÉEN, 2022. Triangulating Amsterdam's illicit stimulant use trends by wastewater analysis and recreational drug use monitoring. *Forensic Science International* [online]. **340**, 111449 [vid. 2024-04-11]. ISSN 0379-0738. Dostupné z: doi:10.1016/j.forsciint.2022.111449

TERNES, Thomas A, 1998. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Research* [online]. **32**(11), 3245–3260 [vid. 2024-02-13]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1354(98)00099-2

THAI, Phong K., Guangming JIANG, Wolfgang GERNJAK, Zhiguo YUAN, Foon Yin LAI a Jochen F. MUELLER, 2014. Effects of sewer conditions on the degradation of selected illicit drug residues in wastewater. *Water Research* [online]. **48**, 538–547 [vid. 2024-04-07]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2013.10.019

UNITED NATIONS, 1961. *United Nations Single Convention on Narcotic Drugs, 1961* [online]. 30. březen 1961. Dostupné z: https://www.emcdda.europa.eu/drugs-library/single-convention-narcotic-drugs-1961_en

UNITED NATIONS, 1971. *United Nations Convention on Psychotropic Substances of 1971* [online]. 21. únor 1971. Dostupné z: https://www.emcdda.europa.eu/drugs-library/convention-psychotropic-substances-1971_en

UNITED NATIONS, 1988. *United Nations Convention against Illicit Traffic in Narcotic Drugs and Psychotropic Substances, 1988* [online]. 20. prosinec 1988. Dostupné z: https://www.emcdda.europa.eu/drugs-library/united-nations-convention-against-illicit-traffic-narcotic-drugs-and-psychotropic-substances-1988_en

UNODC, 2023. *World Drug Report 2023* [online]. S.l.: UNITED NATIONS: Office on Drugs and Crime. ISBN 978-92-1-300070-0. Dostupné z: <https://www.unodc.org/unodc/en/data-and-analysis/world-drug-report-2023.html>

VAN NUIJS, Alexander L.N., Sara CASTIGLIONI, Isabela TARCOMNICU, Cristina POSTIGO, Miren Lopez DE ALDA, Hugo NEELS, Ettore ZUCCATO, Damia BARCELO a Adrian COVACI, 2011. Illicit drug consumption estimations derived from wastewater analysis: A critical review. *Science of The Total Environment* [online]. **409**(19), 3564–3577 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2010.05.030

VAN NUIJS, Alexander L. N., Karim ABDELLATI, Lieven BERVOETS, Ronny BLUST, Philippe G. JORENS, Hugo NEELS a Adrian COVACI, 2012. The stability of illicit drugs and metabolites in wastewater, an important issue for sewage epidemiology? *Journal of Hazardous Materials* [online]. **239–240**, Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment systems, 19–23 [vid. 2024-03-24]. ISSN 0304-3894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2012.04.030

VEROVŠEK, Taja, David HEATH a Ester HEATH, 2022. Enantiomeric profiling of amphetamines in wastewater using chiral derivatisation with gas chromatographic-tandem mass spectrometric detection. *Science of The Total Environment* [online]. **835**, 155594 [vid. 2024-03-27]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155594

VEROVŠEK, Taja, Ariana ŠUŠTARIČ, Maria LAIMOU-GERANIOU, Ivona KRIZMAN-MATASIC, Helena PROSEN, Tina ELERŠEK, Vlasta KRAMARIČ ZIDAR, Vesna MISLEJ, Boštjan MIŠMAŠ, Marjeta STRAŽAR, Marjetka LEVSTEK, Bernardka CIMRMANČIČ, Simon LUKŠIČ, Nataša URANJEK, Tjaša KOZLOVIČ-BOBIČ, Tina KOSJEK, David KOCMAN, David HEATH a Ester HEATH, 2023. Removal of residues of psychoactive substances during wastewater treatment, their occurrence in receiving river waters and environmental risk assessment. *Science of The Total Environment* [online]. **866**, 161257 [vid. 2023-12-27]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.161257

WANG, De-Gao, Qiu-Da ZHENG, Xiao-Ping WANG, Juan DU, Chong-Guo TIAN, Zhuang WANG a Lin-Ke GE, 2016. Illicit drugs and their metabolites in 36 rivers that drain into the Bohai Sea and north Yellow Sea, north China. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. **23**(16), 16495–16503 [vid. 2024-04-07]. ISSN 0944-1344, 1614-7499. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-016-6824-9

WANG, Weimin, Heng ZHANG, Changsheng GUO, Wenxiu LIU a Jian XU, 2022. Stereoselective profiling of methamphetamine in a full-scale wastewater treatment plant and its biotransformation in the activated sludge batch experiments. *Water Research* [online]. **209**, 117908 [vid. 2024-04-14]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2021.117908

WHO, ed., 1994. *Lexicon of alcohol and drug terms* [online]. Geneva: World Health Organization. ISBN 978-92-4-154468-9. Dostupné z: <https://www.who.int/publications/i/item/9241544686>

WU, Shifan, Ying DONG, Bin LIN, Xiantao SHEN, Ping XIANG a Chuixiu HUANG, 2022. Sensitive determination of illicit drugs in wastewater using enrichment bag-based liquid-phase microextraction and liquid-chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* [online]. **1661**, 462684 [vid. 2024-04-08]. ISSN 0021-9673. Dostupné z: doi:10.1016/j.chroma.2021.462684

XU, Zeqiong, Peng DU, Kaiyang LI, Tingting GAO, Zhenglu WANG, Xiaofang FU a Xiqing LI, 2017. Tracing methamphetamine and amphetamine sources in wastewater and receiving waters via concentration and enantiomeric profiling. *Science of The Total Environment* [online]. **601–602**, 159–166 [vid. 2024-03-20]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.045

YADAV, Meena K., Michael D. SHORT, Cobus GERBER, John AWAD, Ben VAN DEN AKKER a Christopher P. SAINT, 2019. Removal of emerging drugs of addiction by wastewater treatment and water recycling processes and impacts on effluent-associated environmental risk. *Science of The Total Environment* [online]. **680**, 13–22 [vid. 2024-04-22]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.05.068

YANG, J., M. MONNOT, T. ELJADDI, L. ERCOLEI, L. SIMONIAN a P. MOULIN, 2021. Ultrafiltration as tertiary treatment for municipal wastewater reuse. *Separation and Purification Technology* [online]. **272**, 118921 [vid. 2024-04-21]. ISSN 1383-5866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2021.118921

ZAFFAR HASMHI, Muhammad, Shuhong WANG a Ahmed ZULKFIL, 2022. *Environmental Micropollutants*. 1. vyd. B.m.: Elsevier. ISBN 978-0-323-90675-3.

ZAPATA, Félix, José Manuel MATEY, Gemma MONTALVO a Carmen GARCÍA-RUIZ, 2021. Chemical classification of new psychoactive substances (NPS). *Microchemical Journal* [online]. **163**, 105877 [vid. 2024-03-05]. ISSN 0026-265X. Dostupné z: doi:10.1016/j.microc.2020.105877

ZUCCATO, Ettore, Chiara CHIABRANDO, Sara CASTIGLIONI, Davide CALAMARI, Renzo BAGNATI, Silvia SCHIAREA a Roberto FANELLI, 2005. Cocaine in surface waters: a new evidence-based tool to monitor community drug abuse. *Environmental Health* [online]. **4**(1), 14 [vid. 2024-03-27]. ISSN 1476-069X. Dostupné z: doi:10.1186/1476-069X-4-14

ŽABKA, D., A. VOJS STAŇOVÁ, I. HORÁKOVÁ, A. BUTOR ŠKULCOVÁ, R. GRABIC, V. ŠPALKOVÁ, M. GÁL a T. MACKULAK, 2023. Bioaccumulation as a method of removing psychoactive compounds from wastewater using aquatic plants. *Journal of Chromatography B* [online]. **1223**, 123717 [vid. 2023-12-27]. ISSN 15700232. Dostupné z: doi:10.1016/j.jchromb.2023.123717

9 Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – Klasifikace psychoaktivních návykových látek dle účinku na lidský organismus a vnímání, str. 14

Obrázek č. 2 – Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů THC, str. 17

Obrázek č. 3 – Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů MA, str. 18

Obrázek č. 4 – Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů MDMA, str. 19

Obrázek č. 5 – Struktura výchozí formy a nejvýznamnějších metabolitů kokainu, str. 20

Obrázek č. 6 – Zdroje znečištění komunální odpadní vody nelegálními psychoaktivními látkami, str. 26

Obrázek č. 7 – Schéma čistírny odpadních vod se třemi stupni čištění, str. 30

Obrázek č. 8 – procento populace evropských zemí dle jejich připojení k ČOV s různým počtem stupňů čištění, str. 31

Obrázek č. 9 – Obsah THC a THC-COOH ve vysušených vzorcích čistírenského, str. 32

Obrázek č. 10 – Průměrné efektivitu odstranění drog v různých ČOV s třemi stupni čištění, str. 40

10 Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Příklady koncentrací vybraných drog v povrchových vodách světa, str. 12

Tabulka č. 2 – klasifikace psychoaktivních látek dle chemické struktury, str. 15

Tabulka č. 3 – množství vybraných nelegálních drog v odpadních vodách evropských měst, str. 22

Tabulka č. 4 – Příklady koncentrací [ng.L-1] vybraných drog a jejich metabolitů měřených na nátoku do čistíren odpadních vod, str. 25

Tabulka č. 5 – Efektivita odstranění vybraných drog a jejich metabolitů v ČOV s různou sekundární fází čištění, str. 37

Tabulka č. 6 – Efektivita odstranění drog v terciární fází čištění a jejich koncentrace na nátok a odtoku ČOV, str. 43

Tabulka č. 7 – Minimální, maximální a průměrná hodnota účinnosti jednotlivých fází pro vybrané drogy a jejich metabolity, str. 46