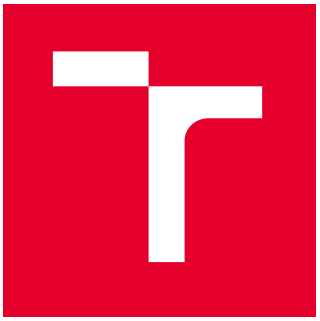


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

SPECIFICKÉ POŽADAVKY NA ČIŠTĚNÍ KOMUNÁLNÍCH ODPADNÍCH VOD V KRASOVÝCH OBLASTECH

SPECIFIC REQUIREMENTS FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT IN KARST AREAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Michal Krásný

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Jakub Raček, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2026

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav vodního hospodářství obcí
Student:	**Michal Krásný**
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Jakub Raček, Ph.D.**
Akademický rok:	2025/26
Studijní program:	B0732A260005 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Specifické požadavky na čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci bakalářské práce bude zpracován přehled specifických požadavků na kvalitu vyčištěné odpadní vody a na technologie čištění odpadních vod v krasových oblastech, a to s rozdělením na decentralizované a centralizované systémy se zaměřením na standardní parametry znečištění (BSK5, CHSK, N, P, NL) a také na vybrané organické polutanty. Nedílnou součástí bakalářské práce bude popis stávajícího a plánovaného stavu nakládání s odpadními vodami v CHKO Moravský kras ve vztahu ke specifickým požadavkům právě na citlivé krasové oblasti.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

V první části bakalářské práce bude provedena rešerše zaměřená na specifické požadavky na kvalitu vyčištěné odpadní vody a technologie čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech, se zaměřením na decentralizované a centralizované systémy a vybrané ukazatele znečištění. V praktické části bude popsán současný a plánovaný stav nakládání s odpadními vodami v CHKO Moravský kras ve vztahu k těmto specifickým požadavkům.

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] Směrnice Rady 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod

[2] Rámcová směrnice o vodách 2000/60/ES

[3] Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách (vodní zákon) a související vyhlášky

[4] ČSN 75 6402 Čistírny odpadních vod do 500 ekvivaletních obyvatel

[5] ČSN 75 6401 Čistírny odpadních vod pro ekvivalentní počet obyvatel větší než 500

[6] Metodické materiály AOPK a CHKO Moravský kras

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 15. 11. 2025

L. S.

doc. Ing. Petr Hluštík, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Jakub Raček, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá stávajícím stavem poznání nakládání s komunálními odpadními vodami v krasových oblastech, které se vyznačují vysokou zranitelností podzemních vod a minimální samočisticí schopností. Cílem práce je zhodnotit vhodnost používaných technologií čištění odpadních vod a posoudit, zda platné legislativní a technologické požadavky zajišťují dostatečnou ochranu krasového kolektoru. Teoretická část se zaměřuje na charakteristiku krasového prostředí, standardní složky komunálního znečištění a vybrané organické mikropolutanty, včetně přehledu české a evropské legislativy. Praktická část analyzuje současný a plánovaný stav nakládání s odpadními vodami v CHKO Moravský kras a porovnává centralizované a decentralizované systémy čištění. Práce poukazuje na omezenou vhodnost některých decentralizovaných řešení v krasových oblastech a zdůrazňuje význam stabilního a technologicky řízeného čištění, zejména z hlediska odstraňování živin a mikropolutantů. Výsledky práce přispívají k diskusi o ochraně vodních zdrojů v citlivých krasových územích.

KLÍČOVÁ SLOVA

komunální odpadní vody, krasové oblasti, centralizované a decentralizované systémy čištění, ochrana podzemních vod, mikropolutanty

ABSTRACT

This bachelor's thesis examines the current state of the art in municipal wastewater management in karst areas, which are characterized by high vulnerability of groundwater and very limited natural self-purification capacity. The aim of the thesis is to evaluate the suitability of wastewater treatment technologies and to assess whether current legislative and technological requirements provide sufficient protection of the karst aquifer. The theoretical part focuses on the characteristics of the karst environment, standard components of municipal pollution, and selected organic micropollutants, including an overview of Czech and European water legislation. The practical part analyses the current and planned wastewater management in the Moravian Karst Protected Landscape Area and compares centralized and decentralized treatment systems. The thesis highlights the limited suitability of certain decentralized solutions in karst areas and emphasizes the importance of stable, technologically controlled treatment processes, particularly with respect to nutrient and micropollutant removal. The results contribute to the discussion on effective groundwater protection in sensitive karst regions.

KEY WORDS

municipal wastewater, karst areas, centralized and decentralized wastewater treatment, groundwater protection, micropollutants

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁSNÝ, Michal. Specifické požadavky na čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech. Online, bakalářská práce. Jakub RAČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2026. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/174741. [cit. 2025-12-24].

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

KRÁSNÝ, Michal. *Specific Requirements for Municipal Wastewater Treatment in Karst Areas*. Online, bachelor's thesis. Jakub RAČEK (supervisor). Brno: Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 2026. Available at: https://www.vut.cz/en/students/final-thesis/detail/174741. [accessed 2025-12-24].

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Specifické požadavky na čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 01. 05. 2026

Michal Krásný
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Specifické požadavky na čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 01. 05. 2026

Michal Krásný
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Jakubovi Račkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a cenné připomínky během zpracování práce. Dále děkuji společnosti VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a.s. – Divize Boskovice, Svazku vodovodů a kanalizací měst a obcí a Agentuře ochrany přírody a krajiny ČR – Správě CHKO Moravský kras za poskytnutí aktuálních informací o odkanalizování obcí na území Moravského krasu a o nakládání s odpadními vodami v dané oblasti.

Poděkování patří rovněž společnosti VH atelier spol s.r.o. za poskytnutí podkladů a informací ke studii odkanalizování obce Němčice.

OBSAH

1 Úvod 11
1.1 Vymezení a význam stávajícího stavu 11
1.2 Cíle práce 12
1.3 Metodika práce 12
2 Charakteristika krasového území a specifika znečištění 14
2.1 Charakteristika CHKO Moravský kras 14
2.2 Definice krasové hydrogeologie a geomorfologie 15
2.3 Zranitelnost krasového kolektoru 17
2.4 Standardní komunální znečištění (BSK_5, CHSK, N, P, NL) 18
2.5 Vybrané mikropolutanty 23
3 Legislativní rámec a identifikace rizikových polutantů 30
3.1 Přehled a nedostatky legislativy ochrany vod v krasových oblastech ČR 30
3.2 Požadavky krasových vod v Evropské unii 36
3.3 Švýcarsko 41
3.4 Zhodnocení legislativních přístupů 45
4 Centralizované vs. decentralizované systémy čištění odpadních vod v oblastech krasů 48
4.1 Centralizované systémy – mechanicko-biologické ČOV 48
4.1.1 ČOV do 500 EO 50
4.1.2 ČOV 500–2 000 EO 51
4.1.3 ČOV 2 000–10 000 EO 51
4.1.4 ČOV 10 000–100 000 EO 52
4.1.5 ČOV >100 000 EO 52
4.2 Decentralizované systémy 53
4.2.1 Vícekomorový septik se zemním filtrem 53
4.2.2 Jímky na vyvážení 53
4.2.3 Domovní čistírny odpadních vod 54
4.2.4 Vegetační ČOV 56
4.2.5 Stabilizační nádrže a biologické rybníky 57

4.2.6 Ostatní decentralizované systémy 58
4.3 Porovnání centralizovaných a decentralizovaných systémů 59
5 Technická kritéria a požadavky na ČOV v krasových oblastech 62
5.1 Požadavky na stokovou síť a mechanické předčištění 62
5.2 Technologické nároky na biologický stupeň (nízko zatížená aktivace) 63
5.3 Řešení eliminace fosforu (P) 63
5.4 Pokročilé systémy separace a čištění 65
5.5 Řešení odstraňování mikropolutantů 65
5.6 Kontrola a monitoring dat ČOV 67
6 Management odpadních vod v CHKO Moravský kras 69
6.1 Hodnocení strategických dokumentů 69
6.1.1 Plán rozvoje vodovodů a kanalizací území kraje 69
6.1.2 Územní plán 69
6.1.3 PRVKÚK JMK pro obce CHKO Moravský kras 70
6.2 Spolupráce na projektu „Integrované koncepce nakládání s odpadními vodami a jejich aplikovatelnost v ochraně citlivých vodních útvarů“ 71
6.3 Detailní rozbor studie odkanalizování obce Němčice 71
7 Závěr a doporučení 76
7.1 Zhodnocení bakalářské práce 76
7.2 Dopady na projekční a provozní praxi 77
7.3 Doporučení pro ochranu krasových vodních útvarů 78
7.4 Návaznost práce na praktické aplikace výsledků 79
8 Seznam použité literatury 80
9 Seznam obrázků 91
10 Seznam tabulek 92
11 Seznam příloh 93
12 Seznam zkratek 94

1 ÚVOD

1.1 VYMEZENÍ A VÝZNAM STÁVAJÍCÍHO STAVU

Tato práce pojednává o stávajícím stavu poznání v odstraňování komunálních odpadních vod v krasových oblastech, přesněji v oblasti Moravského krasu. Moravský kras je nejvýznamnější krasové území v České republice s rozlohou přibližně 100 km^2. Krasová území představují mimořádně citlivé hydrologické a ekologické systémy. Jedná se o území s unikátními hydrologickými, geologickými a ekologickými hodnotami, a proto zde standardně používané postupy nemusí být bez další úpravy dostatečné a je třeba je posuzovat s ohledem na specifika krasového prostředí. Hlavní problém představuje antropogenní znečištění krasového systému, a to jak ve formě mikropolutantů, tak běžného komunálního znečištění, které do něj vstupuje jednak bodově, například prostřednictvím čistíren odpadních vod (ČOV), jednak difuzně, zejména v důsledku zemědělské činnosti. Do krasového podzemí se dostává znečištění přímo z krasového území, ale i z jeho okolí kvůli povrchovému a podzemnímu proudění vody směrem dovnitř oblastí. Do podzemí se dostávají znečištěné povrchové vody pomocí krasových ponorů. Vzhledem k propustnosti krasového prostředí je problémem rychlý transport znečištění bez přirozeného dočišťování ve vodních tocích a filtrační schopnosti zeminy v dostatečné tloušťce. Přirozené dočišťování v podzemních vodních útvarech neprobíhá z důvodu absence slunečního svitu a nízké biologické aktivity. Standardní komunální znečištění sledujeme pomocí ukazatelů, jakými jsou biologická spotřeba kyslíku (BSK_5), chemická spotřeba kyslíku (CHSK), nerozpuštěné látky (NL), celkový dusík (N_{celk}), amoniakální dusík ($N\text{-}NH_4^+$) a celkový fosfor (P_{celk}). U mikropolutantů se nejčastěji jedná o rezidua léčiv, pesticidy a hnojiva. Důsledkem znečištění je ohrožena jedinečná fauna a flora těchto oblastí. Jedná se zejména o nepřirozenou eutrofizaci (obohacování vod dusíkem a fosforem) a při zvýšeném obsahu dusičnanů, síranů, fosforečnanů a dalších aniontů mohou zvyšovat rozpouštění karbonátů a urychlovat rozšiřování puklin, čímž

podporují akcelerovanou krasifikaci. Ve vodách se vyskytují i mykobakterie, koliformní bakterie a patogeny, které jsou nebezpečné pro člověka. Pro zmenšení obsahu znečištění v krasových vodách je potřeba komplexně řešit systémy čištění odpadních vod, jak na odtoku z ČOV, tak samotné stokové sítě obcí nacházející se v citlivých oblastech [1; 2; 3].

1.2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je provést rešerši specifických požadavků na kvalitu vyčištěné odpadní vody a technologií čištění odpadních vod, která se zaměří na standardní parametry znečištění (BSK_5, CHSK, N_{celk}, $N\text{-}NH_4^+$, P_{celk}, NL) i na vybrané mikropolutanty. V praktické části je provedeno porovnání centralizovaného a decentralizovaného systému čištění odpadních vod ve vztahu k tvorbě znečištění a citlivosti krasu. V rámci tohoto cíle bude posouzena účinnost stávající technologie čištění odpadních vod a případně budou navržena systémová a technická opatření ke zlepšení kvality vyčištěné vody, minimalizaci úniků odpadní vody z kanalizační sítě způsobených nevhodným návrhem a úpravě odtokových poměrů s ohledem na citlivost dané oblasti. Jedním z praktických cílů práce je i zhodnocení nového návrhu stokové sítě s ČOV v obci Němčice a případné vytvoření doporučení na úpravu projektu.

1.3 METODIKA PRÁCE

Práce je založena na mezioborovém přístupu a kombinaci následujících metod:

- Rešerše a legislativní analýza: zhodnocení platných právních předpisů a norem, které se vztahují k ochraně krasových území v podmínkách České republiky (Zákon č. 254/2001 Sb., NV č. 401/2015 Sb.). Cílem této analýzy je identifikovat nedostatky současné legislativy, které neberou v potaz specifické podmínky krasových a dalších citlivých oblastí.

- Technologická rešerše: zhodnocení koncepcí a technologií čištění odpadních vod s důrazem na nízko zatížené aktivace, systémy

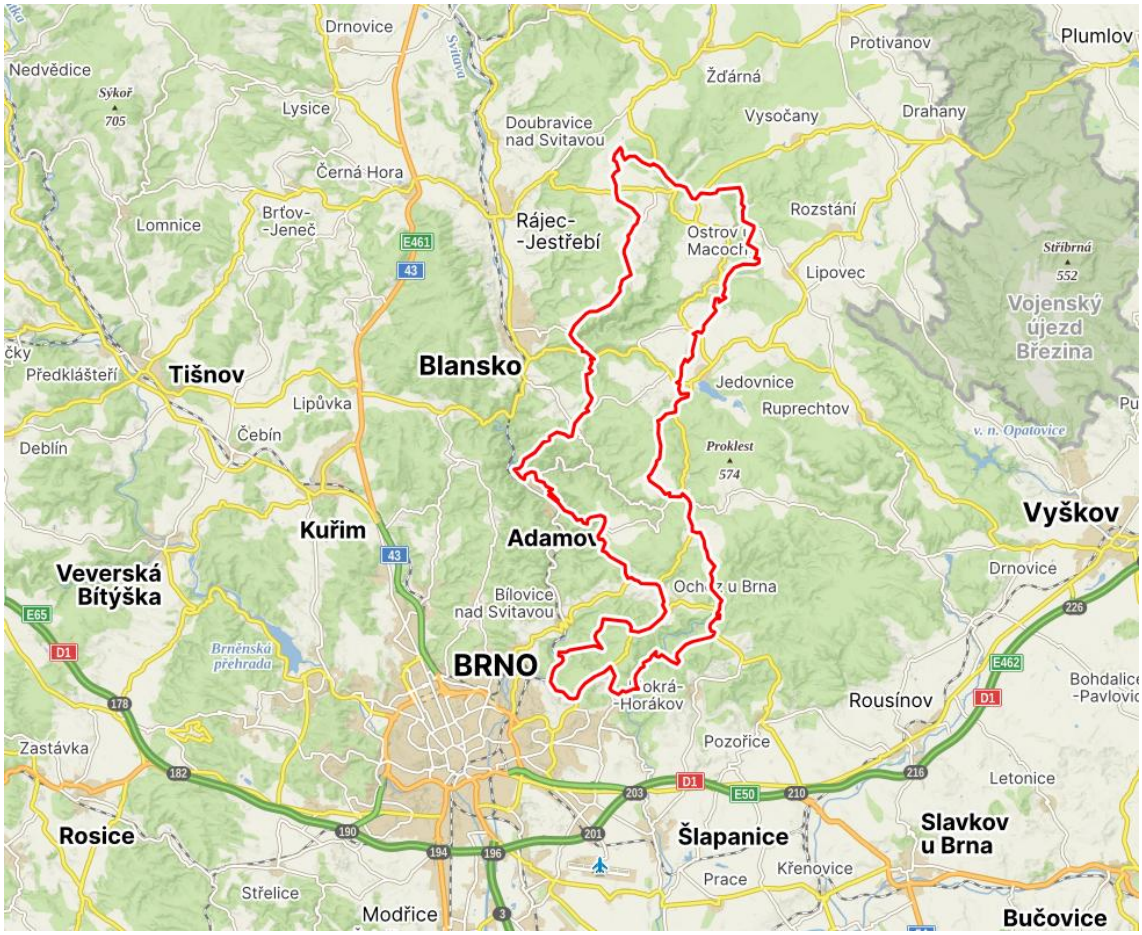
eliminující fosfor a pokročilé systémy, jakými jsou například membránová technologie čištění odpadních vod.

- Analýza strategických dokumentů: zhodnocení Plánu rozvoje vodovodů a kanalizací Jihomoravského kraje s cílem posouzení aktuálnosti popisovaných stavů a správnosti doporučení pro zájmové obce.

2 CHARAKTERISTIKA KRASOVÉHO ÚZEMÍ A SPECIFIKA ZNEČIŠTĚNÍ

2.1 CHARAKTERISTIKA CHKO MORAVSKÝ KRAS

Chráněná krajinná oblast (CHKO) Moravský kras představuje nejvýznamnější a nejrozsáhlejší krasové území v České republice. Nachází se v centrální části Drahanské vrchoviny, přibližně 20 km severně od Brna. Území bylo vyhlášeno za chráněné v roce 1956 a s rozlohou 96,8 km² je druhou nejstarší CHKO v Česku (AOPK ČR). Rozkládá se v nadmořské výšce přibližně 216–546 m n. m. a je tvořeno charakteristickými krasovými jevy – ponory, vývěry, závrty, propastmi a rozsáhlým systémem podzemních jeskyní. Rozsah oblasti je vyobrazen na obrázku Obrázek 1 - Základní topologická mapa s vyznačenou oblastí CHKO Moravský kras [4].



Obrázek 1 - Základní topologická mapa s vyznačenou oblastí CHKO Moravský kras [5]

Geologický základ Moravského krasu tvoří především devonské a spodnokarbonské vápence, jejichž stáří se odhaduje na cca 370 milionů let. Vlivem rozpouštění těchto hornin vodou bohatou na oxid uhličitý došlo k intenzivnímu krasovění, které vytvořilo typické tvary reliéfu. K nejznámějším patří propast Macocha a rozsáhlé jeskynní komplexy – např. Amatérská jeskyně, Rudické propadání – Býčí skála, či Punkevní jeskyně, v nichž protéká podzemní říčka Punkva. Na území CHKO je známo více než 1 100 jeskyní, z nichž je pět zpřístupněno veřejnosti [1; 4].

Moravský kras je z hydrologického hlediska rozdělen do tří povodí – Punkvy, Jedovnického potoka a Říčky. Hlavním odvodňovacím systémem je podzemní Punkva, která vzniká soutokem Sloupského potoka a Bílé vody v Amatérské jeskyni a po vývěru z Punkevních jeskyní se vlévá do řeky Svitavy [1].

K významným ekosystémům CHKO Moravský kras patří lesní porosty, suché trávníky a vápencové skalní stepi. Fauna je rovněž velmi rozmanitá, v jeskyních bylo zaznamenáno více než 20 druhů netopýrů, jež jsou evropsky chráněné v rámci soustavy Natura 2000. Část území byla v roce 2004 zahrnuta mezi mezinárodně významné mokřady v rámci Ramsarské úmluvy – lokalita Podzemní Punkva [4].

CHKO Moravský kras je rozdělena do čtyř ochranných zón s různým stupněm ochrany. V nejpřísněji chráněné I. zóně se nacházejí nejcennější přírodní lokality a jeskynní systémy, zatímco nižší zóny umožňují šetrné zemědělské, lesnické a rekreační využití. Na území CHKO se nacházejí 4 národní přírodní rezervace (Býčí skála, Hády, Rudické propadání, Sloupsko-šošůvské jeskyně), 12 přírodních rezervací a 2 národní přírodní památky [4].

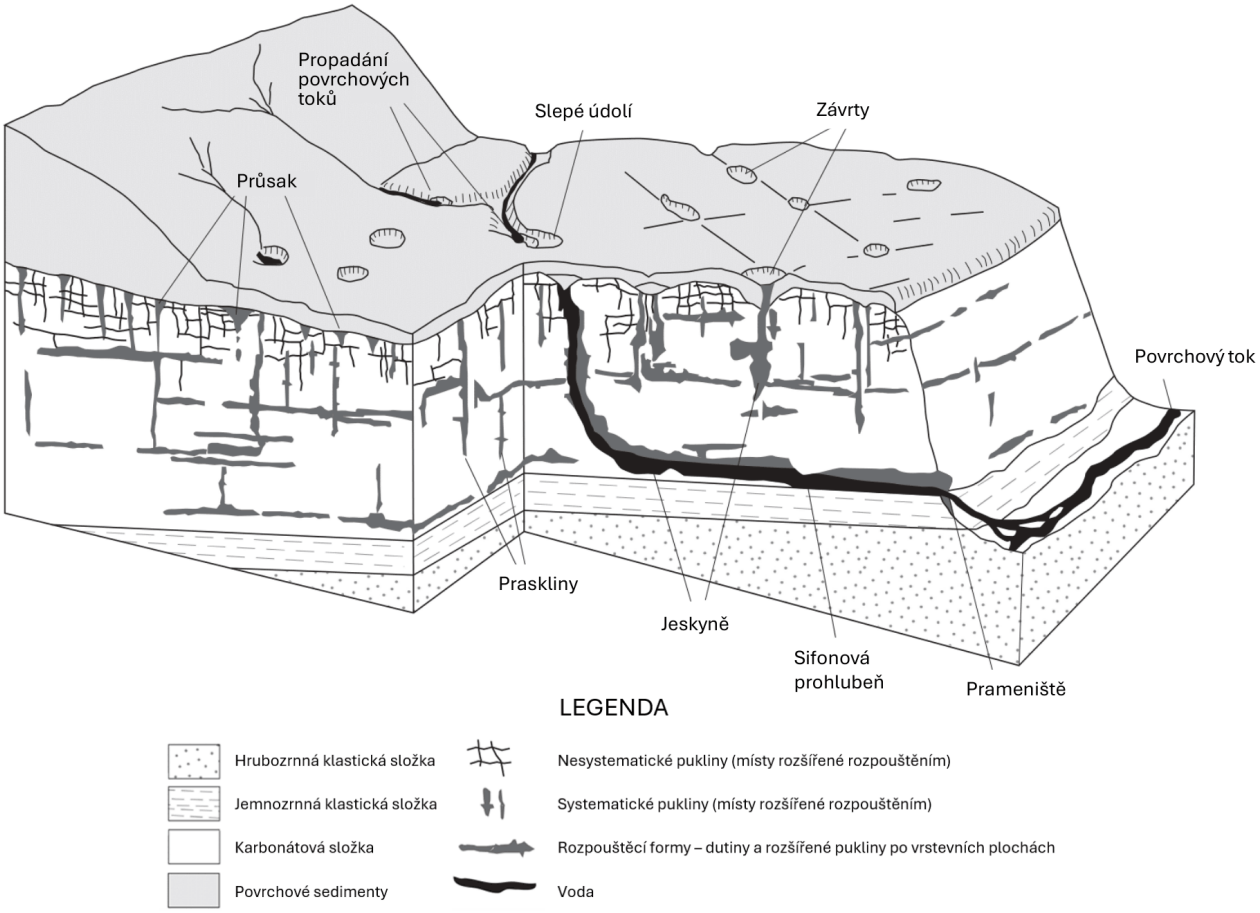
2.2 DEFINICE KRASOVÉ HYDROGEOLOGIE A GEOMORFOLOGIE

Krasové horniny se dělí do tří základních hydrografických zón. Svrchní, nenasycená zóna, označovaná také jako zóna aerace či sestupné cirkulace, sahá od povrchu krasu po úroveň nejvyšší hladiny krasových vod. V podmínkách Moravského krasu její mocnost kolísá od několika metrů až

přibližně do 130 m. Přechodná zóna představuje oblast kolísání hladiny krasových vod. Jedná se o smíšenou zónu s převahou horizontální cirkulace, která je z hydrogeologického hlediska nejdynamičtější. Je vymezena minimální a maximální hladinou podzemních vod, jejichž změny jsou způsobeny zejména proměnlivými průtoky v ponorových oblastech. Spodní zóna je trvale zaplněna krasovými vodami. Moravský kras je nejvýznamnějším českým zástupcem tzv. holokrasu – území, kde jsou rozvinuty všechny typické krasové jevy, které dohromady přispívají k tomu, že v podstatě na povrchu neexistuje povrchová říční síť. Vznik těchto útvarů je závislý na existenci čistých vápenců. Vzhledem k podmínkám pro proces krasovění vytvářejí tyto vápence ideální prostředí pro rozšiřování puklinově-krasových útvarů jak horizontálního, tak vertikálního. Zkrasovění probíhá postupným rozšiřováním puklin a rozpouštěním horniny až do stavu vytvoření nového kanálu pro vodu. Voda v podzemních tocích následuje nejkratší cestu od ponoru (infiltračního místa), po zónu drenáže. Změna tvořená krasověním tudíž mění i hydraulický sklon hladiny podzemní vody. Zároveň stálá hladina podzemní vody v oblasti krasu v podstatě neexistuje, z důvodu vázání na hloubku odvodňování jeskynními systémy. Podzemní povodí v krasových oblastech nelze vymezit podle povrchového reliéfu, protože cirkulace podzemní vody probíhá puklinami, krasovými kanály a jeskyněmi, které často probíhají zcela jiným směrem než povrchová údolí [4; 6; 7; 8; 9].

Dotace vody do krasu probíhá povrchovými toky v ponorech, infiltrací srážek a podzemním přítokem z okolních území. Proudění podzemní vody v krasových útvarech probíhá převážně volnou hladinou, protože krasové kanály a puklinové systémy nejsou zcela zaplněny vodou, ale tvoří otevřené prostory, ve kterých voda teče podobně jako v povrchových potocích. Tento typ proudění je způsoben vysokou propustností a heterogenitou vápencového masivu. Výsledkem je velmi rychlá cirkulace, často v řádu hodin, a téměř okamžitá hydrologická reakce na srážkové události. Proudění volnou hladinou zároveň způsobuje, že voda není filtrována přes půdní nebo

sedimentární vrstvy, což vede k minimální samočisticí schopnosti krasových systémů a vysoké zranitelnosti podzemních vod vůči znečištění. Útvary a proudění vyskytující se v podzemí krasových oblastí můžeme vidět i na obrázku Obrázek 2 - Řez krasovým podložím [6; 7; 8; 9; 10].



Obrázek 2 - Řez krasovým podložím [10]

2.3 ZRANITELNOST KRASOVÉHO KOLEKTORU

Základním faktorem zranitelnosti krasového kolektoru je jeho vysoká hydraulická propustnost, která je dána přítomností puklin, korozních kanálů a jeskynních dutin. Tyto útvary tvoří malá procenta celkového objemu horniny, ale odvádějí až 90 % celkového průtoku. Tyto podmínky vedou k rychlému proudění podzemních vod. Jedná se především o proudění o volné hladině, jehož rychlost může dosahovat stejné rychlosti jako u povrchových potoků. Při průchodu touto horninou probíhá minimální

interakce vody s horninovým prostředím, která by mohla znečištění sorbovat nebo rozkládat, jako to probíhá u procesů na povrchu [2; 11; 12].

Procesy samočištění, které jsou běžné v povrchových tocích nebo v půdním prostředí, mají v krasových jeskyních pouze omezenou účinnost. Jedním z faktorů omezujících účinnost je, že při průchodu podzemím se znečištěné vody ředí s vodami přitékajícími z jiných lokalit, a tudíž je obtížné přesně určit vstupní a výstupní znečištění vod. Samočištění je ovlivněno nedostatečnou biogenní aerací vody, která je způsobena nízkou teplotou, nepřítomností zelených rostlin a slunečního záření. Nepřítomnost rostlin znamená i nevyužití oxidu uhličitého a v konečném důsledku ani sloučeniny fosforu. Tyto okolnosti vedou i k výskytu anaerobních prostředí, ve kterých je intenzita samočisticích procesů ještě menší než v aerobních [2; 11; 12].

Odpadní vody, které se bez samočištění dostávají do krasového podzemí, mohou zásadně měnit chemické i biologické podmínky nutné pro vznik a zachování krasových útvarů. Znečištění zvyšuje obsah organických látek a CO_2, narušuje chemickou rovnováhu uhličitanu vápenatého a podporuje vznik biofilmů na povrchu krápníků, čímž zpomaluje či zcela zastavuje jejich růst. Současně může docházet k urychlené erozi sintru (bělavá hornina vznikající vysrážením uhličitanu vápenatého), zabarvení výzdoby (zbarvení krápníků do hnědých odstínů) nebo k zanášení jeskynních sifonů organickými sedimenty. Krasové útvary jsou proto na kvalitu přitékající vody vysoce citlivé a kontaminace odpadními vodami představuje významné riziko pro jejich dlouhodobé zachování [2; 11; 12].

2.4 STANDARDNÍ KOMUNÁLNÍ ZNEČIŠTĚNÍ (BSK_5, CHSK, N, P, NL)

Odpadní vodu charakterizujeme na základě složení rozpuštěných a nerozpuštěných látek. Pro hodnocení její kvality před a po procesu čištění využíváme ukazatele jako je BSK_5, CHSK, N, P a NL.

BSK_5 (biologická spotřeba kyslíku)

Vyjadřuje množství kyslíku spotřebovaného mikroorganismy při biochemickém rozkladu biologicky rozložitelných organických látek ve vodě během pěti dnů při standardních podmínkách. Tudíž tento ukazatel specifikuje množství biologicky rozložitelného materiálu, jakými jsou například fekálie nebo potravinové zbytky. Vysoké hodnoty BSK_5 indikují zvýšenou spotřebu kyslíku mikroorganismů a při vypuštění do recipientu mohou organismy z odpadních vod odčerpat rozpuštěný kyslík ve vodě a tím ohrozit život vodních organismů [13; 14].

CHSK (chemická spotřeba kyslíku)

Vyjadřuje množství kyslíku potřebného k chemické oxidaci oxidovatelných látek ve vodě. Látky mohou být jak organického, tak anorganického původu oproti BSK_5. Typicky se týká sacharidů, tuků, olejů, bílkovin a detergentů. Hodnota CHSK udává celkový obraz organického zatížení vody. Poměr BSK_5/CHSK se často používá jako indikátor biologické rozložitelnosti odpadní vody [14; 15].

N (amoniakální, dusičnanový a celkový dusík)

Dusík se objevuje v odpadní vodě hned v několika formách, a to jako organický (bílkoviny a močovina), amoniakální ($N\text{-}NH_4^+$), dusitanový (NO_2^-) a dusičnanový (NO_3^+). Dusík v odpadní vodě pochází převážně z fekálií, moči a čisticích prostředků. Na čistírně odpadních vod prochází dusík všemi podobami, přičemž se snažíme dosáhnout vždy volného dusíku. Na ČOV se dusík mění z nejtoxičtější formy amoniakální pomocí aerobní nitrifikace na dusitany a následně dusičnany. Poslední krok je anaerobní denitrifikace, která proměňuje dusičnany na volný dusík, ten poté uniká. Při velkém obsahu dusíku ve vodách dochází k navýšení eutrofizačního faktoru, který podporuje růst řas a sinic. Pokud nedojde alespoň k procesu nitrifikace, tak nastává problém ve vyšších teplotách a pH, kdy je amoniakální dusík velice toxický pro vodní organismy [14].

P (obsah fosforu)

Fosfor je v komunálních odpadních vodách převážně ve formě ortofosforečnanů a polyfosforečnanů. Nejčastěji se vyskytuje ve fekáliích, pracích a čisticích prostředkách. Zčásti může být vázán do biomasy, ale na rozdíl od organického znečištění ho nelze odstranit v plynné formě. Převážně se fosfor odstraňuje ve formě anorganické sraženiny. Odstraňuje se z větší části chemicky, kde může být prováděno ve třech fázích procesu čištění odpadních vod. Ke srážení je využíváno flokulantu (nejčastěji soli železa a hliníku), který se dávkuje odděleně před usazovací nádrž, jako terciální stupeň čištění nebo simultánně do aktivační nádrže. Biologické odstraňování fosforu se podílí na běžných provozech mechanicko-biologických ČOV pouze z 30-40 %, zbytek musí být řešen pomocí dávkování chemických srážedel [14].

NL (nerozpuštěné látky)

Nerozpuštěné látky představují pevné částice přítomné v odpadní vodě, které jsou unášeny proudem vody. Zahrnují organické částice (fekálie, potraviny) a anorganické částice (písek, štěrk, minerály, ostatní odpad). Nerozpuštěné látky mění zejména fyzikální vlastnosti vody, jako zákal, sedimentace a transport ostatních látek. Tyto částice jsou z největší části odstraňovány v mechanickém stupni čištění (hrubé česle, jemné česle, lapák písku, lapák štěrku, usazovací nádrž) [14; 16].

Momentálně legislativa zahrnuje pouze 2 druhy emisních standardů ukazatelů přípustného znečištění odpadních vod. Oba se nacházejí jako příloha č. 1 a č. 7 nařízení vlády č. 401/2015 Sb., kde první popisuje obecné limity platné pro všechny ČOV, které vypouštějí odpadní vody do vod povrchových, pokud vodoprávní úřad nestanoví jinak. Druhý typ limitů jsou tzv. BAT limity (Best Available Technology). BAT limity jsou momentálně nejpřísnější limity stanovené českou legislativou, které jsou ukládány na základě individuálního rozhodnutí vodoprávního úřadu. BAT limity vycházejí z principu nejlepších dostupných technik, tedy takového technického řešení, aby bylo technicky proveditelné, ekonomicky přiměřené a environmentálně

nejúčinnější. Úřad nařizuje dodržení BAT limitů typicky v případech, kde se jedná o:

a) Citlivý nebo významný recipient – jezero, přehrada, malý tok s nízkým ředěním, území ohrožené eutrofizací, zdroj pitné vody nebo jeho ochranné pásmo

b) Chráněné území – CHKO, Národní park, NATURA 2000 nebo zvláštně chráněná vodní tělesa

c) Špatný stav recipientu – programy opatření podle plánu povodí vyžadují snížení zatížení odpadních vod

d) Velké a moderní ČOV – vysoké EO, prokazatelná technická možnost dosáhnout lepších parametrů

Pokud jsou tedy BAT limity lepší pro environmentální stav, proč nejsou aplikovány plošně na všechny ČOV? Hlavní důvod je přiměřenost ekonomické zátěže pro investora a reálné nutnosti přísnějšího čištění. Malé ČOV by BAT limity z většiny technicky a ekonomicky nezvládly. Spousta recipientů si dokáže s odpadní vodou vypouštěnou za standardních limitů poradit v toku v rámci přirozeného dočištění [17].

Níže je v tabulce Tabulka 1 - Standardní limity [17] a Tabulka 2 - BAT limity [17] porovnání obou druhů limitů stanovených nařízením vlády:

Tabulka 1 - Standardní limity [17]

Kategorie ČOV (EO)[1)7)] nebo velikost aglomerace	$CHSK_{Cr}$		BSK_5		NL		$N\text{-}NH_4^{+}$ *		N_{celk}[2),8)] *		P_{celk}*	
	p[3)]	m[4)]	p[3)]	m[4)]	p[3)]	m[4)]	průměr[5)]	m[4),6)]	průměr[5)]	m[4),6)]	průměr[5)]	m[4)]
<500	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
500–2000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2001–10000	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3	8
10001–100000	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
> 100000	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

Tabulka 2 - BAT limity [17]

Kategorie ČOV [EO]	Nejlepší dostupná technologie	$CHSK_{Cr}$			BSK_5			NL			$N\text{-}NH_4^+$			N_{celk}			P_{celk}		
		koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]	koncentrace		účinnost [%]
		p $mg \cdot l^{-1}$	m $mg \cdot l^{-1}$		p $mg \cdot l^{-1}$	m $mg \cdot l^{-1}$		p $mg \cdot l^{-1}$	m $mg \cdot l^{-1}$		prům $mg \cdot l^{-1}$	m $mg \cdot l^{-1}$		prům $mg \cdot l^{-1}$	m $mg \cdot l^{-1}$		prům mg/l	m mg/l	
<500	Nízko až středně zatěžovaná aktivace nebo biofilmové reaktory	110	170	75	30	50	85	40	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500-2000	Nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací	75	140	75	22	30	85	25	30	12	20	75	-	-	-	-	-	-	-
2001 - 10000	Nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací a se simultánním srážením fosforu + mikrosíta či jiná filtrace	70	120	80	18	25	90	20	30	8	15	80	-	-	-	2	5	75	
10001 - 100000	Nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutrientů +terciární stupeň včetně srážení fosforu eventuelně dávkování externího substrátu	60	100	80	14	20	90	18	25	-	-	-	14	25	70	1,5	3	80	
> 100000	Nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutrientů + terciární stupeň včetně srážení fosforu, dávkování externího substrátu	55	90	85	10	15	95	14	20	-	-	-	10	16	75	0,7	2	85	

Porovnání tabulek standardních a BAT limitů ukazuje, že nejvýraznější rozdíly se týkají ukazatelů dusíku (N_{celk}) a fosforu (P_{celk}). To odpovídá obecnému důrazu legislativy na omezení eutrofizačního zatížení recipientů. Na tomto místě se však stále jedná o obecný legislativní rámec, nikoli o požadavky formulované specificky pro krasová území. U BSK_5 a CHSK nejsou limity snížené tak drasticky jako u dusíku a fosforu. Jedná se spíše o celkovou stabilizaci, důvodem je to, že už standardní limity tyto ukazatele redukují velmi efektivně. Pokud bychom chtěli výrazně snižovat BSK_5 a CHSK, bylo by to hodně neefektivní vůči investičním nákladům a reálné ekologické změně.

Na základě výše uvedeného porovnání a s ohledem na zranitelnost krasového kolektoru se v této práci uvažuje, že parametry odpovídající BAT limitům mohou pro CHKO Moravský kras představovat vhodnější referenční úroveň než obecné emisní standardy. Momentálně je u většiny ČOV v oblasti či v oblastech přispívajících dodržován pouze standardní limit ukazatelů. V podmínkách Moravského krasu se jako vhodné jeví podporovat intenzifikaci, modernizaci a výstavbu nových ČOV, včetně rozvoje oddílných stokových systémů, s cílem omezit vypouštění znečištění do tohoto citlivého území. U nových nebo modernizovaných ČOV v krasových oblastech lze považovat za žádoucí dosažení alespoň parametrů odpovídajících BAT limitům, případně přísnějších požadavků stanovených vodoprávním úřadem, pokud to odpovídá charakteru recipientu a míře zranitelnosti území.

2.5 VYBRANÉ MIKROPOLUTANTY

Vedle standardních ukazatelů komunálního znečištění představují v posledních letech stále významnější problém mikropolutanty, tedy látky přítomné v odpadních vodách v nízkých koncentracích, avšak s potenciálně významnými ekologickými účinky. Tyto látky nejsou běžně sledovány v rámci rutinního monitoringu ČOV a jejich přítomnost se neprojevuje změnami základních ukazatelů, jako jsou BSK_5, CHSK nebo nerozpuštěné látky. Tyto polutanty jsou běžné procesy mechanicko-biologických ČOV schopny vyčistit pouze částečně, a tudíž dochází k malé, ale dlouhodobé akumulaci znečištění

v recipientech. Mikropolutanty představují širokou a chemicky velmi rozdílnou skupinu látek, které se ve vodním prostředí vyskytují zpravidla ve stopových koncentracích kolem $\mu g \cdot l^{-1}$ až $ng \cdot l^{-1}$. Do této skupiny se řadí zejména léčiva, hormony, přípravky osobní péče a kosmetické látky, pesticidy, průmyslové chemikálie, látky v domácnosti, obecně mikro- a nanočástice jiných materiálů. Problém s mikropolutanty nastává kvůli jejich perzistenci, schopnosti transformace na další produkty, bioaktivitě a možném působení nežádoucích účinků na vodní prostředí [18; 19].

Mikropolutanty se do komunálních odpadních vod dostávají z různých plošných a bodových zdrojů. Významnou roli hrají primárně domácnosti, zdravotnická zařízení a provozy služeb, odkud se do stokové sítě dostávají zejména rezidua léčiv po vyloučení lidmi nebo zvířaty, složky kosmetických a hygienických přípravků a další perzistentní látky využívané v běžném životě. V případě pesticidů je třeba kromě přímého vstupu z antropogenní činnosti zohlednit i plošné splachy ze zemědělských a jiných ploch. Tyto plochy mohou být při srážkových událostech zachyceny jednotnou nebo dešťovou kanalizací a tím odváděny do recipientů nebo na přítok do ČOV. Po vstupu na ČOV dochází pouze k částečnému odstranění těchto látek, takže odtok z ČOV také představuje jeden ze zdrojů vstupu mikropolutantů do vodních útvarů. V rámci kanalizační sítě může docházet k vypouštění mikropolutantů do vodních útvarů za stavu poruch, odlehčování na jednotné stoce nebo netěsnosti systému bez aspoň částečného předčištění na ČOV. U mikroplastů je situace obdobná, protože do odpadní vody vstupují zejména z umělých textilií, kosmetických přípravků, hygienických produktů a degradací plastových materiálů [19; 20].

Pro potřeby této práce jsou dále podrobněji rozebrány tři skupiny mikropolutantů, které jsou v komunálních odpadních vodách nejrelevantnější z hlediska výskytu a environmentálních rizik.

Pesticidy

Samostatná pozornost je dále věnována pesticidům, protože představují významnou skupinu mikropolutantů, která zahrnuje především herbicidy, insekticidy a fungicidy. Hlavními zdroji pesticidů jsou zemědělství, ale i městské a komunální vody z důvodu údržby zelených ploch, údržba průmyslových areálů, ochrana veřejného zdraví a postřik plodin mimo zemědělství. Do stokové sítě se mohou dostávat také při srážkách splachem z ploch, kde jsou tyto látky využívány. Ve stokové síti a na ČOV se pesticidy vyskytují ve směsích s dalšími mikropolutanty, přičemž jejich chování je ovlivněno chemickými vlastnostmi skupiny látek, ve které se nacházejí. Konvenční mechanicko-biologické procesy obvykle nezajišťují jejich spolehlivé odstranění; naopak bylo opakovaně prokázáno, že účinnost odstranění je často nízká a značně proměnlivá, přičemž u některých látek byly v odtocích z ČOV zjištěny koncentrace srovnatelné nebo dokonce vyšší než na přítoku. Jako příklad látek, které se často vyskytují ve vysokých koncentracích jsou diazinon (insekticid) a diuron (herbicid), dle studie z roku 2013 byly v měřených vzorkách obsaženy na přítoku na ČOV v 96 % a 88 % vzorků v koncentracích dosahujících až 10násobek ostatních látek. Po průchodu ČOV se pesticidy dostávají do recipientů, kde mohou představovat významné riziko pro vodní ekosystémy. Závažné jsou zejména jejich toxické účinky na řasy, bezobratlé a ryby, přičemž ekologický význam nezávisí pouze na koncentraci, ale také na perzistenci, četnosti výskytu a směsném působení více látek současně. U odtoků z ČOV bylo prokázáno, že pesticidy mohou zvyšovat toxicitu toku za vyústěním z ČOV a negativně ovlivňovat strukturu společenstev vodních bezobratlých i funkční procesy v toku, například rozklad organické hmoty. Z hlediska ochrany vodních útvarů je proto nutné pesticidy chápat nejen jako klasické difuzní znečištění zemědělské krajiny, ale také jako relevantní složku komunálních a městských odpadních vod [21; 22].

Reziduální léčiva

Reziduální léčiva představují jednu z nejvýznamnějších skupin mikropolutantů v komunálních odpadních vodách. Do vodního prostředí vstupují především po humánní a veterinární spotřebě, kdy jsou do kanalizace vylučována v nezměněné formě nebo jako částečně látkově přeměněné, případně se do odpadních vod dostávají také nesprávnou likvidací nepoužitých léčiv. Na obrázku Obrázek 3 - Schéma pohybu léčiv, osobní hygieny a kosmetiky v prostředí [23] lze vidět pohyb této skupiny mikropolutantů v prostředí. V komunálních odpadních vodách a odtocích z čistíren odpadních vod jsou běžně detekovány zejména analgetika a protizánětlivá léčiva, antibiotika, antiepileptika, beta-blokátory, lipid-regulující látky nebo rentgenové kontrastní látky. Chování těchto sloučenin na čistírnách odpadních vod je značně rozdílné a závisí především na jejich biologické rozložitelnosti a sorpci na kalu. Zatímco některá léčiva se v biologickém stupni odbourávají relativně dobře, jiná jsou vůči konvenčnímu mechanicko-biologickému čištění vysoce rezistentní; jako typický příklad perzistentní látky je často uváděn carbamazepin (lék proti epilepsii), zatímco například ibuprofen nebo ketoprofen bývají biologicky rozkládány ve vyšší míře. Současně však může u části léčiv docházet i k opačnému jevu, kdy jsou na odtoku z ČOV zjišťovány koncentrace srovnatelné nebo vyšší než na přítoku, například v důsledku transformace částečně látkově přeměněných látek a sloučených forem zpět na mateřské sloučeniny nebo jejich uvolnění z částic během biologického čištění. Ve vodních útvarech pak reziduální léčiva představují riziko zejména z hlediska chronické toxicity, endokrinních a subletálních účinků, směsného působení více látek současně a v případě antibiotik také z hlediska rozvoje antimikrobiální rezistence [18; 24; 25].

Kosmetické přípravky a přípravky osobní péče

Kosmetické přípravky a přípravky osobní péče představují významnou skupinu mikropolutantů, které jsou do vodního prostředí uvolňovány především v důsledku každodenního používání v domácnostech. Na obrázku

Obrázek 3 - Schéma pohybu léčiv, osobní hygieny a kosmetiky v prostředí [23]

lze vidět pohyb této skupiny mikropolutantů v prostředí. Do této skupiny patří zejména konzervanty, dezinfekční a antiseptické látky, repelenty, syntetické vůně a UV filtry. Na rozdíl od léčiv jsou tyto látky často aplikovány přímo na povrch těla nebo používány při mytí, koupání a hygieně, a proto vstupují do stokové sítě ve značné míře již v nezměněné podobě. Hlavní cestou jejich přestupu do vodních útvarů jsou odtoky z ČOV. Zatímco některé sloučeniny, například parabeny, jsou za aerobních podmínek poměrně dobře biologicky rozložitelné, jiné látky, zejména triclosan (biocid), triclocarban (biocid), syntetické vůně a některé UV filtry, mohou v odtocích z ČOV přetrvávat a následně kontaminovat povrchové i podzemní vody. Ve vodních útvarech mohou tyto látky působit toxicky na řasy, bezobratlé a ryby, některé vykazují endokrinní účinky, schopnost bioakumulace nebo dlouhodobé perzistence, a proto představují relevantní riziko i při výskytu ve stopových koncentracích [23; 26].

Mikroplasty

Mikroplasty jsou pevné, ve vodě nerozpustné částice polymerních materiálů o velikosti menší než 5 mm. Podle původu se dělí na primární mikroplasty, které jsou do této velikosti vyráběny cíleně, a sekundární mikroplasty, vznikající rozpadem větších plastových předmětů vlivem mechanického, chemického a biologického zvětrávání. Do odpadních vod vstupují zejména z přípravků osobní péče, syntetických textilií, pracích a čisticích procesů, oděru pneumatik, povrchových splachů a degradace plastových materiálů, přičemž čistírny odpadních vod představují hlavní uzlové místo jejich přenosu do vodního prostředí. Přestože běžné i pokročilejší čistírenské technologie dokážou zachytit značnou část mikroplastů, jejich odstranění není úplné, takže část přechází do odtoku a další významný podíl se akumuluje v čistírenském kalu. Ve vodních útvarech představují mikroplasty problém nejen jako fyzikální částice, které mohou být přijímány vodními organismy, ale také jako nosiče dalších kontaminantů, například aditiv, persistentních organických polutantů, těžkých kovů nebo mikroorganismů. Jejich účinky

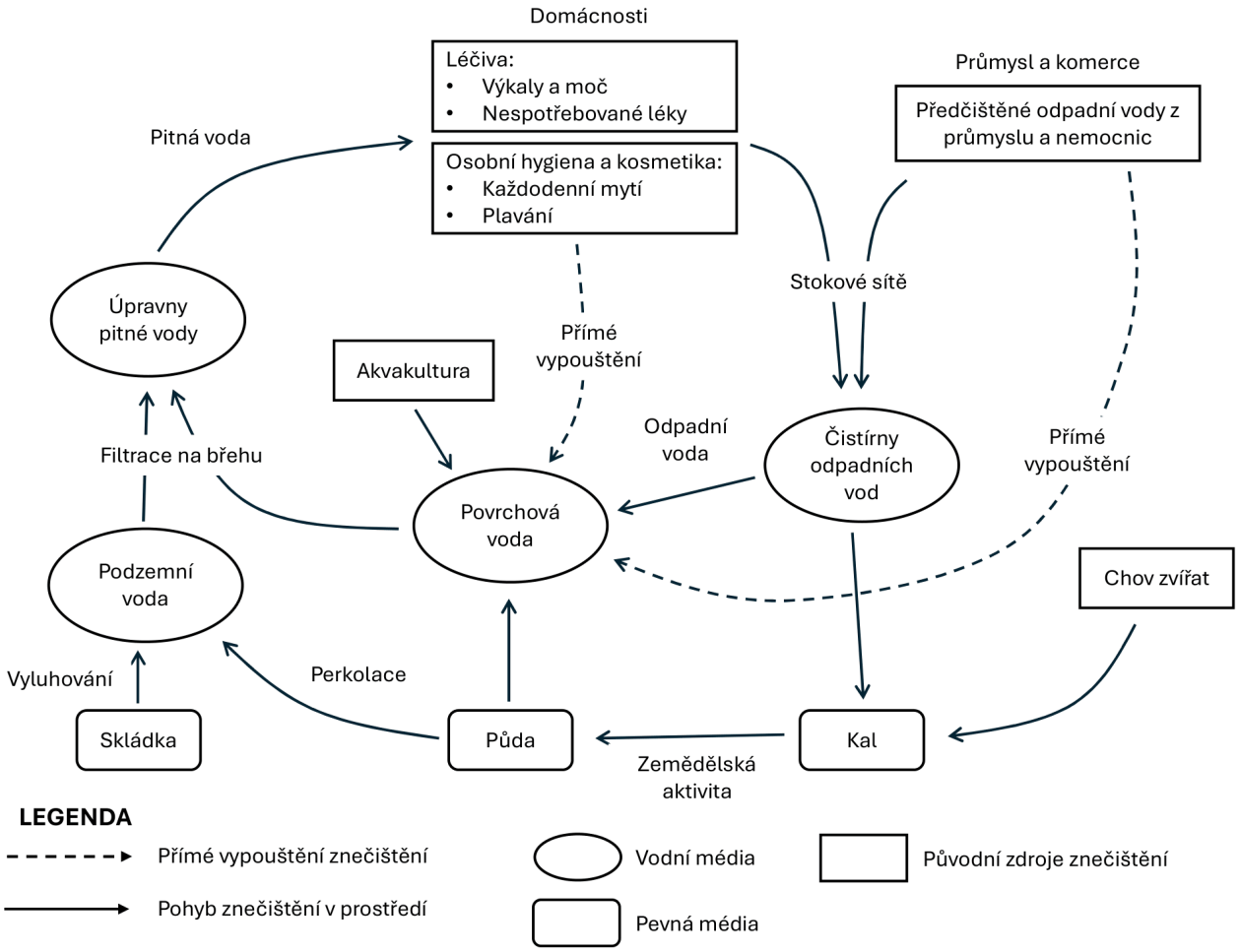
proto zahrnují mechanické poškození, změny příjmu potravy, možnost bioakumulace navázaných látek a potenciální přenos toxických či patogenních složek v potravních řetězcích. Z hlediska ochrany vodních útvarů tak mikroplasty nepředstavují pouze nový typ znečištění, ale i médium, které může zvyšovat mobilitu a účinek dalších škodlivin ve vodním prostředí [27; 28].

Dopady mikropolutantů ve vodních útvarech

Dopady mikropolutantů se projevují na úrovni jednotlivých organismů i celých vodních ekosystémů. U reziduálních léčiv a dalších biologicky aktivních látek je významná především chronická expozice, která může vést k poruchám reprodukce, změnám růstu a vývoje, narušení endokrinní regulace nebo ke změnám fyziologických funkcí vodních organismů. U antibiotik je navíc zmiňováno riziko podpory antimikrobiální rezistence v prostředí. Pesticidy jsou spojovány zejména s toxickými účinky na řasy, plankton, bentické bezobratlé a ryby, přičemž mohou ovlivňovat nejen druhové složení společenstev, ale i funkční procesy vodních ekosystémů. Látky z kosmetických a hygienických přípravků mohou vykazovat ekotoxické, endokrinní a bioakumulační účinky, přičemž některé z nich přetrvávají ve vodním prostředí i po průchodu čistírnou odpadních vod. Mikroplasty pak představují specifický problém tím, že působí nejen jako samostatné částice přijímané organismy, ale současně i jako nosiče dalších kontaminantů, které mohou být na jejich povrch sorbovány a dále transportovány vodním prostředím [18; 22; 26; 27].

V krasových oblastech se význam těchto dopadů dále zvyšuje v důsledku specifických hydrogeologických podmínek. Typická je zde rychlá infiltrace, krátká doba zdržení vody v horninovém prostředí a omezená schopnost přirozeného dočištění vod, takže mikropolutanty mohou být do krasového kolektoru transportovány s menší možností přirozeného útlumu než v jiných typech horninového prostředí. Právě proto jsou krasové kolektory považovány za mimořádně zranitelné vůči antropogennímu znečištění a

dostupné poznatky ukazují, že se v nich poměrně často vyskytují zejména farmaceutika a pesticidy. Další věcí důležitou pro krasové oblasti je jejich často specifické složení a diverzita organismů v podzemních vodních útvarech. Tyto organismy jsou z většiny chráněny z důvodu vysoké náchylnosti na antropogenní znečištění a kvůli vstupování mikropolutantů do krasových vodních útvarů dochází k jejich vyhynutí [12].



Obrázek 3 - Schéma pohybu léčiv, osobní hygieny a kosmetiky v prostředí [23]

3 LEGISLATIVNÍ RÁMEC A IDENTIFIKACE RIZIKOVÝCH POLUTANTŮ

3.1 PŘEHLED A NEDOSTATKY LEGISLATIVY OCHRANY VOD V KRASOVÝCH OBLASTECH ČR

V České republice neexistuje specifická norma nebo směrnice zaměřená výhradně na kvalitu povrchových a podzemních vod v krasových oblastech. Normy pro kvalitu povrchových a podzemních vod v krasových oblastech jsou zahrnuty v rámci obecných směrnic týkajících se vodního prostředí.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)

Představuje základní právní rámec ochrany povrchových a podzemních vod v České republice. Jeho hlavním cílem je chránit vody jako složku životního prostředí, regulovat jejich využívání, předcházet znečištění a zmírňovat negativní dopady lidské činnosti na vodní ekosystémy. Vodní zákon upravuje nakládání s vodami, stanovuje povinnosti při vypouštění odpadních vod a definuje požadavky na povolení k nakládání s vodami, včetně povinností provozovatelů čistíren odpadních vod. Součástí zákona je také vymezení ochranných pásem vodních zdrojů, zásady pro hospodaření v povodích a opatření pro ochranu před povodněmi a suchem. Zákon transponuje do české legislativy požadavky rámcové směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES (WFD) a stanovuje pravidla pro dosažení dobrého ekologického stavu vod. Současně zahrnuje nástroje státní vodoprávní kontroly a sankce za porušení povinností. Tento zákon má 2 přílohy. První příloha je seznam nebezpečných a závadných látek a druhá příloha obsahuje poplatky za odebrané množství podzemní vody a poplatky za vypouštění odpadních vod do vod podzemních. Seznam výše zmíněných látek lze vidět v tabulce Tabulka 3 - Zvláště nebezpečné a nebezpečné látky dle Zákona č. 254/2001 Sb. [29] [29].

Tabulka 3 - Zvláště nebezpečné a nebezpečné látky dle Zákona č. 254/2001 Sb. [29]

Kategorie	Skupina látek	Charakteristika / příklady
Zvlášť nebezpečné závadné látky	1. Organohalogenové sloučeniny	Látky obsahující halogeny, popř. látky schopné tyto sloučeniny tvořit ve vodním prostředí
	2. Organofosforové sloučeniny	Chemické látky obsahující fosfor v organické vazbě
	3. Organocínové sloučeniny	Sloučeniny cínu s výraznou toxicitou pro vodní organismy
	4. Karcinogenní, mutagenní a endokrinně aktivní látky	Látky ovlivňující hormonální systém, reprodukci a genetickou informaci organismů
	5. Rtuť a její sloučeniny	Vysoce toxické a bioakumulativní látky
	6. Kadmium a jeho sloučeniny	Toxické kovy s dlouhodobým účinkem na ekosystémy
	7. Persistentní minerální oleje a ropné uhlovodíky	Látky s dlouhou dobou setrvání v prostředí
	8. Persistentní syntetické látky	Látky setrvávající ve vodním prostředí, schopné sedimentace nebo suspenze
Nebezpečné závadné látky	1. Sloučeniny kovů a metaloidů	Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Se, As, Sb, Mo, Ti, Sn, Ba, Be, B, U, V, Co, Tl, Te, Ag
	2. Biocidy a jejich deriváty	Biocidní látky neuvedené mezi zvlášť nebezpečnými
	3. Látky ovlivňující chuť a vůni	Sloučeniny zhoršující senzorickou kvalitu vody a vodních produktů
	4. Organické sloučeniny křemíku	Toxické nebo persistentní sloučeniny Si
	5. Fosfor a jeho anorganické sloučeniny	Elementární fosfor a anorganické formy fosforu
	6. Nepersistentní ropné látky	Minerální oleje a uhlovodíky ropného původu
	7. Fluoridy	Anorganické sloučeniny fluoru
	8. Látky narušující kyslíkovou rovnováhu	Amonné soli, dusitany
	9. Kyanidy	Vysoce toxické sloučeniny kyanidu
	10. Sedimentovatelné tuhé látky	Pevné částice zhoršující stav povrchových vod

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech

Stanovuje podrobná pravidla pro ochranu povrchových vod a určuje limity znečištění, které je možné vypouštět do vodního prostředí. Toto nařízení definuje ukazatele a nejvyšší přípustné hodnoty pro odpadní vody vypouštěné do vod povrchových nebo kanalizace, včetně limitů pro základní znečišťující látky (BSK_5, CHSK, amoniakální dusík, celkový dusík, celkový fosfor, nerozpuštěné látky) a vybrané nebezpečné a zvlášť nebezpečné látky. Současně rozlišuje velikostní kategorie zdrojů znečištění podle EO (ekvivalentních obyvatel) a stanovuje zpřísněné požadavky pro citlivé oblasti, specifické vodní útvary a chráněná území. Nařízení rovněž upravuje podmínky pro sledování kvality vypouštěných vod, rozsah povinného monitoringu a způsob vyhodnocování ukazatelů znečištění. Slouží jako závazný podklad při stanovování podmínek vodoprávních rozhodnutí pro provozovatele čistíren odpadních vod a při kontrole dodržování limitů [17].

Toto nařízení přímo nespecifikuje oddílné limity pro Moravský kras nebo krasové oblasti obecně, ale zohledňuje takzvané „Citlivé oblasti“. V rámci nařízení se jedná o každý vodní útvar na území ČR. To se promítá do povinností obcí a ČOV v okolí, které vypouštějí odpadní vody do hydrologicky propojených povodí. Přestože jsou zde zmiňovány citlivé oblasti, legislativní limity zůstávají na celém území České republiky stejné, a jsou proto pro krasové oblasti nedostatečné. Na základě provedené analýzy se jeví jako vhodné zvážit stanovení specifických limitů pro chráněná a hydrogeologicky citlivá území, včetně CHKO Moravský kras, s ohledem na jejich konkrétní charakteristiky. V rámci této práce se jedná o nejdůležitější nařízení pro vypouštění komunálních vod zpět do přírody.

Vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích)

Stanovuje podrobná pravidla pro projektování, provoz, evidenci a technické požadavky na vodovodní a kanalizační infrastrukturu. Vyhláška vymezuje způsob stanovování kapacity vodovodů a kanalizací, podmínky jejich připojování, požadavky na technické řešení čistíren odpadních vod a obsah povinností vlastníků a provozovatelů těchto zařízení. Upravuje také vedení provozní dokumentace, způsob měření množství vody a odpadních vod, tvorbu kanalizačních řádů a strukturu plánů rozvoje vodovodů a kanalizací (PRVK). Součástí vyhlášky je rovněž podrobné členění kanalizačních systémů, definice povinností při provozování stokových sítí a stanovení požadavků na ochranu vodních zdrojů v souvislosti s odváděním a čištěním odpadních vod. Vyhláška tak vytváří technicko-provozní rámec pro správu veřejných vodovodů a kanalizací a zajišťuje, aby jejich provoz odpovídal hygienickým, bezpečnostním a environmentálním požadavkům stanoveným zákonem. Pro téma krasových vod je tato vyhláška důležitá kvůli části 9 (§21-23). Tato část definuje ukazatele jakosti vody odebrané z povrchových vodních zdrojů nebo podzemních zdrojů pro účely úpravy na vodu pitnou [30].

Vyhláška č. 98/2011 Sb., o způsobu hodnocení stavu útvarů povrchových vod, způsobu hodnocení ekologického potenciálu silně ovlivněných a umělých útvarů povrchových vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu povrchových vod

Stanovuje metodický postup pro hodnocení chemického a kvantitativního stavu povrchových a podzemních vod v České republice. Vymezuje sledované ukazatele jakosti, způsob jejich vyhodnocování a kritéria pro zařazení vodních útvarů do tříd stavu. U podzemních vod se zaměřuje zejména na koncentrace znečišťujících látek, trendy jejich vývoje a na posouzení vlivů lidské činnosti, včetně bodových a plošných zdrojů znečištění. Vyhláška poskytuje podklad pro plánování opatření v rámci plánů povodí podle rámcové směrnice o

vodách (2000/60/ES). Vyhláška se týká oblasti krasů pouze z hlediska hodnocení kvality podzemních vod, což může napomáhat k identifikaci zdrojů znečištění [31].

Vyhláška č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod

Vyhláška upravuje vymezení tzv. zranitelných oblastí podle nitrátové směrnice Rady 91/676/EHS a stanovuje akční program k omezení znečištění vod dusičnany ze zemědělských zdrojů. Definuje pravidla pro hospodaření se statkovými a minerálními hnojivy, skladování hnojiv, aplikaci dusíkatých látek a další opatření zaměřená na ochranu povrchových a podzemních vod před nadměrným obsahem dusičnanů. Vyhláška rovněž stanovuje časová omezení aplikace hnojiv, maximální přípustné dávky dusíku a povinnosti evidence hnojení. Vyhláška přímo nespecifikuje krasové oblasti, ale i tak je tato vyhláška velice důležitá z důvodu rychlé infiltrace hnojiv a dusičnanů v nich obsažených. Hnojení je aplikováno plošně a díky absenci přirozené filtrace půdy se do podzemí dostává vysoká koncentrace dusičnanů [32].

Nařízení vlády č. 71/2003 Sb., o stanovení povrchových vod vhodných pro život a reprodukci původních druhů ryb a dalších vodních živočichů a o zjišťování a hodnocení stavu jakosti těchto vod

Nařízení je pro krasové oblasti významné zejména proto, že ekologický stav povrchových toků v krasu je úzce závislý na kvalitě podzemních krasových vod, které tyto toky napájejí. Znečištění komunálními odpadními vodami, které se v krasu rychle šíří bez samočištění, se může projevit zvýšenými koncentracemi amoniaku, dusitanů nebo snížením obsahu kyslíku, což ohrožuje citlivé druhy ryb a bezobratlých. Nařízení tak nepřímo zdůrazňuje potřebu vysoké kvality vyčištěných odpadních vod v krasových oblastech, protože ekologická stabilita povrchových toků je zde přímo svázána s podzemním krasovým kolektorem [33].

Nařízení vlády č. 83/2019 Sb., o Chráněné krajinné oblasti Moravský kras

Nařízení stanovuje poslání a předmět ochrany CHKO Moravský kras, do kterého patří zachování a obnova přírodních hodnot, včetně hydrologických funkcí povrchových i podzemních vod a zachování biologické i geologické rozmanitosti. Definuje rozdělení oblasti do 4 zón odstupňované ochrany přírody. V přílohách nařízení se nachází vymezení území včetně přehledné mapy, seznamu katastrálních území a pozemků tvořících hranici oblasti. Nařízení je pojato velice obecně a neobsahuje žádné úpravy limitů znečištění či přísnější požadavky na provoz vodohospodářské technické infrastruktury [34].

Pokud proběhne úprava české legislativy v rámci citlivých oblastí, mělo by být i toto nařízení doplněno o povinnosti dodržovat nově stanovené limity a podmínky citlivých oblastí aplikované přímo na CHKO Moravský kras.

NATURA 2000

NATURA 2000 je celoevropská soustava chráněných území vytvořená za účelem ochrany biologické rozmanitosti a zachování přírodních stanovišť a druhů významných z hlediska Evropské unie. Soustavu tvoří evropsky významné lokality (EVL) a ptačí oblasti (PO), které jsou vymezovány s cílem zajistit příznivý stav chráněných stanovišť a druhů, nikoliv úplné vyloučení lidské činnosti. V rámci NATURA 2000 je CHKO Moravský kras zahrnuta jako evropsky významná lokalita s kódem lokality CZ0624130. NATURA 2000 obsahuje informace o CHKO Moravský kras, jako jsou poloha území a popis ekotopu (geologie, reliéf, pedologie, klima a krajinnou charakteristiku). Součástí je také výpis chráněných živočichů a rostlin vyskytujících se v oblasti [35].

Současný legislativní rámec ochrany vod v České republice vychází primárně z obecně platných limitů znečištění a kategorizace vodních útvarů, které však dostatečně nezohledňují specifické hydrogeologické podmínky krasových a jiných citlivých oblastí. Přestože právní předpisy, zejména nařízení vlády

č. 401/2015 Sb., zavádějí pojem tzv. citlivých oblastí a zpřísněné požadavky na odstraňování živin, jsou tyto limity v praxi aplikovány jednotně na celé území České republiky bez ohledu na míru zranitelnosti konkrétního prostředí. To vede k situaci, kdy legislativa sice formálně zajišťuje ochranu vod, avšak v případě krasových oblastí neposkytuje dostatečnou úroveň ochrany. Nedostatkem je zejména absence specifických emisních limitů a technologických požadavků pro tyto oblasti, stejně jako nedostatečné zohlednění mikropolutantů a reálných provozních podmínek čistíren odpadních vod. Je tedy třeba se zaměřit na zahraniční legislativu, která tato specifika lépe zohledňuje, a to v rámci evropské legislativy a příkladové švýcarské legislativy v následujících kapitolách.

3.2 POŽADAVKY KRASOVÝCH VOD V EVROPSKÉ UNII

Na rozdíl od národních předpisů se evropské právo soustředí především na stanovení environmentálních cílů a principů ochrany vod, nikoliv na detailní technická řešení. Přesto má zásadní význam pro regulaci komunálního znečištění a pro hodnocení stavu vodních útvarů i v citlivých územích, mezi něž krasové oblasti bezpochyby patří. Evropská legislativa stanovuje pouze obecné cíle, detailní aplikace stanovených cílů a principů musí být provedena v rámci členské země.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky

Směrnice vytváří jednotný rámec pro ochranu a udržitelné využívání povrchových a podzemních vod v Evropské unii. Jejím hlavním cílem je dosažení dobrého ekologického a chemického stavu podzemních a povrchových vod. Směrnice zavádí pojem vodního útvaru jako základní jednotky hodnocení dělené na povrchové a podzemní. Směrnice zavádí kombinovaný přístup k regulaci znečištění, který spojuje emisní regulaci (např. komunální odpadní vody) a environmentální standardy kvality vody v recipientu. Konkrétní limity však směrnice nestanovuje, ale odkazuje na jejich úpravu v dalších evropských a národních předpisech. Směrnice klade důraz

na monitoring, prevenci zhoršování stavu vod a dlouhodobou ochranu vodních ekosystémů. Dalším prvkem směrnice je povinnost zpracovávat plány povodí a programy opatření směřujících k environmentálním cílům. Směrnice obecně dává za úkol ochranu povrchových a podzemních vod, vůči bodovému a plošnému znečištění [36].

S ohledem na krasové oblasti je směrnice nezařazuje mezi zvláštní hydrogeologický typ dle Přílohy 2. V krasových oblastech mohou být vodní útvary, specifikované směrnicí, často velice heterogenní a může vznikat paradox toho, že sice v rámci celku může být klasifikován jako dobrý stav, ale v jeho částech (např. ponory nebo jeskynní systémy) může docházet k lokálnímu znečištění. U monitoringu narážíme na podobný problém, kdy je hodnocen na vodní útvary, přičemž v oblastech krasu je to nedostatečné kvůli heterogennímu prostředí. Přes uvedené limity představuje směrnice základní rámcový nástroj ochrany vod, přičemž specifika krasových oblastí musí být řešena na úrovni národní legislativy.

Směrnice o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)

Směrnice upravuje sběr, čištění a vypouštění městských (komunálních) odpadních vod a stanovuje minimální požadavky na úroveň čištění v závislosti na velikosti aglomerace vyjádřené v EO. Směrnice uvádí dvoje hodnoty limitů pro vypouštění, a to pro standardní prostředí a pro citlivé prostředí. Přesné hodnoty stanovené směrnicí můžeme vidět v tabulkách Tabulka 4 - Požadavky na vypouštění z čistíren městských odpadních vod dle SMĚRNICE RADY ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)[37] a v Tabulka 5 - Požadavky na vypouštění z čistíren městských odpadních vod v citlivých oblastech, které podléhají eutrofizaci dle SMĚRNICE RADY ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)[37]. Podle tohoto ukazatele se ukládá povinnost vybudování kanalizačního systému a minimální úrovně čištění. Zavádí povinnost sekundárního (nad 2000 EO), případně terciárního čištění a definuje citlivé oblasti, kde je nutné odstraňovat dusík a fosfor. Směrnice stanovuje základní

emisní limity pro ukazatele jako BSK_5, CHSK a nerozpuštěné látky a ukládá povinnost monitoringu vypouštění i dopadů na recipienty [37].

V krasových oblastech jsou požadavky na čištění vázány primárně na velikost aglomerace (EO), nikoli na zranitelnost prostředí. To je v krasových oblastech problematické, protože i malé obce mohou významně ohrozit podzemní vody. Kras je chráněn pouze nepřímo prostřednictvím vymezení citlivých oblastí, což nepostihuje rychlý transport znečištění v podzemních dutinách a kanálech. Stejně jako u směrnice 2000/60/ES musí být provedena úprava pro jednotlivá území dle národní legislativy.

Vývoj evropské regulace v oblasti městských odpadních vod dále reflektuje přepracované znění směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) ze dne 27. listopadu 2024. Tato směrnice udává cíle pro zlepšení kvality čištění odpadních vod na městských čistírnách. Konkrétní změny týkající se ČOV dle aglomerace jsou zahrnuty v rámci kapitoly Centralizované systémy – mechanicko-biologické ČOV.

Směrnice o ochraně podzemních vod (2006/118/ES)

Směrnice doplňuje rámcovou směrnici o vodách (2000/60/ES) a zaměřuje se na ochranu podzemních vod před znečištěním a zhoršováním jejich stavu. Stanovuje kvalitativní standardy pro podzemní vody, zejména pro dusičnany a pesticidy, a zavádí pojem prahových hodnot, které určují členské státy podle místních podmínek. Přesné hodnoty stanovené směrnicí můžeme vidět v tabulce Tabulka 6 - Normy jakosti podzemní vody dle SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2006/118/ES [38]. Směrnice klade důraz na sledování trendů znečištění, identifikaci jejich nárůstu a přijetí opatření k jejich zvrácení. Tato směrnice je z evropských předpisů nejrelevantnější pro krasová území, avšak ani ona je výslovně nezmiňuje [38].

Tabulka 4 - Požadavky na vypouštění z čistíren městských odpadních vod dle SMĚRNICE RADY ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)[37]

Ukazatel	**Koncentrace**	**Minimální procento úbytku (1)**	**Referenční metoda stanovení**
Biochemická spotřeba kyslíku (BSK5 při 20 °C) bez nitrifikace (2)	25 mg $O_2 \cdot l^{-1}$	70—90 40 podle čl. 4 odst. 2	Homogenizovaný, nefiltrovaný a nevyhnilý vzorek. Stanovení rozpuštěného kyslíku před pětidenní inkubací a po ní při 20 °C ± 1 °C v naprosté tmě. Přídavek inhibitoru nitrifikace.
Chemická spotřeba kyslíku ($CHSK_{Cr}$)	125 mg $O_2 \cdot l^{-1}$	75	Homogenizovaný, nefiltrovaný a nevyhnilý vzorek dichroman draselný.
Nerozpuštěné látky	35 mg·l^{-1} (3)	90 (3)	— Filtrace reprezentativního vzorku membránovým filtrem 0,45 µm. Sušení při 105 °C a zvážení.
	35 mg·l^{-1} podle čl. 4 odst. 2 (nad 10 000 PE)	90 dle čl. 4 odst. 2 (nad 10 000 PE)	— Odstředění reprezentativního vzorku (po dobu nejméně pěti minut při průměrném zrychlení 2 800 až 3 200 g), sušení při 105 °C a zvážení.
	60 mg·l^{-1} podle čl. 4 odst. 2 (2 000 — 10 000 PE)	70 dle čl. 4 odst. 2 (2 000 — 10 000 PE)	

(1) Úbytek ve vztahu k zatížení na vtoku.

(2) Tento ukazatel lze nahradit jiným ukazatelem, a to celkovým obsahem organického uhlíku (TOC) nebo celkovou spotřebou kyslíku (TOD), pokud lze prokázat závislost mezi BSK_5 a náhradním ukazatelem.

(3) Tento požadavek je volitelný.

Tabulka 5 - Požadavky na vypouštění z čistíren městských odpadních vod v citlivých oblastech, které podléhají eutrofizaci dle SMĚRNICE RADY ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)[37]

Ukazatel	**Koncentrace**	**Minimální procento úbytku (1)**	**Referenční metoda stanovení**
Celkový fosfor	2 $mg \cdot l^{-1}$ (10 000-100 000 PE)	80	Molekulární absorpční spektrofotometrie
	1 $mg \cdot l^{-1}$ (více než 100 000 PE)		
Celkový dusík (2)	15 $mg \cdot l^{-1}$ (10 000-100 000 PE) (3)	70—80	Molekulární absorpční spektrofotometrie
	10 $mg \cdot l^{-1}$ (10 000-100 000 PE) (3)		

(1) Úbytek ve vztahu k zatížení na vtoku.

(2) Celkovým dusíkem se rozumí součet dusíku stanoveného Kjeldahlovou metodou (organický a amoniakální dusík), dusičnanového dusíku a dusitanového dusíku.

(3) Těmito hodnotami koncentrací se rozumí roční průměry podle přílohy I D odst. 4 písm. c). Požadavky na dusík však mohou být kontrolovány pomocí denních průměrů, pokud se v souladu s ustanovením přílohy I D odst. 1 prokáže, že je zajištěna stejná úroveň ochrany. V tomto případě nesmí denní průměr přesáhnout koncentraci 20 $mg \cdot l^{-1}$ celkového dusíku pro všechny vzorky, jestliže teplota na výtoku z biologického reaktoru je vyšší nebo rovna 12 °C. Teplotní podmínky mohou být nahrazeny časovým omezením provozu při zohlednění oblastních klimatických podmínek.

Tabulka 6 - Normy jakosti podzemní vody dle SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2006/118/ES [38]

Znečišťující látka	Normy jakosti
Dusičnany	50 $mg \cdot l^{-1}$
Účinné látky v pesticidech včetně jejich významných metabolitů, produktů rozkladu a reakčních produktů ([1])	0,1 $\mu g \cdot l^{-1}$
	0,5 $\mu g \cdot l^{-1}$ (celkem) ([2])
([1]) „Pesticidy“ se rozumějí přípravky na ochranu rostlin ve smyslu článku 2 směrnice 91/414/EHS a biocidní přípravky ve smyslu článku 2 směrnice 98/8/ES. ([2]) „Celkem“ znamená úhrn všech jednotlivých pesticidů, které byly zjištěny a jejichž množství bylo změřeno během monitorovacího postupu, včetně jejich významných metabolitů, produktů rozkladu a reakčních produktů.	

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/105/ES ze dne 16. prosince 2008 o normách environmentální kvality v oblasti vodní politiky

Stanovuje environmentální standardy kvality (EQS) pro prioritní a prioritně nebezpečné látky v povrchových vodách. Určuje mezní koncentrace znečišťujících látek ve vodě, sedimentech a biotě a vytváří nástroj pro hodnocení chemického stavu povrchových vod. Směrnice doplňuje rámcovou směrnici o vodách a slouží především ke kontrole toxické, perzistentní a bioakumulativní látky, jako jsou těžké kovy, pesticidy nebo průmyslové organické sloučeniny [39].

Ve vztahu ke krasovým oblastem směrnice slouží spíše jako nástroj zpětné kontroly dopadů znečištění než jako preventivní ochrana krasového kolektoru, protože se zaměřuje pouze na povrchové vody.

3.3 ŠVÝCARSKO

Švýcarský právní rámec v oblasti ochrany vod je postaven především na Federálním zákoně o ochraně vod (Water Protection Act / Gewässerschutzgesetz, GSchG) a na jeho prováděcím předpisu Vyhlášce o ochraně vod (Gewässerschutzverordnung, GSchV). Tyto normy definují cíle ochrany povrchových i podzemních vod, pravidla pro prevenci znečištění,

monitorování kvality vod a povinnosti provozovatelů zdrojů znečištění; konkretizují rovněž limity a požadavky (vč. příloh/EQS) a nástroje pro řízení vypouštění odpadních vod [40].

Veškeré technické požadavky (včetně limitů pro vybrané látky a monitorovacích režimů) jsou v praxi specifikovány právě v GSchV (včetně příloh s požadavky na kvalitu) a v dalších prováděcích dokumentech. V rámci limitů vypouštění Švýcarsko řeší obdobně jako směrnice evropské unie, kdy rozděluje oblasti na standardní a citlivé. Přesné hodnoty nastavené zákonem můžeme vidět v tabulce Tabulka 7 - Obecné požadavky na vypouštění komunálních odpadních vod do vod dle 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV) [40] a v Tabulka 8 - Požadavky na vypouštění komunálních odpadních vod v citlivých oblastech dle 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV) [40]. Z hlediska politiky k odpadním vodám Švýcaři kombinují právní požadavky s dlouhodobými programy modernizace ČOV (např. programy pro odstranění mikro-polutantů — plánované úpravy pro cca 130 ČOV tak, aby dosahovaly vysoké účinnosti proti reziduím léčiv, pesticidů apod.). Tento přístup představuje cílenou implementaci pokročilých technologií na národní úrovni [41; 42].

Tabulka 7 - Obecné požadavky na vypouštění komunálních odpadních vod do vod dle 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV) [40]

No.	Parametr	Požadavky
1	NL_{celk}	Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou menší než 10 000 EO platí: – koncentrace na odtoku: 20 $mg \cdot l^{-1}$ Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou 10 000 EO a více platí: – koncentrace na odtoku: 15 $mg \cdot l^{-1}$
2	CHSK	Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou menší než 10 000 EO platí: – koncentrace na odtoku: 60 $mg \cdot l^{-1}$ O_2 – účinnost odstranění vzhledem k surové vodě: 80 % Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou 10 000 EO a více platí:

		– koncentrace na odtoku: 45 mg·l^{-1} O_2 – účinnost odstranění vzhledem k surové vodě: 85 %
3	TOC (Rozpuštěný organický uhlík)	Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou 2 000 EO a více platí: – koncentrace na odtoku: 10 mg·l^{-1} – účinnost odstranění: 85 %, vyjádřená jako: $100 \times (1 - \frac{mg\ TOC\ ve\ vyčištěné\ vodě}{mg\ TOC\ v\ surové\ odpadní\ vodě})$ Pokud není hodnota splněna, příslušný orgán posoudí látky, určí jejich původ a v případě potřeby stanoví požadované postupy podle příloh 3.2 a 3.3.
4	Průhlednost (Snellenova metoda)	30 cm
5	NH_4^+-N + NH_3-N	Pokud jsou koncentrace amonného dusíku v odpadní vodě potenciálně škodlivé pro jakost vodního toku, platí při teplotě odpadní vody vyšší než 10 °C: – koncentrace na odtoku: 2 mg·l^{-1} N – účinnost odstranění: 90 %, vyjádřená jako $100 \times (1 - \frac{mg\ TOC\ ve\ vyčištěné\ vodě}{mg\ TOC\ v\ surové\ odpadní\ vodě})$ V těchto případech musí být nitrifikace prováděna po celý rok. Poznámka: Kjeldahlův dusík je součet dusíku vázaného v amonném, amoniaku a organickém dusíku.
6	NO_2^--N	0,3 mg·l^{-1} N (směrná hodnota)
7	Adsorbovatelný organicky vázaný halogen (AOX)	0,08 mg·l^{-1} X Pokud není hodnota splněna, příslušný orgán posoudí látky, určí jejich původ a v případě potřeby stanoví požadované postupy podle příloh 3.2 a 3.3.
8	Organické látky znečišťující vody již v nízkých koncentracích (organické stopové látky)	Účinnost odstranění vzhledem k surové odpadní vodě, měřená na vybraných látkách, musí dosahovat 80 % pro odpadní vody z: – ČOV s 80 000 a více připojenými obyvateli;

		– ČOV s 24 000 a více připojenými obyvateli v povodí jezer; kanton může povolit výjimky, pokud je přínos odstranění pro životní prostředí a zásobování pitnou vodou zanedbatelný; – ČOV s 8 000 a více připojenými obyvateli, které vypouštějí do vodního toku obsahujícího více než 10 % odpadní vody neupravené na odstranění stopových látek; kanton určí tyto ČOV v rámci plánu povodí; – ostatních ČOV s 8 000 a více připojenými obyvateli, pokud je odstranění požadováno z důvodu zvláštních hydrogeologických podmínek; Příslušný orgán stanoví v nařízení látky používané k hodnocení účinnosti a způsob jejího výpočtu.
9	BSK_5, s inhibicí nitrifikace	Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou menší než 10 000 EO, u nichž mají koncentrace BSK_5 nepříznivý vliv na jakost vodního toku, platí: – koncentrace na odtoku: 20 $mg \cdot l^{-1}$ O_2 – účinnost odstranění vzhledem k surové vodě: 90 % Pro odpadní vody z ČOV s kapacitou 10 000 EO a více, u nichž mají koncentrace BSK_5 nepříznivý vliv na jakost vodního toku, platí: – koncentrace na odtoku: 15 $mg \cdot l^{-1}$ O_2 – účinnost odstranění vzhledem k surové vodě: 90 %

Tabulka 8 - Požadavky na vypouštění komunálních odpadních vod v citlivých oblastech dle 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV) [40]

No.	Parametr	Požadavky
1	P_{celk}	Pro odpadní vody z ČOV: – nacházejících se v povodí jezer, – umístěných na vodních tocích pod jezerem, pokud je to nezbytné pro ochranu vodního toku, a – s kapacitou 10 000 EO a více, umístěných na vodních tocích v povodí Rýna pod jezerem, platí následující požadavky: – koncentrace na odtoku: 0,8 $mg \cdot l^{-1}$ P

		– účinnost odstranění vzhledem k surové odpadní vodě: 80 %
2	N_{celk}	U ČOV, pro které není stanovena mezní koncentrace ani požadovaná účinnost odstranění celkového dusíku, musí být provoz zajištěn tak, aby při čištění odpadních vod a zpracování kalů bylo odstraněno co největší množství dusíku. Všechna konstrukční a technologická opatření, která lze realizovat bez výrazných nákladů, musí být provedena; to platí zejména pro ČOV, které již provádějí nitrifikaci.

Co se týče krasových nebo jinak hydrogeologicky citlivých území: Švýcarské předpisy kras výslovně nepojmenovávají jako samostatnou kategorii, nicméně právní ochrana podzemních a povrchových vod, požadavky na EQS (Environmental Quality Standards) a regionální (kantonální) řízení umožňují cílená opatření v citlivých lokalitách — např. zřízení přísnějších ochranných pásem okolo vodárenských zdrojů, požadavky na vyšší stupeň čištění nebo zákaz vsakovacích řešení tam, kde by hrozilo kontaminování zásob pitné vody. V GSchV jsou odděleny dodatečné limity pro citlivé oblasti, které se aplikují i na krasové oblasti a tím pádem tvoří přísnější vypouštěcí limity pro ČOV. V praxi to znamená, že přístup Švýcarska k ochraně vod je kombinací federálních standardů a kantonálních implementací, které mohou být přísnější v oblastech s vysokou zranitelností (např. vodárenská ochranná pásma, krasové vývěry) [40].

3.4 ZHODNOCENÍ LEGISLATIVNÍCH PŘÍSTUPŮ

V následující tabulce je provedeno porovnání českého, evropsko-unijního a švýcarského přístupu, zpracované na základě předchozího zhodnocení legislativ.

Tabulka 9 - Souhrnné porovnání přístupu k legislativě

Kritérium / přístup	Česká republika	Evropská unie	Švýcarsko
Existence specifické legislativy pro kras	**Neexistuje**	**Neexistuje**	**Ano (citlivá oblast)**
Základní právní rámec	Vodní zákon č. 254/2001 Sb., NV č. 401/2015 Sb., vyhl. č. 98/2011 Sb.	Rámcová směrnice o vodách (2000/60/ES), Směrnice o městských OV (91/271/EHS), Směrnice o dusičnanech	Federální zákon o ochraně vod (Gewässerschutzgesetz), prováděcí vyhlášky
Přístup ke krasovým oblastem	Kras posuzován stejně jako běžné vodní útvary	Kras není samostatná kategorie	Kras považován za vysoce zranitelný hydrogeologický systém
Stanovení emisních limitů	Jednotné limity bez ohledu na citlivost území	Minimální harmonizované požadavky	Přísnější limity v citlivých oblastech
Možnost zpřísnění požadavků lokálně	Teoreticky ano, prakticky výjimečně	Ano (členské státy), bez metodické opory	Standardní nástroj ochrany
Důraz na ochranu podzemních vod	Deklarativní („dobrý stav“)	Silný konceptuálně, slabý realizačně	Prioritní ochranný cíl
Přístup k decentralizovaným systémům	Povolené i v krasu (DČOV, septiky)	Neregulováno specificky	Silně omezené nebo zakázané
Mikropolutanty (léčiva)	Samostatně neřeší, pouze v rámci EU	Od roku 2035 zavádění čtvrtého stupně čištění	Aktivní zavádění čtvrtého stupně čištění
Monitoring kvality vod	Omezený, často nesystematický	Požadován, ale obecný	Hustý a cílený monitoring
Koncepční řízení povodí	Fragmentované (PRVKÚK, ÚP, plány povodí)	Povodňové a vodní plány	Integrated Catchment Management
Uplatnění principu prevence	Slabé	Formální	Silné (prevence před sanací)

Z porovnání v tabulce Tabulka 9 - Souhrnné porovnání přístupu k legislativě je patrné, že Česká republika i Evropská unie uplatňují vůči krasovým oblastem převážně obecný legislativní přístup, který neodráží mimořádnou zranitelnost krasových kolektorů. Ochrana vod je založena na plnění obecných emisních a imisních limitů a na deklarovaném cíli dosažení „dobrého stavu vod“, avšak bez zvláštních nástrojů pro krasové prostředí.

Na rozdíl od toho švýcarský přístup vychází z principu předběžné opatrnosti, kdy jsou krasové oblasti považovány za citlivá území. Tomu odpovídají přísnější emisní požadavky, omezení decentralizovaných systémů, zákaz zasakování vyčištěných odpadních vod a systematické zavádění pokročilých technologií čištění, včetně odstraňování mikropolutantů.

Tento rozdíl ukazuje, že současná česká i evropská legislativa neposkytuje dostatečný rámec pro ochranu krasových vodních systémů, a potvrzuje potřebu cíleného zpřísnění požadavků na čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech.

4 CENTRALIZOVANÉ VS. DECENTRALIZOVANÉ SYSTÉMY ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD V OBLASTECH KRASŮ

4.1 CENTRALIZOVANÉ SYSTÉMY – MECHANICKO-BIOLOGICKÉ ČOV

Centralizovaný systém nakládání s komunálními odpadními vodami je založen na jejich soustředěném odvádění z jednotlivých objektů do veřejné kanalizační sítě, která zajišťuje transport odpadních vod na centrální čistírnu odpadních vod (ČOV). Kanalizační systém může být řešen jako jednotný nebo oddílný a v závislosti na morfologii terénu je doplněn čerpáním. Na ČOV probíhá čištění odpadních vod ve více navazujících stupních, jejichž cílem je odstranění nerozpuštěných látek, organického znečištění a nutrientů. Mechanický stupeň zajišťuje oddělení hrubých a jemných pevných nerozpuštěných částic. Biologický stupeň je založen na působení mikroorganismů v aktivačních nádržích, kde dochází k rozkladu organických látek a k biologickému odstraňování dusíku a fosforu prostřednictvím nitrifikace, denitrifikace a případně biologické likvidace fosforu. Vyčištěná voda je následně odváděna do recipientu, zatímco vzniklé kaly jsou dále zpracovávány v kalovém hospodářství. Kalové hospodářství obnáší stabilizaci, zahušťování, vyhnívání, odvodnění a skladování kalu. Centralizované mechanicko-biologické ČOV představují stabilní způsob čištění komunálních odpadních vod s dostatečnou účinností pro většinu požadovaných limitů legislativou. Jejich účinnost je však primárně zaměřena na standardní ukazatele znečištění, a nikoliv na odstranění mikropolutantů [43].

V krasových oblastech je vhodné navrhovat, modernizovat nebo intenzifikovat stokovou síť a ČOV tak, aby jejich provoz odpovídal zvýšeným požadavkům na ochranu povrchových a podzemních vod. S ohledem na uvedená specifika lze za vhodné považovat systematické monitorování kanalizační sítě, pro zjištění jejího stavu a případné navržení sanace, obnovy nebo rekonstrukce objektů. Jako další doporučení by mělo být zlepšení účinnosti ČOV z hlediska výstupních koncentrací ukazatelů. Pro dosažení

lepších výsledků koncentrací biologického znečištění je doporučeno navrhovat například koncepci nízko zatížené aktivace. V podmínkách krasových oblastí je z technologického hlediska klíčové zejména spolehlivé odstraňování dusíku, proto jsou dále stručně uvedeny procesy nitrifikace a denitrifikace.

Jedno z hlavních doporučení je požadovat při výstavbě či intenzifikaci účinné a celkové odstranění dusíku pomocí procesů nitrifikace a denitrifikace. Tyto procesy probíhají v aktivačních nádržích při střídání aerobního a anoxického prostředí. Nitrifikace je biochemický proces oxidace sloučenin dusíku, jedná se o podmíněnou činnost tzv. nitrifikačních bakterií, které tímto procesem získávají energii. Proces se rozděluje do dvou stupňů, a to nitritace a nitratace. Při nitritaci jsou amonné ionty oxidovány na dusitany pomocí *Nitrosobakterií*. V druhém stupni (nitratace) jsou vyprodukované dusitany oxidovány na dusičnany pomocí *Nitrobakterií* [14].

Na účinnost nitrifikace působí stáří kalu, pokud bychom měli příliš nízké stáří tak by nitrifikace neprobíhala. Nitrifikací se neodstraní dusík z aktivovaného kalu, ale pouze přemění jeho toxická amonná forma na nitrátovou. Z hlediska ochrany recipientu je žádoucí minimalizovat vypouštění amoniakální formy dusíku, protože při určitých podmínkách může být pro vodní organismy vysoce toxická. Pro úspěšnou nitrifikaci je potřeba dostatečné stáří kalu a správný obsah kyslíku v aktivovaném kalu, který je potřeba hlídat pomocí kyslíkových sond [43].

Po procesu nitrifikace následuje proces denitrifikace, který probíhá v anoxickém prostředí, tedy prostředí bez přítomnosti volného kyslíku. Denitrifikační mikroorganismy využívají kyslík z dusičnanů a dusitanů. Finálním produktem denitrifikace je plynný dusík. Zdrojem energie pro denitrifikaci je organická hmota v odpadní vodě, popřípadě se přidává do odpadní vody externí substrát. Je-li v ČOV uvažována nitrifikace, bývá z technologického i provozního hlediska zpravidla vhodné její doplnění denitrifikací, a to z důvodu toho, že je pomocí denitrifikace získáván zpět

kyslík vázaný v dusičnanech, ten se uvolňuje a přispívá k aeraci kalu, tudíž klesají náklady na aeraci. Tímto způsobem lze snížit spotřebu kyslíku až na přibližně dvě třetiny spotřeby potřebné pro nitrifikaci. Dalším důvodem je omezení spontánní denitrifikace v dosazovací nádrži, a tím i zabránění vznosu kalu a zhoršení jeho usazování na dně nádrže [43].

V oblasti CHKO Moravský kras se v rámci centralizovaného nakládání s odpadními vodami nejčastěji uplatňuje splašková, případně jednotná kanalizace zaústěná na mechanicko-biologické ČOV. Tento přístup představuje v podmínkách krasového území obecně vhodnější řešení než decentralizované systémy, zejména z hlediska provozní kontroly a stability kvality odtoku. Současně je však třeba zohlednit, že část stávajících systémů je stále zatížena problémy spojenými s jednotnou kanalizací, především s odlehčováním při srážkových událostech. V podmínkách Moravského krasu může tento problém představovat významné riziko, protože nečištěné nebo nedostatečně naředěné vody mohou být odváděny do toků s vazbou na krasový podzemní systém [44].

4.1.1 ČOV DO 500 EO

Jedná se o nejmenší centralizované ČOV s oddílnou kanalizací. Typické je jednolinkové biologické uspořádání, řízení pomocí kyslíkové sondy a případné simultánní chemické srážení fosforu. Technologické řešení je koncipováno s důrazem na ekonomickou náročnost, jednoduchost obsluhy a bezporuchový provoz [44; 45].

Při návrhu nových nebo intenzifikaci stávajících ČOV do 500 EO v krasových oblastech je vhodné uvažovat o technologickém uspořádání umožňujícím úplnou nitrifikaci a denitrifikaci za účelem účinnějšího odstraňování dusíku. Pro dosažení tohoto cíle je nezbytné správně navrhnout a nastavit střídání aerobních a anoxických podmínek, přičemž vhodným řešením je využití kyslíkových sond a odpovídajícího systému řízení provozu. V případě požadavku na vyšší účinnost odstraňování fosforu se jako vhodné jeví chemické srážení formou simultánní aplikace srážedla do aktivační nádrže s

následnou separací vzniklých vloček v dosazovací nádrži. Toto řešení zpravidla vyžaduje doplnění dávkovacího zařízení a zajištění skladování chemikálie. Z hlediska provozní stability se dále jako vhodné jeví uplatnění režimu nízkozatěžované aktivace, který může přispět ke stabilnějšímu průběhu biologických procesů a ke zlepšení kvality odtoku. Uvedené úpravy přitom nepředstavují zásadní změnu základního technologického uspořádání ČOV a v řadě případů mohou být realizovány bez nepřiměřených investičních nároků.

4.1.2 ČOV 500–2 000 EO

Tato kategorie již vyžaduje dvoulinkové biologické uspořádání (minimálně dvě aktivační nádrže), strojní hrubé předčištění a řešení recirkulace kalu. Stoková síť je oddílná. Oproti předchozí kategorii je zde častější simultánní srážení fosforu a větší důraz na hydraulickou a látkovou stabilitu. Řeší se zde běžně odstranění dusíku pomocí nitrifikace a denitrifikace. Od roku 2035 dle evropské směrnice Urban Wastewater Treatment Directive (UWWTD) vyplývá povinnost sběru a čištění odpadních vod pro obce >1 000 EO. A zároveň pro obce >1 000 EO je povinnost sekundárního (běžně biologické) čištění [44; 46; 47].

Na kategorii 500–2000 EO v krasových oblastech lze vztáhnout obdobné požadavky jako na kategorii do 500 EO, avšak s ohledem na vyšší kapacitu a větší význam provozní spolehlivosti je vhodné uvažovat již s dvoulinkovým biologickým uspořádáním. V této kategorii se současně jako vhodné jeví posun od simultánního srážení fosforu k oddělenému srážení v terciárním stupni čištění, tedy k řešení, při němž je dávkování srážedla a následná separace fosforu realizována v samostatném technologickém stupni za biologickým čištěním. Takové uspořádání může přispět k vyšší účinnosti odstraňování fosforu a k lepší provozní kontrolovatelnosti celého procesu.

4.1.3 ČOV 2 000–10 000 EO

Jde o středně velké ČOV s možností oddílné nebo správně optimalizované jednotné kanalizace. Standard je dvoulinková biologická část, lepší systém

měření a regulace, strojní zahušťování kalu a odvodnění kalu oproti předchozím kategoriím. Nachází se zde i případné řešení III. stupně pro chemické srážení fosforu [44; 47].

U kategorie 2000–10 000 EO v krasových oblastech je vhodné vycházet z požadavků uvedených pro kategorii 500–2000 EO. Vedle běžných způsobů separace je v této kategorii možné zvažovat také technologicky náročnější, například membránové bioreaktory. V případě zvýšených požadavků na kvalitu odtoku nebo při potřebě odstraňování specifických organických polutantů lze současně uvažovat i o zařazení čtvrtého stupně čištění, například ve formě adsorpce, oxidačních procesů nebo filtrace.

4.1.4 ČOV 10 000–100 000 EO

Jedná se o velké aglomerační ČOV, obvykle napojené na jednotnou kanalizaci spojenou s centrálním řízením objektů na síti jako jsou odlehčovací komory a čerpací stanice. Technologické vybavení většinou obsahuje více linkové biologie s pokročilým řízením, primární a sekundární sedimentace, oddělený třetí stupeň, strojní zahušťování kalu a anaerobní stabilizace kalu, občasné využívání bioplynu pro snížení energetické zátěže. Emisní limity pro tuto kategorii jsou poměrně přísné, proto většinou vyžadují kontinuální monitoring nátokových a odtokových poměrů. Od roku 2035 dle evropské směrnice UWWTD vyplývá povinnost III. stupně čištění pro oblasti, kde hrozí eutrofizace od 10 000 EO. Také je zde povinnost využívání obnovitelných zdrojů energie jako je bioplyn nebo solární energie. V případě citlivých oblastí jako může být i Moravský kras je zde povinnost zavedení IV. stupně čištění >10 000 EO. Pro tyto citlivé oblasti bude sestaven seznam každým členským státem do 31.12.2030 [44; 46; 47].

4.1.5 ČOV >100 000 EO

Největší kategorie ČOV stanovená českou legislativou, jde o komplexní technologické systémy s plně centralizovaným řízením, pokročilou energetickou koncepcí a víceúrovňovým dočištěním. Momentálně s povinným třetím stupněm čištění. Od roku 2035 dle evropské směrnice

UWWTD vyplývá povinnost IV. stupně čištění pro odstranění mikropolutantů jako jsou farmaceutické látky a mikroplasty od 150 000 EO [44; 46; 47].

4.2 DECENTRALIZOVANÉ SYSTÉMY

Decentralizovaný systém se dá definovat jako systém, ve kterém nejsou splaškové vody z určité oblasti čištěny na jednom jednotném místě (ČOV), ale jsou řešeny v rámci každého zdroje znečištění zvlášť. Mezi běžné decentralizované systémy řadíme například domovní ČOV, vícekomorové septiky, jímky, suché WC, chemická WC, biologické rybníky a vegetační ČOV.

4.2.1 VÍCEKOMOROVÝ SEPTIK SE ZEMNÍM FILTREM

Nejčastěji se v obcích se decentralizovaným systémem vyskytují septiky. Septik je jednoduché zařízení na předčištění odpadních vod, založené na mechanické separaci nerozpuštěných látek a částečného anaerobního rozkladu organického znečištění. Jedná se o vícekomorovou nádrž, ve které dochází k sedimentaci těžších částic na dno, jedná se v podstatě o malou usazovací nádrž. U dna v sedimentu probíhá anaerobní rozklad organických látek, který částečně stabilizuje kal. Tekuté a plovoucí látky poté přepadají do odtoku ze septiku do zemního filtru. Sediment je odvážen pomocí fekálního vozu na ČOV, průměrně jednou až dvakrát za rok. Odtok ze zemního filtru může téct v lepším případě do jednotné kanalizace, kde se naředí s dešťovou vodou a teče do recipientu. V horším případě se odpadní voda někde zasakuje, jak to bývá v menších obcích. V podstatě se jedná o situaci, kdy jsou odpadní vody s minimálním nebo žádným předčištěním odváděny přímo do vodních toků. Takové řešení představuje významné environmentální riziko nejen v krasových oblastech, ale i v dalších typech území [48; 49; 50].

4.2.2 JÍMKY NA VYVÁŽENÍ

Dalším častým systémem jsou jímky na vyvážení. Jedná se často o betonovou nebo plastovou nádrž, která slouží jako akumulace pro veškerou splaškovou vodu. Jsou vyváženy fekálním vozem a sváženy na ČOV, kde jsou poté stejně jako sediment ze septiku dávkovány na nátok ČOV. Pokud by jímky fungovaly

bezproblémově tak by nehrozila žádná kontaminace okolí, bohužel se v praxi děje to že ať už únavou materiálu nebo lidskou činností se tvoří praskliny a otvory v nádrži. Poté dochází k úniku znečištění a kontaminace okolního podloží. Netěsné nebo poškozené jímky mohou představovat významný bodový zdroj znečištění, který je v citlivých hydrogeologických podmínkách skoro neakceptovatelný. Proto je naléháno na připojení majitelů objektů na oddílnou kanalizaci, když je v obci budovaná.

4.2.3 DOMOVNÍ ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD

V lepším případě, nebo u novostaveb v obci bez centrálního systému se setkáváme s domovní ČOV (ČOV do 50 EO). Domovní ČOV (dále DČOV) jsou moderním řešením pro decentralizovaný systém. DČOV mohou dosahovat podobných výsledků jako běžné mechanicko-biologické ČOV, při jejich správném provozování a plnohodnotné funkci. Obvykle jsou založeny na předřazeném usazovacím prostoru, biologickém stupni s aktivací a následné separaci kalu. Podle typu zařízení mohou být doplněny o pokročilejší prvky řízení provozu nebo o doplňkové technologie, například dezinfekci, filtraci či chemické srážení fosforu. Z hlediska této práce je podstatná jejich reálná provozní spolehlivost, účinnost a vhodnost pro použití v krasových oblastech. [49; 51; 52].

Jak už bylo zmíněno na začátku podkapitoly, tak DČOV mohou dosahovat podobných výsledků jako běžná mechanicko-biologická ČOV nebo lepší. Jenže narážíme na několik problémů v praxi, které tuto účinnost výrazně snižují. Při provozování DČOV u rodinných domů se setkáváme s kolísáním znečištění na nátoku a kolísání hydraulického zatížení. Dalším problémem je ten, že některé běžně používané chemické čisticí prostředky mohou mít inhibiční nebo toxický dopad na organismy v biomase. Někdy se setkáváme s DČOV, které jsou ochuzeny o části čisticího procesu, z důvodu nízkých limitů ukazatelů na odtoku z DČOV, nastavených českou a evropskou legislativou, a tudíž vyšší koncentrace znečištění na odtoku. Dalším možným problémem je nedostatečná nebo naopak nadměrná dotace kyslíku při absenci

odpovídajícího systému řízení provozu s kyslíkovou sondou. V obou případech to vede ke snížení účinnosti čištění. S řídící jednotkou je spojena i recirkulace kalu, která je při analogovém ovládání spojena s aerací, a tudíž nelze nastavit ideální časování recirkulace a aerace separátně. Narážíme také na provozní problémy, kdy u DČOV je absence záložních zařízení (čerpadla, dmychadla). Při výpadku nebo poruše tak dochází k narušení procesu a kritického zhoršení účinnosti DČOV. Poslední věc, kterou je potřeba vzít v potaz a z mého pohledu ta nejdůležitější je lidský faktor. Majitelé DČOV často neprovádějí potřebné kontroly pro její účinný provoz a zamezení poruch. Dochází tedy ke zhoršení účinnosti, než je uváděna výrobcem a nesplňuje závaznou legislativu. Tento problém se dá řešit například zavedením centrálního systému řízení, tudíž by byly DČOV vybaveny potřebnými sensory, elektronickými vodoměry a telemetrickou soustavou. Pro vlastníka by to znamenalo minimální provozní povinnosti a celý systém několika i klidně desítek DČOV by byl řízen a kontrolován provozovatelem. Tento systém je běžně dostupný například od firmy SATTURN HOLEŠOV spol. s.r.o., která se přímo specializuje s jejich produktem Enceladus na systémové řízení DČOV [53; 54; 55; 56; 57].

Z porovnání technických možností DČOV, jejich reálných provozních omezení a požadavků kladených na ochranu krasových vod vyplývá, že běžně uplatňovaný standard provozu DČOV nemusí být pro citlivá krasová území dostatečný, zejména pokud není zajištěna soustavná kontrola provozu vlastníkem a stabilní kvalita odtoku. V porovnání s běžnými mechanicko-biologickými ČOV mají DČOV nižší provozní robustnost a menší jistotu dlouhodobě stabilních odtokových parametrů, a to zejména z důvodu kolísavého zatížení a omezené odbornosti vlastníka. Pro obce do 50 EO je potřeba posoudit aplikaci DČOV oproti standardní akumulaci a svozu splašků. Pokud by byl systém DČOV použit v takové obci na území CHKO Moravský kras, je nutné zajistit standardní vodohospodářskou kontrolu objektu, například prostřednictvím odběrů vzorků a sledování ukazatelů znečištění na odtoku. Za vhodnější lze v takovém případě považovat zavedení

centralizovaného systému řízení a dohledu nad provozem DČOV. Pokud by se jednalo o standardní situaci, jaká je provozována v dnešní době u většiny nemovitostí s DČOV, takové řešení nelze z hlediska ochrany krasového prostředí považovat za vhodné. U obcí s EO vyšším než 50 se systém DČOV v podmínkách krasového území jeví jako problematický, zejména pokud není zajištěna odpovídající úroveň provozní kontroly a monitoringu. V případě poruchy nebo poklesu účinnosti DČOV může dojít ke kontaminaci recipientů a vsakování do podzemních vod pomocí ponorů a propadání v krasu [54; 55; 56].

4.2.4 VEGETAČNÍ ČOV

Vegetační čistírny odpadních vod jsou založeny na principech přírodě blízkého čištění, při kterém dochází ke kombinaci fyzikálních procesů, mikrobiálního rozkladu a odstranění živin rostlinami ve filtračním loži. Tyto systémy jsou často prezentovány jako ekologicky šetrné a provozně nenáročné řešení pro menší sídla. Z hlediska ochrany vod v krasových oblastech však vykazují celou řadu zásadních omezení, která výrazně snižují jejich vhodnost. Základním problémem vegetačních ČOV je omezená kontrolovatelnost a proměnlivost čisticího efektu. Účinnost čištění je silně závislá na teplotních podmínkách, hydraulickém zatížení a rovnoměrném rozdělení přítoku do filtračního pole. V období nízkých teplot nebo při nerovnoměrném zatížení může docházet k výraznému poklesu biologické aktivity, což se negativně projevuje zejména v odstraňování dusíku. Zatímco odstranění organického znečištění může být za optimálních podmínek uspokojivé, transformace a skutečné odstranění anorganických forem dusíku je u těchto systémů omezené a dlouhodobě nestabilní [58; 59].

Dalším zásadním aspektem je nakládání s fosforem, který je ve vegetačních ČOV odstraňován převážně sorpcí na filtrační materiál. Tato schopnost je však časově omezená a s postupným nasycením lože dochází ke snížení účinnosti, případně k opětovnému uvolňování fosforu. Bez pravidelné výměny nebo regenerace filtrační náplně tak nelze zajistit dlouhodobě nízké

koncentrace fosforu na odtoku, což je v krasových oblastech z hlediska eutrofizace podzemních i povrchových vod zásadní riziko. Z pohledu ochrany krasového kolektoru je problematická také koncepce vsaku nebo povrchového rozptylu vyčištěných vod, která je u vegetačních ČOV běžná. I relativně malé koncentrace zbytkového znečištění mohou být v krasovém prostředí velmi rychle transportovány do podzemních dutin, jeskynních systémů a vývěrů, aniž by došlo k významnému přirozenému dočištění. Absence účinných filtračních zón a krátké doby zdržení znamenají, že případné provozní selhání nebo snížení účinnosti se může okamžitě projevit v kvalitě krasových vod [59].

Problematická je rovněž kontrola provozu a vyhodnocování skutečné účinnosti vegetačních ČOV. Tyto systémy jsou často provozovány bez kontinuálního monitoringu a jejich čisticí efekt je hodnocen pouze orientačně nebo s dlouhými časovými odstupy. To výrazně omezuje možnost včasného odhalení zhoršení kvality odtoku. V podmínkách krasu, kde je vyžadována vysoká míra preventivní ochrany, je takový způsob provozu z hlediska vodohospodářské bezpečnosti nevyhovující [59].

Z uvedených důvodů lze vegetační čistírny odpadních vod v krasových oblastech považovat za řešení s významnými technologickými a environmentálními omezeními, které neposkytuje dostatečnou jistotu ochrany podzemních vod. Jejich použití je problematické zejména tam, kde je požadována dlouhodobě stabilní kvalita vyčištěné vody a kde případné selhání systému může mít nepřiměřeně závažné dopady na krasový kolektor.

4.2.5 STABILIZAČNÍ NÁDRŽE A BIOLOGICKÉ RYBNÍKY

Stabilizační nádrže a biologické rybníky jsou z hlediska principu čištění blízké vegetačním čistírnám, avšak liší se především otevřeným vodním režimem a absencí filtračního lože, které je typické pro vegetační ČOV. Čištění zde probíhá převážně ve vodním sloupci a v sedimentech prostřednictvím přirozených biologických procesů, zatímco u vegetačních ČOV je dominantním mechanismem filtrace a mikrobiální aktivita v loži. Tento rozdíl

vede k ještě větší závislosti stabilizačních nádrží na klimatických a sezónních podmínkách, zejména na teplotě a intenzitě slunečního záření, což se projevuje výraznými výkyvy v kvalitě vyčištěné vody [60].

Ve srovnání s vegetačními ČOV poskytují stabilizační nádrže menší možnost řízení a kontroly čisticího procesu a jejich účinnost je obecně méně předvídatelná. Zatímco vegetační ČOV mohou při správném návrhu dosahovat relativně stabilního odstranění organického znečištění, u stabilizačních nádrží dochází častěji k přechodným stavům, kdy je znečištění pouze transformováno, nikoliv skutečně odstraněno. Z hlediska odstraňování dusíku a fosforu jsou oba systémy problematické, avšak u stabilizačních nádrží je riziko jejich opětovného uvolnění ze sedimentů zpravidla vyšší [60].

V krasových oblastech představují stabilizační nádrže a biologické rybníky ještě větší riziko než vegetační ČOV, a to zejména kvůli otevřenému kontaktu vody s podložím a možnosti infiltrace do krasového masivu. Jakékoliv snížení účinnosti nebo porucha systému se může velmi rychle projevit v kvalitě podzemních vod, přičemž chybí technologické prvky, které by umožnily nápravu nebo okamžitou regulaci provozu. Z tohoto důvodu se stabilizační nádrže a biologické rybníky v krasových oblastech zpravidla nejeví jako preferované řešení, které neposkytuje dostatečnou ochranu vysoce zranitelného krasového kolektoru, a to ani ve srovnání s jinými decentralizovanými systémy.

4.2.6 OSTATNÍ DECENTRALIZOVANÉ SYSTÉMY

Do ostatních decentralizovaných systémů lze zařadit především řešení, která mohou mít význam pouze v omezeném rozsahu, dočasně nebo pro jednotlivé objekty. Příkladem těchto řešení mohou být suché záchody nebo mobilní chemická WC. Z hlediska systematického odkanalizování obcí však tato opatření nepředstavují vhodnou koncepční variantu, protože zpravidla neumožňují dostatečně kontrolovatelné a stabilní nakládání s komunálními odpadními vodami. V podmínkách krasových oblastí je jejich nevhodnost

ještě výraznější, neboť i drobná provozní nekázeň, netěsnost nebo nevhodné nakládání se zachyceným odpadem může vést k rychlé kontaminaci okolního prostředí a následně i krasového podzemního systému. Z tohoto důvodu by měla být tato řešení v krasových oblastech používána pouze výjimečně a jejich aplikace by měla být co nejvíce omezena na specifické nebo nouzové případy [61].

4.3 POROVNÁNÍ CENTRALIZOVANÝCH A DECENTRALIZOVANÝCH SYSTÉMŮ

V níže uvedené tabulce Tabulka 10 - Celkové srovnání centralizovaných a decentralizovaných systémů odstranění odpadních vod je uvedeno shrnutí pro oba systémy odstraňování odpadních vod na základě výše uvedených informací, doplněné o hodnoty převzaté z citovaných studií.

Tabulka 10 - Celkové srovnání centralizovaných a decentralizovaných systémů odstranění odpadních vod [57; 62; 63; 64]

Kritérium	Centralizované systémy	Decentralizované systémy
Základní koncepce	Soustředění odpadních vod stokovou sítí nebo svozem na jedno centrální místo čištění.	Čištění nebo akumulace odpadních vod přímo u jednotlivých zdrojů znečištění.
Technologická úroveň	Mechanicko-biologické ČOV s možností nitrifikace, denitrifikace, chemického srážení fosforu a případně terciárního či kvartérního stupně.	Velmi nejednotná úroveň; od jímek a jednoduchého předčištění až po domovní ČOV, vegetační ČOV nebo filtrační/infiltrační systémy.
Účinnost odstraňování standardního znečištění	Vysoká a stabilní účinnost pro BSK_5, CHSK a NL; u běžných komunálních ČOV byly dle studie zabývající se 14 ČOV dosaženy průměrné účinnosti přibližně BSK_5 98 %, CHSK 92 % a NL 94 %.	U decentralizovaných systémů je účinnost velmi rozdílná podle typu zařízení. U domovních biologických ČOV může být odstraňování organického znečištění a NL dobré, např. domovních SBR ČOV byla technologická spolehlivost pro BSK_5 77,5 %, CHSK 97,8 % a NL 100 %; u vegetačních ČOV jsou někdy uváděny vysoké odstranění BSK_5, CHSK a NL, ale obecně s větší provozní variabilitou než u centrálních ČOV.

Odstraňování nutrientů (N, P)	Reálně řešitelné technologicky i provozně; v souboru 14 komunálních ČOV byly dosaženy průměrné účinnosti přibližně N_{celk} 75 % a P_{celk} 82 %.	Slabší a méně stabilní. U výše uvedeného SBR byla technologická spolehlivost jen N_{celk} 12,2 % a P_{celk} 21,7 %, což potvrzuje, že malé systémy bez pokročilého řízení často nezajišťují stabilní odstraňování nutrientů. U vegetačních ČOV je odstraňování N a P možné, ale silně závislé na návrhu a provozních podmínkách.
Odstraňování mikropolutantů	Lze doplnit o čtvrtý stupeň čištění (ozonizace, aktivní uhlí, membrány).	Ve většině decentralizovaných systémů se cílené odstraňování mikropolutantů neuplatňuje; jejich přestup do prostředí je proto významně více závislý na typu zařízení a místních podmínkách.
Stabilita odtokových parametrů	Vysoká při odborném provozování, automatizaci a monitoringu.	Výrazně závislá na typu zařízení, kolísání nátoku, hydraulickém zatížení a kvalitě údržby; u filtračních systémů bylo prokázáno, že účinnost významně ovlivňuje aktuální i předchozí hydraulické a organické zatížení.
Možnost řízení a optimalizace procesu	Vysoká; proces lze řídit pomocí sond, automatizace, recirkulace, dávkování chemikálií a dispečerského dohledu.	Omezená; většina zařízení nemá pokročilé řízení ani systematický online monitoring.
Monitoring a kontrola provozu	Dobře proveditelné, včetně pravidelných odběrů, online měření a provozní evidence.	Obtížné, zejména při velkém počtu malých zdrojů; kontrola bývá nesystematická a provozní kázeň obtížně vymahatelná.
Citlivost na provozní chyby	Nižší; větší systémy mají vyšší provozní robustnost a možnost korekce.	Vyšší; studie přímo ukazují, že nedostatečná údržba zhoršuje chemické i mikrobiologické parametry odtoku.
Závislost na lidském faktoru	Nižší; provoz zajišťuje odborný personál nebo provozovatel.	Vysoká; výkon je přímo závislý na odpovědnosti vlastníka, pravidelné údržbě a správném užívání.
Provozní spolehlivost / garantovatelnost výkonu	Obecně vyšší; odpovědnost i kontrola jsou soustředěny do omezeného počtu objektů.	Obecně nižší a více rozptýlená; literatura k malým domovním ČOV přímo pracuje s pojmem technologické spolehlivosti a ukazuje, že zejména u nutrientů bývá nízká.
Riziko přímého ohrožení krasového kolektoru	Nižší, pokud je systém správně navržen, oddílný a bez havarijních přepadů nečištěných vod.	Vyšší, protože porucha, netěsnost nebo infiltrace do podloží se může projevit jako přímý bodový zdroj znečištění; systematické přehledy potvrzují, že u onsite systémů je obtížné riziko kontaminace podzemních vod zcela eliminovat.
Vhodnost pro hydrogeologicky citlivá území	Obecně vhodnější, zejména při použití oddílné stokové	Obecně méně vhodné; použitelnost je omezená a vyžaduje individuální a velmi opatrné posouzení.

	sítě a kvalitní ČOV s odstraňováním nutrientů.	
Prostorové a investiční nároky	Vyšší nároky na výstavbu stokové sítě a centrální infrastruktury.	Nižší nároky na centrální infrastrukturu.
Provozní koncepce v krasových oblastech	Umožňuje soustředit kontrolu, monitoring i odpovědnost na omezený počet klíčových objektů.	Rozptyluje zdroje znečištění do velkého počtu bodů, což zvyšuje obtížnost kontroly i kumulativní zatížení území.
Celkové hodnocení pro krasové oblasti	Obecně vhodnější řešení.	Použitelnost omezená, vyžaduje individuální a opatrné posouzení.

Pozn.: Hodnoty u centralizovaných systémů vycházejí z vyhodnocení 14 komunálních ČOV uvedených v předchozí části práce. U decentralizovaných systémů jsou uvedeny orientační charakteristiky odvozené z publikovaných provozních studií domovních biologických ČOV, vegetačních ČOV a filtračních systémů; vzhledem k vysoké technologické rozmanitosti a rozdílům v provozu je nutné je chápat jako reprezentativní, nikoli univerzálně platné.

Porovnání centralizovaných a decentralizovaných systémů bylo v této práci provedeno formou kvalitativního odborného posouzení, nikoli pomocí bodové multikriteriální metody. Zohledněna byla zejména hydrogeologická zranitelnost krasového prostředí, riziko přenosu znečištění do podzemních vod, provozní stabilita systému, možnost monitoringu a kontroly, riziko poruch a požadavky na stokovou síť. Kritéria nebyla číselně vážena, avšak největší význam byl přikládán ochraně krasového kolektoru a schopnosti systému dlouhodobě zajistit stabilní a kontrolovatelnou kvalitu odtoku. Na základě těchto kritérií se v krasových oblastech jako vhodnější zpravidla jeví centralizované systémy, zatímco decentralizovaná řešení jsou podmíněna příznivými místními podmínkami a odpovídajícím provozním zajištěním.

5 TECHNICKÁ KRITÉRIA A POŽADAVKY NA ČOV V KRASOVÝCH OBLASTECH

V krasových oblastech, jak už bylo zmíněno výše, jsou samočisticí procesy velmi omezeny oproti standardním podmínkám. Jedním z prvků preventivní ochrany podzemních vod je eliminace znečištění v odpadních vodách už na povrchu před vstupem do podzemí. V současné době se jako nejstabilnější a provozně nejlépe kontrolovatelné řešení v krasových oblastech zpravidla jeví mechanicko-biologická čistírna odpadních vod napojená na centrální kanalizační systém. Zároveň je potřeba stanovit takové procesy a úpravy, které jsou běžně dostupné, prověřené v praxi a ekonomicky dostupné.

5.1 POŽADAVKY NA STOKOVOU SÍŤ A MECHANICKÉ PŘEDČIŠTĚNÍ

Základním principem stokové sítě v nově navrhovaném řešení je oddílná splašková a dešťová kanalizace. Druh oddílné splaškové kanalizace (gravitační, tlaková, podtlaková) by pak měl vycházet z geomorfologických podmínek dané lokality. Jednotná stoková síť se v krasových oblastech jeví jako méně vhodná, zejména z důvodu hydraulických špiček, kdy dochází k využití odlehčovacích komor a tím kontaminaci recipientu nečištěnou odpadní vodou. Dalším problémem je nestabilní hydraulické zatížení a ředění odpadních vod natékajících na ČOV a tím zhoršení celkové účinnosti čisticích procesů [65].

Jeden z požadavků je i minimalizace poměru balastních vod natékajících do potrubí z důvodu netěsností nebo špatného stavu kanalizační sítě. Důsledky většího procenta ředění jsou nestabilní zatížení a ředění odpadních vod na přítoku ČOV. Řešením hydraulických a látkových špiček u nátoku do ČOV je správné dimenzování čerpací stanice a jejího akumulačního prostoru. Pozornost je vhodné věnovat také složení odpadních vod, převážně jejich homogenitě. Pro zlepšení homogenity velikosti částic může být přínosné do vystrojení čerpací stanice zahrnout drtič shrabků. Výhodou osazení drtiče shrabků je i to že lze využít i jiné typy čerpadel než ty s řezacím zařízením [65].

5.2 TECHNOLOGICKÉ NÁROKY NA BIOLOGICKÝ STUPEŇ (NÍZKO ZATÍŽENÁ AKTIVACE)

V oblastech se zvýšenými nároky na ochranu vodních útvarů lze nízko zatíženou aktivaci považovat za vhodný a často preferovaný koncept, zejména pokud je cílem dosažení vyšší provozní stability a spolehlivé nitrifikace. Jedná se o modifikaci klasického aktivačního procesu, která je navržena pro dosažení vysoké stability procesu, účinného odbourávání biologického znečištění a zaručení efektivního průběhu nitrifikace a následné denitrifikace. Nízké zatížení znamená, že množství přiváděné organické látky vztažené na jednotku biomasy je malé. Stáří kalu je zpravidla větší, což přispívá ke stabilní nitrifikaci. Při nízkém stáří nitrifikačních bakterií může docházet k vyplavování z procesu. V praxi se setkáváme s automatickým časovým řízením, kyslíkovou sondou, nastavitelné koncentrace kyslíku, časování fází nitrifikace a denitrifikace a řízený objem vratného kalu. V režimu nízko zátěžové aktivace se v ČR řídíme pomocí limitů stanovující BAT dle *nařízení vlády č. 401/2015 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech* [66].

5.3 ŘEŠENÍ ELIMINACE FOSFORU (P)

Odstraňování fosforu z odpadních vod lze rozdělit na chemické srážení, biologické odstraňování, membránové procesy a adsorpci. Jednotlivé metody se liší mechanismem účinku, vzniklými produkty procesů a účinností.

Chemické srážení je založeno na dávkování kovových solí a vápna (nejčastěji $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, $AlCl_3$, $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$), které reagují s ortofosforečnany za vzniku fosforečnanů kovů. Tyto sloučeniny poté odstraňujeme sedimentací nebo filtrací. Alternativně lze využít proces krystalizace, který má výhodu znovu využitelného produktu srážení, avšak vyžaduje technologicky náročnější postupy; v rámci řešeného tématu se proto jedná o zbytečně vysokou ekonomickou zátěž [67].

Biologické odstraňování fosforu (EBPR – Enhanced Biological Phosphorus Removal) je založeno na organismech, které při střídání aerobního a anaerobního prostředí do sebe akumulují fosfor intercelulárně ve formě polyfosfátů (poly-P). Za anaerobních podmínek dochází k degradaci polyfosfátů a k uvolňování ortofosfátů. V aerobní části pak organismy zpět akumulují ortofosfáty a ukládají se do biomasy. Výhodou je nižší spotřeba chemikálií. Nevýhodou je citlivost procesu na provozní podmínky (pH, teplota, látkové zatížení, podíl kyslíku). V praxi se uplatňuje kombinace chemického a biologického odstraňování. Biologické probíhá společně s procesy odstraňování dusíku a chemické je zařazeno jako simultánní nebo jako terciální stupeň dočištění pro minimalizaci koncentrace na odtoku. Pro nejlepší výsledky koncentrace na odtoku je doporučováno odstraňovat fosfor v separátních nádržích jako terciální stupeň, ale toto řešení je nákladnější než simultánní aplikace [67].

Membránové procesy (NF, RO, FO, ED) se vyznačují velice vysokou efektivitou, bohužel jsou složité na aplikaci do standardních mechanicko-biologických ČOV a jsou energeticky vysoce náročné. Pokud by byla aplikace této technologie technicky a ekonomicky realizovatelná, mohla by představovat velmi účinné řešení. Adsorpce je spíše vhodná jako terciální nebo čtvrtý stupeň. Je schopna si poradit s nízkými koncentracemi fosforu a má dobrý poměr cena-výkon. Další výhodou je lehká aplikace do stávajícího provozu a možná desorpce a využití adsorbované látky [67].

Z technologického hlediska tedy chemické procesy poskytují vyšší provozní stabilitu a přesnou kontrolu výstupní koncentrace, biologické procesy jsou ekonomičtější z hlediska chemikálií, zatímco složitější systémy jako membránová separace a kombinované systémy představují kvalitní nástroj pro zajištění nízkých emisních limitů i efektivní recyklaci fosforu [67].

5.4 POKROČILÉ SYSTÉMY SEPARACE A ČIŠTĚNÍ

Membránový bioreaktor (MBR) je pokročilá technologie biologického čištění odpadní vody, která integruje proces aktivovaného kalu s membránovou filtrací. V aktivační části dochází k rozkladu organických látek, obdobně jako u konvenčního aktivačního systému, ale změna nastává za aktivační nádrží, kdy místo dosazovací nádrže je využíváno na oddělení biomasy od vyčištěné vody pomocí mikro- nebo ultrafiltrační membrány. Membránová separace umožňuje dosahovat vyšší kvality odtoku než u klasických systémů, lze ji provozovat i při vyšších koncentracích látek. Koncentrace látek v odpadní vodě se u klasických systémů pohybuje kolem 5000 $mg \cdot l^{-1}$ a u membránových systémů si můžeme dovolit 8000 – 12 000 $mg \cdot l^{-1}$. S tím současně aplikujeme i delší dobu zdržení, což vede k vyšší stabilitě procesu a tím lepší odbourávání znečištění. Výhodou membránové separace je i menší prostorová náročnost, kvůli absenci dosazovací nádrže. Nevýhodou jsou vyšší provozní náklady, vyšší energetická náročnost a membránové zanášení (membrane fouling). Z důvodu zanášení membrány je potřeba pravidelné mechanické a chemické čištění. Zanášení je ovlivňování vlastnostmi a obsahem odpadních vod natékajících na ČOV [68].

Membránová separace je ideálním řešením pro vypouštění přečištěných odpadních vod do citlivých recipientů, jako jsou právě krasové oblasti kvůli její vysoké efektivitě a nulové prostorové náročnosti při rekonstrukci ČOV. Je ale potřeba zvážit její vyšší provozní náklady.

5.5 ŘEŠENÍ ODSTRAŇOVÁNÍ MIKROPOLUTANTŮ

Pro dosažení vysoké úrovně ochrany vodních útvarů je nezbytné věnovat pozornost i mikropolutantům, jako jsou rezidua léčiv, pesticidy, kosmetické látky či další organické stopové kontaminanty, které jsou v konvenčních mechanicko-biologických procesech odstraňovány pouze omezeně. Účinnost jejich eliminace v běžných čistírnách odpadních vod je značně variabilní a závisí na fyzikálně-chemických vlastnostech jednotlivých látek, přičemž se typicky pohybuje v širokém rozmezí od jednotek procent až po přibližně 80

%. Řada perzistentních látek přitom zůstává ve vyčištěné odpadní vodě téměř nezměněna. Z tohoto důvodu jsou v posledních letech zaváděny pokročilé stupně čištění, často označované jako čtvrtý stupeň čištění odpadních vod, které navazují na konvenční biologické a terciární procesy. Tyto technologie jsou navrhovány s cílem cíleného odstranění mikropolutantů a obvykle zahrnují kombinaci fyzikálně-chemických a biologických procesů [18; 19; 20].

Mezi nejvýznamnější technologie patří především oxidační procesy, zejména ozonizace a pokročilé oxidační procesy (AOP), které umožňují transformaci organických mikropolutantů na biologicky lépe odbouratelné nebo mineralizované produkty. Princip metody je založen na aplikaci silného oxidačního činidla, který reaguje s organickými mikropolutanty. Tyto reakce vedou k oxidaci molekul, jejich štěpení, mineralizaci a případné přeměně na lépe odbouratelné látky. Ozonizace dosahuje u většiny sledovaných látek vysoké účinnosti, často přesahující 80–90 %, přičemž její efektivita závisí na dávce ozonu a charakteru čištěné vody [25; 69].

Další významnou skupinou technologií je adsorpce na aktivním uhlí, a to jak ve formě práškového (PAC), tak granulovaného uhlí (GAC). Tyto procesy umožňují odstranění širokého spektra organických mikropolutantů s účinností typicky v rozmezí 60–95 %, přičemž výsledná účinnost závisí na dávkování sorbentu a kontaktním čase. Princip metody spočívá v navázání částic fyzikálně-chemickými interakcemi. V praxi jsou tyto technologie často kombinovány s ozonizací, kdy dochází k synergickému efektu spočívajícímu v rozkladu látek a následné adsorpci vzniklých meziproduktů [69; 70; 71].

Membránové procesy, zejména nanofiltrace a reverzní osmóza, představují další možnost odstraňování mikropolutantů, přičemž dosahují velmi vysokých účinností, často přesahujících 90–99 %. Jejich využití je však omezeno vyššími investičními a provozními náklady. Membránové bioreaktory (MBR) kombinují biologické čištění s membránovou separací a umožňují vyšší účinnost odstranění některých látek, nicméně u perzistentních mikropolutantů zůstává jejich účinnost omezená [72; 73].

Významnou roli hrají také biologické dočišťovací procesy, jako jsou biofiltry s aktivním uhlím (BAC) nebo systémy s přisedlou biomasou (např. MBBR), které mohou dosahovat vysoké účinnosti odstranění u biologicky rozložitelných látek. Tyto technologie se často využívají jako následný stupeň po ozonizaci, kdy dochází k biologickému odbourání transformačních produktů pomocí mikroorganismů [74].

Specifickou skupinu představují mikroplasty, které nejsou v čistírnách odpadních vod cíleně odstraňovány, nicméně díky mechanickým a biologickým procesům dochází k jejich významnému snížení, obvykle v rozmezí 80–99 %. Mikroplasty jsou odstraňovány převážně mechanickými procesy, jako je sedimentace, flotace a filtrace. Část mikroplastů se zachytí v kalu během biologické části procesu. Přesto i po čištění zůstává určité množství mikroplastů ve vyčištěné odpadní vodě, což představuje potenciální riziko pro vodní prostředí [75].

Celkově lze usoudit, že efektivní odstranění mikropolutantů vyžaduje kombinaci několika technologických přístupů, přičemž nejčastěji se uplatňuje kombinace oxidačních procesů a následné adsorpce nebo biologického dočištění. Volba konkrétní technologie závisí na charakteru odpadní vody, požadované účinnosti a ekonomických podmínkách provozu čistírny. Čtvrtý stupeň představuje doplňkový, nikoliv náhradní prvek čištění, jehož význam se zvyšuje zejména v hydrogeologicky citlivých oblastech jako jsou právě krasy, viz. CHKO Moravský kras [19].

5.6 KONTROLA A MONITORING DAT ČOV

Efektivní řízení čistírny odpadních vod (ČOV) v citlivých oblastech vyžaduje systematický a komplexní monitoring provozních dat s cílem zajistit splnění emisních limitů a minimalizovat riziko úniků znečišťujících látek. Monitoring představuje kontinuální sledování klíčových parametrů jak na přítoku a odtoku ČOV, tak ve vybraných bodech kanalizační sítě, odlehčovacích komor a přepadů čerpacích stanic. Pro zajištění co nejpřesnějších údajů o složení

emisí se v praxi uplatňuje 24hodinové vzorkování, které poskytuje reprezentativní časovou charakteristiku koncentrací hlavních ukazatelů znečištění [76].

Při monitoringu jednotné stokové sítě jsou jedním z nejdůležitějších míst měření odlehčovací komory, kde dochází při intenzivních srážkách k dočasnému převedení zředěné odpadní vody. Sledování těchto bodů umožňuje detekci úniků odpadních vod bez předčištění do recipientů a také slouží k optimalizaci provozu odlehčovacího zařízení. Obdobným způsobem lze monitorovat i bezpečnostní přepady z akumulačních prostorů čerpacích stanic. Na stokové síti může docházet k únikům zejména z důvodu netěsností nebo poruchy materiálu. Tyto úniky jsou špatně monitorovatelné, jediný ukazatel může být stáří potrubí, o kterém by měl mít provozovatel informace a průběžně iniciovat rekonstrukce a obnovy.

V nově postavených ČOV bývají integrovány systémy řízení SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) s online sběrem dat z různých sond a průtokoměrů nacházejících se v systému ČOV. Data jsou pak vyhodnocována pomocí statistických metod, které slouží pro detekci odchylek od standardního provozu a tím předcházejí poruchám nebo nepovoleným emisím [77].

6 MANAGEMENT ODPADNÍCH VOD V CHKO MORAVSKÝ KRAS

6.1 HODNOCENÍ STRATEGICKÝCH DOKUMENTŮ

6.1.1 PLÁN ROZVOJE VODOVODŮ A KANALIZACÍ ÚZEMÍ KRAJE

Nejdůležitějším dokumentem, který pro jednotlivé kraje centrálně hodnotí aktuální a plánovaný stav, je Plán rozvoje vodovodů a kanalizací území kraje (dále jen PRVKÚK). Každý kraj v samostatné působnosti zajišťuje zpracování a aktualizaci PRVKÚK pro své území. V rámci PRVKÚK je uvažováno s řešením koncepcí zásobování pitnou vodou, vymezení povrchových a podzemích zdrojů pitné vody, koncepcí odkanalizování a čištění odpadních vod. PRVKÚK musí reflektovat politiku územního rozvoje daného území. Všechny PRVKÚK jsou realizovány na základě § 4 zákona č. 275/2013 Sb., který mění zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů [44].

Cílem PRVKÚK je:

- rozšíření vodovodní a kanalizační sítě do oblastí, kde chybí nebo je nevyhovující
- rekonstrukce vodovodní a kanalizační sítě
- navýšení standardu kvality pitné vody a efektivnosti stokové sítě
- přepojení obyvatel z decentralizovaných systémů na centralizované a jejich spojená výstavba/rekonstrukce/intenzifikace ČOV

6.1.2 ÚZEMNÍ PLÁN

Dalším významným dokumentem jsou územní plány obcí, které stanovují zásady uspořádání území, jeho funkční využití a podmínky rozvoje. Vymezuje plochy pro bydlení, výrobu, dopravní a technickou infrastrukturu, krajinu a ochranu přírodních hodnot a určuje rámec pro umísťování staveb a technických zařízení. Územní plán je závazný pro rozhodování stavebních úřadů a představuje klíčový nástroj, kterým obec ovlivňuje dlouhodobý rozvoj svého území. Návaznost územního plánování na PRVKÚK spočívá v tom, že územní plán obce musí být s tímto dokumentem v souladu z hlediska

koncepce zásobování vodou a odkanalizování. PRVKÚK stanovuje strategický rámec a preferovaný způsob řešení vodohospodářské infrastruktury na úrovni kraje, zatímco územní plán tyto záměry konkretizuje v území a vytváří podmínky pro jejich realizaci. Pokud PRVKÚK předpokládá například centralizovaný způsob čištění odpadních vod nebo napojení obce na společnou ČOV, musí tomu odpovídat i řešení v územním plánu [78].

6.1.3 PRVKÚK JMK PRO OBCE CHKO MORAVSKÝ KRAS

Tato podkapitola je zaměřena na hodnocení jednotlivých obcí v území CHKO Moravský kras z hlediska stávajícího a výhledového stavu kanalizace. Oblast CHKO Moravský kras jsem si vybral z důvodu, že se jedná o největší krasovou oblast nacházející se na území ČR. Je zde také oproti ostatním krasovým oblastem poměrně velké antropogenní znečištění způsobené větším zalidněním oblasti. Nachází se zde 24 obcí, z nichž 12 má hodnotu EO > 1000. Samotné posouzení jednotlivých obcí je uvedeno v příloze č. 3 – Zhodnocení aktuálnosti PRVKÚK JMK.

V řadě hodnocených obcí se v návrzích PRVKÚK opakuje varianta dočištění v biologickém rybníku. Vzhledem k tomu, že limity a rizika tohoto řešení jsou v podmínkách krasových oblastí obdobné, nejsou v jednotlivých kartách obcí opakovány v plném rozsahu. Podrobné zdůvodnění je uvedeno v kapitole č. 4.2.5; v hodnocení jednotlivých obcí je proto vždy doplněn pouze konkrétní lokální aspekt návrhu.

U více hodnocených obcí se opakuje problém jednotné kanalizace. V krasových oblastech je tento systém považován za rizikový zejména v případech, kdy při dešťových stavech a činnosti odlehčovacích komor dochází k únikům nečištěných odpadních vod do povrchových toků a následně i do krasového podzemí. Z tohoto důvodu je v této práci oddílná stoková síť hodnocena jako obecně vhodnější řešení. V jednotlivých hodnoceních obcí proto není tento argument rozepisován opakovaně a je doplněn pouze o specifické lokální okolnosti.

6.2 SPOLUPRÁCE NA PROJEKTU „INTEGROVANÉ KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S ODPADNÍMI VODAMI A JEJICH APLIKOVATELNOST V OCHRANĚ CITLIVÝCH VODNÍCH ÚTVARŮ“

V rámci mé bakalářské práce jsem se dílčím způsobem zapojil do přípravy žádosti vědecko-výzkumného projektu zaměřeného na integrované koncepce nakládání s odpadními vodami a jejich aplikovatelnost v ochraně citlivých vodních útvarů. Projektová žádost byla zaměřena na posouzení vztahu mezi produkcí komunálních odpadních vod, technickým řešením jejich čištění a ochranou hydrologicky a ekologicky zranitelných území. V kontextu této práce byl klíčový zejména jeho přesah do podmínek CHKO Moravský kras, která představuje typické krasové území s vysokou zranitelností podzemních vodních systémů.

Moje práce na projektu spočívala ve vypracování podkladových příloh, konkrétně přehledné mapy CHKO Moravský kras (Příloha č.1) a seznamu dotčených obcí nacházejících se přímo v oblasti CHKO nebo přispívající ke kontaminaci podzemních vod v CHKO (Příloha č.2). Přehledná mapa CHKO Moravský kras zachycuje hranici chráněného území, sídelní strukturu a vodní toky. Hlavní částí mapy je vizuální rozlišení přímého a vedlejšího množství znečištění pomocí barev. U jednotlivých obcí je vyobrazen způsob odkanalizování dle PRVKÚK a dat VAS. Je také rozlišen stávající a plánovaný stav odkanalizování. Druhou přílohou je seznam dotčených obcí, který uvádí důležité informace ke stavu odkanalizování jednotlivých obcí.

Zpracované přílohy poskytují prostorovou a kvantitativní oporu pro hodnocení bodových zdrojů znečištění, pro prioritizaci intenzifikace ČOV a pro formulaci požadavků na ochranu citlivých vodních útvarů v CHKO Moravský kras.

6.3 DETAILNÍ ROZBOR STUDIE ODKANALIZOVÁNÍ OBCE NĚMČICE

Jako modelový příklad praktické aplikace výše uvedených principů byla zvolena obec Němčice, pro kterou je v současnosti zpracován konkrétní návrh odkanalizování v citlivém krasovém území. Tato obec tak slouží jako

praktická ukázka možného přístupu k návrhu odkanalizování a čištění odpadních vod v sídle ležícím v krasové oblasti nebo v území, které do ní vodohospodářsky přispívá.

Obec Němčice se nachází v okrese Blansko v Jihomoravském kraji a leží v území s přímým vlivem na vodní útvary v oblasti CHKO Moravský kras. Z hlediska ochrany krasového prostředí se jedná o citlivé území, kde je kladen zvýšený důraz na nakládání s komunálními odpadními vodami. Podle údajů Českého statistického úřadu měla obec v roce 2024 celkem 471 obyvatel, přičemž výhledový počet je uvažován v rámci návrhu přibližně 600 EO.

Studie „Odkanalizování obce Němčice“ byla zpracována společností VH atelier spol. s r. o. jako investiční záměr pro „Svazek vodovodů a kanalizací“ měst a obcí. Studie navazuje na předchozí dokument „Němčice, Ludíkov, Žďár, Petrovice – odkanalizování“ z roku 2025. V rámci původní studie byly posuzovány celkem čtyři varianty řešení odkanalizování obce. Po jejich vyhodnocení byla orgány ochrany přírody (AOPK ČR, Správa CHKO Moravský kras) preferována varianta č. 1, která je následně podrobněji rozpracována v navazující dokumentaci „Odkanalizování obce Němčice“. Projekt splaškové kanalizace a ČOV je nyní ve fázi zpracování dokumentace pro povolení záměru v rozsahu pro dokumentaci provádění stavby. Navržené řešení spočívá ve vybudování nové oddílné splaškové kanalizace pro veřejnou potřebu v celém rozsahu obce. Odpadní vody budou odváděny převážně gravitačním systémem stok do jihozápadní části obce, kde je navržena nová mechanicko-biologická čistírna odpadních vod. Stávající jednotná kanalizace bude po realizaci projektu využívána výhradně pro odvádění dešťových vod [79].

V současné době není v obci Němčice vybudována kanalizace pro odvádění splaškových odpadních vod. Likvidace splaškových vod probíhá převážně decentralizovaným systémem přímo u jednotlivých nemovitostí. Odpadní vody jsou částečně předčišťovány v septicích, případně jsou akumulovány v žumpách. V některých případech jsou přepady ze žump zaústěny do stávající

jednotné kanalizace, případně do povrchových příkopů nebo trativodů, kterými jsou odváděny spolu s ostatními vodami do vodního toku Němčický potok, který je pravostranným přítokem vodního toku Punkva. Provozovatelem této kanalizace je Vodárenská akciová společnost, a. s.

V rámci zpracování studie byly provedeny terénní obchůzky jednotlivých nemovitostí, jejichž cílem bylo ověření skutečného stavu nakládání s odpadními vodami. Tyto obchůzky sloužily zejména k ověření údajů o způsobu odkanalizování jednotlivých objektů a k získání podkladů pro návrh stokové sítě. Projektovaná kapacita nové ČOV je navržena na 600 EO. Při návrhu bylo uvažováno s průměrným denním přítokem odpadních vod přibližně 108 m³/den včetně balastních vod, což odpovídá průměrnému průtoku přibližně 1,25 l/s. Roční množství odpadních vod je odhadováno na přibližně 39 400 m³. Technologie ČOV je navržena jako mechanicko-biologická čistírna s nízkozatěžovanou dlouhodobou aktivací se simultánní nitrifikací a denitrifikací a aerobní stabilizací kalu. Součástí technologické linky bude jemné mechanické předčištění, biologická část tvořená aktivační a dosazovací nádrží, uskladňovací nádrž kalu a terciální stupeň čištění pro eliminaci fosforu. Terciální stupeň bude tvořen egalizační nádrží a dávkováním srážedla pro chemické srážení fosforu. Navržená technologie je dimenzována tak, aby splňovala požadavky na nejlepší dostupné technologie (BAT) pro čistírny odpadních vod v kategorii 500–2000 EO a zároveň reflektovala zvýšené požadavky na kvalitu vyčištěných odpadních vod v citlivém území CHKO Moravský kras [79].

Součástí návrhu je samozřejmě také výstavba nové splaškové stokové sítě z polypropylenových trub DN 250, případně DN 300, doplněné o kanalizační výtlak a čerpací stanici v místech s nevhodnými spádovými poměry. Celková délka nově navržené gravitační stokové sítě činí přibližně 3,8 km, doplněná o kanalizační výtlak délky přibližně 197 m [79].

Pro obec byly posuzovány varianty nové splaškové kanalizace zakončené buď na vlastní ČOV, nebo výtlakem na ČOV v sousední obci s její intenzifikací. V

této části budou dále stručně zhodnoceny i alternativní možnosti zlepšení odtokových poměrů, konkrétně decentralizované řešení s domovními ČOV, splašková kanalizace zakončená na kořenové čistírně a sanace stávající jednotné kanalizace s vybudováním mechanicko-biologické ČOV. Cílem je ukázat, jak lze v podmínkách krasového území přistupovat k posouzení různých způsobů odkanalizování obce.

Ve variantě decentralizovaného systému je výhodou nižší pořizovací náročnost z důvodu vyřazení nákladů na centrální splaškovou stokovou síť a ČOV. V případě obce Němčice se však tato varianta nejeví jako koncepčně nejvhodnější, a to nejen z důvodu citlivosti krasového území, ale také s ohledem na velikost obce a výhledové zatížení přibližně 600 EO. Jedním z hlavních důvodů je vysoká závislost na kvalitě provozu každého jednotlivého zařízení, omezený rozsah systematické kontroly a nestabilní hydraulické i látkové zatížení, které vede k výkyvům v účinnosti zařízení. Aby byl systém DČOV přípustný, muselo by každé zařízení obsahovat srážení fosforu, chytrou řídící jednotku, kyslíkovou a pH sondu pro vypouštění do povrchových vod. V případě vsakování do podzemních vod by byly požadavky na úrovni MBR reaktorů a UV dezinfekce. Při splnění těchto podmínek by byl tento systém přípustný, ale v případě, kdy každý majitel dodržuje správné postupy revizí, výměn a oprav stanovených výrobcem, což u decentralizovaného systému nelze garantovat.

Další možností je vybudování splaškové kanalizace zaústěné na vegetační ČOV. Za pozitivní stránky této varianty lze považovat její přírodě blízký charakter a provozně nižší energetickou i technologickou náročnost. Obecně však naráží na výraznou závislost na klimatických podmínkách a vyšší prostorové nároky. V krasových oblastech je však třeba zohlednit zejména omezenou možnost přesného řízení procesu, proměnlivou účinnost čištění a nižší jistotu dlouhodobě stabilního odstraňování nutrientů. Za kvalitativních podmínek, které vyžadují krasové oblasti pro vypouštění odpadních vod se toto řešení nejeví jako preferované.

Jako další řešení vyvstává sanace stávající jednotné kanalizace a výstavba mechanicko-biologické ČOV. Tato varianta by představovala menší ekonomickou náročnost, ale i když by se sanací eliminovaly úniky z důvodu netěsnosti potrubí, tak by stále přetrvával problém s odlehčovacími komorami i při správném poměru přepadání. V krasových oblastech je vypouštění nevyčištěných odpadních vod nevhodné, a tudíž je tato varianta nepřípustná. Tento závěr je v souladu se závěry metodických a koncepčních dokumentů Ministerstva životního prostředí ČR.

Varianta nové splaškové kanalizace zakončené mechanicko-biologickou ČOV se v podmínkách krasových oblastí jeví jako nejvhodnější, a to zejména z hlediska provozní stability, možnosti kontroly a dlouhodobě spolehlivého zajištění požadované kvality odtoku. Výhodou je oddělení splaškových a dešťových vod, omezení hydraulických špiček a snížení rizika nekontrolovaných přepadů do recipientu. Přestože se jedná o investičně náročnější řešení, z hlediska ochrany krasového prostředí a minimalizace rizik pro podzemní vody představuje nejlépe obhajitelnou variantu.

Na základě provedené analýzy lze konstatovat, že návrh zpracovaný společností VH atelier spol. s r. o. je ve vysoké míře v souladu s doporučeními formulovanými v kapitole č. 5. Návrh zahrnuje oddílnou kanalizaci, ČOV s nízkozatíženou aktivací, celkové odstraňování dusíku, terciální srážení fosforu a splňuje BAT limity nastavené nařízením vlády č. 401/2015 Sb. Tento přístup reaguje na vysokou zranitelnost krasového prostředí a přispívá k omezení rizika znečištění podzemních vod v oblasti CHKO Moravský kras.

7 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

7.1 ZHODNOCENÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat přehled specifických požadavků na čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech a posoudit technologické možnosti jejich aplikace v podmínkách CHKO Moravský kras. Na základě provedené rešerše a vyhodnocení legislativních a strategických dokumentů lze usoudit, že práce splnila stanovené cíle v rozsahu, který odpovídá dostupným zdrojům a charakteru bakalářské práce.

Práce potvrdila původní hypotézu, že krasové oblasti představují z hlediska odvádění a čištění komunálních odpadních vod výrazně citlivější prostředí než běžné lokality. Hlavním důvodem je vysoká zranitelnost krasového kolektoru, rychlý transport znečištění a omezená samočisticí schopnost podzemních vod. Z tohoto pohledu se jako podstatné nejeví pouze samotné limity na odtoku z ČOV, ale také celková koncepce nakládání s odpadními vodami, včetně stokové sítě, provozní stability technologie a možnosti kontroly systému.

Na základě porovnání centralizovaných a decentralizovaných přístupů bylo dospěno k závěru, že v podmínkách krasových oblastí se jako obecně vhodnější jeví centralizované čištění na mechanicko-biologických ČOV s dobře navrženou stokovou sítí a s důrazem na stabilní odstraňování organického znečištění, dusíku a fosforu. U decentralizovaných systémů byla jako problematická identifikována především nižší provozní jistota a vyšší riziko nedosažení požadované kvality odtoku. Neznamená to však, že by decentralizované systémy byly nevhodné bez výjimky; jejich použitelnost je nutné posuzovat vždy s ohledem na konkrétní místní podmínky, velikost lokality a způsob provozování.

Jeden z výsledků práce je také zhodnocení, že běžný legislativní rámec a standardní požadavky na čištění odpadních vod nejsou vždy dostatečně citlivé vůči specifikům krasového prostředí. V práci bylo ukázáno, že

požadavky jsou zpravidla vztaženy především k velikosti aglomerace nebo k obecnému vymezení citlivých oblastí, zatímco samotná hydrogeologická zranitelnost krasu v nich není zohledněna vždy dostatečně přímo.

Praktická část práce dále ukázala, že při hodnocení konkrétních obcí a návrhových dokumentů je třeba sledovat nejen navrženou technologii čištění, ale i širší souvislosti, zejména oddělení splaškových a dešťových vod, omezení odlehčování, vazbu recipientu na krasový systém a reálnou možnost provozní kontroly. Přínos práce tak nespočívá pouze ve shrnutí obecných poznatků, ale také v jejich aplikaci na konkrétní území CHKO Moravský kras a v posouzení vybraných strategických a projektových podkladů.

Současně je však třeba uvést, že práce je založena především na rešerši dostupné literatury, legislativních dokumentů a strategických podkladů. Nepracuje s vlastním dlouhodobým provozním měřením na konkrétních ČOV v krasových oblastech, a proto některé závěry představují spíše odborně podložené hodnocení a doporučení než univerzálně ověřený postup. Omezením práce je také nejednotnost dostupných podkladů pro jednotlivé obce a dokumenty, které se liší mírou podrobnosti, aktuálností i technickým rozsahem. I přes tato omezení práce poskytuje ucelený pohled na problematiku čištění komunálních odpadních vod v krasových oblastech a vytváří základ pro navazující podrobnější analýzu a praktické řešení v podmínkách CHKO Moravský kras.

7.2 DOPADY NA PROJEKČNÍ A PROVOZNÍ PRAXI

Výsledky práce mohou být využitelné zejména v projekční a provozní praxi při návrhu nových systémů odvádění a čištění odpadních vod, jejich intenzifikaci nebo modernizaci. Zpracované poznatky mohou sloužit jako podklad pro aktualizaci legislativních dokumentů a úpravu dokumentů státní správy zabývajících se ochranou citlivých oblastí. Dle aktualizované legislativy by se poté eventuálně měnily podmínky pro návrh nové nebo intenzifikované technologie a dodržování stanovených limitů v rámci provozu. Důležitou částí

práce je shrnutí technologických požadavků a kritérií čištění odpadních vod, kde jsou vybrané technologie zlepšující odtokové poměry. Analýza ukazuje, že požadavek na vyšší účinnost čištění odpadních vod nemusí nutně znamenat výrazné zvýšení investičních ani provozních nákladů oproti standardním čistírnám odpadních vod, pokud je technologický návrh správně koncipován. V některých případech může vhodně navržený biologický proces dokonce přinášet provozní úspory, například díky energetickým přínosům denitrifikačních procesů. Je však třeba zohlednit, že navržené závěry nejsou ve všech případech podloženy jednotnými provozními daty z realizovaných staveb, ale vycházejí ze syntézy dostupných podkladů.

7.3 DOPORUČENÍ PRO OCHRANU KRASOVÝCH VODNÍCH ÚTVARŮ

Dle provedené analýzy lze konstatovat, že současné legislativní požadavky na kvalitu vyčištěné odpadní vody nejsou v rámci citlivých oblastí dostatečné. Na základě této analýzy se jeví jako vhodné zvážit stanovení samostatných koncentračních limitů pro citlivé oblasti, které budou zahrnovat rozdílnost vlastností dle druhu oblasti. Nebudou-li nové limity zavedeny, lze za minimální požadavek považovat uplatňování parametrů odpovídajících BAT limitům stanoveným nařízením vlády č. 401/2015 Sb. Česká legislativa by měla také navazovat na legislativu Evropské unie, která často stanovuje pouze koncepce, a tudíž přímé řešení změn spadá na členské státy. Současně lze doporučit, aby orgány státní správy, jako je například Agentura ochrany přírody a krajiny ČR nebo Ministerstvo životního prostředí iniciovaly tvorbu koncepčních dokumentů zaměřených na ochranu vodních útvarů krasových oblastí. Tyto dokumenty by mohly sloužit jako podklad pro stanovení přísnějších požadavků na nakládání s odpadními vodami v krasových územích, včetně doporučení vhodných technologických řešení a povinnosti monitoringu kvality vypouštěných vod. Tyto úpravy lze aplikovat i na další citlivé oblasti nacházející se v ČR.

7.4 NÁVAZNOST PRÁCE NA PRAKTICKÉ APLIKACE VÝSLEDKŮ

Na výsledky této práce je možné navázat podrobnějším zpracováním jednotlivých dílčích témat, zejména provozním posouzením vybraných technologií čištění odpadních vod v krasových oblastech, vyhodnocením konkrétních odtokových parametrů a porovnáním skutečně realizovaných staveb. Další rozpracování by bylo vhodné zaměřit také na podrobnější návrh technických a koncepčních opatření pro vybrané obce v CHKO Moravský kras. Výsledky práce mohou současně sloužit jako podklad pro projekční praxi, pro aktualizaci koncepčních dokumentů nebo vytvoření metodiky pro nakládání s odpadními vodami v krasových oblastech.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BALÁK, Ivan, Eduard HOFMANN, Hana SVOBODOVÁ, Radek DURNA a Jaromír KOLEJKA. *Moravský kras a okolí / Moravian Karst and its Environs: Atlas pro terénní výuku a outdoorové aktivity / Atlas for field work and outdoor activities* [online]. Brno: Masaryk University Press, 2020 [cit. 2025-12-29]. ISBN 9788021096271. Dostupné z: doi:10.5817/cz.muni.m210-9627-2020

[2] HUBELOVA, Dana, Jitka MALA, Alice KOZUMPLIKOVA, Katerina SCHRIMPELOVA, Hana HORNOVA a Petr JANAL. Influence of Human Activity on Surface Water Quality in Moravian Karst. *Polish Journal of Environmental Studies* [online]. HARD Publishing Company, 2020, 2020-5-12, **29**(5), 3153-3162 [cit. 2025-12-29]. ISSN 1230-1485. Dostupné z: doi:10.15244/pjoes/114233

[3] MALÁ, J., D. HÜBELOVÁ, K. SCHRIMPELOVÁ, A. KOZUMPLÍKOVÁ a S. LEJSKA. Surface watercourses as sources of karst water pollution. *International Journal of Environmental Science and Technology* [online]. Springer Science and Business Media, 2021, 2021-6-12, **19**(5), 3503-3512 [cit. 2025-12-29]. ISSN 1735-1472. Dostupné z: doi:10.1007/s13762-021-03440-w

[4] AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČR. *CHKO Moravský kras* [online]. 2025 [cit. 2025-12-29]. Dostupné z: https://moravskykras.aopk.gov.cz/web/chko-moravsky-kras

[5] SEZNAM.CZ, A.S. *Mapy.com* [online]. 2025 [cit. 2025-12-02]. Dostupné z: mapy.com

[6] GILLIESON, D., J. GUNN, A. AULER a T. BOLGER. *Guidelines for cave and karst protection* [online]. 2nd edition. Postojna, Slovenia : International Union of Speleology ; Gland, Switzerland : IUCN, 2022 [cit. 2026-02-28]. ISBN 978-0-646-84911-9. Dostupné z: https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2022/04/UIS-Guidelines-for-Cave-and-Karst-Protection-2nd-ed-electronic-v6.pdf

[7] ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA. *Česká geologická služba* [online]. 2025 [cit. 2025-12-29]. Dostupné z: https://cgs.gov.cz/

[8] LEGRAND, H.E. a V.T. STRINGFIELD. Karst hydrology — A review. *Journal of Hydrology* [online]. Elsevier BV, 1973, **20**(2), 97-120 [cit. 2026-02-28]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/0022-1694(73)90034-6

[9] EARLE, S. *Environmental Geology* [online]. Thompson Rivers University, 2021 [cit. 2026-02-28]. Dostupné z: https://environmental-geol.pressbooks.tru.ca/

[10] RUNKEL, A.C., R.G. TIPPING, E.C. ALEXANDER a J.A. GREEN. *Hydrogeology of the Paleozoic bedrock in southeastern Minnesota: Minnesota Geological Survey Report of Investigations 61* [online]. 2003.

[11] RAVBAR, Nataša, Janez MULEC, Cyril MAYAUD, Matej BLATNIK, Blaž KOGOVŠEK a Metka PETRIČ. A comprehensive early warning system for karst water sources contamination risk, case study of the Unica springs, SW Slovenia. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2023, **885**, 163958 [cit. 2025-12-29]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163958

[12] LUKAČ REBERSKI, Jasmina, Josip TERZIĆ, Louise D. MAURICE a Dan J. LAPWORTH. Emerging organic contaminants in karst groundwater: A global level assessment. *Journal of Hydrology* [online]. Elsevier BV, 2022, **604**, 127242 [cit. 2025-12-29]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2021.127242

[13] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Kvalita vod - Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po n dnech (BODn) - Část 1: Zřed´ovací a očkovací metoda s přídavkem allylthiomočoviny*.

[14] HLAVÍNEK, P., P. PRAX, P. HLUŠTÍK a R. MIFEK. *STOKOVÁNÍ A ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD: MODUL 2 ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD* [online]. 2006.

[15] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Jakost vod - Stanovení chemické spotřeby kyslíku*.

[16] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Čistírny odpadních vod - Část 4: Primární čištění*.

[17] Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2015.

[18] LUO, Yunlong, Wenshan GUO, Huu Hao NGO, Long Duc NGHIEM, Faisal Ibney HAI, Jian ZHANG, Shuang LIANG a Xiaochang C. WANG. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2014, **473-474**, 619-641 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.065

[19] ROGOWSKA, Justyna, Monika CIESZYNSKA-SEMENOWICZ, Wojciech RATAJCZYK a Lidia WOLSKA. Micropollutants in treated wastewater. *Ambio* [online]. Springer Science and Business Media, 2019, 2019-7-10, **49**(2), 487-503 [cit. 2026-03-01]. ISSN 0044-7447. Dostupné z: doi:10.1007/s13280-019-01219-5

[20] BELETE, Biniam, Belay DESYE, Argaw AMBELU a Chalachew YENEW. Micropollutant Removal Efficiency of Advanced Wastewater Treatment Plants: A Systematic Review. *Environmental Health Insights* [online]. SAGE Publications, 2023, **17** [cit. 2026-03-01]. ISSN 1178-6302. Dostupné z: doi:10.1177/11786302231195158

[21] KÖCK-SCHULMEYER, Marianne, Marta VILLAGRASA, Miren LÓPEZ DE ALDA, Raquel CÉSPEDES-SÁNCHEZ, Francesc VENTURA a Damià BARCELÓ. Occurrence and behavior of pesticides in wastewater treatment plants and their environmental impact. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2013, **458-460**, 466-476 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.010

[22] MÜNZE, Ronald, Christin HANNEMANN, Polina ORLINSKIY, et al. Pesticides from wastewater treatment plant effluents affect

invertebrate communities. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2017, **599-600**, 387-399 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.008

[23] YANG, Yi, Yong Sik OK, Ki-Hyun KIM, Eilhann E. KWON a Yiu Fai TSANG. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2017, **596-597**, 303-320 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.04.102

[24] JOSS, Adriano, Elvira KELLER, Alfredo C. ALDER, Anke GÖBEL, Christa S. MCARDELL, Thomas TERNES a Hansruedi SIEGRIST. Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. *Water Research* [online]. Elsevier BV, 2005, **39**(14), 3139-3152 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2005.05.031

[25] HOLLENDER, Juliane, Saskia G. ZIMMERMANN, Stephan KOEPKE, et al. Elimination of Organic Micropollutants in a Municipal Wastewater Treatment Plant Upgraded with a Full-Scale Post-Ozonation Followed by Sand Filtration. *Environmental Science* [online]. American Chemical Society (ACS), 2009, 2009-8-13, **43**(20), 7862-7869 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es9014629

[26] MONTES-GRAJALES, Diana, Mary FENNIX-AGUDELO a Wendy MIRANDA-CASTRO. Occurrence of personal care products as emerging chemicals of concern in water resources: A review. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2017, **595**, 601-614 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.286

[27] LI, Jingyi, Huihui LIU a J. PAUL CHEN. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research* [online]. Elsevier BV, 2018, **137**, 362-374 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.12.056

[28] YASEEN, Aarif, Irfana ASSAD, Mohd Sharjeel SOFI, Muhammad Zaffar HASHMI a Sami Ullah BHAT. A global review of microplastics in wastewater treatment plants: Understanding their occurrence, fate and impact. *Environmental Research* [online]. Elsevier BV, 2022, **212**, 113258 [cit. 2026-03-29]. ISSN 0013-9351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2022.113258

[29] Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001, 254/2001 Sb.

[30] Vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001.

[31] Vyhláška č. 98/2011 Sb., o způsobu hodnocení stavu útvarů povrchových vod, způsobu hodnocení ekologického potenciálu silně ovlivněných a umělých útvarů povrchových vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu povrchových vod. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2011.

[32] Vyhláška č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2011.

[33] Nařízení vlády č. 71/2003 Sb., o stanovení povrchových vod vhodných pro život a reprodukci původních druhů ryb a dalších vodních živočichů a o zjišťování a hodnocení stavu jakosti těchto vod. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2003.

[34] Nařízení vlády č. 83/2019 Sb., o Chráněné krajinné oblasti Moravský kras. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2019.

[35] EVROPSKÁ KOMISE. *NATURA 2000* [online]. 2025 [cit. 2025-12-29]. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/natura-2000_en?prefLang=cs

[36] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000 , kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky. In: *Úř. věst. L 327, 22.12.2000, p.1*. 2000.

[37] Směrnice Rady ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod. In: *OJ L 135 30.5.1991, p. 40*. 1991.

[38] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/118/ES ze dne 12. prosince 2006 o ochraně podzemních vod před znečištěním a zhoršováním stavu. In: *OJ L 372, 27.12.2006, pp. 19–31*. 2006.

[39] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/105/ES ze dne 16. prosince 2008 o normách environmentální kvality v oblasti vodní politiky, změně a následném zrušení směrnic Rady 82/176/EHS, 83/513/EHS, 84/156/EHS, 84/491/EHS a 86/280/EHS a změně směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES. In: *Úř. věst. L 348, 24.12.2008, pp. 84–97*. 2008.

[40] 814.201 Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV). In: *Amtliche Sammlung des Bundesrechts*. 1998.

[41] *Český statistický úřad* [online]. 2026 [cit. 2026-02-28]. Dostupné z: https://csu.gov.cz/

[42] *Bundesamt für Umwelt BAFU* [online]. 2026 [cit. 2026-02-28]. Dostupné z: https://www.bafu.admin.ch/de

[43] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN a Petr PRAX. *Příručka stokování a čištění* [online]. Brno: NOEL 2000, 2001 [cit. 2025-12-29]. ISBN 80-860-2030-4.

[44] JIHOMORAVSKÝ KRAJ. *Plán rozvoje vodovodů a kanalizací JMK* [online]. 2025 [cit. 2025-12-29]. Dostupné z: https://jmk.brandcloud.pro/en/document/111945/219499

[45] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel*.

[46] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2024/3019 ze dne 27. listopadu 2024 o čištění městských odpadních vod (přepracované znění). In: *Úř. věst. L, 2024/3019*. 2024.

[47] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Čistírny odpadních vod pro ekvivalentní počet obyvatel (EO) větší než 500*.

[48] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Malé čistírny odpadních vod do 50 ekvivalentních obyvatel - Část 1: Prefabrikované septiky*.

[49] KAŇKA, Jiří. *Provozování a bezpečnost stok a čistíren odpadních vod* [online]. České Budějovice: Vysoká škola evropských a regionálních studií, 2013 [cit. 2026-03-01]. ISBN 978-80-87472-52-1. Dostupné z: https://csvh.cz/file/21/stokovani.pdf

[50] HARDEN, Harmon S., Eberhard ROEDER, Mark HOOKS a Jeffrey P. CHANTON. Evaluation of onsite sewage treatment and disposal systems in shallow karst terrain. *Water Research* [online]. Elsevier BV, 2008, **42**(10-11), 2585-2597 [cit. 2026-03-14]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2008.01.008

[51] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Malé čistírny odpadních vod do 50 ekvivalentních obyvatel - Část 3: Balené a/nebo na místě montované domovní čistírny odpadních vod*. 2017.

[52] ENVI-PUR S.R.O. *ENVI-PUR* [online]. 2025 [cit. 2025-12-29]. Dostupné z: https://www.envi-pur.cz/

[53] SATTURN HOLEŠOV SPOL. S R.O. *ENCELADUS* [online]. 2025 [cit. 2025-12-29]. Dostupné z: https://www.enceladus.cz/

[54] ENGSTLER, Eva, David J. KERSCHBAUMER a Guenter LANGERGRABER. Evaluating the Performance of Small Wastewater Treatment Plants. *Frontiers in Environmental Science* [online]. Frontiers Media, 2022, 2022-7-15, **10**, 10 [cit. 2026-03-14]. ISSN 2296-665X. Dostupné z: doi:10.3389/fenvs.2022.948366

[55] IRIBARNEGARAY, Martín Alejandro, Juan José CORREA, Jazmín Marcela del Rosario SORANI, Araceli CLAVIJO, María Soledad RODRIGUEZ-

ALVAREZ a Lucas SEGHEZZO. A Simple Method for Identifying Appropriate Areas for Onsite Wastewater Treatment. *Water* [online]. MDPI, 2021, 2021-9-25, **13**(19), 2634 [cit. 2026-03-14]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w13192634

[56] ROSSETTO, Rudy, Chiara MARCHINA a Laura ERCOLI. Onsite wastewater treatment systems are a major source of pharmaceutical products in surface water of peri-urban/rural areas. *City and Environment Interactions* [online]. Elsevier BV, 2024, **21**, 100140 [cit. 2026-03-14]. ISSN 2590-2520. Dostupné z: doi:10.1016/j.cacint.2023.100140

[57] GYÖRKI, Gábor, Orsolya PÁLNÉ SZÉN a Judit KNISZ. Impact of maintenance on domestic wastewater treatment systems. *Pollack Periodica* [online]. Akademiai Kiado Zrt, 2023, 2023-7-11, **18**(2), 60-65 [cit. 2026-03-28]. ISSN 1788-1994. Dostupné z: doi:10.1556/606.2023.00778

[58] DOTRO, Gabriela, Günter LANGERGRABER, Pascal MOLLE, Jaime NIVALA, Jaume PUIGAGUT, Otto STEIN a Marcos VON SPERLING. Treatment Wetlands. In: *Treatment Wetlands* [online]. IWA Publishing, 2021, 2021-6-15, s. 172 [cit. 2026-03-01]. ISBN 9781780408774. Dostupné z: doi:10.2166/9781780408774

[59] VYMAZAL, Jan a Lenka KRÖPFELOVÁ. *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow* [online]. [Dordrecht?]: Springer, c2008 [cit. 2026-03-01]. Environmental pollution. ISBN 978-1-4020-8579-6. Dostupné z: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8580-2

[60] MAHAPATRA, Saswat, Kundan SAMAL a Rajesh Roshan DASH. Waste Stabilization Pond (WSP) for wastewater treatment: A review on factors, modelling and cost analysis. *Journal of Environmental Management* [online]. Elsevier BV, 2022, **308**, 114668 [cit. 2026-03-01]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2022.114668

[61] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Mobilní záchodové kabiny bez připojení na kanalizaci - Požadavky na služby a výrobky související s umisťováním kabin a sanitárními výrobky*.

[62] JUCHERSKI, Andrzej, Andrzej WALCZOWSKI, Piotr BUGAJSKI a Krzysztof JÓŹWIAKOWSKI. Technological reliability of domestic wastewater purification in a small Sequencing Batch Biofilm Reactor (SBBR). *Separation and Purification Technology* [online]. Elsevier BV, 2019, **224**, 340-347 [cit. 2026-03-28]. ISSN 1383-5866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2019.05.024

[63] DALAHMEH, Sahar S., Mikael PELL, Lars D. HYLANDER, Cecilia LALANDER, Björn VINNERÅS a Håkan JÖNSSON. Effects of changing hydraulic and organic loading rates on pollutant reduction in bark, charcoal and sand filters treating greywater. *Journal of Environmental Management* [online]. Elsevier BV, 2014, **132**, 338-345 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2013.11.005

[64] GIKAS, Georgios D. a Vassilios A. TSIHRINTZIS. A small-size vertical flow constructed wetland for on-site treatment of household wastewater. *Ecological Engineering* [online]. Elsevier BV, 2012, **44**, 337-343 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0925-8574. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoleng.2012.04.016

[65] HLAVÍNEK, P., P. PRAX, P. HLUŠTÍK a R. MIFEK. *STOKOVÁNÍ A ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD: MODUL 1 STOKOVÁNÍ* [online]. 2006.

[66] CHHIMI, Ikram, Badr EL FATHI, Abdessalam OUALLALI, Velibor SPALEVIC a Abdeslam TALEB. Performance assessment of urban wastewater treatment of the low-load activated sludge system at Ain El Aouda, Morocco. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* [online]. Springer Science and Business Media, 2025, 2025-4-7, **10**(4), 2443-2452 [cit. 2026-02-17]. ISSN 2365-6433. Dostupné z: doi:10.1007/s41207-025-00748-8

[67] ZHENG, Yulin, Yongshan WAN, Yue ZHANG, et al. Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorous removal technologies. *Critical Reviews in Environmental*

Science and Technology [online]. Informa UK Limited, 2022, 2022-9-30, **53**(11), 1148-1172 [cit. 2026-02-19]. ISSN 1064-3389. Dostupné z: doi:10.1080/10643389.2022.2128194

[68] AL-ASHEH, Sameer, Marzieh BAGHERI a Ahmed AIDAN. Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [online]. Elsevier BV, 2021, **4**(1), 100109 [cit. 2026-02-19]. ISSN 2666-0164. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscee.2021.100109

[69] MARGOT, Jonas, Cornelia KIENLE, Anoÿs MAGNET, et al. Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2013, **461-462**, 480-498 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.05.034

[70] MAILLER, R., J. GASPERI, Y. COQUET, et al. Removal of a wide range of emerging pollutants from wastewater treatment plant discharges by micro-grain activated carbon in fluidized bed as tertiary treatment at large pilot scale. *Science of The Total Environment* [online]. Elsevier BV, 2016, **542**, 983-996 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2015.10.153

[71] ALTMANN, Johannes, Aki Sebastian RUHL, Frederik ZIETZSCHMANN a Martin JEKEL. *Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment* [online]. 185-193 [cit. 2026-03-28]. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2014.02.025

[72] KIMURA, Katsuki, Hiroe HARA a Yoshimasa WATANABE. Removal of pharmaceutical compounds by submerged membrane bioreactors (MBRs). *Desalination* [online]. Elsevier BV, 2005, **178**(1-3), 135-140 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2004.11.033

[73] RADJENOVIĆ, Jelena, Marin MATOŠIĆ, Ivan MIJATOVIĆ, Mira PETROVIĆ a Damià BARCELÓ. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced

Wastewater Treatment Technology. *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 37-101 [cit. 2026-03-28]. ISBN 9783540792093. Dostupné z: doi:10.1007/698_5_093

[74] REUNGOAT, J., B.I. ESCHER, M. MACOVA, F.X. ARGAUD, W. GERNJAK a J. KELLER. Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents. *Water Research* [online]. Elsevier BV, 2012, **46**(3), 863-872 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2011.11.064

[75] TALVITIE, Julia, Anna MIKOLA, Arto KOISTINEN a Outi SETÄLÄ. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research* [online]. Elsevier BV, 2017, **123**, 401-407 [cit. 2026-03-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.07.005

[76] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. *Kvalita vod - Odběr vzorků - Část 10: Návod pro odběr vzorků odpadních vod*. 2021.

[77] WADE, M. J., A. SÁNCHEZ a M. R. KATEBI. On real-time control and process monitoring of wastewater treatment plants: real-time process monitoring. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* [online]. SAGE Publications, 2005, **27**(3), 173-193 [cit. 2026-02-28]. ISSN 0142-3312. Dostupné z: doi:10.1191/0142331205tm140oa

[78] Zákon č. 197/1998 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) - (úplné znění, jak vyplývá z pozdějších změn a doplnění). In: *Sbírka zákonů České republiky*. 1998.

[79] TAUŠ, M., M. PODHRÁZSKÝ a M. MIKEŠOVÁ. VH ATELIER, S.R.O. *Odkanalizování obce Němčice - studie (investiční záměr)*. Brno, 2025.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Základní topologická mapa s vyznačenou oblastí CHKO Moravský kras [5] 14
Obrázek 2 - Řez krasovým podložím [10] 17
Obrázek 3 - Schéma pohybu léčiv, osobní hygieny a kosmetiky v prostředí [23] ... 29

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Standardní limity [17] 21
Tabulka 2 - BAT limity [17] 22
Tabulka 3 - Zvláště nebezpečné a nebezpečné látky dle Zákona č. 254/2001 Sb. [29] 31
Tabulka 4 - Požadavky na vypouštění z čistíren městských odpadních vod dle SMĚRNICE RADY ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)[37] 39
Tabulka 5 - Požadavky na vypouštění z čistíren městských odpadních vod v citlivých oblastech, které podléhají eutrofizaci dle SMĚRNICE RADY ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod (91/271/EHS)[37] 40
Tabulka 6 - Normy jakosti podzemní vody dle SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2006/118/ES [38] 41
Tabulka 7 - Obecné požadavky na vypouštění komunálních odpadních vod do vod dle 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV) [40] 42
Tabulka 8 - Požadavky na vypouštění komunálních odpadních vod v citlivých oblastech dle 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV) [40] 44
Tabulka 9 - Souhrnné porovnání přístupu k legislativě 46
Tabulka 10 - Celkové srovnání centralizovaných a decentralizovaných systémů odstranění odpadních vod [57; 62; 63; 64] 59

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Přehledná mapa CHKO Moravský kras

Příloha č. 2 – Seznam dotčených obcí CHKO Moravský kras

Příloha č. 3 – Zhodnocení aktuálnosti PRVKÚK JMK

12 SEZNAM ZKRATEK

AOP	pokročilé oxidační procesy
AOPK ČR	Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky
AOX	adsorbovatelný organicky vázaný halogen
BAC	biologicky aktivní uhlí
BAT	nejlepší dostupná technologie
BSK_5	biochemická spotřeba kyslíku za 5 dní
CHKO	chráněná krajinná oblast
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
$CHSK_{Cr}$	chemická spotřeba kyslíku dichromanem
ČOV	čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
DČOV	domovní čistírna odpadních vod
EO	ekvivalentní obyvatel
EQS	normy environmentální kvality
EVL	evropsky významná lokalita
FO	dopředná osmóza
GAC	granulované aktivní uhlí
GSchG	Federální zákon o ochraně vod
GSchV	Vyhláška o ochraně vod
JMK	Jihomoravský kraj
MBBR	reaktor s pohyblivým nosičem biomasy
MBR	membránový bioreaktor
N	dusík

NATURA 2000	soustava chráněných území Evropské unie
NF	nanofiltrace
$N\text{-}NH_4^+$	amoniakální dusík
NL	nerozpuštěné látky
NO_2^-	dusitany
NO_3^-	dusičnany
PAC	práškové aktivní uhlí
PRVKÚK	Plán rozvoje vodovodů a kanalizací území kraje
RO	reverzní osmóza
SBR	sekvenční biologický reaktor
SCADA	systém dispečerského řízení a sběru dat
TI	celkový anorganický dusík
TKN	celkový Kjeldahlův dusík
TOC	celkový organický uhlík
UWWTD	směrnice o čištění městských odpadních vod
UV	ultrafialové záření
VAS	Vodárenská akciová společnost
WFD	rámcová směrnice o vodách
WWTP	čistírna odpadních vod