

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Možnosti racionalizace nakládání s vodou v lidské
společnosti**

Bakalářská práce

Tereza Grézlová

Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.

© 2025 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Možnosti racionalizace nakládání s vodou v lidské společnosti" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 25.4.2025

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Švehlovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi poskytl během zpracování práce. Tvorba bakalářské práce byla součástí aktivit spojených s řešením projektu TAČR č. SS07020258. Děkuji poskytovateli dotace za finanční podporu.

Možnosti racionalizace nakládání s vodou v lidské společnosti

Souhrn

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi racionalizace nakládání s vodou v lidské společnosti. Cílem práce bylo identifikovat cesty ke snižování spotřeby vody a efektivnímu využívání vodních zdrojů v různých oblastech lidské činnosti v domácnostech, průmyslu, zemědělství i městském prostředí. Práce se opírá o literární rešerši a systematicky popisuje technologická, ekologická a organizační opatření, která mohou přispět ke zlepšení vodního hospodářství.

V úvodních kapitolách je představena problematika dostupnosti vody, její význam pro člověka a dopady klimatických změn na vodní cyklus. Dále jsou diskutovány různé typy vod, mezi něž patří zejména pitná, užitková, šedá, černá či dešťová voda, a jejich potenciál pro opětovné použití. Práce se věnuje konkrétním technologiím pro úsporu vody v domácnostech, jako jsou úsporné sprchy, toalety a chytré zavlažovací systémy. Samostatná kapitola je věnována optimalizaci spotřeby vody v průmyslové výrobě, konkrétně například chladicím systémům, které v některých odvětvích představují největší podíl spotřeby vody. Zvláštní pozornost je věnována procesní vodě v potravinářském a papírenském průmyslu, kde hraje zásadní roli v technologických procesech a kde její efektivní recyklace představuje významný nástroj pro snížení celkové spotřeby vody v daném podniku.

Důležitou částí práce je rozbor možností využití vyčištěné odpadní vody jak v zemědělství, tak v městském a průmyslovém prostředí. Popsány jsou metody čištění i využití odpadní vody jako zdroje cenných látek, především dusíku a fosforu. Tyto živiny lze z vody získat pomocí různých fyzikálně-chemických a biologických procesů. Důležitým zdrojem je rovněž čistírenský kal, který může být po stabilizaci využit jako hnojivo nebo dále zpracován jako surovina. Práce rovněž upozorňuje na rizika spojená s využíváním recyklované vody, zejména z hlediska mikrobiální bezpečnosti a chemického složení.

Klíčová slova: pitná voda, užitková voda, odpadní voda, minimalizace spotřeby, recyklace, přírodní zdroje

The possibilities of the rationalization of water handling in human society

Summary

This bachelor thesis explores the possibilities for rationalizing water management in human society. The aim of the work was to identify ways to reduce water consumption and use water resources more efficiently across various sectors of human activity, including households, industry, agriculture, and urban environments. The thesis is based on a literature review and systematically describes technological, ecological, and organizational arrangements that can contribute to improving water management.

The introductory chapters present the issue of water availability, its importance for humans, and the impacts of climate change on the water cycle. Various types of water are also discussed, such as drinking water, utility water, greywater, blackwater, and rainwater water, along with their potential for reuse. The thesis focuses on specific water-saving technologies for households, including low-flow showers, dual-flush toilets, and smart irrigation systems. A separate chapter addresses the optimization of water consumption in industrial production, particularly in cooling systems, which account for a significant share of water use in certain sectors. Special attention is given to process water in the food and paper industries, where it plays a crucial role in production and where efficient recycling can significantly reduce total water consumption within a facility.

An important part of the thesis is the analysis of treated wastewater reuse in agriculture, urban settings, and industrial environments. It describes methods of wastewater treatment and its use as a source of valuable substances, particularly nitrogen and phosphorus. These nutrients can be recovered through various physical, chemical, and biological processes. A key source is also sewage sludge, which, after stabilization, can be used as fertilizer or further processed as a raw material. The thesis also highlights the risks associated with using recycled water, especially concerning microbial safety and chemical composition.

Keywords: drinking water, non-potable water, wastewater, consumption reduction, recycling, natural resources

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce.....	10
3	Voda a její význam pro člověka.....	11
3.1	Pitná voda	11
3.2	Užitková voda	11
3.3	Odpadní voda.....	11
3.3.1	Splásková odpadní voda	12
3.3.2	Srážková odpadní voda	12
3.3.3	Průmyslová odpadní voda	12
3.4	Zdroje vody	12
3.5	Zásoby vody	13
4	Globální stav vody.....	13
4.1	Klimatické změny	13
4.2	Spotřeba vody ve světě	14
4.3	Spotřeba vody v Evropě.....	14
4.4	Znečištění vody	15
4.4.1	Anorganické znečištění	15
4.4.2	Organické znečištění	16
4.4.3	Chemické a tepelné znečištění	16
4.4.4	Mikropolutanty	16
5	Možnosti minimalizace spotřeby vody v běžném životě.....	16
5.1	Úsporné sprchové hlavice	17
5.2	Úsporné toalety	17
5.3	Chytré zavlažovací systémy.....	18
6	Možnosti minimalizace spotřeby vody v průmyslové výrobě	19
6.1	Chladicí systémy.....	19
6.1.1	Chladicí okruhy otevřené s odparem.....	19
6.1.2	Recirkulační chladicí vodní systém	20
6.1.3	Chladicí věž	20
6.2	Optimalizace průmyslových chladicích systémů pro úsporu vody	21
6.3	Recyklace a opětovné použití vody v průmyslu	22
6.3.1	Potravinářský průmysl	22
6.3.2	Papírenský průmysl.....	23
7	Možnosti využití vyčištěné odpadní vody	24

7.1	Opětovné použití vody	24
7.1.1	Opětovné využití odpadní vody ve městech	24
7.1.2	Závlahy v zemědělství	25
7.1.2.1	Vliv vyčištěné odpadní vody na vodní zdroje	25
7.1.2.2	Vliv vyčištěné odpadní vody na půdu	26
7.2	Čištění odpadní vody	26
7.2.1	Biologické odstranění organického znečištění	26
7.2.2	Nitrifikace a denitrifikace	27
7.2.3	Odstraňování fosforu	27
7.2.4	Pokročilé oxidační procesy	28
7.2.5	Membránové procesy	28
7.2.5.1	Nanofiltrace	28
7.2.5.2	Ultrafiltrace	29
7.2.5.3	Reverzní osmóza	29
7.3	Opětovné využití odpadních vod v různých zemích	29
8	Možnosti využití odpadní vody	30
8.1	Šedá voda	30
8.2	Žlutá voda	31
8.3	Hnědá voda	32
9	Získávání cenných látek z odpadní vody	34
9.1	Čistírenský kal	34
9.1.1	Stabilizace kalu	34
9.1.2	Anaerobní stabilizace kalu	35
9.1.3	Aerobní stabilizace kalu	35
9.1.4	Kompostování	35
9.1.5	Tepelné a chemické zpracování kalu	36
9.2	Dusík a fosfor	36
9.2.1	Metody získávání dusíku	36
9.2.2	Metody získávání fosforu	37
10	Závěr	38
11	Literatura	40
12	Seznam citací obrázků	47

1 Úvod

Voda je základním aspektem pro existenci života a současně strategickým přírodním zdrojem, který hraje klíčovou roli ve fungování celé společnosti. Přestože tvoří voda většinu povrchu Země, pouze její malá část je přítomna ve formě sladké vody, kterou lze přímo využívat. Její nerovnoměrné geografické rozložení, znečištění a stále rostoucí poptávka po ní vyvolaná populačním růstem, urbanizací, průmyslovou výrobou a intenzivním zemědělstvím vede k narůstajícímu tlaku na vodní zdroje. Řada regionů již dnes čelí chronickému nedostatku vody a predikce vývoje naznačují, že tento trend bude nadále sílit.

V posledních desetiletích vzrostla globální spotřeba vody několikanásobně. Klimatické změny, extrémní výkyvy počasí, úbytek ledovců a změny v rozložení srážek situaci dále zhoršují. Mnohá území, která dosud netrpěla nedostatkem vody, se mohou v blízké budoucnosti dostat do vodního stresu. Vlivem sucha a přehřívání zemského povrchu klesá kvalita vody i její dostupnost, což může vážně narušit základní potřeby obyvatelstva, zemědělskou produkci a průmyslové procesy. Voda je zároveň surovinou, se kterou lidská společnost často nakládá nehospodárně. V domácnostech bývá pitná voda používána na činnosti, pro které by stačila voda užitková. V průmyslu a zemědělství dochází ke značným ztrátám vody buď v důsledku zastaralých technologií, nebo kvůli nedostatečnému řízení procesů. Tato praxe je nejen ekonomicky neefektivní, ale v kontextu klimatické nejistoty také environmentálně neudržitelná.

Zásadním směrem, kterým se moderní přístupy k hospodaření s vodou ubírají, je racionalizace jejího využívání. Tento přístup zahrnuje jak technologické inovace zaměřené na úspory a efektivnější využití vody, tak i změny v chování spotřebitelů, podporu osvěty a implementaci nových přístupů v oblasti vodního hospodářství. Stále větší význam získává také recyklace odpadních vod, nejen jako způsob úspory, ale i jako potenciální zdroj cenných látek, které lze z odpadních toků zpětně získávat a dále využívat, například v zemědělství či průmyslu. Otázka efektivního a odpovědného nakládání s vodou se tak stává jedním z klíčových témat současnosti. Nejde pouze o technický problém, ale i o širší otázku udržitelného rozvoje, environmentální spravedlnosti a schopnosti přizpůsobit se měnícím se podmínkám. Právě z toho důvodu je třeba hledat nové možnosti a strategie, jak spotřebu vody optimalizovat, a zároveň využít potenciál technologií, které umožňují nejen vodou šetřit, ale i zhodnocovat vodní zdroje v celém koloběhu vody.

Tato práce se proto zaměřuje na přehled možností racionálního nakládání s vodou a představuje přístupy, které mohou přispět k udržitelnějšímu hospodaření s tímto vzácným zdrojem.

2 Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce bude vytvořit literární řešení na téma "Možnosti racionalizace nakládání s vodou v lidské společnosti". Budou prezentovány cesty vedoucí k minimalizaci spotřeby vody v běžném životě i v průmyslové výrobě. Důraz přitom bude kladen mimo jiné na zabránění situací, ve kterých je voda vysoké kvality (například pitná voda) zbytečně používána k účelům, pro které je možno ji plnohodnotně nahradit vodou výrazně nižší kvality. Pozornost bude věnována také možnostem recyklace vody v různých situacích i problematice získávání cenných látek z odpadních vod.

3 Voda a její význam pro člověka

Na Zemi je 70 % povrchu pokryto vodou. Je to nezbytná součást našich životů i životů všech živých organismů (Říha 2014). Voda je unikátním zdrojem z několika důvodů. Zaprvé, díky hydrologickému cyklu se neustále obnovuje, což z ní činí relativně stabilní zdroj. Tento proces zahrnuje oběh povrchové a podzemní vody na Zemi, doprovázený změnami skupenství. Zadruhé je voda přítomná téměř na každém místě na Zemi, přestože její využitelnost se liší. Často se nachází v podobě slané vody v oceánech nebo jako led, což omezuje její přímé využití. Zdroje sladké vody, které jsou nezbytné pro lidskou spotřebu, nejsou rovnoměrně rozloženy. Proto je v mnoha případech nutné přepravovat vodu na velké vzdálenosti, aby bylo možné uspokojit potřeby velkých měst (Hordon, 2024).

Voda zastává v lidské společnosti mnoho funkcí, přičemž v biologické a zdravotní oblasti hraje zásadní roli ve výživě člověka. Samotné lidské tělo obsahuje 70 % vody, je nezbytné pravidelně přijímat tekutiny, aby bylo zajištěno správné fungování organismu. Doporučuje se, aby dospělý člověk denně přijal 2,5 až 3 litry vody. Voda však nenaplňuje své funkce pouze na individuální úrovni. Hraje také zásadní roli v širším měřítku, kde se její význam projevuje v podobě ekonomického, sociálního a enviromentálního přínosu. Její dostupnost a kvalita ovlivňují nejen lidské zdraví, ale i zemědělství, průmysl a celkové fungování ekosystémů (Říha 2014).

3.1 Pitná voda

Pitná voda zahrnuje veškerou vodu, ať už v přírodním stavu nebo po úpravě, která je určena k přímé konzumaci, vaření, přípravě jídel a nápojů nebo osobní hygieně. Patří sem také voda využívaná k čištění předmětů, jež přicházejí do styku s potravinami nebo lidským tělem, a k další účely související s lidskou spotřebou, bez ohledu na její původ, fyzikální stav či způsobu dodávání. Pro zajištění hygienické kvality a zdravotní nezávadnosti vody existují stanovené limity, které se týkají mikrobiologických, biologických, fyzikálních, chemických a organoleptických vlastností (Pitter 2015).

3.2 Užitková voda

Užitková voda je definována jako voda, která není určena pro pití ani přípravu jídel, avšak i přesto musí splňovat určité hygienické požadavky. Je-li určena k napájení hospodářských zvířat, její kvalita nesmí překročit stanovené limity. Specifickým typem užitkové vody je teplá voda, přičemž v obytných budovách je striktně vyžadováno, aby k jejímu ohřevu byla použita výhradně voda pitné kvality (Šálek 2012).

3.3 Odpadní voda

Vedle užitkové vody, která může být znovu využita, existuje také voda odpadní, jež vyžaduje odpovídající zpracování. Odpadní voda zahrnuje veškerou vodu, která byla použita a následně odváděna do kanalizačního systému a následně čistících zařízení, tedy do čistíren odpadních vod. Základní rozdělení odpadních vod se obvykle provádí na splaškové, průmyslové, zemědělské a dešťové (RAVOS, s.r.o. 2022).

3.3.1 Splašková odpadní voda

Splašková voda je výsledkem běžných lidských aktivit a pochází z různých objektů, jako jsou domácnosti, vzdělávací instituce, administrativní budovy či obchodní prostory (RAVOS, s.r.o. 2022). Smícháním černé a šedé vody vzniká splašková odpadní voda, přičemž černá a šedá voda se rozlišují podle svého původu. Černá voda vzniká splachováním toalet, kdy dochází ke spojení hnědé a žluté vody. Žlutá voda, tedy moč, obsahuje důležité živiny jako jsou dusík, fosfor a draslík, které lze využít jako hnojivo v zemědělství. Hnědou vodu tvoří fekálie smíchané s určitým množstvím vody. Je bohatá na organickou hmotu a živiny, jako je vápník, hořčík a železo, a v malém množství obsahuje také uhlík, dusík, fosfor a draslík. Na rozdíl od černé vody, která obsahuje fekálie a moč, je šedá voda méně znečištěná a pochází především z koupelen, kuchyní a prádelen. Voda z koupelen může být znovu využita jako provozní voda neboli bílá voda, která se často používá ke splachování toalet nebo k zavlažování zahrad. Největší podíl znečištění šedé vody pochází z detergentů obsažených v pracích práscích, šamponech, mýdlech, zubních pastách a dalších hygienických a čistících prostředcích (Beránková 2016).

3.3.2 Srážková odpadní voda

Při intenzivních deštích, bouřkách nebo povodních se voda často nevsákne do půdy a stéká po ulicích a otevřených prostranstvích. Tento povrchový odtok představuje významný zdroj znečištění, protože s sebou unáší škodlivé látky, jako jsou plasty, pesticidy, herbicidy, oleje, chemické látky, těžké kovy a různé patogeny. Tyto nečistoty pocházejí z městských komunikací, průmyslových oblastí nebo stavenišť. Dešťová voda poté odtéká přímo do přírodních vodních toků nebo je odváděna kanalizačními systémy. Takto kontaminovaná voda negativně ovlivňuje vodní ekosystémy a celkově životní prostředí (Ahmed et al. 2021).

3.3.3 Průmyslová odpadní voda

Průmyslová odpadní voda představuje vedlejší produkt výrobních a komerčních procesů, zahrnujících výrobu, čištění a další technologické operace. Její složení se vyznačuje přítomností rozpuštěných i suspendovaných látek, jejichž charakteristiky závisí na specifikách daného průmyslového odvětví. Mezi hlavní producenty této odpadní vody patří těžební a metalurgický průmysl, elektrárny, těžba ropy a plynu či potravinářský sektor. Kontaminace průmyslových odpadních vod zahrnuje široké spektrum látek, včetně těžkých kovů, organických sloučenin, olejů, pesticidů, kalů, léčiv a dalších průmyslových vedlejších produktů (Ahmed et al. 2021).

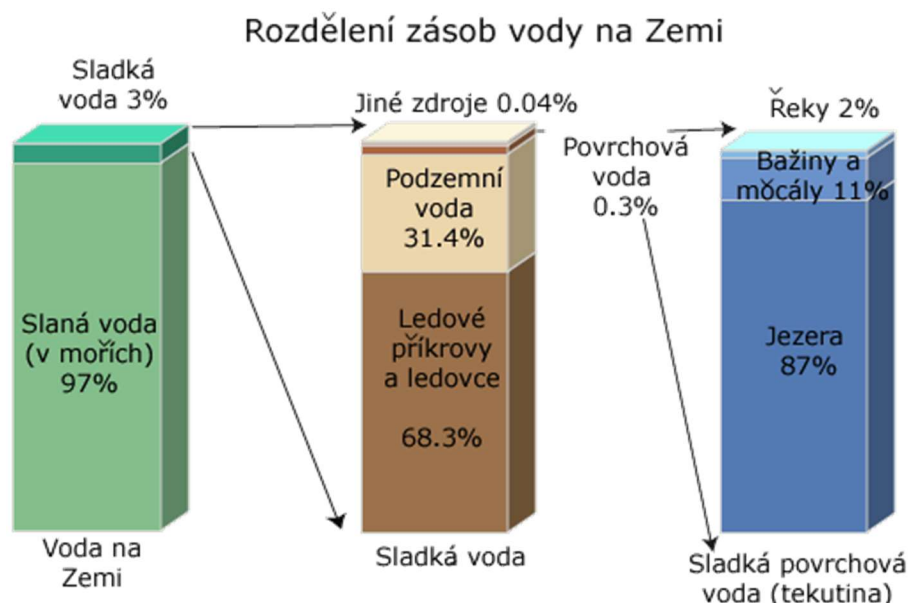
3.4 Zdroje vody

Zdroje vody lze obecně rozdělit na povrchové a podzemní, přičemž tvoří základ našeho vodního hospodářství a poskytují většinu vody, kterou denně používáme. Povrchová voda hraje zásadní roli v lidské společnosti a v různých ekosystémech, přičemž její dostupnost je však geograficky a časově nerovnoměrná. Tato zásoba vody zahrnuje oceány, řeky, potoky a jezera. Klíčovým faktorem pro tyto zdroje je hydrologický cyklus, který neustále doplňuje jejich zásoby. Povrchová voda je nepostradatelná nejen pro přímou spotřebu, ale také pro zavlažování, výrobu elektřiny ve vodních elektrárnách, průmyslové procesy a dopravu (Belward et al. 2020).

Podzemní voda se nachází ve vrstvách pod zemským povrchem. Představuje zásadní zdroj pitné vody a také v zemědělství zdroj vody pro zavlažování plodin. Podzemní voda se nachází v podzemních vodonosných vrstvách, které tvoří trhliny a prostory v půdě, písku a horninách, které umožňují akumulaci vody. Vzniká postupným vsakem srážkové vody, jako je déšť nebo sníh, do zemského povrchu. Tento proces zajišťuje neustálé doplňování zásob v hlubších vrstvách (Hagler 2024).

3.5 Zásoby vody

Zásoby vody jsou nerovnoměrně rozložené a jejich dostupnost se značně liší v závislosti na geografických a klimatických podmínkách. Celkové množství vody na Zemi činí přibližně 1,4 miliard m^3 , z toho většina se nachází ve formě slané vody a tvoří asi 97 % celkového objemu. Pouze 3 % světových vodních zásob představuje sladká voda, jak znázorňuje obr. 1. Rozdíly v zásobách vody v různých částech světa mohou mít vážné výzvy v oblasti správy a ochrany vodních zdrojů. (Říha 2014)



Obrázek 1: Rozdělení zásob vody na Zemi (USGS, 2018).

4 Globální stav vody

4.1 Klimatické změny

Změna klimatu představuje jednu z největších výzev, kterým lidstvo čelí. Stoupající teploty, změny srážek a nárůst četnosti extrémních klimatických jevů, jako jsou sucha a povodně, výrazně ovlivňují kvalitu a dostupnost vody. Hlavní příčinou těchto změn je globální oteplování, které má zásadní dopad na hydrologický cyklus. Zvýšení teploty vede k rychlejšímu odpařování vody z povrchu země a oceánů, což způsobuje jak častější a intenzivnější sucha, tak i extrémní srážky, vedoucí k povodním a erozi půdy (Kanae 2009).

V polosuchých a suchých oblastech, kde jsou vodní zdroje již omezené, globální oteplování pravděpodobně povede k dalšímu snížení dostupnosti vody (Kanae, 2009). Mezi nejvíce ohrožené regiony patří Afrika, Blízký východ, Austrálie a Aralská pánev (Ragab & Prudhomme 2002). Hlavní příčinou je předpokládaný pokles srážek a úbytek zásob vody ze sněhu a ledovců, které jsou klíčovými zdroji vody v mnoha regionech. Snížená dostupnost vody může vážně ovlivnit zemědělství a způsobit zhoršení produkce potravin. To může mít negativní dopady na veřejné zdraví, které mohou vést ke zdravotním problémům, jako je podvýživa nebo nemoci spojené s kontaminovanou vodou (Kanae 2009). Mezi tato onemocnění patří Salmonella, Hepatitida A a Legionelóza, které mohou způsobovat těžké průjemové onemocnění, dehydrataci či závažné infekce dýchacích cest, a tím ohrožovat zejména zranitelné skupiny obyvatel (Ashbolt 2004). Naopak v jiných regionech, jako je Asie, můžeme očekávat nárůst srážek, což může způsobit záplavy a jiné vodní katastrofy. Očekává se, že v průběhu 21. století bude každoročně postiženo záplavami více lidí. Tyto záplavy mohou přinést nejen fyzické škody, ale také zdravotní rizika (Kanae 2009).

4.2 Spotřeba vody ve světě

Současná spotřeba vody je sice na první pohled relativně nízká, neboť je využíváno přibližně 10 % obnovitelných sladkovodních zdrojů, které jsou na Zemi k dispozici. Tyto zdroje zhruba odpovídají celkovému množství vody, které odtéká z pevniny. Příčinou vodních krizí je nerovnoměrné rozložení vody v čase a prostoru ve srovnání s místy, kde je voda potřeba. Zejména geografická nerovnováha hraje klíčovou roli. I když jsou v oblastech s dostatkem srážek velké zásoby vody, lidé se často nacházejí v oblastech, kde je vody málo (Kanae 2009).

Globální spotřeba vody neustále narůstá, a to především v důsledku rostoucí světové populace a zrychlující se urbanizace a industrializace v rozvojových zemích. Rozložení sladké vody na Zemi je však velmi nerovnoměrné, což vede k výrazným regionálním přebytkům i deficitům, které nejsou patrné při pohledu na celkové světové průměry. Nároky jednotlivých států na spotřebu vody se odvíjejí zejména od toho, zda daná země produkuje potraviny pro vlastní potřebu, tedy potřebuje více vody na zavlažování, nebo je závislá na jejich dovozu. Významně spotřebu ovlivňují i klimatické podmínky a množství srážek. K výrazným rozdílům dochází i mezi rozvinutými a rozvojovými zeměmi, zejména v oblasti domácí a průmyslové spotřeby. Zatímco průměrná roční potřeba vody na produkci potravin činí přibližně 1200 m³ na osobu, domácnosti spotřebují v průměru pouze kolem 18 m³/os/rok (Jury et al. 2007).

Navíc, i přes rozvoj technologií a vodohospodářských projektů, regionální krize s vodou přetrvávají. Kvůli změnám klimatu, které vedou k extrémním projevům počasí, je stále složitější předvídat a regulovat dostupnost vody v různých částech světa. V důsledku toho jsou nejvíce postižené oblasti nuceny hledat alternativní způsoby získávání vody, například prostřednictvím odsolování mořské vody. Avšak tato technologie je energeticky náročná a nemusí být udržitelným řešením v širším měřítku (Kanae 2009).

4.3 Spotřeba vody v Evropě

Evropa se stále více potýká s nedostatkem vody v důsledku klimatických změn, sucha, nadměrného čerpání a znečištění vodních zdrojů. Nejvíce ohrožené jsou jižní státy, jako

Španělsko, Řecko a Portugalsko, kde zavlažování významně zatěžuje vodní bilanci. Spotřeba vody je vysoká i v průmyslu a energetice, kde chlazení elektráren tvoří přibližně 28 % celkové spotřeby, zatímco zemědělství spotřebuje až 40 %. S rostoucí populací a urbanizací se problém dotýká i severní a střední Evropy. Pro zajištění dlouhodobé udržitelnosti vodních zdrojů je klíčové efektivnější hospodaření s vodou, modernizace technologií a snížení znečištění. (Europien Environment Agency 2018).

V roce 2023 se denní spotřeba vody v českých domácnostech snížila na 86,7 litru na osobu, což představovalo tříprocentní pokles oproti předchozímu roku. Naopak průmyslová a ostatní spotřeba vzrostla o 1,5 %, dosahující 152 milionů m³. Vodovodní síť pokrývala 94,5 % populace, přičemž průměrná cena vodného činila 53,10 Kč/m³ bez DPH. Kanalizací bylo napojeno 86,7 % obyvatel a téměř veškeré odpadní vody prošly čištěním (ČSÚ 2024).

4.4 Znečištění vody

Znečištění vody představuje degradaci kvality vodních zdrojů v důsledku lidské činnosti, která má závažné důsledky nejen pro životní prostředí, ale také pro lidské zdraví. Mezi hlavní faktory přispívající ke znečištění vody patří průmyslová výroba, zemědělství, těžba surovin a nevhodná likvidace odpadu (Goudie 2013).

4.4.1 Anorganické znečištění

Závažnou formou anorganického znečištění vody je přítomnost těžkých kovů, jejichž koncentrace stoupá v důsledku lidské činnosti, zejména průmyslové výroby. Mezi nejnebezpečnější kovy z hlediska lidského zdraví patří olovo, rtuť, arzen a kadmium. Další prvky, jako například měď, stříbro, zinek, chrom a selen, mohou být škodlivé zejména pro vodní organismy. Tyto kovy pocházejí z různých zdrojů, například ze spalování uhlí, hutní výroby, komunálních odpadních vod nebo výluhů ze skládek. Vedle kovů představují problém také dusičnany a fosfáty, které přispívají k eutrofizaci vod. Tyto živiny pocházejí z přírodních i antropogenních zdrojů, jako jsou hnojiva, odpadní vody nebo živočišné exkrementy. (Goudie 2013).

Eutrofizace je proces zvyšování koncentrace minerálních živin (především N a P) vedoucí k vysoké produkci biomasy řas, sinic a dalších organismů. Tento jev se vyskytuje přirozeně, ale v posledních desetiletích je výrazně urychlován lidskou činností. Mezi hlavní zdroje živin, které vedou k eutrofizaci patří hnojiva a zemědělská činnost, průmyslové a komunální odpadní vody, akvakultura a chov zvířat. Přebytek živin ve vodních ekosystémech podporuje intenzivní růst řas, které snižují průhlednost vody a omezují přístup světla do hlubších vrstev. To narušuje rovnováhu ekosystému, vede k omezení druhové rozmanitosti a ohrožuje citlivější druhy organismů. Po odumření řas dochází k jejich rozkladu, který spotřebovává velké množství kyslíku, což může vyvolat masivní úhyn ryb a dalších vodních živočichů. Navíc některé druhy sinic produkují toxiny, jež mohou kontaminovat pitnou vodu a představovat zdravotní riziko pro lidi i zvířata (Akinnawo 2023).

4.4.2 Organické znečištění

Odpadní vody obsahují komplexní směs organických látek, přičemž dominantní složkou jsou sloučeniny uhlíku, vodíku, kyslíku a dusíku. Dále se zde vyskytují organické sloučeniny síry a fosforu. Z hlediska hlavních skupin látek převládají bílkoviny (40-60 %), cukry (25-50 %) a tuky s oleji (10 %). Splaškové vody vždy obsahují močovinu a produkty jejího rozkladu. V menším množství se v nich nacházejí také fenoly, tenzidy a pesticidy (Pecháček 2019).

Organické polutanty jsou syntetické chemické látky, které se v prostředí obtížně rozkládají, protože odolávají chemickým, biologickým i fotolytickým degradačním procesům. Často se vyskytují v povrchových, podzemních i odpadních vodách, kam se dostávají z pesticidů, farmaceutických přípravků nebo petrochemického průmyslu. Kvůli své dlouhodobé přetrvávající povaze negativně ovlivňují jak ekosystémy, tak lidské zdraví (Yusuf et al. 2019).

4.4.3 Chemické a tepelné znečištění

Tepelné znečištění vzniká, když lidská činnost zvýší teplotu vody, čímž negativně ovlivňuje vodní ekosystémy. Vyšší teploty snižují schopnost vody vázat kyslík, zatímco současně zrychlují rozklad organických látek, což dále zvyšuje spotřebu kyslíku. Tím dochází k jeho úbytku, což může být fatální pro vodní organismy, zejména plankton, korýše a ryby citlivé na teplotní změny. Změny teploty mohou také narušit přirozené chování ryb, například migraci nebo tření (Goudie 2013).

Hlavním zdrojem tepelného znečištění v průmyslových zemích je ohřátá voda z chladicích systémů elektráren, která bývá vypouštěna zpět do řek. Vliv na teplotu toku závisí na průtoku, při povodních je změna malá, při nízkých stavech vody může být ohřev výraznější. Teplotní změny mohou být způsobeny také urbanizací, například odtokem z městských ploch, výstavbou přehrad, ztrátou přirozeného stínu podél toků nebo změnami ve tvaru koryta. K oteplení dochází i po odlesnění, kde odstranění vegetace zvyšuje sluneční osvit, a tím i teplotu vody (Goudie 2013).

4.4.4 Mikropolutanty

Mikropolutanty jsou znečišťující látky, které zahrnují široké spektrum sloučenin pocházejících jak z přírodních zdrojů, tak z lidské činnosti. Mezi tyto látky patří léčiva, kosmetické přípravky, hormony, průmyslové chemikálie a pesticidy. Látky se mohou dostat do vodního prostředí, kde mohou mít negativní dopady, jako je akutní i chronická toxicita, narušení hormonální rovnováhy u organismů nebo vznik rezistentních mikroorganismů vůči antibiotikům. Představují riziko pro volně žijící organismy a jejich malé množství a rozmanitost ztěžují jejich odstranění při čištění vody (Luo et al. 2014).

5 Možnosti minimalizace spotřeby vody v běžném životě

V domácnostech představuje spotřeba vody klíčový faktor každodenního života. S rostoucí světovou populací, která přesahuje 8 miliard, se zvyšuje tlak na vodní zdroje, přičemž voda spotřebovaná v domácnostech představuje významnou část celkové poptávky po sladké vodě. Podle dostupných údajů se domácnosti podílejí přibližně 15 % na celosvětové spotřebě sladké vody, což však výrazně kolísá mezi jednotlivými zeměmi a regiony. Například v Indii

tvoří spotřeba vody v domácnostech pouze 7 % z celkové spotřeby, zatímco v rozvojových oblastech, jako je Jižní Afrika, dosahuje tento podíl až 35 %. V Číně, která je jednou z nejlidnatějších zemí světa, činí spotřeba vody v domácnostech přibližně 15,4 % (Chen et al. 2023).

Kromě domácností je významným odběratelem sladké vody zemědělství, které spotřebovává až 70 % celkového objemu vody odebírané z řek, jezer a podzemních zdrojů. To odebíráme z tzv. modré vody a využíváme ji na zavlažování (International Water Management Institute 2007).

5.1 Úsporné sprchové hlavice

Úsporné sprchové hlavice představují efektivní řešení pro snižování spotřeby vody v domácnostech. Moderní sprchové hlavice využívají různé technologie, které umožňují šetřit vodu buď mechanicky, nebo prostřednictvím chytrých funkcí, které mění chování uživatelů (Tomberg 2024).

Jedním z typů je chytrá sprchová hlavice, která poskytuje vizuální zpětnou vazbu pomocí LED diod měnících barvu v závislosti na množství spotřebované vody. Tato zpětná vazba motivuje uživatele ke zkrácení doby sprchování nebo vypnutí vody během mydlení. Použitím chytré hlavice lze dosáhnout snížení spotřeby vody přibližně o 20 %. Pro nižší spotřebu, která se pohybuje okolo 40 % je možné použití nízkoprůtokové sprchové hlavice, která tohoto úsporného efektu docílí mechanickým omezením průtoku. Tato technologie nevyužívá digitální zpětnou vazbu, omezení průtoku je stálé a není závislé na chování uživatele, což zajišťuje trvalou úsporu vody. Nejúčinnějším řešením je kombinovaná hlavice, která spojuje výhody obou přístupů. Tato hlavice omezuje průtok vody mechanicky a zároveň poskytuje vizuální zpětnou vazbu pomocí LED diod. Díky této kombinaci lze dosáhnout až 60% úspory vody, protože se nejen redukuje průtok, ale zároveň se motivuje uživatel k ještě úspornějšímu chování (Tomberg 2024).

Snížená spotřeba vody má také dopad na spotřebu energie, protože se snižuje množství vody, kterou je třeba ohřívat. Vědecké studie ukazují, že použití chytrých nebo úsporných hlavice může snížit spotřebu energie na ohřev vody o 20 až 60 %, v závislosti na použité technologii (Tomberg 2024).

5.2 Úsporné toalety

Tradiční způsoby nakládání s lidským odpadem, zejména v městském prostředí, často zahrnují využívání pitné vody k jeho odstraňování prostřednictvím splachování. Tento přístup je nejen energeticky a ekonomicky náročný, ale především neudržitelný z pohledu šetření přírodními zdroji. Existují však alternativní řešení, která umožňují významné snížení spotřeby vody a zároveň efektivnější využití živin obsažených v lidském odpadu (Anand & Apul. 2013).

Jedním z těchto řešení jsou kompostovací toalety, které fungují bez napojení na vodovodní a kanalizační síť. Umožňují přirozený rozklad organické složky odpadu a výsledný materiál je možné dále využít jako kompost. Konstrukčně se tyto systémy liší, některé pracují s jednou komorou, jiné mají vícekomorové uspořádání, které umožňuje oddělené zpracování čerstvého a rozloženého materiálu. Toalety mohou být provozovány mechanicky nebo s

využitím elektrické energie, některé fungují zcela bez vody, jiné využívají minimální množství vody nebo pěny (Anand & Apul. 2013).

Zvláštní kategorií tvoří separační toalety, které umožňují oddělit moč od pevných složek odpadu. Tím se zamezuje nadměrnému zvlhčování kompostu a současně se snižuje množství patogenů i zápachu. Moč obsahuje vysoké množství živin, především dusíku, fosforu a draslíku, a je možné ji dále využít jako přírodní hnojivo (Anand & Apul. 2013).

Dalším inovativním řešením je vakuová toaleta s mechanickým ovládáním, která splachuje odpad pomocí podtlaku vytvořeného ručním pístem. Tento systém nevyžaduje elektřinu a využívá šedou vodu z domácnosti, například z praní nebo sprchování, čímž zcela eliminuje potřebu použití pitné vody. Oproti běžným toaletám může tímto způsobem dojít ke snížení spotřeby vody až o polovinu. Odpad je přesměrován do skladovací komory, kde dochází k oddělení pevné a kapalné složky. Pevná část je následně smísena s přírodními materiály, jako jsou piliny nebo kokosová vlákna, a po několika měsících kompostována. Výsledkem je organický materiál vhodný k využití v zemědělství (Ihalawatta et al. 2015).

Tyto systémy nejen šetří vodní zdroje, ale zároveň umožňují uzavřít koloběh živin, omezit produkci odpadních vod a v některých případech dokonce vytvářejí nové ekonomické příležitosti, například prostřednictvím výroby a distribuce kompostu nebo hnojiva. Díky nízkým nárokům na vodu a energii představují funkční alternativu ke klasickým toaletám zejména v oblastech s omezeným přístupem ke zdrojům, ale i v ekologicky zaměřených stavbách a projektech (Ihalawatta et al. 2015).

5.3 Chytré zavlažovací systémy

Moderní zavlažovací systémy představují významný krok směrem k efektivnějšímu hospodaření s vodními zdroji v domácnostech i v zemědělství. Mezi nejpokročilejší systémy patří chytré kapkové a postřikovací zavlažovací systémy, které využívají moderní technologie, jako jsou senzory půdní vlhkosti, meteorologická data a řízení pomocí Internetu věcí (IoT). IoT označuje propojení různých chytrých zařízení do jedné sítě, která umožňuje vzájemnou výměnu informací a automatizace procesů. Tyto systémy umožňují automatizovat a optimalizovat zavlažování, což vede k úsporám vody, energie a snížení nákladů (Bhavsar et al. 2023).

Kapková závlaha je jednou z nejefektivnějších metod zavlažování. Voda je aplikována přímo ke kořenům rostlin v malých dávkách, čímž se minimalizují ztráty způsobené odpařováním a odtokem. Tento systém využívá síť plastových hadic a kapkovačů, které regulují množství dodané vody (Bhavsar et al. 2023). Chytré systémy kapkové závlahy používají senzory vlhkosti půdy, které neustále měří množství vody v půdě. Na základě těchto dat se automaticky upravuje zavlažovací plán. Pokud senzory detekují dostatečnou vlhkost v půdě, zavlažování se zastaví, čímž se eliminuje nadměrné zalévání. V některých případech se k optimalizaci zavlažování používají i algoritmy strojového učení, které predikují potřebu vody na základě historických dat a aktuálních povětrnostních podmínek. Dalším významným přínosem kapkové závlahy je možnost využití recyklované vody. Vyčištěná odpadní voda může být po vhodné úpravě využita pro zavlažování zemědělských plodin, čímž se snižuje potřeba pitné vody (Odone et al. 2024).

Postřikovací systémy zavlažují plochy rovnoměrným rozprašováním vody do vzduchu, která následně padá na zem jako déšť. Tento způsob je ideální pro zavlažování trávníků,

květinových záhonů a zeleninových zahrad. Moderní chytré postřikovací systémy však překonávají tradiční systémy díky pokročilé technologii řízení zavlažování. Chytré postřikovací systémy využívají data z meteorologických stanic, senzory vlhkosti půdy a srážkové senzory. Pokud například dojde k dešti, zavlažovací cyklus se automaticky přeruší, aby se předešlo zbytečnému plýtvání vodou. Systémy lze ovládat pomocí mobilních aplikací, které umožňují uživatelům plánovat a řídit zavlažování na dálku (Bhavsar et al. 2023).

Pro automatické zavlažování hraje klíčovou roli IoT. Systémy propojené s IoT využívají síť senzorů, které přenášejí data o půdní vlhkosti, počasí, srážkách a teplotě do centrálního systému. Tento systém na základě přijatých dat rozhoduje o tom, kdy a jak dlouho zavlažovat (Bhavsar et al., 2023). V pokročilých systémech, jako je například chytrá fertigace, jsou navíc používány senzory pro měření koncentrací živin (N, P, K) v zavlažovací vodě. Díky neustálému monitorování, zajišťuje přesné dodávání vody a živin v reálném čase. Pomocí těchto senzorů systém upravuje nejen množství vody, ale také poměr živin dodávaných rostlinám, což optimalizuje celý proces zavlažování (Odone et al. 2024). Dalším klíčovým prvkem je vzdálená správa a řízení přes mobilní aplikace. Díky IoT je možné sledovat a ovládat zavlažovací systém na dálku. Uživatelé mají přístup k analytickým datům o spotřebě vody, vlhkosti půdy a meteorologických podmínkách. Tato data se zpracovávají prostřednictvím pokročilých algoritmů, které umožňují predikci potřeby zavlažování v budoucích dnech. To přináší vyšší efektivitu a eliminuje zbytečné plýtvání vodou (Bhavsar et al. 2023).

6 Možnosti minimalizace spotřeby vody v průmyslové výrobě

V důsledku postupného vyčerpávání přírodních zdrojů jsou průmyslová odvětví, jako energetika, petrochemický, textilní a zemědělský průmysl, nucena zavádět opatření pro efektivnější využívání vody a energie. V této souvislosti se stává klíčová vzájemná rovnováha mezi spotřebou vody a energetickými nároky. Voda hraje zásadní roli v procesních operacích, kde je nezbytná pro chlazení, přepravu, zpracování surovin a jejich extrakci. Naopak energie je nezbytná pro celý cyklus hospodaření s vodou, od jejího získávání, úpravy, skladování, distribuce a následného čištění. Tento vzájemný vztah vyžaduje integrovaný přístup k řízení průmyslových procesů, jehož cílem je snížit ekologickou zátěž a zároveň zlepšit efektivitu provozu (Duhbaci 2021).

6.1 Chladicí systémy

Chladicí systémy hrají klíčovou roli v mnoha průmyslových odvětvích. Tyto systémy pracují na principu přenosu tepla mezi chladicím médiem a okolním prostředím, přičemž nejčastěji využívají právě vodu (Hübner 2023).

6.1.1 Chladicí okruhy otevřené s odparem

Otevřené chladicí systémy patří mezi nejdůležitější technologie pro odvod tepla v průmyslových a energetických provozech, přičemž jejich princip je založen na odpařování vody. Tyto systémy jsou široce využívány zejména v elektrárnách a velkých výrobních závodech, kde je nutné efektivně odvádět přebytečné teplo. Mezi hlavní typy těchto systémů patří odpařovací rybníky nebo plochy s rozstříkem, ale nejvýznamnější jsou chladicí věže. To

jsou zařízení určená k odvádění přebytečného tepla z průmyslových procesů, elektráren nebo klimatizačních systémů. Fungují na principu přímého kontaktu vody s okolním vzduchem, čímž dochází k ochlazení vody díky odpařování (Hübner 2023).

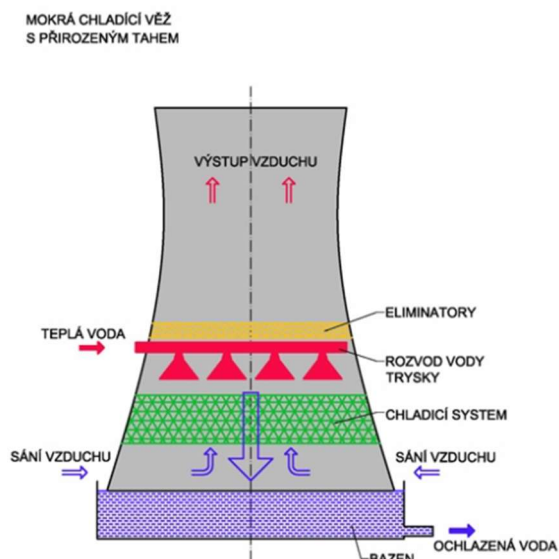
6.1.2 Recirkulační chladicí vodní systém

Uzavřené chladicí systémy pracují na principu cirkulace chladicího média v uzavřeném okruhu (Serna-González 2010). Jsou nezbytnou součástí chemického, ocelářského a petrochemického průmyslu, stejně jako elektráren, chladicích a klimatizačních systémů (Serna-González et al. 2010; Shigi et al. 2025). Tyto systémy se skládají z čerpadla, výměníků tepla, chladicí věže, potrubních systému a ventilů, které odvádějí přebytečné teplo. Tepelná výměna se skládá ze dvou okruhů, které se propojují. Nejprve voda absorbuje teplo ve výměníku tepla a následně je odváděna do chladicí věže, kde dochází k jejímu ochlazení a uvolněním tepla do okolního prostředí (Shigi et al. 2025).

Tento systém má však problémy s úsporou vody a energie. Z důvodu proměnlivých provozních podmínek dochází k nutnosti zvýšit průtok vody pro zachování optimálního chladicího výkonu. To vede k vyššímu zatížení zařízení, rostoucí energetické spotřebě a následným ztrátám, což může výrazně ovlivnit efektivitu celého systému. Přestože jsou recirkulační systémy výhodnější než otevřené chladicí systémy, protože umožňují opětovné využití vody a tím její celkovou spotřebu, stále patří mezi velké spotřebitele jak vody, tak energie. Proto je důležité se zaměřit na jejich optimalizaci a hledání způsobů, jak minimalizovat provozní náklady i environmentální dopady (Shigi et al. 2025).

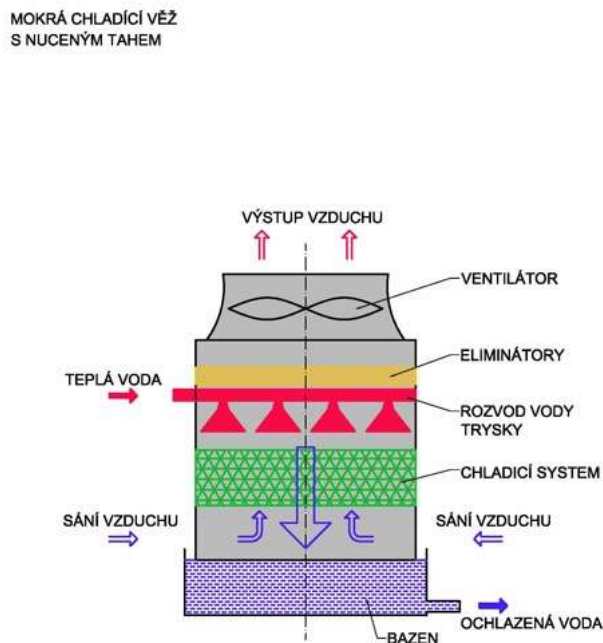
6.1.3 Chladicí věž

Chladicí věže jsou podstatné pro chladicí systémy v průmyslu. Správná funkčnost věže záleží na environmentálních podmínkách, konstrukčních parametrech a vlastnosti použité výplně, které ovlivňují dynamiku tepelného přenosu (Shigi et al. 2025). Chladicí věže se rozdělují na 2 kategorie. Ve velkých elektrárnách se používají chladicí věže přirozeného tahu, které využívají vztlak ohřátého vzduchu k jeho cirkulaci věží. Tento systém je znázorněn na obr. 2. (Serna-González et al. 2010).



Obrázek 2: Chladicí věž s přirozeným tahem (FANS, a.s.)

Naproti tomu mechanické chladicí věže na obr. 3 využívají ventilátory k aktivnímu pohybu vzduchu, což zajišťuje vyšší účinnost přenosu tepla, kompaktnější konstrukci a nižší spotřebu vody ve srovnání s přirozeným tahem (Serna-González et al. 2010).



Obrázek 3: Chladicí věž s nuceným tahem (FANS, a.s.)

6.2 Optimalizace průmyslových chladicích systémů pro úsporu vody

V některých chemických výrobních procesech se až 70–80 % veškeré spotřebované vody využívá v chladicích systémech, což z nich činí klíčovou oblast pro efektivnější hospodaření s

vodou a zavádění moderních technologií. Tradiční otevřené chladicí věže sice efektivně odvádějí teplo, ale dochází u nich k výrazným ztrátám vody odparem, odvodem odpadní vody a unášením kapek. Uzavřené chladicí systémy, kde voda nepřichází do přímého kontaktu se vzduchem, dokážou tyto ztráty minimalizovat. Další možností úspor je kombinace vodního a vzduchového chlazení. Vzduchové chladiče umožňují odvést část tepla bez nutnosti použití vody, čímž snižují její celkovou spotřebu (Liu et al. 2022).

6.3 Recyklace a opětovné použití vody v průmyslu

Pro průmyslové účely není zpravidla vyžadována tak vysoká kvalita vody jako pro vodu pitnou, což činí recyklovanou vodu vhodnou alternativou. Její opětovné využití přispívá ke snižování provozních nákladů a zvyšování udržitelnosti. V současnosti se recyklovaná voda nejčastěji využívá k chlazení, doplňování kotlů nebo přímo v technologických procesech. Je však třeba počítat s určitými riziky, jako je koroze, nežádoucí růst mikroorganismů nebo tvorba vodního kamene, které se u pitné vody vyskytují méně často (Mo & Zhang 2013).

6.3.1 Potravinářský průmysl

Voda hraje v potravinářském průmyslu klíčovou roli, protože je nezbytná pro mnoho výrobních procesů, včetně mytí surovin, oplachování, chlazení, vaření, pasterizace a hygieny zařízení i provozu (Casani et al. 2005). Tento sektor je jedním z největších spotřebitelů vody, přičemž většina využívané vody je pitná voda (Garnier et al. 2023). Mezi hlavní zdroje pitné patří veřejné vodovody, podzemní a povrchové vody, přičemž kvalita vody se může lišit v závislosti na jejím původu. Aby byla vhodná pro použití v potravinářství, často se upravuje pomocí filtrace, změkčováním nebo dezinfekce (Casani et al. 2005).

Velká spotřeba vody v tomto odvětví vede následně k produkci značného množství odpadních vod. Recyklace vody se v tomto ohledu stává klíčovým řešením, které pomáhá snižovat spotřebu vody a snižovat náklady na její úpravu a likvidaci (Shrivastava et al. 2022). Opětovné využití vody v potravinářském průmyslu se často uplatňuje pro zavlažování, ale efektivnější je její opětovné použití přímo v rámci výrobních procesů. Voda z potravinářských procesů obsahuje různorodé složky, a proto je nutné pečlivě zhodnotit její kvalitu, účel použití a možnosti úpravy. Vhodnost jejího znovupoužití závisí na požadované kvalitě pro daný proces, typu znečištění a zvoleném způsobu regenerace (Casani et al. 2005).

V potravinářském průmyslu existuje potenciál pro opětovné využití vody z výrobního procesu. Zatímco se tato voda běžně používá pro nepotravinářské účely, jako je čištění zařízení nebo chlazení, lze ji po úpravě využít přímo ve výrobě. Příklady přímého opětovného využití zahrnují vodu z mytí nebo chlazení při výrobě másla, kondenzát z odpařovačů v mlékárnách a vodu z lisování pomerančové kůry při výrobě vlákniny. V současnosti se upravená voda běžně používá pro prvotní mytí zeleniny, oplachování nezpracovaných produktů a spařování masa a drůbeže. Technika protiproudého mytí, která spočívá v použití nejčistší vody z posledního mytí pro předchozí fáze, významně snižuje spotřebu vody, zejména v nepřetržitých provozech, jako jsou konzervárny. Alternativou je použití upravené vody, ale to je náročnější, protože vyžaduje neustálé sledování kvality a účinnosti úpravy (Casani et al. 2005).

Většina recyklované procesní vody je využívána přímo v rámci stejného potravinářského provozu. Úprava vody často vyžaduje více kroků, včetně předúpravy, aby se dosáhlo

požadované kvality. Většina dostupných studií se zaměřuje na úsporu vody a zachování kvality produktů, zatímco mikrobiologická bezpečnost bývá hodnocena jen zřídka. V několika případech se však prokázalo, že použití recyklované vody nemá negativní vliv na zdraví spotřebitelů ani na smyslové vlastnosti výrobků (Casani et al. 2005).

Pro přijetí účinných postupů šetření vodou v potravinářském průmyslu je nezbytné provést komplexní analýzu, která zohlední ekonomické, bezpečnostní a environmentální aspekty. Výsledky takových analýz poskytnou potravinářským společnostem klíčové informace, které jim pomohou vnímat úpravu a opětovné využití vody jako reálné a přínosné řešení pro snížení jejich spotřeby vody (Meneses et al. 2017).

6.3.2 Papírenský průmysl

Výroba recyklovaného papíru je proces náročný na spotřebu vody, přičemž rozsah této spotřeby se pohybuje v širokém rozmezí 5 až 80 m³ na tunu vyrobeného papíru. Tato variabilita je ovlivněna řadou faktorů, mezi něž patří zejména kvalita vyráběného papíru a míra recyklace vody v daném provozu. Voda je v tomto procesu využívána v řadě různých výrobních operací, jako je příprava surovin, chemické úpravy, vývoj vlastností vláken, doprava, ředění buničiny, tvorba papírového pásu a čištění zařízení. Kromě toho se voda využívá také pro chlazení a ohřevu ve formě páry (Han et al. 2021).

V posledních letech se však v papírenském průmyslu projevuje snaha o snižování spotřeby vody, a to zejména z ekonomických a ekologických důvodů. Moderní papírny se zaměřují na implementaci efektivnějších technologií čištění odpadních vod a uzavřených vodních okruhů, které umožňují opakované využití procesní vody. Recyklace vody v tomto odvětví přináší nižší spotřebu vody a energie ve srovnání s výrobou z primární buničiny. Spotřebu vody v papírně ovlivňuje také nutnost odstraňování tiskařské barvy z recyklovaného papíru a místní požadavky na vypouštění odpadních vod. Papírny, které vyrábějí obalové papíry, jako je vlnitý papír nebo lepenka, obvykle vykazují nejnižší požadavky na kvalitní vodu a některé z nich dokonce dosahují nulového vypouštění odpadních vod (Han et al. 2021).

V papírně, která zpracovává recyklovaný papír, se voda používá v několika fázích výrobního procesu a je recirkulována v rámci tří hlavních vodních okruhů. Primární okruh se zaměřuje na ředění surovin. Klíčovou roli zde hraje procesní voda, což je vodný roztok odtékající z mokrého lisu papíru. Tato voda je bohatá na jemná vlákna a plniva a její recirkulace může způsobit hromadění těchto složek. Většina vody se spotřebuje právě v tomto okruhu a přebytek je odeslán do jednotky pro separaci pevných a kapalných látek. Nejčastěji se jako takové jednotky používají kotoučové filtry, které produkují zakalený, čirý a superčirý filtrát. Čirý filtrát se používá k ředění surovin, zatímco superčirý filtrát, resp. tzv. superčirá voda může nahradit čerstvou vodu pro vysokotlakové sprchy. Sekundární okruh zahrnuje recyklaci vyčištěné provozní vody pro přípravu zásob a čistící vodu. Přebytečná provozní voda je odváděna do čistírny odhadních vod. Terciální okruh se zabývá čištěním přebytečné vody ze sekundárního okruhu a dalších odpadních vod z provozu, jako je čištění výrobních zařízení a odkalovací voda z kotle. Čištění odpadních vod v tomto okruhu může zahrnovat primární, sekundární a terciální čištění v závislosti na místních normách. Vyčištěná odpadní voda z terciárního okruhu se může znovu využít v hydraulickém rozvlákňovači (Han et al. 2021).

Pro efektivní hospodaření s vodou v papírně je klíčové hospodaření s procesní vodou. To zahrnuje oddělení vodních okruhů, protiproudé toky, omezení míchání vod z různých linek a dostatečné zásobníky vody. Důležitá je také úprava procesní vody pro odstranění pevných a škodlivých látek. Pro úpravu procesní vody se používají různé technologie, jako jsou kotoučové filtry, DAF (flotace s využitím vzduchu) a membránová filtrace (ultrafiltrace, nanofiltrace, reverzní osmóza). Každá technologie má své výhody a nevýhody, přičemž ultrafiltrace se v papírenském průmyslu jeví obecně jako nejvhodnější pro recyklaci vody (Han et al. 2021).

V papírenském průmyslu se stále více prosazuje trend uzavřených vodních okruhů, jehož cílem je snížit spotřebu čerstvé vody a eliminovat vypouštění odpadních vod. Tento přístup přináší ekonomické i ekologické výhody, jako je snížení nákladů na chemikálie a vytápění, a také minimalizace dopadu na životní prostředí. Implementace uzavřených okruhů s sebou nese řadu výzev. Jednou z hlavních je akumulace kontaminantů v recirkulační vodě, což může vést ke zhoršení kvality papíru a problémům s produktivitou. Dále je nutné investovat do vhodných technologií a vybavení, které zajistí efektivní čištění a recirkulaci vody. I přes tyto výzvy je koncept uzavřených okruhů stále populárnější (Han et al. 2021).

7 Možnosti využití vyčištěné odpadní vody

Nárůst populace, rozvoj průmyslu, zemědělství a měst vedou k vyšší spotřebě vody, a tím i k nárůstu produkce odpadních vod. Tradiční postupy čištění odpadních vod se zaměřují na snižování znečištění, ochranu veřejného zdraví a životního prostředí, a to odstraňováním biologicky rozložitelných látek, živin a patogenů (Levine 2004). V současnosti se k dosažení větší udržitelnosti čistíren odpadních vod uplatňují dva hlavní přístupy, a to zvyšování energetické účinnosti a obnova zdrojů. Energetické úspory se zpravidla dosahují prostřednictvím energetických auditů, systémových kontrol a modernizace zastaralých zařízení (Mo & Zhang 2013).

7.1 Opětovné použití vody

Čištění odpadních vod zahrnuje procesy, které odstraňují znečišťující látky a snižují jejich koncentraci na úroveň umožňující bezpečné vypuštění do přírody. Běžné čištění odpadních vod začíná odstraněním hrubých nečistot a sedimentací, která odstraňuje část pevných látek a snižuje obsah organických látek. Následuje biologické čištění, kde mikroorganismy rozkládají organické znečištění. Přesto běžné čistírenské procesy nedokážou zcela eliminovat například mikropolutanty. Pro opětovné použití vody je proto nutné terciální čištění, případně i pokročilé metody, které zajišťují odstranění patogenů, živin a stopových organických látek (Voulvoulis 2018).

Opětovné využití vody znamená recyklaci upravené odpadní vody pro užitečné účely, jako je zavlažování v zemědělství, údržba krajiny, průmyslové procesy, splachování toalet a doplňování zásob podzemní vody (Mo & Zhang 2013).

7.1.1 Opětovné využití odpadní vody ve městech

V městském prostředí se upravená odpadní voda využívá pro zavlažování zeleně, ke komerčním účelům, jako je mytí aut, protipožární ochrana, splachování toalet, kontrola prachu

a výroba betonu. Zavlažování rezidenčních zahrad je nejčastějším městským využitím, které představuje přibližně polovinu spotřeby vody v domácnostech. Nahrazení pitné vody recyklovanou vodou pro zavlažování městských ploch může výrazně snížit náklady a omezit zatížení vodních zdrojů, zejména v suchých obdobích. V městském prostředí je riziko kontaktu lidí s recyklovanou odpadní vodou vyšší než při zemědělském zavlažování nebo průmyslovém využití. Z tohoto důvodu je třeba klást větší důraz na prevenci možných zdravotních rizik. Navíc systémy opětovného využití vody ve městech často vyžadují budování oddělených rozvodných sítí pro pitnou a recyklovanou vodu, což může pro některé obce představovat značnou finanční zátěž (Mo & Zhang 2013).

7.1.2 Závlahy v zemědělství

Potřeba využívání vodních zdrojů roste rychleji než samotná světová populace, přičemž zavlažování představuje až 70 % celkových odběrů vody. Tento trend vede k nadměrnému čerpání sladké vody, což způsobuje vysychání řek a pokles hladiny podzemních vod. V reakci na tento problém se stále více prosazuje využití vyčištěné odpadní vody k zavlažování (Becerra-Castro et al. 2015). Přibližně 52 % celosvětově vyčištěné vody se využívá právě k tomuto účelu, což z něj činí nejrozšířenější formu jejího opětovného použití. Zejména v oblastech s nedostatkem vody je toto řešení preferováno před technicky i energeticky náročnějším odsolováním mořské vody (Mannina et al. 2022). Zavlažování odpadní vodou je dnes běžné v mnoha zemích, včetně Francie, Itálie, Španělska, Kypru, Malt, Izraele, Jordánska či USA, kde se využívá především v zemědělství a při údržbě krajiny (Becerra-Castro et al. 2015).

Přestože využití odpadní vody přináší řadu výhod, je nutné brát v úvahu i možná rizika spojená s přítomností mikrobiologických a chemických kontaminantů. Bezpečné a udržitelné využití vyčištěné odpadní vody proto vyžaduje důkladnou kontrolu kvality a odpovídající technologie pro odstranění potenciálně škodlivých látek (Becerra-Castro et al. 2015). Kvalitu odpadních vod určuje jejich chemické a mikrobiální složení. Míra jejich škodlivosti závisí na chemickém složení, koncentraci a vlastnostech látek v nich obsažených, ale také na způsobu zavlažování, vlastnostech půdy a klimatu (Ofori et al. 2021).

Zavlažovací zemědělství je silně závislé na dostupnosti vody s odpovídající kvalitou. Přijatelnost vody závisí na jejím konkrétním využití, tedy to, co je vhodné pro zavlažování, nemusí vyhovovat požadavkům na pitnou vodu či průmyslové využití. Různé aplikace tedy vyžadují odlišné úrovně kvality, přičemž ne vždy je dostupný zdroj ideální zdroj. V takových případech je nutné posoudit, zda dostupná voda splňuje požadavky konkrétního použití (Al-Hazmi et al. 2023).

7.1.2.1 Vliv vyčištěné odpadní vody na vodní zdroje

Důležitým důvodem pro využívání vyčištěných odpadních vod k zavlažování je možnost jejich využití jako náhrada za tradiční zdroje vody. Upravené odpadní vody tak představují alternativní zdroj vody, který může podpořit růst rostlin. Odběr vody zahrnuje čerpání vody z povrchových a podzemních vod nebo z nádrží. Vzhledem k nedostatku vody je vhodné využívat odpadní vodu pro zavlažování, protože většina odebrané vody se vrací jako odpadní, kterou lze z velké části znovu použít. Použití odpadní vody také pomáhá chránit a zlepšovat kvalitu vody. Především se omezuje znečištění tím, že se snižuje množství odpadní vody

vypouštěné do vodních toků. Dalším pozitivním faktorem je snížení spotřeby hnojiv v zemědělství, čímž se omezuje únik živin do podzemních vod (Ofori et al. 2021).

Zavlažování odpadní vodou může představovat riziko znečištění vody. Kvalita této vody závisí na jejím zdroji, způsobu použití a technologii čištění. I po úpravě může obsahovat chemické kontaminanty, jako jsou těžké kovy a pesticidy, pevné částice v podobě mikroplastů či písku, nebo mikrobiologické kontaminanty, pod které se řadí *E. coli*, *Salmonella* nebo viry. Tyto látky se mohou dostat do vodních toků a podzemních vod, poškodit vodní ekosystémy a ohrozit zdraví (Ofori et al. 2021).

7.1.2.2 Vliv vyčištěné odpadní vody na půdu

Zavlažování s využitím vyčištěných odpadních vod může mít na půdu jak pozitivní, tak negativní dopady. Mezi hlavní přínosy patří obohacení půdy o důležité živiny, jako je dusík, fosfor a draslík, což zlepšuje úrodnost a snižuje spotřebu minerálních hnojiv. Odpadní vody také zvyšují obsah organické hmoty v půdě, což přispívá k lepší struktuře, schopnosti zadržovat vodu a podpoře mikrobiální aktivity (Ofori et al. 2021).

Jedním z hlavních problémů je hromadění těžkých kovů, zejména olova, kadmia, mědi a zinku, které se mohou postupně akumulovat v půdě a ovlivňovat její úrodnost. Tyto prvky mohou být následně absorbovány rostlinami a prostřednictvím potravinového řetězce ovlivnit lidské zdraví (Singh 2021). Dalším důsledkem je zasolení půdy, kdy dochází k akumulaci solí obsahující zejména ionty sodíku, hořčíku a chloridy. To může způsobit osmotický stres rostlin, snížit jejich růst a v extrémních případech vést k poklesu zemědělské produkce (Ofori et al. 2021). Sodík obsažený v odpadních vodách navíc rozrušuje jílovité částice půdy, což způsobuje snížení pórovitosti a omezení infiltrace vody, což může vést k erozi půdy. Změny nastávají také v pH půdy, které se může v důsledku zavlažování odpadními vodami zvýšit nebo snížit v závislosti na chemickém složení aplikovaných vyčištěných odpadních vod. Zvýšená hodnota pH omezuje dostupnost důležitých mikroživin, zatímco kyselé podmínky zvyšují mobilitu toxických kovů a jejich pronikání do rostlin (Singh 2021).

7.2 Čištění odpadní vody

S rostoucí spotřebou vody v komunální a průmyslové sféře je nutné pečlivě volit vhodné čištění odpadních vod. Tyto procesy kombinují fyzikální, chemické a biologické metody a jejich výběr závisí na dostupném prostoru, požadované kvalitě vody a ekonomických faktorech (Bhatnagar & Sillanpää 2010). Obecně však proces čištění odpadních vod probíhá ve třech základních fázích – předčištění, mechanické (primární) čištění a biologické (sekundární) čištění, jejichž cílem je postupné dosažení kvality vody odpovídající hygienickým normám stanoveným legislativními předpisy (Al-Hazmi et al. 2023).

7.2.1 Biologické odstranění organického znečištění

Biologické odstranění organického znečištění představuje klíčovou fázi sekundárního (biologického) čištění odpadních vod v čistírnách odpadních vod. V této fázi se využívají mikroorganismy, které rozkládají organické látky přítomné ve vodě a přispívají k částečnému odstranění dusíku a fosforu (Zhou et al. 2022).

Po biologickém čištění odpadních vod zbývá ve vyčištěné vodě již zlomek organických látek ve srovnání s jejich obsahem v surové odpadní vodě. Zbývající organická hmota se skládá zejména z rozpuštěných organických látek, které lze rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří přírodní organické látky pocházející z přírodní vody a jejího okolního prostředí, včetně těžko odbouratelných složek jako lignin a celulóza. Druhou skupinou jsou rozpuštěné mikrobiální produkty vzniklé při vlastním biologickém čištění vody, například bílkoviny, cukry, tuky, močovina a nukleové kyseliny. Třetí skupinou jsou těžko odbouratelné syntetické organické sloučeniny z chemického průmyslu, mezi které patří látky narušující hormonální rovnováhu, povrchově aktivní látky a antibiotika. Tyto látky mohou negativně ovlivňovat vodní organismy i lidské zdraví. K odstranění odolných organických polutantů se využívají pokročilé oxidační procesy, biodegradace specializovanými mikroorganismy nebo kombinace biologické a chemické úpravy. Podrobná analýza rozpuštěných organických látek v odtoku z biologického stupně čištění je důležitá nejen pro pochopení jejich původu, ale i pro optimalizaci navazujících čistících technologií terciálního či kvartérního čištění, jako je koagulace, adsorpce nebo membránové procesy, které mohou být přítomností organických látek negativně ovlivněny (Zhou et al. 2022).

7.2.2 Nitrifikace a denitrifikace

Procesy nitrifikace a denitrifikace probíhají v rámci biologického čištění odpadní vody (Thakur & Medhi 2019). V odpadních vodách se anorganický dusík obvykle nachází ve formě amoniakálního dusíku (N-amon). K jeho odstranění se v praxi využívá biologický způsob, při němž mikroorganismy postupně přeměňují N-amon nejprve na dusitany a poté na dusičnany. Tento proces se označuje jako nitrifikace (Adámek et al. 2008). Tyto mikrobiální procesy však často vedou k tvorbě oxidu dusného (N_2O), zejména v důsledku nízké koncentrace rozpuštěného kyslíku, akumulace dusitanů, nedostatku organického uhlíku nebo narušené enzymatické aktivity. Vzhledem k tomu, že biologická fáze nemusí vždy zajistit úplné odstranění dusíkatých látek ani minimalizaci emisí N_2O , bývá doplňována následnými technologiemi. Patří mezi ně například biofiltry, bioscrubbery nebo membránové biofilmové reaktory, které slouží k dočištění odpadní vody a zároveň ke snížení úniku reaktivních dusíkatých sloučenin do prostředí (Thakur & Medhi 2019).

7.2.3 Odstraňování fosforu

Chemické srážení se provádí pomocí iontů železa (Fe^{3+}), hliníku (Al^{3+}) nebo vápníku (Ca^{2+}), nejčastěji ve formě solí. Touto metodou lze odstranit více než 80 % fosforu, avšak má nevýhody například nutnost předávkování chemikálií, negativní vliv na mikroorganismy v aktivovaném kalu nebo zvýšenou produkci kalu, což komplikuje provoz (Adámek et al. 2008).

Biologické odstraňování fosforu je méně provozně náročné a probíhá přímo v rámci biologického čištění. Klíčovou roli zde hrají tzv. poly-P bakterie, které v aerobních podmínkách akumulují fosfáty ve formě polyfosfátových granulí a v anaerobním prostředí je opět uvolňují, čímž si obnovují schopnost dalšího příjmu fosforu (Adámek et al. 2008).

Moderní systémy, jako je EBPR (enhanced biological phosphorus removal), kombinují anaerobní a aerobní fázi. V anaerobní části bakterie zpracovávají organické látky na zásobní sloučeniny, přičemž uvolňují fosfáty. V aerobní fázi naopak fosfáty aktivně absorbují a

hromadí. Výsledkem je kal s vyšším obsahem fosforu, který lze dále zpracovat (Adámek et al. 2008).

7.2.4 Pokročilé oxidační procesy

Pokročilé oxidační procesy představují moderní technologii úpravy odpadních vod, která využívá silně reaktivní radikály, především hydroxylové, které díky vysokému oxidačnímu potenciálu účinně rozkládají toxické organické látky v odpadních vodách. Tyto radikály vznikají při různých oxidačních procesech, jako je Fentonova oxidace, fotochemická oxidace, elektrochemická oxidace nebo ozonizace. Procesy jsou neselektivní, takže dokážou odstranit široké spektrum znečišťujících látek, včetně těch, které běžné biologické metody nedokážou účinně rozložit. Klíčem ke všem těmto metodám je tvorba reaktivních forem kyslíku, které zajišťují mineralizaci škodlivin na méně nebezpečné látky (Saravanan et al. 2022).

7.2.5 Membránové procesy

Membránové procesy představují moderní a účinný způsob čištění odpadních vod, který v posledních desetiletích zaznamenal výrazný rozvoj. Využívají se při úpravě vody, odsolování i při odstraňování znečišťujících látek, a to s vyšší účinností než tradiční metody. Oproti klasickým biologickým a chemickým postupům jsou membránové systémy prostorově úsporné a nevyžadují tolik chemikálií. Hlavní nevýhodou však zůstává náchylnost k zanášení membrán, které snižuje jejich výkon. Tomuto problému lze předcházet předúpravou vody, například pomocí koagulace nebo flokulace. Membrány se rozlišují na izotropní (homogenní) a anizotropní (složené z více vrstev), přičemž tenkovrstvé anizotropní membrány se běžně používají například v reverzní osmóze. Přestože membránové technologie čelí výzvám spojeným s kontaminací a provozními náklady, zůstávají jedním z nejslibnějších přístupů k dosažení vysoké kvality vyčištěné vody (Al-Hazmi et al. 2023).

Membránová filtrace se od běžných filtračních metod liší dvěma zásadními aspekty. Za prvé, membrány jsou navrženy asymetricky a průtok vody je veden na stranu s menšími póry. To snižuje tlakový spád přes membránu a minimalizuje riziko jejího ucpání. Za druhé, pro správnou funkci membránových systémů je klíčový silný příčný tok přes povrch membrány. Tento tok zabraňuje toku filtračního koláče. V běžných podmínkách se filtrační koláč nebo koncentrační polarizace na membránách omezuje na několik milimetrů. Membránové techniky lze rozdělit na mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a reverzní osmózu podle toho, jaký tlakový rozdíl se používá k protlačení skrz membránu (Abdel-Fatah 2018).

7.2.5.1 Nanofiltrace

Nanofiltrace je proces, při kterém se část vstupní kapaliny protlačuje polopropustnou membránou. Tím se vstupní proud rozděluje na dvě části, a to na permeát, což je vyčištěná kapalina, a na retentát (koncentrát), neboli nefiltrovaná odpadní složka. Nanofiltrace se osvědčila jako účinná metoda pro odstraňování organických látek. Nicméně, pro zabránění růstu mikroorganismů v distribučních systémech je nezbytné dezinfekce chlórem. Optimální kvality vody lze dosáhnout použitím nanofiltračních membrán, které minimalizují zadržování anorganických látek a zároveň efektivně odstraňují organické materiály (Abdel-Fatah 2018).

Nanofiltrace představuje novější technologii, která se svými vlastnostmi řadí mezi osvědčenou reverzní osmózu a ultrafiltraci. Vyniká tím, že dokáže propouštět ionty s jediným nábojem, zatímco zadržuje ionty s vyšším nábojem. Díky této jedinečné selektivitě se otevírá široké pole pro jejich využití při navrhování specifických technologických postupů napříč průmyslovými sektory. Jelikož se nanofiltrace zaměřuje především na procesní využití, její zařazení přirozeně doplnilo stávající portfolio ultrafiltračních a mikrofiltračních systémů. V praxi nachází nanofiltrace uplatnění v celé řadě odvětví, od chemické výroby a potravinářství přes textilní průmysl a úpravu kovových povrchů až po papírenský sektor, farmaceutickou výrobu, biotechnologie či energetiku (Abdel-Fatah 2018).

7.2.5.2 Ultrafiltrace

Ultrafiltrace je membránový proces, který využívá nanometrové póry jako jemné síto a za pomoci tlaku odděluje částice. Oproti jiným technologiím nabízí specifickou výhodu v efektivním čištění, zahušťování a rozdělení makromolekul díky fyzikální membráně, která zajišťuje stabilní oddělení látek různých velikostí, včetně kalů, plastových částic, nanočástic, olejů, oxidu křemičitého, endotoxinových bakterií a dalších virů, a zároveň si zachovává vysokou propustnost. Díky této všestrannosti se ultrafiltrační technologie uplatňuje v mlékárenství, farmacii, biotechnologii, potravinářství, k rostlinné extrakci a při čištění odpadních vod (Kammakakam & Lai 2023).

7.2.5.3 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza je široce používaná technologie pro úpravu vody (Maleb & Ayoub 2011). Tento proces umožňuje odstranit 95–99 % anorganických solí a nabitých organických látek. Reverzní osmóza se úspěšně využívá například při odstraňování těžkých kovů z průmyslových odpadních vod. Systémy reverzní osmózy jsou kompaktní a vysoce účinné, avšak náchylné ke kontaminaci a degradaci membrán, což patří k jejich hlavním nevýhodám (Al-Hazmi et al. 2023). Ačkoli reverzní osmóza dokáže odstranit i mikroorganismy, není pro tento účel ideální, protože bakterie mohou na membráně vytvářet odolné biofilmy, které ji poškozují. To vede k nutnosti častého chemického čištění a výměny membrán, což zvyšuje provozní náklady. Celkově je reverzní osmóza vysoce účinnou technologií, která nachází široké uplatnění zejména v oblastech s nedostatkem kvalitní sladké vody. Její širší využití je však omezeno vysokými náklady a energetickou náročností, což ji činí méně dostupnou pro chudší regiony a rozvojové země (Pichel et al. 2019).

7.3 Opětovné využití odpadních vod v různých zemích

Ve Španělsku se vyčištěné komunální odpadní vody využívají nejen v zemědělství, ale také pro zavlažování veřejné zeleně, obnovu mokřadů, hašení požárů, mytí ulic a čištění lodí. V oblasti Costa Brava, konkrétně města Portbou, Colera, Port de la Selva a Cadaqués, byla odpadní voda původně čištěna pouze sekundárně, ale po modernizaci zařízení pro čištění odpadních vod se zde přešlo na terciární úroveň čištění. Díky tomu je možné tuto vodu bezpečně využívat pro různé městské i zemědělské účely, včetně závlahy vinic (Kalavrouziotis & Arslan-Alaton 2008).

V Itálii se opětovné využití splaškových odpadních vod využívá především na zavlažování zemědělských a lesních porostů (Kalavrouziotis & Arslan-Alaton 2008). Zajímavý příklad pochází z oblasti Pistoia ve střední Itálii, kde bylo zkoumáno zavlažování lesních rostlin (např. cypřiše, jalovce, myrty) pomocí komunální odpadní vody. Sazenice byly pěstovány v kontejnerech a zavlažovány buď běžnou podzemní vodou, nebo odpadní vodou. Výsledky ukázaly, že většina rostlin rostla dobře i při použití odpadní vody, a to bez negativního vlivu na kořenový systém. U některých druhů nebyly zjištěny žádné rozdíly v růstu mezi režimy zavlažování. Výzkum potvrdil, že komunální odpadní voda může sloužit jako cenný zdroj živin pro pěstování lesních rostlin, zejména při pěstování v kontejnerech. To přináší jak ekologické, tak ekonomické výhody (Lubello et al. 2004). V jižní Itálii, kde je dostupnost vody stále problematičtější, představuje recyklace odpadní vody reálné řešení nedostatku a zároveň pomáhá omezit znečištění vodních toků (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008).

Francie má díky svému klimatu a rovnoměrně rozložené hydrologické síti obecně dobré podmínky pro zajištění dostupnosti vody, což snižuje nutnost rozsáhlé recyklace odpadních vod. I přesto se v některých částech země odpadní voda běžně využívá, zejména k zavlažování. Ačkoli bylo ve Francii realizováno jen omezené množství projektů, recyklovaná voda se aplikuje na závlahy zemědělských plodin, výsadbu stromů a lesních porostů, k údržbě travních porostů či zavlažování golfových hřišť. Modernizace technologií pro čištění vody otevírá do budoucna možnost využívat recyklovanou vodu i v domácnostech, například pro splachování toalet nebo úklidové účely (Kalavrouziotis & Arslan-Alaton 2008).

Nedostatek vody na Maltě vedl k úvahám o recyklaci odpadních vod pro zemědělství již v roce 1884. Od roku 1983 se k zavlažování využívá voda z čistírny odpadních vod Sant Antnin. Čistírna používá aktivační proces a pískové filtry, odpadní voda se dezinfikuje chlórem a používá se k zavlažování 600 ha zemědělské půdy, kde se pěstují různé plodiny. I přes větší slanost díky propustné půdě nedochází k poškození úrody. V 80. letech dvacátého století se uvažovalo také o využití recyklované vody v průmyslu. Pro tyto účely je třeba vody vyšší kvality, a proto byla navržena pokročilá úprava, včetně reverzní osmózy. I když by takto upravená voda mohla být využitelná i pro průmysl, její širší použití závisí na ekonomické výhodnosti ve srovnání s jinými zdroji. Recyklovaná voda na Maltě se využívá především v průmyslových prádelnách (Angelakis et al. 1999).

8 Možnosti využití odpadní vody

8.1 Šedá voda

Šedá voda, která zahrnuje odpadní vodu z koupelen, kuchyní a praní, představuje přibližně až 80 % celkového objemu domácích odpadních vod. Tento typ odpadní vody vzniká při běžných činnostech, jako je mytí nádobí, osobní hygiena a praní prádla. Regenerovaná šedá voda musí být hygienicky nezávadná, esteticky přijatelná, ekologicky šetrná a ekonomická. Pro úpravu šedé vody se využívají technologie založené na fyzikálních, chemických a biologických procesech. Tyto systémy obvykle zahrnují počáteční separaci pevných částic od kapalné fáze jako formu předúpravy, zatímco dezinfekce slouží jako finální krok pro zajištění bezpečnosti upravené vody (Li et al. 2009).

Vlastnosti šedé vody vykazují značnou variabilitu a jsou ovlivněny především typem zdrojových toků, klimatickými podmínkami, sociokulturními faktory a charakterem původního vodního zdroje, proto je nutné přizpůsobit metody úpravy dané lokalitě. Složení šedé vody představuje komplikaci pro její další využití, kvůli chemikáliím z pracích prostředků a produktů osobní hygieny. Míra salinity představuje významný faktor ovlivňující její potenciál pro opětovné využití. Existují různé názory na to, jak dlouhodobé zavlažování upravenou šedou vodou působí na půdu. Rizikové kovy se v šedé vodě vyskytují v relativně nízkých koncentracích, přičemž dlouhodobé zavlažování může způsobit, že se kovy v půdě nahromadí nad povolenou úroveň. Primárním zdrojem mikrobiální kontaminace šedé vody je znečištění, které pochází z hygienických činností. K přenosu patogenů může vést koupání, sprchování a praní prádla, ale i odtoky z kuchyňských dřezů, které mohou obsahovat patogeny z kontaminovaných potravin. Jak již bylo zmíněno, vlastnosti šedé vody se liší v závislosti na mnoha faktorech, což komplikuje její úpravu a opětovné využití. Kromě salinity a přítomnosti stopových kovů je dalším významným problémem kontaminace xenobiotickými organickými sloučeninami. Tyto uměle vytvořené chemikálie se do šedé vody dostávají z běžných domácích produktů, jako jsou kosmetika, konzervanty a čisticí prostředky. Přítomnost těchto chemikálií představuje riziko pro lidské zdraví při opětovném využití vody a pro ekosystémy (Van de Walle et al. 2022).

Díky tomu, že šedá voda má lepší parametry než běžná odpadní voda z domácností, se nabízí možnost její efektivnější recyklace a opětovného použití. Opakované využití šedé vody představuje efektivní způsob, jak snížit spotřebu pitné vody a tím i zatížení vodních zdrojů, což přináší i finanční úspory. Významné snížení spotřeby vody je dosaženo tím, že se eliminuje potřeba jejího transportu potrubím, zejména v rychle rostoucích městech. Pouhé využití šedé vody pro splachování toalet může ušetřit až 30 % vody v domácnostech a až 60 % v kancelářských budovách. Pokud se k tomu přidá i zavlažování zahrad, celková úspora v domácnostech může dosáhnout až 40 %. Nicméně je nutné si uvědomit, že šedá voda obsahuje širokou škálu kontaminantů, které mají negativní dopad na lidskou společnost a životní prostředí. Opětovnému využití brání také nedostatečné právní předpisy pro její nakládání, nutnost zajistit monitorování a negativní postoj veřejnosti (Van de Walle et al. 2022).

Opětovné využití šedé vody má z hlediska životního prostředí jak pozitivní, tak negativní dopady. Na jednu stranu může snížit znečištění a podporovat zdravější ekosystémy, na druhou stranu může vést ke zvýšení emisí skleníkových plynů a ohrožení lidského zdraví, především kvůli použitým materiálům, jako jsou polyvinylchloridové potrubí. Ekologická šetrnost těchto systémů závisí na jejich typu a rozsahu. Lokální systémy bývají ve srovnání s centralizovanými variantami příznivější k životnímu prostředí, a to zejména ve větších komunitách. Při hodnocení decentralizovaných systémů je klíčové zohlednit zdroj energie, který se používá k jejich provozu (Van de Walle et al. 2022).

8.2 Žlutá voda

I když moč tvoří jen malé procento odpadní vody, je hlavním zdrojem živin, konkrétně dusíku, fosforu a draslíku. Pro získání živin z moči je nejlepší oddělit ji od ostatního odpadu z domácnosti. Tento postup může snížit zatížení čistíren odpadních vod, což se projevuje snížením nákladů a energetické náročnosti čistících procesů. Zatímco zavedení infrastruktury

pro oddělování moči je v existujících budovách náročné, pro novostavby představuje atraktivní a realizovatelnou možnost (Kundu et al. 2022).

Lidská moč obsahuje mnoho živin, které se už od pradávna používají k podpoře růstu rostlin. V současnosti se moč používá v zemědělství v různých zemích, přičemž hlavní pozornost je věnována jejímu využití jako zdroje živin. Vysoké náklady na kompost a chemická hnojiva jsou problémem pro méně majetné farmáře, kteří přesto potřebují pěstovat potraviny. Využití lidské moči jako hnojiva by mohlo snížit náklady, omezit znečištění a chránit vodní zdroje. Je ale důležité dodržovat bezpečnostní opatření, jako je správné skladování moči, aby se zabránilo šíření patogenů a dalším negativním vlivům. Riziko představují i farmaceutické zbytky, jejichž vliv na půdu, podzemní vodu a rostliny není dosud dostatečně prozkoumán (Karak & Bhattacharyya 2011).

Splachování toalety spotřebuje výrazně více vody, než kolik jí tělo vyloučí močí. Využití recyklované moči prostřednictvím elektrochemické úpravy ke splachování představuje efektivní způsob, jak snížit spotřebu vody. Tato metoda eliminuje nepříjemný zápach při jejím uskladnění. Pro využití recyklované moči je nutné zajistit její skladování a přepravu, a to i v případě, že je oddělena od výkalů (Ikematsu et al. 2007).

Dospělý člověk denně vyloučí přibližně 1,5 litru moči, která se z 95 % skládá z vody. V moči mohou přítomné bakterie způsobit pomocí enzymu ureázy hydrolýzu močoviny, která vede k tvorbě NH_3 a zvyšují pH, což způsobuje ztrátu dusíku a silný zápach (Ikematsu et al. 2007; Wang et al. 2024). Elektrochemickou úpravou se dá zabránit nepříjemnému zápachu amoniaku, vzniklého při rozkladu močoviny. Pro zamezení činnosti ureázy se musí udržet hodnoty oxidačně-redukčního potenciálu na 240 mV nebo vyš. Tato inhibice enzymu umožňuje skladování moči bez zápachu a sloužit jako náhrada vody při splachování toalety (Ikematsu et al. 2007).

Jednou z možností, jak stabilizovat moč přímo na místě pro pozdější přepravu, je použití hydroxidu vápenatého. Tato látka reaguje s fosforem v moči a vytváří fosforečnan vápenatý. Zvýšené pH, způsobené přebytkem hydroxidu vápenatého zabraňuje enzymické hydrolýze močoviny. Stabilizovaná moč může být shromažďována a transportována, nebo může být systém doplněn o sedimentační sekci pro odvod přebytečných živin do kanalizace. Tento proces odstraňuje fosfor před vstupem do čistírny odpadních vod, čímž snižuje ucpávání potrubí minerálními usazeninami, běžné u bezvodých pisoárů. Zároveň omezuje tvorbu amoniaku a ničí patogeny (Randall & Naidoo 2018).

8.3 Hnědá voda

Lidské exkrementy jsou tradičně vnímány jako odpad, což ovlivňuje jejich zpracování. Rostoucí povědomí o jejich využitelnosti jako zdroje živin však podporuje nové přístupy k jejich obnově a využití (Harder et al. 2020). Obsahují cenné prvky, jako je dusík, fosfor a draslík, které jsou nezbytné pro růst rostlin. Kromě toho přispívají organickou hmotou, jež zlepšuje strukturu půdy a zvyšuje její schopnost zadržovat vodu (Heinonen-Taski & Wijk-Sijbesma 2005).

Začlenění hnědé vody do zemědělských systémů může zlepšit využití živin a podpořit udržitelnost i potravinovou bezpečnost. Efektivita zemědělské výroby závisí na dostatečné dostupnosti živin, přičemž rostliny potřebují nejméně 17 esenciálních prvků pro svůj růst.

Přesto se současné snahy o recyklaci živin zaměřují na dusík a fosfor, zatímco další důležité prvky, zinek nebo selen, jsou často přehlíženy. To vede k systematickému vyčerpání půdy a ohrožení dlouhodobé potravinové bezpečnosti. Širší zaměření na obnovu živin z lidských exkrementů by mohlo pomoci udržet rovnováhu půdních živin a předejít degradaci zemědělské půdy (Harder et al. 2020).

Jedním z hlavních problémů současného zemědělství je degradace půdy a snižování její úrodnosti. Aby bylo možné chránit globální zdroje půdy, musí být produkty obsahující živiny z lidských exkrementů kompatibilní se zemědělskými postupy, které zlepšují zdraví půdy a ekosystémů (Harder et al. 2020). Hlavním problémem využití lidských fekálií je přítomnost patogenních mikroorganismů, včetně bakterií, virů a parazitů, které mohou přežívat v půdě i ve vodě a způsobovat šíření nemocí. Proto je nezbytné je před použitím jako hnojivo bezpečně zpracovat. Nejúčinnější metodou je kompostování, při němž se fekálie rozkládají za přítomnosti mikroorganismů po dobu několika dní. Tento proces eliminuje většinu patogenů a vytváří bezpečný kompost, který lze využít v zemědělství. Správným způsobem kompostované fekálie poskytují půdě nejen důležité živiny, ale také zlepšují úrodnost a zvyšují schopnost zadržovat vodu, což je zvláště výhodné v suchých oblastech. Výzkumy ukázaly, že rostliny hnojené kompostem vyrobených z fekálií dosahují srovnatelných výnosů jako při použití chemických hnojiv, přičemž se minimalizuje riziko kontaminace podzemních vod dusičnany (Heinonen-Tanski & Wijk-Sijbesma 2005).

Současné metody hodnocení účinnosti hnojiv se zaměřují především na výnos plodin, přičemž méně pozornosti je věnováno dlouhodobému vlivu na biologickou rozmanitost půdy a její celkové zdraví. Přítomnost kontaminantů jako jsou farmaceutické látky, průmyslové chemikálie a těžké kovy, představuje jednu z hlavních výzev pro recyklaci lidských exkrementů jako zdroje živin. Kontaminaci lze snížit omezením používání a emisí těchto látek a úpravou lidských exkrementů. U jiných látek je kontrola složitější. Oddělený sběr exkrementů bez smíchání s dalšími odpadními vodami by mohl snížit kontaminaci. Nicméně, není to vždy proveditelné. Úprava odpadních vod může některé organické látky odstranit, ale je nákladná a vznikají při ní vedlejší produkty. Pro recyklaci živin je třeba snížit kontaminaci u zdroje a zlepšit úpravu odpadních vod. Další možností je používání snadno rozložitelných chemikálií, jako jsou léky a hormony (Harder et al. 2020).

V rozvojových zemích jižních oblastí se často používají latríny s jednou jímkou, kde se mísí čerstvá a starší fekální hmota. Směs moči a stolice je silně kontaminovaná, zapáchá a rychle se stává anaerobní, což zhoršuje hygienu a ohrožuje zdraví lidí, kteří jámy vyprazdňují. Zápach zároveň odrazuje od používání latrín, což omezuje přístup k hygienickým podmínkám. Situaci lze zlepšit přidáváním suchých materiálů, jako je popel, zemina, bioodpad, které snižují vlhkost a umožňují kompostování. Pomáhá také lepší větrání a využití slunečního tepla, například nátěrem latríny tmavou barvou. Dále je možné snížit promíchání výkalů rozdělením jámy přepážkou, kdy čerstvá hmota padá do jedné části, zatímco druhá dozrává a může být bezpečně vyprázdněna (Heinonen-Tanski & Wijk-Sijbesma 2005).

9 Získávání cenných látek z odpadní vody

9.1 Čistírenský kal

Při čištění odpadních vod vzniká směs pevných částic rozptýlených ve vodě, kterou označujeme jako kal. Jedná se o dvoufázové prostředí tvořené pevnou složkou a kapalinou, tj. kalovou vodou. V rámci provozu čistírny odpadních vod rozlišujeme dva hlavní typy kalů, a to primární kal, který vzniká při mechanickém usazování nečistot, a sekundární kal, jenž tvoří vedlejší produkt biologického čištění, tedy odpadní biomasa aktivovaného kalu. Primární kal z městských čistíren má typicky žlutohnědé až šedé zbarvení a obsahuje hlavně nerozpuštěné látky, které prošly předchozími stupni čištění. Díky přítomnosti jemných koloidních částic, které poutají vodu, je jeho odvodňování často komplikované (Adámek et al. 2008). Čistírenský kal je biologicky rozložitelný, ale jeho složení je velmi variabilní, vedle organických látek a živin může obsahovat také těžké kovy, zbytky léčiv a hormonů, perzistentní organické látky, patogeny i mikroplasty. Tato různorodost znečištění představuje výzvu zejména v regionech s přísnými ekologickými normami, kde je potřeba zaručit jeho bezpečné a udržitelné zpracování. (Hušek et al. 2022).

Při použití čistírenského kalu jako hnojiva pro potravinářské a krmné plodiny je klíčová biologická a chemická bezpečnost. V případě použití čistírenského kalu pro rekultivace půdy jsou důležité i fyzikální vlastnosti kalů. Únik těchto škodlivých látek do půdy nebo spodních vod může negativně ovlivnit půdní úrodnost i ekosystém, proto je třeba kal upravit před použitím. Podle právních norem a požadavků na konkrétní aplikace se kal upravuje zejména pomocí stabilizace, dezinfekcí a sušením (Ciešlik et al. 2015).

9.1.1 Stabilizace kalu

Stabilizace kalu je běžně využívaný způsob úpravy kalu v čistírnách odpadních vod, především v rozvinutých zemích, jako jsou USA, Kanada, Japonsko nebo evropské státy. Jejím cílem je snížit množství organické hmoty, zamezit zápachu, omezit přítomnost patogenů a připravit kal na další využití nebo likvidaci. K minimalizaci množství kalu dochází v několika etapách, a to buď přímo během čištění odpadní vody, v kalovém hospodářství nebo při finálním odstranění kalu. Ve většině větších čistíren odpadních vod se kal zpracovává obvykle ve dvou krocích. V první fázi se provádí zahuštění, při kterém se využívají technologie jako odstředění, gravitační sedimentace nebo vzduchová flotace. Ve druhé fázi dochází k biologické stabilizaci, tedy biologickému rozkladu organických složek kalu. Stabilizace může probíhat několika biologickými způsoby, nejčastěji formou anaerobní stabilizace, aerobní stabilizace, případně následným kompostováním. Tyto procesy nejen stabilizují kal, ale často také umožňují získat produkty s přidanou hodnotou, jako je například bioplyn využitelný pro energetické účely. Účinnost stabilizace závisí mimo jiné na rozkladu složitých organických molekul, které tvoří významnou část aktivovaného kalu. Klíčovým krokem je narušení buněčných struktur, díky čemuž dochází k rychlejšímu rozkladu a zkrácení doby zdržení v reaktorech (Anjum et al. 2016).

9.1.2 Anaerobní stabilizace kalu

Anaerobní stabilizace kalu je považována za ekonomicky výhodnou a ekologicky šetrnou technologii, neboť umožňuje výrobu bioplynu bohatého na metan a zároveň snižuje množství kalu a přítomnost patogenů (Anjum et al. 2016). Zatímco se při anaerobní stabilizaci kalu podstatná část organické hmoty přeměňuje na plynné produkty, které jsou základem zmíněného bioplynu, většina anorganických živin (zejména N a P) se z původní suroviny uvolňuje do kapalné fáze, přičemž menší část je využita mikroorganismy pro tvorbu nové biomasy. Výsledkem je na živiny bohatý filtrát – tzv. kalová voda, obsahující zejména dusík, fosfor a draslík. Kalová voda může být po sterilizaci či jiné úpravě využita jako kapalné hnojivo. Pevná frakce kalu se obvykle dále zpracovává, například kompostováním (viz. kapitola 9.1.4). V oblastech s nízkou poptávkou po kapalných hnojivech je však nutné kalovou vodu před navrácením do procesu čištění dále upravit, aby se odstranily zbytkové organické látky, přebytkové živiny a patogeny. Využití tohoto odpadního proudu jako zdroje pro obnovu živin přináší nové možnosti, jako je stripování, adsorpce amoniaku a srážení fosforu ve formě struvitu. N-amon obsažený v kalové vodě lze aktuálně využít dvěma způsoby, přímo jako hnojivo nebo jej získávat zpět pro další využití (Ma et al. 2018).

9.1.3 Aerobní stabilizace kalu

Aerobní stabilizace kalu je běžně využívaný způsob stabilizace kalu využívaný zejména v objektech menších čistíren odpadních vod, při němž se odvodněný nebo zahuštěný kal upravuje v provzdušněném reaktoru. Teplota a doba zdržení zpracovaného kalu mají zásadní vliv na efektivitu rozkladu. Proces lze aplikovat za nízkých teplot daným okolním prostředím, popřípadě za mezofilních či termofilních podmínkách, kdy je stále větší pozornost věnována termofilním metodám, jako je autotermní termofilní aerobní stabilizace. Autotermní termofilní stabilizace umožňuje rychlý rozpad biomasy, zkracuje dobu zdržení a účinně likviduje patogeny díky vysokým teplotám dosaženým vlastní produkcí tepla běhe, procesu. Nevýhodou je riziko zvýšené tvorby plynného amoniaku z rozkladu bílkovin, který se při vyšších teplotách hromadí kvůli omezení nitrifikace a denitrifikace. Nadbytečný amoniak navíc negativně působí na mikroorganismy a může poškodit buněčné struktury (Anjum et al. 2016).

9.1.4 Kompostování

Jednou z možností dodatečné biologické stabilizace kalu je kompostování, u kterého se předpokládá, že probíhá z velké části za aerobních podmínek a přeměňuje odvodněný anaerobně a aerobně stabilizovaný kal na stabilní materiál využitelný jako organické hnojivo. Proces se skládá ze tří fází. První fází rostou mezofilní mikroorganismy, které zvyšují teplotu systému. Následuje termofilní fáze, během níž dochází k eliminaci většiny patogenů díky vysokým teplotám. V závěrečné fázi zrání se teplota snižuje a obnovuje se činnost mezofilních druhů. Kompostování kalu je běžně využívané ve větších provozech, i když jeho účinnost může být ovlivněna složením kalu, tepelnými ztrátami či nerovnoměrnou biologickou aktivitou (Anjum et al. 2016).

9.1.5 Tepelné a chemické zpracování kalu

Upravený kal z čištění odpadních vod lze dále využít jako surovinu. Jednou z možností je pyrolýza, což je tepelný proces probíhající za omezeného přístupu vzduchu. Výsledkem jsou materiály využitelné například pro výrobu průmyslových absorbentů. Vedlejším produktem je pyrolýzní olej, který může sloužit jako palivo. Před použitím vzniklých produktů je však nutné provést analýzy pro ověření jejich bezpečnosti. Nejčastější metodou získávání cenných látek z kalu je obnova fosforu, ale je možné získat i kovy vzácných zemin. Tyto prvky, jako je stříbro, tellur, thalium nebo germanium, se vyskytují v kalech, zejména z průmyslově zatížených oblastí. Obnova probíhá v pecích za oxidačních nebo redukčních podmínek (Ciešlik et Namiešnik 2015).

9.2 Dusík a fosfor

Odpadní vody obsahují důležité živiny (dusík a fosfor), které jsou klíčové pro růst rostlin a udržení života. Zatímco dusík je sice hojně zastoupen v atmosféře, ve své reaktivní formě je v půdě omezený. Fosfor je navíc neobnovitelný a jeho dostupné zásoby se postupně vyčerpávají. Zemědělství je stále více závislé na syntetických hnojivech, avšak většina živin se ztrácí do prostředí, kde způsobuje problémy jako eutrofizace nebo znečištění ovzduší. Efektivním řešením je obnova dusíku a fosforu z odpadních vod, která pomáhá šetřit primární zdroje, snižuje environmentální dopady a podporuje udržitelné hospodaření s živinami (Sengupta et al. 2015).

9.2.1 Metody získávání dusíku

Z odpadních vod lze dusík nejen odstranit, ale i znovu získat a využít. Získávání dusíku z odpadních vod je možné několika způsoby. Současné přístupy k obnově dusíku lze rozdělit na fyzikálně-chemické a biologické metody. Mezi fyzikálně-chemické postupy patří stripování amoniaku, srážení struvitu, iontová výměna, adsorpce a bioelektrochemické systémy (Han & Zhou 2022).

Stripování amoniaku je běžně využíváno pro získávání amoniaku z průmyslových odpadních vod. Tento proces je ale účinný jen při vysoké koncentraci amoniaku a vyžaduje značné množství energie. Srážení struvitu nabízí možnost současného získávání amoniakálního dusíku N-amon i fosforu a je považováno za slibný způsob obnovy živin. V praxi je často nutné dodávat další fosfor nebo hořečnaté soli a upravovat pH, což zvyšuje náklady. Navíc obsah N-amonu ve struvitu je jen asi 6 %, takže metoda je vhodnější spíše pro obnovu fosforu. Iontová výměna a adsorpce jsou výhodné pro vody s nízkým obsahem N-amon, nicméně jejich širší uplatnění brzdí problémy se srážením iontů vápníku a hořčíku a vysoké náklady na regeneraci ionexů (Han & Zhou 2022).

Většina fyzikálně-chemických metod vyžaduje vysokou koncentraci N-amon, která v běžných odpadních vodách často není přítomna. Přestože jsou fyzikálně-chemické metody efektivní, jejich reálný potenciál je omezený a většinou nejsou přímo propojeny s procesy biologického odstraňování dusíku. Vzhledem k tomu, že současné čištění odpadních vod je založené hlavně na biologických postupech, je nezbytné se zaměřit na biologické metody, které umožní kombinovat odstranění i regeneraci dusíku v jednom procesu (Han & Zhou 2022).

9.2.2 Metody získávání fosforu

Světové zásoby fosforu jsou omezené, a i když se liší odhady, kdy dojde k jejich vyčerpání, je jisté, že zbývající fosfátové horniny jsou méně kvalitní a obtížněji těžitelné. Jelikož je fosfor nezbytný pro život, jeho recyklace a opětovné využití představuje logický krok (Yuan et al. 2012).

Fosfor se do čistírenského kalu dostává v průběhu biologického čištění odpadních vod, zejména při procesu tzv. zvýšeného biologického odstraňování fosforu. Během tohoto procesu jsou bakterie střídavě anaerobním a aerobním podmínkám akumulující fosfor ve formě polyfosfátů uvnitř svých buněk. Díky tomu se čistírenské kaly se řadí mezi organické odpadní materiály s významným obsahem fosforu (Ciešlik & Konieczka 2017). Fosfor je sice běžným prvkem, ale jeho zásoby se tenčí a jeho cena pravděpodobně poroste. Jednoduchým řešením využití fosforu je použití vysušeného a praženého kalu jako hnojiva, ovšem existuje riziko kontaminace těžkými kovy. Fosfor se dá také získat i za alkalických podmínek pomocí elektrolýzy železa, čímž se sníží spotřeba spalování a energetické náklady. Další možností je elektrolytická separace, která umožňuje zároveň odstranit těžké kovy, ale proces je časově náročný (Ciešlik & Namiešnik 2015).

Jednou z nejčastěji využívaných metod získávání fosforu z odpadních vod je krystalizace struvitu. Tento proces probíhá v podmínkách s vyšším pH a dostatečnou koncentrací amonného dusíku a fosforečnanů, často ve výstupních prouděch po anaerobní stabilizaci. Přidáním hořčíku do krystalizační nádrže lze fosfor účinně srážet a oddělit ve formě struvitu, který lze následně využít jako bezpečné a efektivní hnojivo. Struvitové technologie jsou schopny dosáhnout vysoké účinnosti při odstraňování fosforu, a navíc mohou přispět i ke snížení patogenů v digestátu. Výhodou této metody je, že ji lze uplatnit jak při přímém zpracování kalu, tak i při regeneraci fosforu z kalové vody. Nevýhodou je nutnost technologického vybavení a případná přítomnost iontů, jako je vápník, který může srážení fosforu ve formě struvitu znesnadnit (Ma et al. 2018).

10 Závěr

Bakalářská práce se podrobně zabývala možnostmi racionalizace nakládání s vodou v lidské společnosti. V kontextu globálních výzev, jako jsou klimatické změny, rostoucí spotřeba vody a nerovnoměrné rozložení vodních zdrojů, se efektivní hospodaření s vodou stává klíčovým prvkem udržitelného rozvoje. Práce ukázala, že existuje celá řada technických, technologických i organizačních opatření, která umožňují nejen snížit spotřebu vody, ale také zajistit její opětovné využití či transformaci odpadní vody na zdroj nové hodnoty.

Zvláštní pozornost byla věnována jednotlivým sektorům. V oblasti domácností práce zdůraznila význam úsporných technologií, jako jsou sprchové hlavice s omezeným průtokem, kompostovací a separační toalety či chytré zavlažovací systémy s automatizací. Implementace těchto řešení přináší nejen přímé finanční úspory, ale i pozitivní dopad na spotřebu energie a životní prostředí díky optimalizaci spotřeby vody na základě reálných potřeb. V průmyslové sféře se práce zaměřila na chladicí systémy, přičemž popsala výhody uzavřených recirkulačních systémů oproti otevřeným s odpadem z hlediska úspory vody. Zdůraznila význam optimalizace těchto systémů, včetně využití vzduchových chladičů. Vývoj v potravinářském i papírenském průmyslu naznačuje, že recyklace procesní vody a zavedení uzavřených vodních okruhů jsou cestou k výraznému snížení spotřeby kvalitní vody. V potravinářství se recyklovaná voda uplatňuje zejména při chlazení, mytí či oplachování, přičemž je nutné zajistit její zdravotní nezávadnost. V papírenském průmyslu může důsledné oddělení vodních okruhů a využití technologií, jako jsou membránová filtrace, výrazně snížit nároky na čerstvou vodu a současně omezit produkci odpadních vod.

Zvláštní pozornost byla věnována opětovnému využití vyčištěné odpadní vody. V městském prostředí se používá například na závlahu, splachování na toaletách či výrobu betonu. Zároveň pomáhá snížit potřebu minerálních hnojiv využívané pro zemědělské účely. Nezbytné je důkladné čištění zajišťující zdravotní nezávadnost.

Práce dále poukázala na potenciál různých druhů odpadní vody, především šedé, žluté a hnědé vody, jako alternativních zdrojů vody a živin. Opětovné využití šedé vody může výrazně snížit spotřebu pitné vody, zejména pro technické účely, jako je splachování toalet či zavlažování. Žlutá voda, tedy moč, je bohatá na živiny a může sloužit jako levné a ekologické hnojivo, pokud je správně hygienicky ošetřena. Hnědá voda, obsahující fekálie, může být využita k výrobě bioplynu anaerobním rozkladem nebo pro kompostování k zúrodnění půdy a navracení živin do zemědělského cyklu.

Současně byly popsány možnosti získávání cenných látek z odpadních vod, především dusíku a fosforu. Dusík a fosfor, klíčové prvky pro zemědělství, je možno z odpadní vody získávat různými fyzikálně-chemickými i biologickými metodami. Významným zdrojem živin je rovněž čistírenský kal, který vzniká jako vedlejší produkt při čištění odpadních vod. Po vhodné stabilizaci může být využit jako hnojivo nebo surovina pro další zpracování.

Racionalizace nakládání s vodou musí být chápána jako komplexní proces, který zahrnuje úsporná opatření, opětovné využití vody, využití alternativních zdrojů a současně získávání cenných látek z odpadních vod. Úspěšné zavádění těchto opatření závisí na spojení technologického rozvoje, vhodné legislativy, ekonomických nástrojů a aktivního přístupu jednotlivců i institucí. Vzhledem k měnícím se klimatickým podmínkám a rostoucím nárokům

na vodní zdroje bude potřeba tato opatření dále rozvíjet, podporovat jejich implementaci a hledat inovativní cesty k udržitelnému vodnímu hospodářství.

11 Literatura

- Abdel-Fatah MA. 2018. Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal* **9**:3077-3092. DOI:10.1016/j.asej.2018.08.001.
- Adámek Z, Helešic J, Maršálek B, Rulík M. 2008. *Aplikovaná hydrobiologie*. 1. vydání. Vodňany: VÚRH JU Vodňany. ISBN 978-80-85887-79-2.
- Ahmed J, Thakur A, Goyal A. 2021. Industrial Wastewater and Its Toxic Effects. Pages 1-14 in Shah MP, editors. *Biological Treatment of Industrial Wastewater*. Chemistry in the Environment, Cambridge.
- Akinnawo AO. 2023. Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges* **12** (100733). DOI:10.1016/j.envc.2023.100733.
- Al-Hazmi HE, Mohammadi A, Hejna A, Majtacz J, Esmaeili A, Habibzadeh S, Saeb MR, Badawi M, Lim EC, Mańinia J. 2023. Wastewater reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research* **236** (116711). DOI:10.1016/j.envres.2023.116711.
- Anand Ch, Apul DS. 2014. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation – A review. *Waste Management* **34**:329–343. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.10.006.
- Angelakis AN, Marecos Do Monte MHF, Bontoux L, Asano T. 1999. The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. *Water Research* **33**:2201-2217. DOI:10.1016/S0043-1354(98)00465-5.
- Anjum M, Al-Makishah NH, Barakat MA. 2016. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Safety and Environmental Protection* **102**:615-632. DOI:10.1016/j.psep.2016.05.022.
- Ashbolt NJ. Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. *Toxicology* **198**:229-238. DOI:10.1016/j.tox.2004.01.030.
- Becerra-Castro C, Lopes AR, Vaz-Moreira I, Silva EF, Manaia CM, Nunes OC. 2015. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International* **75**:117-135. DOI:10.1016/j.envint.2014.11.001.
- Belward A, Pekel JF, Cottam A, Gorelick N, Felice L, Wem Q, Dewsbery I. 2020. *Atlas of Global Surface Water Dynamics*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Beránková M. 2016. Odpadní voda – odpad nebo poklad? Vodohospodářské technicko ekonomické informace **58** DOI:10.46555/VTEI.2016.01.006.

Bhatnagar A, Sillanpää M. 2010. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential absorbents for water treatment – A review. Chemical Engineering Journal **157**:277-296. DOI:10.1016/j.cej.2010.01.007.

Bhavsar D, Limbasia B, Yash M, Aglodiya MI, Shah M. 2023. A comprehensive and systematic study in smart drip and sprinkler irrigation systems. Smart Agricultural Technology **5** (100303). DOI:10.1016/j.atech.2023.100303.

Casani S, Rouhany M, Knøchel S. 2005. A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry. Water Research **39**:899-915. DOI:10.1016/j.watres.2004.12.015.

Chen H, He H, You J, Xie J, Fang G, Xiao P. 2023. A study on urban household water consumption behavior under drought conditions. Journal of Environmental Management **346** (118963). DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118963.

Ciešlik B, Konieczka P. 2017. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. Journal of Cleaner Production **142**:1728–1740. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.11.116.

Ciešlik BM, Namieśnik J, Konieczka P. 2015. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. Journal of Cleaner Production **90**:1–15. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.11.031.

Anand CK, Apul DS. 2014. Compostion toilets as a sustainable alternative to urban sanitation – A review. Waste Management **34**:329-343. DOI:10.1016/j.wasman.2013.10.006.

ČSH. 2024. Domácnosti vodou nadále šetří, v průmyslu její spotřeba mírně roste. Český statistický úřad. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/produkty/domacnosti-vodou-nadale-setri-v-prumyslu-jeji-spotreba-mirne-roste>. [cit. 2025-03-12].

Duhbaci TB, Özel S, Bulkan S. 2021. Water and energy minimization in industrial processes through mathematical programming: A literature review. Journal of Cleaner Production **284** (124752). DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124752.

Europien Environmental Agency. 2018. Water use in Europe — Quantity and quality face big challenges, Luxembourg.

Garnier C, Guiga W, Lameloise M, Fargues C. 2023. Water reuse in the food processing industries: A review on pressure-driven membrane processes as reconditioning treatments. Journal of Food Engineering **344** (111397). DOI:10.1016/j.foodeng.2022.111397.

Goudie A. 2013. The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future. 7. vydání. John Wiley & Sons, Oxford. ISBN 978-1-118-57657-1.

Hagler G. 2024. Groundwater. Salem Press Encyclopedia of Science. Dostupné z: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=e2386772-86d1-3675-8371-5b63b515333f>. [cit. 2025-03].

Han F, Zhou W. 2022. Nitrogen recovery from wastewater by microbial assimilation – A review. *Bioresource Technology* **363** (127933). DOI:10.1016/j.biortech.2022.127933.

Han N, Zhang J, Hoang M, Gray S, Xie Z. 2021. A review of process and wastewater reuse in the recycled paper industry. *Environmental Technology & Innovation* **24** (101860). DOI:10.1016/j.eti.2021.101860.

Harder R, Wielemaker R, Molander S, Öberg G. 2020. Reframing human excreta management as part of food and farming systems. *Water Research* **175** (115601). DOI:10.1016/j.watres.2020.115601.

Heinonen-Tanski H, Van Wijk-Sijbesma C. 2005. Human excreta for plant production. *Bioresource Technology* **96**:403–411. DOI:10.1016/j.biortech.2003.10.036.

Hordon R. 2024. Water. Salem Press Encyclopedia of Science. Dostupné z: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=6536ac28-bb41-355a-bb34-679a5f699bfa> [cit. 2025-03].

Hübner P. 2023. Úprava vody v energetice. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7592-091-1.

Hušek M, Moško J, Pohořelý M. 2022. Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *Journal of Environmental Management* **315** (115090). DOI:10.1016/j.jenvman.2022.115090.

Ihalawatta RK, Kuruppuarachchi KABN, Kalatunga AK. 2015. Eco-Friendly, Water Saving Sanitation System. *Procedia CIRP* **26**:786–791. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.165.

Ikematsu M, Kaneda K, Iseki M, Yasuda M. 2007. Electrochemical treatment of human urine for its storage and reuse as flush water. *Science of The Total Environment* **382**:159-164. DOI:10.1016/j.scitotenv.2007.03.028.

International Water Managment Institute. 2007. Water for Food Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London: Earthscan. ISBN 978-1-84407-396-2.

- Jury WA, Vaux HJ. 2007. The Emerging Global Water Crisis: Managing Scarcity and Conflict Between Water Users. *Advances in Agronomy* **95**:1–76. DOI:10.1016/S0065-2113(07)85001-4.
- Kalavrouziotis IK, Arslan-Alaton I. 2008. Reuse of urban wastewater and sewage sludge in the Mediterranean countries: Case studies from Greece and Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* **17** (6).
- Kammakakam I, Lai Z. 2023. Next-generation ultrafiltration membranes: A review of material design, properties, recent progress, and challenges. *Chemosphere* **316** (137669). DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.137669.
- Kanae S. 2009. Global Warming and the Water Crisis. *Journal of Health Science* **55** (6). DOI:10.1248/jhs.55.860.
- Karak T, Bhattacharyya P. 2011. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resources, Conservation and Recycling* **55**:400–408. DOI:10.1016/j.resconrec.2010.12.008.
- Kundu S, Pramanik BK, Halder P, et al. 2022. Source and central level recovery of nutrients from urine and wastewater: A state-of-art on nutrients mapping and potential technological solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **10** (107146). DOI:10.1016/j.jece.2022.107146.
- Levine AD, Asano T. 2004. Peer Reviewed: Recovering sustainable water from wastewater. *Environmental Science & Technology* **38** (11). DOI:10.1021/es040504n.
- Li F, Wichmann K, Otterpohl R. 2009. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of The Total Environment* **407**:3439–3449. DOI:10.1016/j.scitotenv.2009.02.004.
- Liu B, Wang Y, Feng X. 2022. Optimal design of industrial cooling water systems considering economic performance and water savings. *Computer & Chemical Engineering* **167** (108021). DOI:10.1016/j.compchemeng.2022.108021.
- Lubello C, Gori R, Nicese FP, Ferrini F. 2004. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation. *Water Research* **38**:2939–2947. DOI:10.1016/j.watres.2004.03.037.
- Luo Y, Guo W, Ngo HH, et al. 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment* **473**:619–641. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.12.065.

- Ma H, Guo Y, Qin Y, Li Y. 2018. Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion. *Bioresource Technology* **269**:520–531. DOI:10.1016/j.biortech.2018.08.114.
- Maleb L, Ayoub GM. 2011. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *Desalination* **267**:1–8. DOI:10.1016/j.desal.2010.09.001.
- Mannina G, Gulhan H, Ni B. 2022. Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. *Bioresource Technology* **263** (127951). DOI:10.1016/j.biortech.2022.127951.
- Meneses YE, Stratton J, Flores RA. 2017. Water reconditioning and reuse in the food processing industry: Current situation and challenges. *Trends in Food Science & Technology* **61**:72–79. DOI:10.1016/j.tifs.2016.12.008.
- Mo W, Zhang Q. 2013. Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management* **127**:255–267. DOI:10.1016/j.jenvman.2013.05.007.
- Odone G, Parulli GD, Mancuso G, Lavrnić S, Toscano A. 2024. A novel smart fertigation system for irrigation with treated wastewater: Effects on nutrient recovery, crop and soil. *Agricultural Water Management* **297** (108832). DOI:10.1016/j.agwat.2024.108832.
- Ofori S, Puškáčová A, Růžičková I, Wanner J. 2021. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of The Total Environment* **760** (144026). DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.144026.
- Pecháček J. Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení. Dostupné z:
https://kke.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-aekologie_43_44/44_MMP/081_cisteni-odpadnich-vod---Pechacek.pdf. [cit. 2025-03-12].
- Pichel N, Vivar M, Fuentes. 2019. The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere* **218**:1014–1013. DOI:10.1016/j.chemosphere.2018.22.205.
- Pitter P. 2015. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Vysoká škola chemicko technologická, Praha. ISBN 978-80-7080-928-0.
- Ragab R, Prudhomme C. 2002. SW—Soil and Water: Climate Change and Water Resources Management in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for the 21st Century. *Biosystems Engineering* **81**:3–34. DOI:10.1006/bioe.2001.0013.

Randall DG, Naidoo V. 2018. Urine: The liquid gold of wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **6**:2627-2635. DOI:10.1016/j.jece.2018.04.012.

RAVOS, s.r.o. Odpadní voda. RAVOS, s.r.o. Dostupné z: <https://www.ravos-sro.cz/vse-o-vode/odpadni-voda/>. [cit. 2025-03-12].

Říha J. 2014. Voda jako složka biosféry: Encyklopedie vodního hospodářství I. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí. ISBN 978-80-7414-809-5.

Saravanan A, Deivayanai VC, Kumar PS, Rangasamy G, Hemavathy RV, Harshana T, Gayathri N, Alagumalai K. 2022. A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook. *Chemosphere* **308** (136524). DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.136524.

Sengupta S, Nawaz T, Beaudry J. 2015. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. *Current Pollution Reports* **1**:155–166. DOI:10.1007/s40726-015-0013-1.

Serna-González M, Ponce-Ortega JM, Jiménez-Gutiérrez. 2010. MINLP optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling towers. *Chemical Engineering Research and Design* **88**:614–625. DOI:10.1016/j.cherd.2009.09.016.

Shigi L, Xiaobo L, Guoyu Z, Like T, Qing Y. 2025. A novel flexible analysis approach of recirculating cooling water system integrated cooling tower and cooling water network. *Applied Thermal Engineering* **265** (125628). DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.125628.

Shrivastava V, Ali I, Marjub MM, Rene ER, Soto AMF. 2022. Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. *Chemosphere* **293** (133553). DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.133553.

Singh A. 2021. A review of wastewater irrigation: Environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling* **168** (105454). DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105454.

Šálek J. 2012. Voda v domě a na chatě: využití srážkových a odpadních vod. Grada, Praha. ISBN 978-80-247-7204-2.

Thakur IS, Medhi K. 2019. Nitrification and denitrification processes for mitigation of nitrous oxide from wastewater treatment plants for biovalorization: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology* **282**:502-513. DOI:10.1016/j.biortech.2019.03.069.

Tomberg L. 2024. Resource conservation through improved efficiency, behavioral change, or both: Willingness to pay for (smart) efficient shower heads. *Resources, Conservation and Recycling* **203** (107387). DOI:10.1016/j.resconrec.2023.107387.

- Van De Walle A, Kim M, Alam MK, Wang X, Wu D, Dash SR, Rabaey K, Kim J. 2023. Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental Science and Ecotechnology* **16** (100277). DOI:10.1016/j.esse.2023.100277.
- Voulvoulis N. 2018. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health* **2**:32–45. DOI:10.1016/j.coesg.2018.01.005.
- Wang F, Yang Y, Gao J, Li X, Tian S, Lu Z, Zhou Z, Sohn W, Shon HK, Ren J. 2024. Biological nitrification-based nutrient recovery technologies for source-separated urine treatment: A critical review. *Desalination* **591** (118027). DOI:10.1016/j.desal.2024.118027.
- Yuan Z, Pratt S, Batstone D. 2012. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Current Opinion in Biotechnology* **23**:878–883. DOI:10.1016/j.copbio.2012.08.001.
- Yusuf M, Kamar M, Khan MA, Sillanpää M, Arafat H. 2019. A review on exfoliation, characterization, environmental and energy applications of graphene and graphene-based composites. *Advances in Colloid and Interface Science* **273** (102036). DOI:10.1016/j.cis.2019.102036.
- Zhou Q, Sun H, Jia L, Wu W, Wang J. 2022. Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment: A review. *Chemosphere* **296** (134054). DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.134054.

12 Seznam citací obrázků

USGS: Science for a changing world. U.S. Department of the Interior, 2018 Dostupné z: [https://www.usgs.gov/media/images/rozdeleni-zasob-vody-ve-svete-earths water-distribution-czech](https://www.usgs.gov/media/images/rozdeleni-zasob-vody-ve-svete-earths-water-distribution-czech) [cit. 2025-04-16].

FANS, a.s. Chladicí věže s nuceným tahem. FANS, a.s. Dostupné z: <https://www.fansct.com/cz/chladici-veze-s-nucenym-tahem/>. [cit. 2025-03-12].

FANS, a.s. Chladicí věže s přirozeným tahem. FANS, a.s. Dostupné z: <https://www.fansct.com/cz/chladici-veze-s-prirozenym-tahem/>. [cit. 2025-03-12].