

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin  
FAPPZ**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Možnosti opětovného využití vyčištěné odpadní vody**

**Bakalářská práce**

**Kateřina Petrová**

**Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů**

**Ing. Pavel Švehla, Ph.D.**

**© 2022/2023 ČZU v Praze**



## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Možnosti opětovného využití vyčištěné odpadní vody" 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 21.4. 2023

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu práce, Ing. Pavlovi Švehlovi, PhD. za jeho odborné vedení, ochotu a trpělivost, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.



# Možnosti opětovného využití vyčištěné odpadní vody

## Souhrn

Tato bakalářská práce poskytuje přehled možných způsobů využití vyčištěné odpadní vody. Globálně se spotřeba vody zvyšuje, ale například v Evropě se v posledních letech spíše snižuje. V souvislosti s vysokou spotřebou vody společností a postupující klimatickou změnou, bude vyčištěná odpadní voda čím dál využívanějším zdrojem vody. Klimatická změna bude mít dopad zejména na polopouštní oblasti, které jsou hlavními pěstitelskými regiony. Zároveň bude mít negativní dopad i na kvalitu vody. Společnost nicméně sama znečišťuje přírodní vody velkou mírou vypouštěním vysokého množství kontaminantů z odpadních vod, které by pro nás mohly být zdrojem živin. Byly shrnuty výhody a nevýhody využití vyčištěných odpadních vod k zavlažování. Výhodou je vysoký obsah živin, který v určité míře podporuje růst rostlin a zkvalitňuje půdu. Nevýhodami jsou znečišťující látky, jako jsou rizikové prvky, které se potom mohou kumulovat v rostlinách a půdě a mohou tak následně vstupovat do potravního řetězce. Dále byly popsány možnosti využití vyčištěných odpadních vod jako procesní vody v papírenském a potravinářském průmyslu a možné způsoby jejich čištění pro následné využití v konkrétním průmyslovém odvětví. Do budoucna by mohlo být sníženo vypouštění průmyslových odpadních vod do komunálních odpadních vod uzavřením vodních okruhů v rámci výroby v daném průmyslovém závodě, kdy se voda recykluje v rámci jednoho provozu a použije se například k čištění výrobních strojů, jako doplňovací voda do kotlů či jako chladicí voda. Následně byly charakterizovány odpadní vody z domácností, které by se mohly separováním na jednotlivé složky efektivněji využít. Žluté a hnědé vody se ukázaly jako významný potenciální zdroj živin, mohou však zároveň působit zdravotní rizika vzhledem k obsahu patogenů nebo residuí farmaceutických sloučenin. Na závěr práce byly uvedeny možné technologie výroby pitné vody z odpadních vod. Jejich potenciál je spíše v menších regionech s nedostatkem pitné vody, kde by technologie úpravy vody byla přizpůsobena konkrétnímu znečištění odpadních vod v dané oblasti.

**Klíčová slova:** vyčištěná odpadní voda, terciární čištění vody, závlahy, snížení spotřeby vody, udržitelnost, recyklace vody

# Possibilities of Reuse of Treated Wastewater

## Summary

This bachelor thesis provides an overview of the possible uses of treated wastewater. Globally, water consumption is increasing, but in Europe, for example, it has been decreasing in recent years. In the context of high consumption of water by society and advancing climate change, treated wastewater will be an increasingly used water resource. Climate change will have a particular impact on semi-desert areas, which are the main growing regions. It will also have a negative impact on water quality. However, society itself is polluting natural waters to a large extent by discharging high levels of contaminants from wastewater, which could be a source of nutrients for us. The advantages and disadvantages of using treated wastewater for irrigation were summarised. The advantage is the high nutrient content, which to some extent promotes plant growth and improves the soil. The disadvantages represents pollutants, such as risk elements, which can then accumulate in plants and soil and may subsequently enter the food chain. Furthermore, the possibilities of using treated wastewater as process water in the paper and food industry and possible ways of treating it for subsequent use in a specific industrial sector were described. In the future, the discharge of industrial wastewater into municipal wastewater could be reduced by closing the water loops within the production of an industrial plant, where the water is recycled within the same plant and used, for example, for cleaning of production machines, as make-up water for boilers or as cooling water. Subsequently, domestic wastewater was characterised where the possibility that it could be used more efficiently by separating it into its individual components. Yellow and brown waters emerged as an important potential source of nutrients but may also cause health risks due to the presence of pathogens or residues of pharmaceutical compounds. At the end of the work, possible technologies to produce drinking water from wastewater were presented. Their potential is rather in smaller regions with a lack of drinking water, where the water treatment technology would be adapted to the specific wastewater pollution in the area.

**Keywords:** treated wastewater, tertiary wastewater treatment, irrigation, water consumption reduction, sustainability, water recycling

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Vysvětlení významu důležitých pojmů.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Pitná voda .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2</b>	<b>Užitková voda .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3</b>	<b>Provozní voda .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4</b>	<b>Vyčištěná odpadní voda .....</b>	<b>12</b>
<b>3.5</b>	<b>Splaškové vody .....</b>	<b>12</b>
<b>3.6</b>	<b>Srážková voda.....</b>	<b>13</b>
<b>3.7</b>	<b>Průmyslová odpadní voda .....</b>	<b>13</b>
<b>3.8</b>	<b>Znečištění vody .....</b>	<b>14</b>
<b>3.9</b>	<b>Ukazatele znečištění vody .....</b>	<b>14</b>
3.9.1	Koncentrace veškerých látek .....	14
3.9.2	Koncentrace rozpuštěných látek .....	15
3.9.3	Koncentrace nerozpuštěných látek .....	15
3.9.4	Ztráta žiháním .....	15
3.9.5	Koncentrace rozpuštěných anorganických solí (RAS) .....	15
3.9.6	Amoniakální dusík .....	16
3.9.7	Koncentrace celkového dusíku a fosforu .....	16
3.9.8	Hodnota pH vody .....	16
3.9.9	Neutralizační kapacita vody .....	17
3.9.10	Biochemická spotřeba kyslíku .....	17
3.9.11	Chemická spotřeba kyslíku .....	17
<b>4</b>	<b>Globální stav vody .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1</b>	<b>Vliv změn klimatu na hospodaření s vodou .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Spotřeba vody společností .....</b>	<b>20</b>
<b>4.3</b>	<b>Zdroje vody pro lidskou společnost.....</b>	<b>21</b>
<b>4.4</b>	<b>Příčiny znečištění vody na Zemi .....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Proces čištění odpadních vod .....</b>	<b>23</b>
<b>5.1</b>	<b>Čistírna odpadních vod.....</b>	<b>23</b>
<b>5.2</b>	<b>Mechanické předčištění čištění odpadních vod .....</b>	<b>23</b>
<b>5.3</b>	<b>Mechanické (primární) čištění odpadních vod.....</b>	<b>24</b>
<b>5.4</b>	<b>Sekundární (biologické) čištění odpadních vod.....</b>	<b>24</b>
<b>5.5</b>	<b>Terciární čištění odpadních vod .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Formy využití vyčištěné odpadní vody .....</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>Závlahy v zemědělství .....</b>	<b>26</b>

6.1.1	Vliv vyčištěné odpadní vody na půdu.....	27
6.1.2	Nevýhody a rizika.....	28
6.1.3	Metody dočištění odpadní vody pro závlahy .....	29
6.1.4	Zavlažování vyčištěnou odpadní vodou v různých zemích .....	30
6.1.5	Shrnutí.....	33
<b>6.2</b>	<b>Procesní voda v průmyslu .....</b>	<b>33</b>
6.2.1	Papírenský průmysl.....	33
6.2.2	Potravinářský průmysl .....	35
6.2.2.1	Metody čištění a dočištění odpadních vod vznikajících v potravinářském průmyslu a jejich možné využití .....	37
<b>6.3</b>	<b>Užitková voda v domácnostech .....</b>	<b>39</b>
6.3.1	Třídění odpadní vody z domácností a jejich využití.....	39
6.3.1.1	Hnědé vody .....	39
6.3.1.2	Šedé vody .....	40
6.3.1.3	Žluté vody.....	43
<b>6.4</b>	<b>Další možnosti využití .....</b>	<b>47</b>
6.4.1	Čištění odpadních kontejnerů .....	47
<b>6.5</b>	<b>Možnost výroby pitné vody z odpadní vody .....</b>	<b>48</b>
6.5.1	Reverzní osmóza.....	48
6.5.2	Elektrodialýza s bipolárními membránami .....	48
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>52</b>

# 1 Úvod

Voda je jedním ze základních přírodních zdrojů. Využívá se každý den a téměř ve všech odvětvích. V současné době je spotřeba pitné vody a její využívání důležitým tématem i v souvislosti s přicházející klimatickou změnou. Možnost využívání vyčištěné odpadní vody by mohla být řešením, jak předejít nadměrné spotřebě přírodní vody a zároveň ji využít jako potenciální zdroj živin.

Globálně se za posledních 100 let šestkrát zvýšila spotřeba vody. Tato spotřeba neustále roste rychlostí přibližně 1 % ročně, v závislosti na rostoucí populaci a ekonomickém rozvoji (UNESCO et al. 2020). Na druhou stranu, ve vyspělých zemích v Evropě je možno pozorovat v posledních letech spíše určitý pokles spotřeby vody. Evropské zdroje pitné vody jsou především z řek a podzemních vod. Evropa se snaží již čtyři desetiletí o pokrok v regulaci kvality vody, čištění odpadních vod a v ochraně mořských i sladkovodních stanovišť a druhů (Evropská agentura pro životní prostředí 2018). Tyto regulace jsou zajišťovány právními předpisy Evropské Unie a jejich zastrešujícími programy, týkajícími se životního prostředí a vody. Jejich zásluhou se podařilo od roku 1990 snížit celkový objem vody odebíraný z přírodních zdrojů o 19 %. Evropská agentura pro životní prostředí ve své zprávě o stavu vody v Evropě z roku 2018 uvedla, že přibližně tři čtvrtiny útvarů podzemních vod a přibližně 40 % povrchových vod jsou z chemického hlediska čisté (European Environment Agency 2018).

Důležitým faktorem, který negativně ovlivňuje a v budoucnu bude ovlivňovat spotřebu a kvalitu vody, je klimatická změna. Podle současných předpovědí může do budoucna zhoršit situaci v regionech, které jsou již dnes ohroženy nedostatkem vody, a způsobit nedostatek vody v oblastech, které jsou prozatím na vodní zdroje bohaté. Vlivem klimatické změny vzrůstá mimo jiné i frekvence a rozsah extrémních událostí, jako jsou vlny veder, silné srážky nebo bouřky. Vysoké teploty mohou nepříznivě ovlivnit kvalitu vody, konkrétně snížením obsahu rozpuštěného kyslíku, a tím i sníženou samočisticí schopností sladké vody. Predikce udávají, že se mohou výrazně rozšířit suché oblasti po celé planetě a zrychlené tání ledovců bude mít negativní vliv na vodní zdroje v horských oblastech a jejich přilehlých nížinách (UNESCO et al. 2020). Zpráva z Mezivládního panelu změny klimatu (IPCC) z roku 2014 uvádí, že v Evropě lze v budoucnu očekávat zvýšené omezení dostupnosti vody z řek a podzemních zdrojů, kvůli zvýšené poptávce z oblasti průmyslu, energetiky, na závlahy v zemědělství, či na užití v domácnostech (IPCC 2014).

Přestože jsou výsledky stavu vody v Evropě povzbudivé, je potřeba situaci s čistotou vody a její spotřebou řešit v globálním měřítku a zaměřit se na možnosti, které by mohly být v budoucnu udržitelnější a ekonomičtější. Doporučení ze zprávy Mezinárodního panelu změny klimatu jasně uvádí, že je nutné zavést a rozšířit více technologií pro efektivní hospodaření s vodou a zaměřit se na vhodné strategie pro úsporu vody ve všech odvětvích (IPCC 2014). Vhodnou strategií by mohlo být právě efektivní využívání vyčištěné odpadní vody.

## **2 Cíl práce**

Cílem této bakalářské práce bude formou literární rešerše zpracovat ucelený přehled možností opětovného využití vyčištěné odpadní vody. Bude popsána možnost využití vody na závlahy v zemědělství. Dále bude řešeno její využití ve formě užitkové vody například v průmyslu. Bude diskutována i možnost výroby pitné vody z vody odpadní. Nastíněny budou aspekty ovlivňující aplikovatelnost různých metod dočištění odpadních vod za účelem rozšíření možností recyklace odpadních vod.

## 3 Vysvětlení významu důležitých pojmů

### 3.1 Pitná voda

Pitná voda je dle zákona č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví veškerá voda v původním stavu nebo po úpravě, která je určena k pití, vaření, přípravě jídel a nápojů, voda používaná v potravinářství, voda, která je určena k péči o tělo, k čištění předmětů, které svým určením přicházejí do styku s potravinami nebo lidským tělem, a k dalším účelům lidské spotřeby, a to bez ohledu na její původ, skupenství a způsob jejího dodávání. Pitná voda musí mít dané fyzikálně-chemické vlastnosti, které nejsou rizikové pro zdraví lidí. Jsou stanovené nejvyšší možné koncentrace, v jakých se v pitné vodě mohou objevovat mikroorganismy, parazité či látky jakéhokoli druhu.

Světová zdravotnická organizace (WHO) stanoví pokyny pro kvalitu pitné vody na celém světě. Zahrnují fyzikální a chemické vlastnosti, mikrobiologické a radiologické parametry kvality vody. Směrnice EU o pitné vodě stanovuje závazné maximální a nezávazné hodnoty ukazatelů pro řadu chemických látek a mikrobiálních parametrů (Smith et Scott 2005).

### 3.2 Užitková voda

Užitková voda je dle zákona č. 544/2020 Sb. srážková nebo šedá voda, která je upravena a hygienicky zabezpečena. Šedou vodou se rozumí odpadní voda z umyvadel, sprch a van. Tento druh vody lze využít pro splachování toalet a pisoárů, praní, úklid, mytí vozidel, zalévání zahrady nebo kropení komunikací, nikoli však jako vodu pitnou (Smith et Scott 2005).

Její jakost odpovídá způsobu použití (Pitter 2015). Prováděcí právní předpis určuje vyžadovanou míru úpravy a hygienického zabezpečení této vody, včetně způsobu jeho prokázání. Jedná se o zdravotně nezávadnou vodu, která ovšem není vhodná pro lidskou konzumaci. Abychom s ní mohli napájet hospodářská zvířata, musela by užitková voda splnit limitní požadavky pro požívání vody zvířaty (Šálek 2012).

### 3.3 Provozní voda

Tento druh vody je určen k různým výrobním a nevýrobním účelům jako je chlazení, mytí zařízení, hydraulická doprava, rozpouštění surovin, aj. V tomto případě mohou být specifické požadavky na jakost vody vzhledem k jejímu účelu. Dle Pittera (2015) jsou obecné požadavky pro tento typ vody tyto:

- Bezbarvá, bez zákalu a sedimentujících látek,
- Nesmí se z ní dodatečně vylučovat nerozpuštěné látky a nesmí se tvořit chemické ani biologické povlaky na výrobcích,
- Nesmí působit agresivně na kovy a stavebniny,
- Málo mineralizovaná,
- Neměla by obsahovat velké množství organických látek,
- Pokud by přicházela do styku s potravinami při jejich výrobě a zpracovávání surovin, musí být hygienicky nezávadná.

Specifické požadavky na jakost vody jsou nejčastější pro některá odvětví elektrotechnického průmyslu, na vodu při výrobě plastů, v textilním a papírenském průmyslu a v neposlední řadě na vodu, která se používá k napájení parních kotlů. Konkrétní parametry provozní vody pro energetická zařízení, povrchovou úpravu kovů či průmyslové chladicí okruhy se řídí dle platných norem. Pro průmyslové chladicí okruhy je důležité, aby voda nepůsobila nadměrnou korozi materiálu, proto se sledují složky vody jako sírany, chloridy, amonné ionty, aktivní chlor.

Voda, která je v přímém kontaktu s potravinami, může mít mnohdy přísnější požadavky na jakost, než má voda pitná. Například mlékárny vyžadují nižší koncentraci hořčičku ve vodě, jelikož by mohl způsobit hořkou chuť másla (Pitter 2015).

### **3.4 Vyčištěná odpadní voda**

Voda, jejíž vlastnosti, ať už chemické, fyzikální nebo biologické, byly jejím používáním pozměněny, se označuje jako voda odpadní. Abychom ji mohli vrátit zpět do přírody nebo ji znovu využít, je třeba odpadní vodu vyčistit. Odpadní vodu čistíme v čistírnách odpadních vod, zkráceně ČOV (Švehla et al. 2007).

Odpadní voda přitéká do ČOV kanalizačním systémem a následně prochází v ČOV několika procesy, které vedou k odstranění znečištění. Po vyčištění by měla kvalita vody odpovídat recipientu, do kterého je vypouštěna nebo pro její opětovné použití. Recipientem je nazýván vodní útvar, do kterého navracíme vyčištěnou odpadní vodu. Vyčištěná odpadní voda je odváděna přímo z čistírny odpadních vod. Recipienty jsou nejčastěji vodní toky nebo vodní nádrže (Švehla et al. 2007).

Mnohdy je kvalita vyčištěné odpadní vody lepší než v recipientu, do kterého je vypouštěna (Vojtěchovská Šrámková et Wanner 2014).

Vyčištěná odpadní voda je tedy pojem, který používáme pro odpadní vodu, která prošla procesem vyčištění v čistírně odpadních vod (ČOV) a je navracena zpět do recipientu nebo opětovně využita.

### **3.5 Splaškové vody**

Splaškové vody nebo také splašky je označení pro druh odpadních vod, které odtékají z umyvadel, van sprch, dřezů apod. (Smith et Scott 2005; Beránková 2016). Jsou odváděny z domácností, hygienických zařízení, objektů společného stravování, ubytování a dalších míst (Pitter 2015; Beránková 2016).

Adámek et al. (2010) uvádí, že z technologického hlediska obsahují splaškové vody zejména hrubě rozptýlené látky, jemně rozptýlené usaditelné látky, jemně rozptýlené obtížně usaditelné a neusaditelné látky a rozpuštěné látky. Ve splaškových vodách jsou především organické látky a sloučeniny dusíku. Dále také organické sloučeniny síry a fosforu. Z organických látek převládají bílkoviny (40–60 %), cukry (25–50 %), tuky a oleje (10 %). V menším množství tu dále nalezneme fenoly, tenzidy a pesticidy (Pecháček 2019). Tenzidy se do splaškových vod dostávají zejména z pracích prášků, šamponů, mýdel nebo čistících prostředků (Beránková 2016).



Dle Pecháčka (2019) jsou splaškové vody závadné svým mikrobiálním znečištěním. Mají charakter infekční látky, a proto je nutno při práci s nimi dodržovat všechna hygienická pravidla a maximální opatrnost. Významný podíl znečišťujících látek pochází z moče a fekálií. Přibližně 120 až 330 g fekálií vyprodukuje člověk za jeden den, přičemž sušina je okolo 30 g až 75 g. V průměru to tedy vychází na 250 g fekálií a 50 g sušiny na osobu za den. Fekálie jsou z 90 % organické látky a z 10 % anorganické látky (Pitter 2015). Z organických látek jsou to lipidy, bílkoviny, polysacharidy a jejich rozkladné produkty, plus zbytky střevních bakterií. Z anorganických látek je zde například fosfor, který je vázaný na vápník a hořčík (Švehla a kol. 2007).

Beránková et al. (2017) uvádí, že průměrná spotřeba vody na obyvatele České republiky je pod 90 litrů na den.

### **3.6 Srážková voda**

Srážková voda je označení pro vodu z atmosférických srážek, která dopadá na zemský povrch. Srážková voda je jedna z nejčistších vod (Smith et Scott 2005).

Může být potenciálním zdrojem kontaminace povrchových a podzemních vod, pokud při srážkách odtéká ze znečištěných komunikací a zpevněných ploch, jako jsou dálnice, silnice nebo parkoviště. Splachovaný silniční sediment, který následně odtéká do kanalizace, může obsahovat různé částice a materiály. Těmi mohou být nerozpuštěné látky, těžké kovy a aromatické uhlovodíky z pohonných hmot a opotřebených částí automobilů, jako jsou brzdy či pneumatiky. Míra znečištění těchto ploch je závislá na počtu dní bez deště, kdy se zde znečištění kumuluje, na frekvenci zatížení a také na intenzitě srážek (Čejková et al. 2021).

### **3.7 Průmyslová odpadní voda**

Jako průmyslové odpadní vody jsou označovány odpadní vody, které produkuje průmyslová výroba. Kromě průmyslu zahrnuje také odpadní vody ze zemědělství.

Mezi jednotlivými průmyslovými odvětvími jsou rozdíly v množství vyprodukované odpadní vody a v jednotlivých znečišťujících látkách. Tyto rozdíly souvisí s konkrétní činností dané průmyslové výroby (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012). Mezi materiály, které mohou být vypouštěny z průmyslových procesů patří chemikálie, barviva, kyseliny, louhy, šterk, čisticí prostředky a vysoce toxické látky a materiály (Drinan et Spellman 2012).

Čištění průmyslových odpadních vod probíhá buď na městské ČOV společně se splaškovými vodami, nebo má daná průmyslová výroba svoji ČOV, kde si ji čistí sama (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012). Dle Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod 445/2021 Sb. mohou být průmyslové odpadní vody na komunální čistírně odpadních vod likvidovány pouze v případě, že znečištění, které obsahují, je odstranitelné technologií použitou na dané ČOV (Švehla et al. 2007). Obecně se odstranění znečišťujících látek provádí fyzikálními, chemickými a biologickými prostředky. Neexistuje pouze jediná metoda, která by byla schopna zajistit dostatečné čištění, vzhledem k tomu, že mohou obsahovat různé složky znečištění. Nejčastěji se používá kombinace několika metod. Ve vyspělejších zemích jsou právní předpisy pro čištění průmyslových odpadních vod

stále přísnější, aby se zpět do životního prostředí navracela voda v co nejlepší kvalitě (Crini et Lichtfouse 2019).

### **3.8 Znečištění vody**

Znečištění vody lze definovat mnoha způsoby. Jedním z nich je, že k němu dochází, když se do vody vypustí jedna nebo více látek, které ji negativně pozmění. Změny mohou mít negativní dopad na lidi, živočichy a jejich biotopy nebo také na životní prostředí (Crini et Lichtfouse 2019).

Vodní zdroje mohou být znečištěny bodovými nebo plošnými zdroji, atmosférickými vlivy nebo erozí půdy (Vojtěchovská Šrámková et Wanner 2014). Zdrojem vody jsou přírodní útvary na zemském povrchu (vodní toky, vodní nádrže) nebo pod zemským povrchem (podpovrchová voda).

Samotný fakt, že se voda používá, znamená, že se znečistí. Ať je to činnost domácností, zemědělská nebo průmyslová, produkuje odpadní vody obsahující nežádoucí znečišťující látky. (Crini et Lichtfouse 2019). Míra znečištění a konkrétní znečišťující látky ve vodě potom souvisí s konkrétním účelem, ke kterému je voda využita.

### **3.9 Ukazatele znečištění vody**

Ukazatele znečištění vody jsou parametry sloužící k měření fyzikálních, chemických a biologických vlastností vody (Drinan et Spellman 2012). Používají se pro všechny znečištěné vody, což jsou jak vody odpadní, tak i vody přírodní. K odhalení daného znečištění se využívají kvalitativní a kvantitativní analytické rozborů vody.

Kvalitativní rozborů nám pomáhají ke zjišťování konkrétních látek, které vodu znečišťují a kvantitativní rozborů ke zjišťování množství jednotlivých znečišťujících látek. Množství se nejčastěji vyjadřuje hmotnostní koncentrací dané látky v jednotkách  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{g/l}$ ,  $\text{mg/l}$ , nebo její látkovou koncentrací v jednotkách  $\text{mol/l}$ ,  $\text{mmol/l}$ . Oba typy rozborů jsou velmi důležité pro správnou volbu procesů při čištění znečištěných vod a pro určení míry účinnosti čištění na konkrétní ČOV. Každá ČOV má stanoveny své limitní hodnoty, které je její provozovatel povinen dle právních předpisů splnit, takže jsou pro něj tyto hodnoty závazné. Napomáhají ke správnému fungování celého procesu čištění odpadních vod (Švehla et al. 2007).

Ukazatelů znečištění vody je více, blíže je vysvětleno devět nejdůležitějších.

#### **3.9.1 Koncentrace veškerých látek**

Koncentrace veškerých látek již z názvu napovídá, že se tento ukazatel týká všech látek, které jsou ve vzorku odpadní vody. To znamená, že se týká jak rozpuštěných, tak nerozpuštěných látek a zároveň nerozlišuje látky organické a anorganické.

Stanovení se provádí se vzorkem o známém množství v předem zvážené misce. Ta se umístí na vodní lázeň, odkud se následně ze vzorku odpaří voda. Miska se nakonec umístí na dvě hodiny při  $105^\circ\text{C}$  do sušárny. Koncentrace veškerých látek po sušení se zjišťuje jednoduše rozdílem hmotnosti misky se vzorkem po vysušení ( $m_2$ ) a hmotnosti původní misky s původním

vzorkem ( $m_1$ ) (Švehla et al. 2007). Hmotnostní koncentrace se vypočítá dle vzorce níže. Výsledek je v g/l.

$$\rho(VL) = (m_2 - m_1) \cdot 1000 / V_{vz} \quad (1)$$

### 3.9.2 Koncentrace rozpuštěných látek

Koncentrace rozpuštěných látek se ve vzorku určuje podobným způsobem jako u koncentrace veškerých látek. Aby se ze vzorku odstranily nerozpuštěné látky, využívá se metoda filtrace či odstředění. Filtr by měl mít průměrnou velikost pórů 0,45  $\mu\text{m}$ . Po přefiltrování ve vzorku zůstanou pouze látky rozpuštěné (Švehla et al. 2007).

### 3.9.3 Koncentrace nerozpuštěných látek

Koncentraci nerozpuštěných látek lze spočítat prostým rozdílem koncentrací veškerých látek a látek rozpuštěných v daném vzorku. Tento ukazatel je velmi důležitý při výběru správné technologie čištění na ČOV. Pokud je známá koncentrace nerozpuštěných látek, víme, že se jedná o znečištění, které lze odstranit mechanicky – sedimentací nebo filtrací (Švehla et al. 2007).

### 3.9.4 Ztráta žiháním

Ukazatelem ztráty žiháním rozlišujeme organické a anorganické znečištění vody.

Postup při této metodě navazuje na stanovení všech látek nebo rozpuštěných látek, který je již popsán výše. Po stanovení veškerých nebo rozpuštěných látek miskou se vzorkem po vysušení, nejčastěji z hliníkové folie, vkládáme do pece, kde je při teplotě 550°C žihána po dobu jedné hodiny. Během této doby v peci shoří organické látky a zůstanou pouze anorganické látky (Švehla 2012).

Miska se poté opět zváží a ztráta žiháním se následně vypočítá jako rozdíl mezi hmotností misky po žihání ( $m_3$ ) a hmotností misky po vysušení ( $m_2$ ). Výsledek bude obdobně jako u koncentrace veškerých látek v jednotkách g/l (Švehla et al. 2007).

$$\rho(Z\check{Z}) = (m_2 - m_3) \cdot 1000 / V_{vz} \quad (2)$$

### 3.9.5 Koncentrace rozpuštěných anorganických solí (RAS)

Po žihání homogenizovaného vzorku v misce zůstane pouze anorganické znečištění. To jsou tedy všechny anorganické látky přítomné ve vzorku. Rozpuštěné anorganické soli jsou jinými slovy anorganické látky, přítomné po žihání filtrovaného nebo odstředěného vzorku odpadní vody. Jejich koncentraci lze snadno získat rozdílem koncentrace rozpuštěných látek (RL) a koncentrace rozpuštěných organických látek ( $RL_{org}$ ).

Tento ukazatel je při čištění odpadních vod důležitý, jelikož popisuje, kolik je v odpadní vodě látek, které nelze odstranit mechanickými a většinou ani biologickými postupy (Švehla 2012).

### 3.9.6 Amoniakální dusík

Pro technologii čištění odpadní vody jsou důležité koncentrace i některých konkrétních látek. Týká se to především dusíku a fosforu.

Přítomnost amoniakálního dusíku (N-amon) ve vodě je nebezpečná. Především pro ryby a vodní organismy, jelikož je i při nízké koncentraci velmi toxický. Jeho koncentrace se udává v jednotkách mg/l.

Může se vyskytovat ve dvou formách, disociované a nedisociované. Disociovanou formou je amonný kationt  $\text{NH}_4^+$ . Nedisociovaná forma N-amon je volný amoniak  $\text{NH}_3$ . Zastoupení nedisociovaného amoniaku se zvyšuje spolu se stoupající hodnotou pH a stoupající teplotou vody. Dalším rizikem při jeho vyšší koncentraci je spotřeba rozpuštěného kyslíku ve vodě. Ten je ovšem nezbytný pro vodní živočichy, zejména ryby. Rozpuštěný kyslík je spotřebováván během nitrifikace N-amon (Švehla et al. 2007).

### 3.9.7 Koncentrace celkového dusíku a fosforu

Dusík a fosfor mohou ve vyšších koncentracích v přírodních vodách způsobovat eutrofizaci vody. Eutrofizace je přemnožení fytoplanktonu (řasy a sinice), způsobené vyšším obsahem nutrientů (minerálních živin) ve vodě (Drinan et Spellman 2012). Zhoršuje se pach vody a dochází k tvorbě toxických organických látek. Pokud tato situace nastane, je významně omezena možnost zpracování této vody na vodu pitnou a také možnost jejího využívání k rekreačním účelům.

Rozlišuje se přirozená a antropogenní eutrofizace vody. Pojmem přirozená eutrofizace se myslí taková, kterou nelze ovlivnit a je způsobena přirozenými pochody v přírodě, např. dusík a fosfor z půdy, z rozkladu odumřelých vodních organismů nebo ze sedimentů ze dna koryt vodních toků (Švehla et al. 2007). V případě tzv. kyselých dešťů také mohou přidávat dusík do povrchových vod (Drinan et Spellman 2012). Antropogenní eutrofizace je ovlivněna člověkem a jeho nakládáním s vyčištěnou odpadní vodou, kterou vypouští zpět do přírody. Jedná se o vodu, která je znečištěna polyfosforečnany z pracích a čistících prostředků (Švehla a kol. 2007; Drinan et Spellman 2012). Dusík se do přírodní vody může dostat s vodou, kterou byla splachována hnojiva z půdy či z vypuštěných odpadních vod (Drinan et Spellman 2012). Dalším antropogenním zdrojem je zemědělství (Švehla et al. 2007). Zemědělství aplikuje mnoho živin do půdy, zejména dusíkatých hnojiv. Hnojiva se potom mohou dostat do sladkovodních toků. Schopnost vodních toků vyrovnat se přirozenými procesy s velkým množstvím znečištěním je pouze omezená (Shahady 2022).

### 3.9.8 Hodnota pH vody

Hodnota pH nám udává zásaditost, resp. kyselost vody. Dle její intenzity ovlivňuje biologické a chemické reakce (Drinan et Spellman 2012). Hodnoty se pohybují mezi 0–14, kdy pH rovno 7 znamená, že je voda (roztok) neutrální. Čím nižší je hodnota pH, tím je voda kyselejší, a naopak s vyšší hodnotou pH roste její zásaditost. Pro proces čištění odpadních vod, a i pro říční život v přírodě nejsou vhodné ani příliš vysoké, ani příliš nízké hodnoty pH. Například zvýšená hodnota pH prodlužuje dobu potřebnou k dezinfekci vody chlorem (Drinan

et Spellman 2012). Obecně lze říct, že pokud má voda vyšší obsah kyselin či zásad, bude téměř jistě výrazně znečištěna i jinak (Švehla et al. 2007).

### **3.9.9 Neutralizační kapacita vody**

Ukazatel neutralizační kapacita vody udává, kolik činidla je třeba přidat k danému objemu vzorku odpadní vody, abychom změnilly jeho pH z hodnoty původní na hodnotu požadovanou. Kyselinová neutralizační kapacita (KNK) stanovuje množství jednosytné silné kyseliny, například kyseliny chlorovodíkové (HCl), kterou potřebujeme ke změně na požadovanou hodnotu pH. Zásadová neutralizační kapacita (ZNK) na druhou stranu stanovuje množství jednosytné silné zásady, například hydroxidu sodného (NaOH), potřebného ke změně hodnoty pH (Švehla 2012).

### **3.9.10 Biochemická spotřeba kyslíku**

Biochemická spotřeba kyslíku, zkráceně BSK, je ukazatel, který vyjadřuje množství kyslíku, který během biochemického rozkladu organických látek spotřebují mikroorganismy. (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012). Jinými slovy nám říká, kolik organických látek v odpadní vodě je biologicky rozložitelných. Organické látky jsou, jednou z významných skupin znečišťujících látek ve vodě. Z tohoto důvodu je tento ukazatel velmi důležitý při rozboru odpadní vody.

Hodnota BSK má k sobě obvykle připojen ještě číselný dolní index, který označuje, kolik dní probíhal test (Švehla et al. 2007). Standartně je délka testu 5 dní, během něhož je vzorek s odpadní vodou uchovávan při konstantní teplotě 20 °C, bez přístupu atmosférického kyslíku a světla, a za aerobních podmínek po celou dobu testu. Jednotkami pro hodnoty BSK jsou mg/l O<sub>2</sub> (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012).

### **3.9.11 Chemická spotřeba kyslíku**

Chemická spotřeba kyslíku, zkráceně CHSK souvisí s biochemickou spotřebou kyslíku. Rozdílem je, že chemická spotřeba kyslíku definuje všechny organické látky přítomné ve vzorku vody, které jsou chemicky oxidovatelné (Švehla et al. 2007).

Postup stanovení probíhá s využitím silného oxidačního činidla, nejčastěji je to dichroman draselný (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) v silně kyselém prostředí kyseliny sírové (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), při teplotě 150 °C. Katalyzátorem reakce je síran stříbrný (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Přídavek síranu rtuťnatého (HgSO<sub>4</sub>) váže v reakci chloridy, jelikož by se jinak dichromanem draselným v kyselém prostředí také oxidovaly (Pitter 2015). Výsledná hodnota chemické spotřeby kyslíku je měřena zbylou koncentrací produktů reakce, případně zbývající koncentrací oxidačního činidla. Hodnota chemické spotřeby kyslíku bývá přibližně dvojnásobná než hodnota biochemické spotřeby kyslíku (Švehla et al. 2007).

## 4 Globální stav vody

Voda pokrývá 71 % zemského povrchu. Z více než 95 % se jedná o oceánskou vodu. Pouze 2,5 % tvoří voda sladká a ta je uchovávána v ledovcích, ledových polích a sněhových pláních. Pouze 1 % veškeré sladké vody se nachází v řekách, jezerech nebo potocích. Část této vody je bohužel nějakým způsobem znečištěna (Letcher 2022).

Přestože na mnoha místech světa bylo zaznamenáno mnoho krizí s vodou, lidé v současné době využívají pouze 10 % nebo méně z maximálních dostupných obnovitelných zdrojů sladké vody. Těmto zásobám sladké vody odpovídá zhruba celkový suchozemský odtok. Pokud by se jednalo o pouhých 10 %, nezní to jako příliš velké globální riziko. Problémem ovšem je geografická nerovnováha mezi dostupností vody a poptávkou po ní (Kanae 2009). Poptávka narůstá o 20-30 % ročně, především v důsledku zvýšení počtu obyvatel ze 7 na 8 miliard, a to za pouhých 11 let (Novoa et al. 2023). Rozložení poptávky po vodě se ne vždy shoduje s jejím geografickým rozložením. To znamená, že se na mnoha místech spotřebovává více vody, než kolik jí přirozeně v daném regionu je (Kanae 2009). Vysoká poptávka vody se týká například polosuchých oblastí, kde je voda využívána zejména pro zemědělskou produkci. Tyto oblasti mají přirozeně příznivé klimatické podmínky při dostatku vody, a proto jsou hlavními oblastmi pro pěstování plodin. Lidé z těchto oblastí proto využívají značný podíl svých vodních zdrojů právě k zemědělství (Kanae 2009). Mnoho oblastí s vysokou intenzitou slunečního záření jsou často oblastmi s nedostatkem vody (Ayoun et al. 2022).

Pravdou je, že 70 % celosvětových odběrů vody připadá na zemědělskou výrobu. Problematika nedostatku vody je tedy větším dílem spojena se zemědělstvím a produkcí potravin než s nedostatkem pitné vody, jak se řada lidí domnívá (Kanae 2009). Voda v zemědělství se využívá zejména k zavlažování. Třiadvacet procent zemědělské půdy je na zavlažování závislých, přičemž za posledních 50 let se tato plocha zdvojnásobila. Zavlažované plodiny mohou být v závislosti na konkrétním regionu ekonomicky velmi cenné. Poptávka po vodě se bude zvyšovat ve většině oblastí v důsledku konkurenčních požadavků na ochranu životního prostředí a v důsledku rostoucí lidské populace s rostoucími příjmy, která vyžaduje stále kvalitnější stravu (Booker 2022). Spotřeba vody na zavlažování se pohybuje mezi 900 a 1280 km<sup>3</sup>/rok, což překračuje odhadovanou udržitelnou hranici (Novoa et al. 2023). K rozvoji vodních zdrojů a zmírnění problémů s vodou využívají lidé moderní technologie, které ovšem nejsou dlouhodobě udržitelné (Kanae 2009).

Důležitým faktorem, který nelze opomenout, a který významným způsobem ovlivňuje, a i do budoucna bude ovlivňovat stav vody na planetě, je klimatická změna. Globální riziko menší dostupnosti vody a zvýšeného sucha v důsledku globálního oteplování nelze zcela eliminovat pomocí špičkových technologií, jako je například odsolování mořské vody, které mimo jiné spotřebovává velké množství fosilních paliv. Aby mohla být voda užitečným zdrojem, měla by být především levná. Voda za vyšší cenu, jako je například komerční balená minerální voda, je pro nás užitečná jen k velmi omezeným účelům. Voda je zdrojem pouze tehdy, pokud je k dispozici tam, kde a kdy je potřeba, a to v dostatečném a potřebném množství, za adekvátní cenu (Kanae 2009). Příliš nákladná voda by mohla mít negativní dopad na mnoho zemědělských komunit v rozvojových zemích polopouštních oblastí. Mezi vyspělými a rozvojovými státy je velká propast v možnostech, jak tuto situaci řešit (Vojtěchovská Šrámková et Wanner 2014).

## 4.1 Vliv změn klimatu na hospodaření s vodou

Klimatickou změnu dnes musíme brát v souvislosti s globálním stavem vody v úvahu, protože ať už chceme nebo ne, ovlivňuje procesy na Zemi a do budoucna bude mít zejména na vodu značný dopad. Její vlivy jsou již dnes patrné a netýkají se pouze vody, ale i řady dalších oblastí. Prognózy vývoje na další desetiletí nejsou právě přívětivé. Předpokládá se, že globální oteplování vodní krizi ještě zhorší (Kanae 2009). Základní příčinou je, že globální oteplování zvyšuje teplotu země a oceánů. Na pevnině způsobuje vyšší teplota zvýšený výpar, který může nakonec vyústit v sucho. V oceánech vyšší teplota způsobuje větší množství vodní páry, která jde do atmosféry, což následně způsobuje větší množství srážek. Ty mohou dopadnout jak zpět do oceánu, tak na pevninu. Zvýšená teplota atmosférického vzduchu mění cirkulaci vzduchu, což může mít za následek v některých oblastech přibývání srážek a v jiných větší sucho. (Letcher 2022).

Přestože nelze na veškeré predikce budoucího vývoje spoléhat stoprocentně, klimatické modely se shodují, že globální oteplování povede ke snížení dostupnosti vody v polopouštních oblastech, kde se nacházejí hlavní pěstivelské regiony. Kromě úbytku vody využívané k zemědělství by mohly být v těchto oblastech ohroženy také zásoby pitné vody pro obyvatele. Naopak ve vysokých zeměpisných šířkách a některých vlhkých tropických oblastech se předpokládá nárůst průměrného ročního odtoku řek a dostupnosti vody (Kanae 2009). Změna klimatu ovlivňuje také obsah vody v půdě, která je dostupná pro rostliny, jelikož se jedná o funkci poměru mezi srážkami a evapotranspirací. Evapotranspirace je celkový výpar vody z půdního či vodního povrchu. To znamená, že čím je evapotranspirace vyšší, tím vyšší je obsah vody v půdě (Rustum et al. 2022).

Zásoby vody uložené v ledovcích a sněhové pokrývce budou v průběhu tohoto století klesat. Vzhledem k tomu, že mnoho komunit v polopouštních oblastech je závislých na sněhu a tající vodě z ledovců, je pravděpodobné, že v těchto oblastech bude méně vody a více sucha (Kanae 2009). Pevné ledové pokrývky Země ovlivňují klima mnoha způsoby a jeden z nich je například spojen s bělostí sněhu a ledu. Bílá barva totiž odráží sluneční světlo z barevného spektra nejvíce a pomáhá tak ledovce udržovat. S globálním oteplením část tohoto ledu taje, čímž se snižuje množství odraženého stoupajícího záření a umožňuje tak Slunci tuto roztátou vodu ohřívat, což vede k dalšímu oteplení (Letcher 2022). Tyto hydrologické změny mohou vést k různým druhům krizí (Kanae 2009).

Dle IPCC (2014) může změna klimatu snížit kvalitu surové a pitné vody, vzhledem ke zvyšování teploty na planetě, nárůstu sedimentů, živin a znečišťujících látek během sucha nebo povodní. Voda je činitelem, který má mnoho dopadů na společnost, jako například na energetiku, zemědělství, dopravu. Scénář budoucího vývoje, který předpovídá nedostatek vody, uvádí zvýšené riziko v souvislosti s produkcí a bezpečností potravin, jelikož podle něj bude nutné produkovat do roku 2050 o 50 % více potravin. Předvídá také, že do roku 2050 bude třeba zvýšit používání dusíkatých hnojiv a o 100 % zvýšit objem vody pro zavlažování. Tento scénář by významně ovlivnil vodní režim a dostupnost vody (Novoa et al. 2023).

Navzdory rostoucímu počtu důkazů o tom, že změna klimatu ovlivňuje globální hydrologický cyklus, zůstává při projekci jejích budoucích dopadů v menším geografickém a časovém měřítku mnoho nejistoty. Tato nejistota by ovšem neměla být záminkou k nečinnosti. Měla by sloužit spíše jako podnět k rozšíření výzkumu, k podpoře vývoje praktických

analytických nástrojů a inovativních technologií (UNESCO 2020). Vodní zdroje by proto měly být využívány tak, aby podporovaly blahobyt lidí a integritu ekosystémů (Rustum et al. 2022).

## 4.2 Spotřeba vody společností

Měnící se klima nemusí být hlavní příčinou budoucího nedostatku vody na světě. Předpokládaná změna odběru vody je obecně větší než změna dostupnosti vody. Změna odběru vody je dána především počtem obyvatel a socioekonomickými podmínkami, jako je hospodářský růst (Kanae 2009).

Důležitým faktorem je změna vzorců spotřeby potravin ve spojení s hospodářským růstem. Například množství vody potřebné pro jednotku produkce hovězího masa je přibližně desetkrát větší než množství vody potřebné pro jednotku produkce rostlinné výroby. Kanae (2009) uvádí, že v případě sladkovodních zdrojů, je s výjimkou extrémních událostí změna klimatu zřídka hlavním faktorem, který působí na možnost dlouhodobého a efektivního využívání vody. Negativní vlivy je třeba úplně odstranit či omezit, aby mohla být voda zdrojem i do budoucna.

Jak již bylo zmíněno, zavlažování v zemědělství je největším spotřebitelem sladké vody na Zemi. Zásoby vody se budou snižovat s tím, jak se bude zvyšovat globální teplota a jak se budou nadále spotřebovávat vyčerpatelné zásoby podzemních vod. Očekává se, že celosvětově vzroste potřeba vody pro zemědělství a bude nutné doplnit ji z podzemních vodonosných vrstev. V nejvýznamnějších vodonosných vrstvách, jako jsou například Ogalala v Kalifornii, Severočínská nížina, severozápadní Indie, Pákistán a Tigris-Euphrat, ubývají zásoby podzemních vod a nadměrné využívání by mohlo způsobit, že tyto zásoby budou neudržitelné. K úpravě bude třeba změnit typ plodin a zavlažovací postupy (Booker 2022). Objem spotřebované vody v zemědělství souvisí s bohatstvím, úrovní spotřeby masa, klimatickými podmínkami a efektivitou zemědělství. Víme, že celosvětová spotřeba vody se za posledních 100 let šestkrát zvýšila a pravděpodobně se bude o 1 % každý rok zvyšovat. Pokud by byla tato předpověď přesná, bude to znamenat obrovský tlak na vodní zdroje. Zemědělské znečištění vody je v současné době považováno za nově vznikající a zhoršující se problém znečištění kvůli současným a rostoucím nárokům na potraviny. S rostoucí celosvětovou populací a spotřebou vody bude k uspokojení poptávky zapotřebí více půdy, více vody na zavlažování a větší spotřeba agrochemikálií, krmiv a antibiotik. To vytváří stále větší změny ve struktuře vodních toků, ve kterých se následně zvyšuje koncentrace znečišťujících látek. Intenzifikace rostlinné i živočišné výroby může způsobit, že se tyto problémy stanou neudržitelnými. V příštích desetiletích možná nebudeme schopni produkovat zemědělské produkty stejným způsobem jako v minulosti. Bude nutné zavést nové procesy (Shahady 2022).

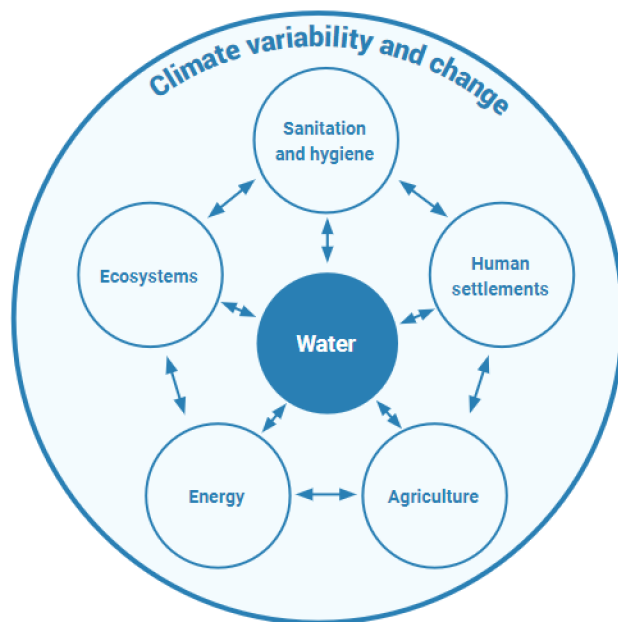
Urbanizace, spolu s nárůstem počtu obyvatel, zlepšováním životní úrovně, industrializací a hospodářským rozvojem, má vliv na množství sladké vody na Zemi a na její kvalitu. Nadále zvyšuje objem komunálních odpadních vod. Odpadní vody, které byly kdysi označovány za odpad a zátěž pro životní prostředí, jsou stále více uznávány a stavěny do pozice cenného zdroje vody, živin, organického uhlíku a organických látek, vzácných kovů a energie. Přestože je uznáváno, že odpadní voda může být cenným zdrojem vody, živin a energie, rozsah plánovaného využití zdrojů z odpadních vod se v jednotlivých zemích a regionech značně odlišuje. V rozvojových zemích jsou mnohem omezenější technologické možnosti, jak



přeměnit odpadní vody na užitečný zdroj. Řada technických, sociálních, politických a ekonomických překážek brání čistírnám odpadních vod v dosažení plného potenciálu využití zdrojů z odpadních vod (Quadir 2022).

Mezi jednotlivými světovými regiony existují rozdíly v produkci odpadních vod na obyvatele. Na prvním místě v produkci odpadních vod na jednoho obyvatele za rok je Severní Amerika (231 m<sup>3</sup>), následuje Evropa (124 m<sup>3</sup>), Blízký východ a severní Afrika (114 m<sup>3</sup>), Oceánie (88 m<sup>3</sup>), Asie (82 m<sup>3</sup>), Latinská Amerika a Karibik (65 m<sup>3</sup>) a subsaharská Afrika (46 m<sup>3</sup>). Celosvětový průměr produkce odpadních vod činí 95 m<sup>3</sup> na obyvatele (Quadir 2022).

Znovuvyužití vody je spolehlivou alternativou ke konvenčním zdrojům vody pro řadu použití za předpokladu, že je upravována nebo používána bezpečně. Odsolování vody může rozšířit zásoby sladké vody, ale je energeticky náročné, a zároveň může přispívat k emisím skleníkových plynů. Většina emisí skleníkových plynů souvisejících s vodním hospodářstvím pochází zejména z biochemických procesů spojených s produkcí pitné a užitkové vody a čištěním odpadních vod. Zvýšení efektivity využívání vody a snížení jejího zbytečného spotřebování se projeví v nižší spotřebě energie, a tím i v nižších emisích skleníkových plynů (IPPC 2014).



Obr. 1: Interakce mezi vodou a dalšími hlavními socioekonomickými sektory ovlivněnými proměnlivostí vody (UNESCO 2020).

### 4.3 Zdroje vody pro lidskou společnost

Více než polovina světové populace žije podél moře na pobřeží, v deltách řek nebo podél řek a jezer (Jahren 2017). V oblastech, kde lidé žijí v okolí mořského či oceánského pobřeží se sladká voda obvykle získává ze sladkovodních zdrojů ve vnitrozemí (Ayoun et al. 2022). Mnoho zemí včetně Austrálie, Číny, Saúdské Arábie, Spojených arabských emirátů, Francie, Kataru a

Spojených států amerických zajišťuje část pitné vod úpravou mořské vody (Adigüzel et al. 2023). Odsolování mořské vody je ovšem kvůli vysokým investičním a energetickým nákladům nejdražší metodou výroby pitné vody v komerčním měřítku (Adigüzel et al. 2023). Mezi odsolovacími technologiemi je nejvýznamnější reverzní osmóza, která v roce 2016 představovala 65 % celosvětově instalované odsolovací kapacity. Pro různé oblasti na světě, ve kterých je větší nedostatek pitné vody, vyšší expozice sluneční energie a bohaté zdroje slané vody, může být tato technologie dostupným řešením výroby pitné vody zejména v období sucha (Ayoub et al. 2022).

Voda je omezený, ale obnovitelný přírodní zdroj, který se mění v čase a prostoru a podléhá nejistotám souvisejícím s klimatem a počasím. Stejně tak se bude měnit množství vody, které prostředí potřebuje k podpoře přírodních ekosystémů, v průběhu ročních období, aby odrazilo preference různých druhů. Proměnlivost dostupnosti vody může být silně tlumena přirozenou akumulací v půdě, respektive v podzemních vodách. Geologické podloží, zejména jeho propustnost a zásoby, výrazně charakterizuje vodní prostředí a možnosti, které jsou k dispozici pro zvládnání dočasných výkyvů mezi dostupnými zásobami a požadavky.

Vodonosné vrstvy představují významný přírodní zdroj vody, který lze využívat prostřednictvím vrtů a studní. Podzemní vody však vyžadují také pečlivé hospodaření, protože jejich odběry budou mít v konečném důsledku dopad na povrchové vody. Pro hospodaření s podzemními vodami je rozhodující rovnováha mezi infiltrací srážek a odtokem do řek, potoků atd.

V mnoha částech světa jsou podzemní vody vystaveny neudržitelným odběrům. Správné hospodaření s podzemními vodami vyžaduje, aby intenzita jejich odběru nepřekračovala intenzitu doplňování jejich zásob srážkami (Bishop et al. 2016).

#### **4.4 Příčiny znečištění vody na Zemi**

Vzhledem k urbanizaci dochází k degradaci podpovrchových vodních toků. Městské obyvatelstvo často sdílí společné vodní zdroje, což vede ke znečištění, které může být zdravotním rizikem. Voda nemusí být bezpečná pro konzumaci ani pro koupání. Znečištění městských vod může být způsobeno odpadními vodami a průmyslovým odpadem, jako jsou tuky, oleje a další chemické látky, včetně těch, které vykazují toxicitu. Tyto vodní útvary často obsahují sedimenty, materiály náročné na kyslík, ropné látky, toxické kovy a patogeny. Kvalitu a množství vody ovlivňují změnou přirozeného toku dešťové vody. Se stále více nepropustnými strukturami, jako např. střechy, parkoviště a betonové ulice, se dešťová voda více znečišťuje a přenáší tyto látky do vodních útvarů. Je budováno stále více chodníků, které ztěžují vsakování vody do půdy, což má za následek snižování hladiny podzemní vody. Proto je nutné minimalizovat znečištění zejména z měst (Priyadarshini et al. 2022).

Stále častějším fenoménem je, že se celosvětově podporuje hospodářský pokrok, který ale zároveň zhoršuje kvalitu vody. Zemědělství je velkou částí zodpovědné za znečištění vody. Znečišťující látky, které zde vznikají, jsou různorodé. Nejrozšířenější a nejproblematictější jsou živiny, jako je fosfor a dusík, sedimenty, pesticidy a mikroorganismy. Pěstitelé, kteří se řídí spíše produktivitou než udržitelností, používají k produkci plodin velmi vysoké koncentrace živin. To ovšem silně znečišťuje okolní vodní útvary. Geneticky modifikované plodiny (GMO) způsobily revoluci v zemědělství. Díky snadné produkci a příslibu vyšších zisků se nyní pěstuje

velká část sóji, kukuřice a bavlny s GMO. Produkce s využitím GMO plodin ovšem produktivitu nezvýšila, jelikož vyžaduje větší používání pesticidů a hnojiv. Větší využívání těchto plodin zhorší znečištění vodních toků. Dalším problémem je bakteriální znečištění, které naznačuje, že zemědělská dílčí povodí mají tendenci být více znečištěna ve srovnání s povodími se smíšenou zástavbou či lesními porosty. Je zřejmé, že zemědělství má vliv na kvalitu vody a je třeba ho zohlednit (Shahady 2022).

Budoucí environmentální výzvy se budou týkat nejen technologií, ale bude třeba také nových politických nástrojů, správních reforem, a především účast veřejnosti (Vannevel 2017).

## **5 Proces čištění odpadních vod**

### **5.1 Čistírna odpadních vod**

Odpadní voda je čištěna souhrnem technologických procesů realizovaných za účelem eliminace znečišťujících látek v čistírně odpadních vod. Hlavním úkolem čistírny odpadních vod a jejího provozovatele je vyčistit odpadní vodu na úroveň čistoty přijatelnou pro její navrácení do životního prostředí nebo pro okamžité opětovné použití. (Drinan et Spellman 2012).

Městská odpadní voda je směs dešťové vody, splaškové vody a v některých případech i průmyslových odpadních vod. Směs těchto vod je do čistírny odpadních vod transportována kanalizací (Švehla et al. 2007). V čistírnách odpadních vod probíhají děje podobné samočisticím procesům, které se odehrávají samovolně v přírodě. Zde je proces uměle podporován, je intenzivnější a rychlejší, než jak by probíhal v přírodě. Každá čistírna odpadních vod je přizpůsobena druhu a množství odpadní vody, kterou je schopna zpracovat. Především jsou důležité vlastnosti znečištěné vody z pohledu volby správných technologií čištění. Mimo čištění odpadních vod se v čistírnách odpadních vod dále může zpracovávat kal, který vzniká při procesu čištění. Velikost čistírny odpadních vod závisí zejména na počtu připojených EO, tedy ekvivalentních obyvatel (Pecháček 2019). Tento parametr se využívá k popisu množství znečištění, které bude do ČOV přicházet (Švehla et al. 2007). V čistírnách městských odpadních vod jsou zpravidla čištěny největší objemy odpadních vod (Pecháček 2019). Města nejčastěji mají zavedené centralizované odvádění odpadních vod kanalizací do jedné společné čistírny. Samotná kanalizace může být buď jednotná nebo oddílná, přičemž jednotná kanalizace odvádí jedním potrubím jak splaškové, tak dešťové vody a oddílná má dva potrubní systémy, jeden pro vody splaškové a jeden pro vody dešťové (Adámek et al. 2010).

Samotný proces čištění odpadních vod má tři až čtyři hlavní stupně, přičemž některé z těchto stupňů nemusí být zařazeny na každé ČOV (Pecháček 2019). Těmito stupni jsou mechanické předčištění, mechanické (primární) čištění, biologické (sekundární) čištění a terciární čištění odpadních vod (Drinan et Spellman 2012).

### **5.2 Mechanické předčištění čištění odpadních vod**

První stupeň čištění odpadních vod neboli mechanické předčištění zachycuje unášený materiál a suspendované látky (Adámek et al. 2010; Drinan et Spellman 2012). Slouží především k odstranění nerozpuštěných látek, kterých se v odpadních vodách vyskytuje mnoho.

V ČOV je mechanické předčištění vždy první fází (Pecháček 2019). Odpadní voda přechází přes lapáky šterku a písku, česle, popřípadě jsou někdy zařazovány lapače tuků a olejů (Adámek et al. 2010; Drinan et Spellman 2012).

Přitékající odpadní voda prochází nejprve přes lapák šterku, což je jímka, která se nachází těsně před čistírnou na přivaděči odpadních vod. Lapák šterku zachycuje velké a těžké předměty, které se do vody mohou dostat např. přívalovým deštěm. Tím chrání další zařízení ČOV před poškozením (Drinan et Spellman 2012; Pecháček 2019). Dalším zařízením, které zachycuje hrubé nečistoty jsou česle. Jedná se o mříž tvořenou rámem a pruty, která je skloněna ve směru toku odpadní vody. Nečistoty z česlí stírají shrabovány, které zachycené nečistoty vytahují směrem vzhůru. Zde přepadávají do žlabu, kde se po odkapání likvidují. Česle zachycují hadry, plast, papír, zbytky ovoce a zeleniny, trávu, listí, nerozpadlé fekálie a další odpad. Vzhledem k jejich obsahu jsou tyto nečistoty hygienicky rizikové, jelikož mohou obsahovat patogenní mikroorganismy (Pecháček 2019). Po česlích jsou zařazeny lapáky písku, které zachycují písek a další nerozpuštěné minerální látky o větší hustotě (Janosova et al. 2006; Adámek et al. 2010). Takto předčištěná odpadní voda dále pokračuje do mechanického (primárního) stupně čištění.

### **5.3 Mechanické (primární) čištění odpadních vod**

Po mechanickém předčištění odpadní voda pokračuje do stupně vlastního mechanického čištění. V tomto stupni jsou odstraněny usaditelné nerozpuštěné látky, které sedimentují v usazovacích nádrži (Adámek et al. 2010; Drinan et Spellman 2012). Podstatná část organického materiálu je odstraněna usazením (Adámek et al. 2010). Oddělené znečištění, vzniklý sediment na dně usazovacích nádrží, se nazývá primární kal. Ten se u velkých čistíren dále zpracovává a využívá se pro výrobu bioplynu (Drinan et Spellman 2012; Pecháček 2019). Po mechanickém čištění, kdy je odpadní voda zbavena hrubých nečistot a většiny usaditelných látek, pokračuje do dalšího, biologického stupně čištění.

### **5.4 Sekundární (biologické) čištění odpadních vod**

Druhý, biologický stupeň čištění odpadních vod je založen na biochemické aktivitě heterotrofních organismů, zejména bakterií. Účelem tohoto stupně čištění je rozklad a mineralizace organických látek (Adámek a kol. 2010; Drinan et Spellman 2012).

Biologické čištění odpadních vod může probíhat dvěma odlišnými procesy. Technicky se liší, ale oba z nich jsou založené na růstu a aktivitě biologických společenstev. Jedním z nich jsou biofilmové procesy, založené za růstu a aktivitě organismů v přisedlé složce. Druhým je tzv. proces aktivace, který je založen na růstu a aktivitě organismů v suspendované polykultuře (Adámek et al. 2010; Drinan et Spellman 2012).

Tento stupeň čištění probíhá zpravidla v aerobních podmínkách. Nastává při něm postupný rozklad a mineralizace organických látek. Větší ČOV by při tomto čištění měly také odstranit sloučeniny dusíku, někdy také fosforu. Biologické čištění je složeno z biologického reaktoru, nejčastěji se jedná o tzv. aktivační nádrž, a ze separační jednotky, jíž je tzv. dosazovací nádrž. Oba tyto prvky jsou součástí většiny mechanicko-biologických ČOV (Janosova et al. 2006; Švehla et al. 2007).

Odpadní voda přitéká do aktivační nádrže, kde celý proces probíhá. V aktivační nádrži jsou kultury mikroorganismů a současně je do nich pomocí tzv. aerátorů vháněn tlakový vzduch dodávaný z dmychadel, který obsahuje kyslík. Ten je zásadní k biochemické oxidaci organických látek a jejich mineralizaci (Pecháček 2019). Odstraňují se zejména biologicky rozložitelné organické látky, také sloučeniny dusíku, popřípadě fosforu oxidačními a syntézními procesy (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012). Biomasa, která vzniká syntézou, je separována v dosazovací nádrži, kde se odděluje a zahušťuje kal. Část zahuštěného kalu se vrací zpět do aktivační nádrže ve formě tzv. vratného aktivovaného kalu (Drinan et Spellman 2012; Pecháček 2019). Přebytečný kal nebo také sekundární kal, je veden do linky a dále zpracováván spolu s primárním kalem v kalovém hospodářství ČOV (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012).

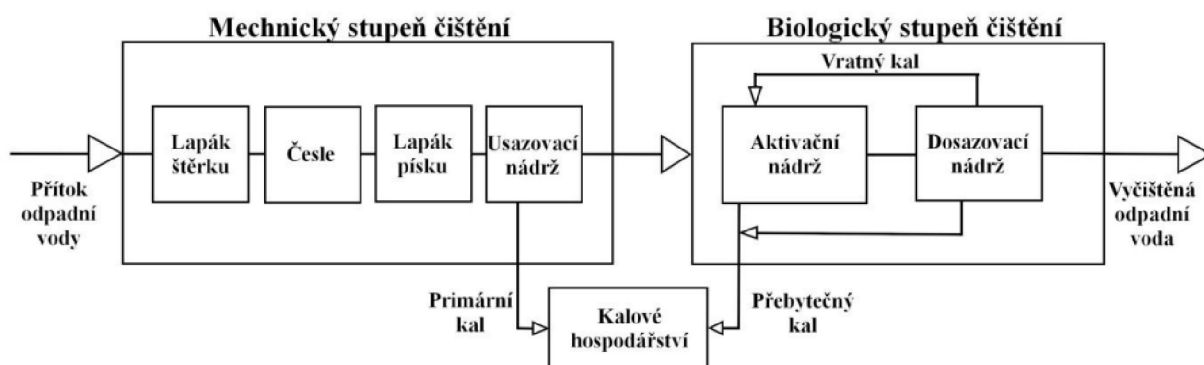
Ke snížení koncentrace anorganického dusíku v odpadní vodě lze využít biochemickou oxidaci amoniakálního dusíku na dusitany a dusičnany neboli nitrifikace, na kterou navazuje biochemická redukce (denitrifikace) na plynný dusík. Plynný dusík je uvolněn z vodního prostředí a uniká do atmosféry (Adámek et al. 2010; Drinan et Spellman 2012).

K odstranění fosforečnanů z odpadních vod se využívají chemické, biologické nebo kombinované postupy (Adámek et al. 2010). Častým způsobem je využívání fyzikálně-chemických postupů, formou srážení. Fosforečnany lze z odpadní vody vysrážet např. přidávkem železitých, železnatých, hlinitých, horečnatých solí nebo vápna. Během procesu srážení se fosforečnany vysráží do formy, ve které je možné je separovat sedimentací nebo filtrací. Tento postup srážení lze aplikovat v primárním či sekundárním stupni čištění nebo jako samostatné terciární čištění. To záleží na konkrétním technologickém postupu dané ČOV (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012). Druhou možností je využití biologické metody, která je výhodnější v tom, že není třeba využívat chemikálie. Biologická metoda využívá mikroorganismy aktivovaného kalu, tzv. PP bakterie, které dokážou fosfor za určitých podmínek akumulovat ve formě polyfosforečnanů. Polyfosforečnany jsou následně odstraněny z odpadní vody společně s přebytečným aktivovaným kalem (Švehla et al. 2007).

Pokud není zařazeno terciární čištění odpadních vod, je vyčištěná odpadní voda z dosazovací nádrže vedena zpět do recipientu (Drinan et Spellman 2012; Pecháček 2019).

## 5.5 Terciární čištění odpadních vod

Terciární stupeň čištění slouží zpravidla k odstranění minerálních nutrientů, především kvůli možné eutrofizaci vody. Může zde ještě pokračovat fyzikálně-chemické nebo biologické snižování obsahu fosforu, případně dusíku. Hlavní podíl těchto látek by ovšem měl být odstraněn již během biologického čištění. Kromě toho může být terciárním čištěním také biologická dočišťovací nádrž nebo dezinfekce odtoku z ČOV, např. UV zářením nebo chlorací. Dočištěním dochází také k odstranění mikroorganismů (Adámek et al. 2010; Drinan et Spellman 2012). Nejčastější metody dočištění jsou chlorace, biologické dočišťování ve stabilizačních nádržích, filtrace a srážení (Švehla et al. 2007; Drinan et Spellman 2012).



Obr. 2: Blokové schéma ČOV (Zidek 2017).

## 6 Formy využití vyčištěné odpadní vody

Hlavními faktory způsobujícími zvyšující se objem produkce odpadních vod jsou nárůst počtu obyvatel, urbanizace, zlepšování životních podmínek a hospodářský rozvoj. Rostoucí trendy v oblasti produkce odpadních vod by měly být signálem pro společnost a zároveň možností ukázat perspektivu řešení nedostatku vody v suchých a polosuchých oblastech a komunitách prostřednictvím účinného nakládání, čištění a dalšího využívání odpadních vod. Mohou mít totiž mnohostranné využití (Quadir 2022). Základním předpokladem k tomu, aby odpadní vody mohly být dále využívány, je odpovídající stupeň čištění a splnění požadavků na kvalitu vyčištěné vody pro daný způsob jejího opětovného použití (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008).

### 6.1 Závlahy v zemědělství

Přibližně ve 44 zemích světa je v současné době znovu využíváno až 15 milionů m<sup>3</sup> vyčištěné odpadní vody pro zavlažování plodin (Hashem et Xuebin 2021). Provádí se v zemích jako je Francie, Itálie, Španělsko, Kypr, Malta, Izrael, Jordánsko nebo USA. Tyto země se řídí doporučeními stanovenými Světovou zdravotnickou organizací (WHO) a americkou Agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA), které tvoří základ většiny právních pokynů stanovených v legislativních předpisech zaměřených na odpadní vody. Dodržování těchto právních rámců vyžaduje analýzu vyčištěné odpadní vody před jejím opětovným použitím (Becerra-Castro 2015).

Navzdory přínosům, jako je snížení využívání přírodní vody k zavlažování a úbytek vypouštěných odpadních vod do sladkovodních ekosystémů, zahrnuje využívání odpadních vod také zdravotní a environmentální rizika (Becerra-Castro 2015). Rozsah rizik a dopadů závisí na kvalitě vyčištěné odpadní vody a dalších vnějších faktorech. Kvalita odpadních vod je charakterizována fyzikálně-chemickým a mikrobiálním složením. Rozsah dopadu je určován chemickým složením odpadních vod, koncentrací, rozpustností a toxicitou přítomných látek.

Dalšími faktory jsou míra a četnost zavlažování, vlastnosti půdy a klimatické podmínky (Ofori et al. 2021).

### 6.1.1 Vliv vyčištěné odpadní vody na půdu

Odpadní voda obsahuje řadu nutrientů, jako je dusík, fosfor, draslík, zinek, železo, mangan a měď. Zavlažováním odpadními vodami se tyto živiny dodávají do půdy a několik studií uvádí zvýšení obsahu makroživin a mikroživin v půdě po využití odpadních vod (Ofori et al. 2021). Zejména kvůli těmto živinám bylo prokázáno, že zavlažování odpadní vodou výrazně navyšuje výnosy plodin, jako je citron, růžové keře, a také její pozitivní vliv na kvalitu oleje získaného z plodin slunečnice a ricinovníku (Becerra-Castro 2015). Kromě toho, že je odpadní voda zdrojem dusíku, obsahuje také mikroorganismy, které jsou schopné sloučeniny dusíku přeměňovat. Tím zvyšují rychlost mineralizace dusíku v půdě, a následně i příjem dusíku plodinami (Ofori et al. 2021). Dle Ofori et al. (2021) bylo pozorováno zlepšení v oblasti obsahu živin v půdě po šestiletém zavlažování. Je zde uveden nárůst obsahu dusičnanů i draslíku. V dalších studiích se uvádí významné zlepšení úrovně půdní úrodnosti, pokud jde o dusík, fosfor, draslík a mikroživiny odpadních vod. Navýšení množství fosforu dostupného rostlinám lze považovat za nepřímý mechanismus recyklace fosforu v půdě (Ofori et al. 2021). Jak dusík, tak fosfor mohou mít vliv na půdní mikrobiální společenstva, zejména na aktivitu spojenou s koloběhem těchto prvků (Becerra-Castro 2015).

Vzhledem k celosvětové poptávce po živinách v hnojivech by mohla odpadní voda být velkým pomocníkem, jelikož tyto živiny mimo jiné podporují růst rostlin. Odhady ukazují, že dusík v odpadních vodách by mohl kompenzovat přibližně 15 % celosvětové poptávky po dusíku jako živiny v hnojivech. Pro srovnání, fosfor může doplnit 7 % a draslík 19 % z celkové spotřeby hnojiv (Quadir 2022). Přidávání živin do půdy prostřednictvím zavlažování vyčištěnými odpadními vodami proto významně přispívá k udržitelnosti zemědělství tím, že zpřístupňuje základní živiny pro absorpci rostlinami. I přesto, že je obecně dodávání živin pro růst rostlin prospěšné, může v případě nadměrného přísunu dojít i k toxicitě pro rostliny (Ofori et al. 2021). Mohou být rovněž vyplavovány do povrchových a podzemních vod a způsobit eutrofizaci nebo toxicitu v jiných biotopech (Becerra-Castro 2015).

Organická hmota v půdě je jednou z nejvíce ovlivňovaných při zavlažování odpadní vodou, jak naznačují různé studie. Zavlažováním narůstá množství celkového obsahu organického uhlíku a dusíku. Půdní organická hmota má zásadní význam jako zásobárna živin a pro strukturu půdy. Obsah organické hmoty přispívá ke schopnosti půdy zadržovat vodu, ovlivňuje drenážní vlastnosti a odolnost vůči zhutnění. Má tedy podstatný vliv na úrodnost půdy. Účinky zavlažování odpadní vodou však mohou záviset na koncentraci, složení organické hmoty a struktuře půdy. Zatímco v hlinitopísčitých půdách vedlo zavlažování odpadní vodou ke zvýšení půdní stability, v písčitohlinitých a jílovitých půdách vedlo k jejímu snížení. Složitost důsledků zavlažování odpadními vodami omezuje stanovení možných vztahů mezi příčinami a následky. Ačkoli většina studií uvádí zvýšení obsahu organické hmoty, některé nezjistily významné změny, ale přesto uvádějí změny mikrobiologických a biochemických parametrů (Becerra-Castro 2015).

Rovněž aplikace kalů z čištění odpadních vod na zemědělskou půdu je způsob hospodaření považovaný za používání půdního kondicionéru, který zlepšuje fyzikální,

chemické a biologické vlastnosti půdy. Přesto přetrvávají obavy z této metody kvůli přítomnosti patogenů, možné eutrofizace z nadměrného množství fosforu či nesprávného obhospodařování půdy (Shahady 2022).

V pobřežních a oblastech se zdroji slané vody lze při zavlažování odpadními vodami minimalizovat zasolování podzemních vod, které nastává v důsledku vnikání mořské vody v důsledku nadměrného čerpání podzemních vod (Ofori et al. 2021).

Výhodou, kterou je také třeba zmínit, je ekonomická stránka. V regionu Tiznit v Mexiku se díky opětovnému využití vyčištěné odpadní vody k zavlažování plodin výrazně zvýšil příjem a životní úroveň zemědělců. Zemědělci ušetřili za chemická hnojiva a zároveň zaznamenali zvýšený výnos plodin díky hnojivým účinkům odpadní vody. Zavlažování odpadní vodou může snížit spotřebu chemických hnojiv o 45 % u pšenice a o 94 % u vojtěšky. Ofori et al. (2021) uvádí, že potenciální úspory při zavlažování odpadní vodou u pěstování rajčat činí 280 eur/ha. Přestože se jedná o ekonomické zhodnocení v určité lokalitě, jejich replikace se v místech s podobnými charakteristikami může podobat (Ofori et al. 2021).

Rostlinná výroba vyžaduje nepřetržitý přísun vody, aby se zabránilo vodnímu stresu, který by mohl vést k nižším sklizňovým výnosům. Vzhledem k tomu, že produkce odpadní vody je nezávislá na klimatu, na rozdíl od srážek, zemědělci tak mohou mít nepřetržitý přístup k vodě pro zavlažování plodin i v období sucha. Mají tak možnost udržovat optimální vlhkost půdy a dosahovat stabilních a vyšších výnosů plodin bez ohledu na roční období. To může vést k vyšším ekonomickým přínosům pro zemědělce (Ofori et al. 2021).

### **6.1.2 Nevýhody a rizika**

Znečišťující látky, které mohou v určitém množství zůstat v odpadních vodách i po procesu čištění, mohou negativně ovlivňovat životní prostředí a zdraví lidí, kumulovat se v rostlinách a dostávat se tak do potravního řetězce (Hashem et Xuebin 2021). Zároveň se mohou dostat do vodních útvarů (potoků, jezer, podzemních vod atd.) a negativně tak působit na vodní ekosystém, zejména na vodní organismy, včetně ryb, a to kvůli účinku některých kontaminantů na endokrinní systém (Ofori et al. 2021). Tato rizika jsou považována za hlavní nevýhody opětovného využívání odpadních vod (Hashem et Xuebin 2021).

Salinita odpadních vod je obvykle 1,5 - 2krát vyšší než u sladké vody. Toto množství by mohlo vyvolat zvýšení salinity půdy, obsahu sodíku v půdě a způsobit strukturní změny, což by mohlo vést ke snížení výnosů (Hashem et Xuebin 2021). Soli mohou být transportovány až do podzemních vod, zejména v případě vodonosných vrstev a omezit tak využívání podzemních vod k domácím či zemědělským účelům (Ofori et al. 2021). Hashem et Xuebin (2021) považují zasolení a narůstání obsahu sodíku v půdách v suchých oblastech za hlavní ekologické hrozby, k nimž může dojít při využívání vyčištěné odpadní vody na zavlažování. Dle tohoto parametru je pro hospodaření na zemědělské půdě nutné určit strukturu plodin a zvážit výběr plodin tolerantních k zasolení, výběr zavlažovacího systému, plán zavlažování, vyplavování, instalaci odvodňovacích zařízení, dostatečnou hloubku podzemní vody a vyrovnání půdy (Hashem et Xuebin 2021).

Rizikové prvky, například arsen, měď, kadmium, nikl, molybden, chrom, zinek, a olovo se účinně odstraňují správnými procesy úprav odpadních vod. Nicméně určitý podíl může zůstat



i ve vyčištěných odpadních vodách, zejména pokud jsou zdrojem průmyslové odpadní vody nebo směs průmyslových a komunálních odpadních vod a kumulovat se v půdě. Vstup těchto kovů by měl být brán v úvahu při dlouhodobém používání této vody. Významná koncentrace těžkých kovů byla zaznamenána ve svrchních vrstvách půdy, která byla zavlažována vyčištěnou odpadní vodou po dobu 20 let. Například v Pekingu byla koncentrace některých těžkých kovů v odpadních vodách srovnatelná s koncentrací v podzemní vodě, s výjimkou zinku. Těžké kovy mohou ovlivňovat metabolismus rostlin, fotosyntézu a růst rostlin (Hashem et Xuebin 2021). Zároveň při konzumaci takto kontaminovaných plodin, se mohou těžké kovy hromadit v lidském těle, kde mohou způsobit řadu problémů (Ofori et al. 2021). Koncentrace těchto kovů v odpadní vodě lze snížit ředěním přírodní vodou (Hashem et Xuebin 2021).

Suspendované látky v odpadní vodě mohou ucpat půdní póry, snížit její infiltraci a zvýšit odtok. Během zavlažování se pevné látky usazují v půdních pórech a časem zmenšují mikropóry i mezipóry půdy. Tím by se snížila pórovitost půdy, včetně rychlosti infiltrace a zvýšil by se odtok (Ofori et al. 2021).

Kromě technologie čištění odpadních vod je možné negativní účinky odpadní vody snížit například efektivním řízením zavlažování. Pro efektivní řízení zavlažování odpadní vodou jsou hlavními prvky, které jsou třeba sledovat nerozpuštěné látky, které by zejména u systému mikro-zavlažování musely být z vody filtrovány, dále obsažené živiny kvůli hnojení, míra zasolení k odhadu podílu vyluhování a volbě správného osevniho postupu a obsažené patogeny pro výběr vhodného zavlažovacího systému. Pro odpadní vodu s vyšším obsahem rozpuštěné soli se doporučují kapkové závlahy nebo mini postřikovače s nízkou výtokovou rychlostí a dostatečnou dobou, protože se tím snižuje půdní krusta, což umožňuje vodě prosakovat do půdy. Podpovrchová kapková závlaha je nejvhodnější technikou zavlažování při používání vyčištěné odpadní vody. Ukázalo se, že je účinná při snižování počtu patogenů v závlahové vodě a omezuje jejich přítomnost na povrchu půdy. Kromě toho snižuje kontaminaci úrody a zmírňuje rizika pro lidské zdraví tím, že omezuje fyzický kontakt odpadní vody jak s půdou a rostlinami, tak se zemědělci (Hashem et Xuebin 2021).

### **6.1.3 Metody dočištění odpadní vody pro závlahy**

Přestože řada studií naznačuje menší zdravotní rizika při používání sekundárně vyčištěných odpadních vod, veřejnost to vnímá nepříznivě. Pro většinu veřejnosti skutečnost, že odpadní voda může obsahovat značné množství patogenů a těžkých kovů znamená, že není bezpečná pro zavlažování. Důkladné vyčištění odpadních vod vyžaduje zařazení pokročilých procesů čištění, jako jsou membránové procesy (mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace) a dezinfekce ultrafialovým zářením, aby se získala vysoce kvalitní závlahová voda z hlediska mikrobiálního zatížení a obsahu těžkých kovů (Ofori et al. 2021).

Z tohoto důvodu se velká pozornost klade na různé způsoby a technologie čištění odpadních vod k odstraňování nových skupin látek. Použití technologií založených na sedimentaci, filtraci nebo dezinfekčních procesech za použití oxidu chloričitého, UV záření, ozonu nebo oxidu titaničitého se zdají být pro čištění odpadních vod k účelu zavlažování adekvátní, v závislosti na kvalitě surových odpadních vod a požadavcích na jejich použití (Becerra-Castro 2015). Začlenění těchto pokročilých procesů, zejména nanofiltrace, nejenže

minimalizuje problémy s dopadem na životní prostředí vyplývající z vysokého obsahu živin a solí, ale také obavy o veřejné zdraví kvůli patogenům a těžkým kovům. Takto vyčištěná odpadní voda má vysokou kvalitu a bude moci podporovat růst rostlin bez vyššího rizika pro zdraví, půdu, vodní zdroje a rostliny (Ofori et al. 2021).

Zlepšení kvality vyčištěné odpadní vody pomocí dezinfekce musí být nedílnou součástí každého systému zavlažování odpadní vodou. Dezinfekce zlepšuje kvalitu vody tím, že ničí patogenní organismy, které by mohly ohrozit veřejné zdraví. Použití UV dezinfekce se upřednostňuje před jinými formami dezinfekce. UV záření je velmi účinné při ničení většiny patogenních mikroorganismů a nezanechává v ošetřené vodě vedlejší produkty ani rezidua. Kombinace UV dezinfekce a membránové technologie by mohla produkovat vyčištěnou odpadní vodu kvality odpovídající přírodní vodě. To by mohlo snížit nebo zcela odstranit environmentální a zdravotní rizika, což by mohlo zvýšit důvěru veřejnosti v zavlažování odpadními vodami, a tím podpořit jeho celosvětové přijetí (Ofori et al. 2021).

Pokud jde o odstraňování mikroorganismů, systémy membránových bioreaktorů vykazují vysokou účinnost a splňují i další důležité cíle, jako je odstraňování těžkých kovů z odpadních vod. Další procesy, jako jsou vybudované mokřady, rybníky a dezinfekční oxidanty mohou rovněž nabízet výhodnou míru odstranění mikroorganismů, ačkoli nemusí být tak účinné pro dosažení odpovídající úrovně jiných parametrů, zejména salinity. Výběr nejvhodnějších metod čištění odpadních vod musí představovat kompromis mezi efektivními ekonomickými náklady a produkcí vody odpovídající kvality pro zavlažování. V současné době by měla kritéria kvality zahrnovat také eliminaci nových kontaminantů, jako jsou léčiva nebo bakterie rezistentní vůči antibiotikům. Vzhledem k tomu, že nelze ignorovat náklady na realizaci a údržbu těchto technologií čištění odpadních vod a jejich potenciální dopady na životní prostředí, může v tomto ohledu být obtížné dosáhnout ideálního kompromisu (Becerra-Castro 2015).

Hlavním problémem při zavádění těchto způsobů čištění odpadních vod jsou relativně vysoké náklady na tyto systémy. Zavlažování odpadní vodou přináší další náklady jak provozovatelům ČOV, tak zemědělcům. Dodatečné investiční náklady vznikají v souvislosti s dočištěním odpadních vod, aby tyto vody splňovaly požadavky na opětovné použití, náklady na dopravu a skladování. V případech, kdy zemědělci nemají přímý přístup k vyčištěné odpadní vodě z ČOV, je nutná infrastruktura pro přepravu a skladování odpadních vod. Bohužel stávající rozvody pitné vody nelze k dopravě odpadní vody k zemědělcům využít, a proto by bylo nutné vybudovat nové rozvody. Zajištění této investičně náročné infrastruktury může zatížit jak zemědělce, tak provozovatele ČOV, pokud nebude k dispozici odpovídající finanční podpora. Bez náležité finanční podpory budou mít provozovatelé problém porýt tyto dodatečné náklady a zemědělci se na druhé straně budou muset vypořádat s vyššími náklady na vodu k zavlažování, což by mohlo negativně ovlivnit jejich příjmy (Ofori et al. 2021).

#### **6.1.4 Zavlažování vyčištěnou odpadní vodou v různých zemích**

Zavlažování vyčištěnou odpadní vodou je rozšířeno nejen v zemích, které mají dostatek vody, ale také v těch, kde je vody nedostatek, jako jsou země Středomoří, Blízkého východu a Latinské Ameriky. Jsou to také některé země, které mají nízkou spotřebu vody, mírnější podnebí a dostatečné zásoby vody, jako je Japonsko, Austrálie, Kanada, severní Čína, Belgie,

Anglie a Německo. Způsob a rozsah jejich využití se však liší v závislosti na infrastruktuře a místních socioekonomických podmínkách, které v dané zemi převládají (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008). Každá evropská země má svůj vlastní vodohospodářský systém, který se skládá ze státních vodohospodářských úřadů a místních úřadů. Ministerstva životního prostředí, zemědělství a zdravotnictví jsou hlavními státními útvary, které vydávají vodohospodářské zákony a právní předpisy týkající se vody (Janosova et al. 2006). V Evropě bylo nedávno schváleno nové nařízení o minimálních požadavcích na opětovné využívání odpadních vod v zemědělství, které vstoupí v platnost v červnu 2023 (Van de Walle et al. 2023). Některé země, např. USA, Španělsko, Jordánsko mají stanoveny různé prahové hodnoty fyzikálně-chemických a mikrobiologických parametrů v závislosti na typu zavlažovaných plodin. U potravinářských plodin určených k přímé spotřebě jsou doporučené hodnoty obecně přísnější než pro ostatní plodiny, které se dále zpracovávají nebo používají k pastvě či jako energetické plodiny pro výrobu obnovitelné bioenergie. Na druhé straně země jako Itálie či Izrael nemají definované kategorie pro zavlažování, a proto by měly splňovat stanovené prahové hodnoty bez ohledu na účel použití zavlažovaných plodin (Becerra-Castro 2015). V Pákistánu se téměř 26 % zeleniny pěstuje za využití odpadních vod. V Ghaně je asi 11 500 ha zemědělské půdy zavlažováno zředěnou odpadní vodou. Indie využívá k zavlažování plodin přibližně 2 600 m<sup>3</sup> odpadní vody za rok. Ve městě Dillí v Indii byla provedena případová studie o využití odpadních vod pro zavlažování zemědělské půdy. Zaznamenali 38-79 % nárůst obsahu organického uhlíku v půdách zavlažovaných odpadními vodami ve srovnání s půdou zavlažovanou vodou ze studní (Kundu et al. 2022).

V Řecku ve městě Agrinio byla použita upravená městská odpadní voda pro pěstování brokolice a růžičkové kapusty. Použití vyčištěné odpadní vody zvýšilo koncentraci některých těžkých kovů jako nikl a olovo v jedlých částech brokolice a obsah kadmia, kobaltu a niklu v jedlých částech růžičkové kapusty. Vyšší koncentrace těžkých kovů v jedlých částech rostlin mohou představovat potenciální zdravotní rizika pro konzumenty (Kundu et al. 2022).

Francouzský ostrov Korsika je oblastí, která není bohatá na vodní zdroje. Ve městě Sperone je zaveden již od roku 1992 projekt, který je zaměřen na nahrazení zdroje pro zavlažování. Tamní ČOV má technologii založenou na kumulaci regenerované vody v laguně, po které následuje písková filtrace odpadní vody. Projekt s názvem Pornic byl zaveden také kvůli ochraně tamní specifické fauny a flory, kvůli které je potřeba chránit mořskou vodu před znečištěním. Je zde recyklováno 100 000 m<sup>3</sup> odpadní vody za rok, což je 10 % z celkového objemu produkované odpadní vody. Tato technologie napomohla snížení vodního stresu, spotřeby přírodní vody, a rovněž k ochraně mořské vody před znečištěním (Vojtěchovská Šrámková et Wanner 2014).

Portugalsko začalo využívat komunální odpadní vody ze sekundárního čištění odpadních vod k zavlažování zemědělských polí. Velká ČOV poblíž Lisabonu plánuje v dalších letech zavlažovat 1 000 ha půdy terciárně vyčištěnou odpadní vodou. V Portugalsku bylo provedeno mnoho rešerší a studií, které dospěly k závěru, že zatímco zavlažování odpadní vodou je vhodné pro dobře odvodněné půdy, jako jsou například hlinité půdy a pro plodiny snášenlivé k alkalickému prostředí, není vhodné pro citlivé půdy (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008).

V Itálii je celkový objem komunálních odpadních vod přibližně 2 400 milionů m<sup>3</sup> za rok. Využívání vyčištěné odpadní vody k zavlažování zemědělských i lesních plodin je v Itálii široce rozšířenou praxí. V regionu Emilia Romagna se více než 450 000 m<sup>3</sup>/rok vyčištěných

odpadních vod používá k zavlažování více než 250 ha půdy. Zavlažování odpadními vodami bylo uskutečněno v oblasti lesních porostů, Pistoia ve střední Itálii. Bylo vysazeno celkem 600 kusů sazenic a zavlažování bylo prováděno vodou z vrtaných studní a komunální odpadní vodou. Výsledky ukázaly, že komunální odpadní vodu lze při zavlažování lesních plantáží používat bez jakýchkoli omezení. Ukázaly se jako důležitý zdroj živin pro rostliny, jako jsou jalovce (*Juniperus*), myrty (*Myrtus*), a kaliny (*Cupressus*). V mnoha částech Itálie, zejména na jihu, je obtížnější situace s vodou, kde by tento způsob mohl být efektivním řešením (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008).

Maroko je suchá, polopouštní země, kde se 58 % odpadních vod vypouští do moře a 42 % do řek. Podíl vyčištěných odpadních vod na národní vodní bilanci nepřekračuje ani 4 %. Určité množství je zde využíváno k zavlažování golfových hřišť a v zemědělství, ale nikoli při pěstování lesních rostlin (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008).

Zavlažování komunálními odpadními vodami je v Egyptě známé a praktikované od roku 1900. Dnes se rozloha zavlažované plochy blíží 4500 ha. Egypt však bohužel nemá vypracované normy pro využívání odpadních vod, což způsobilo mnoho zdravotních problémů občanům (Kalavrouziotis et Arslan-Alaton 2008).

V rozvojových zemích je většina odpadních vod vypouštěna do potoků, příkopů nebo propustků s malým nebo žádným čištěním. Mnoho zemědělců odvádí z těchto zdrojů vodu na zavlažování a využívá tak odpadní vodu k produkci plodin určených k prodeji na místních trzích. Je nezbytné zvážit důsledky používání odpadních vod k zavlažování pro veřejné zdraví a životní prostředí v těchto podmínkách (Quadir 2022).

V České republice není využívání vyčištěné odpadní vody běžnou praxí, ačkoli technologie dostatečného čištění odpadních vod jsou zde k dispozici. Dosud jsou odpadní vody z ČOV vypouštěny do vod recipientů, obvykle do řek nebo potoků v blízkosti čistírny, přičemž se uplatňují pouze dodatečná měření na zlepšení kvality odpadních vod, pokud je odpadní voda vypouštěna v chráněných nebo jiných citlivých oblastech. V současné době neexistuje žádná legislativní úprava, která by umožňovala opětovné využití vyčištěných odpadních vod k jakémukoli účelu, a proto tato možnost zatím nefunguje v praxi (Vojtěchovská Šrámková et al. 2018).

Pilotní zařízení terciárního čištění odpadních vod bylo instalováno v ČOV Milevsko v Jihočeském kraji, kde byly testovány tři způsoby úpravy odpadních vod (separace po koagulaci pomocí tlakové flotace rozpuštěným vzduchem, písková filtrace, filtrace Filtralite®). Všechny tyto způsoby používaly jako přítok odpadní vodu po sekundárním čištění. Nakonec prošla odpadní voda UV dezinfekcí. Výsledky z této studie ukázaly, že ani po UV dezinfekci nebylo dosaženo požadovaných hodnot zákalu pro zavlažování u žádného z procesů. Na druhou stranu se podařilo dosáhnout požadované hodnoty pH a obsahu železa ve vodě. Dále byly splněny přípustné úrovně všech mikrobiologických parametrů u všech typů úpravy ve spojení s UV dezinfekcí. Požadavky na vodu do průmyslových chladicích systémů, byly dosaženy ve všech procesech. Dle Vojtěchovské Šrámkové et al. (2018), by náklady na opětovné využití odpadních vod pro zavlažování představovaly pouhou desetinu současných nákladů na distribuci vody. Dezinfekce UV zářením zlepšila kvalitu odpadní vody a po úpravě vedoucí ke snížení zákalu, například membránovou filtrací, by odpadní voda mohla splňovat i požadavky na zavlažování.

Chybějící právní předpis, který by umožňoval a reguloval opětovné využívání vyčištěných odpadních vod, brání možnosti je adekvátním způsobem využívat. Tato možnost je v současné době potřebou jak v České republice, tak i v dalších zemích, kde zatím není realitou (Vojtěchovská Šrámková et al. 2018).

### **6.1.5 Shrnutí**

Možnost zavlažování vyčištěnými odpadními vodami je velmi významná pro řešení potřeby vody v zemědělství a zmírnění zátěže sladkovodních zdrojů. V mnoha regionech s nedostatkem vody podporuje vyčištěná odpadní voda již mnoho let zemědělské zavlažování (Ofori et al. 2021). Rozšíření se očekává, protože objem odpadních vod se zvyšuje a nabízí příležitost pro jejich bezpečné a produktivní využití právě v zemědělství (Quadir 2022). Zároveň je třeba zohlednit všechna rizika spojená s užíváním vyčištěné odpadní vody, jako jsou například rizika biologických kontaminantů, jako jsou patogeny a geny rezistentní vůči antibiotikům (Becerra-Castro 2015). Zavlažování vyčištěnými odpadními vodami by proto mělo být prováděno opatrně, aby se zabránilo možné kontaminaci povrchových a podzemních vodních zdrojů začleněním opatření k prevenci jejího znečištění (Ofori et al. 2021). Pozorované rozdíly mezi různými plodinami zavlažovanými vyčištěnou odpadní vodou souvisí s parametry odpadní vody, typem plodiny a jejich citlivostí na prostředí a klimatické podmínky. Vhodné nakládání s odpadní vodou výběrem vhodných plodin, strategií řízení zavlažování, sledováním koncentrace a distribuce stopových prvků v půdě a rostlinách, může pomoci minimalizovat riziko používání odpadních vod v zemědělství (Hashem et Xuebin 2021).

Prioritou by mělo být získávání vody a nikoli dodávání živin. Mnoho nepříznivých dopadů na životní prostředí, které brání širokému využití tohoto způsobu zavlažování, vyplývá z obsahu živin a solí v odpadních vodách. Tyto živiny sice mohou být pro rostliny prospěšné, ale zároveň způsobit škody na půdě, vodních zdrojích a rostlinné produkci. Získávání vody pro podporu zemědělství a řešení nedostatku vody by mělo být hlavním cílem, především v oblastech s nedostatkem vody, jako je Středozemí či polopouštní a suché oblasti (Ofori et al. 2021).

## **6.2 Procesní voda v průmyslu**

Lidská činnost a zejména průmyslová činnost přispívají ke změně klimatu a vážnému nedostatku vody. V zájmu zajištění udržitelného hospodaření s vodou UNESCO stanovilo jako jeden ze svých hlavních cílů snížit do roku 2030 o 20 % množství vody spotřebovávané průmyslovými podniky. Hospodaření s vodou je odlišné pro různá průmyslová odvětví (Garnier et al. 2023). Je naléhavé přejít na systémy opětovného využívání odpadních vod ve všech průmyslových odvětvích. Stále je však zapotřebí zlepšit postupy účinného využívání vody a zavádět nákladově efektivní technologie čištění odpadních vod (Shrivastava et al. 2022).

### **6.2.1 Papírenský průmysl**

Voda má při výrobě papíru několik zásadních rolí. Slouží jako suspenzní médium a bobtnací činidlo pro vlákna, která se v počáteční fázi výroby papíru rozptýlí a zformují do jednolitého archu. Funguje také jako rozpouštědlo pro různé chemikálie a přídavné látky

k úpravě kvality papíru. Opětovné využití vody byla v celulózo-papírenském průmyslu vždy důležitým úkolem. Nedávný vývoj umožnil nejen snížit spotřebu vody a dopady na životní prostředí, ale také získat zpět cenné složky, jako jsou vlákna, čímž se technologie recyklace vody stává nákladově efektivní (Han et al. 2021).

Při výrobě papíru je voda ve velké míře využívána při různých operacích, jako je příprava surovin, chemické zpracování, při vývoji vlastností vláken, ředění buničiny, tvorbě papírového balíku, dále při dopravě a čištění zařízení. Kromě toho se voda používá také k chlazení, ve formě páry k ohřevu nebo promazávání. V průměru se spotřebuje 5-80 m<sup>3</sup> vody na každou vyrobenou tunu papíru, přičemž záleží na druhu papíru. Papírny zaměřené na výrobu recyklovaného papíru, vyrábějící také obalový papír, jako je například vlnitý papír nebo lepenka, mají často nejnižší spotřebu přírodní vody. Některým z nich se podařilo dosáhnout nulového vypouštění odpadních vod uzavřením vodních okruhů (Han et al. 2021).

Papírny, které vyrábí papír z recyklovaných vláken, mají zároveň méně náročný výrobní proces ve srovnání s jinými druhy papíru. To by znamenalo, že požadavky na čištění procesní vody by byly pro klasické papírny složitější, a tím i možnost vybudovat uzavřený vodní okruh. Snížení spotřeby přírodní vody uzavřením vodovodního systému může mít také významné negativní dopady na některé provozní jednotky, způsobené například zvýšeným obsahem škodlivých látek ve vodních okruzích. V posledních letech bylo učiněno mnoho pokusů o zvýšení recyklačního poměru procesní vody odstraněním suspendovaných pevných látek a organických rozpuštěných látek. Přestože je recyklovaný papír šetrnější k životnímu prostředí, během jeho výroby se uvolňuje do vody široké spektrum znečišťujících látek. Může obsahovat velké množství suspendovaných a rozpuštěných látek, což by vyžadovalo častou úpravu chemikáliemi, jakými jsou oxidační činidla, polyelektrolyty nebo sloučeniny regulující pH (Han et al. 2021).

Vhodnou úpravou lze procesní vodu znovu použít k různým účelům v rámci závodu, jako například k ředění materiálu, provozu strojů, čištění nebo chemickému barvení. Touto úpravou může být membránová technologie, konkrétně ultrafiltrace. Metoda ultrafiltrace je dosud nejčastěji používanou membránovou technologií pro recirkulaci vody v papírenském průmyslu. Jelikož se membrány musí používat v náročných podmínkách výroby, jako jsou vysoké teploty, silně alkalické nebo silně kyselé prostředí, ale také v rozpouštědlech, je třeba prozkoumat i další možné typy membránových úprav, které těmto podmínkám odolávají, aniž by ztratily své základní vlastnosti. Nulového vypouštění odpadní vody z výroby lze dnes dosáhnout použitím integrovaného membránového systému, který je kombinací dvou nebo více typů membránových úprav. Jedním z nejvýznamnějších typů membrán jsou nízkotlaková volná nanofiltrační vlákna odstraňující barvu. Používají se mimo jiné i v textilním průmyslu. Vzhledem k výhodám této metody by mohla potenciálně v papírenském a celulózovém průmyslu nahradit oxidační procesy čištění procesní vody (Han et al. 2021).

Papírna společnosti Visy v Tumutu, která byla uvedena do provozu v roce 2001, patří mezi papírny s nejnižší spotřebou vody v Austrálii. Papírna byla zkonstruována tak, aby bylo z výroby vypouštěno téměř nulové množství odpadních vod. Využívá sekvenční dávkovací reaktor s biologickým odstraňováním živin pomocí aktivovaného kalu. Všechny stupně procesu čištění probíhají ve stejném reaktoru, takže odpadá potřeba usazovací nádrže a systému recyklace kalu. Tohoto úspěchu bylo dosaženo díky tomu, že vyčištěná odpadní voda z papírny byla převážně znovu použita do procesu výroby a přebytečná voda vypouštěna na zemědělskou

půdu k zemědělským účelům. Za pomoci inovací v technologiích úpravy procesní odpadní vody, se v této papírně podařilo snížit spotřebu přírodní vody o 46 %, ze 6 m<sup>3</sup> na 3 m<sup>3</sup> na jednu tunu papíru (Han et al. 2021).

Čínská společnost Jiuhu realizovala ve své papírně Oji Paper jeden z největších světových projektů nulového vypouštění odpadních vod z papírenského průmyslu. Pomocí procesu předčištění, integrace membrán, krystalizace pomocí odpařování a dalších souvisejících procesů se odpadní voda mění na cenný zdroj. Vyčištěná odpadní voda se následně přivádí do elektrárny k odsolení. Po jejím odsolení se získaná odpadní sůl poskytuje úřadu pro dopravu, který ji využívá jako posypovou sůl na silnice a chodníky (Han et al. 2021).

Obecně každá technologie čištění odpadních vod nabízí své jedinečné funkce, zároveň má i svá vlastní omezení. Záleží na typu surovin a jejich původu a použitých chemikáliích při výrobě papíru. To může být pro každou papírnu specifické, což představuje výzvu k optimalizaci a individualizaci technologií čištění odpadních vod. V současné době vyčištěnou odpadní vodu nelze zcela využít pro výrobu všech druhů papíru. Papírny, vyrábějící jiný než recyklovaný papír, mají proto nižší šanci dosáhnout uzavřeného vodního okruhu (Han et al. 2021).

### **6.2.2 Potravinářský průmysl**

V souvislosti s rostoucí světovou populací a se zvyšující se spotřebou vody pro výrobu potravin hraje opětovné využívání vody zásadní roli při překonávání těchto převládajících problémů a k udržování hospodářského růstu (Shrivastava et al. 2022). Jelikož je potravinářský průmysl významným spotřebitelem zejména pitné vody, musí vyvinout značné úsilí, aby tuto spotřebu snížil. Za tímto účelem provedla Evropská komise v Evropě průzkum konkrétních hodnot spotřeby vody a vypouštění odpadních vod v některých potravinářských odvětvích (Garnier et al. 2023).

Spotřeba vody se na výrobu potravin a nápojů odlišuje v závislosti na typu a parametrech výrobního procesu, čistících procesech a na příslušenství používané v procesu. Odpadní vody z potravinářského průmyslu mohou vznikat v různých fázích zpracování potravin, při oplachovacích a čistících činnostech, a také při tvorbě vedlejších produktů (Shrivastava et al. 2022). V každém potravinářském odvětví se voda využívá jinak v závislosti na vlastnostech surovin a na transformačních procesech. Postupy se navíc mohou lišit i v rámci jednotlivých zemí (Garnier et al. 2023). Potravinářské podniky mají přetrvávající obavy z opětovného využívání odpadních vod vzhledem k negativnímu vnímání jejich vlastností a možných rizik kontaminace. Tyto obavy z rizika hygienických problémů zůstávají významnou překážkou pro zavádění postupů opětovného využívání vody v potravinářském průmyslu. Současné předpisy vyžadují, aby do styku s potravinami přicházela pouze voda pitná nebo ekvivalentních vlastností, aby byla zajištěna bezpečnost a kvalita konečných výrobků (Shrivastava et al. 2022).

V různých zemích, jako je Singapur, Austrálie, Izrael, Čína a Florida s Kalifornií v USA, zavedly již v mnoha potravinářských odvětvích projekty opětovného využití a recyklace vody. Tyto země mají k dispozici pokyny pro implementaci těchto technologií v potravinářském průmyslu. V Austrálii je k dispozici Směrnice pro opětovné využívání vody v potravinářských podnicích v Novém Jižním Walesu, která uvádí proveditelná řešení recyklace, metodiku kontroly těchto řešení a metodiku kontroly kvality výrobku. V Evropě vypracovala Evropská

komise příručku týkající se minimálních požadavků na opětovné využití vody (Garnier et al. 2023). Společnost Coca-cola opětovně využívá přibližně 173 miliard litrů vody z 804 miliard litrů odpadní vody vyprodukované v jejich průmyslových zařízeních. Je využívána ve výrobních procesech, na provoz a údržbu. Tato iniciativa společnosti Coca-cola vytvořila vzor pro další velké průmyslové giganty, jako je P&G a Heineken. Společnost Heineken v současné době celosvětově upravuje 96,5 % své odpadní vody, kterou poté navrací zpět do přírody. Nedávno se však zavázala k tomu, že bude ve větším množství znovu využívat vyčištěnou odpadní vodu ze svých vlastních provozů a poskytovat ji i jiným odběratelům (Shrivastava et al. 2022).

Zařízení pro opětovné využití vody mohou být navržena pro nepřímé nebo přímé opětovné využití. Přímé opětovné využití vyčištěné odpadní vody se častěji používá pro jiné než pitné účely, jako je zavlažování v zemědělství, terénní úpravy, zavlažování parků, chlazení a mycí provozy. V indickém městě Dharmasthala funguje velká kuchyň jménem Annapurna, která produkuje denně 3000-5000 litrů škrobové vody z vaření a mytí rýže. Tato voda má vysokou hodnotu BSK. Z tohoto důvodu se tyto škrobové odpadní vody používají ke krmení krav v Annapurně, jako doplněk stravy, čímž se zvyšuje produkce mléka na 3500 litrů za den. Na druhou stranu přímé využití odpadních vod jako primárního zdroje v potravinářském průmyslu vyžaduje hluboké pochopení složitých procesů probíhajících ve výrobních provozech (Shrivastava et al. 2022).

Druhá možnost opětovného využití vyčištěné odpadní vody z průmyslové výroby je nepřímé využití. Nepřímé opětovné využití spočívá v odvádění odpadních vod z průmyslových výroben do místní ČOV, jejím navrácením do recipientu po vyčištění a z těchto přírodních zdrojů ji lze později opět odebrat a průmyslově využívat. Přímé i nepřímé opětovné využití odpadních vod z potravinářského průmyslu se však řídí kombinací různých technických a sociálních parametrů, které závisí na legislativních a provozních požadavcích. Právní předpisy upravující přímé a nepřímé opětovné využívání odpadních vod by měly být upraveny tak, aby odrážely míru zatížení a způsob čištění odpadních vod používaný v průmyslu. Při nízkém stupni znečištění lze přímé použití odpadní vody považovat za vhodnou možnost, pokud lze technologickou úpravou získat vodu s kvalitou pitné vody (Shrivastava et al. 2022).

Při opětovném použití nebo recyklaci vody, je znalost množství, podrobného složení upravované vody a její kvality potřebné pro jednotlivé fáze výroby, zásadní pro optimalizaci vodovodní sítě i pro volbu vhodného procesu úpravy v případě potřeby. Pro účely ČOV jsou průměrné koncentrace a specifické znečištění odpadních vod produkovaných evropským potravinářským průmyslem, definovány prostřednictvím globálních parametrů jako je biochemická spotřeba kyslíku (BSK), chemická spotřeba kyslíku (CHSK), celkový obsah nerozpuštěných látek, celkový obsah organického uhlíku a celkový obsah dusíku a fosforu. Tyto parametry jsou důležité pro volbu vhodné technologie ČOV. V mnoha zemích kontrolní úřady stanovují používání zásad předběžné opatrnosti, což znamená, že při styku s potravinami by se měla využívat pitná voda, jako je tomu například v evropském společenství, kde pitná voda tvoří 75 % celkové využívané vody v potravinářském průmyslu. Hodnocení kvality upravené vody tedy vyžaduje analýzu dalších parametrů jako je například barva, vodivost, zápach, zákal, ale také specifičtější parametry jako je obsah organických mikropolutantů, bromičnanů, mědi, hliníku nebo železa. V důsledku toho je třeba přesněji zkoumat kvalitu odpadních vod, aby bylo možné přizpůsobit čistící procesy a zajistit zdravotní nezávadnost vody. Krátké okruhy



recyklace vody v rámci jedné průmyslové výroby mohou umožnit nastavení specifictějších procesů odstraňování znečišťujících látek z odpadních vod, což by mohlo přispět k vyšší efektivitě čištění. Pokud jsou odpadní vody z různých provozních činností shromažďovány a míchány, obecně to vede k nižší účinnosti čistících procesů. Mimoto je čerpání a přeprava odpadních vod do ČOV nebo do místa vypouštění nákladnější. Z tohoto důvodu se zdá být vhodnější vyvinout v rámci průmyslového provozu menší recyklační okruhy (Garnier et al. 2023).

### **6.2.2.1 Metody čištění a dočištění odpadních vod vznikajících v potravinářském průmyslu a jejich možné využití**

- Anaerobně-aerobní metoda

V masném závodu bylo čištění odpadních vod provedeno biologickým anaerobně-aerobním procesem v kombinaci s membránovým bioreaktorem. Vyčištěná odpadní voda se v tomto případě občasně využívala ke zpětnému proplachování reaktoru. Samostatně se tato technologie v současné době používá k nepřímému opětovnému využití odpadních vod, zatímco přímé využití odpadní vody se nedoporučuje. Na druhou stranu lze vyčištěnou vodu po vhodném připojení sekundárního a terciárního stupně čištění použít pro čistící účely. Je možné využít například jejich smísení s dezinfekčními a sanitačními prostředky (Shrivastava et al. 2022).

- Reverzní osmóza

V nedávné studii ve Francii byly odpadní vody z mlékáren čištěny pomocí procesu reverzní osmózy. Účinnost tohoto systému byla poměrně vysoká a přibližně 95 % vyčištěné vody bylo opětovně využito. Opětovné využití této vody bylo poměrně omezené, jelikož francouzská legislativa neumožňuje, aby recyklovaná voda byla v přímém kontaktu s výrobním procesem. Voda tak byla využita jako doplňovací voda do kotle, která mnohdy vyžaduje vyšší standardy než voda pitná z důvodu prevence proti usazování vodního kamene. Další možností může být mimo jiné využití ve formě chladicí vody v uzavřeném okruhu nebo k čištění výrobních strojů. Proces reverzní osmózy v rámci terciárního čištění odpadních vod má oproti jiným technologiím řadu výhod, jakými jsou selektivita nebo dlouhá životnost. Nevýhodami na druhou stranu jsou výrazně vyšší provozní náklady a vyšší náklady na údržbu (Shrivastava et al. 2022).

- Ultrafiltrace, nanofiltrace v kombinaci s reverzní osmózou

Proces reverzní osmózy může být doplněn další vhodnou membránovou metodou, jako je nanofiltrace, ultrafiltrace či mikrofiltrace. V Tunisku byla provedena studie, která zkoumala využití vyčištěných odpadních vod z továrny na výrobu živočišných hydrolyzovaných bílkovin. V této studii byla odpadní voda čištěna metodou ultrafiltrace v kombinaci s reverzní osmózou. U všech sledovaných parametrů prokázalo kombinované čištění ultrafiltrací a reverzní osmózou míru zachytu mezi 95 a 99 %. Vyčištěná odpadní voda byla využita dle tuniských norem k výrobnímu procesu nebo byla vypouštěna do recipientu. Celkově je proces reverzní osmózy

v kombinaci s ultrafiltrací nebo nanofiltrací jednou z nejpoužívanějších technologií v potravinářském průmyslu pro úpravu vody až do stupně pitné vody (Shrivastava et al. 2022).

V dalších odvětvích, jako je ovocnářství a zelinářství je možné vodu využitou z blanširování opětovně použít pro přípravné čištění mrazicích tunelů. V tomto odvětví se spotřebuje na čištění ovoce a zeleniny a jejich oplachování po oloupání 90 % celkové spotřeby vody. Až 90 % této vody by se dalo ušetřit, kdyby se veškerá odpadní voda vzniklá při mytí recyklovala pro čištění strojů ve výrobě (Garnier et al. 2023).

V závislosti na procesu membránové filtrace a mezní molekulové hmotnosti membrány lze odstranit různé typy znečišťujících látek nebo částic. Ultrafiltrace, nanofiltrace a reverzní osmóza jsou obvykle hlavními postupy úpravy používanými k odstranění rozpustných organických složek a minerálních látek. Je však třeba, aby jim předcházely příslušné předúpravy, které zvýší jejich účinnost a umožní odstranit veškeré nerozpuštěné látky, zákal nebo olej a tuk, čímž se zabrání předčasnému zanášení membrán nebo jejich mechanickému poškození (Garnier et al. 2023). Pomocí reverzní osmózy a nanofiltrace lze účinně odstraňovat také jednomocné a dvojmocné soli (Hafez et al. 2007).

- Chemická oxidace a elektro oxidace

Cukrovarský průmysl je jedním z hlavních průmyslových odvětví odpovědných za znečišťování. V tomto odvětví není samostatná metoda čištění odpadních vod tak účinná, aby splňovala normy pro vypouštění odpadních vod. Studie z roku 2017 využila k čištění odpadních vod z cukrovarnictví technologii kombinovaného elektrochemického a chemického oxidačního procesu. Měď byla použita jako elektroda i jako chemická příměs. Kal vzniklý při tomto zpracování odpadní vody lze po vysušení separovat a využít ve stavebnictví.

Pro tuto technologii jsou hlavní nevýhodou vysoké investiční náklady a nutnost přizpůsobit se specifickým požadavkům na proces čištění pro každou kontaminující látku. Z tohoto důvodu se tato technologie doporučuje v případě potravinářského průmyslu, kde se z odpadních vod odstraňují znečišťující látky, které mají podobné vlastnosti (Shrivastava et al. 2022).

- Povrchově upravená síť

Další metodou, kterou lze pro čištění potravinářských odpadních vod použít, je metoda jednoduché povrchově upravené (vrstvené) sítě, například z nerezové oceli. Tato metoda spočívá v použití multifunkčního materiálu s jednoduchou metodou úpravy. Má vysokou účinnost zpracování a nabízí univerzální možnost pro čištění odpadních vod z potravinářského průmyslu. Jedna ze studií použila síťku potaženou oxidem měďnatým k účinné separaci oleje a vody katalytickou degradací. Optimalizací obsahu oxidu měďnatého na povrchu sítě lze rozložit více než 99 % organických znečišťujících látek. Současně bylo použito UV záření k eliminaci dalších znečišťujících látek. Takto vyčištěnou odpadní vodu je možné využít pro bezkontaktní činnosti provozu. Výsledky této studie uvádějí, že se zvýšila účinnost separace čisté vody, což z této metody činí vhodnou volbu pro technologii čištění odpadních vod z potravinářství v blízké budoucnosti (Shrivastava et al. 2022).

- **Elektrokoagulace**

S cílem využít vyčištěné odpadní vody ke hnojení z masných a mlékárenských výroben, byla testována metoda elektrokoagulace. Tato technologie využívá již přítomné živiny v odpadní vodě, jako je dusík, fosfor, draslík k zavlažování. Řešení je slibné, ale vyžaduje přísné dodržování legislativy k zajištění bezpečnosti. Za elektrokoagulační jednotkou může správně navržený systém filtrace a dezinfekce zajistit vodu, která bude dostatečně čistá, aby mohla být využita jako složka výrobního procesu (Shrivastava et al. 2022).

## **6.3 Užitková voda v domácnostech**

### **6.3.1 Třídění odpadní vody z domácností a jejich využití**

Odpadní vody z domácností jsou tvořeny především třemi hlavními typy: žlutá voda (moč), hnědá voda (fekálie), šedá voda. Živiny vypouštěné ve formě lidského odpadu, jako jsou fekálie, moč a šedá voda, vznikají v domácnostech a končí v odpadních vodách, které se, pokud nejsou kvalitně čištěny, stávají významným zdrojem uvolňování živin do přírodních vod. V poslední době však lze zaznamenat zřetelný trend směřující od jejich odstraňování k jejich zpětnému využívání, jelikož průmyslové a domovní odpadní vody a kaly jsou považovány za nevyužitý zdroj živin a také energie. Kupříkladu celkový obsah fosforu v lidské moči a fekáliích by mohl pokrýt přibližně 22 % celosvětové potřeby fosforu (Kundu et al. 2022).

Čištění a opětovné využití odpadních vod je důležité jako zdroj vody a jako další možnost nakládání s odpadními vodami. Mohou se však setkat s odporem veřejnosti kvůli možné přítomnosti patogenů či kvůli jejich dlouhodobým neznámým účinkům na lidské zdraví (Alemayehu et al. 2021).

#### **6.3.1.1 Hnědé vody**

Hnědá odpadní voda jsou fekálie smísené se splachovací vodou. Lidská stolice je pevný nebo polotuhý odpadní produkt lidského metabolismu. Zbavuje tělo nežádoucích látek. Přibližně tři čtvrtiny lidských výkalů tvoří voda, zbytek jsou odumřelé bakterie, nestrávená potrava a anorganické látky. Organické složky lidských výkalů zahrnují bakterie, bílkoviny, lipidy a sacharidy. Anorganické složky tvoří vápník, draslík a fosfáty. Výkaly dále obsahují trávicí enzymy, hlen a epitelální buňky. V současné době jsou standardem městské hygieny, zejména v zemích s vysokými příjmy, záchody splachované vodou, napojené na čistírnu odpadních vod. Běžný splachovací záchod spotřebuje na jedno spláchnutí v průměru 5 litrů vody. Odhaduje se, že v zemích s vysokými příjmy se na spláchnutí 500 litrů moči a 35 kg fekálií na osobu spotřebuje 15 000 litrů vody ročně. Jelikož tyto toalety neoddělují moč a fekálie zvlášť, je zapotřebí značného množství energie a chemikálií k odstranění živin obsažených v lidských výkalech, kterou odchází kanalizačním systémem do městských čistíren odpadních vod. Lidské výkaly obsahují živiny důležité pro rostliny, které lze recyklovat a využívat jako hnojiva. Nejběžnější produkty zpracování fekálií se získávají ve formě sušiny, pevných organických látek a popela. Z fekálií lze mimo jiné získat i vodu a použít ji pro různé nepitné účely (Deka et al. 2022).

K obnově živin, vody a energie nebo k výrobě produktů bohatých na uhlík z lidských výkalů oddělených u zdroje lze použít různé technologie. Některé technologie obsahují jednu fázi úpravy, jiné mají více fází, kde výstup jedné fáze obecně funguje jako vstup pro další fázi. K separaci výkalů se používají toalety odklánějící nebo oddělující moč. Mohou to být suché toalety nebo splachovací toalety. Splachovací toalety používají malé množství vody k odplavení výkalů a moči z toalety. Moč se shromažďuje odděleně a lze ji využít k získání živin a vody. Pomocí systému Aquatron lze i při společném splachování moči a výkalů oddělit pevné látky od tekutin, i když jsou moč a výkaly splachovány společně. Tento systém je založen na kombinaci vírového efektu, povrchového napětí a gravitace (Deka et al. 2022).

Cranfieldská univerzita ve Velké Británii vyvinula nano-membránovou samoobslužnou technologii na tzv. nano-membránovou toaletu. Tato technologie se zaměřila především na výrobu energie a znovupoužitelné vody, nikoliv na hnojiva. Toaleta funguje bez vody, přičemž voda se z lidských výkalů odpařuje. Pára prochází membránami a kondenzuje se na hydrofilních perličkách s nano-vrstvou v zadní části toalety. S pevnými látkami, které zůstanou se nakládá dvěma způsoby. Buď se shromažďují a zpracovávají se v centralizovaném zařízení nebo se odvodněný kal na místě spaluje a výroba energie pro pohon toalety. Kapacita toalety je přibližně 10 osob a její životnost 7 let. Tato technologie by byla schopna získat přibližně 1,5 litru vody na osobu za den a generovat přibližně 90 Wh na osobu za den. První studie této toalety proběhla v ghanském městě Kumasi. Toaleta zde byla navržena na 20 litrů odpadní směsi na den. Získaný kal byl použit k výrobě elektřiny pomocí procesu zplyňování (Kundu et al. 2022).

Technologie hydrotermálního zkapalňování umožňuje získat živiny i energii přeměnou výkalů na surový bio olej, pevný zbytek a plyn. Proces probíhá při teplotě 200-350 °C a tlaku v rozmezí 5-20 MPa. Integrovanými technologiemi pro odpadní vody lze získat výtěžek až 35 % surového oleje a do této frakce lze převést téměř polovinu uhlíku obsaženého ve výkalech. Převážná část dusíku a polovina kyslíku obsaženého ve výkalech se uvolňuje do vodné fáze. Většina vápníku, hořčíku, hliníku, železa a zinku z výchozích surovin se oddělí do tuhého zbytku, zatímco draslík a sodík se oddělí do vodné fáze. Zbylá frakce obvykle obsahuje 25-35 % uhlíku, 2-4 % vodíku, 1-3 % dusíku a 40-60 % popelovin, zatímco bio surový olej obsahuje 75 % uhlíku, 10 % vodíku, 3-5 % dusíku, 10 % kyslíku a jeho výhřevnost je 40 MJ/kg (Deka et al. 2022).

Biologická přeměna biomasy na bioplyn je v posledních letech využívanou technologií. Přestože je živočišný hnůj nejpoužívanější surovinou pro výrobu bioplynu, alternativou mohou být lidské výkaly, jelikož mají podobné složení. Proces anaerobní digesce je víceúrovňový proces zahrnující hydrolýzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi. Faktory jako pH, teplota a složení biomasy určují objem produkovaného bioplynu. Z 1 000 m<sup>3</sup> lidských výkalů lze vyrobit 1 000 m<sup>3</sup> bioplynu. Bioplyn lze využít k vaření, ohřevu vody a budov nebo přeměnit na elektřinu (Deka et al. 2022).

### 6.3.1.2 Šedé vody

Šedá odpadní voda je definována jako odpadní voda z kuchyně, koupelny, s výjimkou odpadní vody z toalet. Tvoří 50-80 % celkových odpadních vod z domácností a je méně znečištěná než smíšená odpadní voda z domácností. Kvůli jejímu nižšímu znečištění by mohla

být vhodná pro opětovné využití (Ren et al. 2023). Šedá odpadní voda z koupelen obsahuje mýdla, šampony, zubní pastu, přípravky k péči o tělo, odpad z holení, odumřelé kožní buňky, vlasy a stopy moči a výkalů. Šedá voda z automatických praček obsahuje bělidla, dusičnany, oleje a tuky, fosfáty, sodík, mýdla a suspendované látky. Voda pocházející z kuchyňských dřezů může obsahovat zbytky potravin, oleje a tuky a čisticí prostředky na mytí nádobí. Voda, která odchází z automatických myček může obsahovat bakterie, zbytky potravin, oleje a tuky, organické látky, mýdlo, suspendované látky. (Ghaitidak et Yadav 2013).

Vlastnosti šedé vody jsou velmi proměnlivé a závisí především na klimatických a sociokulturních vlivech a původním zdroji vody. Jejich čištění by tedy mělo být přizpůsobeno místním poměrům. Určité toky šedých vod lze pro případné opětovné využití vyloučit, jelikož kupříkladu šedá voda z kuchyňských dřezů a praček obsahuje vyšší koncentrace znečišťujících látek. Zasolení šedé vody má velký vliv na potenciál pro její opětovné využití například pro zavlažování. Bylo provedeno mnoho výzkumů dlouhodobých účinků zavlažování vyčištěnou šedou vodou na vlastnosti půdy a potenciální fytoxicitu v důsledku zvýšené koncentrace solí. Prvky kovů jsou přítomny v relativně nízkých koncentracích. V poslední době se zvýšil počet plastových vodovodních potrubí, což vede k ještě nižšímu výskytu vysokých koncentrací kovů jako je zinek a měď. Dlouhodobé zavlažování šedou vodou by však stále mohlo vést ke kumulaci stopových prvků kovů v půdě, překračující doporučené hodnoty. Šedé vody obsahují významné koncentrace xenobiotických organických sloučenin, což jsou uměle syntetizované chemické látky, které většinou pocházejí z prostředků pro domácnost, jako jsou produkty osobní hygieny, konzervační prostředky a detergenty. Přítomnost těchto sloučenin v šedých vodách může představovat významné riziko pro lidské zdraví v souvislosti s jejím opětovným využitím pro pitné účely, zavlažování rostlin, ale i pro suchozemské a vodní ekosystémy (Van de Walle et al. 2023).

Hlavním důvodem k opětovnému využívání šedé vody je jejich vysoká dostupnost, nižší stupeň znečištění, což redukuje potřebu jejich čištění ve srovnání s běžnými odpadními vodami z domácností. Na druhou stranu hlavními překážkami pro jejich opětovné využívání je přítomnost některých problematických znečišťujících látek, které mohou být rizikové jak pro člověka, tak pro životní prostředí, chybějící právní legislativa pro nakládání s šedou vodou a negativní náhled spotřebitelů na využívání tohoto druhu odpadních vod. Samotní spotřebitelé mají různou míru přijetí systémů opětovného využívání šedé vody v závislosti na řadě faktorů. Jedním z hlavních je míra kontaktu člověka s vyčištěnou šedou odpadní vodou, přičemž nejvíce se lidé zdráhají využití vyčištěné šedé vody jako vody pitné (Van de Walle et al. 2023).

V mnoha zemích brání rozvoji a zavádění systémů opětovného využívání odpadních vod nedostatek právního rámce pro nakládání se šedou vodou. Zejména pro účely opětovného využití ve městech a pro konkrétní využití v domácnostech, je často zapotřebí konkrétního posouzení vlastností vody. Směrnice k opětovnému využívání často vycházejí z doporučení mezivládních organizací, jako je Světová zdravotnická organizace (WHO), která se zabývá opětovným využitím šedé vody pro zavlažování v zemědělství. Směrnice o kvalitě vody se často zaměřují na malý rozsah parametrů, přičemž dosud nebyla zavedena žádné mezinárodní doporučení pro opětovné využívání šedé vody pro přímé pitné účely (Van de Walle et al. 2023).

Z hlediska přímých a dlouhodobých dopadů na životní prostředí mohou být systémy opětovného využívání šedé vody dvojsečné. Jedna ze studií například porovnávala přímé opětovné využití šedé vody s jejím vypouštěním do životního prostředí, kdy se následně

opakovaně využila v jedné obytné budově. Výsledky ukázaly, že opětovné využití výrazně snižuje toxické účinky na životním prostředí o 1,6-16,2 % a eutrofizační potenciál o 17 %. Při opětovném využití šedé vody se však o 2 % zvýšily emise skleníkových plynů a toxické účinky na člověka až o 51,8 %. Zvýšené toxické účinky byly zapříčiněny především polyvinylchloridovým potrubím, které bylo nutné k dopravě upravené šedé vody po budově. V jiné studii bylo zjištěno, že lokální opětovné využití šedé vody by mohlo snížit emise skleníkových plynů, eutrofizační potenciál i rizika pro lidské zdraví při komunálním zásobování této vody (Van de Walle et al. 2023).

#### 6.3.1.2.1 Technologie čištění šedých vod

Biologické procesy čištění šedé vody, jako jsou procesy využívající například membránový bioreaktor, biologický provzdušňovaný filtr, sekvenční dávkovací reaktor, bioreaktor s pohyblivým ložem jsou považovány za vhodné metody pro čištění šedých vod, jelikož mohou účinně odstraňovat organické kontaminanty. Při výrobě vysoce kvalitních šedých odpadních vod určených k opětovnému využití je preferovaným dezinfekčním prostředkem chlor kvůli své účinnosti, nízkým nákladům a snadné manipulaci. Přestože se šedá voda upravuje spolehlivými procesy a výsledná odpadní voda vyhovuje normám pro opětovné použití, mnoho studií zaznamenalo opětovný růst mikroorganismů během jejího opětovného použití, pokud měla regenerovaná voda nízkou biologickou stabilitu. Nadměrný mikrobiální růst může vést ke zvýšenému zápachu nebo k výskytu patogenů (Ren et al. 2023).

Metoda membránového biofilmového reaktoru kombinuje technologii biofilmu s membránovou jednotkou a umožňuje tvorbu biofilmu dodáváním plynného substrátu přes porézní membránu. Tato metoda je schopna odstraňovat z šedé vody organické a anorganické kontaminanty, jako jsou povrchové aktivní látky a dusík. Jedna ze studií uvádí, že touto metodou se podařilo odstranit 93,8 % povrchově aktivních látek a 80 % dusíku (Van de Walle et al. 2023).

Jedna ze studií uvádí, že zdroje šedé vody v domácnostech lze po jednoduché mikrofiltraci bezpečně používat ke splachování toalet. Toalety spotřebují více vody než jakákoli jiná domácí činnost. Podle statistik představuje voda ze splachování toalet až 45 % spotřeby vody v domácnostech. Pokud by místo přírodní vody byla využívána vyčištěná šedá voda, mohlo by to výrazně snížit spotřebu vody. Šedá voda se již používá ke splachování toalet v obytných čtvrtích, vládních institucích a hotelech v mnoha městech a regionech, jako je Peking, Tokio a Nový Jižní Wales v Austrálii. Normy pro zbytkový chlor ve vyčištěné šedé vodě určené ke splachování toalet, se v jednotlivých zemích značně liší. Důvodem může být rozdílná kvalita regenerované vody, zejména koncentrace organických látek, které spotřebují určité množství dezinfekčního prostředku. Hlavní překážkou opětovného používání šedé vody na splachování toalet je růst bakterií, což vede ke zhoršení kvality vody a v konečném důsledku ohrožuje lidské zdraví. Zbytkový chlor je klíčovým faktorem, který brání opětovnému růstu mikroorganismů v regenerované vodě. Výsledky této studie naznačují, že koncentrace zbytkového chloru by neměla být nižší než 0,8 mg/l, aby byla zajištěna inhibice mikroorganismů (Ren et al. 2023).

Přírodní řešení byla rovněž zkoumána pro čištění šedých vod vzhledem k jejich přirozeným výhodám, kterými jsou nízká energetická náročnost a účinnost při odstraňování organických látek. Za jedno ze základních přírodních řešení čištění lze považovat budované

mokřady, přičemž další možnosti jako jsou zelené střechy a stěny mohou rovněž napodobovat techniku procesů čištění v mokřadech. Účinnost odstraňování organických látek zlepšuje jak biologická degradace, tak fyzikálně-chemické procesy, jako je srážení, filtrace a adsorpce prostřednictvím vybudovaných mokřadů. Mokřady, které jsou osázeny rostlinami mají lepší účinnost snižování CHSK než neosázené mokřady, z důvodu okysličování dna, což způsobuje aerobní rozklad v kořenových zónách a příjem živin. Mokřady jsou schopny také účinně odstraňovat živiny přítomné v šedých vodách. Rostliny v mokřadech pomáhají s odstraňováním dusíku a fosforu, jelikož je umí vstřebávat do svých kořenů. Pomocí těchto mokřadů lze v neposlední řadě odstranit také fekální koliformní bakterie. Uměle budované mokřady tedy mohou být vhodné jako dodatečná úprava při biologickém čištění šedé vody (Van de Walle et al. 2023).

V současnosti jsou různé technologie čištění šedých vod zkoumány za účelem ověření účinnosti dané technologie. Je nutné vyvinout technologie zaměřené na konkrétní účel opětovného využití, například zavlažování, splachování, praní a další. Bylo zjištěno, že jedna metoda či technologie není schopna naplnit všechny požadované normy pro opětovné využití šedé vody. Z tohoto důvodu je třeba vytvořit systém kombinací různých technologií se zaměřením na typ opětovného použití šedé odpadní vody (Ghaitidak et Yadav 2013).

### 6.3.1.3 Žluté vody

Žlutá voda neboli moč, je vodný roztok metabolických odpadů, především močoviny, rozpuštěných solí a dalších organických látek (Beránková 2016). Moč obsahuje většinu živinového zatížení odpadních vod. Z tohoto důvodu je značný zájem využít živiny z moči jako možný zdroj, jelikož přibližně 80 % dusíku, 50 % fosforu a 60 % draslíku v odpadních vodách pochází z moči. Zpětné získávání živin z moči přímo ze zdrojů (domy, byty, sídliště) může významně prodloužit životnost ČOV tím, že minimalizuje potřebu nitrifikačních a denitrifikačních procesů, což by mohlo přispět ke snížení energetických nákladů. Nicméně zajištění infrastruktury, která by byla schopna odebírat moč přímo ze zdrojů by byl náročný úkol. Pro nově budované byty, domy a sídliště by to však mohla být atraktivní možnost, jak do budoucna snížit spotřebu vody (Kundu et al. 2022).

Složení moči se významně liší v závislosti na způsobu odběru a jejího zpracování. V zásadě je získávání živin ze žluté vody snáze proveditelné, pokud je moč oddělena od ostatních tekutých odpadů v domácnostech, jako jsou odpadní vody z kuchyní a koupelny (Kundu et al. 2022).

Pokud by se měla žlutá voda používat jako hnojivo, musí být bez léčivých látek. Farmaceuticky aktivní sloučeniny jsou uznávaným environmentálním problémem se zatím neznámými účinky. Tyto sloučeniny jsou v moči přítomny, a proto by měly být odstraněny z důvodu možných nežádoucích dopadů na kvalitu všech vyrobených konečných produktů. Farmaceutické sloučeniny lze odstranit v odděleném kroku úpravy moči pomocí nových technologií, jako je destilace, ultrafialové záření či dávkování peroxidu vodíku nebo ozonu. Kromě toho by mikropolutanty přítomné v moči mohly být odstraněny pomocí elektrodialýzy. Bylo by však třeba zvážit vysoké investiční náklady a energetickou náročnost (Randall et Naidoo 2018).

Jedním z možných opatření, která mohou pomoci s vysokou spotřebou vody, je recyklace lidské moči, která by se po elektrochemické úpravě umožňující její skladování bez nepříjemného zápachu, mohla využít jako splachovací voda. Dospělý člověk denně vyloučí přibližně 1,5 litru moči, zatímco na samotné spláchnutí se spotřebuje až desetinásobek tohoto množství vody. Tím by se dalo denně ušetřit až 20 litrů vody na osobu, pokud by se veškerá moč recyklovala. Použití recyklované moči, i když se jí podaří oddělit od výkalů, ovšem vyžaduje její skladování a přepravu (Ikematsu et al. 2007).

Moč obsahuje močovinu, která se v důsledku přítomnosti bakterií v moči mění na amoniakální dusík. Tyto bakterie uvolňují enzym ureázu, která hydrolyzuje močovinu, přičemž se může uvolňovat plynný amoniak, který způsobuje charakteristický zápach (Kundu et al. 2022). V důsledku elektrochemické reakce byla reaktivita ureázy potlačena, když byl oxidačně-redukční potenciál moči udržován na hodnotě 240 mV nebo vyšší. Moč tak může být skladována při nepřetržité elektrochemické úpravě, aniž by uvolňovala charakteristický amoniakální zápach, a sloužit tak jako voda na splachování toalet. Za předpokladu, že bychom využili nádrž o objemu 20 litrů, přičemž by celý její obsah byl použit ke spláchnutí močí vymočenou jedním dospělým člověkem, jsou náklady na elektrickou energii nižší než poplatek za vodu z vodovodu, pokud počet cyklů úpravy nedosáhne 64. To znamená, že během 2 měsíců provozu je potřeba pouze 20 litrů vody, a proto by mohl elektrochemický způsob skladování žluté vody přispět ke snížení spotřeby vody (Ikematsu et al. 2007). Alkalizace je další metodou stabilizace moči, kdy se ke zvýšení pH moči používají různé zásady, jako je hydroxid vápenatý, oxid vápenatý nebo hydroxid hořečnatý. Po alkalizaci má čerstvá moč pH 10 nebo více, čímž se tlumí uvolňování ureázy, což vede ke snížení enzymatické hydrolyzy. Je doporučeno použití přibližně 10 gramů hydroxidu vápenatého na 1 litr čerstvé moči, aby byla zachována adekvátní úroveň stabilizace moči (Kundu et al. 2022).

Jednou z možností stabilizace moči na odběrném místě pro následný transport by mohla být stabilizace moči pomocí hydroxidu vápenatého. Hydroxid vápenatý by reagoval s fosforem obsaženým v moči za vzniku fosforečnanu vápenatého. Vysoké pH v důsledku nadbytku hydroxidu vápenatého zabraňuje enzymatické hydrolyze močoviny. Stabilizovaná moč by v tomto případě mohla být odebírána a odvážena nebo by stabilizační nádrž mohla mít zabudovanou část malou sedimentační část, přičemž přebytečné nutrienty by byly odesílány do běžné kanalizační sítě. Tento postup by mohl odstranit fosfor před vstupem odpadních vod do ČOV, což by omezilo zanášení potrubí vodním kamenem. Samovolné srážení minerálních látek a následné ucpávání potrubí je totiž hlavním problémem údržby bezvodých pisoárů a toalet oddělujících moč. Sběrná nádrž by měla být z toalet snadno vyjímatelná a po jejím naplnění by ji uživatelé odváželi do centrálního sběrného zařízení. Následně by si vyzvedli prázdnou sběrnou nádrž, ve které by byl čerstvý hydroxid vápenatý, na další období sběru (Randall et Naidoo 2018).

Pokud by byla moč separována a nesmísila se se zbytkem odpadních vod, bylo by možné ji využít jako zdroj živin. Živiny obsažené v moči jako fosfor, dusík a draslík mohou být použity jako koncentrované hnojivo, protože neobsahují látky škodlivé pro životní prostředí. Techniky separace moči z toku odpadních vod se používají již mnoho tisíc let v různých částech světa. Důvody této separace i systémová řešení se v jednotlivých zemích liší. Například v Číně se moč odděluje v jednoduchých toaletách a shromažďuje se pro místní využití jako hnojivo. Živiny z moči jsou poměrně koncentrované a pro rostliny jsou snadno dostupné. Obsahuje jen velmi



nízké množství těžkých kovů a patogenních organismů (Stockholmshem & HSB National Federation 2000).

#### 6.3.1.3.1 Názor společnosti a zemědělců

Přijetí možného využití moči na zemědělskou půdu může být pro lidi obtížné téma. Vyvstávají otázky, jak by mohli zemědělci, a i společnost reagovat při používání regenerované moči k závlahám nebo ke hnojení. Na toto téma byla provedena řada sociálních studií, jedna z nich poskytla údaje ze 7 evropských zemí od 2 700 respondentů. Toaleta, která by byla oddělena od zdroje byla respondenty obecně přijata dobře. Rozsah přijetí respondentů z Německa, Švýcarska a Švédska se pohyboval mezi 75 a 95 %. Počet respondentů, kteří neměli zájem vyměnit stávající toaletu, byl nižší, ve Švédsku to bylo přibližně 20 % a v Rakousku 50 %. Až 38 % respondentů ze Švédska a 58 % ze Švýcarska bylo dokonce ochotno zaplatit více za výměnu konvenční toalety. Hlavní motivací uživatelů pro toaletu oddělenou od zdroje byl ekologický zájem, což je pozitivní, protože to znamená, že si společnost uvědomuje důležitost ochrany životního prostředí. Případová studie z Nizozemska zjišťovala, jak by lidé akceptovali toalety s odklonem moči. Ze zúčastněných 338 respondentů bylo 64 % ochotno tento systém zavést ve své domácnosti kvůli přínosům pro životní prostředí. Další podobný průzkum byl proveden u obyvatel kampusu na Floridské univerzitě v USA, kdy více než 80 % z 8 800 respondentů hlasovalo pro toalety odvádějící moč a nevádilo by jim si za tento nový systém připlatit. Za hlavní přínos považovali úsporu vody. Respondenti měli větší obavy z využívání moči jako hnojiva na zemědělskou půdu. Studie zaměřená na moči hnojené plodiny určené k potravě, se dotazovala celkem 3 763 respondentů ze 16 zemí. Zjistila, že 68 % dotazovaných akceptovalo lidskou moč jako hnojivo, 59 % bylo ochotno tyto plodiny konzumovat a 63 % bylo ochotno zaplatit stejnou částku, jakou obvykle za potraviny platí (Kundu et al. 2022).

Reakce zemědělců na přijetí moči jako hnojiva byla mnohem méně pozitivní než přijetí toalet oddělených od zdroje širokou veřejností. Většina farmářů ze Švýcarska považovala za dobrý nápad využívat hnojiva na bázi moči na zemědělskou půdu a byli by ochotni si za ně zaplatit. Naproti tomu většina farmářů z Berlína z Německa si tuto metodou nebyla jistá a uvažovali by o ni, pokud by byla hnojiva zdarma. Obávali se kvality hnojiv, přijetí takto vypěstovaných plodin veřejností a vládních nařízení, která by se v tomto ohledu mohla měnit. Zemědělci dávali přednost produkci potravinářských plodin nebo krmiv pro zvířata (Kundu et al. 2022).

Přijetí hnojiv na bázi moči společností se liší podle geografické polohy, ale i v závislosti na řadě dalších faktorů. Zdravotní rizika jsou považována za jedna z nejčastějších důvodů, proč se společnost této metody obává. Sociokulturní preference a náboženská vyznání mohou mít rovněž vliv na postoj k recyklaci moči (Kundu et al. 2022).

#### 6.3.1.3.2 Využití živin ze žluté vody

Využití žluté vody k zavlažování by mohlo poskytovat až čtyřikrát více fosforu a třicetkrát více dusíku než konvenční systém využití vyčištěných odpadních vod a může poskytnout vyšší výnos než jiné odpadní vody. Přestože zvyšuje výnosy různých plodin, jsou

hlášeny i negativní důsledky, jako je změna pH a zasolení půdy, či riziko přenosu patogenů a residuí léčiv. Míra zasolení půdy se s objemem aplikace žluté vody zvyšuje bez ohledu na koncentraci chloridu sodného v půdě (Alemayehu et al. 2021).

V Austrálii provedla organizace CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation a RMIT University studii o toaletě s odděleným odvodem moči. Moč shromážděná z domácností byla aplikována na trávník sklizený na farmě Green Acres. Moč byla srovnána s komerčně dostupným hnojivem. Podle této studie bylo k nahrazení 5 litrů komerčního hnojiva zapotřebí 4000 litrů žluté vody. To mohlo být způsobeno tím, že se značná část dusíku obsaženého v moči přeměnila na amoniak a uvolnila se do atmosféry. V Burkině Faso v západní Africe byl po tři roky zkoumán vliv aplikace moči na výnos rajčat, lilku a gombý. Produkce rajčat, lilku a gombý, které byly hnojené močí byla téměř stejná jako u zeleniny hnojené minerálními hnojivy (Kundu et al. 2022).

V jedné ze studií byla ke snížení těchto negativních vlivů žlutá voda míchána s kávovými odpadními vodami. Žlutá voda a odpadní voda z výroby kávy se vzájemně neutralizují, obsahují přídavné živiny a minimalizují míru zasolení, ke kterému dochází při jejich odděleném používání. Studie byla provedena na zemědělské půdě, kde bylo pěstováno zelí a jejím cílem bylo prozkoumat vliv žluté vody smísené s odpadními vodami z výroby kávy na půdní vlastnosti ve srovnání s využitím syntetického hnojiva. Využití této směsi snížil proces acidifikace půdy na rozdíl od využití samotné žluté vody, která způsobuje okyselení půdy, které může být způsobeno akumulací dusitanů a sníženou nitrifikační aktivitou v důsledku volného amoniaku. Půda ošetřena syntetickými hnojivy byla kyselější než půda ošetřená směsí žluté vody a odpadními vodami z výroby kávy v poměru 1:2. Vzhledem k tomu, že kyselost půdy je jedním z faktorů, které omezují produkci, bývá půda doplněna kompostem či vápnem k minimalizaci kyselosti a zvýšení úrodnosti. Pro tento účel může směs žluté vody a odpadních vod z výroby kávy nahrazovat vápno a kompost, jelikož je snadno dostupná s nízkými náklady a její zpracování vyžaduje méně času. Aplikace směsi žluté vody a odpadních vod z výroby kávy v poměru 1:2 významně ovlivňuje některé parametry půdy ve srovnání s nehnojenou půdou a půdou, na níž byla využita syntetická hnojiva. Zajistila optimální výnos a zvýšila obsah organické hmoty, živin a míru zasolení. Tato směs by tedy mohla být pro pěstování a minimalizaci koncentrací solí výhodnější než použití samotné žluté vody (Alemayehu et al. 2021).

Vhodnost zředěné moči jako hnojiva byla zkoumána také v Zimbabwe pro růst špenátu a kukuřice, které byly vysazeny v pěstebních nádobách. Bylo zjištěno, že jak špenát, tak kukuřice při hnojení zředěnou močí významně rostly ve srovnání s těmi, které nebyly hnojeny vůbec. Nejlepší poměr ředění moči a vody byl zaznamenán mezi 1:3 a 1:5. Jiná studie provedená v Malawi vykazala pětikrát vyšší produkci řepky a tři a půl krát vyšší produkci špenátu v pěstebních nádobách s hnojivem zředěné moči s vodou v poměru 3:1 ve srovnání s produkcí, kde byla použita pouze voda. Tato studie zároveň uvedla, že průměrná hmotnost kukuřičného klasu hnojeného močí byla přibližně 35krát vyšší než v případě kukuřice nehnojené. Ve Švédsku se zkoumala velkoplošná aplikace moči jako hnojiva na přibližně 2 ha pole s ječmenem. Moč byla shromažďována 2 - 3krát ročně a před jejím použitím na poli byla skladována ve 3 nádržích o objemu 150 m<sup>3</sup> po dobu 6 měsíců. Jako hnojivo lze použít jak zředěnou, tak koncentrovanou moč. Úroveň jejího zředění závisí na množství dusíku, který je potřeba dodat (Kundu et al. 2022).

## 6.4 Další možnosti využití

### 6.4.1 Čištění odpadních kontejnerů

Kontejnery na tuhý komunální odpad se pravidelně umývají. Toto čištění je nezbytné k odstranění veškerých zbytků pevných látek a tekutin v nádobách na odpad. Vykonávají to obvykle zvláštní vozidla, vybavená speciálním zařízením následující bezprostředně za vozidly, která popelnice vyprazdňují. V Itálii se ve městě Brescia za jeden pracovní den umyje přibližně 170 kontejnerů, přičemž na každý z nich se spotřebuje přibližně 30 litrů vody. Potřeba vody pro pokrytí potřeb celého pracovního dne tedy činí přibližně 5 000 litrů vody. Odpadní voda z mytí popelnic je obvykle skladována ve stejném vozidle a poté je vypouštěna a čištěna v komunální ČOV. Snížení objemu mycí vody lze dosáhnout pomocí upraveného čistícího procesu složeného z procesu koagulace a flokulace, následované UV dezinfekcí. Tento proces by mohl umožnit opětovně využít vyčištěnou vodu z mytí kontejnerů na více mycích cyklů (Vaccari et al. 2013).

V Itálii není zvláštní předpis pro opětovné využití vyčištěných odpadních vod v rámci stejné výrobní činnosti, například ani směrnice Světové zdravotnické organizace nestanovuje specifické normy pro mytí kontejnerů. Obecně platí, že opětovné využití odpadní vody je možné, pokud je zajištěna vhodná mikrobiologická kvalita vyčištěné odpadní vody. K mytí kontejnerů je nutné zajistit především nízký obsah mikroorganismů v mycí vodě, čehož lze dosáhnout pouze účinnou dezinfekcí. Italská společnost AEP nedávno vytvořila prototyp mycího vozu vybaveného čistícím zařízením tvořeným koagulačně-flokulačním mechanismem, následovaným UV dezinfekcí. Cílem tohoto prototypu je umožnit čištění a recirkulaci vyčištěné odpadní vody k mytí dalších kontejnerů. Výhodou tohoto systému by bylo snížení rozměrů vozidla, a především spotřeby vody (Vaccari et al. 2013).

Účinnost UV dezinfekce závisí na zákalu odpadní vody a průchodnosti UV záření, z tohoto důvodu je třeba předčištění ve formě koagulačně-flokulačního procesu. Při tomto procesu vznikají pevné látky, které lze odstranit sedimentací. Kal, který je odčerpaný ze dna usazovací nádrže lze snadno skladovat a odvodnit ve filtračním vaku umístěném ve vozidle. Čistou vodu odtékající z vaku lze skladovat v nádrži spolu s odpadní vodou z usazovací nádrže a po dezinfekci UV zářením ji opět využít. V případě opětovného využití odpadní vody by měly být dávky UV záření vyšší než 40-45 mJ/cm<sup>2</sup>, aby se zabránilo opětovnému množení mikroorganismů po dezinfekční úpravě (Vaccari et al. 2013).

Testování prototypu probíhalo v laboratorním měřítku a prokázalo, že proces koagulace a flokulace lze použít k čištění odpadní vody vznikající při mytí kontejnerů, aby se snížil zákal a zvýšila se propustnost UV záření v odpadní vodě. Účinnost prototypu, zejména pokud jde o hubení mikroorganismů, je nutno ještě podrobit dalšímu zkoumání. Předběžná analýza nákladů prokázala, že navrhované řešení je mnohem levnější než vypouštění odpadní vody do ČOV. Zároveň je třeba posoudit celkovou udržitelnost tohoto systému, jelikož se využívají chemické látky, jejichž výroba má dopad na životní prostředí a procesem vzniklý chemický kal je třeba likvidovat na skládce. K zavedení tohoto systému je ještě zapotřebí celkové zhodnocení, zda negativní faktory tohoto systému mohou být vyváženy klady, zejména sníženou spotřebou paliva a vody (Vaccari et al. 2013).

## 6.5 Možnost výroby pitné vody z odpadní vody

Celosvětová poptávka po pitné vodě rychle roste. Dostupnost čisté vody pro pitné i další účely je pro společnost zásadní. Přírodní podzemní a povrchová voda je dnes široce využívána pro zemědělství i průmyslovou výrobu. Vzhledem k tomu je v současné době velká pozornost věnována možnostem čištění odpadních vod či odsolování mořské vody, které mohou umožnit výrobu pitné vody (Patel et al. 2021). Technologiemi čištění vod mohou být například destilace, membránová kapacitní deionizace, systémy odpařování za pomoci solární energie či reverzní osmóza (Adigüzel et al. 2023).

Jelikož dosud neexistuje univerzální řešení pro mikrobiální úpravu pitné vody, jsou zkoumány a vyvíjeny bezpečnější, ekonomičtější a účinnější technologické inovace pro úpravu vody. Některé metody jsou zcela nové, jiné vznikají jako varianty konvenčních technologií (Pichel et al. 2019).

Zároveň je třeba zvážit, jaký postoj by k takovému zdroji pitné vody měla společnost. Přestože bylo zaznamenáno pozitivní mínění ohledně využívání vyčištěné odpadní vody k mnoha účelům, nejméně přijímanými možnostmi byly právě takové, které se přímo týkaly lidí a jejich zdraví, konkrétně pitné vody. Zvýšení informovanosti široké veřejnosti pomocí různých platforem ohledně této problematiky může podpořit její přijetí (Baawain et al. 2020).

### 6.5.1 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza je uznávaná a účinná membránová technologie pro odsolování i výrobu pitné vody a je široce využívána v oblastech s nedostatečnými zásobami vody, jako prostředek k odsolování mořské vody. Jedná se o tlakově řízený proces, při kterém polopropustná membrána nepropouští ionty, bílkoviny a organické chemikálie přítomné v napájecí vodě. Ačkoli lze reverzní osmózou odstranit i mikroorganismy, pro toto použití se nedoporučuje. Může totiž dojít k poškození membrány v důsledku nepoddajných biofilmů, které bakterie vytvářejí na povrchu membrány. Membrány v tomto případě vyžadují chemicky vyčistit nebo je zcela vyměnit, což snižuje provozní a nákladovou výhodnost tohoto procesu. Proces zároveň spotřebovává vysoké množství elektrické energie (Pichel et al. 2019).

### 6.5.2 Elektrodialýza s bipolárními membránami

Technologie využívající proces tříkomorové elektrodialýzy s bipolárními membránami byla zkoumána studií, ve které bylo cílem vyrobit pitnou vodu z vody z Černého moře. Byly v ní použity komerčně vyráběné bipolární aniontové a kationtové výměnné membrány a mořská voda. Bipolární membránová elektrodialýza používá při separaci roztoky obsahující současně aniontovou a kationtovou složku. Tento proces je založen na membránových vrstvách, v nichž jsou uspořádány membrány na výměnu iontů spolu s bipolárními membránami. Bipolární membrány jsou složeny ze dvou různých pólů, kationtového a aniontového. Voda, prostupující touto membránou, rozděluje molekuly vody na  $H^+$  ionty a  $OH^-$  ionty pomocí rozdílu potenciálů. Ionty vápníku přítomné v mořské vodě se snadno vysrážejí během procesu odsolování (Adigüzel et al. 2023).

Voda z Černého moře obsahuje mnoho organických sloučenin. Je vystavena značnému antropogennímu zatížení v důsledku vnášení organických polutantů. Do mořských vod a

dalších vodních útvarů jsou navzdory omezením vypouštěny tisíce organických znečišťujících látek, které negativně ovlivňují biologickou rozmanitost ve vodách a mají vliv také na lidské zdraví. Odstraňování organických znečišťujících látek vyžaduje další technologické postupy, což znamená vyšší náklady na celý proces čištění.

Vzhledem k tomu, že mořská voda obsahovala několik různých solí, jako vedlejší produkty procesu vznikly slabé kyseliny a slabé zásady. Během procesu byly organické látky odstraněny působením intracelulární elektrické síly bez jakékoli další úpravy. Výsledky z této studie potvrzují účinnost tohoto procesu a udávají, že byly procesem splněny standardní limity pro pitnou vodu. I jiné studie prokazují, že metoda elektrodialýzy s bipolárními membránami má výhody, jimiž jsou nízká spotřeba energie, vysoká kvalita vody po vyčištění a žádné druhotné znečištění. Jedná se ovšem o drahou metodu vzhledem k vysokým investičním nákladům na pořízení bipolárních membrán. Celkové náklady by bylo možné snížit dodáním potřebné energie z alternativního zdroje, například využitím solární energie (Adigüzel et al. 2023).

## 7 Závěr

V této práci bylo cílem zpracovat ucelený průřez možnostmi nakládání s vyčištěnými odpadními vodami s ohledem na jejich vlastnosti a možná rizika. Vyčištěná odpadní voda má široký potenciál využití. Různé způsoby využití odpadní vody jsou spojeny s různými procesy čištění a dočišťování, aby bylo dosaženo adekvátní kvality vody pro daný účel.

Využívání vyčištěné odpadní vody pro zavlažování zemědělské půdy může snížit spotřebu konvenčních hnojiv, jelikož odpadní voda obsahuje řadu živin, které zlepšují půdní úrodnost a podporují růst rostlin. Zároveň se tím snižují ekonomické náklady na jejich nákup. Na druhou stranu kromě živin mohou i po vyčištění obsahovat vyšší obsah solí, určité množství patogenů a toxických látek, které se mohou kumulovat v rostlinách nebo v půdě. Pokud bychom chtěli vyčištěnou odpadní vodu využívat na zavlažování, je třeba pečlivě zvážit výběr konkrétních plodin, typ půdy a zvolit vhodný zavlažovací systém. Nejvhodnějším zavlažovacím systémem je podpovrchová kapková závlaha.

Potenciál využití má vyčištěná odpadní voda jako procesní voda v průmyslu. V papírenském průmyslu lze v papírnách vyrábějících recyklovaný papír vytvořit uzavřené vodní okruhy a v nich procesní vodu recyklovat. Voda může být využita například k čištění výrobních strojů, ředění či chemickému barvení. Z důvodu komplikovanějšího způsobu výroby a specifitějším parametrům, zatím nelze tyto uzavřené okruhy vody zavést ve výrobě jiných druhů papíru. Vyčištěné odpadní vody z potravinářského průmyslu jsou využívány zejména jako procesní vody, na čištění strojů, ve formě chladicí vody, jako voda do kotlů či k proplachování. V jednotlivých průmyslových odvětvích je třeba volit metody čištění podle konkrétních parametrů znečištění. Z masných a mlékárenských výroben mohou být odpadní vody čištěny metodou elektrokoagulace a následně je možno je použít k zavlažování z důvodu jejich poměrně vysokého obsahu živin. Tento způsob ovšem vyžaduje přísné dodržení legislativy a zajištění potenciálních rizik vody. Pokud by odpadní voda byla čištěna vhodnou membránovou metodou, ideálně s procesem reverzní osmózy, je možné ji vyčistit až do kvality pitné vody.

Odpadní vody z domácností, hnědé vody, žluté vody a šedé vody, mají každá své specifické složení. Pokud bychom je dokázali získat separovaně, nabízí se širší možnost jejich využití, než pokud se mísí a společně čistí v ČOV. K separaci hnědých a žlutých vod se mohou využít suché nebo splachovací toalety, které jsou konstruovány takovým způsobem, že umožňují oddělovat moč a výkaly. Fekálie obsažené v hnědých vodách mohou být využívány jako hnojivo, jelikož obsahují řadu důležitých živin pro rostliny. Zároveň mohou být biologicky přeměněny na bioplyn, který lze následně využít k vaření, ohřevu vody nebo ho přetvořit na elektřinu. Žluté vody obsahují vysoký podíl dusíku, fosforu a draslíku, a proto je značný zájem využívat je jako zdroj živin v zemědělství. Pokud by se získávaly přímo ze zdrojů, významně by se snížila potřeba nitrifikačních a denitrifikačních procesů v ČOV, čímž by se uspořily ekonomické náklady na čištění. Obavy zemědělců a společnosti z využívání hnědých a žlutých vod se týkají zejména zdravotního rizika. Žluté vody mohou obsahovat residua léků, která by musela být před jejím využitím odstraněna procesy, které jsou velmi nákladné. Zároveň by bylo nutné vybudovat novou infrastrukturu, aby mohly být žluté a hnědé vody oddělovány, což by znamenalo další finanční zátěž. Na druhou stranu v nově budovaných bytech, domech a sídlištích by to mohla být možnost, jak snížit spotřebu vody. Šedé vody jsou znečištěny méně,

přesto jejich možnosti opětovného využití nejsou příliš široké. Nejsou příliš vhodné jako vody k zavlažování, jelikož mají vyšší koncentrace solí a mohou obsahovat uměle syntetizované chemické látky, které jsou rizikové pro lidské zdraví i pro vodní ekosystémy. Nejčastěji je šedá voda využívána jako splachovací voda v toaletách.

Technologií čištění odpadních vod na výrobu pitné vody je řada, jsou ovšem dosud značně nákladné pro jejich širší zavedení. V menších oblastech, kde by byla technologie přizpůsobena konkrétnímu znečištění odpadní vody, by to však mohlo být řešením nedostatku pitné vody.

Využití vyčištěné odpadní vody je aktuálně široce diskutovaným a řešeným tématem, díky čemuž je k dispozici stále více studií o možném využívání vyčištěných odpadních vod, které zároveň poskytují i více údajů ohledně jejich nevýhod a potenciálních rizik. Vědecká i politická obec společně s mezinárodními organizacemi jsou čím dál více nakloněny jejich využívání. Výzvami stále zůstává technologická nedokonalost a nákladnost některých čistících procesů, legislativní úprava v rámci jednotlivých zemí a mínění široké veřejnosti.

## 8 Literatura

Adámek Z, Helešic J, Maršálek B, Rulík M. 2010. Aplikovaná hydrobiologie. 2. rozšířené přepracované. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vod, České Budějovice.

Adigüzel M, Erkmen J, Tolga MY. 2023. Application and optimization of bipolar membrane process for drinking water production from Black Sea. *Journal of Cleaner Production* **408** (136814) DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136814.

Alemayehu YA, Asfaw SL, Terfie TA. 2021. Reusing urine and coffee processing wastewater as a nutrient source: Effect on soil characteristics at optimum cabbage yield. *Environmental Technology & Innovation* **23** DOI:10.1016/j.eti.2021.101571.

Ayou DS, Ega HM, Coronas A. 2022. A feasibility study of a small-scale photovoltaic-powered reverse osmosis desalination plant for potable water and salt production in Madura Island: A techno-economic evaluation. *Thermal Science and Engineering Progress*. **35** DOI:10.1016/j.tsep.2022.101450.

Baawain MS, Al-Mamun A, Omidvarborna H, Al-Sabti A, Choudri BS. 2020. Public perceptions of reusing treated wastewater for urban and industrial applications: challenges and opportunities. *Environment, Development and Sustainability* **22** (3) DOI:10.1007/s10668-018-0266-0.

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.

Beránková M. 2016. Odpadní voda – odpad nebo poklad? *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* **58** (2) DOI:10.46555/VTEI.2016.01.006.

Beránková M, Vološinová D, Stejskalová L, Čejka E. 2017. Vypustit nebo znovu využít? *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* **59** (3) DOI:10.46555/VTEI.2017.03.005.

Bishop T, Aigner Ch, Fenner R. 2016. Sustainable water. ICE Publishing, London.

Booker JF. 2022. Economics of water productivity and scarcity in irrigated agriculture. 241-261 in Letcher TM, editor. *Water and Climate Change*. Elsevier, Cambridge.

Crini G, Lichtfouse E. 2019. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters* **17** (1) DOI:10.1007/s10311-018-0785-9.



Čejková J, Kólová A, Kučera J, Váňa M, Holba M, Polášek P. 2021. Terénní testování prototypu separátoru k dočištění srážkových vod. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* **63** (4) DOI:10.46555/VTEI.2021.05.002.

Český hydrometeorologický ústav. 2021. *Hydrologická ročenka České republiky 2021*. nakladatelství Český hydrometeorologický ústav, Praha.

Deka A, Katak R, Simha P. 2022. Recycling source-separated human faeces. 341-352 in Mungray A, Mungray A, Sonawane S, Sonawane S, editors. *Novel Approaches Towards Wastewater Treatment and Resource Recovery Technologies*. Elsevier, Cambridge.

Drinan JE, Spellman F. 2018. *Water and Wastewater Treatment*. CRC Press, London.

European Environment Agency. 2018. *European waters: Assessment of status and pressures* Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Evropská agentura pro životní prostředí. 2018. *Voda je život: Evropské řeky, jezera a moře čelí tlakům spojeným se znečištěním, nadměrným využíváním a změnou klimatu. Jak můžeme zajistit udržitelné využívání tohoto klíčového zdroje?* Úřad pro publikace Evropské Unie, Kopenhagen.

Garnier C, Guiga W, Lameloise ML, 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.jfoodeng.2022.111397.

Ghaitidak DM, Yadav KD. 2013. Characteristics and treatment of greywater—a review. *Environmental Science and Pollution Research*. **20** (5) DOI:10.1007/s11356-013-1533-0.

Hafez A, Khedr M, Gadallah H. 2007. Wastewater treatment and water reuse of food processing industries. Part II: Techno-economic study of a membrane separation technique. *Desalination* **214** (1-3) DOI:10.1016/j.desal.2006.11.010.

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

Hashem MS, Xuebin QI. 2021. Treated Wastewater Irrigation—A Review. *Water* **13** (11) DOI: 10.3390/w13111527.

Ikematsu M, Kaneda K, Iseki M, Yasuda M. 2007. Electrochemical treatment of human urine for its storage and reuse as flush water. **382** (1) DOI:10.1016/j.scitotenv.2007.03.028.

IPCC. 2014. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the*

Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Jahren P, Sui T. 2017. How Water Influences Our Lives. Springer, Singapore.

Janosova B, Miklankova J, Hlavinek P, Wintgens T. 2006. Drivers for wastewater reuse: regional analysis in the Czech Republic. *Desalination* **187** (1-3) DOI:10.1016/j.desal.2005.04.071.

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).

Kanae S. 2009. Global Warming and the Water Crisis. *Journal of Health Science* **55** (6), DOI:10.1248/jhs.55.860.

Kundu S, 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** (2) DOI:10.1016/j.jece.2022.107146.

Letcher TM. 2022. Introduction: water, the vital chemical. 3-11 in Letcher TM, editor. *Water and Climate Change*. Elsevier, Cambridge.

Letcher TM. 2022. The root causes of climate change and the role played by water. 13-25 in Letcher TM, editor. *Water and Climate Change*. Elsevier, Cambridge.

Novoa V, Rojas O, Ahumada-Rudolph R, Arumí JL, Munizaga J, De la Barrera F, Cabrera-Pardo JR, Rojas C. 2023. Water footprint and virtual water flows from the Global South: Foundations for sustainable agriculture in periods of drought. *Science of The Total Environment* **869** (161526) DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.161526.

Núñez J, Yeber M, Cisternas N, Thubaut R, Medina P., Carrasco C. 2019. Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *Journal of Hazardous Materials* **371** (705-711) DOI:10.1016/j.jhazmat.2019.03.030.

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.

Patel SK, Singhi D, Devnani GL, Sinha S, Singh D. 2021. Potable water production via desalination technique using solar still integrated with partial cooling coil condenser. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **43** (100927) DOI:10.1016/j.seta.2020.100927.

Pecháček J. Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení. 2019. Available from [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16\\_Chemie-aekologie\\_43-44/44\\_MMP/081\\_cisteni-odpadnich-vod---Pechacek.Pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-aekologie_43-44/44_MMP/081_cisteni-odpadnich-vod---Pechacek.Pdf) (accessed 04 2019).

Pichel N, Vivar M, Fuentes M. 2019. The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere* **218** (1014-1030) DOI:10.1016/j.chemosphere.2018.11.205.

Pitter P. 2015. *Hydrochemie. 5. aktualizované a doplněné vydání*. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha.

Plotnykova H, Koepfel S, Tiefenauer-Linardon S, De Strasser L. 2020. The United Nations world water development report 2020: water and climate change. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, France.

Priyadarshini I, Alkhayat A, Obaid AJ, Sharma R. 2022. Water pollution reduction for sustainable urban development using machine learning techniques. *Cities* **130** (103970) DOI:10.1016/j.cities.2022.103970.

Quadir M. 2022. Potential of municipal wastewater for resource recovery and reuse. 263-271 in Letcher TM, editor. *Water and Climate Change*. Elsevier, Cambridge.

Randall DG, Naidoo V. 2018. Urine: The liquid gold of wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **6** (2) DOI:10.1016/j.jece.2018.04.012.

Ren X, Zhang S, Miao H. 2023. Biological stability of reclaimed greywater reused for flushing household toilets. *Journal of Cleaner Production* **387** (135863) DOI:10.1016/j.jclepro.2023.135863.

Rusko M, et al. 2012. *Globálne existenciálne riziká: Zborník príspevkov z vedeckej konferencie so zahraničnou účasťou 29. - 30. november 2012*, Bratislava. Strix, Žilina.

Rustum R, Adeloye AJ, Dau Q. 2022. Water resource planning and climate change. 27-40 in Letcher TM, editor. *Water and Climate Change*. Elsevier, Cambridge.

Říhová Ambrožová J. 2003. *Aplikovaná a technická hydrobiologie*. Vyd. 2. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha.

Shahady T. 2022. Agricultural water pollution. 365-382 in Letcher TM, editor. Water and Climate Change. Elsevier, Cambridge.

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.

Smith PG, Scott JS. 2005. Dictionary of water and waste management. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Stockholmshem & HSB National Federation. 2000. Urine Separation - Closing the Nutrient Cycle: Final Report of the R&D Project: Source-Separated Human Urine - A Future Source of Fertilizer for Agriculture in the Stockholm Region. AB Bumling Wettrén & Bergström, Stockholm.

Šalanda P. 2020. Využití přečištěných odpadních vod pro kapkovou závlahu [diplomová práce]. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí, Praha.

Šálek J. 2012. Voda v domě a na chatě: využití srážkových a odpadních vod. Grada, Praha.

Švehla P, Tlustoš P, Balík J. 2007. Odpadní vody. Vyd. 2., přeprac. Česká zemědělská univerzita, katedra agrochemie a výživy rostlin, Praha.

Švehla P. 2012. Cvičení z předmětu Čištění odpadních vod. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agrochemie a výživy rostlin, Praha.

The United Nations. 2020. The United Nations world water development report 2020: water and climate change. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, France.

Vaccari M, Gialdini F, Collivignarelli C. 2013. Study of the reuse of treated wastewater on waste container washing vehicles. *Waste Management* **33** (2) DOI:10.1016/j.wasman.2012.10.004.

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.ese.2023.100277.

Vannevel R. 2017. Learning from the past: Future water governance using historic evidence of urban pollution and sanitation. *Sustainability of Water Quality and Ecology* **9-10** (27-38) DOI:10.1016/j.swaqe.2016.09.002.

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

Vojtěchovská Šrámková M, Wanner J. 2014. Opětovné využití odpadní vody a legislativa České republiky. *Vodní hospodářství* **64** (10).

Vojtěchovská Šrámková M, Diaz-Sosa V, Wanner J. 2018. Experimental verification of tertiary treatment process in achieving effluent quality required by wastewater reuse standards. *Journal of Water Process Engineering* **22** (41-45) DOI:10.1016/j.jwpe.2018.01.003.

Vondra M, Bobák P, Máša V. 2015. Využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* **57** (6) DOI:10.46555/VTEI.2015.09.005.

Zhongming Z, et al. 2021. The United Nations world water development report 2021: valuing water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, France.

Zidek M. 2017. Posouzení budoucího vývoje zpracování kalu na ČOV Modřice [diplomová práce]. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav potravinářské, zemědělské a environmentální techniky, Brno.