



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

HODNOCENÍ ÚČINNOSTI KOŘENOVÝCH ČISTÍREN PROSTŘEDNICTVÍM TESTŮ EKOTOXICITY

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ROOT TREATMENT PLANTS VIA ECOTOXICITY TESTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Konečná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. MVDr. Helena Zlámalová Gargošová, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1574/2020 Akademický rok: 2020/21
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí
Studentka: **Kateřina Konečná**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Vedoucí práce: **doc. MVDr. Helena Zlámalová Gargošová, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Hodnocení účinnosti kořenových čistíren prostřednictvím testů ekotoxicity

Zadání bakalářské práce:

1. Vypracovat literární rešerši zaměřenou na problematiku využití a účinnosti kořenových čistírenodpadních vod.
2. Vybrat vhodné zástupce testů ekotoxicity pro hodnocení účinnosti kořenových čistíren.
3. Odebrat reálné vzorky z různých technologických stupňů kořenové čistírny odpadních voda podrobit je ekotoxikologickým testům.
4. Získané výsledky vhodně vyhodnotit a diskutovat.

Termín odevzdání bakalářské práce: 6.8.2021:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Kateřina Konečná

doc. MVDr. Helena Zlámalová
Gargošová, Ph.D. student(ka)
vedoucí práce

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ANOTACE

Tato bakalářské práce se zaměřuje na hodnocení účinnosti kořenových čistíren pomocí vhodně zvolených testů ekotoxicity. Pro tyto účely byly využity ekotoxikologické testy v akvatickém uspořádání, konkrétně s planktonním organismem *Thamnocephalus platyurus* a rostlinou *Lemna minor*. Hodnocení se provádělo na obecní kořenové čistírně, která čistí vodu pro 955 ekvivalentních obyvatel. Výsledky testů s *T. platyurus* potvrdily, že kořenová čistírna vodu dostatečně zbavuje akutní toxicity. Pro dva vzorky byly stanoveny hodnoty LC₅₀, pro přítok 213,71 ml/l a pro usazovací nádrž 388,20 ml/l. Na odtoku již nešlo tyto hodnoty určit pro nízký ekotoxikologický efekt takto ošetřené vody. U testů s organismem *L. minor* byly vypočteny hodnoty IC₅₀ taktéž u prvních dvou vzorků. U vzorku č. 1 byla hodnota IC₅₀ vypočtena na 311,25 ml/l, u vzorku č. 2 na 963,35 ml/l. Nicméně na základě testů přímé toxicity vod s *L. minor* lze i v případě tohoto organismu potvrdit, dobrý čistící efekt této kořenové čistírny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kořenová čistírna, ekotoxikologie, *Thamnocephalus platyurus*, *Lemna minor*

ANNOTATION

This bachelor thesis focuses on the evaluation of the efficiency of root treatment plants using appropriately selected ecotoxicity tests. For these purposes, ecotoxicological tests in an aquatic arrangement were used, specifically with the planktonic organism *Thamnocephalus platyurus* and the plant *Lemna minor*. The evaluation was performed at a municipal root treatment plant, which treats water for 955 equivalent inhabitants. The results of tests with *T. platyurus* confirmed that the root treatment plant sufficiently relieves acute toxicity of water. LC₅₀ values were determined for two samples, 213.71 ml / l for the inflow and 388.20 ml / l for the settling tank. At the outflow, these values could no longer be determined due to the low ecotoxicological effect of the water thus treated. For tests with *L. minor*, IC₅₀ values were also calculated for the first two samples. For Sample No. 1, the IC₅₀ value was calculated to be 311.25 ml / l, for Sample No. 2 to 963.35 ml / l. However, on the basis of tests of direct toxicity of waters with *L. minor*, it is possible to confirm even in the case of this organism, a good cleansing effect of this root treatment plant.

KEY WORDS

Root treatment plant, ecotoxicology, *Thamnocephalus platyurus*, *Lemna minor*

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

Poděkování

Ráda bych poděkovala doc. MVDr. Heleně Zlámalové Gargošové, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Také bych ráda poděkovala Ing. Petře Procházkové, za odbornou pomoc při práci v laboratoři.

Obsah

| | | |
|--------------|--|----|
| 1 | Úvod | 7 |
| 2 | Teoretická část | 8 |
| 2.1 | Kořenové čistírny | 8 |
| 2.1.1 | Historie používání kořenových čistíren | 8 |
| 2.1.2 | Principy čistících procesů | 9 |
| 2.1.3 | Schématické uspořádání kořenových čistíren | 10 |
| 2.1.4 | Kvalita vod čistěných v kořenových čistírnách | 15 |
| 2.1.5 | Aspekty čištění vody | 15 |
| 2.1.5.1 | Předčištění | 15 |
| 2.1.5.2 | Filtrační kořenové pole | 16 |
| 2.1.5.3 | Dimenzování filtračních polí | 16 |
| 2.1.5.4 | Distribuce odpadní vody | 16 |
| 2.1.6 | Výhody a nevýhody | 17 |
| 2.1.7 | Účinnost čištění | 20 |
| 2.1.7.1 | Organické látky | 20 |
| 2.1.7.2 | Bakteriální znečištění | 20 |
| 2.1.7.3 | Nerozpuštěné látky | 21 |
| 2.1.7.4 | Fosfor | 21 |
| 2.1.7.5 | Dusík | 21 |
| 2.1.7.6 | Těžké kovy | 22 |
| 2.1.7.7 | Posouzení účinnosti | 22 |
| 2.1.8 | Údržba a revitalizace | 23 |
| 2.1.9 | Vegetace kořenových čistíren | 23 |
| 2.1.9.1 | Nejčastěji využívané rostlinné druhy | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.2 | Ekotoxikologie..... | 27 |
| 2.2.1 | Ekotoxikologie v ochraně životního prostředí..... | 27 |
| 2.2.2 | Ekotoxikologické testy v akvatickém uspořádání..... | 27 |
| 3 | Experimentální část..... | 29 |
| 3.1 | Kořenová čistírna..... | 29 |
| 3.2 | Test akutní toxicity na organismu <i>Thamnocephalus platyurus</i> | 30 |
| 3.3 | Test na rostlině <i>Lemna minor</i> | 31 |
| 4 | Výsledky a diskuze..... | 33 |
| 4.1 | Test akutní toxicity na <i>Thamnocephalus platyurus</i> | 33 |
| 4.2 | Test na rostlině <i>Lemna minor</i> | 37 |
| 5 | Závěr..... | 43 |
| 6 | Zdroje..... | 44 |

1 Úvod

Kořenové čistírny neboli „umělé mokřady“, se v České republice budují už od 90. let minulého století. Díky jejich schopnosti čistit odpadní vody jsou v dnešní době tyto čistírny relativně běžnou alternativou klasických mechanicko-biologických čistíren odpadních vod, kterou využívají zejména menší obce nebo samostatné domácnosti. Voda, která je vyčištěná pomocí kořenových čistíren se dále používá jako voda užitková. Domácnosti mají vyčištěnou vodu uchovanou v zahradním jezírku odkud je zpět přiváděna do domu, kde slouží například ke splachování. Kořenové čistírny, které čistí vodu pro menší obce, jsou většinou zakončeny rybníkem, odkud mohou vodu k dalšímu použití čerpat například hasiči.

Kořenové čistírny fungují na principu biologického odbourávání nečistot pomocí kořenového systému rostlin a mikroorganismů, které v něm žijí. Tyto procesy probíhají samovolně, proto pro zahájení čistícího procesu není třeba dodávat žádnou energii. Jedná se velkou výhodou oproti klasickým čistírnám, které pro svůj proces energii potřebují. Kořenové čistírny mimo jiné využívají také mechanického předčištění v podobě usazování nerozpuštěných látek a pevných nečistot.

Hodnocení účinnosti čištění kořenových čistíren je možno provádět nejenom klasickými analytickými metodami, které jsou zaměřené na hodnocení vybraných ukazatelů, ale je možné je doplnit i hodnocením toxických účinků na organismy akvatického ekosystému. Tato bakalářská práce je zaměřena na hodnocení účinnosti pomocí ekotoxikologických testů. K těmto testům byl využit organismus reprezentující drobné planktonní korýše žábřonožka – *Thamnocephalus platyurus*, a rostlina *Lemna minor*, česky okřehek menší.

2 Teoretická část

2.1 Kořenové čistírny

Jedná se o čistírny odpadních vod sloužící jako alternativní čistírenská technologie. Hlavním principem je pomalé, přirozené čištění vody díky vodním rostlinám, jenž mají na svých kořenech anaerobní bakterie, které vodu zbavují nečistot. Kořenové čistírny využívají pravidla „co jeden organismus vyloučí, druhý spotřebuje“, jelikož se k čištění vody používají mikroorganismy a vodní rostliny, které jsou schopny odpadní látky odbourávat a takto získávat potřebné živiny. Díky tomu, že kořenové čistírny využívají přirozených procesů není třeba přidávat žádné chemikálie, využívat vstupní energii, nebo mechanické procesy čištění. Z důvodu provozní nenáročnosti a nulové spotřeby energie, jsou tyto čistírny mnohem levnější než klasické. Snižuje se tím i potřeba údržby, jelikož nehrozí, že by se mechanické části mohly pokazit [1, 2, 3, 4].

2.1.1 Historie používání kořenových čistíren

O první umělé mokřady neboli kořenové čistírny, se pokoušeli v Německu již na začátku 50. let minulého století. Avšak, první kořenové čistírny byly zprovozněny až na přelomu 60. a 70. let minulého století v Německu a Nizozemí. Od té doby se jejich provoz rozšířil po celém světě a dnes jich je, jen v Evropě, na 60 000. Většinou se jedné o umělé mokřady s rostlinami.

V České republice byla do provozu uvedena první čistírna v polovině roku 1989 v Praze. Do roku 1991 byly v České republice pouze 4 kořenové čistírny. Tento malý počet byl způsoben skutečností, že nebyly na seznamu tzv. „doporučených způsobů čištění odpadních vod pro malé zdroje znečištění“. Kořenové čistírny tak neměly podporu od vodohospodářských orgánů, jelikož se nevěřilo, že tak jednoduchý systém dokáže řádně čistit odpadní vodu. Zejména toto byl důvod, proč jich bylo málo nejen v České republice, ale také po celém světě. Díky tomu, že byl tento „seznam“ v roce 1992 zrušen a obce se staly finančně nezávislými, počet čistíren tohoto typu v České republice vzrostl. Během pouhých 2 let (1992-1993) u nás vzniklo dalších 22 kořenových čistíren. V dnešní době se má všeobecně za to, že kořenové čistírny jsou vhodný způsob pro čištění odpadních vod pro malé zdroje znečištění ve většině evropských zemí [5, 6].

2.1.2 Principy čistících procesů

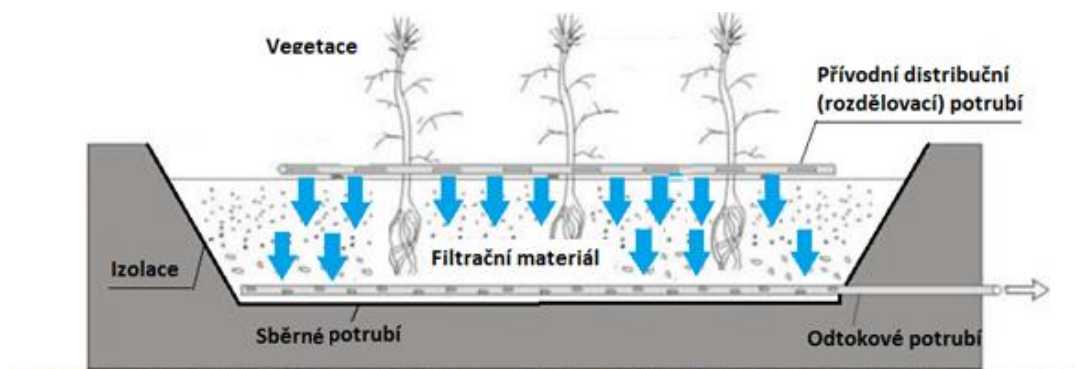
Jak již bylo výše uvedeno, principem je pomalé a přirozené čištění vody. Kořenové čistírny fungují stejně jako přirozené mokřady. Bahenní rostliny ve spolupráci s rozkládajícími mikroorganismy, jsou schopny za vhodných podmínek efektivně čistit vodu od odpadních látek. Mimo biologické procesy se v kořenových čistírnách uplatňují také procesy chemické, popř. fyzikální. Mezi základní předpoklady patří fakt, že odpadní voda, která protéká kořenovým filtrem musí být předčištěná (viz kapitola 2.1.5). Kořenový filtr obsahuje jemné kamínky, na jejichž povrchu se nachází již zmiňované bakterie, díky kterým čistící proces probíhá. Bakterie mají hlavní podíl na čištění vod. Odpadní látky obsažené ve vodě využívají pro svůj metabolismus jako zdroj energie. Rostliny, které se nachází na kořenovém filtru mají doplňkovou a podpůrnou funkci, dále z vody získávají živiny (zejména dusíkaté látky a fosfor), dodávají do vody kyslík a na jejich kořenech jsou bakterie. V zimě rostliny zajišťují tepelnou izolaci, díky tomu mohou čistírny fungovat bez problémů i v tomto ročním období [7, 8, 9, 10, 11].

Mezi základní čistící procesy v kořenových čistírnách patří:

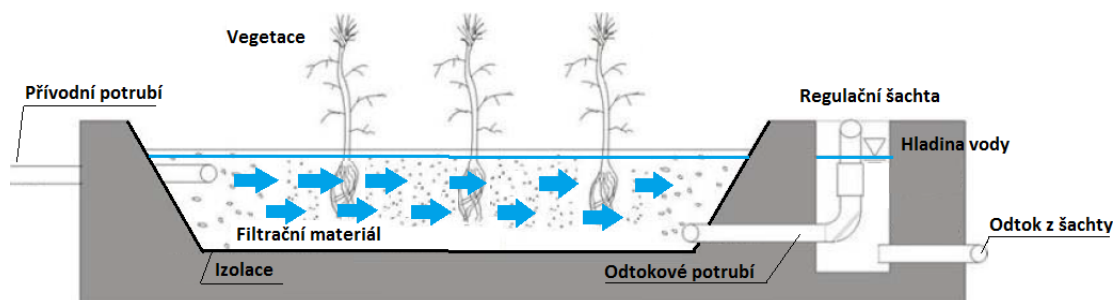
- Fyzikální procesy – sedimentace (usazování těžkých a nerozpustných látek), filtrace (oddělení pevné látky od kapalné nebo plynné přechodem přes porézní přepážku)
- Fyzikálně-chemické procesy – adsorpce (hromadění rozpuštěné látky, nebo látky plynné na povrchu adsorbentu)
- Chemické procesy – precipitace (neboli srážení), oxidace a redukce, rozklad méně stabilních látek
- Biologické procesy – probíhá rozklad dusíkatých organických látek pomocí mikroorganismů, nitrifikace (oxidace amoniaku na dusičnany), denitrifikace (redukce dusičnanů až na elementární dusík), dále zde probíhá rozklad řady dalších látek (např. tuků, celulózy, cukrů, škrobů, nebo také organických a anorganických sloučenin fosforu) [7, 8, 9, 10, 11].

2.1.3 Schématické uspořádání kořenových čistíren

Kořenové čistírny mohou být postaveny ve dvou základních uspořádání, vertikální (obrázek č. 1) nebo horizontální (obrázek č. 2). Jak je z daných obrázků patrné, rozdíl mezi nimi je ve směru přivádění odpadní vody. Ve vertikálním uspořádání je odpadní voda přiváděna pomocí distribučního (rozdělovacího) potrubí, díky kterému protéká přes filtrační materiál ve vertikálním směru. Voda není přiváděna kontinuálně, ale v tzv. pulzech. Z filtračního pole je odváděna sběrným potrubím. V tomto uspořádání není filtr zatopený vodou. Vertikální uspořádání se dnes používá častěji než horizontální. V horizontálním uspořádání je odpadní voda přiváděna přívodním potrubím, díky kterému voda protéká přes filtrační materiál v horizontálním směru. Z filtračního pole je odváděna pomocí odtokového potrubí. V tomto uspořádání musí mít filtrační pole stálou hladinu vody [12].



Obr. 1 – schéma vertikálního uspořádání kořenové čistírny



Obr. 2 – schéma horizontálního uspořádání kořenové čistírny

Kořenové čistírny at' již vertikální nebo horizontální obsahují zejména tyto části:

Odkalovací nádrž

Odkalovací nádrž se umísťuje na začátek systému. Dochází zde k prvotnímu předčištění ve formě sedimentace kalu. Odkalovací nádrž se používá u čistíren, které čistí černou vodu (voda z WC). U čistíren, které čistí vodu šedou (voda, která pochází z umyvadel, z kuchyně, z pračky, popř. při sprchování) nádrž být nemusí. U těchto čistíren je voda rovnou přiváděna do kořenového pole. Odkalovací nádrž je realizována jako tří nebo čtyřkomorový septik [13].

Pulzní šachta s rozdělovacím potrubím

Pulzní šachta s rozdělovacím potrubím se vyskytuje u kořenových čistíren s vertikálním průtokem a slouží k tomu, aby se voda přiváděná na vertikální filtr dávkovala rovnoměrně a s určitým rázem po celé ploše, a ne pouze v přední části. Potrubí je pro tento účel perforované [13].

Kořenový filtr

Do kořenového filtru je rovnoměrně přiváděna voda z pulzní šachty. Jedná se o mělkou nádrž, která má hloubku 60-80 cm, což představuje ideální hloubku pro prorůstání kořenů rostlin. Dno a stěny filtru jsou pokryté nepropustnou hydroizolační fólií, která zamezuje nechtěnému průsaku vody do půdy, čímž by mohlo dojít ke kontaminaci a znehodnocení podzemní vody. Na fólii jsou nasypány oblázky různých průměrů (cca 3-10 mm). Mezi oblázky musí být dostatečný prostor, aby se filtr neucpával. Hladina vody v kořenovém filtru by měla dosahovat 10 cm pod okraj. Díky tomu není čistírna zdrojem zápachu a nepřitahuje tak komáry, či jiný hmyz. V této části čistírny jsou také umístěny rostliny, na jejichž kořenech jsou usazeny mikroorganismy, které pomocí anaerobních procesů rozkládají nečistoty. Z toho důvodu musí kořenový filtr tvořit vhodné prostředí pro život mikroorganismů [13].

Regulační (kontrolní) šachta

Regulační šachta se umísťuje za kořenový filtr a slouží pro regulaci výšky hladiny v kořenovém filtračním poli. Hladina vody se musí regulovat v případě povodní nebo výrazných srážek. Jak již bylo výše uvedeno, je potřeba hladinu vody regulovat tak, aby byla 10 cm pod okrajem kořenového filtru. Z šachty je možno také odebírat vzorky vody pro případné kontrolní rozbor, kterými se hodnotí účinnost čistírny [13].

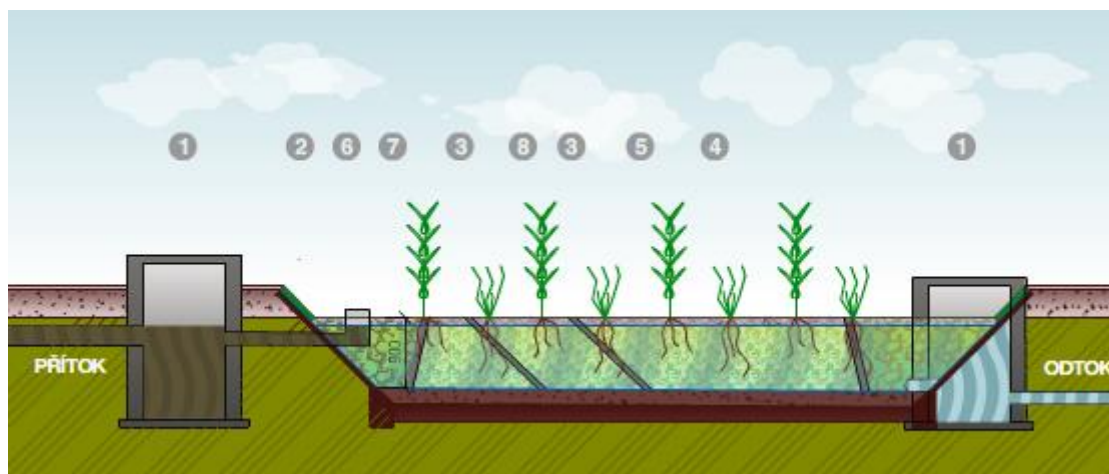
Zahradní jezírko

Zahradní jezírko je poslední stupeň kořenových čistíren. Slouží k zachycení, uchování a dočištění odpadní vody. Funkci zahradního jezírka může také plnit vsakovací jímka. Voda z jezírka (nebo jímky) se poté může použít v zahradě na zalévání, nebo v domě jako užitková voda (splachování) [13].

Rostliny

Rostliny se nachází v kořenovém filtračním poli. Rostliny nemají v kořenových čistírnách „pouze“ doplňkovou funkci. Jak již bylo uvedeno, odčerpávají z odpadní vody živiny, a naopak do filtru dodávají kyslík. Další funkce rostlin je izolační. Díky rostlinám může čistírna fungovat také v zimním období. Samozřejmě mají rovněž funkci čistící; vlhkomilné rostliny dokážou odbourat organické látky až na CO_2 a H_2O , některé rostliny zase z bílkovin získávají elementární dusík. Dále mají funkci estetickou. Do čistíren se sází rostliny, které jsou nejen užitečné, ale také okrasné. Zejména na jaře a v létě plní estetickou funkci [13, 14].

Jak již bylo uvedeno při vertikálním uspořádání je odpadní voda přiváděna do filtračního pole pomocí distribučního potrubí ve vertikálním směru a není přiváděna kontinuálně, ale v tzv. pulzech a v tomto uspořádání není filtr zatopený vodou. Podrobněji je čistírna s vertikálním uspořádání popsána dle schématu na obr. 3.



Obr. 3 – schéma kořenové čistírny s vertikálním průtokem

1 – odkalovací nádrž a regulační šachta – v této části čistírny dochází k usazování pevných částic, než voda dojde do kořenového systému. Dochází zde také k anaerobnímu (bez přítomnosti kyslíku) rozkladu látek.

2 – povrchová úprava svahů – povrchová úprava se u čistíček dělá proto, aby došlo ke zpevnění svahů. Dále díky tomu dochází k přirozenému propojení kořenového pole s okolní plochou.

3 – izolační fólie pro kořenové čistírny – tato fólie se nachází na dně čistírny. Materiál, ze kterého je vyrobena, bývá z polyetylenu nebo ze syntetického kaučuku.

4 – rostliny – můžou se použít např. blatouchy, sibiřský kosatec, rákos obecný, orobinec, zblocha vodní a mnoho dalších.

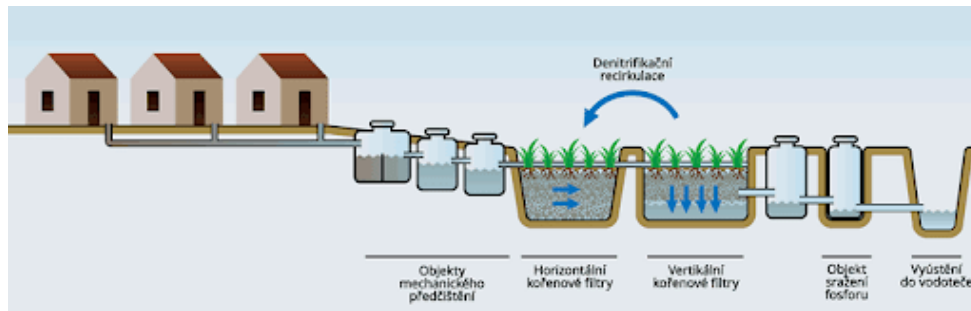
5 – filtrační štěrkové pole – zde dochází k hlavním procesům čištění, díky bakteriím. K procesům dochází na povrchu náplně.

6 – pulzní šachta s rozdělovacím potrubím – rozděluje vodu rovnoměrně po šířce celého kořenového filtru, pomocí otvorů.

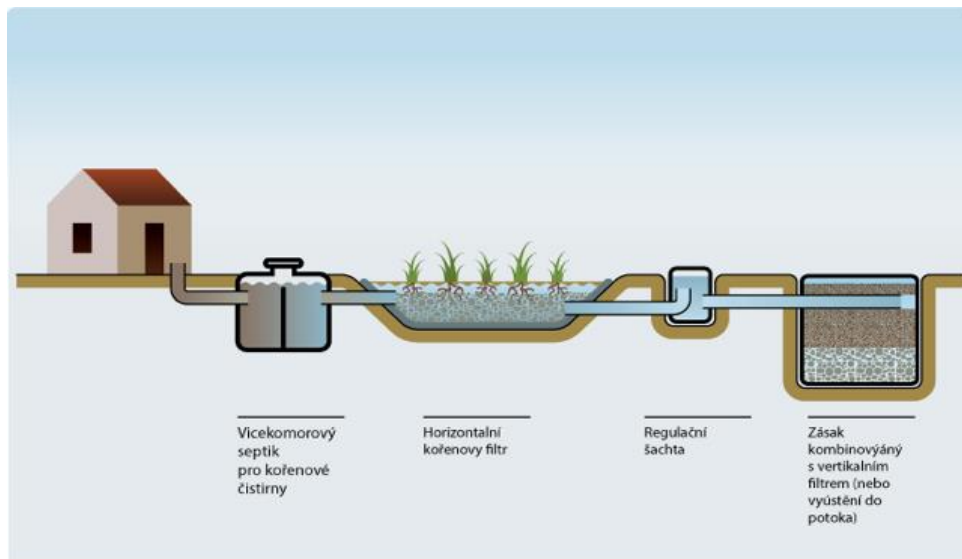
7 – rozdělovací štěrkový pás – díky pásu dochází k rovnoměrnému rozdělení přítoku vody.

8 – geotextilie na pískovém loži – jedná se o izolační fólii.

Voda je dopravena do odkalovací nádrže. Předčištěná voda poté nateče do pulzní šachty, zde se shromažďuje a pomocí plovákového ventilu (jedná se o mechanismus, který se používá pro plnění vodních nádrží, např. splachování záchodů) je vypuštěna potrubím na horizontální a poté na vertikální kořenový filtr, na kterém se nacházejí rostliny. Voda poté odtéká do akumulací jímky, v níž se voda hromadí a poté je vypuštěna do vodního toku (např. rybník) [7].



Obr. 4 – Základní schéma obecní kořenové čistírny



Obr. 5 – Schéma kořenové čistírny odpadních vod pro domácnost

2.1.4 Kvalita vod čištěných v kořenových čistírnách

Kořenové čistírny lze využít na čištění celé řady odpadní vod, ať už vod z domácností nebo z průmyslů. Čistírny jsou schopny z vod odstranit celou škálu znečišťujících chemických látek.

Nejčastěji se tyto čistírny používají pro čištění vod z domácností. Voda z domácností se dělí na dvě skupiny: na vodu šedou a černou. Šedá voda je voda z umyvadel, vany, sprchy, dřezu, myčky, pračky. Černá voda je voda z toalety (rovněž tato voda může být čištěna pomocí kořenové čistírny, ale jak bylo uvedeno v kap. 2.1.3 musí nejprve projít odkalovací nádrží [7, 8, 15].

Na obrázku č. 4 je popsána posloupnost čištění vod u obecní kořenové čistírny odpadních vod, na obrázku č. 5 je zobrazena posloupnost čištění vod pro domácnost.

2.1.5 Aspekty čištění vody

Zjednodušeně se dá říct, že čištění černé vody probíhá pomocí sedimentace (usazování) a rozkladu pevných částic ve vícekomorovém septiku. Poté je voda pomalu přepravována přes kořenový filtr. U vody šedé odkalovací nádrž být nemusí a voda teče rovnou do kořenového filtru. Ve skutečnosti je proces čištění vody pomocí kořenových čistíren složitější [7, 14].

2.1.5.1 Předčištění

Před tím, než je odpadní voda přivedena ke kořenovému systému rostlin, musí dojít k jejímu předčištění. K mechanickému předčištění dochází ve vícekomorovém septiku, nebo v usazovací nádrži. Dochází zde k oddělení nerozpustných látek od vody. Septik se skládá z více komor, z nichž jedna se jmenuje sedimentační nebo šterbinová nádrž. Sedimentační nádrž se používá pro menší zdroje znečištění, zatímco šterbinová nádrž pro větší zdroje znečištěných vod. Dále se na předčištění podílí lapák písku, ten se používá pro vody z jednotné kanalizace obcí a měst, dále lapák tuků, norné stěny (používají se pro vody, kde je zvýšená koncentrace tuků), lokální septik, či česla. Díky předčištění se voda zbavuje pevných, nerozpuštěných nečistot, které by v případě nedostatečného odstranění mohly ucpat filtrační kořenové pole. Dalo by se říct, že předčištění je nejdůležitějším krokem čištění „čím lepší předčištění, tím delší životnost čistírny“ [7, 14].

2.1.5.2 Filtrační kořenové pole

Filtrační kořenové pole je 60-80 cm hluboké. Jeho dno tvořené izolační folií je vystláno nepropustným materiálem, aby nedocházelo k nechtěnému prosakování vody do půdy. Na folii je naskládán štěrk s oblázky a kameny (v současné době se používá zejména praný štěrk). Na kamenech jsou vysázené vodní rostliny. Hladina vody bývá asi 5-10 centimetrů pod povrchem kamenů, což zabraňuje zápachu a výskytu hmyzu, jak již bylo uvedeno.

Odpadní voda přitéká do pole jedním směrem a gravitačním spádem protéká postupně celým filtračním kořenovým polem. Kameny, štěrk a kořeny rostlin mechanicky zachytí nečistoty, které se ve vodě nacházejí i po předčištění. Takto vyčištěná voda poté odtéká do vsakovacího objektu, odkud dále teče do vodního toku. [7, 14].

2.1.5.3 Dimenzování filtračních polí

Čistírny se navrhují tak, aby došlo k odstranění pevných a organických látek. Podle studií vědců z Velké Británie a Dánska se čistírny stavějí tak, aby jejich plocha odpovídala cca 5 m² na osobu [7, 14,].

2.1.5.4 Distribuce odpadní vody

Pro distribuci předčištěné odpadní vody filtračním kořenovým polem se používají trubky s velkými otvory, které zabraňují ucpání odpadním materiálem. Voda následně putuje do sběrného potrubí na dně filtračního kořenového pole, které je spojeno s výpustním mechanismem v odtokové šachtě. Výpustním mechanismem se nastavuje výška vody ve filtračním kořenovém poli [7, 14].

2.1.6 Výhody a nevýhody

Kořenové čistírny mají řadu výhod od minimální údržby, přes nízké provozní náklady, až po celoroční provoz. Neméně významnou výhodou je to, že na pohled zapadají svým vzhledem do krajiny. Hlavní výhody jsou konkretizovány níže:

Spotřeba elektrické energie

Jelikož se jedná o přírodní systém a veškeré procesy se dějí samovolně, není potřeba téměř žádné elektrické energie. Jediné zařízení, které potřebuje elektrickou energii je čerpadlo, jenž se nachází u čistíren pro domácnost. Čerpadlo pumpuje vyčištěnou vodu zpět do domu. Ovšem ani toto čerpadlo není součástí každé čistírny, a tak jsou některé téměř bez potřeby energie [7, 10, 13, 14, 19, 20].

Minimální údržba

Čistírna nepotřebuje každodenní údržbu. Aby byla zachována její funkčnost, je třeba ji každý rok čistit a zkontrolovat septik (nádrž pro částečné čištění odpadních vod). Septik je potřeba doplnit čistou vodou. Dále je třeba pravidelně pečovat o rostliny (kosení, sklízení, kontrola kořenového filtru). Ať již jde o údržbu čistírny pro domácnost, nebo pro obec, vždy se jedná o velmi jednoduchou, minimální a levnou údržbu, kterou zvládne téměř každý jedinec bez speciálního zaškolení [7, 14, 19, 20].

Dlouhá životnost

Tento bod souvisí s pravidelnou údržbou. Při dobré a pravidelné údržbě mohou kořenové čistírny vydržet i desítky let (30-40 let). Jejich účinnost není závislá na konstantním přísunu vody, takže jsou čistírny odolné vůči občasnému výpadku přísunu odpadních vod. Když srovnáme odolnost vůči nestálému přítoku a rozdílné kvalitě vody u kořenových čistíren a u standardních, zjistíme, že kořenové jsou na tom mnohem lépe. Je to zejména z toho důvodu, že nemusí mít stálý přísun organického znečištění a při delší odmlce je nemusíme „nastartovat“ aktivovaným kalem [7, 13].

Schopnost čistit téměř všechny druhy odpadních vod

Kořenové čistírny jsou schopné vyčistit jakoukoliv vodu z domácnosti; např. ze splachování, z kuchyně, koupelny. Nejenže zvládnou vyčistit veškerou vodu z domácností, ale jsou schopny vyčistit i různé odpadní vody, např. splaškové, ze zemědělství, z průsaků ze skládek nebo z čistírenských kalů [7, 14].

Celoroční provoz

Jak již bylo uvedeno, rostliny slouží jako tepelná izolace čistírny, tudíž může být v provozu celý rok. Před zimou se musí čistírny upravit (posekat vegetace, odvést odumřelé části rostlin) [14, 20].

Estetický dojem

Rostliny, které se do čistíren používají, od jara do podzimu kvetou a vytváří tak krásné prostředí. Čistírna, díky rostlinám, není nápadná. Vytváří také nové biotopy. Oproti velkým betonovým čistírnám zapadá do okolní krajiny. Většinou, když člověk neví, že se někde kořenová čistírna nachází, ani ji nepozná [7, 19].

Nízké provozní náklady

Kořenové čistírny mají oproti mechanicko-biologickým čistírnám až 10x menší provozní náklady. Díky tomu, že kořenové čistírny používají pouze přirozené procesy, není potřeba jim dodávat žádné chemikálie ani vstupní energii, což opět snižuje náklady pro jejich provoz [7, 10, 14, 19, 20, 21].

Bezhluché a bez zápachu

Díky tomu, že čistírny nevyužívají žádné mechanické a hlučné zařízení, je velmi tichá. Nenarušuje tudíž klid jak obyvatelům, kteří ji využívají, tak okolnímu prostředí. Jelikož čistírny využívají pouze přírodních ekologických procesů, nejsou pro své okolí zdrojem nepříjemného zápachu [19, 20].

Jak z uvedeného vyplývá, představují kořenové čistírny výhodné alternativní řešení čištění odpadních vod. I když při jejich využívání převažují výhody, najde se i několik nevýhod, jsou popsány níže:

Prostor

Mezi největší nevýhodu těchto čistíren rozhodně patří velikost prostoru, který pro optimální fungování potřebují. Kořenové čistírny vyžadují pro svou výstavbu a pro svůj provoz větší plochy. Aby čistírna dobře fungovala, potřebuje plochu 2-5 m² (ideálně 5 m²) na obyvatele. Dále je potřeba připočítat plochu 1 m² na obyvatele na zařízení pro mechanické předčištění vody, na regulační šachtu a zasakovací objekt [7, 9, 14, 20].

Pokles čistícího efektu mimo vegetační období

Zimní období představuje pro většinu rostlin vegetační klid. Z toho důvodu se musí rostliny použité v kořenových čističkách na zimu upravit, musí se posekat a odstranit odumřelé části rostlin (mohly by ucpat filtr). I přesto, v období vegetačního klidu, rostliny dále čistí odpadní vodu, ovšem s mírným snížením čistící účinnosti. Voda v zimě stále odpovídá parametrům čisté vody [6, 20].

Omezená možnost řízení čistícího procesu

Jak již bylo několikrát zmíněno, kořenové čistírny fungují pouze na základně přírodních procesů. Tyto procesy nemůžeme ovládat, a tak vlastně nemáme žádnou možnost proces čištění řídit. Vše funguje přirozeně samo [11, 20].

Nevhodnost pro čištění velmi koncentrovaných odpadních vod

Přesto, že jsou kořenové čistírny dobré pro čištění vod, které obsahují znečišťující látky, nejsou vhodné pro čištění vod s vysokou koncentrací těchto znečišťujících látek. Rostliny, jakožto živé organismy, nejsou uzpůsobeny velkému náporu nebezpečných a toxických látek. Kořenové čistírny proto nejsou vhodné pro čištění odpadních vod z nemocnic, kde používá mnoho dezinfekčních prostředků, léků a jiných nebezpečných látek nebo pro čištění vod z velkých průmyslových provozů a jiných provozů, kde se do vod vypouštějí nebezpečné látky [6, 11, 20].

2.1.7 Účinnost čištění

Kořenové čistírny slouží k odbourávání anorganického, organického a mikrobiálního znečištění. Účinnost je dlouhodobě velmi dobrá (stabilní po celý rok), přesto závisí na teplotě, množství srážek, vlhkosti, délce vegetačního období rostlin a na době zdržení látek ve filtračním loži. Všechny tyto parametry mají vliv zejména na fyziologické procesy, jako je růst rostlin nebo mikrobiologická aktivita. U čistíren do 500 ekvivalentních obyvatel se sledují převážně tyto parametry:

- BSK₅ – 40 mg/l (maximální hodnota 80 mg/l)
- CHSK_{Cr} – 150 mg/l (maximální hodnota 220 mg/l)
- Nerozpuštěné látky – 50 mg/l (maximální hodnota 80 mg/l)

U čistíren nad 500 obyvatel se sledují stejné parametry, které byly uvedeny, a navíc se hlídá obsah amoniakálního dusíku a fosforu. Obsah fosforu se u čistíren kontroluje v případě, že se voda vypouští do vod povrchových. Kořenové čistírny jsou schopny tyto požadavky zvládnout [7, 22, 23].

2.1.7.1 Organické látky

Znečištění organickými látkami se sleduje pomocí BSK₅ a CHSK_{Cr}. U většiny kořenových čistíren je účinnost čištění sledovaná prostřednictvím těchto ukazatelů nad 99,9 %. Rozklad organických látek probíhá jak anaerobně, tak aerobně. Rozklad bez kyslíku probíhá v odkalovací nádrži a rozklad za přítomnosti kyslíku probíhá v kořenovém filtru. Výhodou je, že účinnost odbourávání organických látek je nezávislá na síle přítoku, ročním období, ani na koncentraci organických látek přítomných v odpadních vodách [7].

2.1.7.2 Bakteriální znečištění

Eliminace bakteriálního znečištění probíhá fyzikálními, chemickými i biologickými procesy. Je ovšem těžké určit, který z procesů se uplatňuje méně a který více. Přesto se odhaduje, že nejvíce se zde uplatňují biologické procesy (přirozený úhyn díky dlouhé době zdržení), oxidace, působení látek vylučovaných z kořenů rostlin (antibakteriální látky), predace a sedimentace. Účinnost čištění bakteriálního znečištění u odpadních vod je nad 99 %, u splaškových vod nad 95 % [7, 22].

2.1.7.3 *Nerozpuštěné látky*

Kořenové čistírny velmi efektivně odstraňují nerozpuštěné látky zejména pomocí filtrace a sedimentace ve filtračním loži. Nerozpuštěné látky se zachytávají již na okraji filtračního pole, kvůli tomu může v čistírně dojít k ucpání filtru a k následnému povrchovému odtoku. Komplikace u povrchového odtoku je, že se u čistíren mohou objevit hygienické problémy. Čistírna začne zapáchat a v rostlinách se může usadit hmyz, například komáři. Přestože jsou tyto problémy nežádoucí, na účinnost čištění většinou nemají vliv [22].

2.1.7.4 *Fosfor*

K odstraňování fosforu dochází adsorpcí, srážením a ukládáním ve filtračním loži a absorpcí rostlinami (ty však zadržují pouze malou část fosforu). Problém je, že materiály, které se běžně používají při stavbě čistírny (šterk, drobné kamínky), nemají dostatečnou sorpční kapacitu, což snižuje účinnost čištění vody od fosforu. Účinnost můžeme zvýšit použitím materiálů s vysokou sorpční schopností např. termicky expandovaný jííl jako sorpční element na odtoku. Fosfor v půdě na rozdíl od vodních ekosystémů není nežádoucí, jelikož se jedná o prvek, který rostlinám pomáhá v jejich růstu. Obsah fosforu v odpadních vodách se může snížit i jinými způsoby, např. používáním bezfosfátových čisticích prostředků [7, 22, 24].

2.1.7.5 *Dusík*

Kořenové čistírny nejsou příliš efektivní při odstraňování dusíkatých látek, kvůli nedostatku přítomnosti kyslíku ve filtračním loži (jedná se o přirozený úkaz, který se nedá ovlivnit). Organicky vázaný dusík je přeměňován za anaerobních podmínek na amoniak, čímž dochází ke zvýšení koncentrace amoniaku v odpadních vodách. Nedostatek kyslíku ve filtračním loži limituje nitrifikaci amoniaku (jedná se o hlavní formu dusíku ve splaškových vodách). V okolí kořenů rostlin probíhá denitrifikace. Z kořenů se uvolňuje kyslík, takže dusičnany jsou odbourávány v anaerobních podmínkách na plynný dusík, který poté opouští filtrační lože a odchází do atmosféry [7, 22, 24].

2.1.7.6 Těžké kovy

Účinnost odstranění těžkých kovů je celkem vysoká, v průměru až 85 %. Liší se však mezi jednotlivými kovy. Nejvíce jsou těžké kovy zadržovány v sedimentech a v podzemních částech rostlin. Asi 10 % se ukládá v nadzemních částech rostlin. Přestože rostliny zadržují poměrně značnou část těžkých kovů přítomných v odpadních vodách, jejich koncentrace v rostlinách se jen mírně zvyšuje. Existuje plno faktorů, které ovlivňují zadržování kovů v čistírnách. Těmito parametry jsou: přítomnost rozpuštěného kyslíku ve filtračním loži; přítomnost dusičnanů a organických látek; přítomnost manganu a železa. Zadržování ovlivňuje zejména železo. V aerobních podmínkách je železo oxidováno za vzniku sraženiny oxyhydroxidů, společně se sraženinami dalších kovů. V anaerobních podmínkách je železo redukováno, je tak více rozpustné a uvolňuje se množství kovů. Zredukováno železo a další kovy mohou tak reagovat s přítomným sirovodíkem (který vzniká redukcí síranů). Vzniklé sloučeniny se ukládají ve filtračním loži a plynný sirovodík může unikat ven do ovzduší, což způsobuje nepříjemný zápach [22].

2.1.7.7 Posouzení účinnosti

K danému tématu není velké množství případových studií, které by se zabývaly hodnocením účinnosti pomocí ekotoxikologických testů. Studie, které se zabývají účinností kořenových čistíren, se zaměřují na hodnoty BSK₅, CHSK_{Cr}. Tyto studie dokazují, že v průběhu čištění se hodnoty těchto dvou parametrů snižují, což znamená, že kvalita čištěné vody stoupá. Stanovené hodnoty BSK₅ a CHSK_{Cr} byly při vstupu do kořenových čistíren výrazně vyšší než při výstupu. Ze zjištěných hodnot se dá konstatovat, že kořenové čistírny mohou být účinností srovnávány s klasickými čistírnami odpadních vod. Další studie se zaměřují na sledování koncentrací konkrétních látek, např. dusíkatých látek, fosforových látek, těžkých kovů, rozpuštěného kyslíku, vápníku nebo hořčíku. Koncentrace jsou měřeny před vstupem vody do čistírny a po výstupu. Podle snížení nebo zvýšení jejich koncentrace se hodnotí, zda je čistící proces v dané čistírně dostatečný. V převážné většině studií je dokázáno, že koncentrace nežádoucích látek v odpadních vodách klesají v průběhu čištění. Dále se stanovuje změna koncentrace těchto látek v některých částech rostlin, které jsou vysázeny v kořenovém poli. Studie dokázaly, že rostliny v kořenových čistírnách jsou schopny ve stoncích, listech a kořenech akumulovat zejména těžké kovy, dusík a fosfor. Většina studií hodnotí kořenové čistírny jako vhodné pro čištění odpadních vod [31, 32, 33, 34].

2.1.8 Údržba a revitalizace

Údržba kořenových čistíren je velmi jednoduchá a nenáročná. Stačí, když se důkladnější údržba provádí jednou ročně, jestliže během roku nastanou závažné potíže, provádí se údržba častěji. Spočívá v tom, že se (většinou v zimě) posekají rostliny a jejich odumřelé a posekané části se odvezou pryč, aby nedocházelo k ucpávání kořenového filtru. Jednou ročně se také do filtru čerpá nová čistá voda. Pravidelně se takto musí čistit a kontrolovat odkalovací nádrž, do které se také dává čistá voda. Dále se musí zkontrolovat stav kořenového filtru, případně se musí vyměnit jeho náplň. Pokud se během pravidelné kontroly zjistí, že odkalovací nádrž nestačí zpracovávat nápor odpadní vody, může se do čistírny nainstalovat menší dočišťovací septik. Údržba je téměř totožná u čistíren pro domácnost a pro obec. U obcí se částečně liší, v tom, že se u čistírny musí častěji kontrolovat stav rostlin a dvakrát ročně se odváží kal. Dále se musí kontrolovat a čistit česla a usazovák (podle potřeby) [1, 7, 20].

Jakmile začne po povrchu kořenové čistírny proudit voda, je čas na revitalizaci. Revitalizace (znovuoživení) se při pravidelné a správné údržbě dělá jednou za 30-40 let tak, že se vymění část náplně kořenového filtru. I když je filtr částečně ucpaný, účinnost čištění je stále dobrá (vyčištěná voda odpovídá limitům), přesto je dobré revitalizaci provést. Mnohem více se vyplatí čistírny obnovovat než dělat nové, jelikož revitalizace vyjde asi na 10-30 % (podle míry obnovení) původní ceny celé čistírny [1, 7, 20].

2.1.9 Vegetace kořenových čistíren

Přestože se kořenové čistírny obejdou i bez přítomnosti rostlin, jelikož vodu čistí převážně bakterie, mají rostliny důležité funkce. Odebírají živiny z odpadních vod, zejména dusíkaté a fosfor obsahující látky, což přispívá ke snížení eutrofizace. Jejich kořenový systém zajišťuje příznivé podmínky pro život mikroorganismů, které jsou, jak již bylo řečeno, důležité pro čistící funkci. Rostliny dále slouží jako tepelná izolace, takže se zmenšuje hloubka zmrznutí vody, díky čemuž jsou čistírny schopné čistit vodu také v zimě [1, 7, 9, 16].

Rostliny, které se používají do kořenových čistíren, musí vykazovat řadu vlastností. Musí mít schopnost adaptovat se na změny obsahu solí, nedostatek kyslíku nebo náhlé změny pH vody. Používají se zejména rostliny, kterým vyhovuje odpadní voda z domácností, jež je bohatá na živiny. Dále by měly rostliny být schopné dodávat do kořenů kyslík, který pomáhá odbourávat organický uhlík a dusík. Také odbourání fosforu je jednodušší, jelikož rostliny využívají fosfor k růstu nadzemních částí [1, 7, 9, 16].

2.1.9.1 Nejčastěji využívané rostlinné druhy

Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*)

Jedná se o vysokou travnatou rostlinu, která může dosáhnout výšky 2,5–3 metry (obr. 6). Její kořeny sahají do hloubky 20-30 centimetrů. Má schopnost snášet vyšší koncentrace znečištění a také je odolnější vůči promrzáni. Naopak má ale menší toleranci vůči výkyvům hodnot pH. Chrastice je velmi náročná, co se týká vody a živin. Obojího musí mít dostatek. Vyhovuje jí zejména fosfor. Chrastice z vod odstraňuje dusík a rizikové látky, jako jsou hliník, chrom, olovo, zinek a měď. Tyto látky akumuluje v podzemní biomase [7, 16, 25].



Obr. 6 – *Phalaris arundinacea*

Orobinec širokolistý (*Typha latifolia*)

Tato rostlina dosahuje výšky až 4 metrů, přičemž kořeny bývají 30-40 centimetrů dlouhé. Jelikož se orobinec velmi rychle množí, zamezuje v růstu jiným druhům rostlin. Orobinec (obr. 7) je ideální zejména pro čištění vody s velmi nízkým pH (hodnota pH může být až kolem 2), ale zvládne čistit vody i s hodnotou pH až 10. Tato rostlina není tolerantní jen co se týká hodnot pH, ale také k velmi vysoké koncentraci znečištění vod. Vyhovují jí půdy s vysokým obsahem živin. Orobinec je schopný v sobě akumulovat těžké kovy, a to zejména měď, olovo a chrom. Konkrétně tyto látky akumuluje ve stonku, v listech a v kořenech. Dále je schopný v kořenech akumulovat dusík a fosfor. Při vhodných podmínkách dokáže redukovat dusičnany [7, 16, 26, 27, 28].



Obr. 7 – *Typha latifolia*

Rákos obecný (*Phragmites australis*)

Rákos (obr. 8) patří mezi největší trávy u nás. Dosahuje výšky až čtyř metrů a má dlouhé kořeny, které rostou do hloubky minimálně 70 cm. Stejně jako již zmiňovaný orobinec také rákos se ve vodách velmi dobře rozmnožuje. Je velmi tolerantní vůči výkyvům hodnot pH. Rákos je vhodný k čištění vod, kde jsou vyšší hodnoty znečištění (BSK₅, dusík), jelikož mu tyto vysoké koncentrace nevadí. Rákos roste hlavně ve velmi vlhkých a eutrofizovaných vodách, kde je přebytek vody a živin. Je součástí téměř každé kořenové čistírny. Je schopný odbourávat dusík a fosfor, přičemž schopnost odbourávání se zvyšuje při pravidelném sklizení vegetace. Rákos, stejně jako chrastice, odbourává rizikové látky, které akumulují v kořenech [1, 7, 16, 25, 27, 29].



Obr. 8 – *Phragmites australis*

Kosatec žlutý (*Iris pseudacorus*)

Tato rostlina dorůstá výšky až 1,2 metru. Jedná se o hojně využívanou rostlinu v kořenových čistírnách. Kosatec (obr. 9) potřebuje vody s velmi bahnitou, spíše kyselější půdou, která obsahuje větší množství živin, a to zejména dusík a fosfor. Kosatec je vhodná rostlina do kořenových čistíren, jelikož potřebuje občasné zaplavení vodou. Oproti jiným rostlinám využívaným v kořenových čistírnách je kosatec velmi jedovatý, jelikož obsahuje třísloviny, silice a glykosidy. Při vhodných podmínkách redukuje ve vodě dusičnany [1, 7, 16, 28].



Obr. 9 – *Iris pseudacorus*

Blatouch bahenní (*Caltha palustris*)

Tato rostlina je, oproti výše zmiňovaným velmi malá. Dosahuje výšky asi 40 centimetrů, ale samozřejmě může být i vyšší. V čistírnách se sází na okraje, kvůli její výšce by dále od okraje měla nedostatek světla, přesto že má ráda polostín. Jedná se o velmi vytrvalou a odolnou rostlinu, která snese nedostatek kyslíku (toho bývá málo např. při záplavách) i vyšší nadmořské výšky. Blatouch (obr. 10) pomáhá z odpadních vod odstraňovat železo, které zůstává ve formě „rezavých“ vloček na povrchu stonků [1, 7, 16, 30].



Obr. 10 – Caltha palustris

Zblochan vodní (*Glyceria maxima*)

Zblochan (obr. 11) je vysoká tráva, která dosahuje výšky až 3 metrů (většinou dorůstá 80-200 centimetrů). Tato mokřadní rostlina dobře snáší zaplavení větším množstvím vody (až do 50 centimetrů své výšky). Jelikož se jedná o plazivou travu, sází se zejména na okraje, čímž dochází ke zpevnění břehů, což je hlavním důvodem vysázení zblochanu. Zblochan vyžaduje trvale vlhké prostředí, dostatek slunečního světla a půdy s velkým množstvím živin [7, 16].



Obr. 11 – Glyceria maxima

2.2 Ekotoxikologie

2.2.1 Ekotoxikologie v ochraně životního prostředí

Ekotoxikologie je vědní obor, který se zabývá účinky škodlivých látek na ekosystémy. Jedná se o kombinaci ekologie (studuje ekosystémy) a toxikologie (studuje interakci chemických látek s organismy). Ekotoxikologie se zabývá toxickými účinky látek na organismy, populace a společenstva. Dále zaznamenává a předvídá metabolismus a akumulaci cizorodých látek, které se dostanou do prostředí. Cílem je chránit populace všech druhů organismů pro budoucí generace, čímž se také přispívá k ochraně potravinových zdrojů ve všech oblastech životního prostředí. Pomocí testů ekotoxicity, hodnocení rizik nových chemických látek a pozorování biochemických a fyziologických reakcí organismů jsme schopni porozumět nežádoucím vlivům chemických látek na životní prostředí a můžeme díky tomu předvídat a identifikovat změny populace po expozici znečišťujícími látkami jako jsou např. genetické změny (např. vznik odolnosti hmyzu vůči pesticidům) [35, 36].

2.2.2 Ekotoxikologické testy v akvatickém uspořádání

Ekotoxikologické testy v akvatickém prostředí se hojně využívají od 80. let minulého století. Jejich cílem je zjistit vlivy testovaných nebezpečných a toxických látek v určitých (přesně definovaných) podmínkách na vodní organismy. Původně se tyto testy prováděly na jedincích určitého organismu, postupem času se ale zjistilo, že testování celých společenstev je mnohem účinnější a testování nám poskytne hodnotnější výsledky. Hlavní pozornost se klade na perzistentní látky, které jsou toxické. Dále se sleduje a odhaduje osud látek ve vodním prostředí a dnovém sedimentu. Díky testům ekotoxicity zjišťujeme působení určitých chemických látek nejenom na jedince určitého druhu, ale také na celý ekosystém. Testy ekotoxicity se dají dělit podle určitých parametrů, a to:

- Podle doby expozice → akutní, subchronické, chronické
- Podle testovací matrice → voda, půda
- Podle generace testů → klasické, biosenzory, mikrotesty
- Podle trofické úrovně → producenti, konzumenti, destruenti
- Podle počtu organismů → jednodruhové, vícedruhové
- Podle složitosti vzorku → čisté látky, směsi
- Podle úrovně testovaného systému → buňky a tkáně, organismy

Při provádění těchto testů s chemickými látkami se postupuje tak, že proběhne *limitní test*. Tímto testem se zjistí, jak organismy reagují na koncentraci sledované látky 100 mg/l. Jestliže žádný organismus neuhyne, není třeba žádný další test. V opačném případě přijde na řadu *předběžný test* v širokém rozsahu koncentrací testované látky. Na základě výsledků předběžného testu se poté vybere užší rozsah koncentrací pro *základní test*. Součástí každého testu je *kontrolní test*. Kontrolní test probíhá za stejných podmínek, jako test, který provádíme souběžně, s tím rozdílem, že do kádinky, kde probíhá kontrolní test nepřidáváme sledovanou chemikálii [37, 38, 39].

3 Experimentální část

3.1 Kořenová čistírna

Pro testování byla vybrána kořenová čistírna odpadních vod pro 955 ekvivalentních obyvatel. Tato čistírna se skládá ze 3 hlavních stupňů čištění. Prvním stupněm je mechanické předčištění. K mechanickému předčištění se používají česle s lapákem písku, za kterými je umístěna usazovací nádrž. Druhý stupeň čištění se skládá ze 3 kořenových polí, 2 z nich fungují jako horizontální filtry, poslední jako vertikální filtr, díky kterému je čistírna schopna zbavit vodu také NH_3 . Třetí stupeň se skládá ze stabilizační biologické nádrže (rybník). Některé části kořenové čistírny jsou zobrazeny na obrázcích č. 12, 13 a 14 [40, 41].

Z čistírny bylo odebráno pět vzorků vody z pěti různých míst, konkrétně:

- I. – přítok odpadní vody
- II. – za usazovací nádrží
- III. – za vertikálním filtrem
- IV. – za horizontálním filtrem
- V. – odtok vody



Obr. 12 – pohled na usazovací nádrž



Obr. 13 – pohled na filtrační lože



Obr. 14 – pohled na rybník za kořenovou čistírnou

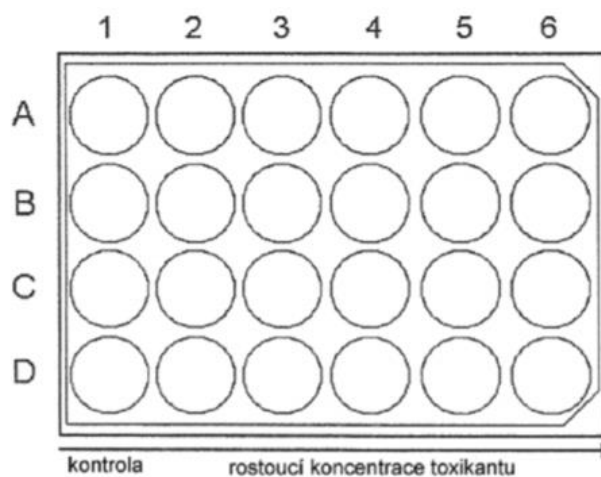
3.2 Test akutní toxicity na organismu *Thamnocephalus platyurus*

Test byl prováděn podle Standardního operačního postupu, který je součástí toxikitu Thamnotoxkit. V tomto testu se jako organismus používá drobný sladkovodní korýš *Thamnocephalus platyurus*, česky žábřonožka (obr. 16). Pro test akutní toxicity se tyto živočichové používají ve formě cyst. Jedná se o „spící“ stádium, kdy se cysta před nasazením do testu musí inkubovat, aby byli získáni jedinci přibližně stejného vývojového stádia. Do zkumavky s cystami se přidá 1 ml zředěné (v poměru 1:8 s deionizovanou vodou) provzdušněné standardní sladké vody, jejíž složení je uvedené v Tabulce č. 1. Po dobu 30 minut jsou zkumavky v pravidelných intervalech protřepávány a poté se cysty jemným kroužením rovnoměrně rozprostřou po Petriho misce. Takto připravené cysty se nechají inkubovat 20-22 hodin při teplotě 25 °C za stálého osvětlení.

Tabulka č. 1 – Složky pro přípravu standardní sladké vody

| Chemikálie | Koncentrace [g/l] |
|---------------------------------------|-------------------|
| NaHCO ₃ | 0,0965 |
| CaSO ₄ · 2H ₂ O | 0,1206 |
| MgSO ₄ · 7H ₂ O | 0,1233 |
| KCl | 0,0044 |

Po uplynutí určené doby se larvy žábřonožek přenesou na testovací desku (Obr. 15) s jamkami naplněnými roztoky vzorků o různých koncentracích (6,25; 12,5; 25; 50 a 100 %), přičemž kontrolu představuje standardní ředící voda. Do každé testovací jamky se přenesou 10 larev. Deska se přikryje parafilmovou páskou a uzavře krytem. Takto připravená testovací deska se dá na 24 hodin do temného inkubátoru, kde je stálá teplota 25 °C.



Obr. 15 – testovací deska

Po uplynutí 24 hodin se zjišťuje počet uhynulých jedinců v každé jamce testovací desky. Počet uhynulých jedinců se vyjadřuje v procentech mortality, které se převedou na probity (viz Tabulka č. 3). Z rovnic regresních přímek závislosti mortality vyjádřené v probitových hodnotách na logaritmech testovaných koncentracích se vypočtou hodnoty LC_{50} .

Test se může pokládat za platný, pokud mortalita organismů v kontrolním roztoku nepřesahuje 10 % [39, 42, 43, 44].



Obr. 16 – *Thamnocephalus platyurus*

3.3 Test na rostlině *Lemna minor*

Jedná se o jednoděložnou krytosemennou vodní rostlinu (obr. 17), která velmi rychle roste. Vyskytuje se ve stojatých vodách, v podobě ucelených porostů. Kvůli tomu nepropouští světlo, a tím dochází ke zhoršení kvality vod. Tímto testem zjišťujeme míru toxicity rozpuštěných látek ve vodě. Dále se využívá také pro testování a kontrolu odpadních a povrchových vod. Test byl prováděn dle normy [ČSN EN ISO 20079](#) (757745) Jakost vod – Stanovení toxických účinků složek vody a odpadní vody na okřehek (*Lemna minor*) - Zkouška inhibice růstu okřehek [25, 27, 29, 46].

Samotný test probíhal 7 dní. Do 150 ml kádinek se odměřilo 100 ml testovacích roztoků. Pro nasazování testů byla připravena ředící voda (tzv. modifikované Steinbergovo médium – SM). Do dvoulitrové odměrné baňky bylo z každého roztoku makrosložek odpipetováno 40 ml, z mikrosložek 2 ml a doplněno po rysku. Takto připravené SM bylo použito pro přípravu koncentrační řady testované vody, která byla stejná jako v případě testu na organismu *T. platyurus*.

Tabulka č. 2 – Složky pro přípravu ředící vody pro *Lemna minor*

| Roztok | Makrosložky [g/l] | | Roztok | Mikrosložky [g/l] | |
|---------------|---|-------|---------------|--|------|
| I. | KNO ₃ | 17,5 | IV. | H ₃ BO ₃ | 120 |
| I. | KH ₂ PO ₄ | 4,5 | V. | ZnSO ₄ · 7H ₂ O | 180 |
| I. | K ₂ HPO ₄ | 0,63 | VI. | Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O | 44 |
| II. | MgSO ₄ · 7H ₂ O | 5 | VII. | MnCl ₂ · 4H ₂ O | 180 |
| III. | Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O | 14,75 | VIII. | FeCl ₃ · 6H ₂ O | 760 |
| | | | VIII. | EDTA | 1500 |

Test na organismu *L. minor* byl proveden ve dvou paralelních opakováních. Do každé kádinky se nasadilo 9 lístků okřehku, změřilo pH a kádinky se na 7 dní umístily do osvětleného inkubátoru se stálou teplotou 25 °C. Jelikož v průběhu testu došlo ke snížení výkonu osvětlovacího tělesa, byly vzorky umístěny pod nový zdroj osvětlení splňujícího parametry testu a test byl prolongován na 14 dní. Po této době se opět změřilo pH v každé kádince a odečetl se počet lístků okřehku. Cílem tohoto testu bylo stanovení vlivu toxicity na inhibici růstu okřehku [39, 43, 44].

Tento organismus byl využit také v testu přímé toxicity vod, kdy je porovnávána toxicita testované vody bez přídavku makro- a mikrosložek s testovanou vodou s přídavkem makro a mikrosložek (ve stejném poměru jak při přípravě SM) a s kontrolní vodou v podobě SM. Přídavek mikro a makrosložek do vzorků testované vody má za úkol rozlišit, zda je voda toxická nebo pouze málo „úživná“. V tomto případě je omezen růst, popř. jsou patrné známky chlorózy a nekrózy v obou testovaných vodách.



Obr. 17 – Okřehek menší (*Lemna minor*)

4 Výsledky a diskuze

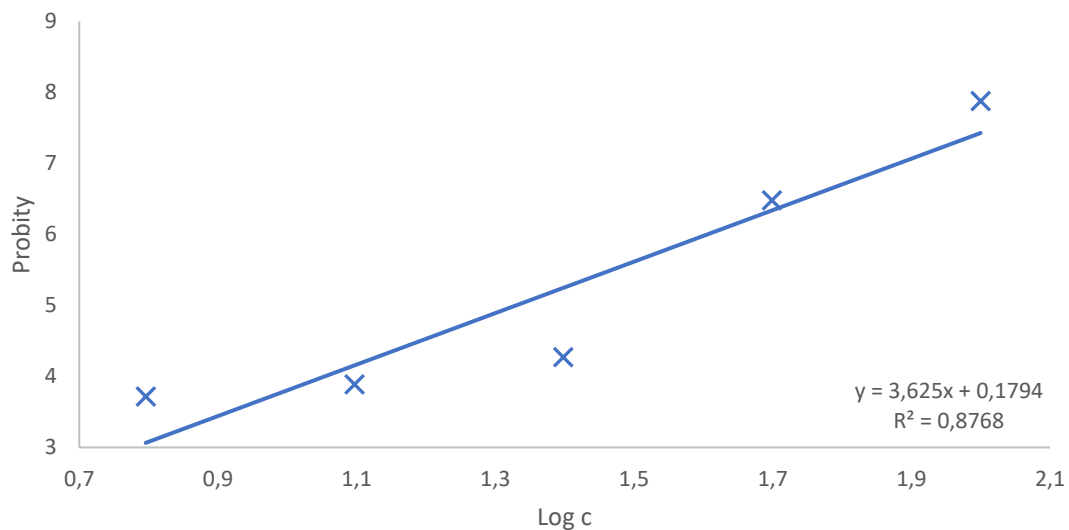
4.1 Test akutní toxicity na organismu *Thamnocephalus platyurus*

Pomocí organismu *T. platyurus* bylo provedeno hodnocení vzorků odpadní vody ze všech stupňů čištění obecní kořenové čistírny. Byla zjišťována mortalita jedinců v každém stupni čistírny (Tabulka č. 3). V první řadě byly hodnoty mortality převedeny na probitové hodnoty, ze kterých byly poté vytvořeny grafy závislosti probitových hodnot na log c (Obr. 18 a 19) a vypočteny ekotoxikologické hodnoty LC₅₀.

Tabulka č. 3 – Výsledky testu na organismu *T. platyurus* pro jednotlivé stupně čištění

| Vzorek č. 1 - přítok | | | | | | |
|---|-----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet živých organismů | 28/30 | 27/30 | 26/30 | 23/30 | 3/30 | 0/30 |
| Mortalita [%] | 6,7 | 10,0 | 13,3 | 23,3 | 93,3 | 100,0 |
| Probity | 3,49 | 3,72 | 3,89 | 4,27 | 6,48 | 7,88 |
| Vzorek č. 2 – usazovací nádrž | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet živých organismů | - | 29/30 | 29/30 | 28/30 | 25/30 | 0/30 |
| Mortalita [%] | - | 3,3 | 3,3 | 6,7 | 16,7 | 100,0 |
| Probity | - | 3,16 | 3,16 | 3,49 | 4,03 | 7,88 |
| Vzorek č. 3 – za vertikálním filtrem | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet živých organismů | - | 27/30 | 29/30 | 25/30 | 23/30 | 17/30 |
| Mortalita [%] | - | 10,0 | 3,3 | 16,7 | 23,3 | 43,3 |
| Probity | - | 3,72 | 3,16 | 4,03 | 4,27 | 4,82 |
| Vzorek č. 4 – za horizontálním filtrem | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet živých organismů | - | 28/30 | 28/30 | 27/30 | 27/30 | 21/30 |
| Mortalita [%] | - | 6,7 | 6,7 | 10,0 | 10,0 | 30,0 |
| Probity | - | 3,49 | 3,49 | 3,72 | 3,72 | 4,48 |
| Vzorek č. 5 – odtok | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet živých organismů | 14/14 | 26/30 | 28/30 | 26/30 | 17/20 | 13/20 |
| Mortalita [%] | - | 13,3 | 6,7 | 13,3 | 15,0 | 35,0 |
| Probity | - | 3,89 | 3,49 | 3,89 | 3,96 | 4,62 |

Na základě výsledků uvedených v tabulce č. 3 byly u vzorků, kde docházelo k mortalitě nad 50 % vypočteny ekotoxikologické hodnoty LC₅₀.



Obr. 18 – Graf závislosti probitových hodnot na log c pro vzorek č. 1 – přítok

Příklad výpočtu LC₅₀ pro vzorek č. 1

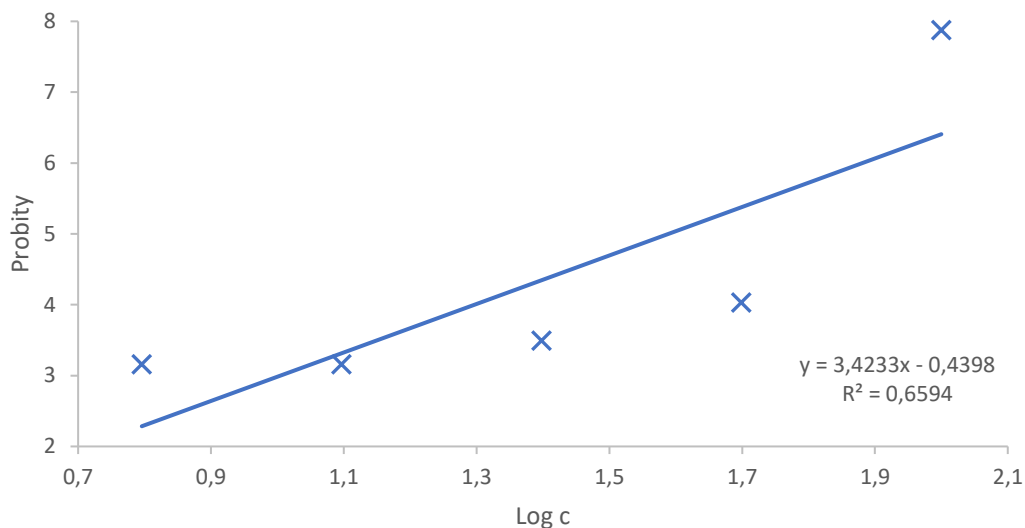
$$y = 3,625x + 0,1794$$

$$\log c = \frac{5 - 0,1794}{3,625}$$

$$\log c = 1,3298$$

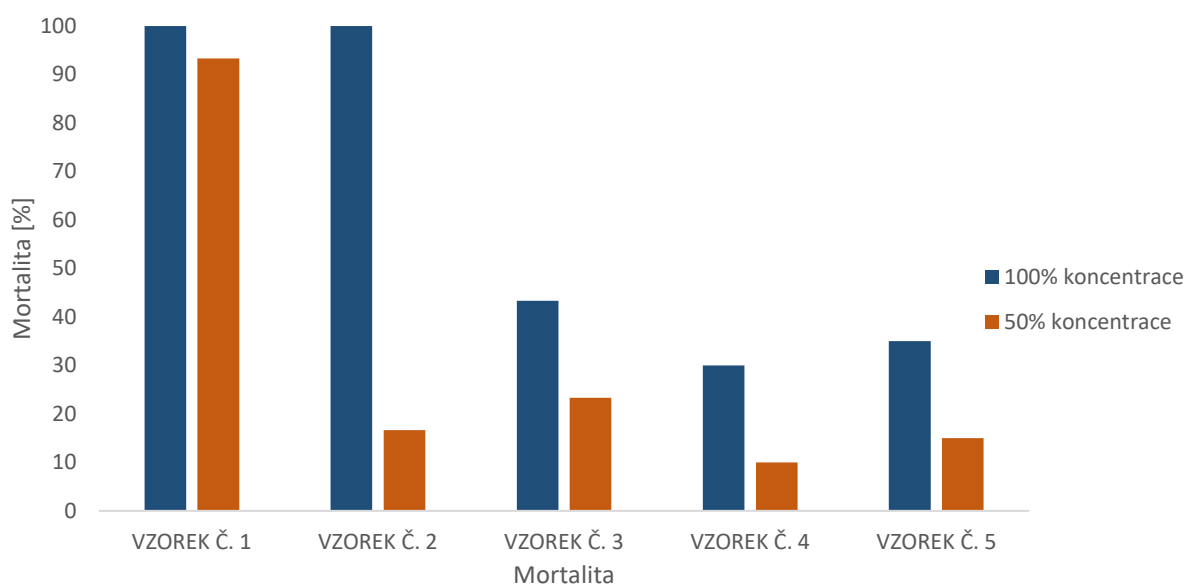
$$c = 10^{1,3298}$$

$$c = 213,71 \text{ ml/l}$$



Obr. 19 – Graf závislosti probitových hodnot na log c pro vzorek č. 2 – usazovací nádrž

U vzorku č. 2 byla stejným způsobem vypočtena hodnota LC₅₀, která v tomto případě byla 388,20 ml/l.



Obr. 20 – Porovnání mortality ve 100% a 50% koncentracích vzorků 1-5

Ne pro všechny vzorky bylo možno vypočítat hodnoty LC₅₀, neboť v některých případech (vzorky č. 3, 4 a 5) nebyla ani v neředěné vodě dosažena 50% mortalita. Proto byly jednotlivé stupně ČOV porovnávány na základě toxicit neředěné vody a 50% koncentrace (Obr. 20).

Je zřejmé, že voda, která přitéká do čistírny, je ze všech vzorků nejtoxičtější. Z hodnot také vyplývá, že v každém dalším stupni je voda méně toxická, tudíž proces čištění je účinný. Předpokládá se, že voda za odtokem z kořenové čistírny bude ze všech vzorků nejlépe vyčištěná, a tudíž by měla vykazovat i nejnižší toxicitu. Z grafu na Obr. 20 však vyplývá, že vzorek č. 5 vykazuje vyšší mortalitu testovacích jedinců než u vzorku 4. Musíme ovšem brát v úvahu dobu zdržení vody v kořenové čistírně. V každém stupni čištění se odpadní voda zdržuje určitou dobu. Doba zdržení v této konkrétní čistírně je v části mechanického předčištění asi 2 hodiny, v části horizontálního filtru asi 1,6 dne, v části vertikálního filtru se předpokládá, že doba zdržení je asi 1 den a v dočišťovací nádrži je doba zdržení asi 3 dny [45]. Jelikož bylo všech 5 vzorků odebráno v jeden den, znamená to, že voda na přítoku je jiná než na odtoku. Nemůžeme přímo objektivně posoudit účinnost, můžeme pouze posoudit, zda stupeň vyčištění představuje riziko pro recipient. Mohlo se stát, že voda, která v daný den vytékala z kořenové čistírny, byla v době přítoku ve skutečnosti více znečištěná. Jelikož je odpadní voda čištěna stále stejným způsobem, mohlo její větší znečištění způsobit méně čistší vodu v odtoku.

Na základě těchto poznatků a výsledků můžeme konstatovat, že námi vybraná kořenová čistírna účinně čistí odpadní vodu, která se dále může používat jako voda užitková, přičemž pro zcela objektivní posouzení by bylo potřeba vykonat testy na zástupcích všech trofických úrovních akvatického, popř. i terestrického ekosystému.

4.2 Test na rostlině *Lemna minor*

Rovněž prostřednictvím *L. minor* bylo provedeno hodnocení vzorků odpadní vody ze všech stupňů čištění obecní kořenové čistírny. Byla zjišťována inhibice růstu dle normy ČSN EN ISO 20079 a přímá toxicita vod. V prvním případě byly vypočteny hodnoty inhibice růstu dle výpočetních vztahů uvedených níže. Výsledky testu inhibice růstu okřehku jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5 – Výsledky testu na organismu *Lemna minor*

| Vzorek č. 1 - přítok | | | | | | |
|--|----------|--------|--------|-------|-------|-------|
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet lístků konec testu | 93,5 | 95,5 | 74,5 | 32 | 20 | - |
| I [%] | - | -0,90 | 9,70 | 45,81 | 65,89 | 100 |
| Vzorek č. 2 - usazovací nádrž | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet lístků konec testu | 93,5 | 78,5 | 62,5 | 47,5 | 37 | 28,5 |
| I [%] | - | 7,47 | 17,21 | 28,93 | 39,60 | 50,76 |
| Vzorek č. 3 - za vertikálním filtrem | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet lístků konec testu | 93,5 | 67 | 44,5 | 46 | 41 | 45,5 |
| I [%] | - | 14,24 | 31,72 | 30,30 | 35,22 | 30,77 |
| Vzorek č. 4 - za horizontálním filtrem | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet lístků konec testu | 158 | 114 | 102,5 | 69 | 68,5 | 56,5 |
| I [%] | - | 11,39 | 15,10 | 28,91 | 29,17 | 35,89 |
| Vzorek č. 5 - odtok | | | | | | |
| c [%] | Kontrola | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| Počet lístků konec testu | 62,5 | 139 | 91 | 71 | 49,5 | 33,5 |
| I [%] | - | -41,25 | -19,39 | -6,58 | 12,03 | 32,18 |

Výpočetní vztahy a příklad výpočtu růstové rychlosti a inhibice růstu pro vzorek č. 2

Vztah pro výpočet růstové rychlosti

$$r = \frac{\ln x_{tn} - \ln x_{t1}}{t_n}, \quad (1)$$

kde x_{tn} je počet lístků na konci testu, x_{t1} je počet lístků na začátku testu a t_n je doba trvání testu v hodinách. Příklad výpočtu:

$$r = \frac{\ln(93,5) - \ln(9)}{336}$$
$$r = 0,0070$$

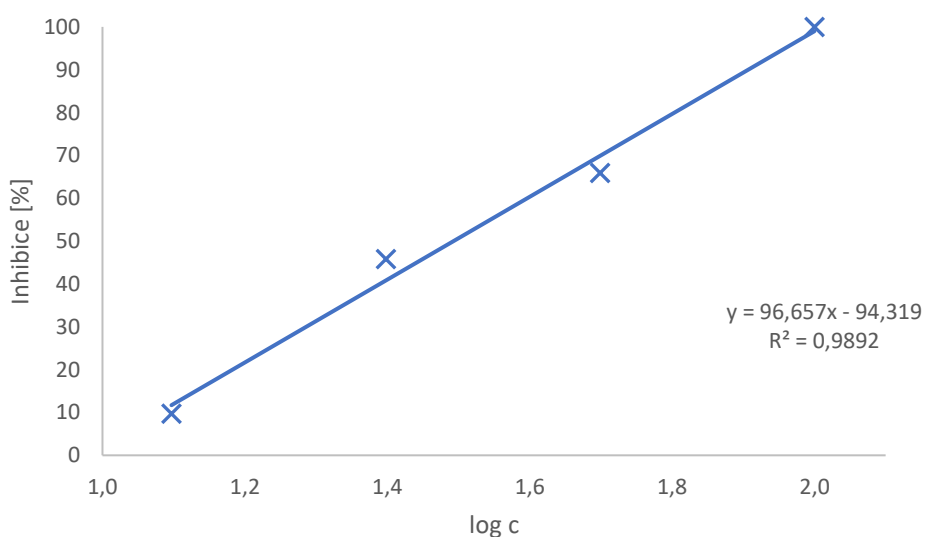
Vztah pro výpočet inhibice růstu

$$I_r = \frac{(r_c - r_1)}{r_c} \cdot 100, \quad (2)$$

kde r_c je růstová rychlost v kontrolním vzorku a r_1 je růstová rychlost v dané koncentraci. Příklad výpočtu:

$$I_r = \frac{(0,0070 - 0,0063)}{0,0070} \cdot 100$$
$$I_r = 9,70 \%$$

Na základě výsledků uvedených v tabulce č. 5 byly u vzorků, kde docházelo k inhibici růstu nad 50 % vypočteny ekotoxikologické hodnoty IC_{50} .



Obr. 21 – Závislost inhibice růstu na log c pro vzorek č. 1

Z regresní přímky byla vypočtena hodnota IC_{50} pro vzorek č. 1, která činí 311,25 ml/l.

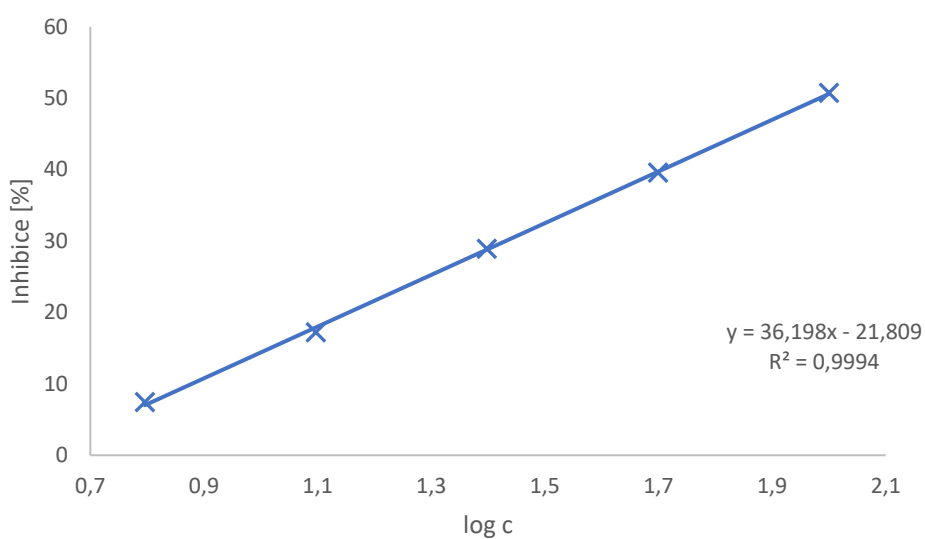
$$y = 96,657x - 94,319$$

$$\log c = \frac{50 + 94,319}{96,657}$$

$$\log c = 1,4931$$

$$c = 10^{1,4931}$$

$$c = 311,25 \text{ ml/l}$$



Obr. 22 – Závislost inhibice růstu na log c pro vzorek č. 2

U vzorku č. 2 byla stejným způsobem vypočtena hodnota IC_{50} , která v tomto případě byla 963,35 ml/l.

V průběhu tohoto testu bylo rovněž měřeno pH. Jak z tabulky č. 6 vyplývá, ve všech případech docházelo k jeho zvyšování, přičemž nejvíce se jeho hodnota zvýšila u vzorku č. 3 ve 100% koncentraci.

Tabulka č. 6 – Naměřené hodnoty pH v průběhu testu na organismu *L. minor*

| pH v kontrolním vzorku začátek/7 dní/konec | | 5,98 | 6,27 | 7,27 | |
|--|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| Vzorek č. 1 | | | | | |
| Koncentrace [%] | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| pH na začátku | 6,58 | 6,86 | 7,17 | 7,62 | 8,11 |
| pH po 7 dnech | 7,17 | 7,76 | 8,10 | 8,47 | 8,57 |
| pH na konci | 7,945 | 8,04 | 9,06 | 9,94 | - |
| Vzorek č. 2 | | | | | |
| Koncentrace [%] | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| pH na začátku | 6,62 | 6,76 | 6,99 | 7,33 | 7,73 |
| pH po 7 dnech | 7,18 | 7,73 | 8,07 | 8,46 | 8,49 |
| pH na konci | 7,85 | 8,50 | 9,85 | 10,01 | 9,66 |
| Vzorek č. 3 | | | | | |
| Koncentrace [%] | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| pH na začátku | 6,44 | 6,62 | 6,78 | 6,96 | 6,97 |
| pH po 7 dnech | 7,01 | 7,62 | 7,91 | 8,33 | 8,69 |
| pH na konci | 7,60 | 7,83 | 8,51 | 9,35 | 10,03 |
| Vzorek č. 4 | | | | | |
| Koncentrace [%] | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| pH na začátku | 6,48 | 6,65 | 6,82 | 6,98 | 7,09 |
| pH po 7 dnech | 7,04 | 7,66 | 7,93 | 8,38 | 8,75 |
| pH na konci | 7,87 | 7,98 | 8,38 | 9,02 | 8,90 |
| Vzorek č. 5 | | | | | |
| Koncentrace [%] | 6,25 | 12,5 | 25 | 50 | 100 |
| pH na začátku | 6,41 | 6,61 | 6,82 | 7,04 | 7,16 |
| pH na konci | 7,94 | 8,03 | 8,48 | 9,51 | 8,97 |

Tato skutečnost byla nejspíše způsobena rostoucím okřehkem, či vyrůstajícími řasami, které mohly svými procesy měnit hodnotu pH, resp. ji zvyšovat.

Test inhibice růstu okřehku menšího

Z hodnot inhibice růstu vypočtených pro rostlinu *Lemna minor* v tabulce č. 5 je patrné, že k inhibici růstu okřehku došlo ve všech vzorcích, kromě vzorku č. 5 kde došlo ke stimulaci. Pouze v prvních dvou vzorcích došlo k inhibici růstu nad 50 %, proto byly hodnoty IC_{50} vypočteny pouze pro tyto dva vzorky. Pro vzorek č. 1 byla vypočtena hodnota IC_{50} na 292,96 ml/l a u vzorku č. 2 byla hodnota IC_{50} 963,35 ml/l. Z uvedených hodnot v tabulce č. 5 je patrné, že voda, která přitékala do kořenové čistírny byla nejvíce toxická oproti ostatním vzorkům. Ve vzorku č. 1 došlo v nezředitelné odpadní vodě k nekróze všech lístků. Zároveň byl ve všech vzorcích prováděn test přímé toxicity, který měl ukázat, jakou roli hraje nedostatek živin v nezředitelné testované vodě. Ve vzorku č. 1 však došlo k úhynu všech lístků také v testu přímé toxicity. Jak již bylo uvedeno výše, pro objektivní porovnání účinnosti čištění v jednotlivých stupních by bylo potřebné odebírat vzorky v termínech, které reflektují dobu zdržení. Voda, která se v době odběru nacházela za horizontálním filtrem, přitekla do kořenové čistírny později než voda, která ve stejné době odtékala z čistírny do rybníku. Kolísání počtu lístků bylo nejspíše způsobeno i růstem zelených a hnědých řas, které vyrostly ve 100% koncentracích u všech vzorků a mohly tak ovlivnit růst okřehku. Největší nárůst lístků lze vyzorovat za horizontálním filtrem (vzorek č. 4) a za odtokem, kde je vypouštěna vyčištěná voda (vzorek č. 5). Očekávalo se, že nejvíce bude testovací organismus prosperovat ve vzorku č. 5, jelikož se okřehek ve velmi dobrém stavu a hojném počtu nachází v rybníku, do kterého je vypouštěna vyčištěná voda z kořenové čistírny (Obr. 14). Tento předpoklad byl splněn a potvrzuje i dobrou čistící účinnost této kořenové čistírny.

Ze zjištěných hodnot můžeme usoudit, že kořenová čistírna dokáže účinně vyčistit odpadní vodu, která po vyčištění nevykazuje toxické účinky na organismy příslušného recipientu. Pro objektivní posouzení ovšem nutno opět konstatovat, jak již bylo řečeno výše, by bylo potřeba vykonat testy na zástupcích všech trofických úrovních akvatického, popř. i terestrického ekosystému.

Přímá toxicita vod

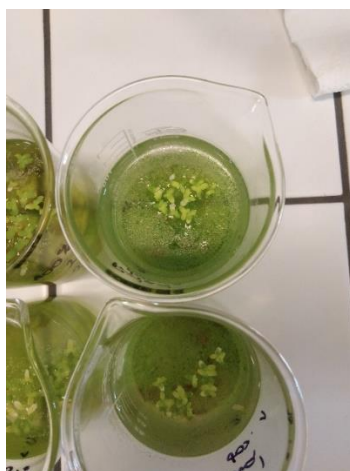
Na základě testu přímé toxicity vod se určovalo, zda je voda toxická pro námi zvolený organismus *Lemna minor* nebo zda je voda pouze neúživná. Výsledky tohoto testu uvádí tabulka č. 7.

Tabulka č. 7 – Počty lístků a vypočtené procento inhibice růstu pro vzorky 1-5

| Vzorek | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| Kontrola | 93,5 | 93,5 | 93,5 | 158 | 62,5 |
| S přidavkem živin | - | 18,5 | 35 | 60 | 45,5 |
| Bez přidavku živin | - | 28,5 | 45,5 | 56,5 | 33,5 |
| Inhibice [%] | 100 | 80,2 | 62,6 | 62,0 | 27,2 |
| pH na začátku testu | 7,61 | 7,35 | 6,89 | 6,99 | 7,01 |
| pH na konci testu | 8,54 | 9,88 | 9,72 | 8,97 | 9,86 |

Byla vypočítána procentuální inhibice růstu ve vzorcích obohacených živinami vzhledem ke kontrole (Tabulka č. 7).

V tabulce č. 7 nejsou uvedeny veškeré hodnoty pro vzorek č. 1, jelikož v tomto vzorku došlo ke 100% nekróze jak ve vodě neobohacené živinami, tak ve vodě, kde přídavek živin měl rozlišit, zda se jedná o toxicitu nebo pouze o nedostatek živin v testované vodě. Z toho vyplývá, že tento vzorek byl pro testovací organismus výrazně toxický. Z tabulky č. 7 je zřejmé, že k inhibici růstu došlo ve všech vzorcích. U všech vzorků vyrostlo i ve vodě neobohacené živinami méně lístků oproti kontrole. Přestože ve všech vzorcích došlo k inhibici, neznamená to, že by voda byla zcela neúživná, jelikož ve všech vzorcích pro stanovení přímé toxicity vod vyrostly hnědé a zelené řasy (obr. 23).



Obr. 23 – dokumentace růstu řas ve vzorcích

5 Závěr

Cílem teoretické části bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši, která se zaměřuje na problematiku účinnosti a využití kořenových čistíren odpadních vod. Ze získaných informací je zřejmé, že kořenové čistírny jsou vhodnou alternativou klasických mechanicko-biologických čistíren.

Experimentální část byla zaměřená na hodnocení účinnosti konkrétní kořenové čistírny odpadních vod, která čistí vodu pro 955 ekvivalentních obyvatel, pomocí vhodných testů ekotoxicity. Pro tyto akvatické testy byly vybrány následující organismy: ze zástupců konzumentů korýš *Thamnocephalus platyurus* a z producentů rostlina *Lemna minor*. Výsledky testů na těchto organismech potvrdily, že námi vybraná kořenová čistírna je schopná toxicitu vody účinně snižovat.

U testu s organismem *T. platyurus* byly na základě mortality vypočteny hodnoty LC_{50} u dvou odebraných vzorků, konkrétně u vzorku č. 1 (přítok vody) a u vzorku č. 2 (voda v usazovací nádrži). U vzorku č. 1 byla koncentrace LC_{50} vypočtena na 213,71 ml/l a u vzorku č. 2 na 388,20 ml/l. U ostatních vzorků nedošlo vlivem účinného čištění ani k 50% mortalitě, tudíž nešly hodnoty LC_{50} vypočítat. U testu inhibice růstu okřehku menšího byly testovány nejenom naředěné vzorky, ale byly provedeny také testy přímé toxicity vod. Podle výsledků testů bylo zjištěno, že voda, která do kořenové čistírny přitéká, je pro tento organismus velmi toxická, jelikož došlo k nekróze všech lístků okřehku. V dalších stupních čištění bylo zřejmé, že probíhá proces čištění, jelikož plná nekróza byla pozorována jen u některých lístků. Pouze u dvou vzorků dosáhla inhibice růstu hodnot nad 50 % a to u vzorku č. 1 (přítok vody) a u vzorku č. 2 (voda v usazovací nádrži). Pro tyto vzorky byla vypočtena hodnota IC_{50} . Pro vzorek č. 1 byla hodnota IC_{50} vypočtena na 311,25 ml/l a u vzorku č. 2 byla vypočtena na 963,35 ml/l.

6 Zdroje

- [1] *Počítáme s vodou. Kořenová čistírna odpadních vod* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.pocitamesvodou.cz/korenova-cistirna-odpadnich-vod/>
- [2] *Vodní hospodářství. Kořenové čistírny* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/korenove-cistirny/>
- [3] *What is a Root Zone Waste Water Treatment?: Definition* [online]. [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.ecoideaz.com/innovative-green-ideas/whats-a-root-zone-waste-water-treatment>
- [4] *Waste water systems technology: Technology* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://wetsystems.com.au/waste-water-systems-technology/>
- [5] *Historie KČOV* [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <https://www.ceskaenergetika.cz/nezarazene-clanky/cistení-odpadních-vod-v-korenových-ci-stirnach.html>
- [6] *Kořenová čistírna odpadních vod: Historie* [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/zdravotni-technika/korenove-cistirny-odpadnich-vod>
- [7] *Kořenová čistírna* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.korenova-cisticka.cz/>
- [8] *Princip kořenových čistíren* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/50314>
- [9] *Jak funguje kořenová čistírna* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <http://www.zelenezpravy.cz/jak-funguje-korenova-cistirna/>
- [10] *Jak funguje kořenová čistírna* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://grania.cz/korenova-cisticka/jak-funguje-korenova-cisticka/>
- [11] *Root Wastewater Treatment* [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <http://oasisdesign.net/>
- [12] *Vertikální a horizontální uspořádání* [online]. [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/21197-technologie-vertikalnich-filtru-s-vegetaci-pro-cistení-odpadnich-vod>

- [13] *Zelené stavění: Kořenové čistírny* [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <https://www.zelenestaveni.cz/korenove-cistirny/>
- [14] *Kořenová čistírna odpadních vod* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <http://www.kcov-rostliny.cz/KCOV.php>
- [15] *Kořenová čistírna odpadních vod* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.ekocentrumkoniklec.cz/korenova-cistirna-odpadnich-vod/>
- [16] *Kořenová čistírna* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://zahrada.bydleniprokazdeho.cz/zahrada/korenova-cistirna-odpadnich-vod.php>
- [17] *Ekozahrady: Kořenové čistírny* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: http://www.ekozahrady.com/korenova_cistirna.htm
- [18] *Kořenové čistírny odpadních vod* [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <http://www.envic.cz/136-357-korenove-cistirny-odpadnich-vod.htm>
- [19] VYMAZAL, Jan. *Kořenové čistírny odpadních vod* [online]. Třeboň: ENKI, 2004 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <http://pece.zf.jcu.cz/docs/prednasky/Funkce-a-vyuziti-makrofyt-41fa21723a.pdf>
- [20] *Kořenové čistírny odpadních vod: Účinnost* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/7689-korenove-cisticky-odpadnich-vod-kcov>
- [21] Nutrient Removal – The Wetlands Initiative [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <http://www.wetlands-initiative.org/nutrient-removal>
- [22] Evaluation of the Efficiency of Wastewater Treatment: Use of *Chironomus calipterus* (Diptera: Chironomidae) as a Bioindicator in El-Tall El-Keber, Egypt [online]. [cit. 2021-7-22]. Dostupné z: <https://scialert.net/fulltext/?doi=jfas.2010.94.105>
- [23] Evaluate the Efficiency of Drinking Water Treatment Plants [online]. [cit. 2021-7-22]. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/jaem/6/1/1/index.html>

- [24] Nutrient Accumulation by *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea*: Growing in Two Constructed Wetlands for Wastewater Treatment [online]. [cit. 2021-7-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/226497930_Nutrient_Accumulation_by_Phragmites_australis_and_Phalaris_arundinacea_Growing_in_Two_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment
- [25] KOMENDOVÁ, Denisa. STUDIE MODERNÍ KOŘENOVÉ ČISTÍRNY PRO OBEC HLÍNA [online]. 2017 [cit. 2021-7-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=154813. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [26] VYMAZAL, Jan. KOŘENOVÉ ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD: Využití ve světě, České republice a Plzeňském kraji. Plzeň, 2016. Podklady pro Ministerstvo životního prostředí. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [27] FARID, Mujahid. Efficacy of *Lemna minor* and *Typha latifolia* for the treatment of textile industry wastewater in a constructed wetland under citric acid amendment: A lab scale study. *Chemosphere* [online]. 2021, (238), 13 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0045653521015794?token=782E173C9E23D63D6303A45149217CF7938A798D12B6395BAF8350681082429AE7F2A70B76E340282FCC71DDCB465A5A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210712194233>
- [28] MLEJNSKÁ, Ing. Eva, Ing. Miloš ROZKOŠNÝ, PH.D. a RNDr. Dana BAUDIŠOVÁ, PH.D. OPTIMALIZACE PROVOZU A ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD Z MALÝCH OBCÍ POMOCÍ EXTENZIVNÍCH TECHNOLOGIÍ [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-07-02]. Dostupné z: https://www.vuv.cz/files/pdf/edicni_cinnost/publikace/mlejnska_optimalizace_provozu_pomoci_extenzivnich_technologii.pdf. Vědecká práce. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
- [29] Dusičnany a jejich redukce v zahradním jezírku: Využití rostlin [online]. [cit. 2021-7-3]. Dostupné z: <https://www.jezirkabanat.cz/clanek/8/dusicnany-a-jejich-redukce-v-zahradnim-jezirku>

- [30] ZEDNÍK, Ondřej. *Studie intenzifikace kořenové čistírny pro obec Machová* [online]. Brno, 2018. [cit.2021-06-23] dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=180553. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Kriška, Ph.D.
- [31] Wikipedia: *Caltha palustris* [online]. [cit. 2021-6-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Caltha_palustris
- [32] *Ecotoxicology: Definition* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.nature.com/subjects/ecotoxicology>
- [33] *Ecotoxicology: Definition* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.thebts.org/careers/ecotoxicology/>
- [34] *Testy toxicity na organismech vodního prostředí* [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/852457-Testy-toxicity-na-organizmech-vodniho-prostredi.html>
- [35] KOČÍ, Vladimír, VÝZNAM TESTŮ TOXICITY PRO HODNOCENÍ VLIVŮ LÁTEK NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ. *Chemické listy*, 100, [online], 2006, 882-888 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2006_10_882-888.pdf
- [36] JANEČKOVÁ, Petra. *Ekotoxikologický screening léčiv – Paralen tbl. a Panadol tbl.* Hradec Králové, 2010. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze Farmaceutická fakulta v Hradci Králové.
- [37] Český statistický úřad: *Počet obyvatel v obcích* [online]. [cit. 2021-7-10]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-k-112021>
- [38] *Naše voda: Vylepšená čistírna na Vyškovsku* [online]. [cit. 2021-7-10]. Dostupné z: <https://www.nase-voda.cz/drazovicich-na-vyskovsku-maji-vylepsenou-korenovou-cistirnu/>
- [39] KAŠPAR, Otakar. *EKOTOXIKOLOGICKÉ HODNOCENÍ POLYMERŮ A BIOLOGICKY AKTIVNÍCH LÁTEK V AKVATICKÉM PROSTŘEDÍ.* Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [40] BALLNÉROVÁ, Petra. *EKOTOXIKOLOGICKÉ TESTY A JEJICH APLIKACE K HODNOCENÍ VEDLEJŠÍCH ENERGETICKÝCH PRODUKTŮ* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-02-21]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [41] *Ekotoxikologická laboratoř: Biologicko-chemicko-ekotoxikologická laboratoř* [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.ibot.cas.cz/cs/vedecke-skupiny-a-laboratore/oddeleni-experimentalni-fykologie-a-ekotoxikologie/laboratore/ekotoxikologicka/>
- [42] TECHNOR: Bezpečnostní tabulky a normy ČSN [online]. [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/757745-csn-en-iso-20079_4_78435.html
- [43] PEŠKOVÁ, K. Studium účinnosti odstranění mikropolutantů na kořenové čistírně odpadních vod [online]. [cit. 2,21-07-26]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. 2020.