

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra aplikované ekologie



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního
prostředí**

**Technické možnosti a údržba DUN, RN a návazných
mokřadních prvků**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

Bakalant: František Šoustal

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

František Šoustal

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Technické možnosti a údržba DUN, RN a návazných mokřadních prvků

Název anglicky

Technical possibilities and maintenance of rain settling, retention tanks and related wetland elements

Cíle práce

Cílem práce je zpracovat studii zaměřenou na problematiku dešťových usazovacích nádrží a retenčních nádrží podél komunikací a cest. Přiblížit jejich vlastnosti, fungování, využití a možnosti čištění srážek – smyvových vod.

Metodika

Rešeršní část bude z hlavní části zaměřena na shrnutí informací z odborných zdrojů, které se zabývají tématem čištěním znečištěných vod z komunikací. Bude popsáno řešení DUN, retenčních nádrží a návazných mokřadních systémů, co zachycují, legislativní rámec a normy týkající se nádrží a požadavky na kvalitu vypouštěné vody. Dále princip fungování, nároky na konstrukci, provoz a potřebné úkony pro udržování systému v optimálním stavu.

V praktické části bakalářské práce se vypracuje case study na fungující retenční nádrž Borek – Úsilné, která slouží pro odvodňování komunikace D3. Budou provedeny návštěvy a odběr vzorků rozboru. Následně se pojedná o kvalitě, stavu a intenzifikace nádrže.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Komunikace, srážky, voda, nádrže, čištění, mokřady

Doporučené zdroje informací

- CASELLES-OSORIO, Aracelly, Hamer VEGA, Juan Camilo LANCHEROS, Henry Alberto CASIERRA-MARTÍNEZ a Jose Euliser MOSQUERA. Horizontal subsurface-flow constructed wetland removal efficiency using *Cyperus articulatus* L. *Ecological Engineering* [online]. 2017, (99), 479-485. ISSN 09258574. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoleng.2016.11.062
- GILL, Laurence W., Pamela RING, Brian CASEY, Neil M.P. HIGGINS a Paul M. JOHNSON. Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. *Science of the Total Environment*. 2017, (601-602), 32-44. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.182.
- TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami: Praha. Sweco Hydroprojekt, 2013
- TP 83 Odvodnění pozemních komunikací: MD-OSI, 2014
- VYMAZAL, Jan. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water* [online]. 2010, (2-3), 530–549. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w2030530
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Tereza Hnátková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Konzultant

Mgr. Michal Šereš

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2022

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2022

Čestné prohlášení

Student na tomto místě prohlašuje, že se jedná pouze o jeho dílo níže uvedenou formulací: Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Technické možnosti a údržba DUN, RN a návazných mokřadních prvků vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne : 31.3.2022

.....
Podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí práce Ing. Tereze Hnátkové, Ph.D. a konzultantovi Mgr. Michalu Šerešovi za pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále také Tomáši Stručovskému za odborný dohled při odběrech vzorků v praktické části práce.

Abstrakt

Bakalářská práce seznamuje s možnostmi odvádění znečištěné dešťové vody ze stavěných ploch, zejména z pozemních komunikací. Práce popisuje způsoby zachycení a předčištění vod před vypuštěním do recipientů. Přibližuje funkce a možnosti využití dešťových nádrží a biologického čištění. Popisuje různé možnosti provedení umělých mokřadů a jejich účinnosti. Dále se zaměří na nároky na údržbu jednotlivých systémů.

Praktická část zahrnuje návštěvu a odběr vzorků z objektu pro čištění vod z dálnice D3. Vzorky vody a půdy z nádrže na úseku Borek-Úsilné. Z analýzy vzorků se popisuje schopnost čištění vody a návrh na intenzifikaci.

Klíčová slova: Komunikace, srážky, voda, nádrže, čištění, mokřady

Abstract

The bachelor's thesis introduces the possibilities of draining polluted rainwater from urban areas, especially from highways. The work describes methods of capturing and pre-treatment of water before release into recipients. It introduces the functions and possibilities of using rainwater tanks and biological treatment. It describes the various design options for constructed wetlands and their effectiveness. It will also focus on the maintenance requirements of individual systems.

The practical part includes a two visits and sampling from the facility for water treatment from the D3 highway. Water and soil samples from the tank in the Borek-Úsilné section. From the analysis of the samples determines the water treatment ability and the proposal for intensification.

Keywords: Communications, rain, water, tanks, treatment, wetlands

Obsah

1 Úvod	10
2 Cíl práce a metodika	11
2.1 Cíl práce	11
3 Dešťové nádrže	12
3.1 Dešťové usazovací nádrže	12
3.1.1 Podzemní usazovací nádrže	13
3.1.2 Přírodní otevřené usazovací nádrže	14
3.2 Filtry DUN	14
3.2.1 Odlučovač lehkých kapalin	14
3.2.2 Koalescenční filtr	15
3.2.3 Adsorpční filtr	15
3.2.4 Biologické dočištění	15
4 Retenční nádrž	16
4.1 Suché retenční dešťové nádrže (poldr)	17
4.2 Retenční dešťové nádrže se zásobním prostorem	17
4.3 Podzemní retenční dešťové nádrže	17
4.4 Umělé mokřady	18
5 Umělé mokřady	19
5.1 Druhy umělých mokřadů	20
5.1.1 Umělé mokřady s povrchovým tokem	20
5.1.2 Podpovrchové umělé mokřady	21
5.1.2.1 S horizontálním tokem	21
5.1.2.2 S vertikálním tokem	23
5.1.3 Hybridní umělé mokřady	24
5.2 Vegetace v umělých mokřadech	25
5.2.1 Rákos obecný (<i>Phragmites australis</i>)	26
5.2.2 Šáchor (<i>Cyperus articulatus</i>)	28
5.2.3 Orobinec širokolistý (<i>Typha latifolia</i>)	29
5.3 Substráty využívané v umělých mokřadech	30
5.4 Doba zdržení v umělých mokřadech	31
5.5 Eliminace polutantů v umělých mokřadech	33
5.5.1 Těžké kovy	33
5.5.2 Dusík	35
5.5.3 Fosfor	36
5.5.4 Chemická spotřeba kyslíku	36
5.5.5 Nerozpuštěné látky	37

5.6	Finanční stránka opatření	38
6	Legislativní rámec	39
6.1	Zákon číslo 254/2001 Sb.	39
6.2	ČSN 75 6551 Odvádění a čištění odpadních vod s obsahem ropných látek	39
6.3	ČSN 75 6261 dešťové nádrže	40
6.4	Nařízení vlády č. 401/2015 Sb.	40
6.5	TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami	41
6.6	ČSN 75 9010 Vsakovací zařízení srážkových vod	41
7	Provoz a údržba systémů pro nakládání se smyrovými vodami.....	43
7.1	Umělé mokřady	43
7.2	Retenční nádrže	45
7.3	Předčisticí zařízení	46
8	Případová studie – Retenční nádrž Borek-Úsilné	47
8.1	Popis lokality	47
8.2	Technický popis	48
8.3	Metodika odběru vzorků	48
8.3.1	Odběr kapalných vzorků	49
8.3.2	Odběr pevných vzorků	49
8.4	Metodika analýzy vzorků	50
8.4.1	Chemická spotřeba kyslíku – CHSK	51
8.4.2	Nerozpuštěné látky – NL	51
8.4.3	Biochemická spotřeba kyslíku – BSK.....	51
8.4.4	Konduktivita.....	51
8.4.5	Rozpuštěné Látky	52
8.4.6	Nepolární extrahovatelné látky – NEL	52
8.4.7	Uhlovodíky.....	52
8.4.8	Chloridy	52
8.4.9	pH.....	53
8.5	Výsledky	53
8.6	Návrh na intenzifikaci RN.....	57
9	Diskuse.....	59
10	Závěr.....	61
11	Zdroje	62
12	Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk	69
12.1	Seznam obrázků	69
12.2	Seznam tabulek.....	70
12.3	Seznam grafů.....	70

Přílohy	70
----------------------	-----------

1 Úvod

V současné době je hospodaření se srážkovými vodami často rozebírané téma. Povinnost hospodařit na každé nové stavbě se srážkovou vodou je zakotvena v zákoně. Dešťové vody dopadající na území komunikací se považují za znečištěné. Při jejich odvádění se požaduje čištění.

Odvádění odpadních vod ze silnic, popřípadě parkovišť a čerpacích stanic je řešeno pomocí oddílné stokové kanalizace. V dnešní době je ze silnic a dálnic odpadní voda sváděna do předčisticího zařízení a následně vyústěna do určeného recipientu. Navrhuje se především jako stupeň mechanického čištění a následné retenční nádrže.

Míra znečištění z pozemních komunikací se zvyšuje s hustotou dopravy. Dešťová voda, která se oplachem dostává z povrchu vozovky obsahuje nebezpečné látky, jako jsou oleje, ropné látky a jiné kontaminanty. Tyto škodlivé látky vznikají spalováním pohonných hmot, špatným stavem vozovky, dřením brzd a pneumatik, únikem brzdové kapaliny a nemrznoucí směsi. Používané čisticí metody na odvodňovacích systémech jsou dnes schopné splnit i velmi přísné požadavky na kvalitu předčištění srážkových vod. Problém nastává v zimních měsících, kdy jsou vozovky soleny. Chloridy obsažené ve vodě se pak dostávají do recipientů. Další nebezpečí nastává při havarijním úniku ropných látek, které by v případě nezachycení, mohly ohrozit půdu a vodu.

V bakalářské práci budou popsány objekty na kanalizacích odvádějící srážky ze znečištěného území a s tím spojené legislativní rámce. Princip a fungování nádrží pro čištění a zadržování vod. Možnosti, jak odpadní vodu dočistit v umělých mokřadech. Zaměřím se na jejich provedení a účinnost odstraňování kontaminantů ze zastavěného území. Dále na provoz údržbu nádrží a mokřadů.

V rámci praktické části bude proveden odběr vzorků z objektu pro čištění srážkových vod z dálnice D3 Borek-Úsilné. Porovnájí se výsledky z měření před a po období zimní údržby a navrhne se možná intenzifikace čištění v tomto objektu.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je popsat různé přístupy a technologie pro čištění anebo úpravu silničních či dálničních smyvu. Konkrétně se jedná o následující:

- Stručná rešerše o technologiích DUN
- Popsat typy využívaných RN
- Definovat platnou legislativu pro ČR
- Popsat a umělých mokřadů využívaných v rámci infrastruktury pro čištění silničních či dálničních smyvů
- Vyhodnotit účinnost DUN a umělých mokřadů pro čištění silničních či dálničních smyvu
- Stručně popsat provozní náročnost
- V rámci praktické části popsat případovou studii vybudované DUN a mokřadu a provést měření kvality vody

3 Dešťové nádrže

V rámci hospodaření s dešťovými vodami se navrhuje nádrže na manipulaci s nimi. Dešťové vody dopadající na zastavěné území jako třeba silniční komunikace se považují za znečištěné. Při návrhu odvádění znečištěné vody pomocí oddílné sítě, kdy jsou vody svedeny přímo do povrchového toku nebo do vsakovacího zařízení, se požaduje předčištění (Nypl, Synáčková, 1998).

Pokud není možné odvést zachycené znečištěné vody, do čističky odpadních vod, musí se řešit jejich úprava na oddílné stokové síti pomocí dešťových nádrží. Umisťují se před vyústěním do recipientů a jejich účelem je snížit, nebo zamezit kontaminaci recipientů znečištěnými dešťovými vodami. Voda se předčišťuje pomocí sedimentace v usazovacích nádržích. Dalším procesem v dešťových nádržích je retence, ta slouží k zředění odpadních vod a kontrolovanému odvádění do povrchové vody nebo průsakem do podzemní vody. Budovat dešťové nádrže se doporučuje v případě, že recipientu hrozí znečištění smyvovými vodami nad únosnou míru, případně nežádoucí přívalová vlna velkým přítokem (ČSN 75 6261, 2004; Nypl, Synáčková, 1998).

3.1 Dešťové usazovací nádrže

Dešťové usazovací nádrže (DUN) mají čistící a retenční funkci. (Nypl, Synáčková, 1998) Navrhují se pro oddílné síť dešťových kanalizací dálnic, rychlostních komunikací a komunikací v ochranných pásmech vodních zdrojů kdy hrozí, že smyvová voda bude obsahovat vysokou koncentraci polutantů způsobenou frekventovanou dopravou. Zachytává usaditelné látky (kal, hlína, písek či posypové látky), ropné látky a snižuje koncentrace těžkých kovů. Svedené dešťové vody budou procházet sedimentačním prostorem, kde se usadí těžší nerozpustné látky na dno a na hladině vznikne kalová vrstva (TNV 75 9011, 2013; TP83, 2014).

Ropné částice se gravitační separací dostávají na hladinu. Jako základní zachycení plovoucího znečištění se instalují norné stěny. V průtočných nádržích se instalují jako plovoucí, stěna se pohybuje se stoupající hladinou. Primární funkcí je zachycení ropných látek, zachytí však i jiné plavoucí znečištění na hladině. Je nutné,

aby stěna sahala dostatečně pod hladinu a nedocházelo tak k podtečení (TNV 75 9011, 2013; TP83, 2014).

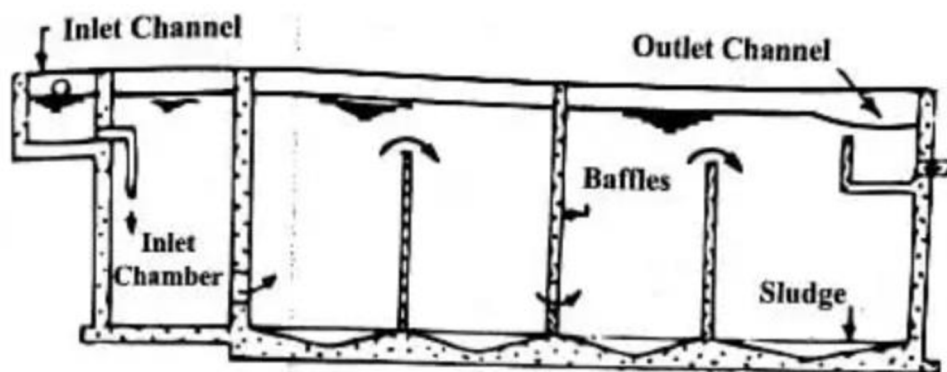
Usazovací nádrž musí odpovídat stanoveným požadavkům na kvalitu vypouštěných vod a být připravena na havarijní únik ropných látek. Předčištěná voda se odvádí dál dešťovou kanalizací. Využívá se několik způsobů konstrukce usazovacích nádrží. Dešťové usazovací nádrže na oddílné dešťové soustavě mohou budovat jako železobetonové podzemní zakryté nebo jako přírodní otevřené (TP83, 2014).

3.1.1 Podzemní usazovací nádrže

Podzemní kryté železobetonové usazovací nádrže jsou dodávány jako prefabrikované kusy, ty se sestavují přímo na místě. Oproti nádržím dodávaným v celku, nabízí prefabrikované rychlejší uvedení do provozu, efektivnější a levnější výstavbu, nenabízí však takovou odolnost na spojích jednotlivých částí (TP83, 2014).

Před vtokem do nádrže se umísťují hrubé česle, jako lapák nejhrubších částí. Opadají tak problémy s odpadem nebo živočichy, kteří by mohly do prostoru vniknout. Podzemní nádrže musí být vybaveny šachtovými vstupy nejlépe přímo u obslužné komunikace pro snadnou údržbu. Regulaci odtoku zajišťují samočinné regulační prvky. Dno nádrže se přizpůsobuje technologickým možnostem odstraňování sedimentu z usazovacího prostoru. Praktikována je kombinace mechanického stírání dna a hydraulického oplachování. Pravidelné čištění usazených kalů je důležité k zachování efektivity sedimentace při celoročním provozu. Celá železobetonová konstrukce musí být vodotěsná a projít zkouškou vodotěsnosti (TP83, 2014; ČSN 75 6261, 2004).

Usazovací nádrže u dešťových komunikací jsou navrhovány jako průtočné (ČSN 75 6261, 2004). Tak aby v nich voda nestála, ale aby za velmi pomalého proudění umožnila těžkým látkám se usadit a ropným látkám, které jsou lehčí než voda vyplavat na hladinu. Tvar půdorysu bývá obdélníkový. V takové nádrži je proud veden horizontálně. Maximální rychlost v podélné nádrži je 0.05 m/s. Podélné nádrže vyžadují větší délku, jelikož se musí dát sedimentům čas, aby klesly ke dnu (Nypl, Synáčková, 1998; Pírek, 2011).



Obr. 1: Dešťová usazovací nádrž zakrytá (The Constructor, 2021)

3.1.2 Přírodní otevřené usazovací nádrže

DUN na oddílné stokové soustavě mohou být navrhovány též jako nádrže přírodní. Jejich provedení je jednodušší a umožňuje vytvořit velký usazovací prostor při menších investičních nákladech. Nádrže se navrhují jako malé vodní nádrže. Půdorysný tvar závisí na místních podmínkách. Na přívodu dešťové vody je nutné navrhnout utěsněnou komoru, kde dojde k předčištění hrubých předmětů a zachycení havarijního znečištění. Na odtoku potom zapotřebí zamezit úniku ropných látek při jejich výskytu na hladině (TP83, 2014; ČSN 75 6261, 2004).

3.2 Filtry DUN

3.2.1 Odlučovač lehkých kapalin

Na principu oddělení kapalin lehčích než voda pomocí gravitace pracuje i odlučovač lehkých kapalin. Ten se navrhuje v usazovacích nádržích společně v jedné nebo oddělené komoře s prostorem pro usazování. Slouží k předčištění odpadní vody z vysoce frekventovaných silnic, vytížených parkovišť, benzínových stanic a místech kde hrozí kontaminace recipientu ropnými látkami. Pro havarijní případy úniku ropných látek je odlučovač opatřen uzávěrem, který se při překročení maximální úrovně hladiny automaticky zavře a zamezí tak odtoku ze systému (ACO, 2022).

3.2.2 Koalescenční filtr

Koalescenční filtry fungují na principu koalescence. Tedy spojování kapek lehkých kapalin protékající filtrem ve větší celek. Vložka filtru bývá pěnová, pro maximální čistící účinek je vhodné je řadit do kazet za sebou a zvýšit tak styk aktivní plochy s vodou. S koalescenčním filtrem a gravitačním odlučovačem je maximální obsah ropných látek ve vypuštěné vodě do 5 mg/l. Filtrační náplň se nijak neopotřebovávají což při pravidelné údržbě přispívá k dlouhé životnosti a účinnosti. Filtr se dá snadno vyjmout a omýt proudem vody v případě čištění (TP83, 2014; Asio, 2022).

3.2.3 Adsorpční filtr

Při vyšších nárocích na čistotu vody, než může být dosaženo koalescenčním filtrem, se používá adsorpční filtr. Instaluje se na výstupu z usazovací nádrže nebo jako samostatný objekt za ní. Jedná se o velmi účinnou metodu filtrace vody přes různé materiály s adsorpční schopností. Volba materiálu ovlivní účinnost odstraňování jednotlivých polutantů ve vodě. Převážně se jedná o aktivní uhlí, zeolity a adsorbenty olejů, jako například textilie nebo vata. Na filtr by se měla dostávat pouze předčištěná voda bez nerozpustných látek. Adsorpční filtry se používají jen ve výjimečných případech, díky jeho vysokým nákladům na provoz (TP83, 2014; TNV 75 9011, 2013).

3.2.4 Biologické dočištění

Jako biologické dočištění po předčištění vody v usazovací nádrži se nabízí umělý mokřad. Procesy fyzické a chemické jsou zde doplněny o biologické procesy čištění. To probíhá v mokřadním nebo vodním filtračním prostředí. Hlavní výhodou jsou přírodě blízké podmínky takového systému. Je nutné ochránit mokřad před úniky ropných látek, jelikož mohou zničit biologické funkce (TP83, 2014).

4 Retenční nádrž

Retenční nádrže (RN) jsou objekty pro zadržení odtoku dešťových vod. Navrhují se, pokud je požadováno řízené vypouštění do recipientů a předešlo se tak přetížení. Odtok se reguluje pomocí regulátoru odtoku na hodnotu stanovenou dle norem. Každá retenční nádrž musí obsahovat bezpečnostní přeliv k odvedení vod při větší než navrhované srážce. Objekty by se měli konstruovat tak, aby nedocházelo k prosakování, v případě hrozícího havarijního znečištění. Při potřebě předčištění vod z více vytižených komunikací se kombinují zadržovací a usazovací nádrže, jelikož velký retenční prostor se čistí hůře. V zařízení pro předčištění by se také mělo zachytit havarijní znečištění. Rychlost bezdeštného průtoku, v retenční nádrži, by měla být minimálně 0,6 m/s. Objekty vyžadují pravidelné kontroly a údržby, proto je zapotřebí zajisti příjezdové cesty pro vozidla. Dále se dělí na nadzemní a podzemní (TNV 75 9011, 2013; TP83, 2014).

Retenční nádrže se budují jako suché nebo se stálou vodní hladinou. Je vhodné navrhovat nádrže s ohledem na ochranu životního prostředí, jako povrchové nádrže se stálou hladinou vody a zatravněnými břehy (Kuk a kol. 2020).



Obr. 2: Povrchová retenční nádrž Borek-Úsilné

4.1 Suché retenční dešťové nádrže (poldr)

Retenční nádrž typu suchý poldr je zemní otevřená nádrž. Jde o vymezenou záchytnou zónu, která se zatápí pouze na krátkou dobu při dešti. Plocha je většinou osázena vegetací. Pro zamezení zanášení nádrže nerozpuštěnými látkami a sedimentem se na vtoku do objektu buduje oddělený usazovací prostor (TNV 75 9011, 2013; Kuk a kol. 2020).

4.2 Retenční dešťové nádrže se zásobním prostorem

Tato zemní otevřená nádrž má svůj prostor, který je trvale pod vodou. Regulátor odtoku vypouští vodu přesahující stanovenou úroveň hladiny zásobního prostoru. Svým provedením se nejvíce blíží přírodním nádržím. Dno nádrže se osazuje vegetací, slouží tak jako životní prostor pro různé živočichy a rostliny. Pokud je to možné, voda z usazovacího prostoru by měla protékat částí trvale zatopené nádrže osázené vegetací. Protékání vody přes území s vegetací snižuje průtokovou rychlost, a tím podporuje další usazování a čistící procesy. Vzniká tak biotop s biologickým čištěním vody (TNV 75 9011, 2013; TP83, 2014).

4.3 Podzemní retenční dešťové nádrže

Podzemní retenční nádrže se realizují jako velké potrubí nebo vodotěsný prostor pod úrovní terénu. Jako materiál se využívá železobeton nebo plast. Navrhuje se v případech hrozícího hygienického ohrožení nebo nedostatku plochy v dané lokalitě. Musí obsahovat zařízení pro vstup sloužící k umožnění údržby a čištění. Je nutné navrhnu otvory snadno přístupné a ovladatelné. Také je zapotřebí navrhnu otvory o dostatečné velikosti, aby se dal odstranit všechen zachycený materiál. Nádrž musí být vybavena dostatečným větracím průduchem. Regulátor odtoku se nachází na nejnižším místě nádrže (TNV 75 9011, 2013; TP83, 2014).

4.4 Umělé mokřady

Uměle vybudovaný mokřad je mělká nádrž se stálou vodní hladinou osázená mokřadní vegetací. Je nutné provést předčištění v odděleném usazovacím prostoru, aby se mokřad nezašle. V umělých mokřadech dochází k biologickému čištění smyvových vod. Zajišťuje výšení vlhkostních poměrů, dočištění vody, zdržení a regulaci odtoku vody (TNV 75 9011, 2013).

5 Umělé mokřady

Uměle vytvořené mokřady jsou mělké nádrže se stálým nadržением a s vodními rostlinami, které plní funkci biologického čištění srážkových vod (TNV 75 9011, 2013). Jde je přírodě blízký systém s jednodušší technologií výstavby a malými nároky na údržbu, aplikovaný již v mnoha případech. Čistí různé druhy odpadních vod, jako například smyvvové vody z pozemních komunikací. Procesy odehrávající se v systému podporující čištění je především filtrace, nitrifikace, denitrifikace a usazování. Důležitý je výběr vegetace a filtračního substrátu. Brát ohled se musí nejen na zacílení na specifické polutanty, ale i na oblast a teploty. Umělým mokřadům zpravidla předchází zóna předčištění, k tomu může sloužit usazovací nádrž. Je důležité, aby se do systému nedostaly větší částice pevných látek, odpad, popřípadě organických látek obsažených v znečištěné vodě. Mohou vést k ucpání pórů filtrační vrstvy mokřadu a způsobit neprůchodnost zejména systému s podpovrchovým tokem (Hoffmann a kol. 2011; Vymazal, 2022).

Vybudované mokřady využívají přirozené biochemické procesy vyskytující se ve vodním a mokřadním prostředí. Cílem je, aby k těmto procesům docházelo pod větší kontrolou ve vybraných lokalitách. Přesně se určí kombinace filtračního substrátu, vodní vegetace a směru toku. Oproti přírodním mokřadům se dá určit velikost, výška hladiny a hydraulické vlastnosti systému. Jsou navrhovány tak, aby napodobovaly přírodní mokřady. Nenarušují ráz krajiny a podporují lokální biodiverzitu (Vymazal, 2022).



Obr. 3: Systém pro čištění odpadních vod sestávající ze tří usazovacích nádrží, čtyř mokřadů s horizontálním tokem a dvou mokřadů s vertikálním podpovrchovým tokem, (Samsó, 2014)

5.1 Druhy umělých mokřadů

Umělé mokřady se dělí do dvou kategorií. Systémů s povrchovým tokem (volnou hladinou) a systémů s podpovrchovým tokem, ty se dále dělí podle směru toku vody na horizontální a vertikální. V dnešní době se stále více aplikuje kombinace těchto dvou typů do jedné soustavy, taková varianta se nazývá hybridní mokřad (Vymazal, 2022).

5.1.1 Umělé mokřady s povrchovým tokem

Hojně využívaný typ umělého mokřadu je mokřad s volnou vodní hladinou. Používají se k čištění odtokových vod ze zastavěných oblastí, silnic a dálnic. V tomto typu se organické látky odstraňují pomocí metabolismu bakterií. Bakterie se vyskytují převážně přichycené na kořenech, případně stoncích a listech. Aby voda v mokřadu byla více v klidu je chráněna pomocí vegetace před větrem. Pomalejší tok přispívá k účinnějšímu usazování pevných látek. Proces denitrifikace se odehrává ve vrstvě mrtvých těl rostlin na dně. Omezený kontakt znečištěné vody a částicím v půdě způsobuje obecně velmi malé schopnosti odstraňování fosforu v mokřadech s povrchovým tokem (Vymazal, 2013; 2022).

Mokřady s volnou vodní hladinou se rozlišují podle vysázeného vodního rostlinstva. Mohou to být rostliny voně plavoucí s kořeny nepřipojenými k půdě. Tokozelka nadmutá (*Eichhornia crassipes*) je příkladem větších rostlin tohoto druhu, mohou se použít i menší jako rostliny Okřehkové, především záleží na oblasti a klimatu v regionu. Submerzní makrofyty neboli ponořené rostliny se využívají jen jako dočišťovací metoda. Při větším výskytu pevných látek dochází k neúplné fotosyntéze vegetace. Stolístek klasnatý (*Myriophyllum spicatum*) je druh vysazený ve většině mokřadů s ponořeným rostlinstvem. Především se aplikují rostliny vynořené, využití v široké škále případů. Typická podoba takového systému je mělká nádrž s hloubkou vody 20-40 cm a 20-30 cm půdního substrátu. Vegetace vynořená nad hladinou často pokrývá více než polovinu vodní plochy. Nejčastěji se v Evropě vysazuje rákos obecný (*Phragmites australis australis*) nebo orobinec širokolistý (*Typha latifolia*). Většinou se rostliny nesklízí, jejich mrtvá těla poskytují ve spodní

vrstvě podmínky pro denitrifikaci a vytvoření anaerobního prostředí (Vymazal, 2010; 2022).



Obr. 4: Umělý mokřad s povrchovým tokem (Vymazal, 2010)

5.1.2 Podpovrchové umělé mokřady

Umělé mokřady s podpovrchovým tokem se dělí podle směru toku na horizontální a vertikální. Do horizontální jednotky je znečištěná voda dodávána neustále, systém s vertikálním tokem je vodou zatěžován přerušovaně. Jiné metody přísunu vody vedou k rozdílným podmínkám v substrátu, kdy v mokřadu s horizontálním tokem nastává aerobní prostředí a anaerobní se vyskytuje v mokřadu s vertikálním tokem (Vymazal, 2022).

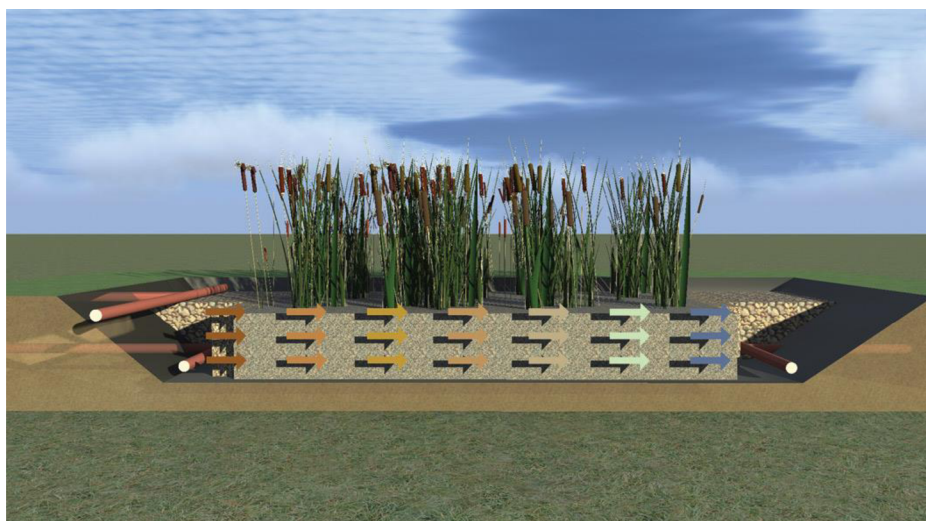
5.1.2.1 S horizontálním tokem

Umělé mokřady s podpovrchovým horizontálním tokem jsou označovány jako kořenové čistírny. V tomto systému se předčištěná voda pohybuje pomalu pod povrchem převážně horizontálním směrem k odtoku. Protéká filtračním substrátem osázeným mokřadní vegetací, kde dochází ke odstraňování kontaminantů. Ve filtrační vrstvě se odehrává mikrobiální degradace a procesy fyzické a chemické

v aerobních a anaerobních prostředích. Aerobní prostředí se v médiu vyskytuje v okolí kořenů a oddenků rostlin, z kterých kyslík uniká do substrátu. Kořeny rostlin poskytují prostředí pro život bakterií, které odbourávají organickou hmotu. Vrstva je vodotěsně oddělena od okolí. Zabraňuje se tak úniku polutantů do podzemní vody (Vymazal, 2022).

Ve většině případů se s velkou efektivitou se pomocí filtrace a sedimentace zadržují suspendované pevné látky. Organické látky jsou odstraňovány především mikrobiální degradací v anaerobním prostředí pomocí bakterií u kořenů a oddenků rostlin. Procesy nitrifikace a denitrifikace probíhající v půdě zbavují vodu dusíku. V systémech s horizontálním tokem však nedochází k dostatečnému okysličení rhizosféry, proto není nitrifikace úplná, což je hlavním důvodem slabšího odbourávání dusíku. S menším okysličením filtrační vrstvy trpí také možnost vypořádat se s amoniakem. Zbavování vody fosforu je spojeno s použitým médiem v mokřadu, pokud nejsou použity vybrané materiály schopny sorpce fosforu, tak je často účinnost malá (10-30 %) (Vymazal, 2008; 2010).

Původně z Německa, avšak dnes se toto provedení používá celosvětově. Dřívější podoby umělého mokřadu s horizontálním tokem byly zóny osázené rákosem obecným (*Phragmites australis*) a zeminou jako médiem. V dnešních systémech zeminu nahradil štěrk o velikosti zhruba 10 mm. Testování dalších substrátů je velmi rozebírané téma. Používá se k čištění jak domácí a industriální odpadní vody, tak smykových vod ze silnic (Vymazal 2008; 2010).



Obr. 5: Umělý mokřad s horizontálním podpovrchovým tokem (Křiška, 2021)

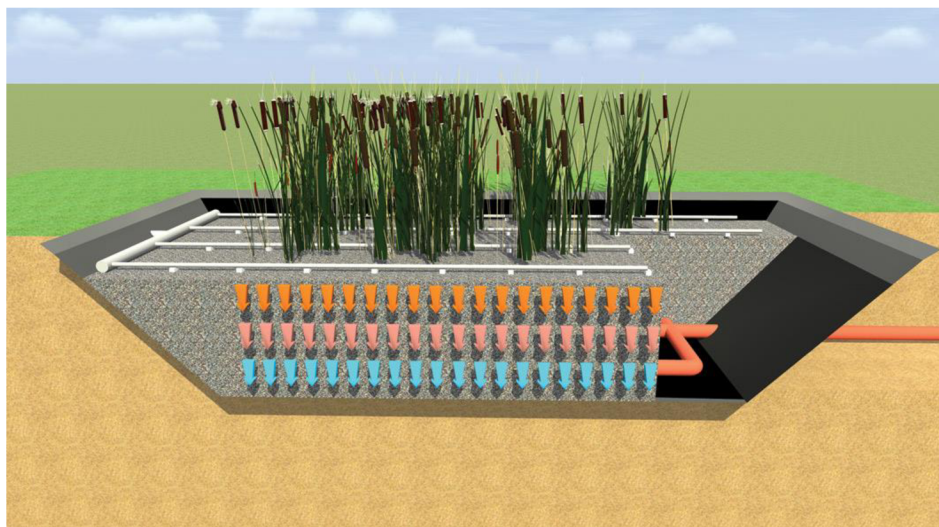
5.1.2.2 S vertikálním tokem

Umělý mokřad s vertikálním tokem je dalším typem systému s podpovrchovým tokem. Voda je obvykle vedena ze shora dolů, ale používají se i varianty s obráceným tokem kdy je voda hnána k povrchu. Jednotka z voděodolného materiálu je zasazená do země. Často se skládá ze dvou až čtyř vrstev rozdílného substrátu. Jelikož voda v průběhu cyklu projde vícero filtračními médii je možné zacílit na odstranění širší škály polutantů. Jako filtrační materiál se používá písek, hrubý štěrk nebo kameny. Osázen bývá obvykle rákosem obecným (*Phragmites australis*). Voda je do systému přiváděna pomocí potrubí umístěného ve vzduchu nad první vrstvou tak, aby rovnoměrně pokryla povrch. Odvodnění je řešeno drenážním potrubím, které sbírá vodu po celém spodku a svádí ji do vyústění (Tsihrintzis, 2017; Vymazal, 2022).

Oproti mokřadům s horizontálním tokem je do těch s vertikálním tokem znečištěná voda přiváděna přerušovaně velkými dávkami. To přináší problémy spojené s tímto druhem systému, jako záplavu povrchu, přehlcení, ucpání a celkově menší účinnost odstraňování dusíku z vody. Proto se musí klást důraz na zvolení vhodného filtračního substrátu a zajistit rovnoměrné rozvádění vody v optimálním množství. Více vrstvý filtrační substrát sestávající ze zeolitu a štěrku se ukázal jako účinný, s poměrem odstranění 57 % pro suspendované pevné látky, 45 % pro organické látky a 73 % pro amoniak. Je také zřejmé, že systémy s různými druhy filtračních substrátů si vedou lépe než ty s jedním (Singh a kol. 2014).

Vyžadují se větší nároky na provoz a údržbu, jelikož jsou k chodu zapotřebí trubky, pumpy, časovače a další elektrické zařízení, oproti mokřadům s horizontálním tokem (Vymazal, 2008). Vertikální mokřady jsou obecně účinnější v odstraňování kontaminantů a zabírají méně místa než systémy s horizontálním tokem. Znečištěná voda je do mokřadu přiváděna intervalově 4krát až 12krát za den s dlouhými přestávkami mezi dávkami. Celý systém se skládá z rozdělených jednotek, aby se mohly zaplavovat střídavě. Voda se nechá protéct na dno, kde je odvedena a povrch mezitím vyschne. Jelikož mokřadem neproudí voda neustále dokáže se více provzdušnit. To způsobuje vhodné podmínky pro nitrifikaci, mokřad ovšem není schopen procesu denitrifikace. Jejich návrh a provedení je složitější a vyžadují hlubší znalosti. Důležitá je také prevence ucpání, která velice nebezpečná pro tento druh umělého mokřadu a vyžaduje odbornější přístup. Mokřady s vertikálním tokem

se uplatňují kvůli svému složitějšímu provedení převážně ve vyspělejších zemích. (Hoffman a kol. 2011).



Obr. 6: Umělý mokřad s vertikálním podpovrchovým tokem (Křiška, 2021)

5.1.3 Hybridní umělé mokřady

Hybridní umělý mokřad představuje kombinaci různých druhů umělých mokřadů navazujících na sebe. Byl vyvinut k posílení schopnosti eliminace polutantů mokřadu s jedním stupněm. Charakteristiky jednotlivých systémů se tak mohou doplňovat, a vyřešit nedostatky při procesu čištění vody. Používáné je spojení mokřadů s horizontálním tokem a následně s vertikálním tokem. Hybridní systémy stoupají na popularitě, i přes větší náklady na výstavbu a komplikovanější provedení (Hoffmann a kol. 2011).

Dříve hybridní umělý mokřad sestával z velké plochy s horizontálním tokem, který v první řadě odstraňoval organické látky, rozložené pevné látky a prováděl denitrifikaci. Voda se z retenčního zařízení přerušovaně přiváděla na čisticí jednotku s vertikálním tokem. Ta měla za úkol dočistit vodu od organických a pevných látek. Dále pomocí nitrifikace eliminovat amoniak a dusík (Vymazal, 2008).

V dnešní době se hybridní mokřad skládá z více než dvou jednotek umělých mokřadů. Často obsahuje i stupeň s volnou vodní hladinou. Mnoho kombinací čisticích jednotek se celosvětově používá k čištění různých druhů odpadních vod. V Estonsku se kombinovaný mokřad skládá ze dvou jednotek s vertikálním tokem.

Následuje jednotka s horizontálním tokem a ve třetím stupni dvě jednotky s volnou vodní hladinou (Vymazal, 2008).

5.2 Vegetace v umělých mokřadech

Vegetace v umělých mokřadech prokazatelně zvyšuje čistící efektivitu systému. Rostliny rostoucí v mokřadech jsou z pravidla hygropyty. Tento druh je schopen přežít ponořený pod vodou. Hydrofyty se dělí na submerzní, natantní a emerzní. V mokřadech se vysazují především emerzní hygropyty. Rostou částečně vynořené, jako příklad lze uvést v mokřadech oblíbený rákos obecný (*Phragmites australis*). Jsou schopny se uchytit ve vodě do hloubky až 150 centimetrů. Do kořenů se kyslík dostává pomocí velkých vnitřních prostorů, kterými se pohybuje (Brix, 2003).

Rostliny jsou jednou z hlavních složek umělých mokřadů a jsou důležité v procesu eliminace kontaminantů ze smykové vody. Schopnost samotné vegetace zachytit částice nečistot v listech a kořenech je jen velmi malá v porovnání se sedimentem. Hlavním přínosem jsou kořeny vytvářející ve filtrační vrstvě podmínky pro procesy, při kterých jsou odstraňovány škodlivé látky. Fyzikální účinky kořenové struktury a aerace, kterou kořeny umožňují v substrátu se považuje za nenahraditelnou. Kořeny přispívají k lepší filtraci a snížení rychlosti průtoku vody v systému, což vede k lepšímu usazování. Napomáhá také k rovnoměrnému rozložení vody a v neposlední řadě snižují pravděpodobnost ucpání média. Kořeny a jejich oddenky dodávají substrátu kyslík a v jejich okolí se tvoří rhizosféra (Shelef a kol. 2013). V rhizosféře se ovlivňují kořeny rostlin a půdní mikroorganismy, látky a plyny uvolněné z kořenů ovlivňují fyzikálně-chemické podmínky a poskytují mikroorganismům zdroj uhlíku a energie. Právě aktivita půdních mikroorganismů hraje velkou roli při čištění vod, každý vliv na ně má nezanedbatelný vliv na celý mokřad (Kaštovská, 2019).

Osazení rostlin má vliv i na snížení chloridů, které se mohou ve smykových vodách nacházet. Jsou problémem v zimních měsících při solení komunikací. Zatím se je nedaří efektivně likvidovat. Do podmínek s možnou vysokou salinitou prostředí jsou doporučovány nasadit halofilní rostliny. Zasolení půdy nebo vody může dosáhnout až 6 %. V teorii mohou sloužit v umělém mokřadu jako filtry pro čištění

zasolené vody. Problém je však v nutnosti rostliny snášet širokou škálu různých solí. Nedisponují schopností zachytit podstatné množství iontů chloridu, aby dostatečně zredukovaly sůl ve vodě. Na uspokojivou eliminaci solí je zapotřebí příliš velká záchytná plocha, která je v praxi téměř nereálná (Shelef a kol. 2013; Kuk a kol. 2020).

5.2.1 Rákos obecný (*Phragmites australis*)

Jedná se o trvalý helofyt rostoucí během jara. V zimních měsících spí. Znovu doroste další vegetační sezonu na jaře. Rákos obecný dosahuje nejvyšší výšky v letních měsících. Teplota hraje rozhodující roli při růstu rostliny, dorůst může až do výšky 5 metrů. Ke konci vegetačního období, kdy rostlina dospívá, ztrácí teplota svůj vliv na výšku a průměr. Dobrý přísun živin a jejich dostupnost zvyšuje počet sílu kořenů, výhonků, živých listů, výšku rostliny, hmotnost a průměr. Více živin se do mokřadu dostává díky povrchovému odtoku při deštích (Gorme a kol. 2012; Packer a kol. 2017).

Rákos snáší velké teplotní rozdíly. Dobře si také vede ve znečištěné vodě. Je schopný snášet různé toxické látky včetně obsahu soli v prostředí. Dokáže pracovat s organickými i anorganickými látkami. Jeho kořeny přenášejí velké množství kyslíku a mikroorganismů do podloží. Přispívá tak k lepším výkonům média v umělém mokřadu (Gorme a kol. 2012; Packer a kol. 2017).

V Evropě a mnoha dalších částech světa je převládajícím rostlinným druhem rákos obecný (*Phragmites australis*). Oblíbený je díky svým čistícím schopnostem. Jeho rozšířenost, schopnost růst v různých hloubkách, snadné zacházení, nenáročnost a vysoká tolerance na složení vody jsou dalšími důvody velké četnosti jeho využívání. Jedná se o makrofyty. Tento druh rostlin odolává téměř ve všech klimatických podmínkách. Rákos se hodí i do chladnějších klimát, využívá při budování mokřadů v chladných severských oblastech (Nivala a kol. 2020; Senduran a kol. 2018).

Ve výzkumech se prokázalo, že rákos obecný může být vysazen v umělých mokřadech, ve kterých se upravují dešťové vody znečištěné ropnými látkami. Přes neustálé vystavení vysokým koncentracím těchto sloučenin se u rostlin neprojeví žádné negativní změny nebo odumírání jejích částí. Zachytávání ropných částic samotnou vegetací je minimální. Důležitá je schopnost rákosu obecného přežít v takto toxických podmínkách, a vytvořit tak prostředí pro výskyt mikroorganismů.

Právě jejich aktivita se uvádí jako hlavní příčina odstranění uhlovodíků z dešťové vody v mokřadu (Bergier, Włodyka-Bergier, 2015).

Rákos obecný je extrémně invazivní druh. Při vysazení v umělém mokřadu společně s jinou rostlinou je pravděpodobné, že za nějaký čas v systému převládne. V experimentálním mokřadu byl vedle rákosu použit orobinec širokolistý, který i přes to že se také jedná o invazivní rostlinu byl postupem času vytlačen a v mokřadu se vyskytoval pouze okrajově. (Gill, 2017) V Americe je díky svému agresivnímu růstu považován za nežádoucí, a dokonce je jeho vysazení často zakazováno (Nivala a kol. 2020).

Při podrobném zkoumání bylo pozorováno zastoupení různých polutantů v částech rákosu obecného. Koncentrace byly velmi malé, až zanedbatelné v porovnání se sedimentem. Je možné pozorovat větší koncentrace v kořenech než v listech (Gill a kol. 2017).

Rostliny mají schopnost ve svých tělech zadržet posypové soli ze silnic. Když se sůl začne z vozovky uvolňovat prokazuje rákos schopnost ji eliminovat. Zabrání chloridům dostat se do recipientů. Dokáže z půdy absorbovat až 650 kg/ha chloridů. Ovšem na jeden km silnice se v průměru spotřebuje 20 tun chloridů. Na účinné zachycení by tedy byla potřeba velká plocha (Kuk a kol. 2020).



Obr. 7: Rákos obecný (*Phragmites australis*) v mokřadním prostředí (Sarika, 2020)

5.2.2 Šáchor (*Cyperus articulatus*)

Tento rychle rostoucí makrofytní druh pochází z tropických a subtropických oblastí světa a dorůstá výšky až 2 metry v letních měsících. Zdá být slibným druhem vegetace pro osazování do umělých mokřadů v teplých oblastech světa (Caselles-Osorio a kol. 2017).

Studie ukazují, že teplé a stabilní teploty totiž přispívají k větším výkonům rostliny, zvýšené mikrobiální biodegradaci, a tedy k menšímu potřebnému času pro zadržení vody. Podporující tak čistící účinnost v mokřadu (Noriega-Rico a kol. 2021). Systém osazený šáchoem oproti systému bez vegetace prokázal velké zvýšení odstraňování znečišťujících látek. Je schopen dodat velké množství kyslíku do média mokřadu než ostatní často využívané druhy rostlin. Kvůli jeho rychlému růstu bylo nutné nashromážděnou biomasu sbírat a zvýšily se tak nároky na údržbu umělého mokřadu (Caselles-Osorio a kol. 2017).

Příjem těžkých kovů samotným šáchoem v umělém mokřadu byl velmi malý. Přednější roli hrají mikroorganismy vyskytující se v systému díky kořenům rostliny, které jsou schopny akumulovat kovy ve vodě. Šáchor dokázal akumulovat 1,62 % Olova, 2,26 % Mědi, 1,95 % Zinku a 1,7 % Chromu. Výsledky takto malých hodnot jsou podobné i v dalších studiích (Zhou a kol. 2019).

(Caselles-Osorio a kol. 2017) ve své práci připisuje šáchoru zásluhu na téměř neutrálním pH, které měla voda v umělém mokřadu. Rostliny totiž vstřebávaly amoniak, a vyvolaly změny v rhizosféře. Další pozitivum měl Šáchor na evaporaci dešťové vody v mokřadu. V porovnání s neosazeným systémem se měsíční evaporace zvýšila o skoro 600 %, především díky většímu množství biomasy. V mokřadu se tak neshromažďuje tolik znečištěné dešťové vody, která by jinak musela systémem projít. Znečištěná voda přeměněná na páru v důsledku evaporace se stává čistou. Pozoroval také, že v osazeném systému se dokázalo odstranit až 75 % dusičnanů přítomných ve vodě. Došlo k tomu díky denitrifikaci posílenou kořenovým systémem

a příjem dusičnanů samotným šachorem. Dusík bývá rostlinami snadno přijímán (Caselles-Osorio a kol. 2017).



Obr. 8: Šáchor (*Cyperus articulatus*) (Plants of the World Online)

5.2.3 Orobinec širokolistý (*Typha latifolia*)

Orobinec je vytrvalá hydrofytní bylina rozšířená hlavně v tropických a subtropických oblastech. V mírném pásmu se vyskytuje zřídka. Rostlina má oddenky a štíhlé stonky zelené barvy ne jejich konci jsou hnědé hlávky. Roste na nejrůznějších místech, jako například v mokřadních a zatopených oblastech. Dokáže bioakumulovat různé těžké kovy. Je schopný snášet salinitu prostředí a detoxikovat organické kontaminanty. V umělých mokřadech je používán hlavně díky jeho vysokým podílům kořenové a vyprodukované biomasy (Papadopulos a kol. 2019).

Prokazoval velikou toleranci znečišťujících látek vyskytujících se v prostředí růstu a bylo pozorováno i přijímání látek. Právě schopnost orobince růst v prostředí s nepříznivými podmínkami a lehké rozmnožování z nich činí velmi vhodné byliny pro umělé mokřady (Meitei, Prasad, 2021).

Při porovnání s rákosem obecným se zdá být rákos lepší volbou. Obě vysazené rostliny v mokřadu prokazovaly podobné vlastnosti a dokázaly se uchytit. Ovšem rákos se zdá být o něco lepší volbou, jelikož jeho nasazení v oblasti umělých mokřadů je oblíbené a více prozkoumané. I zde se rákos vyskytoval ve větších číslech a jednotka, kde byl osázen měla o něco větší účinnost. Proto se stavitelé při osazování velkoplošných umělých mokřadů přiklánějí spíše k rákosu, jelikož prokázal rychlý růst a začlenění, neohrozil tak čistící proces systému (Calheiros a kol. 2009).



Obr. 9: *Orobinec širokolistý (Typha latifolia)* (Michalcová, 2020)

5.3 Substráty využívané v umělých mokřadech

Filtrační náplň je jednou ze tří základních součástí umělého mokřadu. Její výběr je pro jeho správnou funkci zásadní. Substrátem v systémech s podpovrchovým tokem protéká celý objem znečištěné vod. V médiu žijící mikroorganismy eliminují polutanty. Další procesy sloužící k čištění vody odehrávající se v substrátu jsou filtrace, sedimentace, nitrifikace, denitrifikace a adsorpce. V substrátu také roste mokřadní vegetace, která přispívá k jeho lepším funkcím (Lesikar a kol.; Mlejnská, 2017).

Nejdůležitější kritérium při vybírání substrátu je textura, přesněji velikost jednotlivých zrn. Jemnější zrna dokáží filtrovat menší částičky polutantů a mají větší aktivní plochu, ve které probíhají čistící procesy. Jemnější medium je účinnější

v odstraňování dusíku, ale jsou velmi náchylné na ucpání. Můžeme se setkat s půdou, pískem, štěrkem, kamenivem, případně organickými látkami jako substrátem v mokřadech s podpovrchovým tokem (Lesikar a kol.).

V umělých mokřadech s vertikálním tokem je oblíbený písek jako filtrační substrát. Je jemný, levný a dobře dostupný, ale také vysoce náchylný na zanesení a kolmataci. V mokřadech s horizontálním tokem proto se používá jako substrát kamenivo. Kapacita adsorpce je u kameniva menší. To má za následek nižší účinnost při odstraňování dusíku. Dalším limitujícím faktorem je, že štěrk ani kamenivo neobsahují větší množství železa, hliníku a vápníku, které jsou zapotřebí pro eliminaci fosforu (Vymazal, 2008).

Účinný substrát pro eliminaci solí z vysoce solených vod může být umělé kamenivo. S vegetací schopnou přežít ve slané vodě dokázal minimalizovat obsah chloridů v odpadní vodě. Systém s umělým kamenivem však potřeboval dlouhou dobu zdržení, a to až 4 týdny pro dosažení maximálního účinku (Jesus a kol. 2013).

Populární je použití i speciálních substrátů. Jedním z příkladů je zeolit. Jejich hlavní předností je dobré vázání mikroorganismů a eliminace amoniakálního dusíku při čištění znečištěných vod. Zeolitový substrát je schopný udržet efektivní adsorpční schopnost až pod dobu 2 let (Singh a kol. 2014).

5.4 Doba zdržení v umělých mokřadech

Doba zdržení vody je důležitý parametr v umělém mokřadu, který zásadně ovlivňuje efektivitu čistících schopností. Měla by se proto regulovat velikost přítoku do mokřadu. Čím déle je voda vystavena kontaktu se substrátem a vegetací, tím mají mikrobiální procesy více času odstranit polutanty. Pro dosažení požadované doby zdržení je zapotřebí navrhnout vhodnou velikost a tvar mokřadu. Krátká doba zdržení vody může mít za následek neúplnou denitrifikaci. Doba zdržení ovlivňuje typ použitého substrátu, hloubka vody, sklon systému, poměr délky a šířky systému. Dále převažující typ makrofyty a teplota. Vegetace provzdušňuje sediment a zvyšuje nerovnosti dna mokřadu. Způsobuje tím delší dobu zdržení vody v mokřadu. Doba zdržení přímo ovlivňuje odstraňování chemické spotřeby kyslíku, rozložených pevných látek, fosforu, dusíku, amoniaku a organických látek z odpadní vody (Lucas a kol. 2015; Fučík a kol. 2021).

Doba zdržení vody v mokřadu s podpovrchovým tokem se může vypočítat podle následujícího vzorečku:

$$HRT = \frac{p \cdot V}{Q}$$

p = porovitost substátu (%)

V = objem mokřadu (m^3)

Q = průtok (m^3 .hod)

(Fučík a kol. 2021).

Doporučená doba zdržení pro umělé mokřady s horizontálním podpovrchovým tokem se udává mezi 2-5 dny. Může se měnit podle role přidělené systému. Pokud se jedná o dočišťovací jednotku v posledním stupni doba zdržení může být i jeden den (Ergaieg a kol. 2021).

(Gopalan, 2014) ve své studii pozoroval změny efektivity čištění u mokřadů s horizontálním podpovrchovým tokem, s různou vegetací a substrátem, v závislosti na době zdržení. Porovnával rozdíly v účinnosti odstraňování nečistot při zadržení vody na 2,4,6 a 8 dní. Největší rozdíl nastal při zvýšení doby zdržení ze 4 na 6 dní. Průměrná efektivita odstranění chemické spotřeby kyslíku vzrostla ze 45 % na 60-70 % a při delším zdržení už nemělo prokazatelně větší účinek. Podobný průběh probíhal i u rozpuštěných pevných látek, jejich odstraňování vzrostlo i při 8denním zadržení, jelikož sedimentace je dlouhý proces. Delší doba zdržení měla také pozitivní dopad na eliminaci celkového dusíku, pro ten byl ideální čas zdržení 6 dní. Eliminace fosforu závisí na sorpci media a příjmu rostlinami, spíše než na době zdržení. Pro přijatelný čistící účinek se zdá být 6denní doba zdržení jako nejvíce efektivní (Gopalan, 2014).

Pro podpovrchový mokřad s vertikálním tokem se jako nejvíce efektivní doba zdržení uvádí 12 hodin. Ve vertikálním mokřadu s tokem nahoru nehraje čas zdržení podstatnou roli v odstraňování chemické spotřeby kyslíku (Singh a kol. 2014). Pro mokřady s volnou hladinou se doporučuje zadržet znečištěnou vodu na 4 až 15

dní. Efektivita odstraňování polutantů se zvyšovala až do 30 dnů zdržení. Při delší době už nestoupala (Gunes a kol. 2012).

Tabulka 1: Odstraňování polutantů při různých dobách zdržení

Druh mokřadu	Doba Zdržení	Účinnost odstraňování polutantů					Zdroj
		NL	CHSK	DUSÍK	FOSFOR	AMONIAK	
horizontální podpovrchový	9.6h	86.5%	68.1%	78.25%	64.85%	95.2%	(Zhou. 2019)
horizontální podpovrchový	12h	63%	40%	11%	48%	67%	(Rajendra 2015)
	24h	46%	37%	18%	-7%	71%	
horizontální podpovrchový	12h	75%	45%	-4%	77%	78%	(Rajendra 2015)
	24h	55%	50%	-24%	88%	88%	
horizontální podpovrchový	12h	73.5%	55.5%	29.3%	57.1%	81.9%	(Da Fang, 2014)
horizontální podpovrchový	3d	-	91%	75%	-	85%	(Caselles-Osorio, 2017)
vertikální podpovrchový (tok vzhůru)	6h	43%	20%	63%	55%	63%	(Singh 2014)
vertikální podpovrchový (tok vzhůru)	1.5d	-	69–75%	63–78%	67–74%	68–80%	(Wang, 2016)
kapesní mokřad	48h	52%	-	26%	63%	-	(Senduran, 2018)
horizontální podpovrchový	2d	33.6%	39.7%	23.3%	25.3%	-	(Gopalan, 2014)
	4d	34.1%	44.3%	7.1%	28.4%	-	
	6d	41%	64.2%	31.3%	39.2%	-	
	8d	43.5%	69.6%	45.5	74.9%	-	

5.5 Eliminace polutantů v umělých mokřadech

Jednotlivé umělé mokřady se od sebe mohou výrazně lišit. Nedá se přesně určit jejich schopnost odstranění kontaminantů. Proměnných, které ovlivňují výslednou efektivitu je mnoho. V příloze je umístěna tabulka shrnující jednotlivé systémy. Uveden je autor, druh mokřadu, stupně, doba zdržení, účinnost a druh vegetace. Tabulka nabízí širší pohled na různorodost možností při budování umělých mokřadů a jejich porovnání (viz. Příloha 1).

5.5.1 Těžké kovy

Ze silnic a dálnic se do vod dostává znečištění z provozu vozidel a opotřebení vozovky. Tyto vody poté obsahují těžké kovy. Jsou hrozbou pro možnou kontaminaci

recipientu. Kov, zinek, měď a uhlovodíky se vyskytují v běžně vyskytují v odpadní vodě. Chrom, kadmium, nikl a olovo jsou pak přítomné v menších koncentracích.

Povolené limity obsahů rizikových prvků pro půdy jsou uvedeny v legislativních předpisech. Nařízení vlády 401/2015 Sb. v platném znění definuje úroveň znečištění půd v ČR. Vyšší obsahy rizikových prvků v půdách mají negativní vliv na biologické a fyzikálně chemické procesy (TNV 75 9011, 2013).

Potenciální procesy odstraňování těžkých kovů zahrnují usazování, filtraci, adsorpci a rozklad. Většina zadržovaných těžkých kovů se nacházela v sedimentu (Gill a kol. 2017).

Četnost částic těžkých kovů ve smyvu z komunikací závisí na průměrné hustotě dopravy v daném úseku. Jejich frakce, tak jako dalších znečišťujících látek, poté závisí na velikosti částic. Koncentrace jsou obecně vyšší u menších částic okolo 10 μm (Singh a kol. 2015).

Těžké kovy se dařilo eliminovat s velkou intenzitou ve vertikálních mokřadech. Zejména filtry s mixy substrátů se prokázaly jako velmi účinné při čištění vod (písek, kompozit, směs vermikulitu, zeolitu a aktivního uhlí a šterk), ty snížily koncentraci kovů v průměru o 73 % v systému. Jedinou výjimkou nikl. Ten nestíhá se odbourat, protože prochází mokřadem rychleji (Fronczyk a kol. 2017).

V průměru dochází k vyšší účinnosti při odstraňování kadmia a olova, než pro měď a zinek. Ovšem účinnosti se různí, jelikož závisí na mnoha okolnostech. Ve Velké Británii se ve studiích zabývajících se čištěním odtoku z dálnic při bouřích uvádějí různé rychlosti při odstraňování těžkých kovů (Gill a kol. 2017).

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících formy těžkých kovů ve vodních roztocích je hodnota pH. Normální rozsah pH v systémech podzemních vod je od 6,5 do 8,5. S nárůstem hodnoty pH vznikají těžko rozpustné uhličitany a hydroxidy, což snižuje toxicitu těžkých kovů v životním prostředí. Odstraňování olova a kadmia v zeolitových substrátech stoupalo s narůstající kyselostí vody. Hodnota pH má významný vliv na odstraňování kovů z odtoku z dálnic (Singh a kol. 2015; Fronczyk a kol. 2017).

5.5.2 Dusík

Dusík může být ve smyvvových vodách přítomen jak v organických, tak anorganických formách. Ve vodě přispívá k růstu zelených organismů, které způsobují eutrofizaci. Amoniakální dusík vykazuje vysokou spotřebu kyslíku. Mechanismy odstranění dusíku zahrnují nitrifikaci. Při ní dochází k biochemické oxidaci dusíku na dusitany a dusičnany. Následně se dusík redukuje za procesu denitrifikace (Groda a kol. 2007).

V mokřadech je nitrifikace i denitrifikace hlavní metoda pro biologické čištění dusíku. Proces vyžaduje aerobní i anaerobní prostředí. Nitrifikační reakce je však silně teplotně závislá. Nízké teploty výrazně nitrifikaci snižují. Další možnosti odstranění jsou adsorpce na povrchu filtračního media nebo příjem rostlinami. Na odstraňování dusíku má vliv teplota, hodnota pH a koncentrace rozpuštěného kyslíku. Ideální podmínky pro dosažení nejefektivnějšího odstranění dusíku ze znečištěných vod jsou stále nejisté (Kumar, Dutta, 2019).

Zeolit prokázal robustní adsorpční kapacitu při odstraňování dusíku. Substrát zeolitu byl schopen snížit koncentraci dusíků na méně než 0,6 mg/l a i po deseti měsících provozu vykazoval stabilní výsledky. Adsorpce filtračním médiem je jeden z procesů odstraňování dusíku v mokřadu. Vykazuje jen drobné odchylky při změně teplot v letě a zimě (Zhao a kol. 2016). Důvodem velké efektivity zeolitového substrátu se zdá být jeho schopnost poskytnout větší povrch pro adsorpci kontaminantů. Zeolit oproti šterkovým substrátům poskytuje v umělých mokřadech vyšší rychlost nitrifikace. To by mohlo být zapříčiněno větší plochou povrchu zeolitových částic. Do biofilmu se tak dostane více kyslíku. Použití mixu zeolitu a šterku v jednom mokřadu dokázalo odstranit 73 % dusíku z vody. Funkce média hrála hlavní roly, zatímco příjem rostlinami byl méně podstatný. Jednostupňové mokřady nejsou schopny odstranit uspokojující množství dusíku, pokud toho není dosaženo na úkor velké plochy. V případě, že se čištění vody od dusíku požaduje měly by se brát do úvahy hybridní mokřady (Singh a kol. 2014).

5.5.3 Fosfor

Přísun fosforu do vod je stejně nežádoucí, jako přísun dusíku. Jde o limitující prvek rozvoje vodní vegetace. V nadměrném množství stimuluje růst vodních řas, sinic, vyšších rostlin a podporuje nepřírozenou eutrofizaci vod (arnika.org, 2015).

Umělé mokřady mají většinou omezenou, ovšem stabilní, schopnost zachytávat fosfor. Pro zvýšení eliminace fosforu je zapotřebí použít speciálně materiály s vysokou adsorpční kapacitou fosforu. Přerušovaný přívod vody ve vertikálním mokřadu působí negativně na koncentraci fosforu. Okysličení systému vede k jeho vypouštění (Singh a kol. 2014).

K odstraňování dochází především adsorpcí, precipitací a filtrací. Pro zvýšení adsorpce fosforu se používají materiály jako zeolit, bauxit, dolomit nebo vápenec. Výběr filtračního média s vysokou adsorpční kapacitou je klíčový. Větší hloubka a pomalejší proudění vody také přispívají k vyšší efektivitě mokřadu (Kumar, Dutta, 2019).

Fosfor se v mokřadech zadrží mechanicky pomocí sedimentace nebo biologicky jako příjem rostlinami a mikroorganismy. Mokřady slouží jako lapač sedimentů a fosfor, který je navázaný na suspendované sedimenty se usazuje. Teplota nijak výrazně neovlivňuje eliminaci celkového fosforu pomocí (Kadlec, Reddy, 2001).

5.5.4 Chemická spotřeba kyslíku

Jde o míru obsahu látek schopných chemické oxidace. Stanovení slouží především k informaci o celkové koncentraci organických látek ve vodě. Odstraňování chemické spotřeby kyslíku (CHSK) je účinnější v umělém mokřadu osázeném rostlinami. Učinnost v osázeném systému dosáhla v průměru 91 %, zatím co v neosázeném byl průměr 80 %. Je pravděpodobné, že zlepšení odstraňování CHSK v systému bylo ovlivněno rostlinami produkovaným rozpuštěným kyslíkem, který využívaly bakterie ke zvýšení aerobní oxidace (Caselles-Osorio a kol. 2017).

Lepší adsorpční kapacita zeolitu s menší velikostí částic přinesla dobré výsledky v zachytávání CHSK v mokřadu. Z mnohých studií vyplývá, že zeolitové substráty mají lepší účinnost než šterkové substráty. Retenční doba nehraje velkou roli

při odstraňování CHSK z vertikálních umělých mokřadů. Větší povrch a lepší chemické vlastnosti filtračního média mohou být důvodem zlepšení nitrifikace a denitrifikace. Přispívají tak k odstraňování CHSK (Singha kol. 2014).

Odstraňování CHSK v mokřadech je zvýšeno mikrobiologickou degradací látek zachycených médiiem a kořeny rostlin. Je vhodné zvolit médium poskytující dobré prostředí pro růst biomasy. Příjem rostlinami je ve srovnání s biologickou degradací minimální (Zhao a kol. 2016).

Pokud nejsou chemické a biologické vlastnosti vody stékající ze silnice ideální mohou ovlivnit růst mikroorganismů v substrátu mokřadu a snížit tak schopnost vypořádat se s CHSK (Fu a kol. 2014).

5.5.5 Nerozpuštěné látky

Vyjadřují obsah nerozpustitelných pevných látek v odpadní vodě, obvykle se dělí na usaditelné a neusaditelné. Většina nerozpustitelných pevných látek je tvořena anorganickými materiály, ačkoli bakterie a řasy mohou být také přítomny. Jedná se o vše, co plave ve vodě, jako je štěrk, bahno, písek nebo jíl. Dále se ve vodě mohou nacházet rozložené části rostlin a živočichů. Částice se se mohou za nějaký čas usadit do sedimentu. Čím jsou větší a těžší, tím dříve se na dně usadí. Písek a štěrk se usadí, jakmile vstoupí do vody s nízkým nebo žádným proudem. Příliš malé nebo lehké částice se neusadí a jsou nazývány neusaditelné (Fondriest, 2022).

Hlavní metodou při odstraňování nerozpustných pevných látek je usazování, většinou v předsazené usazovací nádrži. Další metody v mokřadech jsou filtrace, adsorpce, mineralizace a metabolizace. Většina pevných látek, fosforu a některých kovů ze silničního odtoku se usadí v relativně krátkém časovém úseku. Teplota lehce ovlivnila rychlost sedimentace pevných látek, pokud je teplota pod 15 stupňů celsia efektivita systému klesá a zvyšuje se čas potřebný pro usazení. Existuje úměrnost mezi nerozpuštěnými pevnými látkami a těžkými kovy, jak v jejich společném výskytu ve vodě, tak i v míře jejich odstraňování (Senduran a kol. 2018).

Prováděná analýza velikosti částic stanovila, že interval velikosti částic je jedním z nejdůležitějších faktorů v procesu odstraňování nerozpuštěných látek. Průměr objemů, který udává velikost částic, byl měřen laserovou difrakcí.

Průměrná velikost částic pevných látek v hlavním odtoku z vozovky se ve studii pohyboval od 20 do 75 μm (Singh a kol. 2014).

Sedimentační nádrž dokáže zadržet až 80 % nerozpuštěných látek o velikosti 10–30 μm , při 24hodinové usazovací době. Usazovací prostor je hlavním stupněm v systému pro eliminaci větších částic (Chen, 2014).

V systému s volnou hladinou docházelo k zachycení nerozpustitelných látek převážně v usazovacím jezírku. Dokazuje to i rozložení sedimentu, v usazovacím předhradí se nacházelo 76% jemných částic (jíl, bahno) a 20 % písku. Na další měřicích stanovištích sediment obsahoval převážně jemné částice (90 % a 98 %). Většina hrubých částic se tedy usadila již v usazovacím předhradí a dál do systému se dostalo jen zlomkové množství (Al-Rubaei a kol. 2016).

5.6 Finanční stránka opatření

Cena výstavby umělého mokřadu se odvíjí od velikosti filtračního lože. Pokud se buduje mokřad s horizontálním podpovrchovým tokem, který tradičně vyžaduje větší rozměry pro dosažení optimálního čištění, může se cena za odkup půdy vyšplhat na větší částky. Cena půdy se závisí na státu, ve kterém se staví, v různých zemích se může cena za m^2 půdy výrazně lišit (Tsihrintzis, 2017).

Do počátečních nákladů spadá i výběr výplně filtračního substrátu a zvolení vegetace, ty se musí zakoupit, přepravit a následně aplikovat. Další náklady zahrnují průzkum lokality, návrh, výkopové práce, vegetaci, případně hydraulický systém pro rozvod a kontrolu vody (Vymazal, 2010).

Výstavba mokřadu s povrchovým tokem vyjde levněji než mokřad s podpovrchovým tokem, protože potřebuje méně substrátu, stačí vrstva na dně, aby mohla vegetace zakořenit a je jednodušší na uvedení do provozu (Vymazal, 2010).

Umělé mokřady nevyžadují nepřetržitou kontrolu a údržbu. Společně se snadnější péčí a nulovou spotřebou energie, u několika typů, vedou k levnějším nákladům na údržbu než u čistících systému z betonu nebo železa. Základní cena výstavby umělého mokřadu se jeví jako přijatelná, když přihlédneme na jeho soběstačnost, dlouhodobou spolehlivost a životnost, bez nutnosti dalších větších nákladů (Hoffmann a kol. 2011).

6 Legislativní rámec

6.1 Zákon číslo 254/2001 Sb.

V tomto zákoně je zakotvena povinnost hospodařit na každé nové stavbě se srážkovou vodou a osobám vypouštějící odpadní vody, povinnost zajistit jejich zneškodnění v souladu s podmínkami stanovenými v povolení k jejich vypouštění. Ve svých 137 paragrafech se zabývá ochranou povrchové a podzemní vody, stanovuje podmínky, za jakých lze hospodářsky využívat vodní zdroje. Ukládá povinnost všem vlastníkům pečovat o ně tak, aby nedocházelo k zhoršování vodních poměrů. Řeší právní povahu vod v přírodním prostředí. Upravuje právní vztahy k povrchovým a podzemním vodám. Zejména zajistit, aby nedocházelo ke zhoršování odtokových poměrů, odnosu půdy erozní činností vody a dbát o zlepšování retenční schopnosti krajiny (Z. č. 254/2001 Sb).

6.2 ČSN 75 6551 Odvádění a čištění odpadních vod s obsahem ropných látek

Norma platí pro čištění odpadních vod s obsahem ropných látek a pro odvádění odkanalizovaných vod s obsahem ropných látek. Norma platí v přiměřeném rozsahu i pro zabezpečení dešťových stok odvádějících vody s rizikem kontaminace ropnými látkami.

V bodě 5 jsou doporučení na odvádění vod s obsahem ropných látek. Jako ideální materiál na potrubí k odvádění se zde uvádí kamenina a litina. Bez úprav se nedoporučuje beton, či železobeton. Podle bodu 5.13 je možno odvést vyčištěnou srážkovou vodu do vodního recipientu jen s povolením a při respektování požadavků příslušného úřadu.

Dále je zde popis návrhu technologie čištění, technologických postupů čištění a jejich dočištění. Jsou zde stanoveny požadavky na čisticí zařízení. Zabývá se návrhem záchytné nádrže na srážkové vody, pocházejících z ploch znečištěných ropnými látkami, ta zpravidla zadružuje vodu po dobu 15 minut. Odtok přes bezpečnostní přeliv musí být chráněn nornou stěnou.

Kapitola 9 se zabývá odpadovým hospodařením, a nakonec se v bodě 11 pojednává o bezpečnosti a hygieny práce (ČSN 75 6551, 2008).

6.3 ČSN 75 6261 dešťové nádrže

Norma se zabývá navrhováním, prováděním a provozování dešťových nádrží na stokových sítích a na dešťových stokových sítích oddílné soustavy průmyslových závodů, či dopravních staveb. Stanovuje uspořádání a druhy dešťových nádrží, dále podmínky návrhu dešťových nádrží. Popisuje metody dimenzování dešťových nádrží. V bodě 7.4.1 se zaměřuje na retenční dešťové nádrže. Stanovuje její objem a příklady vzorce pro jeho specifický nebo přibližný výpočet.

Usazovací dešťové nádrže se rozebírají od bodu 7.4.3, kde je popsáno podle čeho se volí tvar, dále pak Bilanční metody dimenzování dešťových nádrží. V kapitole 8 jsou uvedeny stavební řešení dešťových nádrží a jejich vybavení.

Poslední dvě kapitoly, tedy 9 a 10, jsou zaměřeny na provoz a bezpečnost práce na dešťových nádržích. Stanovuje, že musí být vypracován provozní řád pro každý objekt nebo soubor objektů. Dešťové nádrže se musí pravidelně přezkušovat a kontrolovat. Dešťová nádrž je objektem, který nepředstavuje stálé pracoviště, ale je pracovištěm občasným s pravidelnou kontrolou. Při jejich provozování se musí dbát na bezpečnost práce a ochranu zdraví podle předpisů (ČSN 75 6261, 2004).

6.4 Nařízení vlády č. 401/2015 Sb.

Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových, či kanalizací a o citlivých oblastech. Stanovuje a zajišťuje dodržení emisních limitů vypouštění odpadních vod a určuje náležitosti k vydání povolení k vypouštění. Stanovuje měření objemu vypouštěných odpadních vod a míry jejich znečištění. Kategorizuje všechny útvary povrchových vod na území České republiky. Vymezuje citlivé oblasti a udává standardy hodnot pro vypouštění odpadních vod do těchto oblastí (Nařízení vlády č.401/2015 Sb.).

6.5 TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami

Norma se zabývá současnými trendy a předpisy v oblasti vodního a stavebního práva. Uvádí způsoby nakládání se srážkovými vodami odtékajícími z povrchu zastavěného území. Jde o návod provozu a návrhu odvodnění zastavěné oblasti způsobem blízkým přírodě.

Popisuje volby, jakým se může řešit odvodnění a následně jeho provedení. Při vsakování je nutné provést geologický průzkum. Terénní průzkum se provádí, v případě svádění do povrchových vod. Zde jsou popsány možné způsoby, jak vodu do recipientu dovést. Jedná se o stav povrchových vod, stávajících svodnic nebo dešťové kanalizace.

V 6 kapitole se norma zaměřuje na technické řešení odvodnění. Najdeme tu typy objektů a zařízení, sloužícím k různým účelům, jako například snížení vzniku srážkového odtoku, akumulaci a využívání srážkové vody. Uvádá možnosti povrchového a podzemního vsakování. Zejména se zde, v části zabývající se odváděním do povrchových vod, zmiňují i umělé mokřady, jejich popis a určení. Je doporučeno vytvořit u vtoku oddělený usazovací prostor, aby se tak zabránilo vniku nerozpuštěných látek.

V posledních dvou bodech se stanovuje provoz a údržba objektů nakládajících s dešťovými vodami. Stanovuje se, co by měla obsahovat uživatelská příručka a jaké činnosti jsou zapotřebí k zajištění provozuschopnosti systému. V příloze se nachází tabulka doporučených opatření pro čištění srážkových vod, pocházejících z různých typů ploch, při odvádění do povrchových vod (TNV 75 9011, 2013).

6.6 ČSN 75 9010 Vsakovací zařízení srážkových vod

Norma se zabývá vsakováním srážkových vod. V ní jsou popsány hlavní zásady pro návrhy, výstavbu a následný provoz pro vsakovací nádrže. Uvádí podmínky pro vsakování srážkových vod, nachází se zde přehled v současnosti používaných povrchových a podzemních vsakovacích zařízení. Jsou zde uvedeny postupy a příklady výpočtů retenčních objemů vsakovacích zařízení, zabývá se mírou bezpečnosti proti přeplnění vsakovacích zařízení a přetékání srážkových vod na povrch.

Najdeme zde podklady pro návrhy vsakovacích zařízení na základě geologických průzkumů. Popsán je zde celý proces geologického průzkumu, jeho etapy a metodiky s cílem ověření použitelnosti vsakování při hospodaření se srážkovými vodami. Zakončené terénními a laboratorními testy.

Zaobírá se kvalitativním hlediskem vsakování. Podle této normy se určuje kdy je možno srážkovou vodu vsakovat. V bodu 5.2.1 je stanoveno, že vody nesmí překročit hodnotu ukazatelů přípustného znečištění podzemních vod. Poté se doporučuje zvážit nasazení opatření proti možným haváriím a zabránění možného znečištění. V případě, že srážkové vody stékají z potencionálně výrazně znečištěné plochy je vsakování povoleno pouze v případě účinného předčištění. Je nutné navrhnout dobrý způsob s ohledem na kategorii srážkových povrchových vod a míru jeho předpokládaného znečištění.

Dále stanovuje vhodné dimenzování vsakovacích zařízení. Stanovuje a příkládá příklady zejména ideálního retenčního objemu, tedy dobu, za kterou se vsakovací jednotka vyprázdní a určení správné odvodňovací plochy.

V bodech 7,8,9 a 10 je vypsán přehled vsakovacích zařízení, zásady pro užití povrchové, podzemní a kombinované varianty, jejich popis a fungování. Zásady pro projektování vsakovacích zařízení. Co se doporučuje při návrhu vsakování srážkových povrchových z různých povrchů. Výstavba vsakovacího zařízení a v posledním bodu jeho provoz. Je zde uvedeno, že provozní řád takového zařízení musí obsahovat pokyny pro provoz a údržbu, a intervaly kontrol a údržeb, které jsou určeny typem nebo výrobcem. Také musí mít stanoven organizační a pracovní postup v případě ekologické havárie vzniklé v oblasti (ČSN 75 9010, 2012).

7 Provoz a údržba systémů pro nakládání se smyvovými vodami

Provoz nevyžaduje stálou obsluhu. Stanoviště se však kontroluje v určitých termínech, aby se v případě problému mohla uvést objekt do optimálního stavu. Z provozního hlediska je nutné určit vlastníka objektu, zodpovědného za jeho správný provoz. Po zhotovení systému pro hospodaření s dešťovou vodou, jsou stanoveny pokyny pro vlastníka, kde budou uvedeny požadavky na údržbu, plán údržby, provoz v zimním období a postup v případě havárie, zejména úniku ropných látek z vozovky, nebo jiných mimořádných událostí.

Údržbu objektu pro čištění vod lze rozdělit do tří kategorií:

- pravidelná údržba;
- příležitostná (občasná) údržba;
- oprava.

O pravidelnou údržbu se jedná v případě zásahů, které se provádí v určitých časových intervalech. Jde o jednoduché činnosti stanovené s předstihem, případně vizuální kontrolu.

Příležitostná údržba se provádí jednou za delší časové období. Spadají sem i úlohy, které se dají jen těžko předvídat a složitější procesy.

V případě poškození objektu je zapotřebí oprava. Opravu si může vyžádat opotřebení systému nebo nečekaná situace, jako například extrémní počasí. Cílem je navrátit zařízení zpět do původní funkční podoby. Oprava může zahrnovat i opravu vtoku a odtoku, eroze, vsakovacích vrstev nebo výměnu filtračních vrstev.

Úkony a četnost údržby pro jednotlivé systémy hospodaření s dešťovou vodou jsou uvedeny v příloze H. normy TNV 75 9011 (TNV 75 9011, 2013).

7.1 Umělé mokřady

I přes jednodušší technologii umělých mokřadů se stále počítá s proškolenou obsluhou, disponující znalostmi těchto systémů. Obecně platí, že mokřady s volnou vodní hladinou se snadněji udržují. Mají však problém v zimních měsících s tolerancí

mrazů a v některých případech s přemnožením komárů (Hoffmann a kol. 2011; Tsihrintzis, 2017).

Hlavní hrozba pro horizontální a vertikální mokřady je ucpaní filtračního substrátu. To vede k pomalejšímu proudění vody a tím zhoršení čistících schopností. V nejhorším případě dojde k úplnému ucpaní a záplavě systému. Pravidelná kontrola by měla probíhat minimálně jednou za měsíc, kdy je zapotřebí odstranit nečistoty a odpadky v celém prostoru mokřadního systému. Vybudované mokřady s vertikálním tokem vyžadují častou kontrolu rozvodu vody. Zkontrolovat se musí pumpy, výška vody v systému, správné dávkování znečištěné vody do jednotky. Pro chod mokřadu s podpovrchovým tokem může být vyžadován přívod elektrické energie, rozvody se také musí udržovat. Zanedbání stanovených úkonů způsobí nerovnoměrné rozvedení vody, přetížení mokřadní jednotky a bude mít za následek znehodnocení celého systému mokřadu (Hoffmann a kol. 2011; Tsihrintzis, 2017).

U horizontálních typů mokřadu se mohou úkony pravidelné údržby provádět s delšími intervaly, 1x za dva měsíce, pokud je přítomné dobré předčištění. Vyžaduje větší nároky na údržbu kvůli jeho větším rozměrům. Dále se kontroluje stav a nemoci osázené vegetace, v případě nutnosti se odstraňují odumřelé rostliny, probíhá i kosení v okolí mokřadu. V mokřadech s otevřenou hladinou by se měla vegetace občasně zastříhávat. To vše ve stanovených intervalech, doporučené úkony a jejich četnost (viz. Tabulka 2) (TNV 75 9011, 2013).

Tabulka 2: Úkony a četnost údržby umělých mokřadů (TNV 75 9011, 2013)

Tabulka H.6 – Úkony údržby umělých mokřadů

Typ údržby	Úkon údržby	Četnost údržby
Pravidelná údržba	Odstranění odpadků a povlaku hladiny	1× měsíčně a po větších deštích
	Kosení trávy ve veřejných zónách	1× měsíčně (během vegetační sezóny)
	Kosení trávy na loukách v okolí mokřadu	1× za 6 měsíců (na jaře, před zaházením ptactva a na podzim)
	Odstranění náletové vegetace	Po dobu 3 let 1× měsíčně, potom dle potřeby
	Odstranění vodní vegetace přibližně na 25 % plochy mokřadu (kosení v úrovni dna)	Každoročně nebo dle potřeby
	Odstranění přibližně 25 % vegetace na březích do výšky 1 m od vodní hladiny (selektivně)	Každoročně nebo dle potřeby
	Odstranění mrtvého dřeva před vegetační sezónou	Každoročně
	Odstranění sedimentu z předřazené sedimentační nádrže	Každoročně či dle potřeby
	Odstranění sedimentů z 25 % plochy mokřadu	1× za 2 až 5 let či dle potřeby
Příležitostná údržba	Odstranění (vytěžení) sedimentu z velkých mokřadů, pokud je jejich návrhový objem redukován o 20 %	> 25 let (zpravidla)
Opravy	Oprava míst poškozených erozí	Dle potřeby
	Oprava nátoků, výtoku a přelivu	Dle potřeby
	Doplnění rostlin (aby bylo zachováno alespoň 50% pokrytí mokřadu rostlinami)	Dle potřeby ve vegetačním období
Kontrola	Kontrola fyzického poškození stavebních součástí mokřadu	1× měsíčně / po přívalových deštích
	Kontrola zanášení nádrže	1× za 6 měsíců a po větších deštích
	Kontrola stavidel a případných dalších mechanických součástí	1× za 6 měsíců

7.2 Retenční nádrže

Provoz a údržba suchých retenčních nádrží a retenčních nádrží se zásobním prostorem jsou velice podobné jako u umělých mokřadů. Náročnost některých úkonů je však v porovnání s mokřadem menší. Hlavním problémem u systému se stálou hladinou je možný výskyt eutrofizace. Ta se musí kontrolovat jednou měsíčně v období léta, pokud se eutrofizace vyskytne je zapotřebí nádrž provzdušnit.

U podzemních retenčních nádrží se provádí kontroly stavu vodotěsnosti a celkové funkčnosti jednou měsíčně (TNV 75 9011, 2013).

7.3 Předčisticí zařízení

Tabulka 3: Úkony a četnost údržby předčisticích zařízení (TNV 75 9011, 2013)

Tabulka H.7 – Obecné platné zásady údržby předčisticích zařízení

Typ údržby	Úkon údržby	Četnost údržby
Pravidelná údržba	Odstranění odpadků	1× měsíčně a po větších deštích
Příležitostná údržba	Odstranění (vytženi) sedimentu z velkých mokřadů, pokud je jejich návrhový objem redukován o 20 %	> 25 let (zpravidla)
Opravy	Výměna náplně filtru	Dle potřeby
	Odstranění sedimentu, oleje, tuků a plovoucích nečistot	Dle potřeby
Kontrola	Kontrola příznaků špatné funkce zařízení	1× za 6 měsíců a po větších deštích
	Kontrola zanesení náplně filtru	1× měsíčně během prvních 6 měsíců provozu, potom 1× za 6 měsíců
	Kontrola stavu a trendu výskytu sedimentu	1× za 6 měsíců

V předčisticím zařízení se úkony údržby zaměřují především na odstranění zachycených látek. Pokud se nádrž nachází pod zemí je nutné ji opatřit pevně zakotveným zařízením pro výstup, aby byla zajištěna bezpečnost údržby a čištění. Vstupy pro obsluhu musí být trvale dobře přístupné, dostatečně velké a musí sahát až na dno nádrže (Tp83, 2014).

Pro údržbu je dobré uvést části předčisticího zařízení a jejich rozmístění. Nejčastěji se provádí pravidelné odstraňování zachycených hrubých nečistot ze vstupu do nádrže. Současně se uskuteční i vizuální kontrola funkčnosti zařízení, stavu hladin a filtračních zařízení. Tyto úkony se provádí 1x do měsíce (viz. Tabulka 3) (TNV 75 9011, 2013).

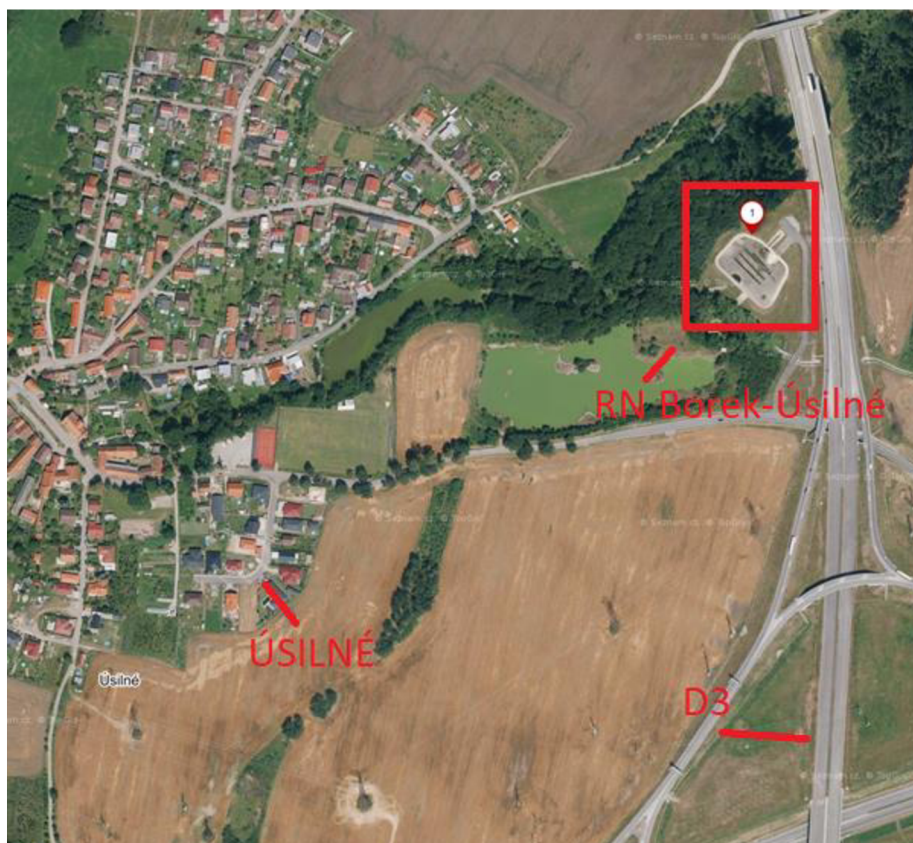
V sedimentačním prostoru je zapotřebí mechanicky nebo hydraulicky likvidovat usazené látky minimálně jednou za rok. Stejně tak je nutné odstranit ropné látky v případě jejich zadržení na hladině, k zajištění správného fungování odlučovače lehkých kapalin, případně norné stěny (ČSN 75 6261, 2004).

Dle potřeby je nutno zajistit správnou funkčnost filtračních zařízení, pokud jsou instalována v předčisticím zařízení. V případě koalescenčního filtru je údržba snadná, kontroly stačí provádět v delších intervalech. Pokud se při kontrole zjistí zanesení na přední straně filtru, je nutné nahromaděné nečistoty odstranit. Jednotlivé kazety se vytáhnou z nádrže očistí pod proudem vody a následně ručně odstraní nečistoty. Údržba nebo oprava adsorpčního filtru je poté náročnější a nákladnější (Asio, 2022).

8 Případová studie – Retenční nádrž Borek-Úsilné

8.1 Popis lokality

Zájemovým objektem je Retenční nádrž Borek-Úsilné. Nádrž se nachází v oblasti obce Úsilné vedle úseku dálnice D3 0309/III těsně před sjezdem na České Budějovice. (viz. Obr. č.10)



Obr 10: mapa lokality RN (mapy.cz)

Odvodnění dešťové vody z dálnice D3 je řešeno novou silniční kanalizací. V kilometru 130 protéká přes bezpečnostní nádrže a retenční nádrž do přílehlého recipientu. RN má za úkol plnit funkci ochrannou. Nádrž je doplněna biologickým stupněm čištění, kde dochází k dočištění vody. Bezpečnostní nádrže se nacházejí pod zemí s přidáním koalescenčním filtrem. Pro zajištění kvality spodních vod bude ředitelství silnic a dálnic provádět pravidelný monitoring solení (ŘSD, 2016).

8.2 Technický popis

Retenční nádrž pro odvodnění je oplocený objekt oválného půdorysu. Smyvová voda je z dálnice svedena dešťovou kanalizací do ochranných nádrží s koalescenčním filtrem a poté do retenční nádrže. Svahy nádrže mají sklon 1:1,5 a okolí je zatravněné. Jedná se o retenční nádrž se stálou hladinou vody 0,1 m pod úrovní štěrkového dna a mělo v něm probíhat anaerobní čištění. Nádrž je izolována proti úniku vody a dno nádrže je vyplněné filtračním substrátem, kterým je drcené kamenivo, uložené do výšky zhruba 0,5 metru ode dna. Povrch by měl být osázen různými druhy vegetace po celém povrchu nádrže.

Dešťová voda se po přítoku z ochranné nádrže vlévá do místa zdržení ohraničené kamenným záhozem. Odtud se kontinuálně vypouští do nádrže, horizontálně protéká substrátem a podélnými filtračními zónami, kde dochází k biologickému dočištění. Podélné pruhy jsou v nádrži 3 obsahují jemnější štěrkové médium a mokřadní vegetaci. U výstupu retenční nádrže se nachází kalová jímka, která má volnou hladinu. Odtud je voda odváděna do recipientu (Kuk a kol. 2016).



Obr 11: RN Borek-Úsilné z příjezdové cesty



Obr. 12: RN Borek-Úsilné uvnitř nádrže

8.3 Metodika odběru vzorků

V rámci samostatné práce bylo provedeno místní šetření, během něhož bylo technické zařízení monitorováno a byly odebrány vzorky vody a sedimentu

k detailnějšímu rozboru. Návštěva objektu proběhla před solnou sezonou 21.10.2021 a 23.02.2022 po zimním období. Vzorky byly odebrány následujícím způsobem:

8.3.1 Odběr kapalných vzorků

Odběr kapalných vzorků probíhal v místě zdržení vody na výstupu z nádrže. Při druhé návštěvě v únoru pak na vstupu i výstupu. Vzorky byly odebrány pomocí kolovky, která byla vhozena do středu prostoru s vodou pro zajištění reprezentativního výsledku. Vzorky vody byly následně rozlity do skleněných nádob a označeny. Pokaždé se odebraly dva litry vody k analýze.



Obr. 13: Odběr kapalných vzorků na výstupu (21.10.2021)

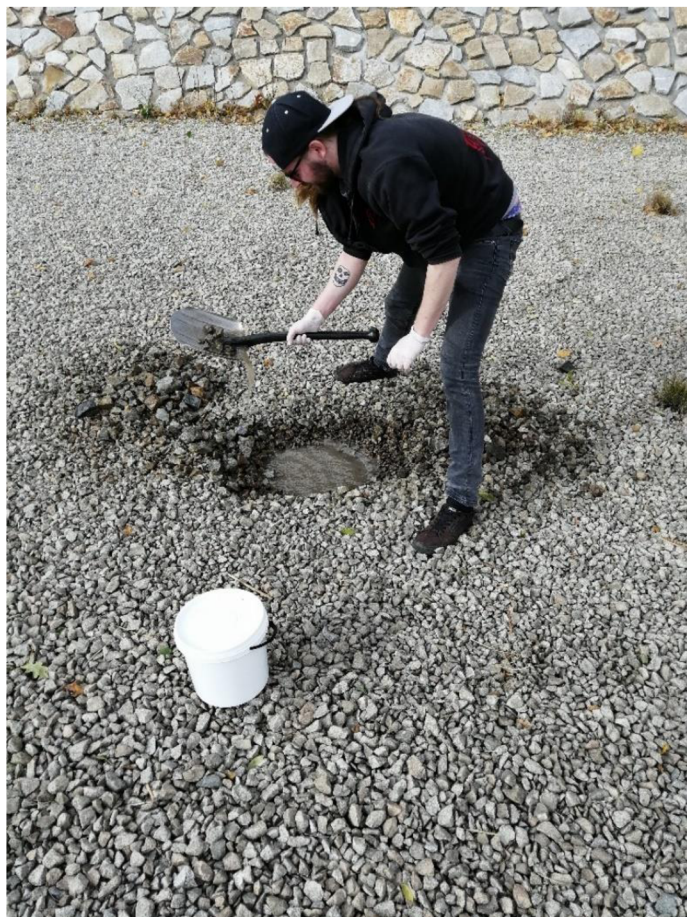
8.3.2 Odběr pevných vzorků

Odběr pevných vzorků se prováděl v různých místech po celé nádrži. Odebíral se hrubý substrát, tak i jemný z čistících pásů. Po vytipování místa se vyhloubila díra do zhruba 30 cm pod povrch a z ní se odebralo kamenivo

ze substrátu, které bylo pod hladinou zadržované vody. Vzorky se uložily do kýblů a přepravily k analýze.



Obr. 14: Odběr pevných vzorků (23.02.2022)



Obr. 15: Odběr pevných vzorků (21.10.2021)

8.4 Metodika analýzy vzorků

Odebrané vzorky se analyzovány v laboratoři spol. Dekonta, a.s. Byly analyzovány tyto parametry a pro analýzy byly použity tyto metody:

8.4.1 Chemická spotřeba kyslíku – CHSK

Do nádoby se vzorkem se přidá dichroman draselný, síran stříbrný a kyselina sírová o přesných objemem. Směs se do deseti minut přivede k bodu varu a vaří se dalších 110 minut. Během této doby se redukuje část dichromanu přítomnými oxidovatelnými látkami. Zbylý dichroman se titruje mohrovou solí. Hodnota CHSK se následně určí z množství redukovaného dichromanu (ČSN ISO 6060, 2008).

8.4.2 Nerozpuštěné látky – NL

Princip měření nerozpuštěných látek spočívá v tom že se vzorek vody o přesném množství ve vakuu, nebo pod tlakem přivede na filtr ze skleněných vláken, ten se následně vysuší. Částice, které neprošly filtrem se zváží a podle toho se určí objem nerozpuštěných částic ve vodě (ČSN EN 872, 2005).

8.4.3 Biochemická spotřeba kyslíku – BSK

Vzorek v naplněné a zazátkované láhvi se za tmy ponechá 5 nebo 7 dní v inkubátoru při teplotě 20 C. Měření koncentrace rozloženého kyslíku se provádí před a po inkubaci. Podle rozdílu se určí množství spotřebovaného kyslíku na litr vzorku (ČSN EN 1899-2, 1999).

8.4.4 Konduktivita

Měří se pitné, povrchové, podzemní nebo odpadní vody, výluhy, kaly, zeminy a půdy, odpady a upravené bioodpady. Provádí se většinou rovnou na místě odběru. Vzorkař použije vhodný přístroj, který stanoví míru proudu vedeného ionty ve vodě. Jednotky se určují buď v $\mu\text{S/cm}$ nebo mS/cm . Po skončení se zařízení očistí v demivodě a uloží se do nádoby s roztokem (ČSN 27888, 1996; ČSN P CEN/TS 15937, 2013).

8.4.5 Rozpuštěné Látky

Odpařovací miska se vyžihá při 550 C, poté se vychladí v exikátoru a prázdná zváží. V určitém rozmezí odlijeme množství vzorku a ve vodní lázni necháme odpařit do sucha. Po vychlazení znovu misku zvážíme s odparkem. Z rozdílu vážení pak určíme obsah rozpuštěných látek (ČSN 757347, 2009).

8.4.6 Nepolární extrahovatelné látky – NEL

Provádí se u různých druhů vod, pevných vzorků, odpadů, zeminy, sedimentů nebo kalů. Stanovuje se pomocí infračervené spektroskopie, kdy se vzorek vody v kyvetě z křemíkového skla interaguje s infračerveným zářením. Do nálevky se vzorkem se přidá HCl NaCl a činidla. Následně vysušíme se síranem bezvodým sodným, dokud není extrakt čirý. K odstranění polárních látek přidáme silikagel, po odstátí se směs přefiltruje a změří přítomnost nepolárních extrahovatelných látek (ČSN 75 7506, 2002).

8.4.7 Uhlovodíky

Vzorek vody se extrahuje extrakčním činidlem. Odstraní se polární látky a analyzuje se kapilární elektrochromatografií. Z oblasti maximálních hodnot mezi dekanem a tetrakontanem se následně zjistí koncentrace uhlovodíků. Je důležité, aby tuto metodu prováděl proškolený personál (ČSN EN ISO 9377-2, 2001).

8.4.8 Chlodridy

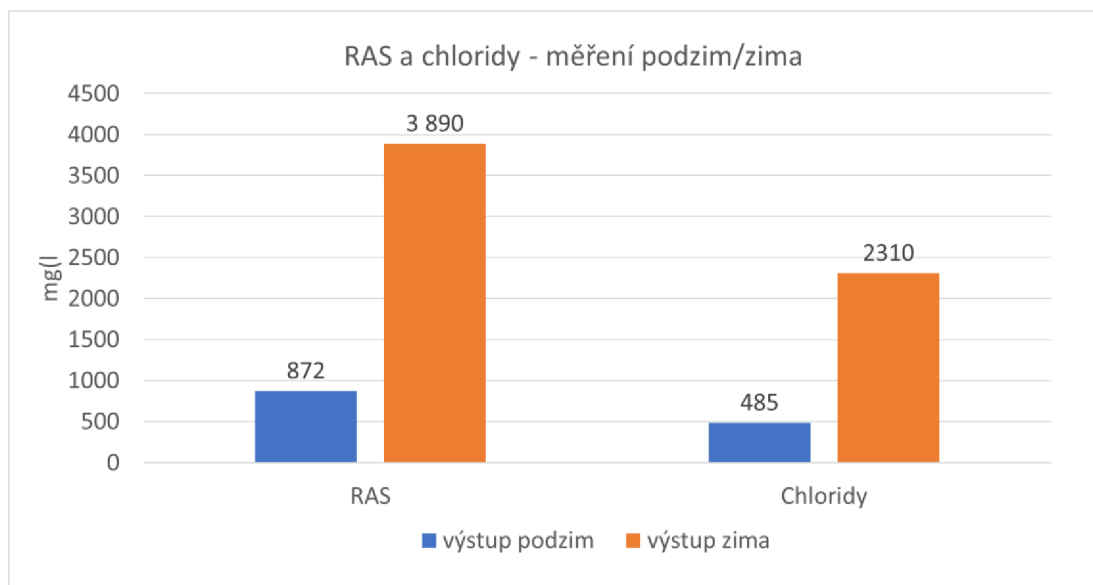
Thiokyanatan se uvolní z thiokyanatanu rtuťnatého. Uvolněný thiokyanatan poté v přítomnosti železa tvoří zbarvený koncentrát s původní koncentrací chloridů. Barevná látka se pak měří pomocí spektrometru a stanoví se obsah chloridů (US EPA 325.1).

8.4.9 pH

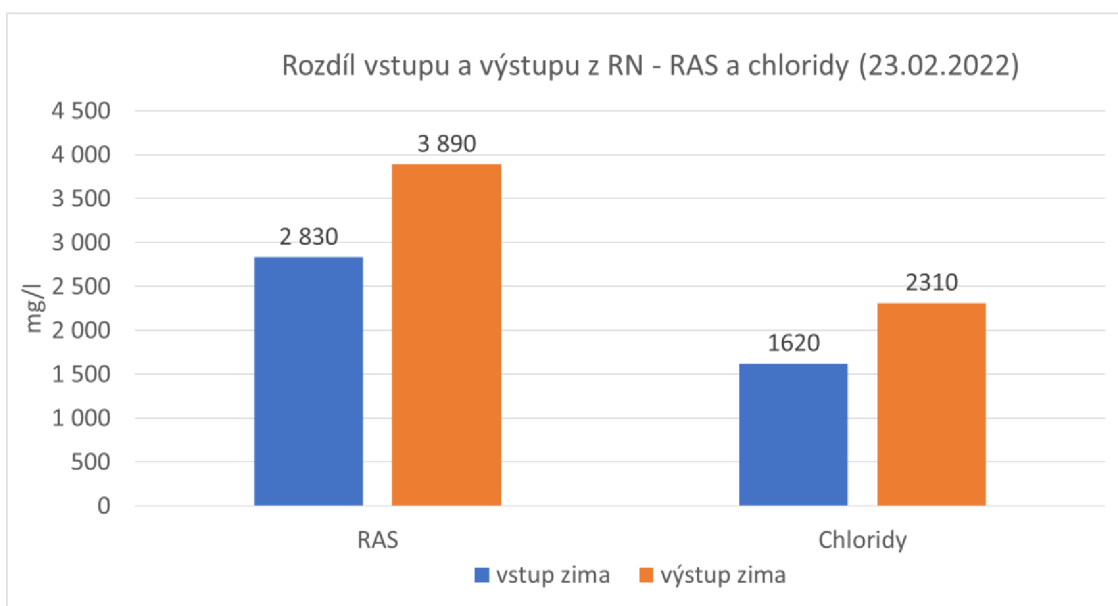
Hodnota pH se v půdě zjišťuje pomocí pH metru, na základě rozdílu potenciálu elektrochemického článku. Měření může proběhnout na místě odběru (ČSN ISO 10390, 2011; ČSN ISO 10523).

8.5 Výsledky

Z výsledků měřených vzorků jak pro vodu, tak pro substrát, můžeme pozorovat poměrně velké rozdíly mezi jednotlivými odběry. Ve vzorcích vody z retenční nádrže je obrovský nárůst hodnot rozpuštěných anorganických solí a chloridů. Jde o látku aplikovanou na vozovku při zimní údržbě. Únorové vzorky však přinesly více než čtyřnásobný nárůst obsahu solí (viz. graf 1). Zajímavý je také fenomén nárustu koncentrace RAS a chloridů při průchodu nádrží (viz. graf 2). Hodna pH ve vzorcích vody vzrostla ze 7,5 při odběru na podzim na 8,1 při zimním odběru. Konduktivita na výstupu při odběru v únoru dosahovala 685 mS/m.



Graf 1: RAS a chloridy – měření podzim/zima



Graf 2: Rozdíl vstupu a výstupu z RN – RAS a chloridy (23.02.2022)

Větší koncentrace na výstupu se dá vysvětlit větším objemem vod protékajících nádrží v období před měřením. V prostoru zdržení bylo množství stojaté vody, za předpokladu, že se větší objem uvolní odpařováním, tak soli zůstanou ve zbytkové vodě ve větší koncentraci. Stejně tak pokud voda substrátem protéká pomalu a dochází k osmóze. Při větším nárazovém průtoku se pak kontaminanty v nádrži nechají strhnout protékající znečištěnou vodu a při slabém biologickém čištění dorazí k odtoku s větší koncentrací, než s jakou se do nádrže dostaly. Nárazový průtok může polutanty tlačit před sebou a dochází k nerovnoměrnému rozložení průtoku kontaminantů filtrem. Znečištěná voda z místa zdržení na výpusti odtékala jen velmi slabě, dá se tedy předpokládat, že se znečištěná voda v recipientu dostatečně zředila.

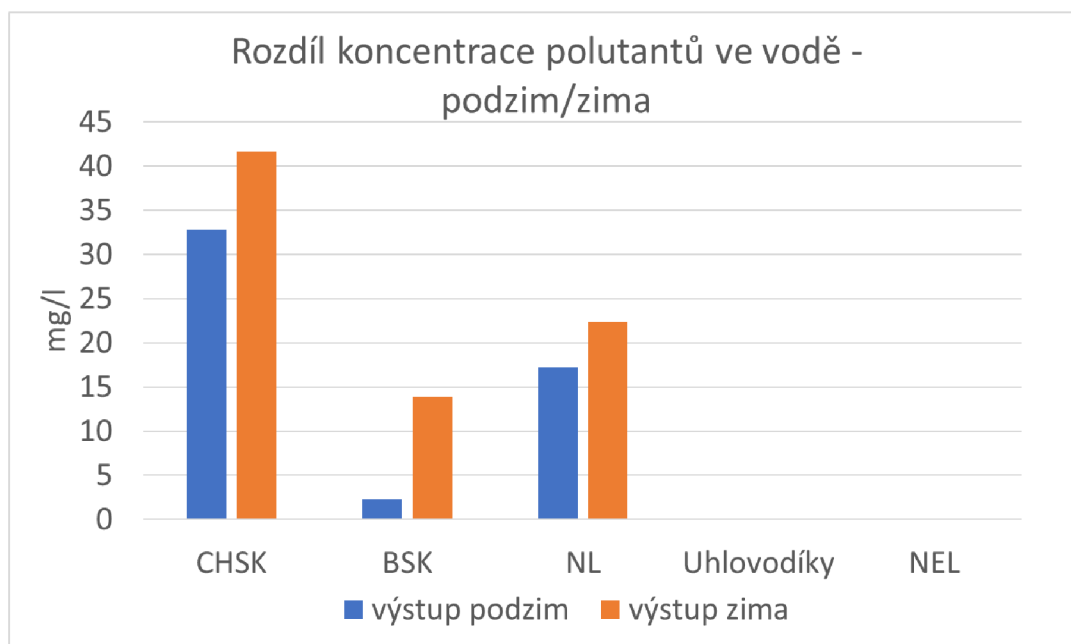
Problematika dopadů zimní údržby by měla být vhodným způsobem řešena již v rámci posouzení vlivu stavby na životní prostředí. Limity vypouštění chloridů do povrchových vod jsou stanoveny nařízením vlády č. 401/2015 Sb. v aktuálním znění, Konkrétně Tabulka 1a: Ukazatele a hodnoty přípustného znečištění povrchových vod, uvádí, že celoroční průměrný limit koncentrace chloridů je 150 mg/l. V technické normě 83 je uvedeno základní schéma výpočtu vlivu chemických rozmrazovacích látek v odtoku z komunikace na recipientní vodoteč i s příkladem ze kterého se zjistí, zda je překročen stanovaný limit (TP 83, 2014; Nařízení vlády č.401/2015 Sb.).

V substrátu je rozdíl mezi odběrem před začátkem solení komunikací a po skončení solné sezony ještě drastičtější. To by napovídalo zadržování solí v substrátu nádrže. Hodnota pH v substrátu klesla.

Tabulka 4: Koncentrace polutantů v substrátu

Datum odběru: 21.10.2021			
Parametr	RAS	Chloridy	pH
substrát	<50	<2	8,78
Datum odběru: 23.02.2022			
substrát	3820	2250	7,4
jednotky	mg/l	mg/l	-

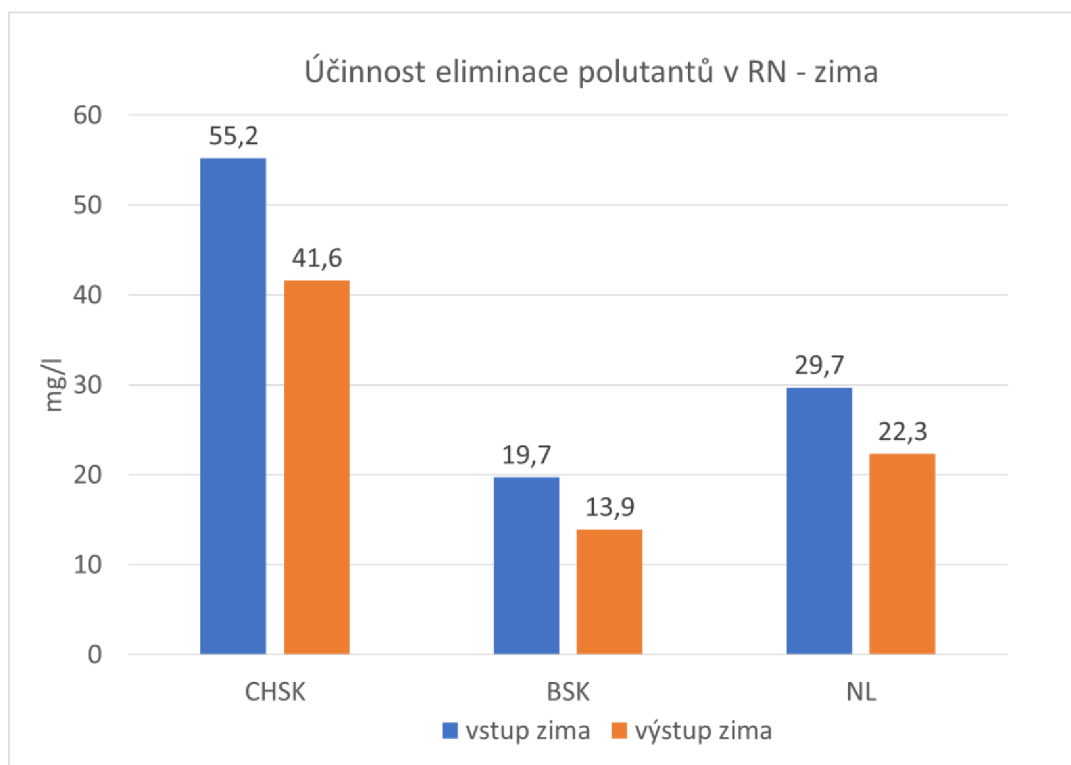
U další parametrů (CHSK, BSK, NL, Uhlovodíky a NEL) měřených ve vodě také zaznamenáváme nárůst mezi jednotlivými odběry, avšak ne tak výrazný (viz. Graf 3).



Graf 3: Rozdíl koncentrace polutantů ve vodě – podzim/zima

V nádrži docházelo je jejich eliminaci. Při průchodu biologickým stupněm se podařilo odstranit část obsahu všech polutantů. Uhlovodíky a NEL se ve všech vzorcích vody nacházely pouze ve stopových množstvích, méně než 0,1 mg/l.

Jednotlivé účinnosti čištění byly pro CHSK 22,9 %, pro BSK 29,4 % a pro nerozpuštěné látky 24,9 % (viz. Graf 4).



Graf 4: Účinnost eliminace polutantů v RN – zima

Vegetace v objektu skoro vymizela. Z původně vysázených šesti druhů se v nádrži drží jen Rákos obecný. Ten se vyskytuje převážně u přítoku do nádrže a v okolí podélných zón kde se zdržuje voda. Porostlá plocha byla odhadnuta na 20 % celkové plochy. Při obou návštěvách nepadal zdravě a byla pozorována spousta mrtvé biomasy. Při odběrech v říjnu se v nádrži vyskytovaly nahodile i jiné rostliny, ty se však po zimním období vytratily (viz. Obr. č. 12,14,16). Ve vodě na povrchu se občasně vyskytovaly olejové skvrny.



Obr. 16: Vegetace a stojatá voda v okolí přítoku do RN

8.6 Návrh na intenzifikaci RN

S limitní čistící kapacitou sestavy pro odvádění vody z dálnice D3 hrozí odvádění vody do recipientu s větší než limitní koncentrací kontaminantů. Před úpravou vod v umělých mokřadech (kořenových filtrech) se doporučuje zavést stupeň předčištění.

Ten by obstarávala prefabrikovaná železobetonová podzemní dešťová usazovací nádrž s česlemi na vstupu, které slouží pro zadržení hrubých odpadů. Zde by se separovaly nerozpuštěné látky, probíhalo gravitační odlučování a dočištění pomocí filtrace. Sedimentační komora dokáže zamezit větším částicím v průchodu do umělého mokřadu a snižuje tak pravděpodobnost ucpání. Při době zdržení jeden den je účinnost usazování 80 % pro usaditelné látky v průměru 10–30 μm . Norná stěna by následně zachytila lehké kapaliny na hladině a chránila tak biologický stupeň od kontaminace ropnými látkami. V poslední části opatřit DUN koalescenčním filtrem a zajistit tak účinné odstraňování nepolárních extrahovatelných látek. Dál voda odtéká otevřeným korytem do retenční nádrže (Chen a kol. 2014; Kuk a kol. 2016).

Dočištění vody od menších částic v dalším stupni zajistí biologická část. Ta se bude jako doteď nacházet v prostoru retenční nádrže. Rozdělovací šachta

na vstupu do nádrže regulace a optimálně rovnoměrně přivede předčištěnou vodu do umělého mokřadu s horizontálním podpovrchovým tokem a nahradí tak řešení se stálou vodní hladinou. Osadí se rákosem obecným a zvolí se vhodný filtrační substrát. Nabízí se zeolit, který v mnoha ohledech funguje lépe než kamenivo. Použit se může i umělé kamenivo. To při delší době zdržení dokázalo odstraňovat chloridy z vody. V kořenovém filtru dochází k mechanickým, biologickým a fyzikálním procesům, které eliminují organické i anorganické polutanty. Do mokřadu se mohou uměle naočkovat mikroorganismy, speciálně kultivované v extrémních podmínkách, pro větší účinnost a rychlost odstranění organických látek (Kuk a kol. 2016).

Voda pod povrchem horizontálně proteče až k výstupu, odkud bude za navrženého odtoku vypouštěna do přílehlého recipientu. Celým systémem protéká gravitačně a nevyžaduje žádné složitější rozvody. Celé řešení je provedeno s minimálními náklady pro následný provoz zařízení. Bude nutná kontrola stavu funkčnosti nádrže 1x za půl roku a údržbové práce 1x za rok (Kuk a kol. 2016).

9 Diskuse

Požadavek na zajištění odvodnění vod spadených na povrch vozovky se vztahuje na projekty nových silnic a dálnic v České republice. Tato práce se zabývá konkrétním objekt umístěný na dálnici D3. Ta spadá do kategorie vysoce frekventovaných pozemních komunikací s počtem vozidel nad 15000 za den. Je tak požadováno náročnější předčištění s koalescenčním filtrem (TP83, 2013).

Na úseku Borek-Úsilné je vybudována retenční nádrž s předřazeným koalescenčním filtrem a biologickým stupněm čištění, nacházejícím se přímo v nádrži (ŘSD, 2016). Substrát by tvořen kamenivem různých průměrů. Prostor býval porostlý vegetací ta se však nacházela v bídném stavu a malém počtu. Pro zjištění poměru obsahu polutantů a chloridů ze zimní údržby vozovky byly provedeny dvě návštěvy za účelem odebrání vzorků. Porovnaly se rozdíly před a po zimním období a při druhém měření rozdíl na vstupu a výstupu. Nárůst chloridů v systému je patrný na první pohled a při průchodu mokřadem se jejich koncentrace ještě zvýšila.

V systému se podařilo eliminovat 22,9 % chemické spotřeby kyslíku. To je o poznání méně než u ostatních autorů. Caselles-Osorio (2017) uvádí průměr odstranění 91 %. Neosázený systém vykazoval menší účinnost. Dá se tedy usoudit, že zbývající rostliny, které hrají při eliminaci CHSK roli, ve zkoumané nádrži fungují jen v omezené míře. Singh (2014) předkládá výsledky bližší zkoumané nádrži, efektivita odstraňování CHSK v jeho práci dosahovala 20 % a koncentrace okolo 80 mg/l. U kamenitého substrátu, použitého i v RN Borek-Úsilné, pozoroval horší výsledky v porovnání se zeolitovým substrátem, který poskytuje lepší adsorpční schopnosti.

Dalším měřeným kontaminantem byly nerozpuštěné látky. Podařilo se odstranit 24,9 % při průchodu mokřadem. U většiny prací efektivita mokřadů přesahuje 50 %. Je to především zapříčiněno tím, že zkoumaný systém postrádá usazovací nádrž. Jelikož hlavním důvodem jejich eliminace je sedimentace. Jelikož se před nádrží nachází koalescenční filtr dá se předpokládat, že částice v nádrži jsou malé a těžko usaditelné. Senduran (2018) pozoroval při podobném obsahu NL ve vodě jako ve výsledcích ze zkoumané lokality, že se látky poměrně rychle usadí. Menší teplota však tento proces zpomaluje, což mohl být problém v zimních měsících. Gopalan (2014) se zaměřoval na dobu zdržení v mokřadech s horizontálním tokem

a systém s kamenivem osázený rákosem obecným eliminoval 33.6 % nerozpuštěných látek, při dvou denním zdržení. Mohlo by se tedy zdát, že RN neposkytne částicím dostatečný čas na to, aby se usadily. Při návštěvě se dalo pozorovat množství stojaté vody, nasvědčující opaku. Problému opět přispívá nedostatečné zapojení vegetace, zlepšující výkon systému.

Pozorované odstraňování biochemické spotřeby kyslíku bylo 29,4 %. Eliminaci BSK více věnoval Wang (2016). Ten zaznamenal efektivitu jeho systému až 82 %. Důležitou úlohu hraje doba zdržení, jelikož dá substrátu a mikrobům více času ovlivnit znečištěnou vodu. Ovšem delší doba zdržení má negativní vliv na účinnost odstranění BSK. Jako ideální délku uvádí 2 dny. Další parametrem je dobré provzdušnění substrátu, které dodává zařízení vegetace, případně systém distribuce vody v nátoku. Opět tedy narážíme na problém s nevyhovujícím stavem rostlin v nádrži.

Jak se dalo předpokládat po zimní údržbě silnice nastalo zvýšení koncentrace chloridů a rozpuštěných anorganických solí ve vodě a substrátu. Ty se vyskytovaly už při měření v říjnu ve větší koncentraci, než se předpokládalo. Navíc v zimě se jejich koncentrace na výstupu zvýšila, v porovnání se vstupem. Senduran (2016) zaznamenal eliminaci 4.5 % chloridů. Fronczyk (2017) naměřila koncentraci Cl 1400 mg/l, podobnou jako v našem případě, avšak nepříliš účinnou eliminaci. Substrát se zeolitem dosáhl 13 % při odstraňování. Výsledky byly ovšem kolísavé a šahaly i do negativních hodnot. Potíže s eliminací solí se tedy zdají být rozšířené a je třeba se na ně zaměřit.

Z pohledů vlastních výsledků a postupů mělo být provedeno více odběrů. Pouhé dvě návštěvy k porozumění problematice RN nestačily. Výsledky mohly být ovlivněny různou intenzitou srážek před odběry a zkreslit tak poměry v polutantů ve vodě a substrátu. Mohly také být odebrány vzorky v blízkosti nebo přímo z recipientu, kam je voda odváděna, pro přesnější stanovení vypouštěných koncentrací. Bylo by také vhodné provést odběry vzorků z podobných zařízení a zjistit, zda se hodnoty vymykají či nikoliv.

10 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo představit dešťové nádrže pro zacházení s dešťovými vodami. Jsou zde popsány možnosti návrhu a jejich funkce. Seznámení s možným využitím uměle budovaných mokřadů jako případnou volbou pro dočištění srážkových vod před vypuštěním do recipientu. Práce se zaměřuje na možnosti různých provedení a shrnuje účinnost při odstraňování kontaminujících prvků. Nastínila finanční stránku zařízení. V rešeršní části jsou uvedeny nároky na údržbu jednotlivých zařízení. V poslední řadě je shrnut legislativní rámec řešící problematiku dešťových nádrží a mokřadů.

V praktické části se řešila otázka fungování retenční nádrže v reálném provozu. Proběhl odběr a zhodnocení výsledků měření. Je uvedeno vybavení nádrže a práce s polutanty. Byly popsány nedostatky a problémy zařízení. V poslední části je představena možnost úprav, které by vedly k lepším účinkům nádrže.

Práce slouží jako podklad pro další práce zabývající se tematikou smyvových vod z komunikací. Použití objektů a umělých mokřadů v tomto odvětví a poukázání možné problematiky zimní údržby pro stávající zařízení. Pro pokračování ve výzkumu by bylo vhodné uskutečnit větší počet měření pro získání lepšího vzorku. Provést porovnání s dalšími obdobnými objekty na jiných místech ČR.

11 Źródła

- AL-RUBAEI, A. M., ENGSTRÖM, M., VIKLANDER M., BLECKEN, G. T., 2016: Long-term hydraulic and treatment performance of a 19-year old constructed stormwater wetland—Finally matured or in need of maintenance?. *Ecological Engineering*. **95**, 73-82. ISSN 09258574.
- BERGIER, T., WŁODYKA-BERGIER, A., 2015: Semi-technical scale research on constructed wetland removal of aliphatic hydrocarbons C7–C40 from wastewater from a car service station. *Desalination and Water Treatment*. **57**(3), 1534-1542. ISSN 1944-3994.
- BRIX, H., 2003: Plants used in constructed wetlands and their functions. *1st International Seminar on the use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands*.
- CALHEIROS, C.S.C., DUQUE, F.A., MOURA, A., HENRIQUES, I.S., CORREIA, A., RANGEL A., CASTRO, P.M.L., 2009: Substrate effect on bacterial communities from constructed wetlands planted with *Typha latifolia* treating industrial wastewater. *Ecological Engineering*. **35**(5), 744-753. ISSN 09258574.
- CASELLES-OSORIO, A., VEGA, H., LANCHEROS, J.C., CASIERRA-MARTÍNEZ H.A., MOSQUERA, J.E., 2017: Horizontal subsurface-flow constructed wetland removal efficiency using *Cyperus articulatus* L. *Ecological Engineering*. **99**(4), 479-485. ISSN 09258574.
- ERGAIEG, K., MSADDEK, M.H., KALLEL, A., TRABELSI, I., 2021: Monitoring of horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of municipal wastewater. *Arabian Journal of Geosciences*. **14**(19). ISSN 1866-7511.
- FRONCZYK, J., PARK, K., KIM Y., FU, D., 2017: Artificial road runoff water treatment by a pilot-scale horizontal permeable treatment zone. *Ecological Engineering*. **107**(7), 198-207. ISSN 09258574.
- FU, D. F., SINGH, R.P., JUAN, H., OJHA, C.S.P., SURAPALLI, R.Y., ZHANG, T.C., 2014: Highway runoff treatment by lab-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. **64**, 193-201. ISSN 09258574.

- FUČÍK, P., VYMAZAL, J., ŠEREŠ, M., 2021: Navrhování umělých mokřadů v návaznosti na zemědělské odvodnění pro zlepšení jakosti vody: certifikovaná metodika/2021. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. ISBN 978-80-88323-50-1.
- GILL, L.W., RING, P., CASEY, B., HIGGINS N.M.P., JOHNSTON, P.M., 2017: Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. *Science of The Total Environment*. **601-602**(4), 32-44. ISSN 00489697.
- GOPALAN, B., 2014: EFFECT OF VEGETATION AND RETENTION TIME ON WASTEWATER TREATMENT IN PILOT SCALE CONSTRUCTED WETLANDS IN A TROPICAL CAMPUS. *BIOINFO Environment and Pollution*. **4**(2), 72-77. ISSN 2249-1716.
- GORME, J.B., MANQUIZ, M.C., LEE, S., KIM, L.H., 2012: Seasonal changes of plant biomass at a constructed wetland in a livestock watershed area. *Desalination and Water Treatment*. **45**(1-3), 136-143. ISSN 1944-3994.
- GRODA, B., VÍTĚZ, T., MACHALA, M., FOLLER, J., SURÝNEK D., MUSIL, J., 2007: ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD JAKO NÁSTROJ K OCHRANĚ ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ V ZEMĚDĚLSKÉ PRAXI A NA VENKOVĚ. Brno, Metodika. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- GUNES, K., TUNCSIPER, B., AYAZ S., DRIZO, A., 2012: The ability of free water surface constructed wetland system to treat high strength domestic wastewater: A case study for the Mediterranean. *Ecological Engineering*. **44**, 278-284. ISSN 09258574.
- HOFFMANN, H., PLATZER, C., VON MÜNCH E., WINKER, M., 2011: *Technology review of constructed wetlands: Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- CHEN, Y., PARK, K., KIM Y., FU, D., 2014: Particle retention in compact constructed wetlands treating highway stormwater. *Water Science and Technology*. **69**(7), 1440-1446. ISSN 0273-1223.
- CHOI, J.Y., MANQUIZ-REDILLAS, M.C., HONG, J.S., LEE, S.Y., KIM L.H., YAN, L., 2015: Comparison of the treatment performance of hybrid

constructed wetlands treating stormwater runoff. *Water Science and Technology*. 72(12), 2243-2250. ISSN 0273-1223.

- JESUS, J.M., CALHEIROS, C.S.C., CASTRO, P.M.L., BORGES, M.T., 2013: Feasibility of *Typha Latifolia* for High Salinity Effluent Treatment in Constructed Wetlands for Integration in Resource Management Systems. *International Journal of Phytoremediation*. 16(4), 334-346. ISSN 1522-6514.
- KADLEC, R.H., REDDY, K.R., 2001: Temperature Effects in Treatment Wetlands. *Water Environment Research*. Wiley, 73(5), 543–557.
- Kuk, R., Hnátková, T., Šereš, M., 2016: Praktická možnost využití nových technologií při odvodnění dálnic v průběhu výstavby. Sborník conference městské vody 2016, 6.-7.10.2016, Velké Bílovice, 87-94.
- KUK, R., DVOŘÁK D., HNÁTKOVÁ, T., 2020: Využití prvků hospodaření s dešťovými vodami při výstavbě dálnic. *Silniční Obzor*. 81, 251-255.
- KUMAR, S., DUTTA, V., 2019: Efficiency of Constructed Wetland Microcosms (CWMs) for the Treatment of Domestic Wastewater Using Aquatic Macrophytes. *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future*. Singapore: Springer Singapore, 287-307. ISBN 978-981-10-7283-3.
- LESIKAR, B., WEAVER, R., RICHTER R., O'NEILL, C., Constructed wetland media. *Texas A&M Agrilife*.
- LUCAS, R., EARL, E.R., BABATUNDE, A.O., BOCKELMANN-EVANS, B.N., 2015: Constructed wetlands for stormwater management in the UK: a concise review. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 32(3), 251-268. ISSN 1028-6608.
- MEITEI, M.D., PRASAD, M.N.V., 2021: Potential of *Typha latifolia* L. for phytofiltration of iron-contaminated waters in laboratory-scale constructed microcosm conditions. *Applied Water Science*. 11(2). ISSN 2190-5487.
- MLEJNSKÁ, E., 2017: Kolmatace umělých mokřadů. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace. 59(6). ISSN 03228916.
- NIVALA, J., MURPHY C., FREEMAN, A., 2020: Semi-technical scale research on constructed wetland removal of aliphatic hydrocarbons C7–C40 from wastewater from a car service station. *Water*. 12(4), 1534-1542. ISSN 2073-4441.

- NORIEGA-RICO, E.F., CASELLES-OSORIO, A., ORTEGA HERRERA, A., CERRO MEDINA J., MOSQUERA, J.E., 2021: Uptake and Accumulation of Triclosan in *Cyperus articulatus* L. Planted in a Constructed Wetland for the Treatment of Domestic Wastewater. *Ecological Engineering*. **232**(11), 479-485. ISSN 0049-6979.
- NYPL, V., SYNÁČKOVÁ, M., 2017: Zdravotně inženýrské stavby 30: stokování. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01729-X.
- PACKER, J.G., MEYERSON, L.A., SKÁLOVÁ, H., PYŠEK P., KUEFFER, C., 2017: Biological Flora of the British Isles: *Phragmites australis*. *Journal of Ecology*. **105**(4), 1123-1162. ISSN 0022-0477.
- PAPADOPOULOS, N., ZALIDIS, G., YI, W., ZHANG T., ZHANG, Y., 2019: The Use of *Typha Latifolia* L. in Constructed Wetland Microcosms for the Remediation of Herbicide Terbutylazine. *Environmental Processes*. **6**(4), 985-1003. ISSN 2198-7491.
- ŘSD. *TECHNICKÁ PRŮVODKA STAVBY: Dálnice D3 Borek–Úsilné stavba 0309/III*. Ředitelství silnic a dálnic ČR, 2016.
- SAMSÓ, R., 2014: Numerical Modelling of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.
- SARIKA, M., ZIKOS, A., 2020: Coastal Salt Marshes. *Handbook of Halophytes*. Cham: Springer International Publishing, 1-39. ISBN 978-3-030-17854-3.
- SENDURAN, C., GUNES, K., TOPALOGLU, D., DEDE, O.H., MASI F., KUCUKOSMANOGLU, O.A., 2018: Mitigation and treatment of pollutants from railway and highway runoff by pocket wetland system; A case study. *Chemosphere*. **204**, 335-343. ISSN 00456535.
- SHELEF, O., GROSS A., RACHMILEVITCH, S., 2013: Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives. *Water*. **5**(2), 405-419. ISSN 2073-4441.
- SINGH, R.P., FU, D., FU, D., JUAN, H., 2014: Pollutant Removal Efficiency of Vertical Sub-surface Upward Flow Constructed Wetlands for Highway Runoff Treatment. *Arabian Journal for Science and Engineering*. **39**(5), 3571-3578. ISSN 1319-8025.

- SINGH, R.P., FU, D., HUANG J., FU, D., 2015: Pollutant removal efficiency of mesocosm HSSF-constructed wetlands treating highway runoff with different filter materials and HRT. *Desalination and Water Treatment*. **54**(1), 103-112. ISSN 1944-3994.
- TSIHRINTZIS, V.A., 2017: The use of Vertical Flow Constructed Wetlands in Wastewater Treatment. *Water Resources Management*. 31(10), 3245-3270. ISSN 0920-4741.
- VYMAZAL, J., 2008: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Proceedings of Taal: The 12th World Lake Conference*. 965-980.
- VYMAZAL, J., 2010: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A review. *Water*. **2**(3), 530-549. ISSN 2073-4441.
- VYMAZAL, J., 2013: Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*. **61**, 582-592. ISSN 09258574.
- VYMAZAL, J., 2022: The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land*. **11**(2). ISSN 2073-445X.
- WANG, X., TIAN, Y., ZHAO, X., WU, Q., PENG S., YAN, L., 2016: Optimizing the operation of combined oxidation pond-constructed wetland ecosystems used for treating composite wastewater. *Ecological Engineering*. **88**, 64-76. ISSN 09258574.
- ZHAO, J., ZHAO, Y., XU, Z., DOHERTY L., LIU, R., 2016: Highway runoff treatment by hybrid adsorptive media-baffled subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*. Singapore: Springer Singapore, **91**, 231-239. ISBN 978-981-10-7283-3. ISSN 09258574.
- ZHOU, Y., GU, T., YI, W., ZHANG T., ZHANG, Y., 2019: The release mechanism of heavy metals from lab-scale vertical flow constructed wetlands treating road runoff. *Environmental Science and Pollution Research*. **26**(16), 16588-16595. ISSN 0944-1344.

Zákony, normy a vyhlášky

- ČSN 75 7506: Jakost vod – Stanovení extrahovatelných látek metodou infračervené spektrometrie. Český normalizační institut, 2002.
- ČSN 75 7347: Jakost vod – Stanovení rozpuštěných anorganických solí (RAS) v odpadních vodách - Gravimetrická metoda po filtraci filtrem ze skleněných

vláken. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- ČSN 75 9010: Vsakovací zařízení srážkových vod. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- ČSN 75 6551: Odvádění a čištění odpadních vod s obsahem ropných látek. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- ČSN 75 6261: Dešťové nádrže. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- ČSN EN 1899-2: Jakost vod – Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po n dnech (BSKn) - Část 2: Metoda pro neředěné vzorky. Český normalizační institut, 1999.
- ČSN EN 872: Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- ČSN EN 27888: Jakost vod. Stanovení elektrické konduktivity. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- ČSN EN ISO 9377-2: Jakost vod – Stanovení uhlovodíků C10 až C40 – Část 2: Metoda plynové chromatografie po extrakci rozpouštědlem. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- ČSN ISO 10390: Kvalita půdy – Stanovení pH. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- ČSN ISO 10523: Jakost vod – Stanovení pH. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- ČSN ISO 6060: Jakost vod – Stanovení chemické spotřeby kyslíku. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- ČSN P CEN/TS 15937: Kaly, upravený bioodpad a půdy – Stanovení elektrické konduktivity. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- NAŘÍZENÍ VLÁDY č.401/2015 Sb., 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. V platném znění.
- ZÁKON Č. 254/2001 Sb., Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). V platném znění.

EL zdroje

- ACO, © 2022: Odlučovače lehkých kapalin. [online] [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: https://www.aco.cz/fileadmin/standard/aco.cz/04_Ke_stazeni/Prospekty-Katalogy/Technologie/ACO_Technologie_-_Kap_2_-_ORL_Oleopator-G.pdf?fileVersion=1557390797.
- Arnika, 2015: Celkový fosfor. [online] [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/celkovy-fosfor>.
- Asio, © 2022: Návod k obsluze a údržbě. [online] [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/materialy-as-top>.
- Fondriest, © 2022: Turbidity, Total Suspended Solids & Water Clarity. *Fundamentals of Environmental Measurements* [online] [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>.
- KAŠTOVSKÁ, Eva, © 2021: Rhizosféra – místo, kde to žije. Habilitační pedagogická přednáška. Katedra biologie ekosystémů [online] [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://kbe.prf.jcu.cz/cs/rhizosfera-misto-kde-zije-habilitacni-pedagogicka-prednaska>.
- PÍREK, Oldřich, 2013: Zařízení ke snížení znečištění dešťových vod – AS-AKU filtr. *ASIO* [online] [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/193.zarizeni-ke-snizeni-znecistení-destovych-vod-as-aku-filtr>.
- Plants of the World Online. *Cyperus articulatus L* [online] [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:303822-1>.

12 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk

12.1 Seznam obrázků

Obr. 1: Dešťová usazovací nádrž zakrytá (The Constructor, © 2021: Different Types of Sedimentation Tanks used in Water Treatment. [online] [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/environmental-engg/types-of-sedimentation-tank/14711/>).

Obr. 2: Povrchová retenční nádrž Borek-Úsilné (autor).

Obr. 3: Systém pro čištění odpadních vod sestávající ze tří usazovacích nádrží, čtyř mokřadů s horizontálním tokem a dvou mokřadů s vertikálním podpovrchovým tokem (Samsó, 2014).

Obr. 4: Umělý mokřad s povrchovým tokem (Vymazal, 2010).

Obr. 5: Umělý mokřad s horizontálním podpovrchovým tokem (KRIŠKA, Michal a Miroslava NĚMCOVÁ: Kořenové čistírny. Vodní hospodářství [online]. © 2021 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/korenove-cistirny/>).

Obr. 6: Umělý mokřad s vertikálním podpovrchovým tokem (KRIŠKA, Michal a Miroslava NĚMCOVÁ: Kořenové čistírny. Vodní hospodářství [online]. © 2021 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/korenove-cistirny/>).

Obr. 7: Rákos obecný (*Phragmites australis*) v mokřadním prostředí (Sarika, 2020).

Obr. 8: Šáchor (*Cyperus articulatus*) (Plants of the World Online: *Cyperus articulatus* L [online]. © Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:303822-1>).

Obr. 9: Orobinec širokolistý (*Typha latifolia*) (MICHALCOVÁ, D.: *Typha latifolia* L. (orobinec širokolistý). *Botanická fotogalerie* [online]. 2020 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: https://www.botanickafotogalerie.cz/cz/Typha_latifolia/).

Obr. 10: mapa lokality RN (www.mapy.cz).

Obr. 11: RN Borek-Úsilné z příjezdové cesty (autor).

Obr. 12: RN Borek-Úsilné uvnitř nádrže (autor).

Obr. 13: Odběr kapalných vzorků na výstupu (21.10.2021) (autor).

Obr. 14: Odběr pevných vzorků (23.02.2022) (autor).

Obr. 15: Odběr pevných vzorků (21.10.2021) (autor).

Obr. 16: Vegetace a stojatá voda v okolí přítoku do RN (autor).

12.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Odstraňování polutantů při různých dobách zdržení (autor).

Tabulka 2: Úkony a četnost údržby umělých mokřadů (TNV 75 9011, 2013).

Tabulka 3: Úkony a četnost údržby předčisticích zařízení (TNV 75 9011, 2013).

Tabulka 4: Koncentrace polutantů v substrátu (autor).

12.3 Seznam grafů

Graf 1: RAS a chloridy – měření podzim/zima (autor).

Graf 2: Rozdíl vstupu a výstupu z RN – RAS a chloridy (23.02.2022) (autor).

Graf 3: Rozdíl koncentrace polutantů ve vodě – podzim/zima (autor).

Graf 4: Účinnost eliminace polutantů v RN – zima (autor).

Přílohy

Příloha 1: Tabulka účinností systémů jednotlivých autorů (autor).

Příloha 1: Tabulka účinnosti systému jednotlivých autorů

AUTOR	(Senduran, 2018)	(Zhou, 2019)	(Bergier,2016)	(Caselles-Osorio, 2017)		(Chen,2014)		
DRUH MOKŘADU	kapesní umělý mokřad	Umělý mokřad s vertikálním tokem	umělý mokřad	umělý mokřad s Horizontálním podpovrchovým tokem		umělý mokřad s vertikálním tokem		
STUPNĚ	Biologický (Reálný)	Biologický (Laboratorní)	usazovací + Biologický (pilotní)	usazovací nádrž, Biologický (pilotní)		usazovací nádrž, Biologický (Laboratorní)		
DOBA ZDRŽENÍ	48 h	2 d	36 h	3 d		2,3 d		
SUBSTRÁT	X	zeolity a šterk	šterk	žulový šterk		kamenivo, extruzivní hornina	kamenivo, pemza	kamenivo, dřevní štěpka
NEZACHYTÍ	organický uhlík (-5 %), Ni (-19.5 %)	rozložený zinek	X	X	X	X	X	X
ZACHYTÍ	NL 52 %, N 26 %, P 63 %, Cl 4.5 %, Síran 3 %, Cr 33 %, Co 39 %, Cu 7 %, Zn 55 %, As 36 %, Cd 38 %, Pb 18 %	Pb 99 %, Cu 98,2 %, Zn67 %, Cr 75,1 %	Uhlovodíky 70 %	CHSK 80 %, amoniak 37 %	CHSK 91 %, amoniak 90 % Dusík > 75 %	částice 10–30 μm > 80 % částice menší než 1 μm 40 %, exturzní h. < 90 % všech velikostí	částice 10–30 μm > 80 % částice menší než 1 μm 40 %, pemza <90 % všech velikostí	částice 10–30 μm > 80 % částice menší než 1 μm 40 %, dřevní štěpka > 90 % všech velikostí
VEGETACE	Rákos obecný (Phragmites australis)	Šáchor střídavolistý (Cyperus alternifolius)	Rákos obecný (Phragmites australis)	X	Šáchor (Cyperus articulatus)	Puškvorec obecný (Acorus Calamus)		

Příloha 1 (pokračování): Tabulka účinnosti systému jednotlivých autorů

AUTOR	(Gill, 2017)	(Al-Rubaei, 2016)	(Gopalan, 2014)				(Fu, 2014)	
DRUH MOKŘAU	umělý mokřad s horizontálním podpovrchovým tokem	umělý mokřad s volnou hladinou	umělý mokřad s Horizontálním podpovrchovým tokem				laboratorní mokřad s Horizontálním podpovrchovým tokem	
STUPNĚ	Biologický (Reálný)	usazovací předhradí, Biologický (Reálný)	Biologický (Laboratorní)				Biologický (Laboratorní)	
DOBA ZDRŽENÍ	21 m až 8.7 h	X	2 d	4 d	6 d	8 d	12 h	
SUBSTRÁT	půda	X	štěrk				nadrcené kameny, půda	dlažební kamen, půda
NEZACHYTÍ	X	X	X	X	X	X	N-29.3 %	x
ZACHYTÍ	Cd 5 %, Cu 60 %, Pb31 %, Zn 86 %	Cd 90 %, Cu 91 %, Zn 90 %, P 89 % Pb 96 %, NL 96 %, N 59 %	NL 33.6 %, CHSK 39,7 %, N 23,3 %, P 25,3 %	NL 34,1 %, CHSK 44,3 %, N 7,1 %, P 28,4 %	NL 41 %, CHSK 64,2 %, N 31,3 %, P 39,2 %	NL 43,3 %, CHSK 69,6 %, N 45,5 %, P 74,9 %	NL 73.5 %, CHSK 55.5 %, amoniak 81.9 %, P 57.1 %	NL 65 %, CHSK 31.3 %, amoniak 63.7 %, N 21 %, P 23.7 %
VEGETACE	Rákos obecný Orobinec širokolistý	mokřadní vegetace	Rákos obecný (Phragmites australis)				Rákos obecný (Phragmites australis)	

Příloha 1 (pokračování): Tabulka účinnosti systému jednotlivých autorů

AUTOR	(Singh, 2015)				(Singh, 2014)			
DRUH MOKŘADU	umělý mokřad s Horizontálním podpovrchovým tokem				vertikální mokřad s podpovrchovým tokem vzhůru			
STUPNĚ	Biologický (Laboratorní)				Biologický (Laboratorní)			
DOBA ZDRŽENÍ	24 h	12 h	24 h	12 h	6 h			
SUBSTRÁT	dlažební kamen		nadcené kameny		štěrk, půda hladina 50 cm	štěrka, půda hladina 30 cm	zeolit a štěrk, půda hladina 50 cm	zeolit a štěrk, půda hladina 30 cm
NAZACHYTÍ	F -34 %	X	N -28%	N -6 %	N -39 %, F	N -21 %	N -42 %, F	N -46%
ZACHYTÍ	NL 46 %, CHSK 37 %, amoniak 71 %, N 18 % P 34 %	NL 63 %, CHSK 40 %, amoniak 67 %, N 11 %, P 48 %	NL 55 %, CHSK 50 %, amoniak 88 %, P 34 %	NL 75 %, CHSK 45 %, amoniak 78 %, P 77 %	NL 29 %, CHSK 19 %, amoniak 52 %,	NL 43 %, CHSK 20 %, amoniak 63 %, P 55 %	NL 54 %, CSHK 26 %, amoniak 68 %	NL 57 %, CHSK 45 %, amoniak 78 %, P 37 %
VEGETACE	Rákos obecný (<i>Phragmites australis</i>)				Rákos obecný (<i>Phragmites australis</i>)			

Příloha 1 (pokračování): Tabulka účinnosti systému jednotlivých autorů

AUTOR	(Choi, 2015).		(Wang, 2016)		(Fronczyk, 2017)		
DRUH MOKŘADU	hybridní mokřad		dolů vertikální s pod povrchovým tokem (neprovzdušněná)	nahoru vertikální s pod povrchovým tokem (provzdušněná)	vertikální filtrační zóna		
STUPNĚ	Biologický – s volnou hladinou (sedimentační) podpovrchový horizontální (Reálný)		oxidační rybníček, biologický (Laboratorní)		Biologický (pilotní)		
DOBA ZDRŽENÍ	0.4 ± 0.6 h	0.9 ± 1.2 h	1,5d		X	X	X
SUBSTRÁT	štěrk a písek	půda a štěrk	Štěrk – láva – písek-půda		nula mocné železo, aktivní uhlí, zeolit	nula mocné železo, aktivní uhlí, vápenec	nula mocné železo, aktivní uhlí, křemičitý spongolit
NEZACHYTÍ	X	X	X	X	X	Chloridy	Chloridy
ZACHYTÍ	NL 71 %, CHSK 51 %, N 49 %, P 42 %, Zn 58 %, Pb 52 %	NL 95 %, CHSK 90 %, N 97 %, P 96 %, Zn 84 %, Pb 88 %	CHSK 58.9–61.7 %, BSK 82 % amoniak 39–45 % N 47.5–53.2 %, P 64.2–65.3 %	CHSK 69.6–75.8 % BSK 86 % amoniak 68.5–80.4 % N 63.0–78.3 %, P 67.2–73.9 %	těžké kovy ≥ 96 %, Ni 93 %, Cu a Pb 99 %, Cd 96 %, Cl 13 %, CHSK 82 % uhlovodíky 93 %	těžké kovy ≥ 96 %, Ni 92 %, Cu a Pb 99 %, Cd 97 %, CHSK 20 %, uhlovodíky 97 %	těžké kovy ≥ 96 %, Ni 88 %, Cu a Pb 99 %, Cd 97 %, CHSK 9 %, uhlovodíky 97 %
VEGETACE	kosatec	rákos a kosatec	Pupečník obecný (<i>Hydrocotyle vulgaris</i>) Dosna indická (<i>Canna indica</i>)		X	X	X