

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE



Využití plovoucích ostrovů pro čištění vod

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Bakalant: Lucie Pondělíčková

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lucie Pondělíčková

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Využití plovoucích ostrovů pro čištění vod

Název anglicky

Floating treatment wetlands

Cíle práce

1. Charakterizovat mokřadní ekosystémy.
2. Shrnout základní informace o umělých mokřadech pro čištění odpadních vod.
3. Popsat vznik plovoucích ostrovů v přírodních podmínkách.
4. Shrnout poznatky o plovoucích mokřadech sloužících k čištění vod.

Metodika

Jesná se o rešeršní práci, která má poskytnout základní informace o využití plovoucích ostrovů pro čištění vod.

Doporučený rozsah práce

40 stran včetně příloh

Klíčová slova

mokřady, makrofyta, znečištění vody, plovoucí ostravy

Doporučené zdroje informací

Headley, T.R., Tanner, C.C., 2012. Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: an innovative stormwater treatment technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Research* 42, 2261-2310.

Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 2007. *Wetlands*, 5. vydání. Wiley, Hoboken, New Jersey, USA.

Nichols, P., Lucke, T., Drapper, D., Walker, C., 2016. Performance evaluation of a floating treatment wetland in urban catchment. *Water* 8, 244.

Van de Moortrel, A.M., Meers, E., De Pauw, N., Tack, F.M., 2010. Effect of vegetation, season and temperature on the removal of pollutants in experimental floating treatment wetlands. *Water, Air and Soil Pollution* 212, 281-297.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 28. 2. 2023

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 21. 03. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Využití plovoucích ostrovů pro čištění vod“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, 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 vědoma, 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 31.3.2023.

Poděkování

Chtěla bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce, panu prof. Ing. Janu Vymazalovi, CSc., za vstřícný přístup, odborné vedení a cenné rady.

Zároveň bych také ráda poděkovala své rodině a přátelům za podporu při psaní této bakalářské práce i během celého mého studia.

Využití plovoucích ostrovů pro čištění vod

Abstrakt

Voda je základní lidská potřeba. V důsledku růstu lidské populace dochází ke stále většímu rozvoji průmyslu a zemědělství. Díky tomu se navyšuje spotřeba vody a stoupá její znečištění. Zlepšování kvality vody a funkce vodního ekosystému patří mezi důležité funkce mokřadů. Existují přírodní mokřady, ale také umělé mokřady, vybudované lidmi. Mezi umělé mokřady můžeme zařadit kořenové čističky a plovoucí ostrovy. Tyto dva systémy mohou působit samostatně, nebo jsou umělé ostrovy součástí čističek. Umělé mokřady se snaží napodobit funkce přírodních mokřadů. Výhodou je, že tyto procesy probíhají v kontrolovaném prostředí, což zvyšuje jejich efekt. Po celém světě proběhlo mnoho studií s cílem hodnotit účinnost technologie plovoucích ostrovů pro čištění nejen odpadních vod. I přes všechny již proběhlé studie existuje stále prostor pro další zkoumání. Cílem této práce je popsat možnosti čištění vod při použití plovoucích mokřadů.

Klíčová slova: mokřady, makrofyta, znečištění vody, plovoucí ostrovy, kořenové čistírny

Use of floating islands for water purification

Abstrakt

Water is a basic human need. As a result of the growth of the human population, there is also a greater development of industry and agriculture. Thanks to this, water consumption increases, and its pollution rises. Improving water quality and aquatic ecosystem function are among the important functions of wetlands. There are natural wetlands, but also artificial wetlands, built by humans. Among the artificial wetlands we can include treatment wetlands and floating treatment wetlands. These two systems can work independently, or the floating treatment wetlands are part of the constructed wetlands. Artificial wetlands try to mimic the functions of natural wetlands. The advantage is that these processes take place in a controlled environment, which increases their effect. Many studies have been conducted around the world to evaluate the effectiveness of floating treatment wetlands technology for the treatment of more than just wastewater. Despite all the studies that have already been done, there is still space for further research. The aim of this work is to describe the possibilities of water purification using floating treatment wetlands.

Key words: wetlands, macrophytes, water pollution, floating treatment wetlands, treatment wetlands

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíl práce	3
3. Literární rešerše.....	4
3.1 Charakteristika mokřadů	4
3.1.1 Definice a význam mokřadů.....	4
3.1.2 Rozdělení mokřadů.....	5
3.1.3 Mokřady jako anaerobní prostředí.....	6
3.2 Umělé typy mokřadů pro čištění odpadních vod.....	7
3.2.1 Umělé mokřady s volnou vodní plochou.....	9
3.2.2 Umělé mokřady s horizontálním podpovrchovým tokem	10
3.2.3 Umělé mokřady s vertikálním podpovrchovým tokem	11
3.2.4 Hybridní umělé mokřady	12
3.2.5 Výhody a nevýhody umělých mokřadů.....	13
3.2.6. Využití umělých mokřadů	14
3.2.7 Účinnost umělých mokřadů.....	15
3.2.8 Procesy podílející se na odstranění znečištění v umělých mokřadech	17
3.2.8.1 Koloběh dusíku	17
3.2.8.2 Koloběh fosforu	20
3.2.8.3 Koloběh uhlíku.....	22
3.2.9 Účinnost odstraňování jednotlivých znečišťujících látek v určitých druzích mokřadů	23
3.2.9.1. Organické látky	24
3.2.9.2 Nerozpuštěné látky.....	24
3.2.9.3 Dusík	24
3.2.9.4 Fosfor	25
3.2.9.5 Bakteriální znečištění.....	25
3.3 Plovoucí ostrovy.....	26
3.3.1 Vliv plovoucích mokřadů na čištění vod.....	26
3.3.2 Přírodní plovoucí ostrovy	27
3.3.3 Umělé plovoucí ostrovy.....	28
3.3.3.1 Makrofyta umělých plovoucích mokřadů a jejich pěstování.....	28
3.3.3.2 Substrát pro růst makrofyt	32
3.3.3.3 Vliv rostlin na kyslíkový režim mokřadů	33
3.3.3.4 Výstavba plovoucích ostrovů.....	33
3.3.3.5 Použití umělých plovoucích mokřadů na našem území.....	34
3.3.3.6 Aplikace plovoucích ostrovů ve světě	36
.....	38
3.3.3.7 Účinnost plovoucích mokřadů při čištění vod	39
4. Závěr	41
5. Seznam použité literatury.....	43

1. Úvod

Mokřady nalezneme po celém světě. Přesto, nebo možná právě proto, se jedná o velmi ohrožené ekosystémy. Objevují se dokonce tvrzení, že mokřady ubývají rychleji než deštné pralesy. Kvůli nutnosti jejich ochrany byla vyhlášena Ramsarská úmluva, která zajišťuje ochranu mokřadů na mezinárodní úrovni. Plochy mokřadů ubývají v důsledku klimatických příčin nebo zásahem člověka. Mokřady trpí vysušením krajiny, zanikají kvůli znečištění, jsou ale i cíleně odvodňovány a zaváženy zeminou. Přitom mokřady v krajině plní důležité funkce, z nichž asi nejvýznamnější je schopnost zadržet vodu v krajině. Zabraňují také povodním, když vylití vody do mokřadů snižuje množství vody pronikající do lidských sídel. Velký význam mají také na zvyšování biodiverzity, protože jsou domovem mnoha rostlin a živočichů. Jedná se o vlhké prostředí bez kyslíku, díky čemuž zde dochází k zachycování a ukládání uhlíku. Mokřady mají také schopnost filtrace, což způsobuje zlepšení kvality vody. Tato funkce je pak využívána nejen v technologii kořenových čističek, ale i v systémech umělých plovoucích ostrovů.

V přírodě můžeme nalézt přirozeně se vyskytující plovoucí ostrovy. Přírodní ostrovy vznikají například utržením části příbřežního porostu a jeho odplavením na vodní plochu. To že se přírodní ostrovy vznášejí, způsobují plyny, které vznikají během anaerobního rozkladu organického materiálu, který se v biomase zachytává. Tyto plovoucí mokřady nám mohou poskytnout důležité poznatky, které se pak dají aplikovat i pro lidmi vyrobené ostrovy. Hlavně nám mohou poskytnout informaci o tom, co od jejich variant vyrobených lidmi můžeme očekávat do budoucna.

Ve srovnání s přirozeně se vyskytujícími mokřadními systémy mají umělé plovoucí ostrovy řadu výhod, které urychlují a zlepšují odstraňování znečišťujících látek. Plovoucí nosiče poskytují rostlinám lepší podmínky tím, že snižují turbulence a zmírňují promíchávání vody způsobené větrem a vlnami. Plovoucí ostrovy mohou být využity pro větší hloubky, protože rostliny jsou usazeny na plovákových konstrukcích. To umožní, že plovoucí mokřady zůstávají na hladině vody a reagují na stoupající a klesající hladinou vody, aniž by došlo k zatopení. Další výhodou plovoucích systémů je i to, že kořeny rostlin visí volně v mase vody. Kořeny rostlin pokrývá biofilm, který má význam při biologickém čištění znečištěných vod. Biofilm obsahuje mnoho

mikroorganismů, kteří se podílejí na řadě důležitých procesů čištění.

Význam plovoucích ostrovů nespočívá ale pouze v jejich čistící funkci. Poskytují také prostor pro hnízdění ptáků, ukrývají se zde malí savci, ptáci, drobné vodní organismy i ryby. Makrofyta rostoucí na plotnách a jejich kořeny, visící do vody, se dále podílejí na zvyšování biodiverzity. Zároveň slouží jako semenná banka mokřadních rostlin. V neposlední řadě mají i estetický efekt.

Plovoucí mokřady můžeme nalézt i na území České republiky. Je možno je nalézt na Lipně, na přehradní nádrži Mšeno, na rybníku u Svitav i na mosteckých nádržích. V těchto lokalitách mají různé způsoby využití. Mohou sloužit jako hnízdiště ptáků, poskytují prostor pro zvýšení biodiverzity poškozených lokalit, nebo pomáhají snižovat znečištění sinicemi u rekreačních nádržích.

Umělé mokřady se umí vypořádat s různým znečištěním. Lze je použít pro čištění komunálních, zemědělských, ale i průmyslových odpadních vod. Mají různé způsoby technologického řešení. Proto je vždy možné najít vhodný typ těchto systémů, který se bude hodit pro danou situaci.

Myslím si, že čištění vody přirozenými procesy je jednou z nejlepších cest, jak přispět k ochraně naší planety. Z tohoto důvodu jsou i plovoucí mokřady dobrým řešením pro redukci vodního znečištění. Plovoucí ostrovy jsou moderní transformací toho, co přirozeně funguje v přírodě.

2. Cíl práce

Cílem práce bylo pomocí literární rešerše prokázat, že plovoucí ostrovy jsou potřebné a že se významně podílejí na zlepšení kvality vody ve vodních rezervoárech. Zároveň jsem chtěla čtenáře blíže seznámit se samotnou problematikou plovoucích mokřadů i mokřadů obecně. Pro srovnání uvádím i další typy umělých mokřadů, zejména kořenové čistírny. Mým dalším cílem bylo nastínit faktory ovlivňující výkon plovoucích ostrovů. S tím souvisí technologie výstavby plovoucího mokřadu, které se věnuji v další kapitole. Popisuji tu nejen samotný podklad plovoucího ostrova, ale i vhodné rostliny pro jeho osázení a typy substrátu pro zakořenění makrofyt. Dále jsem se zaměřila na různé druhy znečištění, se kterými tyto systémy pomáhají bojovat.

3. Literární rešerše

3.1 Charakteristika mokřadů

3.1.1 Definice a význam mokřadů

Mitsch & Gosseling (2000) definují mokřad třemi složkami. A to přítomností vody, jedinečnými půdními podmínkami (které se liší od podmínek sousedních, výše položených ploch) a výskytem mokřadních rostlin. Podle Ramsarské úmluvy jsou mokřadem území bažin, slatin, rašelinišť i území pokrytá vodou, přirozená i umělá, trvalá nebo dočasná, s vodou stojatou či tekoucí, sladkou, brakickou nebo slanou, zahrnující i území s mořskou vodou, jejíž hloubka při odlivu nepřesahuje šest metrů (Ramsar Convention Bureau 1997).

Funkční mokřady patří mezi naše nejproduktivnější prostředí a poskytují nám mnoho benefitů. V mokřadech žije nebo se rozmnožuje 40 % všech druhů, proto mokřady podporují biologickou rozmanitost. Toto prostředí je také zásadní pro zmírnění změny klimatu, neboť mokřady ukládají 30 % uhlíku. Dále se tu odstraňují znečišťující látky z prostředí, mokřady poskytují ochranu před povodněmi a bouřkami, absorbují a zadržují vodu. Mokřady také poskytují zaměstnání, potravu a energii. Mokřady jsou místem pro rekreaci, kulturu a volný čas (Teagasc 2021).

Ramsarská úmluva je úmluva o mokřadech, jež mají mezinárodní význam hlavně jako biotopy vodního ptactva. Úmluva byla vytvořena v roce 1971 pro zajištění celosvětové ochrany a ohleduplného užívání všech typů mokřadů. ČSFR k ní přistoupila 2. července 1990. Po svém rozpadu sukcedovala ČSFR ČR jako nástupnický stát do závazků plynoucích z Úmluvy dne 1. ledna 1993 (č. 396/1990 Sb.). Každá smluvní strana Ramsarské úmluvy musí zařadit alespoň jeden ze svých mokřadů na „Seznam mokřadů mezinárodního významu“ (tzv. List of Wetlands of International Importance) a postarat se o odpovídající ochranu a rozumné užívání mokřadů na svém území. Česká republika má na seznamu zapsáno celkem 14 mokřadů mezinárodního významu (MZE 2022).

V podmínkách České republiky se mokřadem rozumí hlavně rašeliniště a slatiniště, rybníky a jejich soustavy, lužní lesy, nivy řek, mrtvá ramena, tůňe, zaplavované a mokré louky, rákosiny, ostřicové louky, prameny, prameniště, toky s jejich úseky, další vodní a bažinné biotopy, údolní nádrže, zatopené lomy, šterkovny, písčkovny, horská jezera a slaniska (MZE 2022).

Definice krajinného prvku „mokřad“ dle nařízení vlády č. 307/2014 Sb., o stanovení podrobností evidence využití půdy podle uživatelských vztahů, zní: „Mokřadem se rozumí samostatný útvar neliniového typu s minimální výměrou 100 m², sloužící k zajištění retence vody v krajině s cílem udržovat přirozené podmínky pro život vodních a mokřadních ekosystémů podle § 2 odst. 2 písm. i) zákona č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny. Krajinný prvek mokřad může být evidován na ploše půdního bloku podle § 3a odst. 9 písm. a) a § 3a odst. 10 zákona o zemědělství“ (Routová 2016).

3.1.2 Rozdělení mokřadů

Existuje velká nejednotnost v rozdělení mokřadů na jednotlivé kategorie. Kategorizace byla provedena jednotlivými vědci i vědeckými ústavy, nedošlo ovšem ke shodě. Všechny země, které nemají národní inventář mokřadů, by ho měly provést pomocí metod, které umožní porovnat inventarizaci v dalších zemích. Vodítkem by měla být definice podle Ramsarské úmluvy (Finlayson & Spiers 1999).

Ramsarská úmluva dělí mokřady na mořské, příbřežní, vnitrozemské a vzniklé antropogenní činností (Ramsar Convention Bureau 1997).

Podle této úmluvy byla vytvořena klasifikace mokřadů vyskytujících se v České republice. Mokřady byly rozděleny na antropogenní a umělé. Vzniklo šest skupin antropogenních a deset skupin přirozených mokřadů. Mezi přirozené mokřady se řadí rákosina, ostřicová louka, rašeliniště, slatiniště, horské jezero, slanisko, pramen, prameniště, tok, úsek toku, nivní jezero, mrtvé rameno, lužní les, olšina, zaplavovaná či mokrá louka, jiné vodní a bažinné biotopy. Umělým mokřadem je lom, šterkovna, písčkovna, údolní nádrž, soustava rybníků, rybník, průmyslová odkalovací

nádrž, kanál, stoka, příkop (Jindra 2020).

3.1.3 Mokřady jako anaerobní prostředí

V mokřadech jsou kořeny rostlin vystaveny prostředí s nízkou dostupností kyslíku (tzv. anaerobní prostředí). Tomu je uzpůsobena i stavba těla bahenních rostlin. Aby byly kořeny zásobovány dostatečným množstvím kyslíku pro dýchání, vytváří většina mokřadních rostlin ve svých tělech rozšířené dutiny naplněné plynem. Transport kyslíku může být buď difúzní nebo konvektivní. Dosud byly identifikovány především tři samostatné mechanismy konvekce, a to konvekce vyvolaná vlhkostí, tepelná osmóza a Venturiho konvekce. Konvekce vyvolaná vlhkostí je řízena rozdílem tlaku par mezi nasycenou plynnou fází mezibuněčných buněk listů a mikroprostředím. U tepelné osmózy jde o hmotnostní tok plynu do listu poháněný přenosem tepla v opačném směru. Venturiho konvekce je tok plynu iniciovaný nasáváním vzduchu do kořenového systému skrze otvory zbylé po ulomených suchých stoncích (např. u rákosu). Tento mechanismus je spouštěn větrem, který proudí nad stébly (Wegner 2010).

Sasser et al. (1991) uvádějí trvale nízké koncentrace rozpuštěného kyslíku pod plovoucími mokřady. To by ukazovalo na to, že hustá pokrývka plovoucích ostrovů na vodní hladině bude napomáhat vytváření anaerobních podmínek ve vodním sloupci. Tam kde zůstala volná hladina, byla ve vodním sloupci hladina kyslíku vyšší. Je to způsobeno tím, že kryt z plovoucí vegetace poskytuje bariéru proti provzdušňování větrem, zamezuje difúzi vzduchu přes rozhraní vzduch – voda a redukuje fotosyntetické řasy. Rozklad organické hmoty pocházející z plovoucí vegetační rohože také působí na deoxygenaci vodního sloupce.

Čistící procesy v mokřadních systémech souvisejí s koncentrací rozpuštěného kyslíku. Jeho nízké koncentrace pozitivně působí na denitrifikaci a na tvorbu sulfidů kovů. Prostředí s nízkou dostupností kyslíku není naopak vhodné pro optimální vývoj kořenového systému makrofyt rostoucích na plovoucích ostrovech. Po provedení výzkumů přinášejících tyto poznatky bylo mnoho umělých plovoucích mokřadů vybaveno provzdušňovacím systémem u dna nádrží. Dostatečné množství rozpuštěného kyslíku ve vodě je potřebné k rozkladu organické hmoty a k

nitrifikačním procesům (Headley & Tanner 2006).

3.2 Umělé typy mokřadů pro čištění odpadních vod

Na počátku 50. let 20. století proběhly v Německu první pokusy s čištěním odpadních vod za pomoci mokřadních makrofyt. Od té doby se systém uměle vytvořených mokřadů vyvinul ve spolehlivou technologii čištění odpadních vod. Jejich využití je celosvětové a vhodné pro různé druhy odpadních vod. Klasifikace uměle vytvořených mokřadů je založena jak na typu vegetace, tak na hydrologii. Umělé mokřady jsou navrženy a zbudovány tak, aby využívaly přirozené procesy zahrnující mokřadní vegetaci, půdu a související mikrobiální společenství, která pomáhají při čištění odpadních vod. Využívají výhod procesů, které se vyskytují v přírodních mokřadech, ale činí tak v kontrolovanějším prostředí (Vymazal 2010).

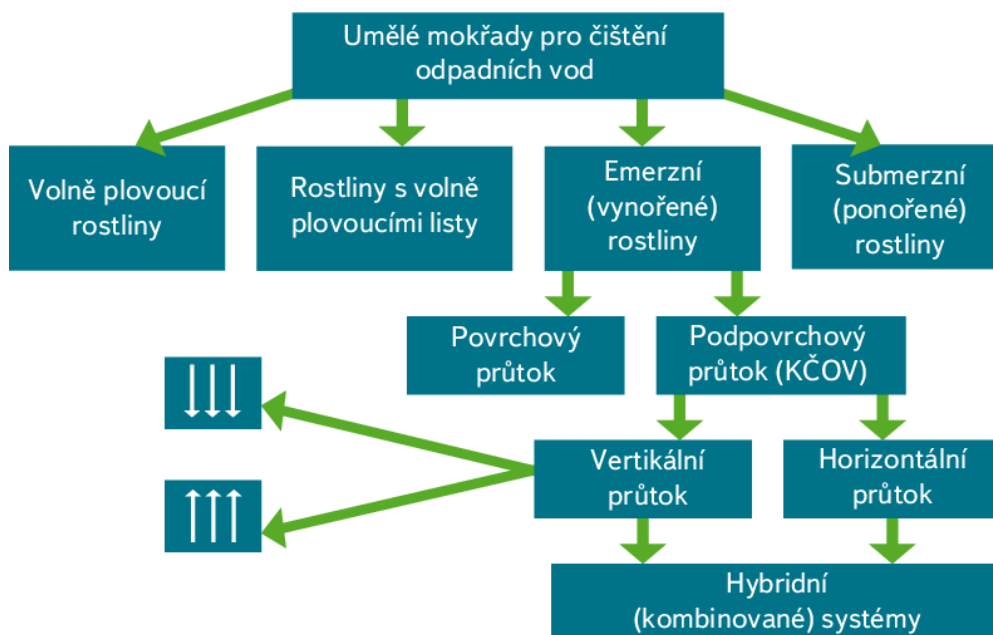
Umělé mokřady se vyskytují v různých technologických úpravách po celém světě. Mají však své limity při odstraňování znečištění a také mají určité nároky, hlavně co se týče plochy a údržby (Rozkošný 2013). Zároveň má použití těchto systémů i několik výhod, jako jsou nízké stavební a provozní náklady (Masoud et al. 2022).

Různé typy umělých mokřadů se liší svými hlavními konstrukčními charakteristikami a také procesy, které jsou zodpovědné za odstraňování znečištění (Vymazal 2010). Umělé mokřady využívané pro čištění vod lze rozdělit podle typu použité vegetace. Jedná se o volně plovoucí rostliny, rostliny s volně plovoucími listy, submerzní (ponořené) rostliny a emerzní (vynořené) rostliny (Rozkošný 2013).

Umělé mokřady lze dále rozdělit do dvou hlavních kategorií podle toku vody – umělé mokřady s povrchovým tokem a s podpovrchovým tokem. Mokřady s podpovrchovým tokem (SF) lze dále rozdělit na mokřady s horizontálním prouděním (HF) a vertikálním prouděním (VF), v závislosti na směru průtoku vody. Mokřady s volnými vodními plochami (FWS) jsou známy jako mokřady s povrchovým tokem. Umělé mokřady s povrchovým tokem jsou hustě porostlé jednotky, ve kterých voda proudí nad médiem, v mokřadech s podpovrchovým tokem se hladina vody udržuje pod povrchem porézního média jako je písek, štěrk, zemina, nebo jiný materiál

(Masoud et al. 2022). Schéma základního rozdělení jednotlivých typů umělých mokřadů je znázorněno na obr. 1.

Obr. 1.: Základní rozdělení jednotlivých typů umělých mokřadů



Zdroj: Vymazal (2004)

Pro určitou situaci se hodí určitý typ umělých mokřadů. Pro čištění vod z difúzních zdrojů, které nejsou mikrobiálně zatížené, se dají využít mokřady s otevřenou vodní hladinou. Mokřady s trvale zaplaveným filtračním prostředím s podpovrchovým prouděním najdou své využití pro odstranění organického a mikrobiálního znečištění, pro denitrifikaci, částečně mohou odstraňovat i fosfor. Mokřady s pulsním plněním se mohou použít pro čištění odpadních vod, a to i pro nitrifikaci amoniakálního dusíku (Rozkošný 2013).

V praxi tedy umělé mokřady najdou uplatnění při čištění splaškových odpadních vod z míst o velikosti maximálně 2000 EO (ekvivalentních obyvatel). Těmi jsou samostatně stojící domy, skupiny domů, hotely, rekreační a restauračních zařízení, letní tábory, menší obce a jejich části. Mohou se použít i pro čištění průmyslových vod z potravinářského průmyslu, malých dílen, z menších průmyslových závodů, pro čištění průsakové vody ze skládek komunálního odpadu, méně znečištěných zemědělských odpadních vod, znečištěných srážkových vod,

povrchových vod a dočištění odpadních vod. Možnost použití u průmyslových vod je závislá na jejich složení. V České republice se pro čištění odpadních vod používají tzv. kořenové čistírny. Ty mají dvě části – jednotku mechanického předčištění a kořenový filtr. Tento filtr je buď s horizontálním podpovrchovým prouděním, nebo s vertikálním prouděním a jedná se vlastně o umělý mokřad. Mezi umělé mokřady můžeme dále zařadit stabilizační nádrže, pokud jsou realizovány s litorálními zónami. Revitalizací říční sítě vznikají umělé mokřady přinášející zvýšení biodiverzity nebo snížení znečištění z difúzních zdrojů. Mezi umělé mokřady lze zařadit i různé akvakultury, které se v současnosti používají například pro čištění vodního sloupce koupališť (Rozkošný 2013).

3.2.1 Umělé mokřady s volnou vodní plochou

Typický umělý mokřad s volnou vodní plochou (zkratka FWS CW, z anglického výrazu Free Water Surface Constructed Wetlands) s emergentními makrofyty vypadá jako mělká uzavřená jáma nebo řada jam, které obsahují 20–30 cm půdy pro zakořenění. Jsou hluboké 20 až 40 cm. Hustá emergentní vegetace většinou pokrývá více než 50 % povrchu. Nachází se zde jak vysazená makrofyta, tak i přirozeně se vyskytující původní druhy rostlin. Vegetace se většinou nekosí a ponechaná rostlinná hmota je zdrojem uhlíku, který je nezbytný pro denitrifikaci. Denitrifikace potom může probíhat v anaerobních kapsách ve spodní vrstvě vegetace. FWS CW jsou účinné při odstraňování organických látek prostřednictvím mikrobiální degradace a usazování koloidních částic, kdy hustá vegetace funguje jako filtr. Odstranění dusíku probíhá nitrifikací (ve vodním sloupci) a následnou denitrifikací (ve vrstvě podkladu) a odpařováním amoniaku při vyšších hodnotách pH, na které má vliv fotosyntéza řas. Retence fosforu je obvykle nízká kvůli omezenému kontaktu vody s částicemi půdy. Příjem fosforu makrofyty umožní pouze jeho dočasné skladování v rostlinných tělech, protože živiny se po rozpadu rostliny uvolňují do vody (Vymazal 2010).

FWS CW jsou účinné při odstraňování patogenních mikroorganismů. Tato účinnost má ale extrémní variabilitu, způsobenou složitou kombinací fyzikálních, chemických a biologických procesů, které ovlivňují mechanismy odstraňování. Těžké

kovy tu mohou být odstraněny rostlinným příjmem, fyzikálně-chemickými interakcemi se zemí nebo tvorbou komplexů a výsledným srážením (Gorgoglione & Torretta 2018).

V umělých mokřadech s volnou vodní plochou se používají běžné bahenní druhy rostlin, jako je skřípina (*Scirpus* sp.), bahnička (*Eleocharis* sp.), šáchor (*Cyperus* sp.), zblochan vodní (*Glyceria maxima*), sítina (*Juncus* sp.), rákos obecný (*Phragmites australis*), chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*) a orobinec (*Typha* sp.). Většina FWS CW používá jeden druh rostlin nebo kombinaci povrchového druhu s ponořenými druhy (Gorgoglione & Torretta 2018).

Umělé mokřady s volnou vodní plochou se budují hlavně v Severní Americe a v Austrálii. V Evropě se tento systém začal více používat ve Švédsku a v Dánsku. Zde se tato technologie používá k eliminaci dusíku z difúzního znečištění. Pro odstranění fosforu se tato metoda nejeví jako příliš účinná (Vymazal 2010).

3.2.2 Umělé mokřady s horizontálním podpovrchovým tokem

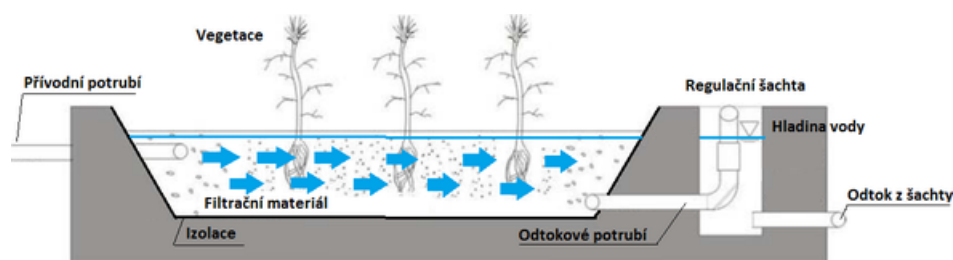
Umělé mokřady s horizontálním podpovrchovým tokem (zkratka HF CW z anglického výrazu Horizontal Flow Constructed Wetlands) byly vyvinuty v 50. letech 20. století v Německu Käthe Seidelovou, která navrhla HF CW s použitím hrubých materiálů jako kořenového média. V 90. letech se tento systém rozšířil do většiny zemí Evropy a také do Severní Ameriky, Austrálie, Asie a Afriky. Koncem 80. let byl půdní materiál nahrazen hrubým materiálem (Vymazal 2010).

HF CW se skládají ze štěrkových nebo skalních lůžek utěsněných nepropustnou vrstvou a osázených mokřadní vegetací (Vymazal 2010). Schéma HF CW je na obrázku 2.

V umělých mokřadech s horizontálním prouděním je odpadní voda přiváděna ke vstupní zóně, obvykle gravitací, a protéká vodorovně přes porézní filtrační médium bez kontaktu s atmosférou, dokud nedosáhne výstupní zóny. Filtrace probíhá přes drobný, kulatý, rovnoměrně velký štěrk o průměru 5–20 mm. Aby se předešlo ucpání mokřadu, je nutná předúprava k oddělení pevných materiálů, mastnoty nebo olejů od kapaliny (Meyer et al. 2012).

Role rostlin v HF CW spočívá zejména v poskytování podkladu pro růst přichycených bakterií (hlavně na kořenech a oddencích), redukce kyslíku (difúze kyslíku z kořenů do rhizosféry), příjem živin a izolace povrchu umělého mokřadu od chladu (Masoud et al. 2022).

Obr. 2.: Schéma HF CW



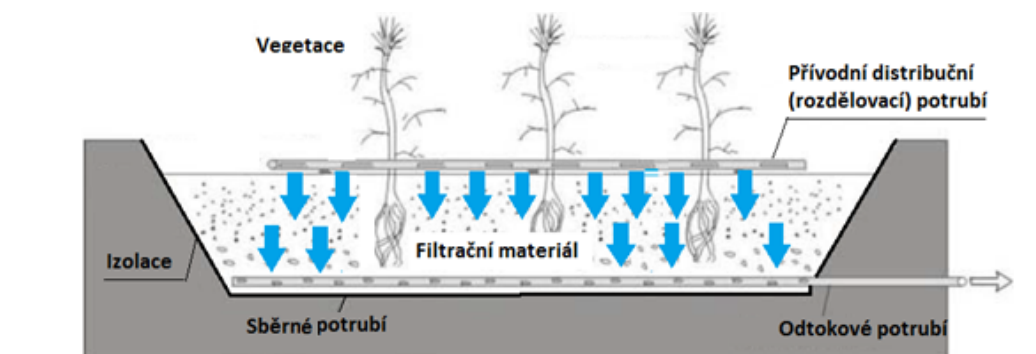
Zdroj: Pumprlová & Křiška (2020)

3.2.3 Umělé mokřady s vertikálním podpovrchovým tokem

Umělé vertikální průtokové mokřady (zkratka VF CW z anglického výrazu Vertical Flow Constructed Wetlands) byly původně zavedeny společností Seidel k okysličování odpadních vod z anaerobních septiků. VF CW se však nerozšířily tak rychle jako HF CW pravděpodobně kvůli vyšším nárokům na provoz a údržbu. Voda je přiváděna ve velkých dávkách, poté prosakuje dolů pískovým médiem. Nová várka se přivádí až poté, co veškerá voda prosákne a lože je bez vody. To umožňuje difúzi kyslíku ze vzduchu do podloží (Vymazal 2010). Schéma VF CW je znázorněno na následujícím obrázku.

Účinnost zpracování a přijatelná míra organického zatížení silně závisí na zrnitosti použitého filtračního média. VF CW se používají, když je požadováno aerobní čištění odpadních vod (např. nitrifikace). Umělé vertikální průtokové mokřady se velmi často používají k čištění domovních a komunálních odpadních vod (Langergraber 2012).

Obr. 3.: Schéma VF CW



Zdroj: Pumprlová & Křiška (2020)

3.2.4 Hybridní umělé mokřady

Umělé mokřady je možné různě kombinovat za účelem dosažení vyššího efektu úpravy využitím výhod jednotlivých systémů. Umělé vertikální průtokové mokřady lze kombinovat s jiným systémem mokřadů, například s umělým mokřadem s horizontálním podpovrchovým tokem nebo s mokřadem s volnou povrchovou vodou (Langergraber 2012).

Kombinovaný systém VF CW – HF CW původně navrhl Seidel již koncem 50. a začátkem 60. let, ale použití hybridních systémů bylo tehdy velmi omezené. Ve Francii a v Anglii byl vybudován tento systém hybridních mokřadů v 80. letech 20. století. V současnosti jsou hybridní mokřady v provozu v mnoha zemích světa a využívají se zejména tam, kde je požadováno odstranění dusíku. Kromě odpadních vod se hybridní mokřady používají k čištění řady dalších odpadních vod, jako jsou výluhy ze skládek, kompostů, jatek, akvakultur a vinařství (Vymazal 2010).

3.2.5 Výhody a nevýhody umělých mokřadů

Umělé mokřady mají podle svého typu určité výhody i nevýhody jak v procesu čištění vod, tak i v nákladnosti na obsluhu, energii, výstavbu či prostor (Gorgoglione & Torretta 2018).

Umělé mokřady s horizontálním podpovrchovým tokem vykazují vysoký efekt čištění organických látek a nerozpuštěných látek. Organické sloučeniny jsou účinně degradovány především mikrobiální degradací za anaerobních podmínek, protože koncentrace rozpuštěného kyslíku ve filtračních ložích je velmi omezená. Suspendované pevné látky jsou zadržovány převážně filtrací a sedimentací a účinnost odstraňování je obvykle velmi vysoká. Hlavním mechanismem odstraňování dusíku z HF CW je denitrifikace. Odstraňování amoniaku je omezeno kvůli nedostatku kyslíku ve filtračním loži v důsledku trvalého podmáčení. Fosfor se odstraňuje především reakcemi výměny ligandů, kdy fosforečnan vytěsňuje vodu nebo hydroxyly z povrchu oxidů železa a hliníku. Pokud nejsou použity speciální materiály, je odstranění fosforu u těchto umělých mokřadů obvykle nízké (Vymazal 2010).

U HF CW jsou možné dlouhé vzdálenosti proudění, které umožňují vytvářet gradienty živin, kromě denitrifikace dochází i k nitrifikaci, vytváří se zde huminové kyseliny pro odstranění N a tyto systémy mají navíc delší životní cyklus. Mezi nevýhody tohoto systému patří větší nároky na plochu, nutnost pečlivého výpočtu hydrauliky potřebné pro optimální funkci, potřeba zajištění rovnoměrného zásobování kyslíkem a komplikované zásobování odpadními vodami (Gorgoglione & Torretta 2018).

U umělých vertikálních průtokových mokřadů se nová várka znečištěné vody přivádí až poté, co veškerá voda prosákne a lože je bez vody. To umožňuje difúzi kyslíku ze vzduchu do podloží. Díky tomu jsou VF CW daleko aerobnější než HF CW a poskytují vhodné podmínky pro nitrifikaci. Na druhou stranu umělé vertikální průtokové mokřady neposkytují žádnou denitrifikaci. VF CW jsou také velmi účinné při odstraňování organických látek a nerozpuštěných látek. Odstranění fosforu je nízké, pokud nejsou použita média s vysokou sorpční kapacitou (Vymazal 2010).

Jejich výhodou je, že oproti mokřadům s horizontálním podpovrchovým tokem ty s vertikálním tokem vyžadují méně půdy. Tyto systémy mají jednoduchou

hydrauliku. Existuje u nich nižší riziko ucpání ve srovnání s HF CW a jsou odolné vůči kolísání zatížení. Kromě toho také nezpůsobují problémy s rozmnožováním komárů (Langergraber 2012).

Mezi nevýhody umělých vertikálních průtokových mokřadů patří nutnost přerušovaně čerpat odpadní vody na povrch mokřadů (Langergraber 2012). Také jejich návrh a výstavba jsou složitější než u mokřadů s horizontálním podpovrchovým tokem (Pumprlová & Kriška 2020). Tento systém má krátké průtokové vzdálenosti (Gorgoglione & Torretta 2018).

Mezi výhody umělých mokřadů s volnou vodní plochou patří minimální mechanické a energetické nároky a malá potřeba kvalifikované obsluhy, významné odstranění dusíku a fosforu při výrazně delším zadržení, přiměřená doba zadržení kovu a organického materiálu. Mezi nevýhody tohoto systému patří vyšší nároky na plochu, špatná nitrifikace v důsledku anaerobního prostředí a problémy s výskytem komárů. Pro odstranění fosforu také není tato metoda příliš účinná (Gorgoglione & Torretta 2018).

3.2.6. Využití umělých mokřadů

Primární využití umělých mokřadů je čištění odpadních vod. Mají ale i další využití. Zadržují vodu, v létě ochlazují své okolí výparem vody, mají estetickou funkci (Ministerstvo životního prostředí 2019).

Kořenové čističky (KČOV) se využívají k čištění odpadních vod s obsahem organických i anorganických látek a vod s mikrobiálním zatížením. Jsou vhodné pro čištění odpadních vod v oblastech, kde by bylo finančně náročné budovat kanalizace do centrálních čistíren. Pro kořenové čističky je ale nutné zajistit vhodný terén a dostatečný prostor. Vhodné jsou pro obce, které mají maximálně 2000 obyvatel, pro izolovaná místa, rekreační objekty, domy s vhodnými pozemky, ale své uplatnění najdou i ve vhodně velkých kancelářských provozech nebo v bytových domech na okraji zástavby. Plocha kořenové čističky na jednoho obyvatele činí minimálně 5 m² pro mokřady HF a pro mokřady VF činí plocha minimálně 3-4 m².

3.2.7 Účinnost umělých mokřadů

Účinnost umělých mokřadů je závislá na více faktorech jako je teplota, srážky, vlhkost, doba zdržení, zeměpisná šířka a nadmořská výška. Zeměpisná šířka a nadmořská výška rozhodují o délce vegetačního období. Všechny faktory společně pak mají vliv na biologické procesy, jako je růst rostlin a mikrobiologická aktivita (Polák 2011).

Ukazatele znečištění odpadních vod charakterizují možné dopady vypouštění odpadních vod na kvalitu povrchových nebo podzemních vod. Mezi tyto ukazatele patří nerozpuštěné látky (NL), biochemická spotřeba kyslíku (BSK₅), chemická spotřeba kyslíku (CHSK), celkový dusík, celkový fosfor, amoniakální dusík (N-NH₄⁺). Nerozpuštěné látky lze potom rozdělit na ty, které se usazují a ty, které se neusazují. Jedná se o anorganické i o organické látky. Pro hodnocení BSK₅ je určující spotřeba kyslíku, kterou mikroorganismy ve vzorku dané odpadní vody odeberou za 5 dnů, aniž by přitom byl kyslík do vody dodáván. CHSK popisuje možné nebezpečí, které může nastat, když znečištění z odpadních vod váže kyslík chemickými reakcemi a narušuje tak jeho rovnováhu v biotopu. Na CHSK i na BSK₅ se mohou podílet jak NL, tak i rozpuštěné látky (RL). Jedná se o látky rozpuštěné ve vodě. Celkový dusík a celkový fosfor patří mezi živiny. Tyto prvky stimulují biochemické procesy a tvorbu buněčné hmoty, čímž se podílejí na množení mikroorganismů. Po jejich namnožení vzroste v biotopu spotřeba kyslíku. Po vyčerpání živin nebo kyslíku biomasa odumírá, čímž vzniká druhotné organické znečištění. Amoniakální dusík je první formou v řetězci rozkladu organických dusíkatých látek. Jeho vyšší koncentrace upozorňuje na možný vznik anaerobních procesů. Díky tomu může omezit další biochemické procesy, nebo je může i zrušit. Hlavně u průmyslových vod se kromě výše uvedených používají i další ukazatele jako je např. rozpuštěný kyslík a nebezpečné látky (Jágllová & Šnajdr 2009).

Umělé mokřady se používají i pro pročištění vody pocházející ze zemědělství. Efektivitu umělého mokřadu ovlivňuje doba zdržení. Proto by měl mít jeho uživatel možnost regulovat velikost přítoku do mokřadu. Dostatečné doby zdržení lze dosáhnout vhodným uspořádáním, tvarem mokřadu a jeho velikostí. Pro prodloužení cesty odtoku je doporučeno umístit přítok a odtok diagonálně v místech, kde je

dostatečný prostor na to vybudovat v mokřadu překážky zpomalující průtok vody skrz něj. Mezi tyto překážky patří kanály, příkopy nebo meandry. Zpomalení průtoku prodlouží dobu kontaktu rozpuštěných znečišťujících látek s rostlinou a se substrátem, což zvýší šanci na jeho odbourávání. Dobu zdržení lze také zvýšit vhodnou velikostí mokřadu. Pro odbourávání pesticidů se doporučuje mokřad o objemu 76 m³ na 1 ha odvodněné plochy. Maximální hloubka se doporučuje 0,8 m. Umělý mokřad by neměl být v krajině umisťován samostatně, ale měl by být jedním z opatření v multifunkčním systému zvyšujícím ekologickou stabilitu zemědělské krajiny (Tournebize et al. 2017).

Podle Bulce (2006) je účinnost kořenových čistíren odpadních vod (KČOV) je závislá na teplotě, srážkách, vlhkosti, době zdržení, zeměpisné šířce a nadmořské výšce. Tyto faktory ovlivňují délku vegetačního období, což dále ovlivňuje růst mokřadních rostlin a mikrobiologickou aktivitu. Účinnost KČOV podle jednotlivých parametrů je uvedena v tabulce 1.

Tab 1.: Účinnost kořenových čistíren v ČR (n = počet ročních průměrů, N = počet KČOV použitých pro analýzu dat)

Parametr	Přítok (mg l ⁻¹)	Odtok (mg l ⁻¹) ¹⁾	Účinnost (%)	n	N
BSK ₅	150	14,4	85,8	184	65
CHSK _{Cr}	333	53	76,1	109	40
NL	165	11,9	84,8	125	44
Celkový N	56	27,6	47,0	37	16
NH ₄ ⁺ - N	27,5	18,0	33,4	77	31
NO ₃ - N	5,8	2,45	40,9	31	12
Celkový P	6,8	3,3	41,4	68	26

Zdroj: Vymazal (2004)

3.2.8 Procesy podílející se na odstranění znečištění v umělých mokřadech

Umělé čistící mokřady se během posledních pěti desetiletí vyvinuly ve spolehlivou technologii čištění, kterou lze použít pro všechny typy odpadních vod včetně splaškových, průmyslových a zemědělských, výluhů ze skládek a srážkových vod. Znečištění se odstraňuje pomocí procesů, které jsou běžné v přirozených mokřadech, ale ve vybudovaných mokřadech tyto procesy probíhají za více kontrolovaných podmínek. Všechny typy vybudovaných mokřadů jsou velmi účinné při odstraňování organických látek a nerozpuštěných látek, zatímco odstraňování dusíku je nižší, ale mohlo by být zvýšeno použitím kombinace různých typů umělých mokřadů (Vymazal 2010).

3.2.8.1 Koloběh dusíku

Dusík je základní živinou pro rostliny a zvířata, ale jeho nadměrné hromadění zejména ve vodních útvarech má nežádoucí ekologické a ekonomické následky. Efektivní hospodaření s živinami, ať už se jedná o snížení nebo zvýšení jejich obsahu v prostředí, vyžaduje pracovní znalost koloběhu živin mezi živými a neživými složkami ekosystému (DeBusk 1999).

Koloběh dusíku se skládá z několika procesů, které vedou k odstraňování dusíku z odpadní vody. Jedním z nich je odpařování amoniaku. Mezi další procesy patří amonifikace (mineralizace), nitrifikace, nitrát – amonifikace, denitrifikace, fixace, rostlinný příjem, asimilace a adsorpce (Vymazal 2016).

Při amonifikaci se organický dusík transformuje na amoniak. K tomuto procesu dochází během rozkladu organického materiálu (Gardavská 2013). Na tomto procesu se podílí řada biochemických procesů, při kterých se uvolňuje energie. Amonifikace probíhá za aerobních, i anaerobních podmínek, v aerobním prostředí je průběh rychlejší. Amonifikace je kineticky mnohem rychlejší než nitrifikace (Vymazal 2016). Cyklus dusíku v mokřadních systémech je znázorněn na následujícím obrázku (obr. 4.).

Nitrifikace je oxidace amoniaku na nitrát. K tomuto procesu je nutná

přítomnost autotrofních bakterií, které jsou zcela závislé na energii získané z tohoto procesu. Nitrifikace probíhá za přísně aerobních podmínek (Gardavská 2013). Přívod vzduchu by mohl být používán jako jednoduchá a účinná metoda pro zvýšení nitrifikace (Yuhui et al. 2021).

Nitrát – amonifikace je proces redukce dusičnanů na molekulární dusík a amoniak. Redukce dusičnanů je uskutečňována dvěma skupinami bakterií redukujících nitrát. Denitrifikační bakterie tvoří N_2O a N_2 jako hlavní redukční produkty, nitrát – amonifikační bakterie vytvářejí NH_4^+ jako hlavní konečný produkt dusičnanové redukce. Po odčerpání kyslíku je nitrát – amonifikace první anaerobní proces (Vymazal 2016).

Denitrifikace je mikrobiální konverze (např *Pseudomonas* spp.) při které jsou nitráty (NO_3^-) redukovány na plynný dusík (N_2) přes dusitany (NO_2^-), oxid dusnatý (NO) a oxid dusný (N_2O), což jsou meziprodukty. Tyto rozpuštěné plyny jsou uvolňovány do atmosféry, čímž se snižuje obsah dusíkatého znečištění v čištěné vodě (DeBusk 1999).

Odpařování amoniaku při vysokém pH je založeno na tom, že neionizovaný amoniak (NH_3) je těkavý a může být uvolňován do atmosféry z rozpuštěné formy odpařováním. V celkovém objemu mokřadního dusíku je jeho neionizovaná forma zastoupena asi 1 % (Gardavská 2013).

Fixace dusíku je proces, při kterém se N_2 uvolňuje do atmosféry, rozpouští se a je redukován na amoniak. Biologická fixace dusíku je proces adaptace u bakterií, zelených řas a mokřadních rostlin. Ty jsou pak schopné fixovat dusík, což je důležité v prostředí, které je na něj chudé. V mokřadních systémech se tato adaptace často nevyskytuje, neboť mokřad je schopen využívat dusík lépe v jiných procesech (Gardavská 2013).

Při asimilaci dusíku dochází k přeměně anorganických forem dusíku na organické sloučeniny. Ty pak slouží pro stavbu těl rostlin. Nejčastěji se pro asimilaci využívá amoniak a dusičnany. Amoniak je energeticky více redukována forma než dusičnan, proto je jako zdroj dusíku využíván přednostně. Amoniak se snadno zabuduje do aminokyselin, zatímco dusičnany se musí nejprve zredukovat na využitelnou formu. V oblastech mírného pásma jsou živiny včetně dusíku přijímány hlavně ve vegetačním období na jaře a v létě. Pokud dojde ke sklizni biomasy, odstraní

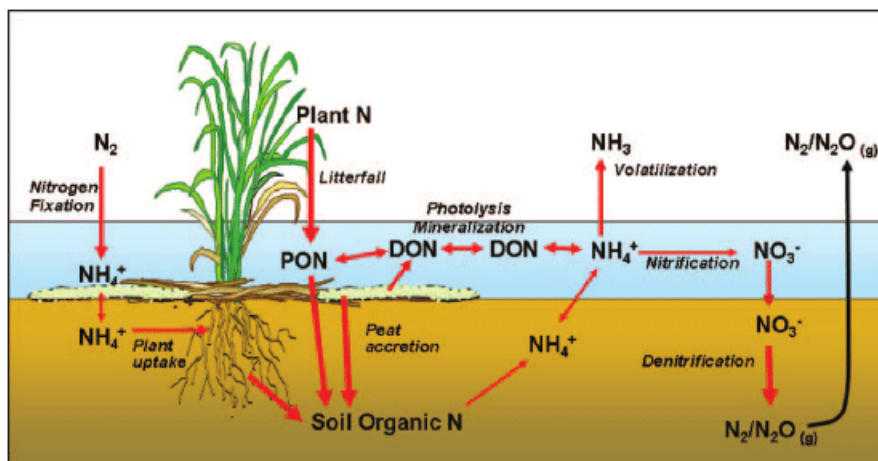
se část dusíku. Toto množství je ve srovnání s ročním zatížením čistírny malé (maximálně 10 %). Maximální koncentrace živin včetně dusíku lze u mokřadních rostlin pozorovat na začátku vegetačního období. V České republice se jedná o měsíce duben a květen. Maximální objem biomasy se naopak objevuje většinou v období před nástupem květu. U chrastice rákosovité je to v našich podmínkách druhá polovina července, u rákosu obecného konec srpna a začátek září. Hlavně na biomase záleží, jaké bude celkové množství kumulovaného dusíku. V podmínkách České republiky se kumulace dusíku pro rákos a chrastici pohybuje v rozmezí 30-50 g N /m². Chrastice snáší i několikanásobnou sklizeň během sezóny. Oproti tomu rákos kosení nesnáší. Navíc, na rozdíl od chrastice, nedokáže po sečení vytvořit dostatečnou biomasu pro zateplení mokřadu (Vymazal 2016).

Při difúzi mohou být rozpuštěné formy dusíku přeneseny z povrchové vody do půdního roztoku a naopak, prostřednictvím procesu difúze. Hnací síla difúze je koncentrační gradient. Rozpuštěná sloučenina v půdě nebo ve vodě difunduje z oblasti s vysokou koncentrací do oblasti s nižší koncentrací (DeBusk 1999).

Při adsorpci dochází k retenci dusíku v půdě díky procesu výměny kationtů (DeBusk 1999).

Adsorbované amonné ionty jsou vázány jen lehce. Proto se mohou uvolnit zpět do vodního prostředí snadno, pokud se změní chemické vlastnosti prostředí (Vymazal 2016).

Obr. 4.: Schéma cyklu dusíku v mokřadních systémech (PON = organický dusík ve formě částic, DON = rozpuštěný organický dusík)



Zdroj: Reddy & DeLaune (2008)

3.2.8.2 Koloběh fosforu

Fosfor (P) je často klíčovou živinou, která je limitující jak v ústí řek, tak ve sladkovodních ekosystémech. Schopnost mokřadů a toků zadržovat fosfor je klíčová pro určení kvality spodní vody. V mokřadech se fosfor vyskytuje v organické i v anorganické formě. Anorganické sloučeniny fosforu jsou spojeny s amorfními a krystalickými formami Fe, Al, Ca a dalšími prvky. Organické formy fosforu jsou obecně spojeny s živými organismy a sestávají ze snadno rozložitelných sloučenin fosforu (nukleové kyseliny, fosfolipidy a fosfáty cukrů) a pomalu rozložitelných organických sloučenin fosforu. Rozpuštěný anorganický fosfor je považován za biologicky dostupný, zatímco organická forma fosforu musí projít transformací na anorganické formy, aby se stala za biologicky dostupnou. Někteří vědci navrhnou rozdělení fosforu na tři frakce podle velikosti. Toto rozdělení sice pomůže definovat sedimentaci, transportovatelnost a reaktivitu, ale nemusí být schopno určit biologickou dostupnost a chemii fosforu (Reddy et al. 1999).

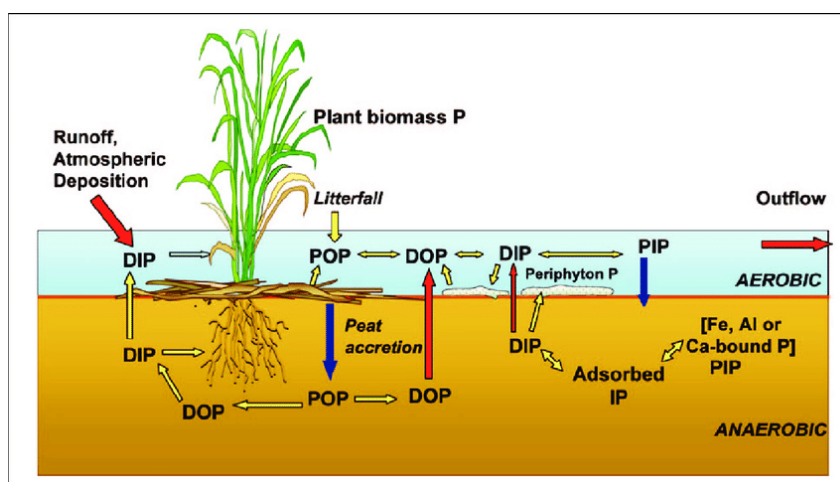
Mezi procesy, které napomáhají přeměnám fosforu v mokřadech řadíme: adsorpci, desorpci, mineralizaci a sedimentaci. Množství fosforu, které se v mokřadech dostane z vody, je závislé hlavně na sorpci substrátu, druhu makrofyty, době zdržení a míře zatížení vody (Jamieson et al. 2001).

Cyklus fosforu v půdě se naprosto liší od koloběhu dusíku. Fyzikálně – chemické procesy hrají největší roli v zadržování fosforu v mokřadech. Jedná se hlavně o adsorpci a srážení s přítomnými ionty vápníku, železa a hliníku. Množství přítomného iontu a pH ovlivňují uplatnění jednotlivých prvků. Mikrobiální společenstva přijímají fosfor velmi rychle, ale celkové množství takto využitého fosforu je velmi malé. Fosfor, který je z odpadní vody odstraněn tímto procesem, se po odumření mikroorganismů velmi rychle vrací zpět do systému mokřadů. Běžné filtrační materiály mají velmi omezenou sorpční kapacitu. Pro lepší odstraňování fosforu z umělých mokřadů je nutné místo štěrku a kameniva použít materiál s dobrými sorpčními vlastnostmi. Mezi vhodné materiály patří kalcit, apatit, zeolity a dále i různé odpadní materiály, jako jsou strusky z vysokých pecí. Sorpční kapacita všech filtračních materiálů je omezená, proto je nutné náplň filtračního lože po čase vyměnit. Část fosforu, maximálně však 5 %, z celkového ročního zatížení čistírny lze odstranit sklízením nadzemní biomasy (Vymazal 2016). Cyklus fosforu v mokřadních systémech je znázorněn na následujícím obrázku (obr. 5.).

Vegetace v mokřadech hraje významnou roli při asimilaci a ukládání fosforu. Plovoucí makrofyta se obvykle vyskytují v oblastech s hlubokou vodou a absorbují fosfor přímo z vodního sloupce. Kvůli rychlému obratu je skladování fosforu krátkodobé a velká část fosforu se po vegetativním rozkladu uvolňuje zpět do vody. Emergentní makrofyta mají rozsáhlou síť kořenů a oddenků a mají velký potenciál pro ukládání fosforu. Také mají více podpůrné tkáně než plovoucí makrofyta a vysoký poměr podzemní biomasy (tj. kořeny a oddenky) k nadzemní biomase (tj. stonek a listy), poskytující ideální anatomické struktury pro uložení fosforu. Makrofyta sice účinně ukládají fosfor, ale velmi málo ho je těmito rostlinami přímo asimilováno z vodního sloupce. Čistý účinek vegetace na retenci fosforu závisí na typu vegetace, poměru kořenů a výhonků, rychlosti obměny tkání, typu metabolických drah a fyzikálně-chemických vlastnostech vodního sloupce. Fosfor koluje mezi půdou, vodou a rostlinou. A to tak, že bylinná vegetace zakořeněná v půdě získává většinu potřebného fosforu z vody z půdních pórů a přemísťuje ho do nadzemní vegetace, aby podpořila aktivní vegetativní růst. Po dozrání a zestárnutí vegetace se podstatná část fosforu přítomného v nadzemní vegetaci přemísťuje do podzemní biomasy. V systémech bohatých na živiny je až 80 % fosforu uloženého v tkáni některých vodních makrofyt znovu uvolňováno do vodního sloupce buď počátečním vyluhováním, nebo v důsledku

rozkladu. Zbytkový rozdrobený materiál se ukládá na povrchu půdy a stává se nedílnou součástí půdy, čímž umožňuje dlouhodobé skladování. Krátkodobě však může rychlý obrát a cyklování přidat biologicky dostupný fosfor do vodního sloupce a ovlivnit kvalitu vody. Z vodního sloupce se fosfor ztrácí hlavně díky usazování částic na sedimentech (Reddy et al. 1999).

Obr. 5.: Schéma cyklu fosforu v mokřadních systémech (POP = částicový organický fosfor, PIP = částicový anorganický fosfor, DIP = rozpuštěný anorganický fosfor, DOP = rozpuštěný organický fosfor, Al = hliník, Fe = železo, Ca = vápník)



Zdroj: Reddy & DeLaune (2008)

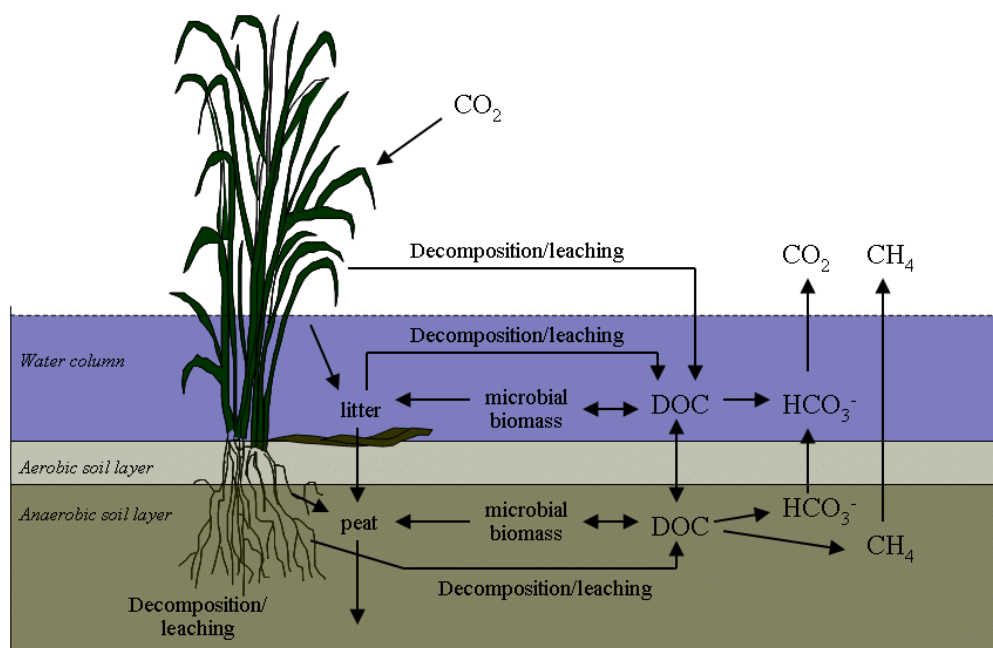
3.2.8.3 Koloběh uhlíku

Vnitrozemské vody zaujímají pouhé jedno procento povrchu Země. Přesto je jejich podíl na koloběhu uhlíku mnohem větší. Význam vnitrozemských vod je podceňovaný, neboť všechny současné modely počítají s těmito ekosystémy pouze jako s kanály odvádějícími uhlík z kontinentů do oceánů. Pravda je ale taková, že vnitrozemské vodní ekosystémy jsou dynamické, čímž významně zasahují do koloběhu uhlíku. Tyto ekosystémy mohou uhlík uchovat v sedimentech a později jej mohou opět vypustit do atmosféry (European Environment Agency 2021). Cyklus uhlíku v mokřadních systémech je znázorněn na následujícím obrázku (obr. 6.).

V periodicky zaplavovaných systémech mohou být emise metanu velmi

variabilní. Když jsou mokřady zaplaveny a vytvoří se anaerobní podmínky, může se produkovat metan. Když jsou tyto mokřady suché, mohou naopak metan pohlcovat. Pobřežní mokřady mohou mít nižší emise metanu než sladkovodní mokřady, neboť slanost inhibuje vznik metanu. Produkce oxidu dusného v nenarušených mokřadech je nízká v porovnání se suchozemským prostředím. Odvodnění a následná oxidace mokřadních půd může snížit produkci metanu a zvýšit ztráty organického uhlíku v sedimentech. Mokřady jsou zásadní pro zmírnění změny klimatu. Mají důležitou roli jak při ukládání uhlíku, tak při regulaci emisí skleníkových plynů (Australian Department of Sustainability, Environment 2012).

Obr. 6.: Schéma cyklu uhlíku v mokřadních systémech



Zdroj: DeBusk et al. (2001)

3.2.9 Účinnost odstraňování jednotlivých znečišťujících látek v určitých druzích mokřadů

Ve vodách, které procházejí čistícím procesem v kořenových čističkách, se

nacházejí různé znečišťující látky. Jednotlivé druhy umělých mokřadů se liší v účinnosti jejich vyčištění. V následujícím textu jsou uvedeny nejvíce odstraňované látky v odpadních vodách (Vymazal 2016).

3.2.9.1. Organické látky

Ve všech typech umělých mokřadů dochází k velkému odstraňování organických látek. V umělých mokřadech s volnou vodní plochou a s vertikálním podpovrchovým tokem jsou procesy mikrobiální degradace převážně aerobní, v umělých mokřadech s horizontálním podpovrchovým tokem převládají procesy anaerobní. Účinnost čištění je podobná u umělých mokřadů s volnou vodní plochou a s horizontálním podpovrchovým tokem. U mokřadů s vertikálním podpovrchovým tokem je procentuální účinnost vyšší v důsledku vyšších přítokových koncentrací (Vymazal 2010).

3.2.9.2 Nerozpuštěné látky

Odstraňování nerozpuštěných látek je velmi vysoké ve všech typech umělých mokřadů. V mokřadech s horizontálním průtokem jsou tyto látky odstraňovány velmi efektivně filtrací a sedimentací ve filtračním loži. Ihned po přítoku odpadní vody do filtračního lože dojde k největšímu záchytu nerozpuštěných látek. Při nedokonalém mechanickém předčištění to může vést k ucpávání filtračního lože. K ucpání filtračního lože docházelo hlavně v mokřadech, kde byly použity zeminy s vyšším obsahem jílovitých částic (Vymazal 2016).

3.2.9.3 Dusík

Těkavost může být významnou cestou pro odstranění dusíku ve vybudovaných mokřadech s otevřenou vodní hladinou, kde společenství řas mohou svou

fotosyntetickou aktivitou vytvářet vysoké hodnoty pH během dne. V umělých mokřadech s vertikálním prouděním probíhá velmi vysoká nitrifikace, ale kvůli zcela aerobním podmínkám ve vertikálním korytě neprobíhá žádná denitrifikace. Aby se dosáhlo efektivního odstranění celkového dusíku, mohly by být umělé mokřady s vertikálním podpovrchovým tokem kombinovány s umělými mokřady s horizontálním podpovrchovým tokem. Ty sice nenitrifikují, ale poskytují vhodné podmínky pro redukci dusičnanů vznikajících při nitrifikaci v mokřadech s vertikálním podpovrchovým tokem. Odstranění celkového dusíku je v důsledku nízké nitrifikace nízké ve vodou nasycených mokřadech s horizontálním podpovrchovým tokem a nízké nebo nulové v důsledku denitrifikace v umělých mokřadech s volnou vodní plochou a s vertikálním podpovrchovým tokem. V umělých mokřadech s volnou vodní plochou je dusík odstraňován nitrifikací v aerobním vodním sloupci a následnou denitrifikací v anaerobní vrstvě steliva na povrchu lože. (Vymazal 2010).

3.2.9.4 Fosfor

Retence fosforu je ve všech typech budovaných mokřadů velmi nízká ve srovnání se zátěžemi, které se běžně vyskytují v odpadních vodách. U umělých mokřadů s podpovrchovým tokem jsou hlavními mechanismy odstraňování adsorpce a srážení. Materiály, které se běžně používají pro umělé mokřady s podpovrchovým tokem (štěrk nebo drcená hornina), poskytují velmi nízkou kapacitu pro sorpci a srážení. V nedávné době byly v umělých mokřadech testovány vyrobené filtrační materiály jako je LECA (lehké jílové kamenivo) nebo vedlejší a odpadní produkty, jako jsou strusky z pecí. Odstranění fosforu je u těchto substrátů velmi vysoké. Ale protože sorpce a srážení jsou nasycené procesy, časem se sorpce snižuje (Vymazal 2010).

3.2.9.5 Bakteriální znečištění

Odstraňování mikrobiálního znečištění v umělých mokřadech probíhá kombinací fyzikálních, biologických a chemických procesů. V mokřadech s

horizontálním průtokem jde zřejmě o kombinaci více faktorů jako je přirozený úhyn i predace, oxidace a působení antibakteriálních látek vylučovaných z kořenů mokřadních rostlin a sedimentace (Vymazal 2016)

3.3 Plovoucí ostrovy

Vzhledem k přirozené samočisticí funkci přírodních mokřadů vznikl nápad využívat k dočišťování méně znečištěných odpadních vod a nádrží lidmi vybudované ostrovy, kde dochází k podobnému procesu čištění jako v přirozených mokřadech. Vznikla tak technologie umělých plovoucích ostrovů. Plovoucí ostrov je masa plovoucích vodních rostlin a sedimentů, která má různou tloušťku a různou rozlohu. Plovoucí ostrovy jsou běžným přírodním fenoménem, který můžeme nalézt v mnoha částech světa. Méně často se vyskytují jako umělá struktura, vytvořená člověkem (ConWe 2018).

3.3.1 Vliv plovoucích mokřadů na čištění vod

Biologické procesy mají v plovoucích ostrovech větší účinnost díky volnému splývání kořenů ve vodním sloupci. Díky tomu dochází k přímému kontaktu mezi kontaminanty a mikrobiální komunitou spojenou s kořeny. Mikroorganismy rozkládají organickou hmotu na jednoduché živiny, které rostliny odstraňují příjmem. Kromě toho kořeny rostou jak horizontálně, tak i vertikálně, čímž zvětšují plochu pro příjem živin. Rostliny také uvolňují různé druhy organických sloučenin, které regulují biologické procesy, jako je denitrifikace. To je zvláště účinné pro povrchové vody bohaté na živiny, ve kterých reduktory dusičnanů přeměňují dusičnany na plynný N_2 a uvolňují jej do atmosféry. Kromě toho rostliny přijímají živiny pro svůj růst a vývoj a tím snižují úroveň eutrofizace. Vodní rostliny na sebe kromě jiných živin váží i fosfor, který pak nemohou sinice využít pro své množení. Druhy v plovoucích mokřadech jsou schopny přijmout dusík v množství od 200 do 2500 kg ha⁻¹ ročně. Rostliny podporují odstraňování jemných suspendovaných částic jejich přilnutím ke

kořenovému systému a tím snižují zákal vody. Makrofyta dále produkují bioaktivní sloučeniny, které podléhají fyzikálně – chemickým změnám ve vodním prostředí, což vede ke zvýšení sorpčních a sedimentačních procesů. Několik druhů rostlin, patřících k helofytům (bahenní rostlina), uvolňuje atmosférický kyslík do rhizosféry. Toto uvolňování kyslíku probíhá většinou za denního světla v důsledku fotosyntézy. Kyslík uvolňovaný kořeny reguluje redoxní potenciál, který ovlivňuje cyklus dusíku, oxidaci specifických fyto toxinů a aerobní degradaci (Shahid et al. 2018).

3.3.2 Přírodní plovoucí ostrovy

Plovoucí ostrovy se obecně nacházejí v bažinách, jezerech a na podobných mokřadních místech. Jejich rozloha může být několik čtverečních metrů až mnoho hektarů (například v Amazonii). Přírozené plovoucí ostrovy se skládají z vegetace rostoucí na plovoucí podložce utvořené z kořenů rostlin nebo z různých organických zbytků. Vznikají obvykle tehdy, když porosty orobince, sítiny, ostřice nebo rákosu vyčnívají směrem od pobřeží do mokřadní oblasti. Jak voda stoupá, kořeny těchto rostlin již nedosáhnou na dno. Rostliny využijí kyslík v hmotě kořenů pro vztlak a okolní vegetaci použijí jako oporu, aby si zachovaly svou vertikální orientaci. Bouře nakonec odtrhnou celé části porostů od břehu a takto vytvořené ostrovy migrují kolem jezera podle proudících větrů. Výbušné sopečné erupce mohou vytvořit pemzové vory, které mohou plavat na hladině měsíce nebo dokonce roky, než se zcela nasáknou vodou a potopí se. Takovéto vory plují i po moři, čímž mohou pomáhat při migraci rostlin a zvířat. Ve vodních oblastech severozápadní Evropy se dochovalo několik tisíc akrů plovoucích luk, které jsou využívány jako zemědělská půda. Část z nich má status přírodní rezervace. Plovoucí ostrovy se významně podílejí na zvyšování biodiverzity v daných lokalitách. Oblast pod těmito plovoucími rohožemi je totiž mimořádně bohatá na vodní formy života (Center For Aquatic And Invasive Plants 2022).

3.3.3 Umělé plovoucí ostrovy

Plovoucí ostrovy jsou vegetační systémy, které mají v rámci vodních nádrží i tekoucích vod několik funkcí. Jednak zlepšují přirozené biologické funkce těchto lokalit, dále se uplatňují jako prvek zvyšující biodiverzitu, bojují proti erozi a v neposlední řadě slouží také jako estetický prvek. Výhodou umělých plovoucích ostrovů je jejich značná variabilita a snadná údržba. Základní plovoucí komponenty se dají využít jednotlivě, nebo se pospojují a vzniknou větší útvary. Společenstva rostlin se dají cíleně vybírat dle specifických potřeb stanoviště. Další výhodou je využití plovoucích ostrovů tam, kde se jiné technologie použít nedají. Například tam, kde není možné osázet břehy, nebo je příliš velká hloubka. Plovoucí mokřady si také díky svému plovoucímu základu dobře poradí s výrazným kolísáním hladiny (Beňo Biotech 2023).

3.3.3.1 Makrofyta umělých plovoucích mokřadů a jejich pěstování

Mokřadní rostliny jsou důležitou a nepostradatelnou součástí technologie plovoucích ostrovů. Druhy rostlin se vybírají jak podle technických požadavků projektu, tak podle životních nároků makrofyt. Proto při výběru druhové skladby rostlin pro použití u konkrétních plovoucích ostrovů záleží na mnoha faktorech. Mezi ně patří klimatické podmínky, citlivost na živiny, odolnost před přímým slunečním svitem, délka, hustota a objem kořenů, nadzemní biomasa, vztlaková síla vznikající vlivem ponoření vzdušných částí kořenů, typ znečištěné vody, chybějící substrát v kořenové zóně, schopnost zadržování vody a rychlost růstu biomasy nad i pod hladinou (ConWe 2018).

Nejideálnější jsou pro tento účel rostliny, které rychle rostou ihned po vysazení a které zároveň produkují velký objem nadzemní biomasy. Mezi tyto rostliny můžeme v podmínkách České republiky zařadit např. chrastici rákosovitou (*Phalaris arundinacea*), rákos obecný (*Phragmites australis*) a zblochan vodní (*Glyceria maxima*). Mokřadní rostliny je optimální vysazovat od dubna do září. V jiné měsíce je možno rostliny také vysazovat, ale přestože je míra uchycení rostlin poměrně dobrá,

není zaručená. Více potom záleží na zkušenostech a odborných znalostech (Fučík et al. 2021).

Vzhledem k tomu, že rákos obecný (*Phragmites australis*) je nejběžněji používaným makrofytem v evropských uměle vytvořených mokřadech, dá se na jeho příkladu dobře ukázat způsoby množení. Při množení jiných mokřadních druhů je však obecně nutné dodržovat podobné techniky a podobná opatření. Existují čtyři různé metody, které lze použít k založení porostu požadovaných makrofyt. Prvním způsobem je použití transplantovaných oddenků. Mohou to být jak malé části vertikálního nebo horizontálního oddenku, tak i větší shluky materiálu. Odebrané části oddenků se pečlivě zasadí do substrátu v pravidelném vzoru. Je možné také velké množství půdy obsahující oddenky rozmístit po celé vyhrazené ploše. Řízkování stonků je další poměrně spolehlivou metodou. Také se používají sazenice, které jsou ve sklenicích vypěstovány ze semen a později přesazeny. Výsev osiva je velice rychlý, snadný a levný způsob pro vytvoření plovoucích mokřadů. Na všechny metody zakládání nových porostů má vliv více faktorů. Kromě typu výsadby to je například typ půdy, výška hladiny vody, kontrola plevelů, množství živin, datum výsadby (Brix 2003).

Zdravotní stav porostu makrofyt a jejich aktuální růstová fáze mají vliv na čistící funkci umělých mokřadů. Zato vliv druhu vegetace na čistící účinek považuje mnoho autorů za druhořadý. Ani měření VÚV TGM neprokázala vztah mezi druhy rostlin a čistícím účinkem, nebo vliv na obsah kyslíku v pročišťovaném prostředí. Využívají se hlavně místní druhy mokřadní vegetace, což má význam zejména v chráněných oblastech, nebo kombinace lokálních a dalších druhů. V českých podmínkách se používají klasické druhy jako je rákos, chrastice a orobinec, u menších systémů najdou své uplatnění i kosatce nebo vrbice (Rozkošný 2013).

Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*) se v přírodě se vyskytuje na zamokřených loukách, kde tvoří jednolitý porosty, nebo podél vodních toků. Patří mezi vysoké rostliny s bohatým kořenovým systémem, který nedosahuje velkých hloubek (jen 20–30 cm.). Množí se oddenky, výhony i semeny (Biom 2009). Chrastice rákosovitá je zobrazena na následujícím obrázku (obr. 7.).

Zblochan vodní (*Glyceria maxima*) je vysoká, plazivá tráva dorůstající až tři metrů. Podobně jako chrastice zakořeňuje jen mělce. Vegetační období má dlouhé.

Když má stanoviště dostatečnou vlhkost, roste zblochan až do října. Kvete v létě, v červenci a v srpnu. Je náročný na trvalou vlhkost stanoviště, snáší zaplavení až do 50 cm (Biom 2009).

Orobinec širokolistý (*Typha latifolia*) je vytrvalá bylina, která má silnou lodyhu, dlouhé a široké listy, dorůstá do výšky 1 až 1,5 metrů. Kvete v červenci až v srpnu. Snáší nízké i vysoké pH i silné znečištění. Preferuje půdy bohaté na živiny (Biom 2009).

Rákos obecný (*Phragmites australis*) má dlouhé rozvětvené podzemní oddenky, z kterých vyrůstají dlouhé výhonky. To rákosu umožňuje zakořenit až do hloubky 70 cm. Z uzlin výhonků raší vzpřímená stébla s dlouhými listy. Kvete v srpnu a v září. Semena mají po dozrání poměrně dobrou klíčivost, kterou rychle ztrácejí. Navíc se rákos výborně rozmnožuje pomocí oddenků. Proto převládá vegetativní způsob rozmnožování. Rákos dobře snáší výkyvy pH a vyšší hodnoty znečištění (BSK₅ i dusíku). Pro svou čisticí schopnost se často využívá (Biom 2009). Fotografie rákosu obecného najdeme níže (obr. 8.)

Kosatec žlutý (*Iris pseudacorus*) je statná vytrvalá rostlina, vyrůstající z plazivého a rozvětveného oddenku. Dosahuje výšky až 120 cm. Kvete od května do července. Má rád bahnitě půdy bohaté na živiny, zejména na dusíkaté látky a fosfor (Biom 2009).

Obr. 7.: Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*)



Zdroj: Navrátilová & Patočka (2014)

Obr. 8.: Rákos obecný (*Phragmites australis*)



Zdroj: Pladias (2023)

3.3.3.2 Substrát pro růst makrofyt

V počátcích svého růstu jsou makrofyta nejvíce náročná na kvalitu substrátu. Nedůležitější je vyřešit problém, jak dosáhnout rovnováhy mezi dostupností živin, vody a provzdušněním. Složení substrátu musí zajistit správnou velikost pórů, která bude vhodná pro udržení aerobních podmínek. Materiály použité v růstovém médiu by měly také měly poskytovat optimální pH. To se pohybuje mezi 5.0 a 6. Před použitím se pH nově vytvořené růstové směsi zkontroluje a případně se upraví přimícháním dolomitového vápence (Headley & Tanner 2006).

V současné době roste zájem o konstrukci FTW s různými substráty, aby se dále zlepšila jejich účinnost při odstraňování kontaminantů. Výsledky ukázaly, že umělé substráty by mohly zvýšit čisticí schopnost plovoucích ostrovů. Použití těchto substrátů má však některá omezení, která mohou znesnadnit jejich použití. Velká hmotnost některých substrátů omezuje vztlkové a pohybové schopnosti na vodní hladině. Kromě toho také mohou některé tradiční substráty způsobit ucpání pórů, což by mohlo ovlivnit růst kořenů a tím i čištění. Póry nesmí být příliš malé, aby nedošlo k omezení akumulace vody. Mezi nepoužívanější substráty patří rýžová sláma, lehký keramzit, rákosová sláma, modifikované lastury ústřic, kokosová vlákna a kukuřičné vločky. Plovoucí mokřad s kukuřičnými vločkami prokazuje vysokou účinnost v odstraňování fosforu i dusíku při nízkých teplotách (He et al. 2022).

Naopak rašelina není vhodným substrátem pro plovoucí ekosystémy a dnes se již nepoužívá. Rašelina spotřebovává rozpuštěný kyslík, v důsledku toho rostliny rostou velmi pomalu a někdy i uhynou. Pokud dochází k proudění, je rašelina náchylná k vymývání z plovoucích ostrovů, což opět způsobí omezení vývoje zasazených rostlin. Navíc je rašelina jemná, což umožňuje nasáknutí vodou a ztěžknutí voru. Místo rašeliny se začaly používat chomáče živých rašeliníků (Headley & Tanner 2006).

Makrofyta se mohou sázet i rovnou na plovoucí rohože hydroponicky, bez použití substrátu (Headley & Tanner 2006).

3.3.3.3 Vliv rostlin na kyslíkový režim mokřadů

V mokřadech je kyslíkový režim určen hydrobionty (organismy vázanými na vodní prostředí). Jejich vliv se zvyšuje s jejich narůstajícím množstvím, se snižováním přítoku a se zklidňováním hladiny. Malé, závětrné, dobře osvětlené a silně eutrofní nádrže jsou vystaveny největšímu kolísání obsahu kyslíku. Producenty kyslíku jsou především nižší vodní rostliny (řasy a sinice), z vyšších rostlin pak ty submerzní. Konzumenti kyslíku jsou všichni živočichové i rostliny, kteří kyslík spotřebovávají při dýchání. S narůstající hloubkou nádrže přebírá úlohu producenta kyslíku fytoplankton, v mělkých malých nádržích mají toto za úkol submerzní (ponořená) makrofyta. Emerzní (vynořené) rostliny produkci kyslíku spíše eliminují, protože zastiňují vodní hladinu. Periphyton (nárosty), který je obrůstá, ale kyslík naopak produkuje. Ve stojatých vodách hrají rostliny prvořadou úlohu při přísunu kyslíku, mnohdy na nich závisí život ryb. V některých stojatých vodách může dojít k přesycení vody kyslíkem. V řekách, hlavně ve střední a horní části toku, k tomu nedochází, protože nadbytečný kyslík je pohybem vody uvolňován do atmosféry (Kopp 2004).

K redukci rozpuštěného kyslíku pod plovoucími mokřady přispívá několik faktorů. Plovoucí ostrovy snižují fotosyntetickou činnost řas tím, že omezují množství světla pronikajícího do vodního sloupce. Plovoucí mokřady vytvářejí překážku, která způsobuje snížení difúze kyslíku přes rozhraní vzduch – voda. Tato překážka také eliminuje turbulentní proudění, neboť omezuje vlnění vody a vítr. Makrofyta rostoucí na plovoucích ostrovech mají také nároky na rozpuštěný kyslík. Jedním ze způsobů, jak dodat kyslík do vodního prostředí je střídat volnou hladinu nádrže s hladinou pokrytou plovoucími ostrovy. V těch částech nádrží, která nebude zakryta plovoucími rohožemi, bude docházet k vlnění a zlepší se i světelné podmínky vodního sloupce. Díky tomu se zlepší průběh fotosyntézy řas a difúze kyslíku (Sasser et al. 1991).

3.3.3.4 Výstavba plovoucích ostrovů

Struktura plovoucích ostrovů je velmi podobná ostatním klasickým mokřadům. Rozdíl je v tom, že v systémech plovoucích mokřadů jsou rostliny podporovány

umělými vztlakovými rohožemi. Tyto plovoucí rohože udržují porost makrofyt nad vodní hladinou a umožňují jim tak vegetovat i v hlubších zónách. Vztlak umělých ostrovů je udržován buď použitím plovoucího podkladového materiálu s nízkou hustotou, nebo použitím rostlin, které mají ve svých tělech aerenchym. Pro konstrukci podkladu umělých ostrovů se používají různé materiály jako jsou polystyrenové desky, PVC trubky a sítě obsahující bambus. Při stavbě těchto systémů jsou vyhledávány emerzní rostliny, protože mají přirozenou schopnost zachycovat plyny v oddencích, což jim umožňuje vznášet se na vodní hladině. Při navrhování plovoucích rohoží jsou důležitá i další hlediska jako je jejich životnost, funkčnost, hmotnost, environmentální citlivost, možnost kotvení, flexibilita a cena. Uměle navržená plovoucí podložka by měla doplňovat přirozenou plovoucí podložku, která je tvořena propletenými kořeny, oddenky, organickou hmotou a rostlinným odpadem (Shahid et al. 2018).

3.3.3.5 Použití umělých plovoucích mokřadů na našem území

V České republice se technologie umělých plovoucích mokřadů masivně nevyužívá. Jejich potenciál je však zřejmý, a proto probíhají různé studie a experimenty, zkoumající jejich funkci v našich podmínkách. Plovoucí ostrovy jsou spouštěny na vodní nádrže, kde se zkoumá vliv na jejich čištění a na rozšíření biodiverzity. Tyto technologie jsou na území České republiky používány například na vodní nádrži Lipno, na rybníku Rosnička, na přehradě Mšeno nebo v Horním Jiřetíně.

Často se jich, spíše než pro čištění vody v nádržích, používá v oblasti ochrany ptactva. Plovoucí ostrovy jsou vhodné pro hnízdění ohrožených druhů ptáků, čímž přispívají k jejich ochraně (Kuras 2020).

Rybník Rosnička ve Svitavách používá metodu plovoucích ostrovů od roku 2019. V říjnu minulého roku zde proběhly kontrolní odběry. Bylo zjištěno, že tato opatření fungují, neboť podle výsledků se celkový objem sedimentů snížil o 40,33 %. Na tomto zjištění se ovšem podílela i další, přírodě blízká opatření, jako je například aplikace probiotických bakterií (Stav rybníku Rosnička ve Svitavách se zlepšuje, 2022). Jeden plovoucí ostrov stál 10 000 Kč. Po pěti letech je bude potřeba přitáhnout ke břehu, protože by se pod váhou přirůstající biomasy potopily (Ekolist.cz 2019).

Na Lipně testují plovoucí mokřady, jejichž plochu tvoří různé materiály (viz

obr. 10.). Některé mají jako základ stočené koberce z kokosového vlákna, jiné pytle s rašelinou smíchanou s pískem. Všechny jsou nadnášeny PET lahvemi uchycenými ve speciální tkanině. Ke dnu je každý ostrov připevněn šesti kotvami. Na Lipně nemají umělé ostrovy pouze čistící funkci, slouží hlavně jako hnízdiště a úkryty pro zvířectvo (Štěpánek 2018).

Na jablonecké přehradě Mšeno byly umělé ostrovy vybudovány především kvůli boji se sinicemi. Na hladině vodní nádrže je 40 plovoucích ostrovů, které jsou uspořádané do šachovnice. Tím pokryjí větší plochu, zhruba 600 m² (Krus 2021).

Vědci z České zemědělské univerzity vybuvovali plovoucí ostrovy v Horním Jiřetíně u Mostu. Nově vzniklá stanoviště mají pomoci vrátit ekologickou stabilitu do rybníčních a mokřadních ekosystémů, které byly narušeny lidskou činností. Tyto plovoucí mokřady budou sloužit hlavně jako hnízdiště vodního ptactva a pomohou vytvářet prostředí pro život drobných vodních živočichů (Prokopová 2022).

Pod vedením RNDr. Tomáše Kurase, PhD. proběhl projekt na Věstonické nádrži a na nádrži Nové Mlýny. Ten prokázal, že plovoucí ostrovy zlepšují podmínky pro hnízdění ptáků, zejména rybáka obecného (*Sterna hirundo*). Kromě toho tato technologie přispěla i k rozšíření pobřežního pásma v nádrži a omezení abraze, na kterou mělo vliv nevhodné hospodaření v nádrži (Kuras 2020).

Plovoucí mokřady jsou vhodným systémem pro chov ryb, protože umožňují zlepšit kvalitu vody v rybnících (Jindra 2020).

Další využití nachází tato technologie v kořenových čistírnách. V této oblasti probíhají různé výzkumy. Příkladem může být projekt Ing. Evy Mlejnské a Ing. Miloše Rozkošného, který byl zaměřen na možnosti zlepšení účinnosti čištění v malých obcích. V tomto projektu byly použity extenzivní technologie. Mezi ně patřil i plovoucí mísící ostrov s vlastním zásobováním energií (Mlejnská & Rozkošný 2016).

Umělé plovoucí ostrovy se používají i pro svou estetickou funkci v malých soukromých vodních dílech. Pro zbudování těchto malých plovoucích mokřadů si můžeme zakoupit prefabrikovaný ostrůvek FIAP 3025 (Conrad ©2023). Ten je zobrazen na následujícím obrázku (obr. 9.).

Obr. 9.: FIAP 3025 plovoucí ostrůvek



Zdroj: Conrad (©2023)

Obr. 10.: Plovoucí ostrovy na Lipně



Zdroj: Cibulová (2020)

3.3.3.6 Aplikace plovoucích ostrovů ve světě

Umělé plovoucí mokřady jsou vnímány jako technologie hodná uznání v mnoha zemích. Oceňovány jsou hlavně ve Spojeném království, Číně (viz obr. 11), Japonsku, USA, na Novém Zélandu a v Evropě. Jejich hlavní výhodou je větší flexibilita pro řízení kvality vody. Statické umělé mokřady, používané pro čištění, potřebují až 3% rozlohy povodí, aby úprava vody byla účinná. Oproti tomu plovoucí umělé ostrovy jsou instalovány na stávajících vodních útvarech a mohou se pohybovat podle kolísání vody. Jejich hlavní význam spočívá ve zlepšování kvality vody, zvyšování biologické rozmanitosti, rozptylu energie vln a zpříjemnění krajiny (Harris

environmental consulting 2017).

Plovoucí ostrovy se běžně používají pro čištění dešťové a šedé vody, což umožní její další použití. Pročišťují odpadní vody z průmyslu včetně potravinářského, vody z mlékáren, výkrmů a vepřinů. Pomáhají čistit nádrže pro rekreační rybolov, vodohospodářské rybníky, rybníky na golfových hřištích, rekreační nádrže. Plovoucí mokřady najdeme i v čističkách odpadních vod. Kromě odstranění znečištění jsou plovoucí ostrovy významné také pro svoje další funkce, jako je tlumení vlnění a ochrana pobřeží. Zároveň zvyšují biodiverzitu, poskytují úkryt rybám a mají i estetickou funkci. (Harris environmental consulting 2017).

Čištění odpadních vod pomocí umělých plovoucích mokřadů nachází uplatnění hlavně v rozvojových zemích, kde není vybudována infrastruktura. V těchto oblastech může být tato technologie levným a účinným řešením. V Pákistánu probíhal výzkum čištění splaškových a průmyslových vod po dobu tří let. Plovoucí mokřady způsobily zlepšení všech zaznamenaných ukazatelů kvality vody a snížení koncentrací těžkých kovů v odtoku ve srovnání s přítokem. Maximální kapacita odstraňování touto technologií byla 79 % chemické spotřeby kyslíku (CHSK), 88 % biochemické spotřeby kyslíku (BSK) a 65 % celkových rozpuštěných pevných látek. Bylo zjištěno, že se plovoucí ostrovy hodí pro čištění splaškových i průmyslových vod. Navíc tato technologie nebyla nejen účinná, ale i poměrně levná (Afzal et al. 2019).

V roce 2022 se v Indii dokončovaly práce na zlepšení čistoty vody v řece Jamuna. Ta po úpravě zajišťuje pitnou vodu pro metropoli Dillí. Hotovo bylo všech 24 jezů a zahájilo se čištění

in situ (na místě). Využity byly kotoučové filtry, provzdušňování, UV dezinfekce a plovoucí mokřadní systémy (TN City Desk 2022). Provedené úpravy jsou zachyceny na obrázku 12.

Plovoucí mokřady najdou využití i u čištění vod ze zemědělství. Příkladem může být výzkum z roku 2010, provedený v prostředí vepřina po dobu 35 dnů. Díky použití této technologie došlo v tomto subjektu ke snížení celkového fosforu o 90,4 %, celkového dusíku o 84,0 %, chemické spotřeby kyslíku o 83,4 %, sulfonamidů o 91,8 % a antibiotik o 99,5 %. (Xien et al. 2010).

Vypouštění kyselých půdních vod do okolního prostředí představuje riziko pro zdraví živých organismů, hlavně v důsledku kumulace těžkých kovů v životním

prostředí. Existuje několik nových metod k odstranění tohoto znečištění. Tyto postupy zahrnují techniky pasivního čištění, mezi něž patří i využití plovoucích ostrovů (Palihakkara 2018).

Umělé plovoucí ostrovy dále najdou uplatnění i v takových provozech, jako jsou letiště. Před výstavbou letiště Heathrow proběhla studie na účinnost čištění těchto odpadních vod pomocí plovoucích rohoží osázených rákosem obecným. Tento systém byl později doplněn provzdušňovacími jednotkami (Headley and Tanner, 2006).

Obr. 11.: Plovoucí mokřad osázený šáchorem střídavolistým (*Cyperus alternifolius*) - Ningbo, Čína



Zdroj: Vymazal (2022)

Obr. 12.: Čištění vody na indické řece Jamuna



Zdroj: (TN City Desk 2022)

3.3.3.7 Účinnost plovoucích mokřadů při čištění vod

Pro stanovení účinnosti čištění za pomoci plovoucích mokřadů lze použít měření pěti kontaminantů. Jedná se o celkový dusík (TN), amonný (NH_4), dusičnanový a dusitanový dusík ($\text{NO}_x\text{-N}$), fosforečnan (PO_4) a celkový fosfor (TP). Ve výzkumech různých autorů nalezneme široké rozmezí účinnosti při odstraňování těchto látek (Johnson 2001).

Při porovnání několika prací o využití plovoucích mokřadů v eutrofních vodách (s vysokým obsahem živin) je možno zjistit, že celkový fosfor je tu odstraňován s účinností 16,2 % až 92,9 %, NH_4 s účinností od 3 % do 59,4 %, míra odstranění $\text{NO}_x\text{-N}$ byla od 24,6 % do 82,4 %, fosforečnan byl odstraněn od 2 % do 67 % a celkový fosfor od 16,1 % do 91,6 % (Johnson 2001).

Rychlost odstraňování dusičnanového dusíku byla při použití plovoucích ostrovů až $8,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ přičemž u FWS a HF CW byla maximální rychlost odstraňování 3,3 a $0,58 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Kadlec a Wallace 2009). Rychlost odstraňování celkového fosforu při použití tohoto systému byla 0,08 - $7,47 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Chen et al. 2016).

Již 5% pokrytí povrchu čištěných vod plovoucími ostrovy dokáže zajistit vysokou míru odstranění kontaminantů (Sharma et al. 2021). Moortel et al (2000) provedli srovnání mezi třemi nádržemi s vodou z čističky odpadních vod. Dvě nádrže osadili plovoucím ostrovem s vegetací (CFW), třetí nádrž byla bez emergentní vegetace a sloužila jako kontrola k porovnání účinnosti čištění. Vědci zjistili, že nádrže, které pokrývaly umělé ostrovy, fungovaly lépe než kontrola. Průměrná účinnost odstraňování $\text{NH}_4\text{-N}$, celkového dusíku, celkového fosforu a CHSK byla 35 %, 42 %, 22 % a 53 % u CFW a 3 %, 15 %, 6 % a 33 % u kontroly. Po 11 dnech bylo pH významně nižší u CFW ($7,08 \pm 0,21$) než u kontroly ($7,48 \pm 0,26$). Účinnost odstraňování $\text{NH}_4\text{-N}$, celkového dusíku a CHSK byla významně vyšší u nádrží, které měly umělé ostrovy, protože přítomnost plovoucí rohože makrofyt pozitivně ovlivnila jejich odstranění. Teplota se projevila jako řídicí faktor. Celkový dusík, $\text{NH}_4\text{-N}$ a P byly nejlépe odstraňovány mezi 5 °C a 15 °C. Plovoucí rohože makrofyty zamezily zvýšení teploty vody, pokud teplota vzduchu vystoupala nad 15 °C.

Umělé plovoucí ostrovy jsou účinné i při odstraňování kovů. V roce 1992

byl v Kanadě proveden výzkum zjišťující úspěšnost eliminace kovů z kyselých odpadních důlních vod. Bylo odstraněno 88 % Fe, 77 % Ni, 39 % S a 72 % kyselosti. Po dvou letech fungování systému se účinnost odstraňování Fe a Ni zvýšila na 98 % a 95 % (Fyson et al. 1995). U dešťových vod byla Cu odstraňována rychlostí 3,8–6,4 mg m⁻² d⁻¹, Zn rychlostí 25–88 mg m⁻² d⁻¹ (Tanner a Headley 2008)

Většina autorů se shoduje, že sezónní změny mají přímý vliv na růstovou výkonnost rostlin. Obecně se má za to, že při vyšších teplotách dochází k většímu odstranění živin v důsledku většího příjmu rostlinami, které výrazně zvýšily biomasu a zvýšily mikrobiální degradaci v rozšířené rhizosféře. Během chladnějších teplot rostlina naopak neasimiluje živiny v důsledku vegetačního klidu. Mikrobiální degradace je zpomalena díky pomalému metabolismu bakterií a snížené enzymatické aktivitě (Sharma et al. 2021).

Naopak Ge et al. (2016) zjistili, že sezónní změny neměly významný vliv na vylučování fosforu i uhlíku.

Plovoucí ostrovy jsou zvláště účinné pro odstranění suspendovaných pevných látek. Při čištění domovních odpadních vod je rychlost odstraňování suspendovaných pevných látek 2,7 g m⁻² d⁻¹ až 7,1 g m⁻² d⁻¹, u odpadních vod z chlévů je 7,1 g m⁻² d⁻¹. Nejvyšší rychlost byla ale dosažena u odpadních dešťových vod, 45 g m⁻² d⁻¹ (Chen et al. 2016).

Míra odstranění CHSK (chemická spotřeba kyslíku) se u plovoucích ostrovů pohybuje od 17 do 84 %, účinnost odstranění BSK (biochemická spotřeba kyslíku) se v těchto systémech pohybuje od 36 % do 90 %. Závisí ovšem na zdroji znečištění. Rychlost odstraňování BSK také zvyšuje vyšší koncentrace přítoku (Boonsong & Chansiri 2008)

4. Závěr

Umělé plovoucí ostrovy jsou speciální typ umělých mokřadů. Jedná se o inovativní ekologickou technologii umožňující odstranění bodového i nebodového zdroje znečištění. Své uplatnění najdou jako součást kořenových čističek, ale používají se i ve volné přírodě. Zde je jejich úlohou pročišťovat nádrže, poskytovat hnízdiště ptákům i úkryt různým živočichům. Také chrání pobřežní linie před erozí a mají i estetickou funkci. Plovoucí ostrovy dále snižují zápach a eliminují výskyt sinic v nádržích. Tento systém se dá použít i tam, kde je problém s proměnlivou výškou hladiny.

Při návrhu plovoucích mokřadů je důležitá volba druhů rostlin. Nejčastěji jsou vybírány původní rostliny, vyskytující se v daném místě a hodící se do daných klimatických podmínek. Rostliny musí být schopny rychle růst ve znečištěné vodě. Příkladem může být rákos obecný (*Phragmites australis*) nebo chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*). Významnou funkci má i substrát, do kterého jsou makrofyta zasazována. Mezi nejpoužívanější substráty patří rýžová sláma, lehký keramzit, rákosová sláma, modifikované lastury ústřic, kokosová vlákna a kukuřičné vločky. Naopak rašelina vhodná není, protože růst rostlin zpomaluje. Pokud je plovoucí mokřad spuštěn do vod bohatých na živiny, může být rostlina pěstována hydroponicky. K výrobě plovoucího ostrova se používají různé materiály. Těmi může být polystyren, PET lahve, bambus a další. Při jejich výběru by se neměla zohledňovat nejen cena, ale i vliv na životní prostředí.

Umělé plovoucí ostrovy se podílejí na čištění eutrofních vod, odpadních vod, znečištěných vod z domácností, dešťových vod i průmyslových vod. U průmyslových vod je zatím sesbíráno pouze menší množství dat ohledně účinnosti odstraňování nežádoucích látek plovoucími mokřady. Budoucí studie zaměřené na tyto vody nám však další data jistě přinesou a pomohou se zefektivněním čištění.

Čištění odpadních vod pomocí umělých plovoucích mokřadů nachází uplatnění v rozvojových zemích, kde je tato technologie levným a účinným řešením. Plovoucí ostrovy čistící nejen odpadní vody jsou hojně využívány i ve Spojeném království, v Číně, v Japonsku, v USA, v Kanadě, na Novém Zélandu a v Evropě.

Ve výzkumech různých autorů nalezneme široké rozmezí účinnosti při odstraňování znečišťujících látek z vod pomocí plovoucích mokřadů. Stanovování účinnosti čištění se zaměřuje hlavně na pět kontaminantů. Těmi je celkový dusík (TN), amonný (NH_4), dusičnanový a dusitanový dusík ($\text{NO}_x\text{-N}$), fosforečnan (PO_4) a celkový fosfor (TP). Rychlost odstraňování dusičnanového dusíku byla u plovoucích ostrovů až $8,5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Denitrifikace a míra retence dusíku dosahovala u plovoucích ostrovů 4,2 a $2,8 \text{ g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Rychlost odstraňování celkového fosforu je 0,08 - $7,47 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, účinnost odstraňování činí 5 až 88 %.

Cu byla u dešťových vod odstraňována rychlostí $3,8\text{--}6,4 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Zn rychlostí $25\text{--}88 \text{ mg m}^{-2} \text{ den}^{-1}$.

Organická hmota se u plovoucích mokřadů odstraňuje filtrací nebo usazováním a může být dále degradována spolu s rozpuštěným organickým uhlíkem aerobními a anaerobními mikroorganismy. Podle zdroje znečištění se míra odstranění CHSK pohybuje od 17 % do 84 %, účinnost odstranění BSK se pohybovala od 36 % do 90 %. Rychlost odstraňování BSK také zvyšuje vyšší koncentrace přítoku. Díky tomu se mohou plovoucí ostrovy uplatnit při čištění odpadních vod obsahujících průmyslové organické sloučeniny.

Plovoucí ostrovy jsou zvláště účinné pro eliminaci suspendovaných látek, kdy nejvyšší rychlost jejich odstraňování ($\text{TSS } 45 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) je dosažena při úpravě dešťové vody.

Hodnocení výkonnosti plovoucích mokřadů je i přes množství provedených výzkumů stále ještě poměrně neprobádanou oblastí, která poskytuje stále velký prostor pro další zkoumání. Tento systém má velký potenciál, neboť se jedná o poměrně jednoduchou a levnou možnost, jak zlepšit kvalitu vody.

Chtěla bych, aby má bakalářská práce přispěla k rozšíření povědomí o technologii plovoucích ostrovů. Nebylo by špatné docílit jejich masivnějšího využití, i kdyby jen pro pročištění rekreačních vodních nádrží. Vždyť plovoucí ostrovy jsou nejen účelné, ale i krásné.

5. Seznam použité literatury

Afzal M, Arslan M, Müller JA, Shabir G, Islám E, Tahseen R, Anwar – ul – Haq M, Hashmat AJ, Iqbal S, Khan QM. 2019. Floating treatment wetlands as a suitable option for large-scale wastewater treatment. *Nat Sustain* **2**: 863–871

Boonsong K, Chansiri M. 2008. Domestic wastewater treatment using vetiver grass cultivated with floating platform technique. *AU J Technol* **12**(2): 73–80

Brix H. 2003. Plants used in constructed wetlands and their functions. In: In: Dias, V. a Vymazal, J. (eds.), 2003: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands*. ICN a INAG, Lisabon, Portugalsko, pp. 1-30

Bulc T.J. 2006. Long term performance of constructed wetland for leachate treatment. *Ecological Engeneering* **26**: 365–374

DeBusk WF, Newman S, Reddy KR. 2001. Spatiotemporal patterns of soil phosphorus enrichment in Everglades Water Conservation Area 2A. *Soil Science Society of America Journal* **60**:1273–77

Finlayson CM, Spiers AG. 1999. Global review of wetlands resources and priorities for wet-land inventory. Supervising Scientist Report/Wetlands International Publication 53, Supervising Scientist, *Canberra*.

Fučík P, Vymazal J, Šereš M, Hejduk T. 2021. Metodika pro navrhování umělých mokřadů v návaznosti na zemědělské odvodnění pro zlepšení jakosti vody. Česká zemědělská univerzita. Praha.

Fyson A, Kalin M, Smith MP. 1995. Microbially-mediated metal removal from acid mine drainage. *Proceedings of the Mining and Environment Conference, May 28 – June 1. Sudbury, Ontario, pp 459–466*

Gardavská A. 2013. Modelování čištění komunálních odpadních vod [MSc. Thesis]. Masarykova Univerzita. Brno

Ge Z, Feng C, Wang X, Zhang J. 2016. Seasonal applicability of three vegetation constructed floating treatment wetlands for nutrient removal and harvesting strategy in urban stormwater retention ponds. *Int. Biodeterior. Biodegrad* 112: 80–87

Gorgoglione A, Torretta V. 2018. Sustainable Management and Successful Application of Constructed Wetlands: A Critical Review. *Sustainability* 10: 3910

He X, Zhao X, Zhang W, Ren B, Zhao Y. (2022) Developing a Novel Alum Sludge-Based Floating Treatment Wetland for Natural Water Restoration. *Water* 14: 2433

Headley TR, Tanner CC. 2006. Application of Floating Wetlands for Enhanced Stormwater Treatment: A Review. New Zealand: Auckland Regional Council Technical Publication

Chen Z, Cuervo PD, Müller JA, Wiessner A, Köser H, Vymazal J, Kästner M, Kusch P. 2016. Hydroponic root mats for wastewater treatment—a review. *Environ Sci Pollut Res* 23: 15911–15928

Jágllová V, Šnajdr M. 2009. Zneškodňování odpadních vod v obcích do 2000 ekvivalentních obyvatel. Ministerstvo životního prostředí ČR. Praha

Jamieson TS, Stratton GW,3, Gordon R, Madani A. 2002. Phosphorus adsorption characteristics of a constructed wetland soil receiving dairy farm wastewater. *Can. J. Soil* 82: 97-104

Jindra T. 2020. Možnosti zlepšení kvality vody v chovu ryb pomocí plovoucích mokřadů – přehledová studie [BSc. Thesis]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. České Budějovice

Kadlec RH, Wallace S. 2009. *Treatment wetlands*, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton

Johnson, S., 2021. Literature Review: pollutant removal efficacy of floating treatment Wetlands across water bodies. Bakalářská práce, Portland State University, Portland, Oregon, USA.

Langergraber G. 2012. Constructed wetland technology in Austria – History, current practices and new developments. *Sciences Eaux & Territoires* 9: 32-34

Masoud AMN, Alfarra A, Sorlini S. 2022. Constructed Wetlands as a Solution for Sustainable Sanitation: A Comprehensive Review on Integrating Climate Change Resilience and Circular Economy. *Water* 14: 3232

Meyer D, Molle P, Esser D, Troesch S, Masi F, Dittmer U. 2012. Constructed Wetlands for Combined Sewer Overflow Treatment—Comparison of German, French and Italian Approaches. *Water* 5: 1-12

Mitsch WJ, Gosselink JG. 2000. The Value of Wetlands: Importance of Scale and Landscape Setting. *Ecological Economics*. 35: 25-33.

Mlejnská E, Rozkošný M., 2016. Návrhové parametry, provozní zkušenosti a možnosti intenzifikace. *Vodohospodářské, vědecko – technické informace* **58** (2): 11-19

Palihakkara CR, Dassanayake S, Jayawardena C, Senanayake IP. 2018. Floating Wetland Treatment of Acid Mine Drainage using *Eichhornia crassipes* (Water Hyacinth). *J Health Pollut* **8**:14-19

Ramsar Convention Bureau. 1997. The Ramsar Convention manual: a guide to the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971). Ramsar Convention Secretariat. Gland

Reddy KR, Kadlec RH, Flaig E, Gale PM. 1999. Phosphorus Retention in Streamsand Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **9**: 83–146

Reddy KR, Delaune RD. 2008. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. CRC Press. Boca Raton.

Sasser, CE, Gosselink JG, Shaffer GP. 1991. Distribution of nitrogen and phosphorus in a Louisiana freshwater floating marsh, *Aquatic Botany* **41**: 317–331

Shahid MJ, Arslan M, Ali S, Siddique M, Afza M. 2018. Floating Wetlands: A sustainable tool for wastewater treatment. *Clean Soil Air Water* **46**: n.pag.

Sharma R, Vymazal J, Malaviya P. 2021. Application of floating treatment wetlands for stormwater runoff: A critical review of the recent developments with emphasis on heavy metals and nutrient removal. *Science of The Total Environment* **777**: 146044

Tanner, CC, Headley, T. 2008. Floating treatment wetlands— an innovative solution to enhance removal of fine particulates, copper and zinc. *The NZWWA Journal*, 26–30.

Tournebize J, Chaumont C, Mander Ů. 2017. Implications for constructed wetlands to mitigate nitrate and pesticide pollution in agricultural drained watersheds. *Ecological Engineering* **103**: 415-425.

Van de Moortel AMK, Meers E, De Pauw N, Tac F. 2010. Effects of Vegetation, Season and Temperature on the Removal of Pollutants in Experimental Floating Treatment Wetlands **212**: 281-297

Vymazal J. 2004. Kořenové čistírny odpadních vod. ENKI. Třeboň.

Vymazal J. 2010. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water* **2**: 530–549

Vymazal J. 2016. Kořenové čistírny odpadních vod. Využití ve světě, České republice a Plzeňském kraji. Česká zemědělská univerzita. Praha

Vymazal J. 2022. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land* **11**: 174

Wegner LH. 2010. Oxygen Transport in Waterlogged Plants. In: Mancuso, S, Shabala, S (eds) *Waterlogging Signalling and Tolerance in Plants*. Springer. Heidelberg. Berlin

Xian Q, Hu L, Chen H, Chang Z, Zou H. 2010. Removal of nutrients and veterinary antibiotics from swine wastewater by a constructed macrophyte floating bed system. *Journal of Environmental Management* **91**: 2657–2661

Internetové zdroje:

Australian Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities. Issues Paper. The Role of Wetlands in the Carbon Cycle [online]. 27.07. 2012 [cit. 15.2.2023]. Dostupné z: <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/wetlands-role-carbon-cycle.pdf>

Beňo Biotech. Plovoucí ostrovy [online]. ©2023 [cit. 13.2.2023]. Dostupné z: <https://beno-biotech.cz/produkty-a-sluzby-beno-biotech/plovouci-ostrovy-uvod/>

Biom. Rozkvetlá kořenová čistírna odpadních vod [online]. 14.8. 2009 [cit. 11.2.2023]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/rozkvetla-korenova-cistirna-odpadnich-vod-2>

Center For Aquatic And Invasive Plants. Tussocks and floating islands [online]. ©2022 [cit. 15.2.2023]. Dostupné z: <https://plants.ifas.ufl.edu/manage/why-manage-plants/tussocks-and-floating-islands/>

Cibulová J. Ostrovy z plastových lahví plovoucí na Lipně se staly hnízdištěm ohrožených rybáků

[online]. 24.7. 2020 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: <https://budejovice.rozhlas.cz/ostrovy-z-plastovych-lahvi-plovouci-na-lipne-se-staly-hnizdistem-ohrozenych-8258550>

Conrad, FIAP 3025 plovoucí ostrůvek s rostlinami [online]. ©2023 [cit. 7.2.2023]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/fiap-3025-plovouci-ostruvek-s-rostlinami-d-x-s-x-v-345-x-345-x-130-mm-1-ks-552694>

ConWe. Plovoucí ostrovy [online]. ©2018 [cit. 12.2.2023]. Dostupné z: <http://conwe.cz/plovouci-ostrovy.html>

De Busk WF. Nitrogen Cycling in Wetlands [online]. 2012 [cit. 10.2.2023]. Dostupné z: <http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/IR/00/00/31/21/00001/SS30300.pdf>

Ekolist.cz. Rybník Rosnička budou čistit i plovoucí ostrůvky [online]. 21.4.2019 [cit. 12.2.2023]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/rybnik-rosnicka-budou-cistit-i-plovouci-ostruvky>

EnviWeb. Rozkvetlá kořenová čistírna odpadních vod [online]. 13.8.2009 [cit. 12.2.2023]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/77698>

European Environmen Agency. Zajištění čisté vody pro lidi a přírodu [online]. 8.4.2021 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2020/articles/zajisteni-ciste-vody-pro-lid>

Harris environmental consulting. How Harris Floating Wetlands Work [online]. ©2017 [cit. 7.2.2023]. Dostupné z: <https://harrisenvironmental.com.au/services/harris-floating-wetlands/how-floating-wetlands-work-2/>

Kopp R. Význam vodních rostlin v životě ostatních hydrobiontů [online]. 28.4. 2004 [cit. 15.2.2023]. Dostupné z: <http://www.rybarstvi.eu/dok%20rybari/botany/Vyznam.pdf>

Krus V. Na přehradě se objevilo 40 plovoucích ostrůvků! Pronájem na vodě vyjde na 14 000 korun ročně. 21. 10. 2021 [cit. 12.2.2023]. Dostupné z:

<https://www.inrybar.cz/na-prehrade-se-objevilo-40-plovoucich-ostruvku-pronajem-na-vode-vyjde-na-14-000-korun-rocne/>

Kuras T, Opatření ke zlepšení podmínek předmětu ochrany přírodní rezervace Věstonická nádrž a ptačí oblasti Střední nádrž VD NM a vodohospodářské funkce soustavy Střední a Dolní nádrže VD NM [online]. 20.10.2020 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z:

https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX01aUDQ5MF92eWhvZG5vY2VuaU5hdHVyYURva3VtZW50YWNIRE9DXzY0NDU0Nzc5MjAzMTk3MjM1NzAucGRm/MZP490_vyhodnoceniNaturaDokumentace.pdf

Ministerstvo životního prostředí. Kořenová čistírna odpadních vod [online]. 2019 [cit. 11.2.2023]. Dostupné z: https://www.otevrenazahrada.cz/getattachment/Specialni-stranky/Projekty/SFZP/tech_list_6.pdf.aspx

MZE. Ramsarská úmluva o mokřadech [online]. ©2022 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/ramsarska_umluva_o_mokradech

Navrátilová Z, Patočka J. Chrastice rákosovitá: všestranně použitelná rostlina [online]. 6.10.2014 [cit. 8.2.2023]. Dostupné z:

<http://www.toxicology.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=699>

Pladias. *Phragmites australis* – rákos obecný [online]. ©2023 [cit. 8.2.2023]. Dostupné z: <https://pladias.cz/taxon/pictures/Phragmites%20australis>

Polák P. Kořenové čističky odpadních vod (KČOV) [online]. 1.8. 2011 [cit. 11.2.2023]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/7689-korenove-cisticky-odpadnich-vod-kcov>

Prokopová L. Vědci ČZU vytvářejí plovoucí ostrovy pro vodní ptactvo v jižních Čechách a nově v posttěžební krajině na severozápadě republiky [online]. 11.10.2022 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: <https://zivauni.cz/vedci-czu-stavi-plovouci-ostrovy-pro-vodni-ptactvo-v-jiznich-cechach-a-nove-v-posttezebni-krajine-na-severozapade-republiky/>

Pumprlová M, Kriška M. Technologie vertikálních filtrů s vegetací pro čištění odpadních vod [online]. 28.9.2020 [cit. 11.2.2023]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/21197-technologie-vertikalnich-filtru-s-vegetaci-pro-cistení-odpadnich-vod>

Rawat Consulting. Plovoucí ostrovy [online]. ©2023 [cit. 15.2.2023]. Dostupné z: <https://www.rawat.cz/detail-3450-plovouci-ostrovy.html>

Routová H. Metodika vymezení krajinného prvku „mokřad“ [online]. 2016 [cit. 8.2.2023]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/456017/Methodika_mokrad_total_final.pdf

Rozkošný M. Umělé mokřady pro čištění vod z malých a difúzních zdrojů [online]. 2013 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/445715/Letak_Bezpecnost_GMO.pdf

Stroud Water Research Center. Climate Change Mitigation Strategies Ignore Carbon Cycling Processes Of Inland Waters, Scientists Say [online] ScienceDaily. 27.9. 2009 [cit. 10.2.2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2009/09/090901143313.htm>

Štěpánek R. Ostrovy z PET lahví plují po hladině Lipna, mají ho oživit i čistit [online].

25.6.2018 [cit. 12.2.2023]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ceske-budejovice/zpravy/pet-lahve-plovouci-ostrovy-lipno-hydrobiologove.A180625_142929_budejovice-zpravy_khr

Teagasc. The importance of wetlands [online]. 26.4.2021 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: <https://www.teagasc.ie/news--events/daily/environment/the-importance-of-wetlands.php>

TN City Desk. Expansion of sewage system in Delhi crucial for clean Yamuna: Delhi Jal Board [online]. 9.8.2022 [cit. 9.2.2023]. Dostupné z: <https://www.timesnownews.com/delhi/expansion-of-sewage-system-in-delhi-crucial-for-clean-yamuna-delhi-jal-board-article-93457383>

VÚVTGM, Výzkum možností optimalizace provozu a zvýšení účinnosti čištění odpadních vod z malých obcí pomocí extenzivních technologií [online]. 6.10.2016 [cit. 10.2.2023]. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/extenzivnitechnologiecov/default.asp>