

# Návrhové parametry, provozní zkušenosti a možnosti intenzifikace umělých mokřadů

EVA MLEJNSKÁ, MILOŠ ROZKOŠNÝ

**Klíčová slova:** čisticí procesy – filtrační materiály – horizontálně protékané umělé mokřady – kolmatace – konstrukční uspořádání – účinnost čištění – vertikálně protékané umělé mokřady

## SOUHRN

Horizontálně a vertikálně protékané umělé mokřady se v České republice řadí mezi často využívané přírodě blízké způsoby čištění odpadních vod z malých obcí. Jsou tvořeny jedním nebo více filtračními poli zapojenými sériově nebo paralelně. Horizontálně protékané umělé mokřady bývají osázeny vhodnou mokřadní vegetací, nejčastěji rákosem obecným nebo chřastící rákosovitou. Nezbytnou součástí těchto technologií je dobře fungující mechanické předčištění, které chrání filtrační náplň vlastního biologického stupně před ucpáváním nerozpuštěnými látkami.

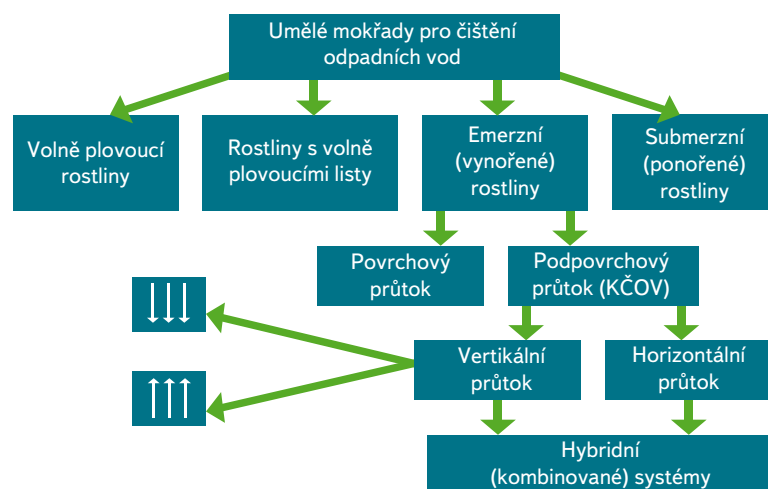
Konstrukční uspořádání vertikálně a horizontálně protékaných umělých mokřadů včetně návrhových parametrů je velice důležité a může významně ovlivnit nejen účinnost čištění, ale také životnost. V současné době probíhá ve světě i u nás celá řada výzkumných prací, které se mimo jiné věnují problematice nových (alternativních) filtračních materiálů, problematice kolmatace umělých mokřadů, která je nejzávažnějším provozním problémem, a mnoha dalším problematikám.

## ÚVOD

Mokřady jsou v různých částech světa využívány k čištění odpadních vod již od poloviny 20. století. Oblast umělých mokřadů je značně rozsáhlá, a proto je i názvosloví i množství vlastních konstrukčních uspořádání značně bohaté. Základní rozdělení umělých mokřadů pro čištění odpadních vod uvádí schéma na obr. 1.

Umělé mokřady dosahují zpravidla velmi vysokých účinností při odstraňování organického a mikrobiálního znečištění. Účinnosti čištění pro nutrienty (dusík a fosfor) jsou většinou nižší a značně rozkolísané. Účinnosti odstraňování nutrientů mohou být zvýšeny nastavením optimálního zatížení, využitím kolísání výšky hladiny odpadní vody v umělém mokřadu (pulzní plnění a prázdnění) nebo přidáním vhodných adsorpčních materiálů do náplně umělého mokřadu nebo do přídavného filtru umístěného na odtoku.

Čisticí procesy jsou ovlivňovány celou řadou faktorů, mezi které patří klimatické podmínky (teplota vody, teplota vzduchu a jeho vlhkost nebo sluneční radiace), hydrologické a hydraulické podmínky (průtok, hydraulické zatížení, doba zdržení, vlastnosti filtrační náplně nebo způsob proudění odpadní vody), vegetace (mohou se projevovat rozdíly mezi vegetačním a nevegetačním obdobím) apod.



Obr. 1. Základní rozdělení jednotlivých typů umělých mokřadů [1]

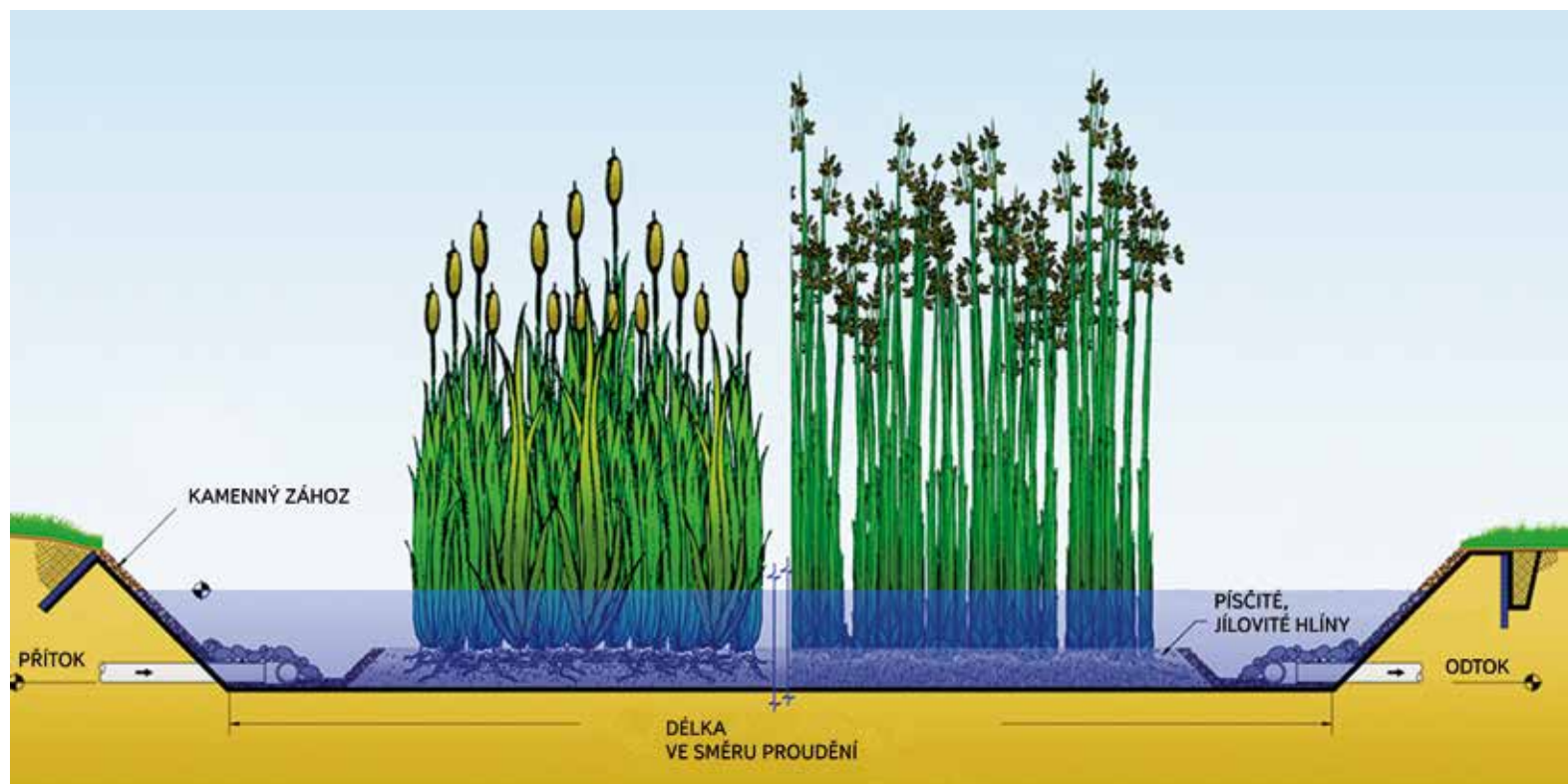
Fig. 1. The basic division of the different types of artificial wetlands [1]

## POVRCHOVĚ PROTÉKANÉ UMĚLÉ MOKŘADY

Tato technologie není v České republice téměř využívána, ale pro úplnost ji zde uvádíme. Většinou představuje jednoduché usazovací nádrže s oddíly a nízkou vrstvou vody (20 až 40 cm) osázené mokřadní vegetací, jako jsou rákosy, orobince nebo skřípiny. Může docházet k mísení čištěné odpadní vody s vodou povrchovou nebo s vyčištěnými odpadními vodami. Doba zdržení bývá navrhována na minimálně 10 dní. Schéma je uvedeno na obr. 2.

Čisticí procesy v povrchově protékaných mokřadech zahrnují usazování nerozpuštěných látek, difuzi rozpuštěných nutrientů do sedimentu, mineralizaci organických látek, odčerpávání nutrientů mikroorganismy a vegetací, mikrobiální transformaci, fyzikálně-chemickou adsorpci a srážení.

Povrchově protékané umělé mokřady mohou dosahovat vysokých účinností čištění pro  $\text{CHSK}_c$  a  $\text{BSK}_5$  (90 %) a pro mikrobiální znečištění (až 99 %), ale výrazně nižších pro dusík a fosfor (10 % až 15 %). Nízká účinnost odstraňování nutrientů je způsobena skutečností, že mnoho důležitých procesů, které se podílejí na jejich odstraňování, probíhá v sedimentu, zatímco nutrienty jsou přítomny v rozpuštěné formě v protékající odpadní vodě a jejich pronikání do sedimentu difuzí je velice pomalý proces. Pokud je ale s výškou hladiny v mokřadu uměle manipulováno a střídají se suché a mokré periody, může být účinnost odstraňování nutrientů až zdvojnásobena [2].



Obr. 2. Schéma umělého povrchově protékaného mokřadu [3]

Fig. 2. Scheme of surface flow constructed wetland [3]

## ZEMNÍ FILTRY

Zemní filtry, které jsou v podstatě ekvivalentem neosázených vertikálně protékajících umělých mokřadů, jsou v České republice využívány zejména jako malá domovní zařízení. Principem čištění je schopnost zrnitého materiálu podporovat fyzikální, chemické a biologické procesy probíhající při odstraňování znečištění obsaženého v protékající odpadní vodě. Hlavní roli hraje společenstvo mikroorganismů, žijící na povrchu náplně umělého mokřadu, které se podílí zejména na rozkladu organického znečištění. Zemní filtry jsou tedy v podstatě zařízení pro pomalou biologickou filtraci předčištěné odpadní vody.

Oproti horizontálně protékajícím umělým mokřadům (kořenovým čistírnám) je hlavní rozdíl v množství kyslíku přítomného ve filtrační náplni. Zemní filtry pracují díky nezatopenému objemu nejčastěji v oxických až anoxických podmínkách, mohou tedy oproti horizontálně protékajícím kořenovým čistírnám lépe odstraňovat amoniakální dusík. Dlouhodobě sledovaný zemní filtr vykazoval průměrnou účinnost odstraňování amoniakálního dusíku 78,5 % oproti prakticky nulové účinnosti u kořenové čistírny [4]. Podobné výsledky byly získány vyhodnocením dat z více sledovaných lokalit. Průměrná koncentrace amoniakálního dusíku se na přítoku do sledovaných kořenových čistíren pohybovala kolem 44 mg/l, průměrná účinnost odstraňování amoniakálního dusíku kolem 8,5 %, zatímco se průměrná koncentrace amoniakálního dusíku na přítoku do sledovaných zemních filtrů pohybovala kolem 38 mg/l a průměrná účinnost odstraňování amoniakálního dusíku kolem 57 % [5].

Zemní filtry jsou vhodné pro čištění běžných a zředěných komunálních odpadních vod. Nehodí se k čištění odpadních vod s velkým množstvím obtížně usaditelných minerálních částic a organického znečištění. Takové vody způsobují rychlé zanášení filtrační náplně (kolmataci). Z tohoto důvodu je velmi důležité dostatečně kvalitní a dobře fungující mechanické předčištění, které by mělo být nedílnou součástí každého umělého mokřadu.

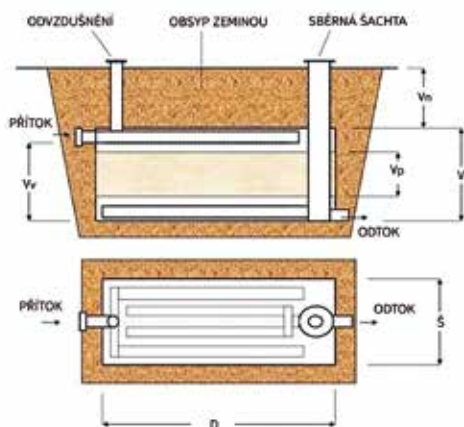
Pro správnou funkci a vyhovující účinnost odbourávání organického znečištění mikrobiálním biofilmem je žádoucí převaha mikroorganismů žijících v prostředí s volným kyslíkem, tedy v oxických podmínkách. Proto musí být filtrační náplň co nejlépe provzdušněná. To je zajištěno vlastním konstrukčním uspořádáním, tedy nezatopenou filtrační náplní a také větráním tělesa zemního filtru. Oxické prostředí je žádoucí též pro činnost nitrifikačních bakterií. Účinnost odstraňování fosforu závisí především na volbě vhodné náplně zemního filtru a její sorpční kapacitě. Zatímco klasické materiály, jako je písek nebo drcené kamínko, tuto schopnost nemají, materiály s vysokým obsahem oxidů hliníku a/nebo železa přispívají ke zvýšení účinnosti odstraňování fosforu v zemních filtrech.

### Konstrukční uspořádání

Zemní filtry lze navrhnout na jednotné nebo oddílné kanalizaci, ale pouze za mechanickým (primárním) stupněm čištění, popř. jako dočišťovací stupeň za biologickým (sekundárním) stupněm čištění, tedy za klasickou čistírnou odpadních vod. Jednoduché schéma je znázorněno na obr. 3.

Horní úroveň filtračního tělesa musí být vodorovná, celý objem filtrační náplně by měl mít konstantní mocnost a homogenitu. Těleso zemního filtru musí být od okolního prostředí vodotěsně odděleno. Rozvodné potrubí se ukládá do štěrkového obsypu. Sběrný drén je nutné opatřit odvětrávacím potrubím, které by mělo být vyvedeno nejméně 0,5 m nad úroveň terénu a opatřeno vhodnou clonou bránící znečištění odvětrávacího a sběrného potrubí vnosem předmětů zvenčí (prach, stébla trávy, listí apod.). Výška filtračního lože by se měla pohybovat od 0,6 m do 1,0 m. Délka jedné větve přítokového a odtokového potrubí by neměla překročit 30 m. Potrubí by mělo být opatřeno otvory s celkovou plochou nejméně 50 cm<sup>2</sup> na 1 m délky. Výškový rozdíl nátoky a výtoku bývá obvykle volen 1,2 m.

Nezbytnou podmínkou dobré funkce zemního filtru je rovnoměrné rozdělení přitékající odpadní vody po celé jeho ploše a také dostatečný přístup vzduchu do porézních vrstev. Vlastní tvar filtru nehraje tak důležitou roli.



Obr. 3. Schéma zemního filtru [6]

Fig. 3. Scheme of unplanted vertical flow constructed wetland [6]

Legenda: V – výška nádrže, Vn – výška nastavení sběrné šachty, Vv – výška ode dna nádrže do vstupního potrubí, Vp – výška vrstvy pískové náplně, D – délka nádrže, Š – šířka nádrže

Legend: V – height of the tank, Vn – height of setting collection shaft, Vv – height from the tank bottom into the inlet conduit, Vp – height of the layer of sand filling, D – length of the tank, Š – width of the tank

## Návrhové parametry

Plocha zemního filtru by se měla pohybovat v rozmezí od 3 m<sup>2</sup>/EO do 6 m<sup>2</sup>/EO, v Belgii je v průměru navrhována plocha 3,8 m<sup>2</sup>/EO [7], v Dánsku 3,2 m<sup>2</sup>/EO [8], v Rakousku normy pro navrhování jednostupňových vertikálně protékajících umělých mokřadů uvádějí plochu 4 m<sup>2</sup>/EO, pro dvoustupňové systémy potom plochu 2 m<sup>2</sup>/EO [9], v Německu je požadována minimální plocha > 2,5 m<sup>2</sup>/EO.

V závislosti na velikosti zrn filtrační náplně se pro mechanicky předčištěné odpadní vody volí hydraulické zatížení v rozmezí od 0,10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.den) do 0,18 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.den) a pro biologicky vyčištěné odpadní vody potom v rozmezí od 0,15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.den) do 0,20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.den) [10].

Dalším důležitým návrhovým parametrem je látkové zatížení, které závisí na složení přitékající odpadní vody, stupni jejího předchozího čištění, výšce a druhu filtrační náplně a požadované účinnosti čištění. Látkové zatížení (BSK<sub>5</sub>) se u vertikálně protékajících umělých mokřadů volí v rozmezí od 10 g/(m<sup>2</sup>.d) do 40 g/(m<sup>2</sup>.d).

## HORIZONTÁLNĚ PODPOVRCHOVĚ PROTĚKANÉ UMĚLÉ MOKŘADY

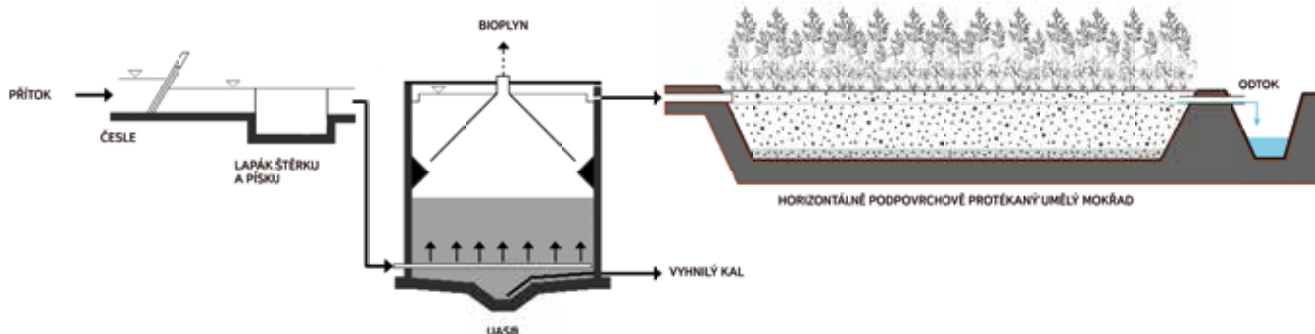
Kořenové čistírny odpadních vod, také nazývané vegetační kořenové čistírny, půdní filtry s vegetací nebo horizontálně protékající umělé mokřady patří v České republice hned po biologických nádržích k nejvíce rozšířeným typům přírodních (extenzivních) způsobů čištění odpadních vod z malých obcí. Od roku 1989 do současnosti jich bylo postaveno zhruba 250 ve velikosti od několika EO do 1 000 EO. Princip čištění je velice podobný jako u zemních filtrů, ale rozdíl je v množství kyslíku přítomného ve filtrační náplni. Protože je u kořenových čistíren celý objem filtračního tělesa zatopen odpadní vodou, pracují většinou v anaerobních až hluboce anaerobních podmínkách. Anaerobní mikroorganismy využívají při respiraci namísto kyslíku řadu terminálních akceptorů kyslíků, jako jsou dusičnany, manganicité a železité ionty nebo sírany, v závislosti na hodnotě oxidačně-redukčního potenciálu [11]. S ohledem na anaerobní podmínky většinou dosahují nižších účinností odstraňování amoniakálního dusíku než zemní filtry.

## Konstrukční uspořádání

Kořenové čistírny s horizontálním pod površovým prouděním musí obsahovat rozvodnou a sběrnou zónu. Mohou být konstruovány jako jediné kořenové pole nebo více polí zapojených buď paralelně, nebo sériově. Výška filtrační náplně se nejčastěji volí v rozmezí od 0,6 m do 1,0 m podle místních podmínek. Její zrnitost závisí především na hydraulickém zatížení a na složení přitékající odpadní vody. Při jednostupňovém uspořádání se doporučuje použít oblé říční kamenivo nebo tříděný štěrk frakce 4 mm až 8 mm, při sériovém zapojení je vhodné u prvního stupně volit zrnitost 8 mm až 16 mm a ve druhém stupni potom zrnitost 4 mm až 8 mm [10]. I při jednostupňovém uspořádání je vhodné v nátokové zóně použít kamenivo frakce 8 mm až 16 mm, aby byla co nejvíce omezena možnost rozvoje kolmatace. Naše zkušenosti ukazují, že volba vhodné frakce kameniva je velice důležitá.

Těleso kořenové čistírny musí být, stejně jako u zemního filtru, od okolního terénu vodotěsně odděleno. Nesmí docházet k průsakům odpadních vod do vod podzemních. Schéma kořenové čistírny je uvedeno na obr. 4.

Předčištěná odpadní voda by měla být rozdělena rovnoměrně po celé šířce nátokové zóny, aby byl na maximální možnou míru omezen vznik kolmatace filtrační náplně. Velmi důležitá je pravidelná údržba a čištění rozvodného potrubí. Často je využíváno rozvedení pomocí drenážní trubky, do které je přiváděna odpadní voda z šachty na jedné straně kořenového pole. Tento způsob ale nemusí zaručit rovnoměrný průtok odpadní vody po celém profilu nátokové hrany a může docházet k lokálnímu přetížení a kolmataci části kořenového pole. Navíc je obtížné delší rozvodné potrubí čistit, a proto by mělo být na



Obr. 4. Schéma kořenové čistírny [12]

Fig. 4. Scheme of horizontal flow constructed wetland [12]

konci kořenového pole vyvedené nad povrch filtračního materiálu. Rozvodné potrubí musí mít dostatečně velké otvory pro výtok vody, otvory do velikosti 2 cm se mohou poměrně rychle ucpat.

Kořenové čistírny mohou přecházet až do hluboce anaerobních podmínek, možným řešením pro zvýšení přísunu kyslíku do filtru je pulsní plnění a prázdňení [13]. Tím může být zvýšena účinnost odstraňování amoniakálního dusíku z přítékající odpadní vody.

## Návrhové parametry

Plocha kořenových polí by se měla pohybovat kolem 5 m<sup>2</sup>/EO, ve světě se většinou navrhuje plocha v rozmezí od cca 3 m<sup>2</sup>/EO do cca 10 m<sup>2</sup>/EO. Terénním průzkumem bylo zjištěno, že skutečná hodnota je podstatně vyšší než 5 m<sup>2</sup>/EO, neboť se poměr skutečného a návrhového zatížení velice často pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,6 [5].

Látkové zatížení (BSK<sub>5</sub>) se u horizontálně protékajících umělých mokřadů volí v rozmezí od 6 g/(m<sup>2</sup>.d) do 10 g/(m<sup>2</sup>.d) [5].

## HYBRIDNÍ SYSTÉMY

V některých případech jsou využívány kombinace vertikálních a horizontálních systémů, případně dalších typů umělých mokřadů, které jsou označovány jako „hybridní“ (viz obr. 5). Účelem kombinace těchto systémů je dosáhnout co nejlepšího čistícího účinku, a to zejména pro dusík. V prvním, vertikálně protékaném umělém mokřadu (oxické až anoxické podmínky), dochází k nitrifikaci amoniakálního dusíku obsaženého v přítékající odpadní vodě ve vysokých koncentracích až na dusičnany. Ve druhém, horizontálně protékaném umělém mokřadu (anoxické až anaerobní podmínky), dochází k denitrifikaci dusičnanů až na plynný dusík.

Autoři Ye a Li [14] uvádějí účinnost čištění 83 % pro amoniakální i celkový dusík, velice podobnou účinnost pro celkový dusík (79 %) uvádějí i autoři Ayaz a kol. [15] pro hybridní umělý mokřad s recirkulací. Účinnost čištění 84 % pro amoniakální dusík a 60 % pro celkový dusík uvádějí autoři Masi a Martinuzzi [16] pro hybridní systém tvořený horizontálním a vertikálním podpovrchově protékaným umělým mokřadem. Autoři Herrera Melián a kol. [17] dokonce uvádějí účinnost odstraňování amoniakálního dusíku 88 %. Všechny tyto výsledky velice dobře ilustrují, že vhodně zvolená kombinace vertikálně a horizontálně protékaného umělého mokřadu může významnou měrou přispět ke zvýšení účinnosti odstraňování amoniakálního a celkového dusíku z čištěných odpadních vod.

S odstraňováním organického znečištění a nerozpuštěných látek v těchto systémech nebývá většinou problém (stejně jako u kořenových čistíren a zemních filtrů), účinnost odstraňování BSK<sub>5</sub> a nerozpuštěných látek se zpravidla pohybuje kolem 90 %, CHSK<sub>C</sub> potom zpravidla kolem 80 %. Ke zvýšení účinnosti odstraňování fosforu použitím hybridních systémů (pokud není použito speciálních náplní) nedochází.

## ČISTICÍ PROCESY V UMĚLÝCH MOKŘADECH

Jak již bylo zmíněno u jednotlivých typů umělých mokřadů, probíhají v nich procesy fyzikální, fyzikálně-chemické, chemické a biologické [19, 20]. Mezi nejvýznamnější fyzikální procesy patří filtrace a sedimentace. Rychlost filtrace souvisí se zrnitostním složením filtračního materiálu, strukturou, texturou, efektivní pórovitostí, složením odpadních vod a zejména závisí na obsahu nerozpuštěných látek přítomných v přítékající odpadní vodě. U umělých mokřadů ale filtrace a sedimentace není žádoucím procesem čištění, protože přispívá ke kolmataci.

Mezi nejvýznamnější fyzikálně-chemické procesy patří vazba řady látek na sorpční komplex filtračního materiálu (amoniak, vápník, hořčík, sodík, draslík aj.). Obzvláště důležitá je vazba fosforu na sloučeniny železa, manganu nebo hliníku. U umělých mokřadů jsou tyto fyzikálně-chemické procesy žádoucí, vhodnou volbou filtračního materiálu lze významně ovlivnit účinnost odstraňování fosforu.

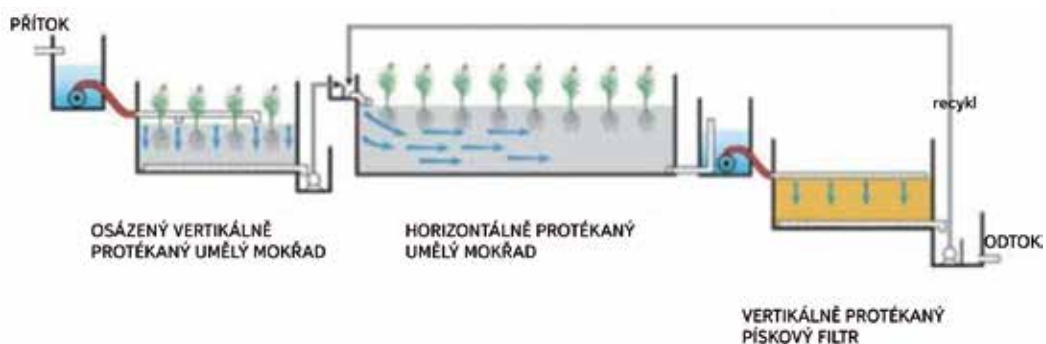
Z chemických procesů jsou nejvýznamnější oxidačně-redukční pochody, které souvisejí s množstvím kyslíku přítomného ve filtračním prostředí. Vedle toho dochází i k rozkladu nebo syntéze nových sloučenin.

Mezi nejvýznamnější biologické procesy patří bakteriální a rostlinný metabolismus. Různorodá směs aerobních a anaerobních bakterií je zapojena do rozkladu organických látek a cyklu nutrientů v umělých mokřadech. Průběh jednotlivých procesů závisí především na množství biologicky rozložitelného materiálu a na množství přítomného kyslíku. Fungovat mohou následující skupiny bakterií: desulfurikační (redukují oxidované formy síry na sirovodík), denitrifikační (redukují dusičnany na dusitany a až plynný dusík), proteolytické (utilizují bílkoviny), amonizační (rozkládají organické dusíkaté látky na amoniak), amylytické (štěpí škrob a nižší cukry na organické kyseliny), nitrifikační (oxidují amonné ionty na dusitany až dusičnany).

## FILTRAČNÍ MATERIÁLY UMĚLÝCH MOKŘADŮ

### Základní poznatky

V umělých mokřadech je možné využít celou řadu více či méně vyzkoušených filtračních náplní, některé se používají buď přímo jako náplň filtračních



Obr. 5. Schéma hybridního systému [18]

Fig. 5. Scheme of hybrid system [18]



Obr. 6. Důsledek kolmatace přítokové zóny umělého mokřadu  
Fig. 6. Clogging consequence

kořenových polí, nebo jako náplň dočišťovacích filtrů umístěných na odtok z umělých mokřadů. Při volbě náplně umělého mokřadu velice záleží na složení čistěné odpadní vody, protože v některých případech může docházet a dochází k velice rychlému ucpávání.

Filtrační náplň je jednou ze tří základních součástí umělého mokřadu a její výběr je pro jeho správnou funkci zásadní. Kromě poskytování fyzické podpory pro růst rostlin a povrchu pro růst mikroorganismů podporuje filtrační náplň sedimentaci a filtraci znečišťujících látek. Některé druhy náplní navíc přispívají ke zvýšené sorpci amoniakálního dusíku nebo fosforu. Patří k nim zejména sekundární produkty z uhlénohého průmyslu, vysokopecní struska apod. [21].

Mezi mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti samotného filtračního materiálu patří zejména [22, 23]: zrnitost, struktura a textura zrn, odolnost a mrazuvzdornost materiálu, chemické složení (podíl železa, hliníku a manganu), obsah vyluhovatelných částic (minerálních i organických), měrná a objemová hmotnost, hydraulická vodivost, pórovitost, dostupnost materiálu (cena, transportní vzdálenost).

Vlastnosti filtračních materiálů, zejména hydraulická vodivost, se během provozu umělých mokřadů mění. Propustnost filtračního lože je ovlivňována zhutněním materiálu (údržba i přirozené sesedání), prorůstáním kořeny a ukládáním stařiny mokřadní vegetace, vyčerpáním sorpční kapacity filtrační náplně a kolmatací volných pórů nerozpuštěnými minerálními a organickými látkami [24]. Ukládání stařiny mokřadní vegetace je podle našich praktických zkušeností závažným problémem. Po několika letech provozu může mocnost takto vytvořené vrstvy dosáhnout až 20 cm, uložený materiál se navíc postupně rozkládá a může významně přispět ke kolmataci filtrační náplně.

## Alternativní materiály

V současné době probíhá ve světě i u nás celá řada experimentů, při kterých jsou využívány zejména náplně, které jsou schopny ve větší či menší míře adsorbovat dusík nebo fosfor. Patří mezi ně struska, zeolity nebo bauxit. Struska z metalurgické výroby železných kovů se jeví jako vhodná náplň a to i proto, že je levnější než štěrkové náplně a je schopná adsorbovat značný podíl fosforu z přitékající odpadní vody. Po vyčerpání sorpční kapacity může plnit roli pevného nosiče, stejně jako štěrková náplň. Nevýhodou je cyklus výměny struskové filtrační náplně, který se pohybuje v rozmezí 1 až 3 roky v závislosti na sorpční kapacitě a koncentraci fosforu v přitékající odpadní vodě. Pro přírodní zeolity je charakteristická schopnost odstraňovat rozpuštěný amoniakální dusík přítomný v odpadní vodě. Nejběžnější a nejčastěji používaný přírodní zeolit je klinoptilolit, který se vyznačuje velmi dobrou adsorpční schopností. Nevýhodou ale je jeho malá sorpční kapacita, proto se musí poměrně často regenerovat. Díky vysokému obsahu oxidů hliníku a železa je možné použít i bauxit, který vykazuje vysokou účinnost při odstraňování fosforu. Jako filtrační náplň do umělých mokřadů je ale bauxit zatím využíván jen velmi zřídka, častěji se používá v přídatných filtrech instalovaných na odtok z kořenových polí [25]. Zkušenosti s použitím dočišťovacího filtru naplněného zeolitem a zjištěné průměrné účinnosti odstraňování amoniakálního dusíku a fosforu popisují autoři Gikas a Tsihrantzis [26]. Autoři Suliman a kol. [27] porovnávali využitelnost dvou materiálů uzpůsobených k sorpci dusíku a fosforu, kterými byly materiál LWA (light weight aggregates) typu Filtralite-<sup>P</sup>™ (keramzit) a lasturový písek, který je přírodní (je tvořen uhličitánem vápenatým a v menším množství uhličitánem hořečnatým). Autoři Li a kol. [21] testovali celkem osm různých filtračních materiálů, kterými byly zeolit, antracit, jílová břidlice, vermikulit, keramická filtrační náplň, struska z výroby oceli, štěrka a bio-keramika. Tyto studie ukazují, že by volba filtračního materiálu neměla být podceňována, protože může významnou měrou přispět k odstraňování nutrientů z čistěných odpadních vod.

## KOLMATACE UMĚLÝCH MOKŘADŮ

U horizontálně a vertikálně protékaných umělých mokřadů je kolmatace poměrně častým jevem. Jde o souhrn fyzikálních, chemických a biologických procesů [28–32], které vedou nejen ke snížení propustnosti filtračního lože, tzn. hydraulické vodivosti a porozity zrnitého materiálu [33], ale také významně ovlivňují přenos kyslíku ze vzduchu do vody [34–36]. Tyto skutečnosti mají za následek významný pokles schopnosti systému čistit odpadní vodu [37]. Jde o ucpávání porézního filtračního prostředí nerozpuštěnými látkami, především jemnými zemitými a organickými částicemi z povrchových smyvů a kalem vyplavovaným ze stokové sítě a mechanického stupně čištění [23], dalšími příčinami mohou být nevhodně řešené dešťové oddělovače, nevhodně zvolený (většinou příliš jemný) materiál filtrační vrstvy nebo pronikání sekundárního znečištění z předřazené biologické nádrže zejména v letním období [38]. Rozsah kolmatace závisí na množství látek (vyjádřeno ukazateli  $CHSK_{Cr}$ , nerozpuštěné látky) v přitékající odpadní vodě [28], hydraulickém zatížení [30], zrnitostním složení porézního filtračního prostředí, jeho struktuře a textuře, době provozu zařízení apod. Pokud je kolmatace v pokročilejším stádiu, může docházet až k zaplávání povrchu umělého mokřadu čistěnou odpadní vodou (viz obr. 6).

Ke kolmataci filtračního prostředí dochází nárazovým uvolněním těchto částic, např. při přívalových deštích nebo významnějších srážkových událostech, nebo hydraulickým přetěžováním [7] nebo pozvolným zakolmatováním, které způsobuje především nevhodná konstrukce usazovacích nádrží (mechanického předčištění), nebo jejich nesprávné provozování a údržba, např. nedostatečné časté vyvážení usazeného kalu [39].

Pokročilá kolmatace vyžaduje sanaci zakolmatované náplně, a tak limituje životnost celého systému, proto je cílem zabránit intenzivní kolmataci a předčasnému ucpání filtračního lože umělých mokřadů. K hlavním opatřením, která významně omezují rozsah a průběh kolmatace, patří rekonstrukce dešťových oddělovačů, minimalizace erozních smyvů, instalace funkčních lapáků písku a usazovacích nádrží, rovnoměrné rozdělení mechanicky předčištěné odpadní vody po celé šíři filtračního lože, navrhování postupného přechodu zrnitostního složení filtrační náplně, pravidelné časné jarní odstraňování zbytků vegetačního pokryvu apod. [40].

## NAKLÁDÁNÍ S ODPADY Z UMĚLÝCH MOKŘADŮ

Jedním z možných způsobů nakládání s odpady z extenzivních čistíren (kaly, kolmatovaný filtrační materiál, makrofytní vegetace kořenových filtrů) je kompostování. Jak vyplývá z dlouhodobého sledování kalů z objektů mechanického předčištění extenzivních čistíren, nepřekračuje jejich kontaminace rizikovými prvky a látkami a mikrobiálním znečištěním limitní hodnoty dané vyhláškou č. 382/2001 Sb. [41]. Mikrobiální znečištění kalů je však poměrně proměnlivé v závislosti na míře jejich stabilizace. Pro dosažení větší stability je vhodné více hlídat probíhající procesy, případně zvolit mezistupeň stabilizace kalů před jejich použitím v zemědělství [42, 43]. Jednou z možností je právě kompostování [43, 44]. Tento proces přináší pozitivní změny vstupních materiálů a snižuje míru jejich kontaminace.

Možnost uplatnění kalů v zemědělství však také závisí na dohodě mezi provozovateli čistíren a zemědělsky hospodařícími subjekty. V obdobích, kdy není zájem ze strany těchto subjektů o kaly, je nutné jejich vyvážení na jiné komunální ČOV s kalovým hospodářstvím. To je pro provozovatele finančně náročnější.

Výsledky pokusného kompostování odpadů z extenzivních čistíren prokázaly vedle výrazného snížení mikrobiálního zatížení i obsah poměrně velkého množství makroelementů využitelných vegetací při aplikaci výsledného



produktu na zemědělskou půdu. Pozornost je však nutné věnovat obsahu těžkých kovů, protože ke snížení jejich obsahu kompostováním prakticky nedochází, výsledný obsah je výsledkem poměru míchání jednotlivých složek a při aplikaci je nutné mít informace o obsahu těchto kovů v půdě.

## INTENZIFIKACE UMĚLÝCH MOKŘADŮ

Jak již bylo uvedeno v předcházejícím textu, mezi možné způsoby intenzifikace čistících procesů probíhajících v umělých mokřadech patří využití pulzního plnění a prázdňení kořenových filtrů, které přispívá ke zvýšení koncentrace kyslíku přítomného ve filtrační náplni, a tím ke zvýšení účinnosti odstraňování amoniakálního dusíku. Dále je to použití alternativních filtračních materiálů (ať již přímo v tělese umělého mokřadu nebo v přídatném filtru umístěném na odtoku z něj), které mohou ve zvýšené míře sorbovat dusík nebo fosfor.

Kolmatovanou filtrační náplň umělých mokřadů není třeba vždy vyměňovat, jako alternativní cesta se jeví in-situ aplikace roztoků chemikálií, jako je roztok roztoku hydroxidu sodného, chlornanu sodného, kyseliny chlorovodíkové nebo speciálně připraveného detergentu [45]. Autoři uvádějí, že se efektivní porozita i infiltrační rychlost nejrychleji a nejvíce zlepšovala při použití roztoku chlornanu sodného (ustálení po 5 dnech aplikace). Při použití vodovodní vody jako srovnávacího roztoku se efektivní porozita téměř neměnila a rychlost infiltrace jen velmi nepatrně stoupala. Proteiny a polysacharidy byly rozpouštěny hlavně roztokem hydroxidu a chlornanu sodného. Anaerobně vytvořený plyn uložený v pórech byl nejlépe uvolňován roztokem kyseliny chlorovodíkové. Autoři rovněž uvádějí, že kolmatace byla podstatně redukována a aplikované roztoky neměly dlouhodobý negativní vliv na rostliny a biofilm umělého mokřadu, ale po aplikaci těchto přípravků nutné následovalo období cca 1 měsíce regenerace biofilmu filtračního lože. Další možností je využití bakteriálně-enzymatických přípravků, které významnou měrou snižují rozsah kolmatace filtračních náplní, a tím přispívají ke zprůchodnění a zvýšení účinnosti čištění umělých mokřadů [37, 46, 47]. Po opakované aplikaci bakteriálně-enzymatického přípravku (vegetační sezona 2013 a 2014) se účinnost čištění v dotčeném kořenovém poli zvýšila pro  $\text{CHSK}_{\text{Cr}}$  z 74 % na 84 %, pro  $\text{BSK}_5$  z 83 % na 92 %, pro nerozpustné látky z 91 % na 94 %, pro amoniakální dusík z 6 % na 17 % a pro celkový dusík z 19 % na 24 %. Tyto výsledky ukazují, že aplikace vhodně zvoleného preparátu může významně přispět ke zvýšení propustnosti kolmatované náplně umělého mokřadu a ke zvýšení účinnosti čištění.

## ZÁVĚR

Kvalita odtékající vyčištěné odpadní vody z dobře fungujícího umělého mokřadu může dosahovat kvality vyčištěné odpadní vody z mechanicko-biologické čistírny odpadních vod a může tak vyhovovat požadavkům nařízení vlády č. 61/2003 Sb., v platném znění. Vyčištěnou odpadní vodu tak lze vypouštět do recipientu nebo do veřejné kanalizace. Pokud není v blízkosti žádný vodní tok ani veřejná kanalizace, je pro jednotlivé rodinné domy nebo rekreační objekty vhodným řešením vsakování vyčištěných odpadních vod do půdních vrstev, tedy vypouštění do podzemních vod.

Umělé mokřady ke svému provozu nevyžadují elektrickou energii, mají minimální nároky na speciální technologické prvky, jejich provozování je jednoduché, na rozdíl od klasických aktivačních čistíren jim nevádí výraznější výkyvy v hydraulickém a látkovém zatížení a jsou vhodné i pro čištění odpadních vod s nízkými koncentracemi organického znečištění ( $\text{BSK}_5$  pod 30 mg/l). Mezi hlavní nevýhody patří vysoké nároky na plochu, nízká účinnost odstraňování amoniakálního dusíku a fosforu, technologická neovladatelnost procesu čištění a také kolmatace filtračního prostředí, která je hlavním provozním problémem.

V současné době probíhá ve světě i u nás celá řada výzkumných projektů zabývajících se umělými mokřady a možnostmi jejich intenzifikace. Jak ukazují tyto výzkumy, je možné ovlivnit jejich funkčnost a účinnost čištění zařazením mnohdy jednoduchého prvku do stávající technologie. V případě nového návrhu by měla být věnována pozornost dostatečnému dimenzování nejen biologického stupně, ale zejména mechanického předčištění. Pokud to podmínky dovolují, je vhodné zvolit hybridní uspořádání nebo alespoň pulzní plnění a prázdňení, aby bylo podpořeno odstraňování amoniakálního dusíku.

Mnoho dalších informací naleznete v nové monografii „Optimalizace provozu a zvýšení účinnosti čištění odpadních vod z malých obcí pomocí extenzivních technologií“ autorského kolektivu Mlejnská, Rozkošný, Baudišová.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu TA02020128 – Výzkum možností optimalizace provozu a zvýšení účinnosti čištění odpadních vod z malých obcí pomocí extenzivních technologií, který je řešen s finanční podporou TA ČR v rámci programu Alfa.

## Literatura

- [1] KRÖPFLOVÁ, L. a VYMAZAL, J. Kombinace vertikálně a horizontálně protékajících umělých mokřadů: využití pro čištění splaškových odpadních vod. In: KRIŠKA, M., ŠÁLEK, J. (ed.) *Přírodní způsoby čištění vod V, sborník z konference*. Brno: Nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3479-0.
- [2] VERHOEVEN, J.T.A. and MEULEMAN, A.F.M. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering*, 12(1–2), 1999, p. 5–12.
- [3] Dostupné z: <http://logixicf.com/ecobuildtrends/2011/04>.
- [4] MLEJNSKÁ, E. a WANNER, F. Porovnání čistícího účinku zemního filtru a kořenové čistírny. *Vodní hospodářství*, 58(1), 2008, s. 3–4.
- [5] MLEJNSKÁ, E., ROZKOŠNÝ, M., BAUDIŠOVÁ, D., VÁŇA, M., WANNER, F. a KUČERA, J. *Extenzivní způsoby čištění odpadních vod*. Praha: VÚV TGM, 2009, 119 s.
- [6] Dostupné z: <http://cistirny-cov.ekocis.cz/zemni-piskovy-filtr>.
- [7] ROUSSEAU, D.P.L., VANROLLEGHEM, P.A., and DE PAUW, N. Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis. *Ecological Engineering*, 23(3), 2004, p. 151–163.
- [8] BRIX, H. and ARIAS, C.A. The use of vertical flow constructed wetland for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering* 25(5), 2005, p. 491–500.
- [9] LANGERGRABER, G., PRESSLE, A., LEROCH, K., ROHRHOFER, R., and HABERL, R. Comparison of single-stage and two-stage vertical flow constructed wetland systems for different load scenarios. *Water Science and Technology*, 61(5), 2010, p. 1341–1348.
- [10] ČSN 75 6402 *Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel*. Český normalizační institut, 1998.
- [11] ŠÍMA J., HOLCOVÁ V., DUŠEK J. a DIÁKOVÁ K. Analytické přístupy ke studiu redoxních vlastností umělého mokřadu, *Chemické listy*, 100, 2006, s. 911–918.
- [12] Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2071-1050/6/10/6998/htm>.
- [13] KRIŠKA, M., ROZKOŠNÝ, M. a ŠÁLEK, J. Koncepce uspořádání malých ČOV využívajících přírodní způsoby čištění. In: *ČOV pro objekty v horách, sborník z konference*, 2011.
- [14] YE, F. and LI, Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering* 35(7), 2009, p. 1043–1050.
- [15] AYZA, S.Ç., AKTAŞ, Ö., FINDIK, N., and AKÇA, L. Phosphorus removal and effect of adsorbent type in a constructed wetland system. *Desalination and Water Treatment*, 37(1–3), 2012, p. 152–159.
- [16] MASI, F. and MARTINUZZI, N. Constructed wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation. *Desalination*, 215(1–3), 2007, p. 44–55.
- [17] HERRERA MELIÁN, J.A., MARTÍN RODRÍGUEZ, A.J., ARAÑA, J., GONZÁLEZ DÍAZ, O., and GONZÁLEZ HENRÍQUEZ, J.J. Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands. *Ecological Engineering*, 36(7), 2010, p. 891–899.
- [18] Dostupné z: <http://www.slideshare.net/MagnusMurray/constructed-wetlands-summary-code-innovation-feb-2013>.
- [19] ŠÁLEK, J., KRIŠKA, M. a ROZKOŠNÝ, M. Čistící procesy v půdním a mokřadním prostředí. In: *ČOV pro objekty v horách, sborník z konference*, 2011.
- [20] TANNER, C., SUKIAS, J.P., and UPSDELL, M.P. Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Water Research*, 32(10), 1998, p. 3046–3054.



[21] LI, M., ZHOU, Q., TAO, M., WANG, Y., JIANG, L., and WU, Z. Comparative study of microbial community structure in different filter media of constructed wetland. *Journal of Environmental Science*, 22(1), 2010, p. 127–133.

[22] ŠÁLEK J. a TLAPÁK V. *Přírodní způsoby čištění znečištěných povrchových a odpadních vod*. Praha: ČKAIT, 2006, 283 s. ISBN 80-86769-74-7.

[23] ŠÁLEK, J., ŽÁKOVÁ, Z. a HRNČÍŘ, P. *Přírodní čištění a využívání vody v rodinných domech a rekreačních objektech*. Brno: ERA, 2008, 124 s. ISBN 978-80-7366-125-0.

[24] HYÁNKOVÁ, E. a ŠÁLEK, J. Poznatky z výzkumu kolmace filtračního prostředí vegetačních kořenových čistíren s vertikálním prouděním. In: 3. *vodohospodářská konference 2003, sborník z konference*. Brno: FAST VUT, 2003.

[25] MATOUŠOVÁ, L. a MLEJNSKÁ, E. Filtrační náplně horizontálně a vertikálně protékavých umělých mokřadů, mechanismy vzniku kolmatice. In: Růžičková, I., Fuka, T., Wanner, J. (ed.) *VODA 2013, sborník z konference*. Brno: Tribun EU, 2013.

[26] GIKAS, G.D. and TSIHRINTZIS, V.A. A small-size vertical flow constructed wetland for on-site treatment household wastewater. *Ecological Engineering*, 44, 2012, p. 337–343.

[27] SULIMAN, F., FRENCH, H.K., HAUGEN, L.E., and SØVIK, A.K. Change in flow and transport patterns in horizontal subsurface flow constructed wetlands as a result of biological growth. *Ecological Engineering*, 27(2), 2006, p. 124–133.

[28] WINTER, K.J. and GOETZ, D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 48(5), 2003, p. 9–14.

[29] SIRIWARDENE, N.R., DELETIC, A., and FLETCHER, T.D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. *Water Research*, 41(7), 2007, p. 1433–1440.

[30] SCHWARZ, M., FUCHS, S., and HAHN, H.H. Nucleic acids: indicators for dynamic processes of clogging in soil filter systems. *Water Science and Technology*, 54(11–12), 2006, p. 183–189.

[31] REDDI, L.N., MING, X., HAJRA, M.G., and LEE, I.M. Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), 2000, p. 236–246.

[32] PEDESCOLL, A., CORZO, A., ÁLVAREZ, E., GARCÍA, J., and PUIGAGUT, J. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. *Water Research*, 45(12), 2011, p. 3579–3589.

[33] PEDESCOLL, A., UGGETTI, E., LLORENS, E., GRANÉS, F., GARCÍA, D., and GARCÍA, J. Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(8), 2009, p. 1216–1224.

[34] KAYSER, K. and KUNST, S. Processes in vertical-flow reed beds: nitrification, oxygen transfer and soil clogging. *Water Science and Technology*, 51(9), 2005, p. 177–184.

[35] HUA, G.F., ZHU, W., ZHAO, L.F., and HUANG, J.Y. Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: Insight from a laboratory study. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1–3), 2010a, p. 668–674.

[36] LI, H.Z., WANG, S., YE, J.F., XU, Z.X., and JIN, W. A practical method for the restoration of clogged rural vertical subsurface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment using earthworm. *Water Science and Technology*, 63(2), 2011, p. 283–290.

[37] WANNER, F. a MLEJNSKÁ, E. Uvolnění zakolmatovaného lože zemního filtru in-situ aplikací enzymů. *Vodní hospodářství*, 52(12), 2010, p. 15–18.

[38] HYÁNKOVÁ, E. Příčiny a možnosti minimalizace kolmatačních jevů ve filtračních náplních kořenových čistíren. In: KRIŠKA, M., ŠÁLEK, J. (ed.) *Přírodní způsoby čištění vod V, sborník z konference*. Brno: Nakladatelství CERM, 2007.

[39] TURON, C., COMAS, J., and POCH, M. Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and reuse of existing knowledge. *Ecological Engineering*, 35(12), 2009, p. 1710–1718.

[40] MALÁ, E., ŠÁLEK, J. a KRIŠKA-DUNAJSKÝ, M. Poznatky z výzkumu kolmace filtračního prostředí zemních filtrů. In: *Odpadové vody 2004, sborník z konference*, Nitra: AČE SR, 2004.

[41] Vyhláška č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Ministerstvo životního prostředí, 2001.

[42] OLESZKIEWICZ, J.A. and MAVINIC, D.S. Wastewater biosolids: An overview of processing, treatment and management. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 1(2), 2002, p. 75–88.

[43] UGGETTI, E., FERRER, I., LLORENS, E., GÜELL, D., and GARCÍA, J. Properties of Biosolids from Sludge Treatment Wetlands for Land Application. In: Vymazal, J. (ed) *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*. Springer, 2010, p. 9–20.

[44] NIELSEN, S. and WILLOUGHBY, N. Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark. *Water and Environmental Journal*, 19(4), 2005, p. 296–305.

[45] HUA, G., ZHU, W., ZHAO, L., and ZHANG, Y. Applying solubilisation treatment to reverse clogging in laboratory-scale vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 61(6), 2010b, p. 1479–1487.

[46] MLEJNSKÁ, E. Vyhodnocení in-situ aplikace bakteriálně-enzymatického preparátu do kolmatovaných kořenových čistíren. *VTEI*, 55(5), 2013a, s. 1–4.

[47] MLEJNSKÁ, E. Kolmatace – významné omezení funkčnosti umělých mokřadů – Jak jí předcházet, Jak jí odstranit?. In: Kriška, M. (ed.) *ČOV pro objekty v horách – Přírodní řešení nebo high tech?, sborník z konference*. Brno: Asociace pro vodu, Vysoké učení technické v Brně, 2013b.

## Autoři

**Ing. Eva Mlejnská<sup>1</sup>**

✉ [eva\\_mlejnska@vuv.cz](mailto:eva_mlejnska@vuv.cz)

**Ing. Miloš Rozkošný, Ph.D.<sup>2</sup>**

✉ [milos\\_rozkosny@vuv.cz](mailto:milos_rozkosny@vuv.cz)

<sup>1</sup>Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha

<sup>2</sup>Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Brno

Príspevek prošel lektorským řízením.

## CONSTRUCTED WETLANDS – DESIGN PARAMETERS, OPERATING EXPERIENCES AND INTENSIFICATION POSSIBILITIES

**MLEJNSKA, E.<sup>1</sup>; ROZKOSNY, M.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TGM Water Research Institute, p. r. i., Prague

<sup>2</sup>TGM Water Research Institute, p. r. i., Brno branch

**Keywords:** treatment processes – filtering materials – horizontal flow constructed wetland – clogging – design layout – treatment efficiency – vertical flow constructed wetland

Horizontal and vertical flow constructed wetlands belong among frequently used near-natural methods of treatment of wastewater from small municipalities in the Czech Republic. They consist of one or more filter fields connected in series or in parallel. Horizontal flow constructed wetlands are planted with suitable wetland vegetation, mostly common reed or reed canary grass. Well-functioning mechanical pretreatment is an essential part of these technologies, which protect the filter content of biological stage from clogging by solid particles.

Constructional arrangements of vertical and horizontal flow constructed wetlands including design parameters are very important and can significantly affect not only the treatment efficiency, but also life-time of the wetlands. At present in the world and in the Czech Republic numerous research papers are dedicated to the issue of new (alternative) filter materials, clogging of constructed wetlands, which is the most serious operational problem, and many other current issues.