

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 671*

*ISSN 1213-418X*

**Michal Kriška Dunajský**

**POKROČILÁ TECHNOLOGIE  
PŘÍRODNÍCH ČISTÍREN  
ODPADNÍCH VOD**

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
**Fakulta stavební**  
**Ústav vodního hospodářství krajiny**

**Ing. Michal Kriška Dunajský, Ph.D.**

**POKROČILÁ TECHNOLOGIE PŘÍRODNÍCH  
ČISTÍREN ODPADNÍCH VOD**

**ADVANCED TECHNOLOGY OF NATURAL WASTEWATER  
TREATMENT PLANTS**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE**



**BRNO 2020**

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Odpadní voda, přírodní čistírna, septik, horizontální filtr, vertikální filtr, stabilizační nádrž

## **KEYWORDS**

Waste water, constructed treatment wetland, septic tank, horizontal filter, vertical filter, stabilization tank

## **MÍSTO ULOŽENÍ:**

Originál práce uložen v archivu PVO FAST VUT v Brně.

# OBSAH

OBSAH .....	3
1 ÚVOD .....	5
2 CÍLE VĚDECKÉ PRÁCE.....	6
3 PROBLEMATIKA KOŘENOVÝCH ČISTÍREN.....	7
3.1 Legislativní rámec .....	8
3.2 přístupy k přírodní technologii.....	9
3.3 Vstupní návrhové parametry .....	10
4 ZAMĚSTNANECKÉ VYNÁLEZY .....	10
4.1 Odlehčovací komora .....	11
4.2 Pulzní vypouštěč .....	11
4.3 Anaerobní separátor .....	11
4.4 Pulzní vypouštěč druhé generace .....	12
4.5 Ostrovní aerace filtru .....	12
4.6 Denitrifikační reaktor vertikální.....	13
4.7 Distribuční systém pro vertikální filtry .....	13
4.8 Plovoucí ostrovy pro čištění vody.....	14
4.9 Denitrifikační bioreaktor horizontální .....	14
5 VÝSLEDKY A APLIKAČNÍ PŘÍNOS.....	14
5.1 Mechanické předčištění.....	15
5.1.1 Odlehčovací komora .....	15
5.1.2 Anaerobní separátor .....	16
5.2 Horizontální filtr .....	17
5.3 Vertikální filtrační pole .....	18
5.4 Nový koncept a uspořádání přírodních čistíren .....	20
5.5 Amoniakální dusík – provozní výsledky .....	22
5.6 Odstraňování dusičnanů – denitrifikace.....	23
5.6.1 Soustava vertikální + horizontální filtr.....	23
5.6.2 Soustava vertikální filtr + denitrifikační bioreaktor.....	24
5.6.3 Soustava vertikální filtr + nádrž s plovoucími ostrovy.....	24
5.7 Kolmatace - efektivní řešení následků .....	25
5.8 Kalové hospodářství „reed-bed“ .....	26
6 DISKUZE.....	27
7 ZÁVĚR.....	30
8 POUŽITÁ LITERATURA.....	31
ABSTRAKT.....	35



Jméno: Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D.  
Trvalé bydliště: Ptašínského 480/17, 60200 Brno  
E-mail: kriska.m@fce.vutbr.cz  
Tel.: +420 541 147 778  
Mobil: +420 774 889 747

## VZDĚLÁNÍ

1994-1999 Gymnázium Jiřího Wolker, Prostějov.  
1999-2004 Magisterské studium (Ing.), Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby.  
2004-2007 Doktorské studium, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby. Prezenční forma studia  
2007-2011 Doktorské studium, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby. Kombinovaná forma studia

## ZAMĚSTNÁNÍ

2007 - 2011 Asistent, Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodního hospodářství krajiny, úvazek 1,0  
2011 - 2012 Technický pracovník, Botanický ústav AV ČR, v.v.i., úvazek 0,5  
2013 – 2015 Výzkumný pracovník, projekt MPO TIP a TAČR-ALFA, úvazek celkem 0,6  
2011 – 2015 Odborný asistent, Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodního hospodářství krajiny, úvazek 1,0  
2015- současnost Odborný asistent, Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodního hospodářství krajiny, úvazek 0,3  
2015 – 2018 Výzkumný pracovník, projekt NAZV, úvazek 0,5  
2015 – současnost Manažer transferu technologií pro FAST, Vysoké učení technické v Brně, Centrum transferu technologií, úvazek 0,3  
2017 – současnost Business develop manager pro FAST, Vysoké učení technické v Brně, úvazek 0,5

# 1 ÚVOD

Problematika čištění odpadních vod je již značnou dobu zakotvena v neustále se rozvíjející národní i zahraniční legislativě, která klade postupně vyšší požadavky na kvalitu životního prostředí, respektive na míru znečištění povrchových i podzemních vod. V minulosti již proběhla řada významných investic a stavebních akcí, které zajistily omezení vypouštěného znečištění od největších producentů – velkých a měst, aglomerací nebo významných průmyslových podniků. Realizované stavební zásahy postupně vedly k pozvolnému zlepšení kvality vodních zdrojů. Dnes se nacházíme v situaci, kdy největší producenti mají čištění odpadních vod vyřešeno a pozornost se postupně zaměřuje na stále menší producenty. Typicky nevyřešeným příkladem menší obec do 500 obyvatel, decentralizované části obcí, skupiny rekreačních objektů či sezóně obývané objekty, horské chaty a penziony, které se potýkají s těžko řešitelným problémem nakládání s odpadními vodami.

Neustále se zpřísnující legislativa požaduje kvalitní hodnoty na odtoku již i od výše zmiňovaných drobných producentů znečištění. Přitom obce o velikosti do 500 obyvatel často řeší primárně otázku ekonomickou. Právě vybudování systému hospodaření s odpadní vodou často představuje značnou finanční zátěž jak pro obec, tak například i pro fyzickou osobu, která je vlastníkem nemovitosti. V současnosti navrhovaná řešení musí tedy jednak zvážit celkovou účinnost zvoleného systému tak, aby byly splněny legislativní požadavky, ale také zohlednit je nutné také finanční náročnost záměru. A právě zde se naskýtá příležitost pro vytvoření udržitelného systému čištění odpadní vody, který bude založen na principech moderních přírodních čistíren, které vykazují po stránce provozně ekonomické příhodnější variantu ve srovnání s konvenčními způsoby čištění odpadních vod.

Přírodní čistírny odpadních vod, dříve nazývané jako „kořenové čistírny“, doznaly zejména v posledních 10 letech i díky pracovišti Ústavu vodního hospodářství krajiny silného zlepšení. Technologie původních kořenových čistíren, dnes modernizovaná na „přírodní čistírny“, se začala objevovat a rozvíjet na začátku 90. let dvacátého století. Donedávna byla chápána kořenová čistírna jako alternativní varianta, založená na přirozených fyzikálních procesech, u níž většinou vstupuje zdroj elektrické energie buď v minimální míře, nebo je úplně vyloučen.

Samotný princip čištění spočívá nejprve ve zpomalení proudu vody a odsazení nerozpuštěných látek. Následuje cílená a specificky charakterizovaná vícestupňová filtrace, doplněná dočišťovacím stupněm – nádrží s přirozenými biologickými (samočisticími) procesy. Na první pohled se jedná o velice snadnou technologii, nicméně právě zjednodušení stálo v minulosti v České republice za problémy, doprovázenými často nedostatečnou čistící účinností ve srovnání s konkurenčními technologiemi. Výsledkem byl postupně přibývajícím počet kořenových čistíren, které vykazovaly stále horší výsledky oproti např. mechanicko-biologickým čistírnám, na jejichž účinnosti se tehdy intenzivně pracovalo.

Od roku 1989, kdy se do tehdejšího Československa dostaly informace o technologii kořenových čistíren ze západních států, bylo postupně přistoupeno k aplikaci „západních zkušeností“, k napodobování a úpravě zahraničních vzorů na specifickou situaci v našich zemích. Na začátku 90. let se začaly projektovat a realizovat první kořenové čistírny, začal se formovat i pohled na tento zvláště snadný způsob čištění odpadních vod. Postupem času se ukázalo, že nejspíše došlo k informačnímu šumu, resp. v České republice si vývoj vzal jen pozitivní zkušenosti s očekáváním všeobecně spasitelného řešení. Na povrch se postupně začaly dostávat nepřilíš uspokojivé výsledky, proto se jejich počet (nad 50 připojených obyvatel) postupně zpomalil na čísle 350 čistíren (Hudcová a kol., 2013). Ukázalo se, že nízkých odtokových koncentrací dosahuje pouze taková čistírna, která je připojená na kanalizační systém s vysokým podílem balastních vod (Kriška a Němcová, 2016) – tudíž je již přitékající odpadní voda vysoce koncentrovaná.

Důvodem ke špatným výsledkům vedl tedy zejména fakt, že řada čistíren je od prvopočátku nevhodně navržena. Druhou příčinou k neuspokojujícím výsledkům byl špatný přístup k provozování kořenových čistíren. Nízké účinnosti a provozní problémy vedly v logické

konstatování: V České republice neexistuje žádná kořenová čistírna, která by byla po stránce účinnosti konkurenceschopná, anebo aspoň přibližující se účinnostmi klasickým čistírnám odpadních vod. Právě tento argument v roce 2006 byl spouštěčem a osobní motivací pro změnu a nápravu. V roce 2006 se stalo napravení reputace kořenových čistíren obrovskou výzvou, která byla postupně naplňována prostřednictvím nových výsledků. Mezi nové výsledky lze dnes zahrnout nové projekční přístupy, registrované užité vzory, nové technologické detaily a uspořádání, spolehlivě fungující poloprovozní objekty i již realizované přírodní čistírny odpadních vod podle nových pravidel a postupů. Přestože technologie svým vývojem není stále u konce, přestože se povedlo zlepšit účinnosti ve sledovaných parametrech z minimálních možných nad 90 %, přesto se stále vyskytují silné názorové skupiny odpůrců přírodních čistíren. Mezi odpůrci se vyskytují nejen odborníci, řešící konkurenční čistírenské technologie, ale také lidé s reálně negativními zkušenostmi z přelomu století – často správci vodních toků a orgány životního prostředí.

Přestože jsou výsledky a špatné zkušenosti dnes již dávno překonané, vysvětlené a dokázané, dodnes se vyskytuje stále se opakující argumentace ve smyslu názoru starého 15 let: kořenové čistírny neodstraňují amoniakální dusík ( $N-NH_4^+$ ), neodstraňují celkový fosfor ( $P_{celk}$ ), v zimě nefungují vůbec, v létě zapáchají, jsou s nimi jen starosti, nikdy nedosahují toho, co bylo slíbeno apod. Všechny tyto a další podobné argumenty jsou vysvětleny a vyvráceny ve zpracované práci. Pomocí čistíren navržených podle vědeckých výsledků získaných na Ústavu vodního hospodářství krajiny, lze reálně docílit lepších výsledků, než pomocí klasického řešení čistírny odpadních vod. Přidanou hodnotou je minimální uhlíková stopa, vznikající za provozem přírodní čistírny, všeobecně levnější provoz čistírny, dlouholetá životnost, zadržaná voda v krajině, vytvoření dílčích ekosystémů, malých vodních nádrží, mokřadních systémů apod.

## 2 CÍLE VĚDECKÉ PRÁCE

Stav poznání technologie kořenových čistíren odpadních vod se od jejich nástupu na počátku 90. let dvacátého století ve své podstatě nijak výrazně neměnil v pozitivním slova smyslu, nedocházelo k postupnému zlepšování technologie, k navyšování čistících účinností, resp. měnil se postupně k horšímu mínění a povědomí o tehdy nazývaných „kořenových čistírnách“ (mezi neodbornou veřejností kořenovka, kořenová čistička apod.). Prvním jasným problémem, který lze identifikovat, je v minulosti nepřilíš přesné pochopení samotné technologie.

Vzhledem k široce negativním zkušenostem s kořenovými čistírnami v první dekádě 21. století byl první cíl jasný – zajištění nových kvalitních výsledků, jejich osvěta a popularizace mezi laickou i odbornou veřejnost. Práci na dílčích úkolech, popisujících principy technologie, navazující osvětou v rámci publikační činnosti a poukazováním na kvalitní výsledky byl tento cíl postupně plněn v průběhu předchozích let. Kořenové čistírny bylo z pohledu technické univerzity nutné začít nazývat jinou terminologií. Proto se v celé práci při výskytu sousloví „kořenová čistírna“ váže text na původní systémy. Naopak nové účinnější systémy, pracující na základě vyvinutých řešení, jsou označovány jako „přírodní čistírny“.

Jedním z hlavních vytyčených úkolů dlouhodobé práce bylo zvýšení účinnosti kořenové čistírny odpadních vod na konkurenceschopnou úroveň, zajištěné úpravou technologie na stále snadný systém a fungující primárně na přirozeném principu čištění. Kompromis mezi složitostí stavebního provedení a rozumnou provozní náročností přírodních čistíren je tedy dalším cílem práce. Ukázalo se, že četné výzkumné výsledky byly předem odepsány jako nepoužitelné v praxi, což usměrnilo vlastní výzkumné aktivity primárně na aplikovaný výzkum.

Kritika původních kořenových čistíren se téměř ve většině případů zaměřuje na dva hlavní nedostatky - nízká účinnost v odstraňování amoniakálního dusíku a náchylnost na ucpávání. Cílem je tedy napravení obou nedostatků zvýšením účinnosti a prevencí úpravou provozu kořenových čistíren odpadních vod. Tyto problémy jsou řešeny v rámci několika výzkumných prací, jsou podrobně popsány jak dílčí výsledky, tak celková koncepce přírodní čistírny, která svým



uspořádáním zajišťuje zároveň zabezpečení proti provozním poruchám a postupnému snižování čisticí účinnosti.

Jedním z posledních ale neméně důležitých úkolů bylo efektivní snížení provozních nákladů, čemuž byla věnována dlouholetá pozornost ve spolupráci s provozovateli čistíren odpadních vod. Stěžejním faktorem, určujícím výši stočného, bylo téměř ve všech případech kalové hospodářství. Cílem práce je tedy vyřešení vlastního kalového hospodářství, založeného na novém nebo inovovaném systému přírodě blízkém, vedoucím k reálnému snížení provozních nákladů přírodní čistírny odpadních vod.

### 3 PROBLEMATIKA KOŘENOVÝCH ČISTÍREN

Obecně platným faktem je, že výběr technologie závisí na spoustě faktorů. Investor, který zvažuje o realizaci čistírny odpadních vod, má možnost zvolit ze dvou základních typů čistíren. V České republice jsou nejznámějším typem čistírny založené na intenzivním přístupu – čisticí proces probíhá za regulované dotace vzduchu v hlubokých nádržích, které se nazývají aktivační. Hlavní výhodou takových čistíren odpadních vod je minimální zábor plochy a spolehlivý provoz a téměř jisté kvalitní výsledky. Určitou nevýhodou můžou být provozní náklady, které jsou vyšší než u čistírny, založené na přírodních čisticích procesech.

Oproti tomu existují typy čistírenských objektů, které pracují na za diametrálně odlišných podmínkách, tj. velice pomalu, většinou bez elektřiny. Tyto čistírny, nazývané např. jako extenzivní (Mlejnská a kol., 2009), využívají přirozených procesů, které v přírodě probíhají. Největší nevýhodou z dnešního pohledu je plošná náročnost. Naopak významnou výhodou původních kořenových čistíren je minimální náročnost na provoz – obsluha čistírny může být jen proškolená a ve výsledku tráví na čistírně podle velikosti jen několik minut denně až týdně. Součástí kořenových čistíren nejsou pohyblivá technologická zařízení (elektromotory, dmychadla, ventily ani mamutková čerpadla), která zatěžují provozovatele servisem a mohou vykazovat poruchový provoz.

Moderní přírodní čistírna pracuje na extenzivním přístupu, tj. pozvolna s cílem dosažení lepších odtokových koncentrací, než jakých je možné dosáhnout pomocí intenzivních čistíren v klasickém řešení. Nutno podotknout, že pokud má přírodní čistírna dosahovat srovnatelných výsledků, je potřeba ji navrhnout jako vícestupňovou, složitější je návrh i provoz a současně je potřeba eliminovat negativní lidský faktor (špatná obsluha), který může vézt ke zhoršené účinnosti. Základní rozdělení přírodních čistírenských technologií zahrnuje i v zahraniční literatuře spoustu specifických řešení, z nichž nicméně nemají všechna reálné uplatnění v mírném klimatu střední Evropy (Rozkošný a kol., 2014). V úvahu přichází tyto typy objektů, jejich kombinací a různých variant řešení podle požadavků na kvalitu odtékající vyčištěné vody:

- Septik
- Štěrbínová usazovací nádrž
- Horizontální filtr
- Vertikální filtr
- Stabilizační nádrž

Jako nejčastější uspořádání podle požadavku na kvalitu vyčištěné vody se uplatní sestavy, podrobněji popsane samotné habilitační práci:

- Septik + vertikální filtr
- Štěrbínová usazovací nádrž + horizontální filtr + vertikální filtr
- Předchozí dvě řešení + denitrifikační filtr
- Septik + soustava dvou vertikálních filtrů



### 3.1 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

Jednou z příčin, vedoucích k historickému odepsání technologie kořenových čistíren odpadních vod byl specifický výklad toho, jak má být čistírna navržena. Stejně jako v minulosti, ani dosud v platném nařízení vlády (č. 401/2015 Sb.) není při vypouštění vyčištěných odpadních vod do povrchových vod u velikosti zdroje znečištění do 500 EO zakotven požadavek na odstraňování amoniakálního dusíku ( $N-NH_4^+$ ). Projektanti proto navrhovali taková řešení, která právě amoniakální dusík odstraňují s minimální účinností. Výsledky výzkumu dokonce přinesly závěry, že ve specifických situacích může dokonce samotná kořenová čistírna  $N-NH_4^+$  produkovat (Křiška a Němcová, 2016). Oproti zahraničí se v České republice navrhovaly od 90. let 20. století kořenové čistírny, jejichž hlavní filtrační stupeň byl založen na horizontálním průtoku odpadní vody. Návrh takové čistírny je snadný, rychlý, stejně jako samotná realizace i provoz. Nicméně, jak ukázal vývoj v České republice, horizontálně protékané filtrační systémy s vegetací vysázenou na povrchu jsou schopny obstojně redukovat pouze nerozpuštěné látky (NL), které při eliminaci zároveň snižují hodnoty  $CHSK_{Cr}$  a  $BSK_5$ . Právě tyto tři parametry lze ve své podstatě tedy odstranit velice snadno i pomocí nejjednoduššího uspořádání, které má ovšem jeden zásadní nedostatek – ostatní znečištění ( $N-NH_4^+$ ,  $N_{celk}$  a  $P_{celk}$ ) jsou eliminována v minimální míře. Projektanti mohou navrhovat toto řešení v souladu s platným nařízením vlády i dnes, při procesu povolování stavby však naráží na oprávněnou nelibost dotčených orgánů. Právě s odkazem na nařízení vlády, které stanovuje emisní standardy a v podstatě umožňuje projektantům navrhovat extrémně jednoduché kořenové čistírny, se uzavírá cesta a motivace k návrhům kvalitnějších řešení kořenových čistíren, které by mohly po stránce kvality vypouštěné odpadní vody konkurovat jiným technologiím. Přitom podle různého typu uspořádání jednotlivých filtračních polí se může účinnost kořenové čistírny např. u parametru  $N-NH_4^+$  pohybovat v rozsahu 0 - 99,9 %.

Skutečnost se tedy vyvinula v situaci, kdy byly po dvě desetiletí navrhovány čistírny, které nedostatečně odstraňovaly amoniakální dusík. Pakliže vzniká požadavek na odstraňování  $N-NH_4^+$  (ze strany investora, správce toku, odboru životního prostředí aj.), je potřeba řešit projektovou dokumentaci jinak než jen jednoduchým systémem výše uvedeným.

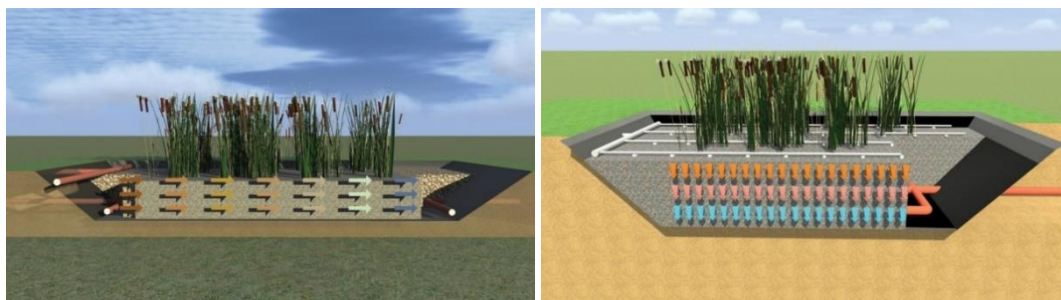
**Tab. 1 Dosažitelné hodnoty pro jednotlivé ukazatele znečištění při použití BAT**

Kat.	Nejlepší dostupná technologie	$CHSK_{Cr}$		$BSK_5$		NL		$N-NH_4^+$				
		Konc. (mg/l)	Účinnost [%]	Konc. (mg/l)	Účinnost [%]	Konc. (mg/l)	Konc. (mg/l)	Účinnost [%]				
[EO]		p	m	p	m	p	m	Prům.	m			
<500	Nízko až středně zatěžovaná aktivace nebo biofilmové reaktory	110	170	75	30	50	85	40	60	-	-	-
500-2000	Nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací	75	140	75	22	30	85	25	30	12	20	75

Vývoj a výzkumné aktivity Ústavu vodního hospodářství krajiny v oblasti kořenových čistíren odpadních vod se soustředil i na již navržená a provozovaná řešení. V rámci intenzifikace technologicky zastaralých systémů, založených na výše uvedené soustavě „štěrbínová usazovací nádrž + horizontální kořenový filtr“, byl podrobně popsán princip pulzního prázdnění horizontálních filtrů (Křiška a Němcová, 2016). Uvedený princip, resp. úprava filtru, zajistí zvýšení účinnosti ve všech sledovaných znečištění, které vyžadují pro odbourání dostupný kyslík. Podrobněji jsou výsledky popsány níže v kap. 5.3.

Z uvedené kritiky plyne, že soustavy, navrhované od 90. let dvacátého století, jsou z pohledu účinnosti již velice zastaralé. Přesto se stále nachází početná množství projektantů (většinou velice zkušených vodohospodářů), kteří se z minulosti nepoučili a tato řešení navrhují stejně jako před 30 lety.

Mnohem lepším řešením, které na první pohled je minimálně odlišné, ale současně mnohem více účinné, je řešení, využívající coby hlavní stupeň čištění vertikální filtr s vegetací.



Obr. 1 A) Schéma horizontálního filtru B) vertikálního filtru s vegetací

Do roku 2010 byl počet reálně provozovaných vertikálních filtrů v České republice minimální (téměř nedohledatelné). Současně se v rámci přeshraniční spolupráce ukázalo, že již za hranicemi České republiky jižním a západním směrem nemají s kořenovými čistírnami tak negativní zkušenosti. Naopak, kořenové čistírny v zahraničí jsou považovány za technologii naprosto konkurenceschopnou, což v roce 2010 bylo v České republice nemyslitelným argumentem. Jako hlavní vzor při práci na pochopení technologie jsme na Ústavu vodního hospodářství krajiny vybrali vzhledem k dostupnosti Rakousko, kde jsou čistírny založené na vertikálních filtrech s vegetací plnohodnotným technickým řešením, které dokáže bez problémů konkurovat jiným typům čištění odpadních vod. V rámci novostaveb jsou tyto přírodní čistírny zastoupeny z 30 % (Langergraber a Weissenbacher, 2017), přičemž celkový počet vertikálních systémů je 5500 (v kategorii 50–500 EO). Přístup ke kořenovým čistírnám je zde odlišný již od samotné projekce – používají jiná uspořádání kořenových polí, jiné technologické detaily řešení, jiné filtrační materiály apod.

### 3.2 PŘÍSTUPY K PŘÍRODNÍ TECHNOLOGII

Odborná veřejnost se od proniknutí technologie do praxe v 90. letech zformovala do dvou názorových skupin, které se v pohledu na kořenové čistírny zásadně rozcházejí. Za vším stojí, jak bylo uvedeno výše, nejspíše velice jednoduchá technická řešení, která vykazují nízkou čistící účinnost v odstraňování amoniakálního dusíku ve srovnání s čistírnami založenými na aktivačním procesu (Křiška Dunajský a Němcová Pumpřlová, 2016). Mezi oběma názorovými skupinami stojí Ústav vodního hospodářství krajiny Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, přinášející nové technologické přístupy jak na základě hlubšího pochopení hydraulického systému, tak na základě několika poloprovozních zařízení. Toto pracoviště, které má dlouholetou tradici ve výzkumné, výukové, vývojové i konzultační činnosti, soustředící se na oblast přírodních způsobů čištění odpadních vod, posunulo toto téma díky několika aplikovaným výzkumům a užitným vzorům za posledních 10 let výrazným krokem vpřed. Za největší úspěch řešitelského kolektivu lze považovat reálné výsledky, které ukazují, že na odtoku z přírodní čistírny lze dosáhnout často vyšší kvality vody, než je často kvalita vody v samotném vodním toku, do něhož je vyčištěná voda odváděna (Rozkošný a kol., 2014). Ve srovnání s původními systémy s nízkými účinnostmi dosahuje několik vlastních poloprovozu i provozu účinností:  $CHSK_{Cr} = 90\text{--}95\%$ ,  $BSK_5 = 85\text{--}90\%$ ,  $NL = 94\text{--}98\%$ ,  $N-NH_4^+ = 90\text{--}99\%$ ,  $N_{celk} = 85\%$ ,  $P_{celk} = 80\%$ . Hodnoty korespondují s výsledky na jedné z prvních víceetapových testovacích kořenových čistíren v České republice (Vymazal a Kröpfelová, 2015).

Stěžejním problémem této technologie je právě jednoduchost samotného principu přírodního čištění odpadních vod. Projekční kanceláře, pohybující se ve vodohospodářské praxi, prodávaly tehdy kořenové čistírny jako alternativu pro investory, kteří se nechtějí o čistírnu starat, resp. chtějí mít bezúdržbové řešení. Projektanti nabízeli řešení, které z odpadní vody vytvoří vodu vyčištěnou, kterou lze bez problémů vypouštět do vodního toku dle aktuálně platných nařízení vlády. Kořenové čistírny trpěly postupně stále více se projevujícími neduhy, které budou popsány níže. Projektanti

současně ale ukazovali na odtokové parametry, které byly pod úrovní stanovených limitů pro vypouštění vod do recipientu. Situace se vyvinula do takového stádia, že čistírny vykazují sice dostatečnou čistící účinnost z pohledu legislativy (resp. z pohledu povolení k vypouštění odpadních vod), nicméně již při vizuální posouzení vyčištěné vody i laik poznal nekvalitně vyčištěnou odpadní vodu. Odtok byl zakalený a silně zapáchal.

Konkurenční boj mezi jednotlivými výrobci mechanicko-biologických čistíren vedl postupně ke zdokonalení aktivačních čistíren až na maximální možné účinnosti, které jsou zakotveny v nařízení vlády jako „nejlepší dostupná technika“. Mezitím se kořenové čistírny postupně dostávaly do pozadí a byly čím dál častěji chápány jako alternativa pro vysoce specifické situace. Nízké účinnosti vedou postupně téměř k zákazu realizací a povolování kořenových čistíren, což se projevilo a dosud projevuje argumentací při povolovacích procesech. Kořenová čistírna není nejlepší dostupná technologie, proto nemůže být povolena jako vhodné technické řešení – takto běžně, a přitom v rozporu s výkladem definice BAT argumentují úředníci odborů životního prostředí a správci vodních toků.

### 3.3 VSTUPNÍ NÁVRHOVÉ PARAMETRY

Kořenové čistírny odpadních vod patří mezi technologie, o nichž do nedávné doby nebylo ze strany projektantů zcela srozumitelné, jakým způsobem fungují, jak spolehlivě odstraňují daný ukazatel znečištění apod. Mezi sledovanými ukazatele patří níže popsané:  $CHSK_{Cr}$ ,  $BSK_5$ ,  $NL$ ,  $N-NH_4^+$ ,  $N_{celk}$ ,  $P_{celk}$  – vše dané nařízením vlády č. NV 401/2015 Sb., resp. přílohou č.1, tabulkou 1a: Emisní standardy. Pokud je při využití přírodních čistírenských technologií cílem i odstranění amoniakálního dusíku, je nutné přistoupit k řešení, založeném na vertikálním filtru, který je provozován jako pulzně skrápěný (detaily viz níže v kapitole 5.4).

Kořenová nebo přírodní čistírna odpadních vod, jak pramení z jejího principu, si ve srovnání s jinými technickými řešeními poradí se sníženými koncentracemi znečištění, které se často vyskytují na jednotných kanalizačních systémech. Přítomné balastní vody mohou způsobovat tak silné naředení, že konvenčním čistírnám odpadních vod způsobují provozní problémy, stejně jako kombinace kolísajících průtoků s rozkolísaným naředením.

Naopak zvýšené koncentrace znečištění je schopna přírodní čistírna úspěšně odstranit i znečištění z průmyslových areálů apod. Odpaní vodu s vysokou koncentrací znečištění je nutné bezpodmínečně čistit vícestupňovým filtračním systémem. Návrh vícestupňového systému musí zahrnovat jak stanovení účinnosti podle parametru  $BSK_5$ , tak zahrnutí i ostatních dimenzí jednotlivých čistírenských objektů dle ČSN 756402. Na návrh i provoz kořenové nebo přírodní čistírny odpadních vod má zásadní vliv typ stokové soustavy. Na jednotné kanalizaci jsou vody zejména za srážkových situacích naředené, je potřeba náležitě dimenzovat mechanické předčištění, které se může v bezdeštném období jevit jako předimenzované (Rozkošný a kol, 2010). V případě dešťů nesmí docházet k vyplavování usazených látek ze septiku nebo usazovací nádrže.

V habilitační práci jsou podrobněji popsány jednotlivé objekty, které při propojení vytváří funkční systém – jedná se o septik, horizontální filtr, vertikální filtr a další související prvky.

V neposlední řadě jsou v práci podrobněji popsány problémy – amoniakální dusík a ucpávání filtračních náplní. Oba tyto problémy jsou často hlavním argumentem proti dalšímu uplatnění této extenzivní technologie.

## 4 ZAMĚSTNANECKÉ VYNÁLEZY

V souvislosti s kořenovými čistírnami odpadních vod bylo realizováno několik výzkumných projektů, většina z nich se zaměřovala na stěžejní problémy v praxi. Téměř z každého výzkumného projektu vznikl minimálně jeden výsledek typu užitečný vzor. Jak ukazují vlastní výsledky, při uplatnění popsanych užitečných vzorů do technologie přírodní čistírny jedná o konkurenceschopné řešení, vykazující s největší pravděpodobností i kvalitnějších výsledků než konvenční čistírenské

technologie. Mezi nejvýznamnější výsledky typu užitný vzor související s kořenovými čistírnami, patří níže popsané registrované užitné vzory. Ve své podstatě zahrnutí většiny výsledků do jednoho systému čistírny odpadních vod vytváří z kořenové čistírny odpadních vod čistírnu přírodní. Nové názvosloví je dáno výrazně kvalitnějšími odtokovými parametry, je tedy snahou o vymanění se z negativního pohledu na kořenové čistírny.

#### 4.1 ODLEHČOVACÍ KOMORA

Prvním užitným vzorem je řešení zlepšující stávající neuspokojivý stav odlehčovacích komor. Jedná se o první užitný vzor, jelikož odlehčovací komora často tvoří u kořenových čistíren první objekt zapojený v systému čištění odpadních vod. Prostřednictvím užitného vzoru je možné řešit velice snadnou rekonstrukci většiny nevhodně fungujících odlehčovacích komor před kořenovými čistírnami, budovanými zejména v 90. letech 20. století.

Číslo přihlášky 2012-26925

Číslo zápisu 24924

Datum podání 01.11.2012

Název **CS:** Odlehčovací komora pro čistírnu odpadních vod  
**EN:** Overflow of wastewater treatment plant

Přihlašovatel/Majitel Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika

Původce Ing. Ph.D. Michal Křiška Dunajský, Prostějov, Česká republika

#### 4.2 PULZNÍ VYPOUŠTĚČ

Zařízení pomáhá rozkolísání úrovně odpadní vody na horizontálních filtrech, které jsou součástí většiny původních kořenových čistíren (přibližně 300 objektů). Měnicí hladina nejen zvyšuje čistící účinnost, ale zároveň zajistí problém s regenerací filtračního materiálu. Popsaným zařízením lze upravit filtrační objekt na pulzně vypouštěný horizontální filtr. Případně je možné osazení zařízení před filtr vertikální, který bez rozkolísaného průtoku nemůže být účinný.

Číslo přihlášky 2013-27602

Číslo zápisu 25544

Datum podání 14.03.2013

Název **CS:** Zařízení k automatickému vypouštění vody z nádrže po dosažení definované maximální hladiny  
**EN:** Device for automatic discharge of water from a tank after achievement of defined maximum level

Přihlašovatel/Majitel Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika

Původce Ing. Ph.D. Michal Křiška-Dunajský, Prostějov, Česká republika

#### 4.3 ANAEROBNÍ SEPARÁTOR

Vyráběné septiky vykazují nedostatečnou separační schopnost takovou, aby nedocházelo ke kolmataci navazujícího čistícího stupně - filtračního prostředí. Nové řešení, optimalizující trajektorii vodního elementu ve vícekomorovém uspořádání, zlepšuje účinnost septiků natolik, že je nově zaneseno do ČSN 756402 jako alternativa k septikům – anaerobní separátor.

Číslo přihlášky	2014-29263
Číslo zápisu	27142
Datum podání	21.02.2014
Název	<b>CS:</b> Vícekomorový septik <b>EN:</b> Multi-compartment septic-plant tank
Přihlašovatel/Majitel	ASIO spol. s r.o., Spáčilka 83, 664 51 Jiříkovice, Česká republika Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 1, 601 90 Brno, Česká republika
Původce	Ing. Karel Plotěný, Jiříkovice, Česká republika Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D., Prostějov, Česká republika

#### 4.4 PULZNÍ VYPOUŠTĚČ DRUHÉ GENERACE

Technické řešení se týká zařízení k vypouštění vody z akumulárního prostoru šachty po dosažení nastavitelné spouštěcí hladiny, fungujícího po seřízení bez nutnosti další obsluhy a bez nutnosti použití elektrické energie. Zařízení plní obdobnou funkci jako užitný vzor č. 25544, navíc se soustředí na nedostatky – nemožnost přesné regulace spouštěcí a vypínací hladiny, možnost dodatečné instalace výrobním uspořádáním (namísto montování komponentů na místě instalace). Bez tohoto dávkovacího zařízení nemohou být vertikální filtry provozovány s vysokou účinností.

Číslo přihlášky	2015-30811
Číslo zápisu	28083
Datum podání	03.03.2015
Název	<b>CS:</b> Zařízení pro automatické rázové vypouštění kapaliny <b>EN:</b> Device for automatic sudden discharge of liquid
Přihlašovatel/Majitel	Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika
Původce	Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D., Prostějov, Česká republika

#### 4.5 OSTROVNÍ AERACE FILTRU

Při řešení výzkumných úkolů se ukázalo, že vertikální filtry jsou výrazně účinnějšími než filtry horizontální. Proto se hledala cesta, jak intenzitu filtrů ještě zvýšit. Nucená aerace prostřednictvím ostrovního systému coby zdroje elektrické energie se nabízela jako jedna z cest. Pozitivní výsledky byly naměřeny na testovací soustavě, několik provozních objektů je připraveno k instalaci zařízení.

Číslo přihlášky	2015-31311
Číslo zápisu	29181
Datum podání	13.07.2015
Název	<b>CS:</b> Sestava pro nucenou aeraci vertikálního skrápěného filtru <b>EN:</b> Assembly for forcible arrestment of vertical percolating filter
Přihlašovatel/Majitel	Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika
Původce	Ing. Miroslava Němcová, Holešov - Tučapy, Česká republika Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D., Prostějov, Česká republika

#### 4.6 DENITRIFIKAČNÍ REAKTOR VERTIKÁLNÍ

Na základě předešlých pozitivních výsledků, souvisejících s účinnou nitrifikací na vertikálním filtru s vegetací, byl vyřešen problém s odstraňováním amoniakálního dusíku. Jelikož finálním produktem nitrifikace je dusičnan, bylo přistoupeno k řešení odstraňování dusičnanů. Jednou z možností, jak pomocí přirozeného přírodního řešení odstranit dusičnany z odpadní vody, je uspořádání prostřednictvím denitrifikačních bioreaktorů – filtrů s organickou náplní. Prosazení a aplikace v praxi je ale otázkou úpravy legislativy a tedy dlouhodobým úkolem do budoucna.

Číslo přihlášky 2016-33030  
Číslo zápisu 30185  
Datum podání 09.11.2016  
Název **CS:** Denitrifikační vertikální bioreaktor  
**EN:** Vertical denitrifying bioreactor

Přihlašovatel/Majitel Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 1, 601 90 Brno, Česká republika  
DEKONTA, a.s., Dřetovice 109, 273 42 Stehelčevy, Česká republika

Původce Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D., Prostějov, Česká republika  
Ing. Karel Hrich, Ph.D., Říčany, Česká republika  
doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D., Brno - Nový Lískovec, Česká republika  
Ing. Miroslava Němcová, Holešov - Tučapy, Česká republika  
Ing. Michal Šereš, Ph.D., Praha 6 - Řepy II, Česká republika  
Ing. Tereza Hnátková, Ph.D., Praha 6, Česká republika

#### 4.7 DISTRIBUČNÍ SYSTÉM PRO VERTIKÁLNÍ FILTRY

Vývoj situace ukázal, že řada projektantů z oblasti přírodních způsobů čištění často převezme nebo okopíruje řešení, které považuje za své. Přesto, že cílem přírodních způsobů čištění je možnost realizace svépomocí, bylo přistoupeno zejména u větších systémů k autorské ochraně na filtry o velikosti nad 150 m<sup>2</sup>, což jsou již natolik rozsáhlé stavby, že je většinou musí realizovat stavební firmy. Popsaný systém zahrnuje optimální uspořádání po hydraulické stránce – byť optimalizace zahrnuje i investiční náročnost. Znamená to tedy, že distribuční systém je kompromisem mezi technickými možnostmi a investiční náročností.

Číslo přihlášky 2017-33547  
Číslo zápisu 30714  
Datum podání 24.03.2017  
Název **CS:** Zařízení pro distribuci vody při pomalých průtocích  
**EN:** A device for water distribution at low flow rates

Přihlašovatel/Majitel Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika  
Původce Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D., Prostějov, Česká republika  
Ing. Miroslava Pumprlová Němcová, Holešov, Česká republika

#### 4.8 PLOVOUCÍ OSTROVY PRO ČIŠTĚNÍ VODY

Užitný vzor vznikl v rámci výzkumného projektu NAZV QJ1620040. Výsledek lze bez jakékoli úpravy aplikovat na stabilizační nádrže, případně na mokřadní tok s příznanou vodní hladinou s cílem eliminace projevů eutrofizace, podpory samočisticích procesů a vytvoření denitrifikačního prostředí pro eliminaci dusičnanového dusíku ještě před vypuštěním odpadní vody do recipientu.

Číslo přihlášky	2017-34059
Číslo zápisu	31169
Datum podání	30.08.2017
Název	<b>CS:</b> Zařízení pro eliminaci vstupu vybraných rizikových látek z malých vodních nádrží do vodních toků <b>EN:</b> A device for eliminating the entry of selected hazardous substances from small water reservoirs into watercourses
Přihlašovatel/Majitel	Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika
Původce	Ing. Michal Křiška-Dunajský, Ph.D., Prostějov, Česká republika Ing. Miroslava Pumprlová Němcová, Brno - Řečkovice, Česká republika

#### 4.9 DENITRIFIKAČNÍ BIOREAKTOR HORIZONTÁLNÍ

Technické řešení má za cíl redukcí dusičnanů z vody – ať už se jedná o zemědělské vody odtékající z meliorací nebo vyčištěnou odpadní vodu. Princip vychází z předchozího zařízení (kap. 4.6, nicméně je po technické stránce jednodušší a provozně spolehlivější za dosažení srovnatelných výsledků. Přes velice pozitivní výsledky dosud nebyl užitný vzor licencován a kromě poloprovozního zařízení nebyl v praxi využit.

Číslo přihlášky	2018-35617
Číslo zápisu	32426
Datum podání	15.11.2018
Název	<b>CS:</b> Denitrifikační bariéra v podpovrchových odtocích ze zemědělských půd <b>EN:</b> A denitrification barrier in subsurface discharge from agricultural soils
Přihlašovatel/Majitel	Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, Česká republika
Původce	Ing. Michal Křiška - Dunajský, Ph.D., Brno, Česká republika Ing. Karel Hrich, Ph.D., Říčany, Česká republika doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D., Brno - Nový Lískovec, Česká republika Ing. Miroslava Pumprlová - Němcová, Brno, Řečkovice, Česká republika

### 5 VÝSLEDKY A APLIKAČNÍ PŘÍNOS

Jak již bylo uvedeno výše, přírodní čistírna odpadních vod je složena z několika stavebních prvků, zapojených v sérii (více filtračních polí bývá zapojeno paralelně, u větších ČOV je zapojení sériově-paralelní), pracujících společně jako celek. Soustava musí být složena z mechanického stupně čištění, hlavního stupně čištění a dočištění. Samotné dočištění je potřebné pouze v případě



nutnosti odstranění celkového dusíku, resp. nutnosti dodržení přísnějších limitů, než které ukládá vždy platné nařízení vlády pro vypouštění do povrchových nebo podzemních vod.

Práce přináší několik dílčích výsledků, které při společném uplatnění vytváří výrazně účinnější a spolehlivější systém, který je i po ekonomické stránce výrazně výhodnější ve srovnání s klasickým uspořádáním mechanicko-biologické čistírny odpadních vod. Mezi vybrané výsledky, které jsou uplatnitelné v širším měřítku a zároveň jsou významné buď pro VUT nebo technologii samotnou, patří zejména:

- mechanické předčištění – řešení nového uspořádání odlehčovací komory a šterbinové usazovací nádrže,
- anaerobní separátor – coby náhrada klasických vícekomorových septiků,
- horizontální filtr – drobné úpravy konfigurace na základě zjištěných poloprovozních měření, zvýšení čistící účinnosti úpravou provozních podmínek,
- vertikální filtr – nová technologie řešení filtrace odpadní vody, výrazně vyšší účinnosti filtru, popis podmínek vedoucích ke kvalitním výsledkům,
- řešení odstraňování amoniaku a dusičnanů – pomocí tří různých inovací a technických řešení,
- vyřešení kolmatace, kalového hospodářství a celkové koncepce přírodních čistíren.

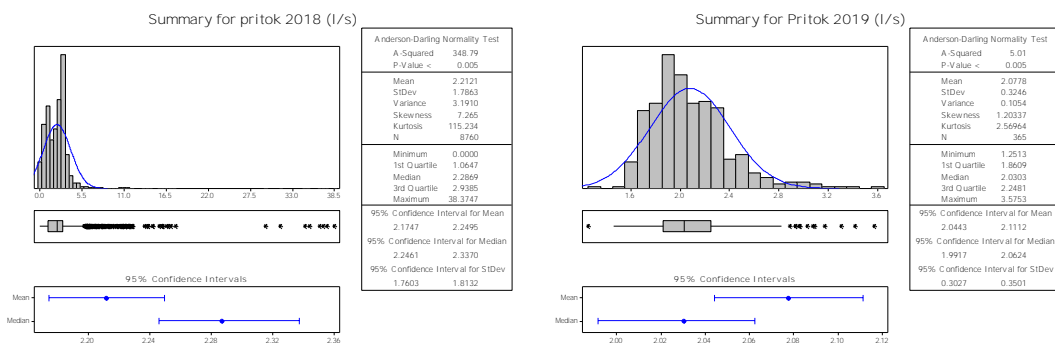
## 5.1 MECHANICKÉ PŘEDČIŠTĚNÍ

Mechanický stupeň předčištění odpadní vody, coby součásti čistírny odpadních vod, tvoří několik objektů, které postupně z protékající odpadní vody odstraňují plovoucí částice od nejhrubších po nejjemnější. Na odtoku z mechanického stupně by se měla vyskytovat minimální koncentrace nerozpuštěných látek proto, aby se udržel technicky nejdéle trvající bezporuchový provoz filtračního pole. Součástí mechanického stupně čištění je i odlehčovací komora, řazena velice často jako první objekt na kořenové čistírně odpadních vod.

### 5.1.1 Odlehčovací komora

Vzhledem k sériovému zapojení jednotlivých čistících stupňů, je odlehčovací komora z pohledu spolehlivosti kořenové čistírny ten nejdůležitější prvek. Pokud vykazuje poruchovost odlehčovací komora (většinou se jedná o nevhodný návrh, spojený s nedodržováním maximálně možných průtoků), není možné zajistit dlouhodobou udržitelnost čistírny, doprovázenou nízkými koncentracemi znečištění na odtoku. Inovace zastaralých a nefungujících odlehčovacích komor byla stěžejním úkolem výzkumného projektu MPO TIP FR-TI3/778. V roce 2012 byla provedena úprava odlehčovací komory na ČOV v obci Dražovice, přičemž řešení je vykázáno současně jako funkční vzor a užitný vzor č. 24924. Užitný vzor byl dle teoretických hydraulických výpočtů sestrojen v modelovém měřítku 1:1 v laboratorním prostředí Ústavu vodního hospodářství krajiny. Hydraulické výpočty a testování průtočného žlabu bylo zpracováno v rámci práce (Herman, M., 2012), realizace řešení in-situ byla potom dílčí částí náplní v navazujícím roce (Pobořil, J., 2013). Od roku 2013 je funkční vzor odlehčovací komory zapojen v provozních podmínkách na čistírně odpadních vod v obci Dražovice, přičemž v letech 2018 a dále je na přítoku osazeno hladinové čidlo, prostřednictvím něhož se vyhodnocují průtokové poměry na Thomsonově ostrohranném přelivu.

Rok 2020 je již osmým rokem, kdy je odlehčovací komora po provedené rekonstrukci podle užitného vzoru VUT v bezporuchovém provozu a vykazuje požadované výsledky (obr.2 ). V uvedeném grafu se vyskytují pouze průtokové extrémy, spojené s čištěním lapáku písku a uvolněním hladinového čidla vlivem poškození nosné konstrukce. Pozitivní důsledek pro provozovatele je eliminace kolmatačních procesů – filtrační náplně na horizontálních filtrech nevykazují náchylnost k ucpávání.



Obr.2 Statistické vyhodnocení přítoků na ČOV Dražovice v roce 2018 a 2019

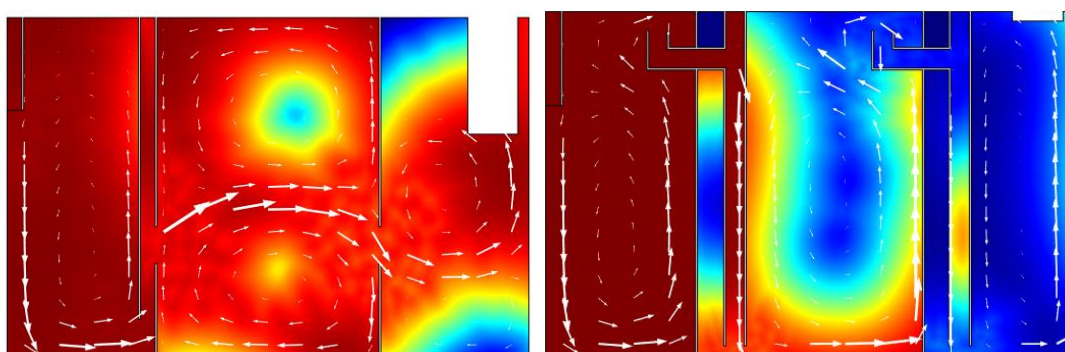
Odlehčovací komora plní svou funkci a stává se vzorem pro rekonstrukce jak straších kořenových čistíren odpadních vod, tak pro nově projektované objekty.

### 5.1.2 Anaerobní separátor

Součástí mechanického předčištění je vždy určitý typ usazovací nádrže – u kořenových čistíren se většinou jedná o šterbinovou usazovací nádrž nebo septik. V habilitační práci je podrobně popsáno několik pokusů o zvýšení účinnosti šterbinové usazovací nádrže, nicméně právě letité pozorování na ČOV v obci Dražovice ukázalo, že se nejedná o problematický objekt. Stěžejní je správný návrh odlehčovací komory, řazené před usazovací nádrží.

Větší pozornost je ovšem věnována novému typu usazovacích nádrží – anaerobnímu separátoru. Tato technologická novinka přišla postupně v letech 2012–2014, vycházela z tříkomorového septiku, ale eliminuje nedostatky septiku za současného zlepšení čistící účinnosti. V rámci řešeného projektu (TAČR: TA02021032) byl vyvinut funkční vzor budoucího anaerobního separátoru, který byl současně ochráněn užitečným vzorem (kap. 4). Dílčím cílem projektu byla optimalizace doby zdržení odpadní vody ve čtyřkomorovém septiku a eliminace zkratového proudění.

Výsledky z vývoje modernizovaného vícestupňového uspořádání sedimentačních prostor byly nejprve publikovány v diplomové práci (Šrámková, D., 2013). Ukázkou může být obr. 3, v němž u levé varianty dochází k rychlému průtoku vody od přítoku k odtoku (původní voda = modrá, čerpaná voda = červená) a u pravé varianty uspořádání dochází k výrazně lepšímu zadržení vody již v první komoře septiku (barevná legenda totožná s předchozím).

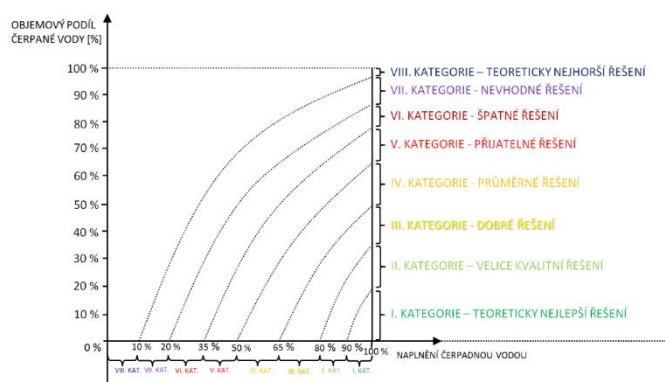


Obr. 3 Zjednodušená simulace mísení dvou kapalin ve tříkomorovém septiku

Závěry a doporučení byly následně rozvinuty prostřednictvím laboratorního měření, které bylo prováděno na výzkumném pozemku Ústavu vodního hospodářství krajiny v roce 2014 (Hradilová, I., 2015), případně publikovány na seminářích, určených pro výrobce septiků a domovních čistíren odpadních vod (Kriška a Hyánková, 2013). V rámci diplomové práce I. Hradilové byla zároveň vyvinuta a opakovaně ověřena nová metoda pro testování využitelnosti prostoru usazovacích nádrží (vícekomorových septiků). Byla vyvinutá vlastní testovací metoda, pomocí které byla srovnávána a

následně vyhodnocována hydraulická účinnost (využití vnitřního prostoru vícekomorových septiků). Měření je založeno na zjišťování rozdílů konduktivity vody ve vybraných profilech při ustáleném přítoku kapaliny do septiku (neměnná okrajová podmínka v čase). Pro účely vzájemného srovnání více septiků, resp. více konfigurací s různými objemy, bylo nutné zavést několik zásadních zjednodušení, resp. konstantních okrajových podmínek, protože napodobit náhodné průtoky v průběhu dne není realistické. Znamená to tedy, že metoda neodpovídá skutečným průtokovým poměrům. Pokud by ale byly všechny vyráběné septiky testovány prostřednictvím snadné, levné, rychlé a účinné metody, byly by tyto výrobky následně srovnatelné navzájem. Na základě zjištěných možností úpravy septiků bylo uvedeno 8 klasifikačních tříd. Očekává se, že vlivem mísení, zkratových proudů, nosných prvků, výztuží, přepážek, tvaru komory, umístění norných stěn, velikosti otvorů mezi komorami, aj. fyzikálních charakteristik, se docílí ve stejném čase vždy různé koncentrace slané vody v odtokovém prostoru.

Dle výše popsané metody bylo provedeno několik úprav třikomorového separátoru a několik postupně optimalizovaných řešení pětikomorového separátoru (čtvrtina kruhu rozdělena na dva oddělené prostory). Pro univerzálnost a reprodukovatelnost metody byla časová osa nahrazena množstvím přičerpané vody, přičemž hodnota není vyjádřena v jednotce objemu, ale výhodnější je vyjádření v procentech vůči celkovému objemu vody v separátoru (obr. 4).



**Obr. 4 Stanovené kvalitativní kategorie podle průběhu konduktivity při testování a záznam z měření - srovnání tří úprav septiků**

Výsledky z testování septiků se promítly nejen do publikační činnosti na odborných seminářích a konferencích, ale byly zahrnuty do revidované ČSN 756402 (revize v roce 2017), kde nově vytvořil anaerobní separátor vlastní kategorii vedle septiku a sedimentační nádrže. Norma zahrnuje také účinnosti anaerobních separátorů, přičemž hodnoty vychází jak z provozních měření, tak z testování v akreditované vodohospodářské laboratoři VUV T.G.M. v.v.i. v Praze. Účinnost odstranění znečištění u nově vyvinutého septiku se při dlouhodobém testovacím provozu v akreditované laboratoři pohybuje např. u  $CHSK_{Cr} = 65 \%$ ,  $NL = 72 \%$ . Výsledek přímo souvisí s rychlostí a délkou trajektorie jednotlivých proudnic, výslednou dobou zdržení, zkratovými proudy, řešením norných stěn apod. Vyvinutý anaerobní separátor je od roku 2016 dosud vyráběn druhým majitelem užitého vzoru.

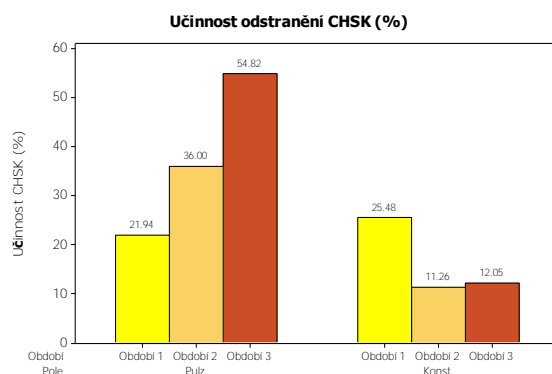
## 5.2 HORIZONTÁLNÍ FILTR

Horizontální filtr, coby hlavní čistící stupeň, byl v letech 1990 – 2010 na území České republiky navrhován téměř ve všech známých příkladech z praxe. Mezi hlavní důvody rozšíření horizontálních filtrů patří zejména jednoduchost návrhu i realizace a provoz s minimální náročností. Nevýhodou jsou všechny známé důsledky spojené s anaerobním prostředím, které vzniká v horizontálním filtru.

Jelikož je u horizontálních filtrů prokazatelně nízká účinnost v odstranění amoniakálního dusíku (Němcová, M., 2015) a současně je kladen důraz na minimalizaci nutrientů v povrchových vodách,

je dnes na základě vlastních získaných zkušeností i tento poznatek nově zahrnut v revidované normě ČSN 756402. Norma zahrnuje novou úpravu distribučního potrubí, novou skladbu filtračních materiálů, možnost vyloučení mokřadních rostlin z povrchu filtru a možnosti zapojení za daným typem mechanického předčištění. Stěžejním novým poznatkem je princip pulzního kolísání hladiny v horizontálních filtrech, spočívající v doplnění zařízení, které zajišťuje nepravidelné vypouštění do té doby vodou zatopeného horizontálně protékaného filtračního pole. Pulzní vypouštění horizontálního filtračního pole zajistí lepší přestup kyslíku do odpadní vody, doprovázený přechodem z anaerobního prostředí na anoxické. Výsledkem takové úpravy provozu filtru je lepší odstranění amoniakálního dusíku a znečištění, které je odbouráváno prostřednictvím kyslíku (BSK<sub>5</sub>, CHSK<sub>Cr</sub>). Technické řešení pulzně vypouštěného horizontálního filtru spočívá v umístění pulzně-vypouštěcího zařízení (popsáno v kap 4.2 nebo 4.4) za filtračním polem. Zařízení umožňuje bez nutnosti napojení na elektrickou energii (zařízení využívající elektro ventil je zobrazeno na obr. 5) automatické vypouštění odpadní vody při dosažení maximální úrovně hladiny v horizontálním filtračním poli. Rozsah pulzního vypouštění tedy nastává v rozmezí „horní hranice zarovnaného terénu filtračního materiálu“ až „horní okraj sběrného potrubí“. Technické provedení, výčet výhod a nevýhod, včetně podrobného vyhodnocení naměřených výsledků, je podrobně popsáno v habilitační práci. Zkráceně lze konstatovat silně pozitivní ovlivnění kvality odtékající vody z horizontálního filtru.

Na základě získaných výsledků v letech 2013 – 2014 se ukázalo, že odtokové koncentrace při kolísající hladině jsou postupně snižovány. Hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> po průtoku filtračním polem s kolísající hladinou se na odtoku snížily o několik desítek (mg·l<sup>-1</sup>) více, než u filtru s konstantní hladinou, který je zapojen paralelně. Účinnost filtračního pole se postupně zvýšila z 12 % na 55 %, tj. zlepšení účinnosti o 32 %. V následujícím grafu (obr. 5) je vidět postupné zlepšování účinnosti.



**Obr. 5** Zobrazení čistících účinností CHSK<sub>Cr</sub> a N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (%) ve vybraných etapách měření

Z pohledu technologie se jedná o vůbec první filtrační pole v České republice, které je řešeno jako pulzně vypouštěné. Druhá realizace, proběhla již v rámci licenční smlouvy na využití výsledku VUT, byla řešena na ČOV Kojetín (okr. Nový Jičín). Čistírna přibližně pro 100 obyvatel je provozována před úpravou na základě systému dvou paralelně zapojených horizontálních filtrů, které nejsou schopny obstojně snižovat znečištění CHSK<sub>Cr</sub>. Oba filtry byly v roce 2017 upraveny instalací dvou pulzních vypouštěčů, čímž se zajistilo spolehlivé odstranění sledovaných parametrů BSK<sub>5</sub>, CHSK<sub>Cr</sub>, NL. Od přechodu na pulzně vypouštěný horizontální filtr ČOV vykazuje hluboce podlimitní odtokové koncentrace, potlačil se zápach a zákal odtékající vody.

### 5.3 VERTIKÁLNÍ FILTRAČNÍ POLE

Jak bylo zmíněno v úvodní kapitole, jedním z největších nedostatků původních kořenových čistíren odpadních vod, byla nedostatečná účinnost v odstraňování amoniakálního dusíku. Prokazatelně lepších výsledků než v případě horizontálně protékaného filtru, dosahuje vertikální filtr pulzně skrápěný, realizovaný za složitějších pravidel, přísnějších realizačních podmínek

a provozovaný za relativně náročnější obsluhy – tato negativa jsou ale vyvážena výrazně vyšší účinností (Luederitz a kol., 2001), tedy odtékající odpadní vodou s minimálním zbytkovým znečištěním.

První testovací objekty vertikálních filtrů jsme společně s výzkumnými týmy projektů MPO TIP FR-TI3/778 a TAČR TA02021032 setkávali s vertikálními filtry, které měly téměř nulovou účinnost v odstraňování  $N-NH_4^+$  - tedy srovnatelnou jako sledované poloprovozní horizontálně protékané filtry. Tento nedostatek byl způsoben našim, z dnešního pohledu ne zcela komplexním, pochopením problematiky. Filtr neměl vhodné materiální složení, nízkou výškou filtrační vrstvy, postrádal systém pulzního napouštění, měl nevhodně řešené distribuční potrubí a byl hydraulicky přetěžován.

Výsledky na poloprovozních objektech přinášely postupně se zvyšující účinnosti vertikálních filtrů, s postupným vývojem od roku 2011 se vertikální filtry prosazovaly a preferovaly coby hlavní součást systému přírodní čistírny (Němcová, 2015; Pumprlová Němcová a Křiška Dunajský, 2017 a 2018). Z dnešního pohledu, v roce 2020, je již tato technologie všestranně výhodnější, účinnosti v běžně sledovaných parametrech staví vertikální filtry na vrchol ve srovnání s jakýmikoli jinými filtry, resp. konkurenčními technologiemi.

Vertikální filtr s vegetací je v podstatě charakterizován jako mělce vyhloubená jámka, jejíž dno je hydraulicky izolované od podloží. Nad samotnou hydroizolací je umístěno sběrné potrubí, zajišťující odtok vody do dalšího stupně/na odtok. Vnitřní prostor nad hydroizolací je tvořen několika vrstvami filtračního materiálu (drenážní, přechodová, hlavní, krycí), přičemž max. výška dosahuje přibližně 1,0 m (podle nadmořské výšky a požadavku na kvalitu vyčištěné odpadní vody). Povrch filtru je osázen mokřadními rostlinami a současně je na povrchu umístěno distribuční potrubí, zajišťující rovnoměrné rozložení přitékající odpadní vody na plochu filtru. Proudění odpadní vody probíhá převážně ve vertikálním směru. Samotný filtr je obdobně hluboký jako horizontální, nicméně liší se zrnitostí filtračního materiálu (je jemnější) a zejména uspořádáním distribučního potrubí a zařazením pulzně vypouštěcího zařízení. Jelikož voda nepravidelně (názarově, pulzně) protéká nenасыceným filtračním prostředím, průnikem vlhkým porézním materiálem dochází k jejímu pozvolnému prokysličení. Ve filtru tedy při nepřetížení převládá aerobní prostředí, které zajišťuje odstranění amoniakálního dusíku ( $N-NH_4^+$ ), vysoké účinnosti v odstranění biologicky odbouratelných látek ( $BSK_5$ ) i látek chemických, které na svůj rozklad spotřebovávají kyslík ( $CHSK_{Cr}$ ).

Ve světě se dnes již nejedná o novou technologii, nicméně v České republice bylo první provozní zařízení testováno teprve v letech 2013–2015 na kořenové čistírně v obci Kotenčice. Vertikální filtry jsou v průběhu posledních deseti let v zahraničí úspěšně používány pro čištění odpadních vod, přičemž nejvhodnějším příkladem je nám nejbližší Rakousko, kde evidují 5600 čistíren odpadních vod, založených na systému vertikálního filtru. Co se týče velikosti, např. v Moldávii byla v roce 2013 uvedena do provozu kořenová čistírna odpadních vod pro 22 000 EO (resp.  $4\,600\text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$ ). Úspěch vertikálních filtrů souvisí s dobrou účinností při odstraňování  $CHSK_{Cr}$  (90 %), NL (90 %), 90 % odstranění  $N-NH_4^+$  (Kadlec a kol., 2009). Nicméně pro odstranění fosforečnanů je účinnost nízká, kolem 20 až 30 % (Langergraber a kol., 2003), což je ovlivněno zejména absencí chemického srážení fosforu. Při požadavku na účinnější odstranění celkového fosforu lze snadno doplnit jednotku na srážení fosforu, která umožní např. dle průtoku (polohy hladiny v měrném profilu) dávkovat definované množství srážedla.

V habilitační práci jsou podrobně popsána pravidla a podmínky pro návrh vertikálních filtrů (projekční pravidla), podmínky pro správnou realizaci, stejně jako provozní podmínky pro zajištění dlouhodobé funkčnosti filtru. V neposlední řadě jsou v práci popsány výhody a nedostatky ve srovnání s horizontálními filtry, vedoucí jasně k pomyslnému technologickému vítězi – vertikálním filtrům. Následuje podrobný popis složení filtračních vrstev, definice správného uspořádání distribučního potrubí a provázanost s vlastními užitnými vzory – pulzně dávkovacími mechanismy. Podrobně je popsán vývoj a náročné testování pulzních zařízení, která pracují na zcela odlišném způsobu oproti zahraničním řešením. Uvedeny jsou výsledky z prvních poloprovozních objektů



v České republice – výsledky vznikaly v rámci projektu MPO TIP FR-TI3/778, až po nejnovější výsledky aplikované v praxi na rekonstruované čistírně v obci Dražovice, kde za minimální nutné investice dosahují špičkových odtokových koncentrací.



Obr. 6 Řešení distribučního potrubí na poloprovozním objektu

#### 5.4 NOVÝ KONCEPT A USPOŘÁDÁNÍ PŘÍRODNÍCH ČISTÍREN

Původní schéma kořenové čistírny je z dnešního pohledu nefunkčním, nedostatečným, překonaným a nekonkurenceschopným. Nové čistírny, vycházející konceptu z původních kořenových čistíren, je vhodné s ohledem na velice negativní zkušenosti z minulosti nenazývat jako kořenové čistírny, ale osvědčuje se nové názvosloví. Nová a doporučovaná technologická uspořádání jsou natolik odlišná, že nazývání systému jako „přírodní čistírna“ se jeví jako výstižnější a objektivnější. Nejen, že natolik neklade důraz na kořenový systém rostlin, ale ve skutečnosti většinu čistících procesů objektivně zajišťují přirozené/přírodní procesy, probíhající na základě fyzikálních a biochemických zákonů. Přírodní čistírna je soustavou složenou z několika navazujících částí, přičemž každá plní specifický úkol a vykazuje specifickou účinnost v každém parametru sledovaného znečištění. Celková čistící účinnost vychází z koncepce zapojení jednotlivých stupňů. Jelikož se jedná o sériové zapojení objektů, předchozí stupeň ovlivňuje stupeň navazující v rámci celého toku.

Očekávané hodnoty výsledného znečištění na odtoku z kořenové čistírny, která je tvořena dvou nebo vícestupňovou soustavou, lze stanovit podle tab. 2, která je převzata z ČSN 756402.

Tab. 2 Účinnosti objektů pro přírodní čistírny odpadních vod

Technologie čištění	Účinnost čištění v %				
	BSK <sub>5</sub>	CHSK <sub>Cr</sub>	NL	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>celk</sub>
Septik	15 až 30	0 až 20	50 až 60	-	-
Anaerobní separátory	50 až 75	40 až 80	70 až 90	5 až 25	10 až 45
Sedimentační nádrž	20 až 30	10 až 30	30 až 60	0 až 5	0 až 8
Horizontální filtr	40 až 95	50 až 90	65 až 95	5 až 60	5 až 25
Vertikální filtr s vegetací	75 až 98	70 až 97	85 až 99	50 <sup>2)</sup> až 99 <sup>1)</sup>	5 až 20
Stabilizační nádrže	65 až 70	60 až 85	85 až 90	20 až 90	5 až 20
	80 až 90 <sup>1)</sup>				

<sup>1)</sup> v letním období (tj. pro T > 12 °C)

<sup>2)</sup> v zimním období (tj. pro T < 6 °C)

Uvedené hodnoty nicméně jsou do normy vloženy právě z výsledků pracoviště Ústavu vodního hospodářství krajiny (Ing. Michal Křiška, Ph.D., je jedním ze spoluautorů revidované normy). Všechny hodnoty byly získány sledováním několika čistíren, podloženy jsou zejména na základě výsledků ze dvou výzkumných projektů: MPO TIP FR-TI3/778 a projektu TAČR TA02021032.

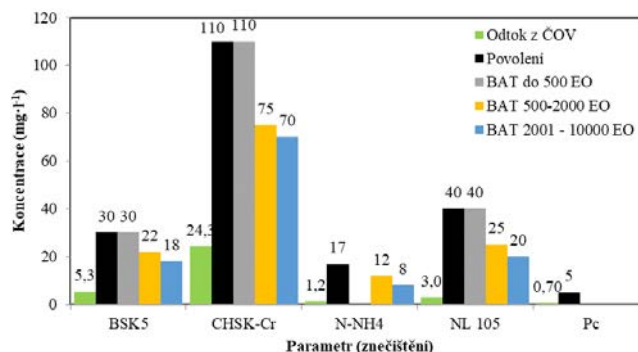
Habilitační práce dále přináší podrobněji zpracované porovnání technologické a velikostní kategorie, které je ukotveno v platném nařízení vlády. Technologické uspořádání přitom zohledňuje jak druh kanalizace, tak místní morfologické podmínky, aj. Práce podrobně uvádí a zpracovává návrh různých technologických uspořádání podle množství připojených obyvatel. Zkrácenou verzí může být tabulka č.3.

**Tab. 3 Doporučené uspořádání přírodní čistírny**

Velikostní kategorie	Vhodná morfologie terénu	Nevhodná morfologie terénu
Do 10	AS + PV + VF	AS + Č + VF
10–35	AS + PV + VF	AS + Č + PV + VF
35–200	RK + P + AS + DS + VF	RK + Č + P + AS + DS + VF
201–500	RK + P + ŠUN + HF + DS + VF	Č + P + RK + ŠUN + HF + DS + VF
501 - více	RK + P + ŠUN + HF + DS + VF + DN	Č + P + RK + ŠUN + HF + DS + VF + DN

*Kde je: AS – anaerobní separátor, PV – pulzní vypouštěč, Č – čerpací šachta, DN – denitrifikační zařízení, DS – distribuční systém, HF – horizontální filtr, P – srážení fosforu, PV – pulzní vypouštěč, RK – rozdělovací komora, ŠUN – štěrbínová usazovací nádrž, VF – vertikální filtr*

Nabízí se srovnání s obecně uznávanou nejlepší dostupnou technologií ČOV ve vybraných velikostních kategoriích. Náorné zobrazení na obr. 7 (ČOV Skašov, navržená podle znaleckého posudku VUT) ukazuje, že ve všech parametrech je navržená technologie vícestupňové ČOV výrazně efektivnější než doporučená "Nízko až středně zatěžovaná aktivace nebo biofilmové reaktory". Při srovnání s velikostní kategorií 500 – 2000 EO, která je přísnější ve všech parametrech, navíc doplněná o znečištění amoniakálním dusíkem, docházíme k obdobnému závěru – vícestupňová ČOV vykazuje lepší výsledky.



**Obr. 7 Srovnání dosahovaných výsledků s ostatními hodnotícími kritérii**

Obdobně je tomu i v kategorii 2001 – 10 000 EO. Stále lepší výsledky z čistírenské technologie, která byla na přelomu století zavržována a téměř odepsána. Při vší opatrnosti lze konstatovat, že tato technologie je po stránce kvality vypouštěné vody akceptovatelná i pro větší velikostní kategorie. Jak bylo uvedeno výše, problémem technologie je náročnost na plochu – proto u velkých čistíren samozřejmě není žádoucí.

Jak bylo uvedeno výše, vertikální filtry vykazují výrazně vyšší účinnosti ve srovnání s filtry, které jsou zatopené vodou, a proudění odpadní vody v nich probíhá v horizontálním směru. Proto se nabízí dnes velice netradiční řešení, tj. zapojení dvou vertikálních filtrů v sérii za sebou. Předpokládá se, že tato technologie bude přibližně za jednu dekádu nejběžnějším řešením, vzhledem k univerzálnosti



a vysoké účinnosti. Uspořádání dvou vertikálních filtrů v sériovém zapojení je schopno zajistit výrazně vyšší účinnosti než vykazuje dnes nejlepší dostupná technologie (BAT). Pokud u jednoho vertikálně zapojeného filtru je možné dosahovat účinnosti v parametrech BSK<sub>5</sub>, CHSK<sub>Cr</sub>, NL, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> v oblasti nad 90 %, potom při dvoustupňovém uspořádání lze očekávat pro stejné parametry účinnosti nad 98 %. Odtokové koncentrace se dle modelů budou pohybovat v oblasti hodnot BSK<sub>5</sub> = 3 mg·l<sup>-1</sup>, CHSK<sub>Cr</sub> = 20 mg·l<sup>-1</sup>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = 0,06 mg·l<sup>-1</sup>, NL méně než 2,0 mg·l<sup>-1</sup>.

Při uspořádání dvou vertikálních filtrů zapojených v sérii, současně za potlačení nutnosti připojení el. energie, je vyžadováno minimální výškové převýšení 5,0 m. Pouze při dostatečném převýšení může systém dosahovat uvedených odtokových parametrů i bez nutnosti připojení zdroje el. energie, bez alternativního zdroje el. energie apod. Účelem prvního vertikálního filtru je zejména intenzivní přeměna amoniakálního dusíku na dusičnanový dusík a následně, ve spodní vrstvě filtru, transformace prostřednictvím denitrifikaci na molekulární dusík, unikající skrz filtrační materiál do atmosféry. Stěžejní procesy, které ve filtru probíhají, jsou nitrifikace a následná denitrifikace ve spodní vrstvě filtru, kde je ještě dostatek organického uhlíku. Dno filtru je trvale zatopeno do výšky 250 mm, přičemž právě v této vrstvě probíhá denitrifikace za přítomnosti organického uhlíku ze zbytkového znečištění organického původu. Druhý filtr je ve všech detailech totožný s jednodušnými vertikálními filtry (kap. 5.4). Cílem filtru je dočištění všech sledovaných parametrů (BSK<sub>5</sub>, CHSK<sub>Cr</sub>, NL, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) na minimální možnou úroveň.

Vzhledem k zahrnutí denitrifikačního procesu, který probíhá ve spodní vrstvě prvního vertikálního filtru, je toto řešení dostatečně účinné i z pohledu odstraňování dusičnanového dusíku, resp. zajistí snížení koncentrace celkového dusíku minimálně o 70 %. Z pohledu stávající platné legislativy (N.V. 401/2015 Sb.) vzniká požadavek na odstraňování celkového dusíku až u čistíren ve velikostní kategorii 10 001 – 100 000 EO. Tzn., dvoustupňový systém vertikálních filtrů vykazuje výsledky o vyšší kvalitě, než je požadována pro velikostní kategorii 10 001 – 100 000 EO. Řešení je možné uplatnit při vypouštění odpadních vod do podloží (N.V. 57/2016 Sb.), koncentrace celkového dusíku v odtékající vodě je sledována od velikosti čistírny nad 10 EO, jedná se o povolené koncentrace 30 mg·l<sup>-1</sup>, resp. nad 50 EO koncentrace 20 mg·l<sup>-1</sup>.

Na základě laboratorních výsledků prováděných v improvizovaném laboratorním prostředí na ČOV Dražovice, bylo navrženo např. uspořádání čistírny pro skupinu domů v obci Samopše pro 35 EO a pro obec Hlína (300 EO). Obě čistírny budou uvedeny do provozu nejdříve v roce 2021.

## 5.5 AMONIAKÁLNÍ DUSÍK – PROVOZNÍ VÝSLEDKY

V souvislosti s jedním z největších problémů kořenových čistíren, tedy amoniakálním dusíkem, byly nejprve testovány lyzimetrické modely v provozních objektech čistíren odpadních vod. Získané zkušenosti byly následně překlopeny v několik poloprovozních objektů. Naše výsledky z let 2013 – 2015 jsou uvedeny v tab. 4, citovány v publikaci (Jelínková a Plotěný, 2015).

**Tab. 4 Průměrná a maximální dosažená účinnost čištění (%) na ČOV Kotečice**

Parametr znečištění	Samotný horizontální filtr		Samotný vertikální filtr		Septik + vertikální filtr
	Prům.	Max.	Prům.	Max.	Prům.
CHSK <sub>Cr</sub>	50,9	89,2	73,0	91,6	94
BSK <sub>5</sub>	69,4	95,6	78,1	93,9	98
NL	94,9	98,1	91,7	98,1	98
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-11,8	10,7	57,1*	89,6	93
P <sub>celk</sub>	-6,2	14,4	20,7	51,2	60

\* Nízká účinnost ve srovnání se zahraniční literaturou je dána použitím hrubšího filtračního materiálu

Druhé řešení, realizované v provozních podmínkách ČOV Dražovice, vycházející z poloprovozního objektu na ČOV Kotenčice, zahrnuje většinu získaných poznatků a úpravu detailů - zejména v rámci distribučního potrubí. Odtokové koncentrace jsou potom nejlepším výsledkem ze všech publikovaných přírodních čistíren v České republice (tab. 5).

Zapojení vertikálního filtru, který je provozovaný jako pulzně skrápěný, je tedy zárukou vysoké kvality odtékající odpadní vody. Na druhou stranu, vertikální filtr neřeší problém s celkovým dusíkem. Odtokové koncentrace amoniakálního dusíku jsou na nízké úrovni, nicméně pokud je účinnost v odstraňování amoniakálního dusíku v oblasti 95 %, jsou současně odtokové koncentrace dusičnanového dusíku téměř na stejné koncentrační hodnotě. Proto je nutné (s ohledem na zodpovědnou živinnou bilanci) snížení celkového dusíku bez ohledu na velikostní kategorii ČOV. Znamená to tedy nutnost zařazení denitrifikačního stupně za vertikální filtr, viz navazující kapitola.

**Tab. 5 Srovnání účinností (%) na ČOV Dražovice v roce 2019**

Proměnná	BSK <sub>5</sub>	CHSK <sub>Cr</sub>	NL	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Požadavek BAT	85	75	-	75
Před rekonstrukcí	85	76	85	48
Po rekonstrukci	99	86	87	95

Podrobné srovnání jednotlivých ukazatelů znečištění je uvedeno v habilitační práci. Detailní pohled na výsledky ukazuje na velice pozitivní vliv zapojeného vertikálního filtru do systému, resp. nahrazení jednoho filtru horizontálního vertikálním.

## 5.6 ODSTRAŇOVÁNÍ DUSIČNANŮ – DENITRIFIKACE

Možností, jak odstranit celkový dusík, resp. snížit odtokovou koncentraci amoniakálního dusíku, se nabízí pomocí přírodního přístupu hned několik. Vždy musí ale být denitrifikační řešení zapojeno za vertikálním filtrem:

- Horizontální filtr
- Filtr s organickým substrátem
- Nádrž pokrytá plovoucími ostrovy

V současné době nelze s jistotou určit, které ze zařízení je pro účely odstraňování celkového dusíku nejvýhodnější, protože pouze zapojení horizontálního filtru je v současné době dlouhodobě provozováno a vykazuje tedy provozní zkušenosti (např. v habilitační práci podrobněji uvedené výsledky z ČOV Velká Jesenice, která byla rekonstruována podle zkušeností na poloprovozu Kotenčice).

### 5.6.1 Soustava vertikální + horizontální filtr

Dle výše uvedeného je soustava uspořádáním vertikální filtr + horizontální filtr zodpovědným řešením, které plní funkci odstranění dusičnanového dusíku. Sestava, založená na uspořádání v pořadí vertikální filtr – horizontální filtr, byla realizována v poloprovozním měřítku na ČOV Kotenčice v rámci výzkumného úkolu MPO FR-TI3/778. Po ukončení výzkumu byly výsledky využity k návrhu rekonstrukce ČOV Velká Jesenice, která byla v předchozím uspořádání řešena jako jednostupňová kořenová čistírna s horizontálním filtrem. Současně na základě poloprovozu (ČOV Kotenčice) vzniklo obdobné uspořádání s využitím výsledků VUT v Brně na ČOV Nová Ves (Třemešné). Odtokové koncentrace N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> jsou v dlouhodobém průměru 7,74 mg·l<sup>-1</sup> ve srovnání s koncentracemi před rekonstrukcí, kdy je průměrná hodnota 51,05 mg·l<sup>-1</sup>. Předpoklady účinné denitrifikace u dlouhodobě sledované přírodní čistírny v obci Velká Jesenice, která prošla rekonstrukcí v roce 2016, se však ani po dvou vegetačních sezonách nepotvrdily. Vzhledem ke skutečnosti, že v České republice se nevyskytují funkční vertikální filtry v kombinaci s filtry

horizontálními, plnicími primárně denitrifikační funkci, nelze spolehlivě určit, zdali dojde ke zlepšení systému nebo ne. Tato nejistota přináší otázku aplikovatelnosti jiných řešení, u nichž denitrifikace probíhá spolehlivě již bezprostředně po spuštění provozu a dlouhodobě, bez ohledu na pomalý vývoj vegetace (viz níže).

### 5.6.2 Soustava vertikální filtr + denitrifikační bioreaktor

Zařízení nazvané jako „denitrifikační bioreaktor“ bylo vyvíjeno a testováno v laboratorním prostředí Ústavu vodního hospodářství krajiny (společně s Ústavem chemie) v letech 2015 – 2018 v rámci řešení výzkumného projektu NAZV QJ1520280. Cílem práce bylo věnování stěžejní pozornosti aplikaci zahraničních zkušeností na místní poměry – s využitím místních dřevin, které jsou současně funkční a zároveň ekonomicky dostupné. Pro účely výzkumu byly testovány filtrační náplně organického původu, u nichž byla sledována při průtoku vody se zvýšenou koncentrací znečištění účinnost v odstraňování dusičnanů.

První výsledky z měření, kdy bylo testováno několik vybraných filtračních materiálů, jsou popsány v publikaci (Křiška a kol., 2015 a 2016), startovací fáze provozu reaktorů, která se jeví jako nejvíce problematická, je potom popsána v článku (Bílková a kol., 2017, 2018). Nejdůležitější výsledky jsou shrnuty ve dvou publikacích (Malá a kol., 2017 a 2018, Šereš a kol., 2019). Při provozu laboratorních denitrifikačních kolon s náplní z topolové štěpky v letech 2015–2018 bylo zjištěno, že při vstupní koncentraci N-NO<sub>3</sub> v rozmezí 19 až 41 mg·l<sup>-1</sup>, dobou zdržení odpadní vody v rozmezí 32 až 34 h a teplotě protékající vody v rozmezí 17 až 21 °C, vykazuje nejvýhodnější filtrační materiál schopnost odstranit z vody N-NO<sub>3</sub> v rozmezí 6,7 až 13,1 g·m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup> (Hrich a kol., 2018). Výsledky ze specifických výzkumů FAST přinesly závěry, že hodnota koncentrace dusičnanů na odtoku u spolehlivě fungujícího vertikálního filtru se pohybuje v oblasti 30–40 mg·l<sup>-1</sup> (Pumprlová Němcová a Křiška Dunajský, 2018).

Náhrada horizontálního filtru vertikálním bioreaktorem umožní výrazně snížit investiční náklady, současně zvyšuje účinnost systému – byť se jedná pouze o předpoklady a hypotézy formulované na základě laboratorního měření bez ověření v poloprovozním měřítku. Samotné laboratorní měření probíhalo na upravené pitné vodě a teprve budoucí testování ukáže, jestli a jak se shodují laboratorní výsledky se zapojením reaktoru na reálnou odpadní vodu. Předpokládáme schopnost reaktoru snížit koncentraci N-NO<sub>3</sub> ve vypouštěné odpadní vodě na hodnotu pod 10 mg·l<sup>-1</sup> z maximální vstupní koncentrace N-NO<sub>3</sub> cca 16 až 30 mg·l<sup>-1</sup> (nebo vyšší).

V dohledné době (vegetační sezona 2021) je v plánu zapojení testovacího objektu na vytypované přírodní čistírně odpadních vod – s největší pravděpodobností ČOV v obci Dražovice pro její vysokou nitrifikační schopnost a vysoké odtokové koncentrace N-NO<sub>3</sub>. Výsledek bude sledován, pravidelně budou odebírány a analyzovány vzorky. Pro predikci odtokových koncentrací budou uplatněny zkušenosti z matematického modelování v problematice šíření znečištění filtračním prostředím, publikované v souvislosti se šířením dusičnanů (Křiška a kol., 2017 a 2018). Stavba bude vykázána jako výsledek typu poloprovoz. Následný postup bude standardní, resp. obdobný jako v případě vertikálních filtrů. Novou technologii je náročné prosadit, ale jakmile se očekávané kvalitní výsledky dostaví, bude snad tato technologie postupně rozšiřována.

### 5.6.3 Soustava vertikální filtr + nádrž s plovoucími ostrovy

Technologie plovoucích ostrovů představuje alternativní řešení k předchozím dvěma uspořádáním. Princip plovoucích ostrovů vychází již z jejich názvu:

- přítomnost lehkého nosiče, plovoucího na vodní hladině, sloužícího jako zakrytí vodní hladiny proti slunečnímu záření
- osázení nosiče mokřadními rostlinami, které odebírají dostupné živiny z vodního prostředí

- kořenový systém rostlin vytváří filtrační prostředí, zajišťuje snížení množství nerozpuštěných látek
- přítomné rostliny zajišťují částečné prokysličení kořenové zóny, uvolňování a tvorbou organických kyselin a ovlivnění pH vnosem CO<sub>2</sub> při procesu dýchání (Tanner, 1998).

Výzkumné práce pracoviště VUT v Brně byly zaměřeny na dva dílčí cíle: získání výsledků z laboratorního měření a získání zkušeností z poloprovozního zařízení, které se realizovalo na malé vodní nádrži v k.ú. Oldřiš (Křiška a kol., 2018). Měření na laboratorních lyzimetrech probíhalo od dubna 2017 do podzimu 2018, testovací poloprovozní zařízení bylo realizováno v srpnu 2018 a sledováno bylo do zimy 2019/2020. Podrobné výsledky byly publikovány v práci (Křiška Dunajský a Němcová Pumprlová, 2018). Celkový dusík je podle předpokladů nejlépe odstraňován prostřednictvím přítomného plovoucího prvku se vzrostlou vegetací. Průměrná hodnota ze všech měření je  $5,62 \pm 1,53 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , ve srovnání s nejhorším lyzimetrem, ve kterém je vodní hladina ponechána volná, v němž je výsledná hodnota téměř o  $2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  vyšší. Průměrná hodnota koncentrace N<sub>c</sub> u lyzimetru „hladina“ je  $7,43 \pm 1,57 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Mezi oběma lyzimetry se opět dle předpokladu pohybuje lyzimetr se zakrytou hladinou, který s největší pravděpodobností vytváří podmínky pro rozvoj denitrifikace pomaleji než zapojení plovoucích ostrovů s rostlinami. Hodnota N<sub>c</sub> vychází u zakryté vodní hladiny bez přítomných rostlin  $6,28 \pm 1,83 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ .

Podle naměřených a vyhodnocených výsledků podrobněji rozepsaných v habilitační práci, má největší podíl během prvních 7 dní (doba zdržení vody pod plovoucím ostrovem). Po 7 dnech se vliv přítomného ostrova eliminuje. Z výsledků plyne, že není vhodné realizovat pro málo znečištěné vody plovoucí ostrovy na rozsáhlou vodní plochu – výsledný efekt vzhledem k investičním nákladům by byl minimální. V podstatě lze největšího rozdílu pozorovat během prvních sedmi dní, následně se množství odstraněného celkového dusíku srovnává.

Zjištěné výsledky zároveň ukazují, že hodnota dusičnanů je téměř konstantní, což je nejspíše dáno postupnou a pozvolnou nitrifikací za současně probíhající denitrifikace. Nejvyšší koncentrace se u všech lyzimetrů pohybují do  $2,0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Na základě poloprovozních zkušeností, které byly získány na realizovaném zařízení, umístěném na malé vodní nádrži v k.ú. Oldřiš, jsou formulovány praktické závěry, shrnuté do několika oblastí:

- Výsadba plovoucích ostrovů
- Provoz v zimním období
- Regenerace odumřelých mokřadních rostlin
- První nevegetační období

Podrobně formulované závěry jsou součástí habilitační práce.

## 5.7 KOLMATAČE - EFEKTIVNÍ ŘEŠENÍ NÁSLEDKŮ

V rámci výzkumu MPO TIP FR-TI3/778 byla soustředěna pozornost také na možnosti regenerace filtračních materiálů, resp. řešení následků špatného návrhu a zanedbaného provozování kořenových čistíren.

Důležité je upozornění, že ucpávání probíhá postupně vlivem poddimenzovaného mechanického stupně čištění (usazovací nádrž nebo vícekomorový septik) nebo při nevhodně řešené odlehčovací komoře, případně při zanedbané obsluze (přeplnění akumulacího prostoru):

V habilitační práci podrobně popsany postup kolmatačního procesu je impulzem k vyhodnocení a posouzení možnosti regenerace. Vyplývá z něj následující: pokud čistírna vykazuje tendence k ucpávání filtru, je potřeba nejprve vyřešit příčinu – většinou mechanický stupeň čištění. Teprve potom je na místě řešení navazujícího stupně čištění (horizontální nebo vertikální filtr).

Je potřeba zdůraznit, že porucha provozu vlivem kolmatace hrozí všem typům filtrů, jimiž protéká odpadní vody s obsahem nerozpuštěných látek. Přirozeně, že čím jemnější materiál (frakce)

je použit jako filtrační náplň, tím vyšší náchylnost na ucpání filtr vykazuje. S odkazem na výše popsané vertikální filtry (kap. 5.4) s hlavní filtrační vrstvou frakce 0/4P je tedy nutné upozornit, že tyto filtry jsou více citlivé na kvalitu předčištění odpadní vody než horizontální filtry (filtrační materiál 8/16 mm). Vertikální filtry nemohou z tohoto důvodu být umístěny za nedostatečně účinnou šterbinovou usazovací nádrží, ale musí mít předřazen správně hydraulicky vyřešený vícekomorový septik (dražší a složitější řešení), u kterého lze předpokládat vyšší účinnost v odstranění nerozpuštěných látek. Tato skutečnost byla implementována do revidované ČSN 756402.

V habilitační práci je podrobně popsáno několik dílčích kapitol a přístupů, souvisejících s kolmatací filtračního materiálu. Popsáno je hodnocení indikátorů zanesení (kolmatace), zkušenosti s těžbou filtračního materiálu, popsány jsou reálné zkušenosti s regenerací filtračního materiálu rozprostřením do tenkých vrstev (jak doporučovala tehdejší literatura).

Nové důležité poznatky spočívají v popisu nového typu horizontálního filtru, který je z pohledu hydraulického provozován jako na pulzně vypouštěný filtr s kolísající hladinou.

Metoda pulzního vypouštění horizontálních filtrů, řešená doplněním vyvinutého pulzního zařízení, viz kap. 4.2) je vybrána jako nejefektivnější způsob úpravy režimu, kombinující současně několik výhod:

- Nahrazuje vytěžování filtračního materiálu – ekonomicky výhodnější
- Zvyšuje účinnost stávajícího filtru – provozně příznivější výsledky
- Eliminuje senzorické problémy čistírny – potlačuje zápach v bezprostředním okolí
- Eliminuje problémy s výskytem komárů – z povrchu filtru mizí hladina odpadní vody

## 5.8 KALOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ „REED-BED“

Technologie kalového hospodářství, založená na systému „reed-bed“ byla testována za účelem snížení provozních nákladů čistíren odpadních vod. Název technologie vychází z anglické literatury. Zvýšená účinnost oproti klasickým kalovým polím je dán přítomností mokřadních rostlin (rákos obecný, chrastice rákosovitá). Mokřadní rostliny se ponechávají na povrchu, čímž zajišťují lepší podmínky pro mineralizaci kalu – vzdušnější prostředí.

Na základě výsledků z měření na výzkumném pozemku Žižkova (Kriška a Šálek, 2012; Kriška a kol., 2013) jsme práce rozšířili na poloprovozní měření v prostředí obecní čistírny odpadních vod. Výzkumné práce, podrobně popsané v diplomové práci (Mrvová, 2014), probíhaly paralelně na dvou čistírnách odpadních vod – ČOV Dražovice a ČOV Kotenčice, přičemž v rámci objektu na ČOV Dražovice jsme vytvořili výsledek typu poloprovaz.

Postup vlastních prací je rozdělen na teoretické stanovení evapotranspirace, resp. definování metodiky měření na základě teoretických předpokladů, na které navazuje měření na poloprovozních konfiguracích. Stěžejní úkol se zabývá definicí bilanční hydrologické rovnice odvodňování kalů pomocí mokřadní vegetace, přičemž vyšetřovaným výsledkem je hodnota potenciální evapotranspirace kalových polí v různých technologických konfiguracích, ověřená na základě dvou uvedených poloprovazů.

Výsledky evapotranspirace v Dražovicích u kalového pole se skleníkem se pohybují v až v hodnotách  $1700 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ , u kalového pole bez přístřešku  $1520 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Na čistírně v Kotenčicích se hodnoty roční evapotranspirace pohybují u kalového pole bez vegetace v oblasti  $710 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ , u chrastice rákosovité je hodnota  $975 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ , u jednoletého rákosu obecného  $420 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$  a u orobince širokolistého  $595 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Všechny hodnoty jsou poměrně nízké, což je dáno stářím vegetace – rostliny byly vysázeny v předchozí vegetační sezoně.

V habilitační práci je rozepsáno několik příkladných řešení bilance vody pro různá technologická uspořádání (s drenáží nebo bez, se skleníkovým přístřeškem nebo ponecháno atmosférickým vlivům).

Z podrobných grafů, uvedených v habilitační práci, lze pozorovat lepší vliv na účinnost kalového pole opatřeného skleníkovým objektem. Maximální hodnota koncentrace sušiny během 63 dní dosáhla u kalového pole se skleníkovým objektem hodnotu 83 %, kdežto kalové pole nezastřešené pouze hodnoty 41,2 %. Přes příznivější výsledky se ukázalo, že po stránce ekonomické vychází jako výhodnější provedení bez skleníkového přístřešku.

Na základě výsledků měření ale vzniklo několik zajímavých poznatků, které byly překlopeny do revidované ČSN 756402, jejich výčet je zahrnut v originální verzi habilitační práce.

## 6 DISKUZE

Porozumění technologii přírodních způsobů čištění odpadních vod docházelo ze strany autora habilitační práce postupně od roku 2003. Výsledky a závěry již v době zpracování vlastní diplomové práce byly jasné, rozhodně situace nemluvila ve prospěch kořenových čistíren. Konkurenční technologie, založené na intenzivním přístupu, vykazovaly mnohem kvalitnější odtokové parametry. Současně zastánci těchto technologií stále častěji ukazovali na problémy, spojené s tehdejšími kořenovými čistírnami. Ve své podstatě se jednalo o všechny nedostatky, které se z dnešního pohledu povedlo vcelku úspěšně vyřešit, objasnit a následně napravit, resp. překonat původně stanovený záměr, kterým bylo srovnání se s ostatními čistírenskými technologiemi.

V roce 2005 a dále během doktorského studia s názvem „Výzkum vlastností filtračních materiálů pro kořenové čistírny odpadních vod a zemní filtry“ se došlo k závěru, že nemá smysl řešit specifické detaily ve smyslu zaměření se na odstraňování těžkých kovů z odpadní vody prostřednictvím kořenových čistíren, odstraňování farmak a hormonální antikoncepce, odstraňování jiných specifických polutantů apod., když se kořenové čistírny potýkaly s provozními problémy v oblasti základních sledovaných parametrů (sledovaných v jakékoli době platným nařízením vlády). Všeobecně panoval velice silný odpor k technologii kořenových čistíren, vedoucí téměř k zakázání tohoto alternativního řešení nakládání s odpadními vodami.

Největším problémem v první dekádě 20. století byla dle správců vodních toků skutečnost, že kořenové čistírny si velice obtížně dovedly vypořádat se základními sledovanými parametry  $CHSK_{Cr}$ ,  $BSK_5$ ,  $NL$ ,  $N-NH_4^+$ . Právě poslední jmenovaný parametr byl největším problémem a současně argumentem proti povolování přírodních čistíren. Postupně jsme prostřednictvím vědeckých týmů, zapojených do převážně aplikovaných výzkumů, dovedli vyřešit nejen zvýšení účinnosti v těchto uvedených parametrech na hodnoty blízké konkurenčním technologiím, ale dokonce se dosáhlo mnohem lepších výsledků a účinností (v uvedených parametrech), než jaké jsou dnes zakotveny v nařízení vlády jako nejlepší dostupné techniky. Nad rámec požadovaných účinností jsou dnes navrhovány přírodní čistírny, které jsou schopny odstraňovat kromě  $N-NH_4^+$  i např. dusík dusičnanový ( $N-NO_3^-$ ), resp. celkový dusík ( $N_{celk}$ ). Posledním ze sledovaných parametrů je potom celkový fosfor ( $P_{celk}$ ), který přírodní čistírny odstraňují prostřednictvím přirozených čistících procesů s poměrně nízkou účinností – výsledky z několika sledovaných čistíren se pohybují v oblasti 50 – 60 %, odtokové koncentrace většinou dosahují hodnot v oblasti 2,0 – 2,5  $mg \cdot l^{-1}$ . Historie se opakuje. Byť odstraňování celkového fosforu vyžaduje nařízení vlády pro vypouštění odpadních vod až u velikosti čistíren od 2001 připojených obyvatel a současně je odtoková koncentrace velice benevolentní (3,0  $mg \cdot l^{-1} P_{celk}$  jako průměrná roční hodnota), teoreticky by po přírodní čistírně při procesu povolování ani během provozování neměl nikdo požadovat. Opak je pravdou, celkový fosfor se stává nejsilnějším argumentem proti přírodním čistírnám. Proto je i tento polutant redukován prostřednictvím zařazení jednotky pro dávkování koagulantu na bázi hliníku (testováno a srovnáváno v rámci projektu TAČR: Anaerobní separátor nerozpuštěných látek a nutrientů, TA02021032, řešitel za VUT: Ing. Michal Křiška, Ph.D., r. 2012-2014). Současná situace při prosazování pokročilé technologie přírodních čistíren odpadních vod je tedy taková, že byť jsou čistírny, zahrnující nejnovější poznatky z výzkumu, schopny spolehlivě odstraňovat dle

legislativních pravidel požadované, je na tento typ čistírny kladen vyšší nárok ve vyšším počtu parametrů.

Zásadní průlom nastal v době, kdy došlo k překlopení zkušeností a poznatků do revidované normy ČSN 756402 Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel (rok 2017). Úpravou normy se aspoň v teoretické rovině povedlo zajistit prevenci před opakováním projekčních nedostatků. Ve své podstatě jsou v dnešní době (r. 2020) tedy vyřešené všechny základní a dříve uváděné nedostatky. Nad rámec uvedených problémů byla vyřešena také otázka nakládání s kaly, která má zásadní vliv na ekonomiku provozu. Kalové hospodářství včetně odpadního hospodářství je řešeno na základě principu fungování cirkulární ekonomiky – z odpadu se vytvoří v rámci čistírny produkt, který je možné prodat (ekonomicky využít). Přímo se tak zvýší příjmy čistírny, které jsou často zahrnuté pouze v rámci výběru stočného od producentů odpadní vody.

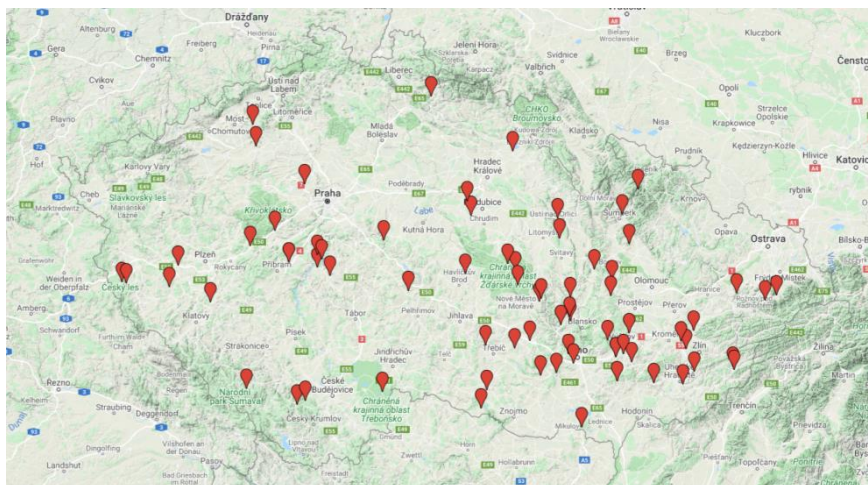
Dnes již lze konstatovat, že pokročilá technologie přírodních čistíren není zcela zapovězena, jak se tomu jevílo před prvními výzkumnými úkoly. Současně, na základě:

- objasnění důvodů, vedoucích k provozním problémům,
- modernizace technologie na základě výzkumných výsledků,
- vzniku četného duševního vlastnictví a realizace několika licenčních smluv o využití výsledků,
- prostřednictvím publikační činnosti v obdobných časopisech,
- konzultační činnosti a opakovaného řešení četných problémů v praxi,
- rozšiřování osvěty mezi potenciální investory (starostové menších obcí),
- osvěty mezi odbornou veřejností (přednášky pro veřejnou správu pod záštitou Ministerstva zemědělství),
- mezi studenty oboru Vodní hospodářství a vodní stavby, Městské inženýrství a příležitostně i další (studenti následně pracující v projekci i ve státní správě),
- zahrnutí přírodních způsobů do aktualizované ČSN 756402,
- působení v Asociaci pro vodu ČR, vedení skupiny Malé čistírny a odlučovače,
- opakovaně zpracovaných přednáškách pro školení úředníků životních prostředí,
- a další činnosti související s popularizací přírodní čistírenské technologie,

došlo během předchozích několika let k pozvolné změně pohledu na dříve téměř zavrženou čistírenskou technologii. Přírodní čistírny se jako dobré příklady postupně rozšiřují v praxi. Nové výsledky postupně očišťují špatnou pověst a postupně přesvědčují zaryté odpůrce, že při správném návrhu a provozování čistírny může i přírodní čistírna vykazovat velice příznivé výsledky. Dnes lze tedy s uspokojením konstatovat, že usilovná činnost postupně přináší úspěšné výsledky. Jedním z důkazů je např. uplatnění (projekce a realizace) užitného vzoru VUT č. 25544 na minimálně 78 lokalitách v rámci České republiky (obr. 8).

Je téměř neoddiskutovatelné, že původní koncept je nahrazen novým řešením, uspořádáním a zapojením nových poznatků a zkušeností. Původní horizontálně protékané filtry, uplatněné jako hlavní stupeň čištění, jsou z pohledu nových výsledků překonané. Vertikální filtry, realizované za téměř stejných investičních nákladů a provozované téměř se stejnou náročností, vykazují mnohem kvalitnější odtokové parametry, proto je jejich zapojení coby hlavního stupně čištění více než jasné. Jak bylo ale uvedeno výše, vertikální filtry vyžadují jiný přístup pro řešení mechanického předčištění. Tudíž zapojení anaerobních separátorů, vykazujících ve srovnání se septiky taktéž výrazně vyšších účinností, je logickým důsledkem pro uplatnění na přírodní čistíreně. Podle velikost producenta zůstává potom sestava „usazovací nádrž + horizontální filtr“ jako součást mechanického stupně čištění v kategorii nad 200 připojených nebo ekvivalentních obyvatel.





**Obr. 8 Využití pulzního systému v rámci ČR (78 realizačních projektů)**

Právě kvalitní výsledky ze stále častějších reálných provozů potom povedou k možnosti zapojení pracoviště do dalších vědeckých úkolů. V budoucnu se pozornost zaměří zejména na tato témata:

- vytváření provozních pravidel pro vícestupňové přírodní čistírny na základě přicházejících podnětů z praxe,
- popis vícestupňových přírodních čistíren ve vztahu k látkám jako léky, hormonální antikoncepce, těžké kovy, pesticidy, drogy, apod.
- nové konstrukční uspořádání, nové typy technických řešení, nové užité vzory a patenty

Kromě nových čistíren odpadních vod je na místě řešení starších a zanedbaných kořenových čistíren, které na první pohled jeví známky poruchového provozu – neplní odtokové parametry, případně se odtokovými koncentracemi přibližují limitním hodnotám. Naše pracoviště řešilo několik studií, souvisejících s rekonstrukcí stávajících filtračních polí, které vykazují známky zakolmatování. Pozornost je potřeba zaměřit u jednotlivých případů na specifické příčiny – od zanedbané údržby, špatného návrhu nebo poddimenzovaného stavu dílčích objektů. Většina problémů s vyplavováním kalů z usazovacích nádrží souvisí se silným a nárazovým hydraulickým přetížením. Téměř ve všech případech byly důvodem ke kolmataci špatně provedené (nebo provozované) odlehčovací komory, které na mechanický stupeň pouští často až 10 x větší průtoky než projektované  $Q_{\max}$ . Logicky potom následuje při každém intenzivním dešti částečné vyplavení akumulovaného kalu ve šterbinové usazovací nádrži nebo vícekomorovém velkoobjemovém septiku.

Pokud se nezanedbá projekt a současně obsluha, potom je přírodní čistírna schopna odbourat znečištění v takové míře, že emisní parametry budou s přehledem dosaženy i ve velikostní kategorii 2001 – 10 000 EO. Důležité je neopomenout skutečnost, že přírodní čistírna ve své podstatě vykazuje velice podobné výsledky pro velikost 5 nebo 5 000 obyvatel. Dimenzování objektů je přímo úměrné počtu obyvatel, takže u správně navržených přírodních čistíren je jistota kvalitních výsledků závislá pouze na obsluze, resp. dodržování provozního řádu. Podstatný problém, resp. nedostatek pokročilé technologie přírodních ČOV je pouze plošná náročnost. Při ideální konfiguraci vychází průměrná velikost oploceného areálu obecní ČOV přibližně  $9\text{--}10 \text{ m}^2 \cdot \text{EO}^{-1}$ , tzn. pro obec o velikost 5 000 EO je za potřeby téměř  $50\,000 \text{ m}^2$ .

Obecným pravidlem pro optimální a udržitelné provozování přírodní čistírny je dostatečný sklon terénu. Není možné stanovit jako sklon terénu jedno číslo, které bude platit pro všechny situace a případy, protože je potřeba počítat s různými velikostmi objektů, ochrannými pásmy, různými koncepcemi využití jednotlivých stupňů, se vzrostlými stromy a jiným vegetačním doprovodem, variabilním a individuálním půdorysným uspořádáním, propojením, atd.

Přírodní čistírna odpadních vod je stavbou, k níž je potřeba přistupovat individuálně a stejně tak ji navrhovat a posuzovat. Dodržování návrhových pravidel, která byla překlopena do revidované normy ČSN 756402, je prvním předpokladem k dlouhodobě udržitelné čistírně. Druhým předpokladem, jak bylo uvedeno výše, je správný přístup k provozu čistírny. Tato činnost je dána zejména včasným odkalováním akumulacího prostoru v usazovací nádrž / septiku / anaerobním separátoru. V rámci poloprovozních objektů byla ověřena funkčnost přirozeného odvodňování a kompostování vyprodukovaných čistírenských kalů. Snadný provoz a minimální ekonomická zátěž jsou cestou, jak dosáhnout zároveň nízkých provozních nákladů – tudíž hlavní motivace ze strany provozovatelů a majitelů.

## 7 ZÁVĚR

S drobnou nadsázkou lze konstatovat, že kořenové čistírny odpadních vod mají za sebou životní etapu, na jejímž konci dnes stojí dva tábory vodohospodářských odborníků. Na jedné straně jsou to správci toků a orgány životního prostředí, kteří si zakládají na svých provozních zkušenostech a jsou přesvědčeni o neúčinnosti kořenových čistíren. Na druhé straně ekologičtí nadšenci a zastánci z řad projektantů, snažící se prosadit přírodní čistírny vždy a ve všech situacích. Obě skupiny si spolu permanentně mění názor, což dělá z problematiky téměř kontroverzní téma. Často, přes snahu zahrnout do projektových dokumentací nejnovější poznatky a výsledky VUT v Brně, naráží projektanti na bariéru, kterou nejsou ochotni překonávat, a tudíž se vydávají jinou cestou.

První aplikované výsledky, které přicházely v letech 2011 a dále, se soustředily na objasnění problémů a rozklíčování příčin, proč jsou v České republice s kořenovými čistírnami nekončící komplikace. Problémy byly odhaleny a vyřešeny, ověřeny v rámci modelových, poloprovozních a následně provozních objektů během několika zimních období na několika obecních i domovních přírodních čistírnách odpadních vod. Potvrzuje se, že třicetileté zahraniční zkušenosti zejména z Rakouské strany lze s úpravami implementovat i v podmínkách České republiky. Povedlo se překonat stanovené cíle – přírodní čistírny jako vícestupňové sestavy přes odpor četných státních institucí vykazují nejen hluboce podlimitní odtokové koncentrace, ale hodnoty účinností překonávají dnes „nejlepší dostupnou techniku“ ve všech sledovaných parametrech podle nařízení vlády pro vypouštění odpadních vod. Budoucí vytyčené cíle jsou poměrně jasné – přírodní technologie budou usilovat o zahrnutí mezi nejlepší dostupné techniky v nařízení vlády. Důležitou metou bude překonání procentuálního zastoupení mezi technologickou konkurencí a samozřejmě zastoupení v realizacích v co možná největším počtu.

Aby samotná technologie ale nestagnovala, v rámci pracovního kolektivu s několika doktorandy jsou dnes řešena témata, která postupně budou vylepšovat a inovovat již tak kvalitní řešení. Plánuje se širší uplatnění výsledků prostřednictvím firmy propojené s VUT – tzv. spin-off VUT v Brně, která v rámci licenčních smluv bude v budoucnu rozšiřovat užité vzory a prototypy vzniklé na VUT v Brně do praxe a projektových dokumentací. Při širším uplatnění na trhu budou vznikat ve spolupráci s provozovateli jednotlivých čistíren nové výsledky, budou přicházet nové zkušenosti a poznatky, které bude možné publikovat nejen na odborných workshopech, ale zejména v rámci článků ve významných časopisech.

Je evidentní, že oblast přírodního způsobu čištění odpadní vody zažila v poslední dekádě silný progres. V současné době dochází k postupnému prosazování zjištěných poznatků zejména prostřednictvím projekční činnosti. Paralelně probíhá spolupráce s obcemi a provozovateli přírodních čistíren s cílem získání široké základny provozních poznatků. Nové provozní objekty prochází kontinuálním vývojem, přičemž se ukazují jako pravdivé závěry plynoucí z teoretických a poloprovozních zkušeností.

Lze očekávat, že do budoucna se bude postupně měnit názor i zarytých skeptiků. Pokud budou ověřeny teoretické předpoklady v souvislosti s parametry  $N_{\text{celk}}$  a  $P_{\text{celk}}$ , pokud se ověří funkčnost nových technologických uspořádání filtrů a nových filtračních materiálů, potom nebrání téměř nic jejich širokému rozšíření – obdobně jako v Německu, Rakousku, Francii a dalších rozvinutých státech. Teprve potom přijde na řadu sledování účinností v odstraňování specifických polutantů jako farmaka, mikro plasty, pesticidy, apod.

Technologii čeká bezpochyby slibná budoucnost. Kombinací investičních nákladů, provozní náročnosti, ekologické zátěže, životnosti a udržitelnosti, společně s pozitivním ovlivněním mikroklima, zadržováním vody v krajině a dalších benefitech, vychází objektivně tato technologie minimálně pro velikostní kategorii do 500 EO jako nejlepší dostupná technika. Stejně tak je evidentní, že v posledních letech se pohled na přírodní čistírny postupně mění k lepšímu, a že i na základě výsledků získaných z vědeckých prací na Ústavu vodního hospodářství krajiny budou přírodní čistírny v budoucnu uznávanou a konkurenceschopnou technologií pro čištění odpadních vod.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Bílková, Z., Hrich, K., Křiška Dunajský, M., Schrimpelová, K., Malá, J. Holistický přístup k hodnocení denitrifikačních bioreaktorů. In *Sborník přednášek a posterových sdělení z 12. bienální konference a výstavy VODA 2017*. 2017. s. 215-218. ISBN: 978-80-263-1322-9.
- [2] Bílková, Z., Hrich, K., Malá, J., Schrimpelová, K., Křiška-Dunajský, M. *Start-Up Phase of Denitrifying Bioreactors Used For Agricultural Runoff Treatment*. International Conference Agriculture for Life, Life for Agriculture, Book of Abstracts, Land Reclamation, Earth Observation and Surveying, Environmental Engineering. Bucharest, Romania: UNIV AGRICULTURAL SCIENCES & VETERINARY MEDICINE BUCHAREST, 59 MARASTI BOULEVARD, DISTRICT 1, BUCHAREST, 011464, ROMANIA, 2018. p. 19-19. ISSN: 2457-3248.
- [3] Bílková, Z., Hrich, K., Malá, J., Schrimpelová, K., Křiška-Dunajský, M. Start-up phase of denitrifying bioreactors used for agricultural runoff treatment. *SCIENTIFIC PAPERS-SERIES E-LAND RECLAMATION EARTH OBSERVATION & SURVEYING ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 2018, vol. VII, no. 2018, p. 24-31. ISSN: 2285-6064.
- [4] Bodík, I., Křiška Dunajský, M., Gemeran, D., Jurík, L., Mackuľák, T., Zamkovský, J., Žember, J.: *Analýza podmienok správneho návrhu a aplikácie extenzívnych systémov čistenia odpadových vod vo vybraných obciach okresu Rimavská Sobota*, Cerogema, n.o., 2017., 96 s.
- [5] ČSN 75 6402, 2017. *Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [6] Herman, M.: *Rekonstrukce odlehčovací komory pro kořenovou čistírnu odpadních vod*. Brno, 2012. 95 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [7] Hnátková, T., Vymazal, J., Křiška-Dunajský, M. Reconstruction of a constructed wetland with horizontal subsurface flow after 18 years of operation. *Water Science and Technology*, 2014, vol. 68, no. 5, p. 1195-1202. ISSN: 0273-1223.
- [8] Hradilová, I.: *Modelování hydraulické účinnosti vícekomorových septiků*. Brno, 2015. 92 stran, 33 stran příl., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [9] Hrich, K., Schrimpelová, K., Malá, J., Bílková, Z., Křiška-Dunajský, M. Návrh in situ denitrifikačního bioreaktoru. In *Odpadové vody 2018 Zborník posterov 10. bienálnej konferencie s medzinárodnou účasťou*. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2018. s. 93-98. ISBN: 978-80-973196-0-1.

- [10] Jelínková, V., Plotěný, K.: Čištění odpadních vod za septikem a netradiční domovní čistírna odpadních vod, 11. Bienální konference CzWA VODA 2015, Poděbrady, 2015, s. 143–150, ISBN 978-80-263-0971-0.
- [11] Kadlec, R. H., Wallace, D. S.: *Treatment wetlands*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor, c2009, 1016 s., [4] s. ISBN 978-1-56670-526-4.
- [12] Kriška Dunajský, M., Malá, J., Králová, H., Hrich, K., Němcová, M., Schrimpelová, K., Hnátková, T. Nové technologie pro odstranění dusičnanů ze zemědělských smyvů. SOVAK, 2015, roč. 2015, č. 12, s. 12-16. ISSN: 1210-3039.
- [13] Kriška Dunajský, M., Němcová Pumprlová, M. Possibilities of improve the environmental performance of small water reservoirs on surface water quality in agricultural landscapes. *European Countryside*, 2018, Volume 66, p.77-87, ISSN: 1803-8417, <https://doi.org/10.11118/actaun201866010077>
- [14] Kriška Dunajský, M., Pumprlová Němcová, M., Malá, J., Hrich, K. Numerical prediction of nitrates concentrations using natural treatment for agricultural water. In *10th International Workshop on Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetland*. Třeboň: ENKI, o.p.s, Třeboň, 2017. p. 49-51. ISBN: 978-80-905483-3-6.
- [15] Kriška, M., Hyánková, E.: Vliv umístění rozrážecí stěny v komoře septiku na odtokové parametry, in. *ČOV pro objekty v horách, Dolní Morava*, 2013, ISBN 978-80-214-4746-2, str. 89-100.
- [16] Kriška, M., Němcová, M., Hyánková, E. The Influence of Ammonia on Groundwater Quality during Wastewater Irrigation, *Soil and Water Research*, Volume: 13,161-169p., DOI: 10.17221/124/2017-SWR. 2018
- [17] Kriška-Dunajský, M., Malá, J., Králová, H., Hrich, K., Němcová, M., Schrimpelová, K., Hnátková, T. Nové technologie pro odstranění dusičnanů ze zemědělských smyvů. SOVAK, 2015, roč. 2015, č. 12, s. 12-16. ISSN: 1210-3039.
- [18] Kriška-Dunajský, M., Mrkývka, M., Pumprlová Němcová, M., Chaloupka, O. Testing of floating island technology capabilities in the Czech Republic. In *16th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Conference Proceedings*. Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, Spain: The International Water Association, 2018. p. 532-535. ISBN: 978-84-17098-53-7.
- [19] Kriška-Dunajský, M., Šálek, J., Šálek, J. Využití vegetace k odvodnění kalů. *Acta Environmentalica Universitatis Comeniana*, 2012, roč. 20, č. 1, s. 38-43. ISSN: 1335-0285.
- [20] Langergraber, G., Haberl, R., Laber, J., Pressi, A., 2003. Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands. *Water Sci. Technol.* 48 (5), 25–34.
- [21] Langergraber, G., Weissenbacher, N. (2017): Survey on number and size distribution of TWs in Austria. *Water Sci Technol* 75(10), 2309-2315.
- [22] Luederitz, V., Ecker, E., Lange-Weber, M., Lange, A., Gersber, R. M., 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, Volume 18, 157–171.
- [23] Malá, J., Bílková, Z., Hrich, K., Schrimpelová, K., Kriška Dunajský, M., Šereš, M. Sustainability of denitrifying bioreactors with various fill media. *Plant, Soil and Environment (PSE)*, 2017, vol. 63, no. 10, p. 442-448. ISSN: 1805-9368.
- [24] Malá, J., Kriška Dunajský, M., Hrich, K., Králová, H., Bílková, Z., Schrimpelová, K. Náplně bioreaktorů pro odstranění dusičnanů ze zemědělských smyvů in situ. In *Odpadové vody 2016 Zborník prdnášok 9. bienálnej konferencie s medzinárodnou účasťou*. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2016. s. 67-72. ISBN: 978-80-89882-00-7.
- [25] Mlejnská, E. a Česko. *Extenzivní způsoby čištění odpadních vod*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2009. s. ISBN 978-80-85900-92-7. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:70a81e70-6aad-11e4-85f4-5ef3fc9ae867>

- [26] Mrvová, M.: *Odpadové hospodářství na kořenové čistírně odpadních vod*. Brno, 2014. 119 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [27] Nařízení vlády 401/2015 Sb. Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech.
- [28] Nařízení vlády 57/2016 Sb., Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních.
- [29] Němcová, M.: *Modelování biochemických pochodů ve filtračním prostředí kořenových čistíren*. Brno, 2015. 96 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [30] Němcová, M., Křiška, M. 2016. Development of constructed treatment wetlands in Czech Republic for five years term. In SGEM conference proceedings. *Ecology, Economics, Education and Legislation*. Sofia : STEF92 Technology Ltd., 225-232. ISBN: 978-619-7105-66- 7.
- [31] Němcová, M., Křiška Dunajský, M. Development of constructed treatment wetlands in Czech Republic for five years term. In *SGEM Conference Proceedings. International multidisciplinary geoconference SGEM*. Ecology, Economics, Education and Legislation. 51 Alexander Malinov Blvd., 1712, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2016. p. 225-232. ISBN: 978-619-7105-66-7. ISSN: 1314-2704.
- [32] ÖNORM B 2505- Kläranlagen – Intermittierend beschickte Bodenfilter („Pflanzenkläranlagen“)
- [33] Pobořil, J.: *Hodnocení vlivu deště na přirozenou regeneraci filtrační náplně*. Brno, 2012. 60 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [34] Pobořil, J.: *Technologie pro zvýšení propustnosti vod v kořenových ČOV*. Brno, 2013. 87 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.
- [35] Pumprlová Němcová, M., Křiška Dunajský, M., Mrkývka, M. Assessment of treatment efficiency and optimization of operating of vertical flow filter bed on constructed wetland for 850 PE. In *16th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Conference Proceedings*. Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain: The International Water Association, 2018. p. 693-696. ISBN: 978-84-17098-53-7.
- [36] Rozkošný, M., Křiška, M., Šálek, J., Bodík, I., Istenič, D. *Natural Technologies of Wastewater Treatment*. Brno: GWP CEE, 2014.
- [37] Rozkošný, M., Křiška-Dunajský, M., Šálek, J. Možnosti využití přírodních způsobů čištění odpadních vod a posouzení vlivu předčištění. *Vodní hospodářství*, 2010, roč. 2010, č. 5, s. 116-121. ISSN: 1211-0760.
- [38] Rozkošný, M., Křiška-Dunajský, M., Šálek, J., Bodík, I., Istenič, D. *Natural Technologies of Wastewater Treatment*. Brno, GWP CEE. 2014. (138 p.).
- [39] Šálek, J., Tlapák, V.: *Přírodní způsoby čištění znečištěných povrchových a odpadních vod*. 1. vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2006. 283 s. ISBN 80-86769-74-7.
- [40] Šereš, M., Mocová, K., Moradi, J., Křiška Dunajský, M., Kočí, V., Hnátková, T. The impact of woodchip-gravel mixture on the efficiency and toxicity of denitrification bioreactors. *Science of the Total Environment*, 2018, no. 647, p. 888-894. ISSN: 0048-9697.
- [41] Šrámková, D.: *Simulace proudění vody v jímce*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2013. 59 s., příl 48s CD. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D.
- [42] Tanner C.C., Sukias J.P.S., Upsdell M.P. (1998) Organic matter accumulation and maturation of gravel bed constructed wetlands treating dairy farm wastewaters. *Water Research* 32(10): 3046–3054.
- [43] Vymazal, J. 2007. Removal nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1-3): 48-65.

- [44] Vymazal, J., Kröpfelová, L.: Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen, (2015), *Ecological Engineering*, 84, pp. 202–208.
- [45] Zedník, O.: *Studie intenzifikace kořenové čistírny pro obec Machová*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. 2018. Vedoucí práce Ing. Michal Kriška, Ph.D.
- [46] Zedník, O.: *Využití stavebních recyklátů pro čištění odpadních vod*. Brno, 2020. 118 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Kriška, Ph.D.

## ABSTRAKT

Habilitační práce se zabývá technologií přírodních čistíren, které pronikly na trh v České republice na začátku 90 let dvacátého století. Původně nazývané kořenové čistírny odpadních vod byly velice diskriminovanou a zavržovanou technologií, uplatňující se pouze jako krajní alternativa vůči klasickým řešením čištění odpadní vody. Za nepříznivou situací stály početné příklady z praxe, kdy čistírna z pohledu správců vodního toku a orgánů životního prostředí nevykazovala dostatečné čistící účinnosti – byť většinou dodržovala povolené limity. Prostřednictvím několika na sebe navazujících výzkumných úkolů na pracovišti Ústavu vodního hospodářství krajiny, prostřednictvím osvěty mezi odbornou a neodbornou veřejnost, prostřednictvím aktivity na seminářích, workshopech a v diskuzních kruzích, došlo a nadále dochází k postupné změně pohledu. Stále více se objevují příklady přírodních čistíren odpadních vod, které vykazují se zapojením zkušeností a výsledků VUT (užitné vzory, funkční vzory, poloprovozy) výrazně kvalitnějších výsledků, než nařizují platná legislativní opatření. Zejména díky osvětě v České republice, kde byla situace velice tristní, se podařilo najít místo pro tuto technologii. Dnes jsou všechny negativní pohledy snadno vyvrátitelné a zejména na základě stále početnějších příkladů z praxe se jedná o technologii, vhodnou zejména pro menší producenty, bez ohledu na druh kanalizační sítě, nadmořskou výšku nebo kvalitu přitékající odpadní vody.