



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

**ODSTRAŇOVÁNÍ FOSFORU NA KOŘENOVÝCH
ČISTÍRNÁCH ODPADNÍCH VOD**

REMOVAL OF PHOSPHOROUS AT CONSTRUCTED TREATMENT WETLANDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Štěpáník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAVA PUMPRLOVÁ NĚMCOVÁ

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

**ODSTRAŇOVÁNÍ FOSFORU NA KOŘENOVÝCH
ČISTÍRNÁCH ODPADNÍCH VOD**

REMOVAL OF PHOSPHOROUS AT CONSTRUCTED TREATMENT WETLANDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Štěpáník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAVA PUMPRLOVÁ NĚMCOVÁ

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Radek Štěpáník
Název	Odstraňování fosforu na kořenových čistírnách odpadních vod
Vedoucí práce	Ing. Miroslava Pumprlová Němcová
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

KADLEC, R., WALLACE, S. 2009. Treatment wetlands, 2nd ed. CRC press, Boca Raton, FL.
KRIŠKA, K., NĚMCOVÁ, M. 2015. Kořenové čistírny odpadních vod. Metodická příručka pro návrh a realizaci. Vysoké učení technické v Brně.
Databáze vědeckých článků - sciencedirect.com, apod.
PITTER, Pavel. Hydrochemie. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9.
ČSN 75 6402. Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel. Praha: Český normalizační institut, 2017.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Moderní kořenové čistírny odpadních vod dosahují vysokých účinností při odstranění sledovaných parametrů znečištění - BSK, CHSK, NL, N-NH₄⁺. Zpřísňující se nároky na kvalitu vyčištěných odpadních vod požadují minimalizovat i koncentrace fosforu, jehož hodnoty doposud nebyly na odtoku z malých čistírenských objektů dle legislativy povinně sledovány. Pro technologii kořenových čistíren odpadních vod to znamená, že je nezbytné nalézt vhodný a udržitelný způsob odstraňování fosforu, tak aby docházelo k účinnému snížení jeho koncentrací, a současně byly co nejvíce zachovány výhody kořenových čistíren, tzn. zejména nízké provozní náklady, přírodě blízké řešení, apod.

Bakalářská práce bude především teoretickou rešerší, která se zaměří na problematiku odstraňování fosforu na kořenových čistírnách odpadních vod. Cílem práce bude posoudit dosavadní zahraniční i tuzemské způsoby a technologie pro odstraňování fosforu na KČOV a jejich účinnost. Uvést možnosti nejčastěji používaných nových i stávajících technologií pro odstranění fosforu na čistírnách odpadních vod a posoudit je z hlediska možnosti použití na KČOV.

Výsledkem práce by měla být doporučení pro výběr vhodné technologie pro odstranění fosforu na kořenových čistírnách v České republice, která bude možné v praxi s úspěchem realizovat.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Miroslava Pumprlová Němcová
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou odstraňování fosforu na vegetačních (kořenových) čistírnách odpadních vod. Hlavním úkolem práce je provést odbornou rešerši se zaměřením na různé technologie pro odstraňování fosforu na malých komunálních čistírnách odpadních vod, s cílem posoudit jejich vhodnost při použití právě na vegetačních čistírnách. Dílčí kapitoly práce se věnují tématu vegetačních (kořenových) čistíren odpadních vod, se zaměřením na problematiku odstraňování fosforu v širším kontextu. Výsledkem práce je doporučení konkrétních technologických řešení, která by bylo možné využít na vegetačních čistírnách. Součástí práce je i praktický příkladem návrhu vybrané technologie pro odstranění fosforu pro reálnou vegetační čistírnu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fosfor, Odstraňování, Vegetační (kořenové) čistírny odpadních vod, Horizontální filtr, Vertikální filtr

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with issues of the removal of phosphorus in constructed (treatment) wetland. The main purpose of this thesis is to make literature review with focus on different technology of the removal of phosphorus from small community waste water treatment plants and evaluate their appropriateness for usage in constructed (treatment) wetlands. Sub-chapters deal with the topic of constructed (treatment) wetlands with a focus on the removal of phosphorus in broader context. The result of this thesis is recommendation for specific technological solutions, that could be used in constructed (treatment) wetlands. Part of this thesis is practical example of the design of selected technology for the removal of phosphorus for a real constructed (treatment) wetland.

KEYWORDS

Phosphorus, Removal, Constructed (treatment) wetland, Horizontal filter, Vertical filter

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Radek Štěpáník *Odstraňování fosforu na kořenových čistírnách odpadních vod*. Brno, 2019. 57 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Miroslava Pumprlová Němcová

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Odstraňování fosforu na kořenových čistírnách odpadních vod* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21. 5. 2019

Radek Štěpáník
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Odstraňování fosforu na kořenových čistírnách odpadních vod* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 5. 2019

Radek Štěpáník
autor práce

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat své vedoucí bakalářské práce paní Ing. Miroslavě Pumprlové Němcové za její vedení a připomínky při zpracování této práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za její podporu během mého studia a během zpracování této bakalářské práce.

Obsah:

1	Úvod.....	3
2	Cíle práce.....	4
3	Technologie kořenových čistíren odpadních vod.....	5
3.1	Kořenové čistírny odpadních vod.....	5
3.1.1	Historie ve světě	5
3.1.2	Historie KČOV v České republice	6
3.2	Mechanické předčištění	6
3.2.1	Odlehčovací komora	6
3.2.2	Česle	7
3.2.3	Lapáky písku	8
3.3	Sedimentační nádrže.....	9
3.3.1	Vícekomorový septik	9
3.3.2	Štěrbínová usazovací nádrž	10
3.4	Rozdělení filtračních polí na KČOV	10
3.4.1	Horizontální filtry (HF).....	11
3.4.2	Vertikální filtry (VF).....	12
4	Legislativa	14
5	Chemie fosforu	18
5.1	Původ fosforu	18
5.2	Formy fosforu ve vodách.....	18
5.3	Vliv fosforu ve vodách	19
6	Metody odstraňování fosforu	20
6.1	Kombinace filtračních polí	20
6.2	Odstraňování fosforu solemi železa a hliníku	21
6.2.1	Sole železa.....	22
6.2.2	Sole Hliníku.....	22
6.2.3	Využití technologie srážení solemi železa a hliníku na vegetačních ČOV	23

6.3	Odstraňování fosforu vápnem	24
6.3.1	Využití technologie srážení vápnem na vegetačních ČOV	24
6.4	Odstraňování fosforu Poly-P bakterie	24
6.4.1	Využití technologie Poly-P bakterií na vegetačních ČOV	25
6.5	Metody využívající speciální filtrační materiály	25
6.5.1	Využití technologie speciálních typů materiálů na filtračních polích ČOV	27
6.6	Odstraňování fosforu pomocí mokřadních rostlin	27
6.7	Shrnutí metod pro srážení fosforu	32
7	KČOV Dražovice	34
7.1	Dražovice	34
7.2	Vyhodnocení měření	36
7.3	Návrh technologie pro odstranění fosforu	43
8	Závěr	47
9	Seznam citací	49
9.1	Seznam internetových zdrojů	51
10	Seznam obrázků	54
11	Seznam tabulek	56
12	Seznam použitých zkratk	57

1 Úvod

Vegetační čistírny odpadních vod, často označované také jako kořenové čistírny, můžeme dnes zařadit mezi běžně používané technologie v procesu čištění odpadních vod. Jedná se o technologii, která se standardně skládá z mechanického předčištění, na něho navazujících filtračních polí, které tvoří hlavní čistící stupeň a v neposlední řadě biologických dočišťovacích nádrží jenž mohou být do systému zařazeny jako terciální stupeň. Na rozdíl od klasických čistíren odpadních vod, používají vegetační kořenové čistírny pro čištění odpadní vody procesy přírodě blízké.

V dnešní době je většina vegetačních kořenových čistíren odpadních vod využívána pro zdroje znečištění do velikosti 2000 ekvivalentních obyvatel. U takových zdrojů aktuálně nejsou legislativně stanoveny limity pro množství vypouštěného fosforu, avšak v dnešní době se stále zvyšují nároky na ekologii a na kvalitu povrchových i podzemních vod. V případě zprůsnění těchto požadavků bude potřeba na většině dnes používaných vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod konstrukčních a technologických úprav, které zajistí splnění přísnějších limitů pro vypouštěné množství fosforu, neboť klasické vertikální a horizontální filtrační pole nejsou dimenzovány tak, aby zvládaly odstraňovat dostatečné množství fosforu.

V současnosti existuje řada možností, jak zajistit požadovanou účinnost odstraňování fosforu na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod. Různé metody a technologie mají variabilní možnosti uplatnění. Řada, zejména zahraničních výzkumů, se věnuje výzkumům a testování vybraných metod a technologií, které by fosfor z odpadních vod účinně odstranily. Mezi nejčastější řešení můžeme zařadit například využití různých typů filtračních materiálů, použití chemicko-fyzikálních metod, možnosti snížení obsahu fosforu ve vodách s využitím mokřadních rostlin či použití speciálních typů bakterií se zvýšenou spotřebou fosforu, takzvaných Poly-p bakterií. Pro volbu vhodné technologie, za účelem snížit koncentraci fosforu ve vodě, je nutné posoudit řadu hledisek, zejména udržitelnost technologie, její finanční náročnost či celkovou účinnost.

Za účelem výběru vhodné technologie pro odstranění fosforu na vegetačních čistírnách odpadních vod byla sepsána i tato bakalářská práce. Přesto, že na většinu vegetačních (kořenových) čistíren, které jsou v České republice aktuálně provozovány, není kladen požadavek na odstraňování fosforu, je takřka jistotou, že v budoucnu bude nutné tento problém řešit. Tomu nasvědčuje jak zpřísňující se legislativa v oblasti jakosti povrchových a podzemních vod, tak i odborná diskuse vedená na téma problematiky obsahu fosforu ve vodách.

2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je porovnání v současnosti nejvíce používaných metod pro odstraňování fosforu z odpadních vod a následného zhodnocení možností jejich využití na vegetačních (kořenových) čistírnách odpadních vod. To vše s ohledem na finanční náklady (jak investiční, tak i provozní), účinnost technologie a její ekologický dopad. Splnění tohoto cíle práce vyžaduje kvalitní rešerši tuzemských a zejména zahraničních odborných prací.

Dílčí kapitoly, které budou předcházet nebo doplňovat hlavní téma bakalářské práce, by se měly věnovat popisu technologie vegetačních čistíren odpadních vod a účinnosti odstraňování požadovaného znečištění v návaznosti na aktuální legislativu. To vše se zaměřením na problematiku odstraňování fosforu z odpadních vod, jeho příčiny a důsledky výskytu v odpadní i povrchové vodě.

Přesto, že hlavním úkolem práce je teoretická rešerše v problematice odstraňování fosforu na vegetačních čistírnách odpadních vod, budou poslední kapitoly zaměřené i na praktickou aplikaci získaných poznatků. Na základě získaných analýz odpadní vody pro konkrétní čistírnu odpadních vod by mělo dojít k vyhodnocení čistící účinnosti a k návrhu vhodné technologie pro snížení obsahu fosforu v odpadní vodě na odtoku z čistírny.

Při současné legislativní úpravě nejsou nijak nastaveny podmínky odstraňování fosforu u malých ČOV do 2000 EO. Při zpřísnění emisních standardů ovšem nastane potřeba zaručit dostatečnou účinnost odstranění fosforu i pro malé kategorie čistíren. Z tohoto důvodu je potřeba zjistit, které z dnes zkoumaných a konvenčně používaných metod by se nejlépe a co možná nejefektivněji daly použít na dnes již vybudovaných vegetačních čistírnách odpadních vod. Při zavedení technologie na odstranění fosforu do provozu vegetačních čistíren by se tyto staly ještě více ekologické a nezatěžovaly by povrchové a podpovrchové vody nadměrným množstvím fosforu. Došlo by k eliminaci bodového vypouštění nutrientů do povrchových vod, což povede k zamezení eutrofizace vod a tím i k jejich zkvalitnění. Z ekologického hlediska tato opatření na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod pomohou ochránit faunu a floru v tocích na území České republiky. Tato práce se věnuje tématu, které v současné době není pro vegetační čistírny aktivně řešeno, z tohoto důvodu může mít obsah práce význam i pro další výzkum a odborné studie.

Výsledkem bakalářské práce měl být přehled různých typů metod a technologií pro odstranění fosforu, doplněný o komentář vhodnosti jejich použití na vegetačních čistírnách odpadních vod.

3 Technologie kořenových čistíren odpadních vod

3.1 Kořenové čistírny odpadních vod

Vegetační čistírna odpadních vod, bývá častěji označována jako, kořenová čistírna odpadních vod (KČOV) je uměle vytvořený technický objekt, který slouží k čištění komunálních, domovních a ve výjimečných případech i průmyslových odpadních vod (Křiška a Němcová, 2015). Jedná se o technologii, u které hlavní čistící stupeň tvoří filtrační pole, která jsou naplněna filtračním materiálem a osázena mokřadními rostlinami např. rákosem obecným nebo orobincem (Šálek a kol., 2013). Vegetační kořenové čistírny odpadních vod jsou převážně systémy, na nichž je napojeno maximálně do 2000 EO. Z legislativních požadavků vyplývá, že není potřeba pro takovéto čistírny sledovat množství vypouštěného fosforu (Vymazal, 2009). V dnešní době se ovšem výzkum nezaměřuje pouze na ukazatele BSK₅, CHSK_{Cr}, NL, N-NH₄ a P, ale objevují se studie, které zkoumají účinnost této technologie při odstraňování léčiv, těžkých kovů a jiných nebezpečných látek (Vymazal a kol., 2016).

3.1.1 Historie ve světě

Jako předchůdci KČOV byly používány přírodní mokřady. Tento způsob se začal uplatňovat v USA na počátku 20. století. K prvním takto používaným mokřadům patří Great Meadows poblíž řeky Cocord ve státě Massachusetts jenž se začal využívat v roce 1912. Poté se tento způsob nakládání s odpadními vodami rozšířil po USA. K prvním výstavbám KČOV začalo docházet až v 70. letech 20. Století a to výhradně na západě (Kadlec a Wallace, 2009). Z počátku ovšem bylo toto řešení čištění odpadních vod odmítáno z důvodů nedůvěry v jeho jednoduchosti a také proto že k provozu nebyla zapotřebí mechanizace ani elektrické komponenty. Celý provoz byl zajištěn gravitačně. Tento trend nám ukazuje například Rakousko, které mezi lety 1983 až 1995 uvedlo do provozu pouze 50 KČOV. Tato situace se ovšem s postupem času začala měnit a dnes se výstavba a zprovoznění nových KČOV výrazně zvýšilo. V Evropě je lídrem v provozu KČOV Německo jenž provozuje více jak 50000 kořenových čistíren odpadních vod (Vymazal, 2003).



Obr. 1 Mokřad Great Meadows (online cit. [1])

3.1.2 Historie KČOV v České republice

V České republice se kořenové čistírny odpadních vod s horizontálními filtry začaly uplatňovat od roku 1989. Od této doby bylo do provozu uvedeno asi 250 dalších KČOV s horizontálním filtrem (Kröpfelová a spol., 2009). Z počátku panovaly obavy z provozování KČOV v oblastech s nadmořskou výškou větší jak 500 m na našem území. Ze zkušeností z jiných zemí a s provozem KČOV v severovýchodních státech se potvrdila funkčnost i ve vyšších polohách a méně příznivých podmínkách chladnějšího klimatu. Dnes u nás postavené KČOV s vertikálními filtry mají stále charakter spíše experimentální (Vymazal a Březinová, 2014). Jedním z takových příkladů je KČOV Kotenčice přestavěná v roce 2011, která je takzvanou hybridní kořenovou čistírnou odpadních vod složenou z devíti horizontálních a čtyř vertikálních filtrů (online cit. [7]). Avšak nově budované KČOV jsou už vždy vybaveny technologií vertikálních filtrů.

3.2 Mechanické předčištění

Mechanické předčištění je řazeno před filtračními poli. Skládá se z česlí, lapáků písků a vícekomorových septiků. Součástí těchto konstrukcí je i odlehčovací komora, která je řazena před česlemi na přítoku. Celá tato část nám slouží k odstraňování hrubých i drobných nerozpustných látek čímž docílíme zvýšené životnosti filtračních polí (Křiška a Němcová, 2015).

3.2.1 Odlehčovací komora

Jedná se o zařízení, které slouží k redukci přítékajících vod a k zajištění toho, že přítékající odpadní voda nebude příliš naředěná. Tato technologie má tedy nezanedbatelný vliv na celkovou životnost KČOV. Z tohoto důvodu je velmi důležité správné navržení odlehčovací komory (Křiška a Němcová, 2015). Návrh se řídí ředicím poměrem (online cit. [8]).

$$Q_{zř} = m * Q_h \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

$Q_{zř}$	Průtok zředěný (m^3/h)
Q_h	Průtok bezdeštný (m^3/h)
m	násobek zředění

Hodnotu m volíme obvykle mezi 1 až 6 avšak tato hodnota může být stanovena správcem toku (online cit. [8]).

3.2.2 Česle

Používají se jako první stupeň mechanického předčištění a slouží k zachycování hrubých nečistot. Dělíme je podle velikostí otvorů v česlích na hrubé a jemné česle. Hrubé česle mají průliny o velikosti 40 až 120 mm a jemné česle mají šířku průlin 0,5 až 6 mm. Materiál zachycený česlemi nazýváme shrabky. Ty jsou odstraňovány buď ručně, nebo jsou odstraněny automaticky. Při ručním odstraňování je potřeba obsluhy, jež tento proces zajišťuje. Sklon česlí by měl svírat se dnem úhel asi 45° (Matysíková, 2014). U ČOV do 500 EO je požadavek na samočisticí česle s co nejjednodušší obsluhou. U těchto česlí, pokud nejsou zdvojené, je požadavek na zbudování revizních česlí. Strojní česle by měly být chráněny před nepříznivými povětrnostními podmínkami vhodnou stavební úpravou (ČSN 75 6402, 2017). Automaticky se čistí česle samočisticí, které jsou tvořené segmentovým nekonečným pásem. Samočisticí schopnost je dána speciálním tvarem a polohou segmentů. Dále se automaticky čistí strojně stírané česle, které mohou být jak hrubé tak i jemné česle (Matysíková, 2014). Rychlost přitékajících odpadních vod by neměla přesáhnout hodnotu 1,0 m/s při maximálním průtoku. Pro shrabky je nutné vybudovat shromažďovací prostory, z kterých se pravidelně odváží k dalšímu využití nebo ke skládkování (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. 2 Česle KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)

3.2.3 Lapáky písku

Lapák písku je nezbytným zařízením každé čistírny odpadních vod umístěné na jednotné kanalizační stoce. Jedná se o zařízení sloužící k separaci písku od odpadních vod. K tomuto procesu využívají gravitačních sil spolu se zpomalenou průtočnou rychlostí (online cit. [9]). Rychlost vody u podélného lapáku písku by měla být maximálně 0,3 m/s a vztupná rychlost ve vertikálním by měla být do 0,05 m/s při maximálním průtoku. Doba zdržení by neměla být kratší jak 30 s při maximálním průtoku (ČSN 75 6402, 2017). Jsou uzpůsobeny tomu, aby docházelo k odstraňování pouze písku a nikoli organických suspenzí. Minimální průměr odstraňovaných částic je 0,2mm. Písek je z lapáku pravidelně odstraňován (online cit. [10]). Lapáky písku dělíme podle směru průtoku na horizontální, vertikální, provzdušňovaný s příčnou cirkulací a vírové (online cit. [9]). K horizontálnímu lapáku písku patří štěrbinový, který nachází největší uplatnění právě na malých čistírnách odpadních vod. Je tvořen trojúhelníkovým nebo obdélníkovým žlabem se štěrbinami ve dně. Ty mají velikost obvykle 10 cm a propouští vodu do boční šachty, z níž je následně písek odtěžován. Vertikální lapák písku přivádí vodu ze spodu a odvádí ji shora. Voda stoupá pomaleji, než je usazovací rychlost písku a tak dochází k jeho usazení s ním, však sedimentuje i organické znečištění. Proto je potřeba provádět propírání písku což je nevýhodou tohoto řešení lapáku písku (online cit. [10]). Lapák písku má akumulaci prostor na zachycený písek. Tento prostor je navržený tak aby jeho kapacita byla na produkci písku za 10 až 15 dní. Dále by měly být vybaveny zařízením pro jeho odstraňování, jehož součástí může být zařízení pro praní písku. Je potřeba zbudovat prostor pro dočasné uskladnění než se písky odvezou na další využití nebo na skládku (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. 3 Lapák písku KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)

3.3 Sedimentační nádrže

U vegetačních čistíren odpadních vod používáme zpravidla dva typy sedimentačních nádrží: vícekomorový septik, který se hodí spíše pro menší ČOV, přibližně do velikosti 100 EO, a šterbinová usazovací nádrž, kterou používáme u větších ČOV.

3.3.1 Vícekomorový septik

Septik zabraňuje zanášení filtračního pole oddělením tuhých kalů od kapalných. Septiky se používají na menších kořenových čistírnách odpadních vod přibližně do 100 EO (Kriška a Němcová, 2015). Septik navrhujeme tak, aby měl minimální účinný prostor 3 m³ s doporučenou dobou zdržení odpadní vody, po dobu alespoň 5 dní. Celkový prostor septiku je složen z účinného prostoru, který je o 50 až 60 % a tak vytváří kalový prostor. Účinný prostor navrhujeme dle rovnice (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. 4 Vícekomorový septik (online cit. [5])

$$V = a * n * q * t \text{ (m}^3\text{)}$$

- a Součinitel vyjadřující kalový prostor
- n Počet připojených obyvatel
- q Specifická potřeba vody (m³/d/os)
- t Střední doba zdržení (obvykle 5) (dny)

Septik obvykle tvoří tři komory, které jsou odděleny příčkami. Ty jsou vybaveny otvory, kdy horní hrana otvoru by měla být alespoň 0,3 m pod hladinou a spodní hranou 0,4 m nade dnem.

Kal nesmí protékat mezi sekcemi ani do odtoku a proto musí být norná stěna u odtoku a přítoku alespoň 0,15 m nad hladinou a 0,3 m pod hladinou (ČSN 75 6402, 2017). Z dlouhodobého hlediska je vhodnějším řešením užívání vícekomorových septiků než použití štěrbínové usazovací nádrže. Avšak z hlediska finančních nákladů na výstavbu je septiků nákladnější (Křiška a Němcová, 2015).

3.3.2 Štěrbínová usazovací nádrž

Štěrbínová usazovací nádrž je hluboko založená horizontálně protékaná nádrž s odděleným kalovým prostorem. V horní části nádrže probíhá usazování, kal dále propadá níže do kalového prostoru, kde dochází k jeho zahuštění a anaerobní stabilizaci (online cit. [14]). Vtok by měl být upravený tak, aby přitékající voda byla rozložena po celé průřezové ploše žlabu. U odtoku by měla být umístěna norná stěna, která by měla být ponořena alespoň 0,3 m pod hladinu a 0,2 m nad hladinou. Stěny bychom měli vybudovat ve sklonu nejméně 1,4:1. Šířku štěrbiny navrhujeme nejméně 0,12 m. Poměry šířky a délky ve žlabu navrhujeme v poměru 1:5 (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. 5 Štěrbínová usazovací nádrž (online cit. [11])

3.4 Rozdělení filtračních polí na KČOV

KČOV se dělí do tří základních typů a to na KČOV s volnou vodní hladinou, filtry s horizontálním prouděním vody a filtry s vertikálním prouděním vody (Kadlec a Wallace, 2009)

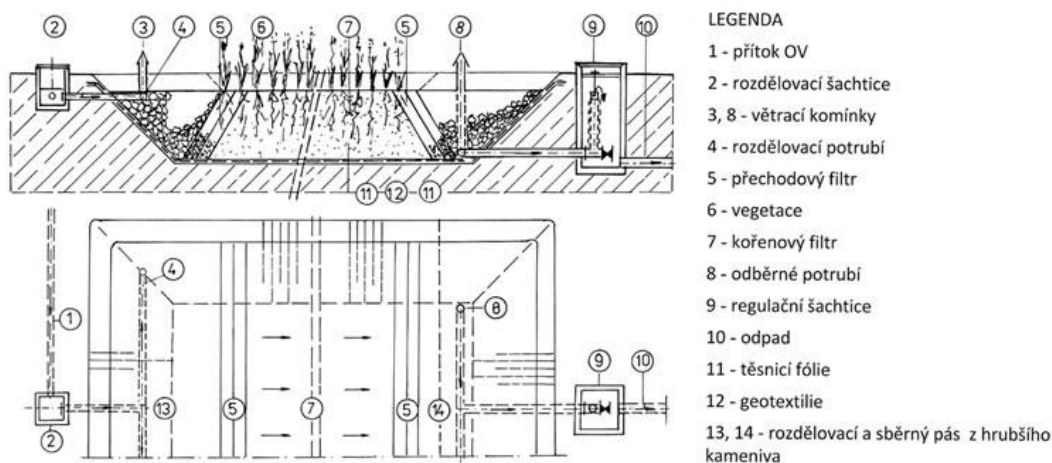
3.4.1 Horizontální filtry (HF)

Jedná se o technologii filtračního pole, která je na území České republiky nejrozšířenější, používá se takřka na všech dnes u nás provozovaných KČOV (Křiška a Němcová, 2015). Výhodou tohoto řešení je to, že znečištěné vody nemohou přijít do styku s lidmi ani jinými živočichy, protože během procesu čištění jsou pod povrchem filtru (Kadlec a Wallace, 2009). K dosažení správné účinnosti se plocha filtru navrhuje průměrně o ploše 5 m² pro 1 EO. V praxi se setkáváme s rozmezím mezi 2 až 10 m² na 1 EO (Pelikán, 2004). Přesné rozměry filtračního pole se spočítají pomocí rovnice (ČSN 75 6402, 2017).

$$A_h = \frac{Q_d(\ln C_{in} - \ln C_{out})}{K_{BSK_5} * n * h} \text{ (m}^2\text{)}$$

- A_h plocha filtru (m²)
 Q_d Průměrný průtok odpadních vod (m³*d⁻¹)
 C_{in} BSK₅ na přítoku (mg/l)
 C_{out} BSK₅ na odtoku (mg/l)
 K_{BSK} Rychlostní konstanta úbytku znečištění (m/d), Doporučená hodnota 0,1
 n Pórovitost (bezrozměrná forma)
 h Hloubka filtru (m)

Toto řešení má ovšem jen velmi omezenou účinnost na odstraňování fosforu, ten je zde odstraňován pomocí mokřadních rostlin (Pelikán, 2004). Jako náplň filtračního pole slouží říční nebo drcené kamenivo frakce 4/8 mm. Vhodným řešením je použití praných štěrků a písků, čímž se předchází kolmataci přítomných prachových částic. V blízkosti odtokového potrubí by mělo dojít ke zvážení zrnitosti na 8/16 až 16/32 mm v závislosti na velikosti otvoru v odtokovém potrubí (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. 6 Schéma horizontálního filtru KČOV (Šálek a kol., 2013)



Obr. 7 Horizontální filtrační pole KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)

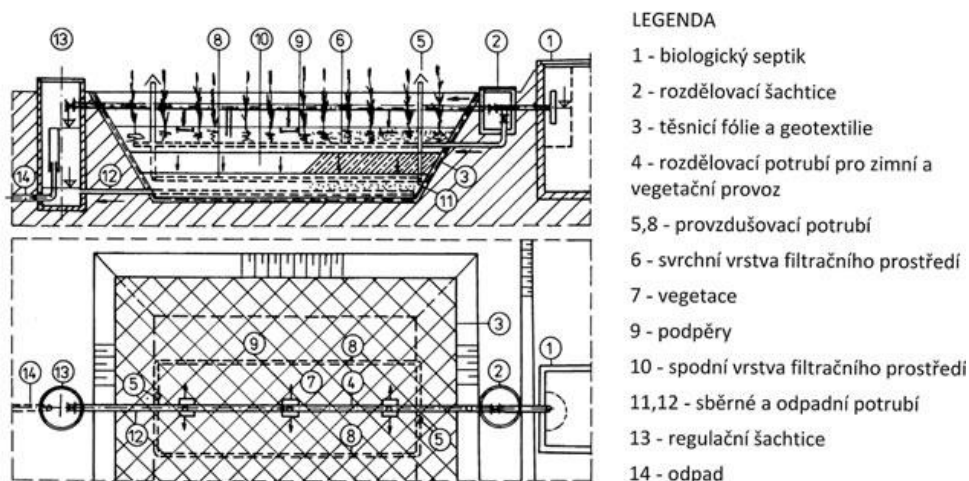
3.4.2 Vertikální filtry (VF)

Vertikálních filtrů se používá, několik typů nejčastěji používaný typ je pulzně skrápěný vertikální filtr, který se uplatňuje hlavně v Evropě (Kadlec a Wallace, 2009). Je zde uplatňováno proudění nenasyceným filtračním materiálem směrem dolů. Složení vertikálních filtrů je doporučeno normou ČSN 75 6402 (ČSN 75 6402, 2017).

Tabulka 1 Složení vrstev vertikálního filtru (ČSN 75 6402, 2017)

Název vrstvy	Výška (mm)	Materiál
Svrchní vrstva	50 až 100 (200 mm v případě nevhodných klimatických podmínek nad 500 m. n. m.)	Praný říční štěrk 4/8P nebo 8/16P mm
Hlavní filtrační vrstva	500 až 600	Praný písek 0/4P ($0.2 \leq d_{10} \leq 0.4$)
Přechodový filtr	50 až 100	Drcený štěrk (praný) 4/8P mm
Drenážní vrstva	200	Drcený štěrk (praný) 8/16P nebo 16/32P mm
Těsnění	-	Hydroizolace (PVC, PE, guma) 1.5 mm Krytá oboustranně geotextilií 500 g/m ²
Kompenzační vrstva (v případě nutnosti)	0 až 50	Písek

U vertikálního filtru se nedoporučuje, použití samostatné šterbinové nádrže, doporučuje se vytvořit mezistupeň ve formě horizontálního filtru. Návrh velikosti vertikálního filtru je závislý na chemické spotřebě kyslíku (CHSK) a hydraulickém zatížení. Je vyžadováno, aby látkové zatížení filtru nebylo větší než $15 \text{ g}_{\text{CHSK}}/\text{EO}/\text{den}$ a současně hydraulické zatížení bylo $125 - 150 \text{ mm}/\text{den}$. V případě zařazení vertikálního filtru za jiným biologickým stupněm se může uvažovat o velikosti $1 \text{ m}^2/\text{EO}$. V případě kdy je vertikální filtr samostatným biologickým stupněm je doporučená plocha $4 \text{ m}^2/\text{EO}$ (ČSN 75 6402, 2017). Vždy by však měl být návrh plochy filtru posouzen ve vztahu k látkovému a hydraulickému zatížení.



Obr. 8 Schéma vertikálního filtru KČOV (Šálek a kol., 2013)



Obr. 9 Vertikální filtrační pole KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)

4 Legislativa

Vegetační (kořenové) čistírny, stejně jako všechny ostatní typy čistírenských objektů, musí splňovat požadavky na kvalitu vypouštěných vod, která se řídí Nařízením 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*. Dle tohoto legislativního dokumentu, který je závazný pro všechny pro všechny provozované čistírny odpadních vod, je fosfor sledován až od kategorie ČOV větších než 2001 EO.

Požadavky v Nařízení vlády 401/2015 Sb. pro maximální emisní standardy jsou určeny dle kategorie čistírny odpadních vod. Čistírny odpadních vod jsou rozděleny podle velikostí na čistírny odpadních vod do 500 EO, kategorie 501 až 2000 EO, kategorie 2001 až 10000 EO, kategorie 10001 až 100000 EO a poslední kategorie je nad 100000 EO. Pro první dvě kategorie není stanovena hodnota průměrné ani maximální účinnosti pro fosfor (NV 401/2015 Sb., 2015). V těchto prvních dvou kategoriích se nachází většina kořenových vegetačních čistíren. Například v první kategorii se nachází vegetační křenové čistírny odpadních vod Břehov pro 100 EO nebo Slavošovice pro 150 EO (Kröpfelová a kol., 2008). Do druhé kategorie patří například vegetační kořenová čistírna odpadních vod Dražovice 850 EO.

Emisní hodnoty pro fosfor nejsou u prvních dvou kategoriích stanoveny. Pro kategorii 2001 až 10000 EO je průměrná emisní hodnota pro fosfor ve vypouštěné odpadní vodě dána limitem 3 mg/l, maximální emisní hodnota je 8 mg/l. Pro kategorii 10001 až 100000 EO jsou emisní standardy stanoveny následovně: průměrné množství vypouštěného fosforu je limitováno hodnotou 2 mg/l a maximální množství 6 mg/l fosforu v odpadní vodě. U další kategorie nad 100000 EO jsou emisní standardy stanoveny takto: průměrná emisní hodnota vypouštěného fosforu je 1 mg/l a maximální emisní hodnota je 3 mg/l fosforu. Maximální hodnoty jsou nepřekročitelné, vzorky stanovuje vodoprávní úřad (NV 401/2015 Sb., 2015).

Tabulka 2 Emisní standardy (NV 401/2015 Sb., 2015)

Kategorie ČOV (EO) nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL		N-NH ₄		N _{celk.}		P _{celk.}	
	p	m	p	m	p	m	průměr	m	průměr	m	průměr	m
< 500	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
500 - 2 000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2 001 - 10 000	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3	8
10 001 - 100 000	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
> 100 000	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

Pro stejné kategorie čistíren odpadních vod jsou stanoveny i hodnoty minimálních účinností při odstraňování fosforu. V kategorii do 500 EO a v kategorii 500 až 2000 EO opět nejsou tyto limitní účinnosti pro odstraňování fosforu legislativou nařízeny. Pro kategorii 2001 až 10000 EO je minimální účinnost stanovena jako 70 %, pro kategorii 10001 až 100000 EO je to pak hodnota účinnosti 80 % a stejně tak pro kategorii nad 100000 EO je minimální účinnost stanovena také na hodnotu 80 % (NV 401/2015 Sb., 2015).

Tabulka 3 Přípustná minimální účinnost čištění vypouštěných odpadních vod v % (NV 401/2015 Sb., 2015)

Kategorie ČOV (EO) nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}	BSK ₅	N-NH ₄	Ncelk.	Pcelk.
< 500	70	80	-	-	-
500 - 2 000	70	80	50	-	-
2 001 - 10 000	75	85	60	-	70
10 001 - 100 000	75	85	-	70	80
> 100 000	75	85	-	70	80

Minimální účinnost je dodržena podle tabulky 3, pokud je dodržen odpovídající počet vyhovujících vzorků uvedených v tabulce 4 (NV 401/2015 Sb., 2015).

Tabulka 4 Počet přípustných nevyhovujících vzorků (NV 401/2015 Sb., 2015)

Celkový počet vzorků	Přípustný počet nevyhovujících vzorků
4 - 7	1
8 - 16	2
17 - 28	3
29 - 40	4
41 - 53	5
54 - 67	6
68 - 81	7
82 - 95	8
96 - 110	9
111 - 125	10
126 - 140	11
141 - 155	12
156 - 171	13
172 - 187	14
188 - 203	15
204 - 219	16
220 - 235	17
236 - 251	18
252 - 268	19

269 - 284	20
285 - 300	21
301 - 317	22
318 - 334	23
335 - 351	24
352 - 366	25

V současné době sílí tlak na to, aby se požadavky na emisní standardy začaly zpřísňovat. Tyto požadavky se za posledních takřka 20 let nezměnily. Zpřísnění těchto požadavků by vedlo k zlepšení ekologické stavu na území České republiky a zároveň by se zlepšila kvalita povrchových a podpovrchových vod. (Fiala, 2016).

Tabulka 5 BAT limity (NV 401/2015 Sb., 2015)

Kat. ČOV (EO)	Nejlepší dostupná technologie	CHSK _{Cr}			BSK ₅			NL		N-NH ₄			N _{celk.}			P _{celk.}		
		Kon.		Úč. (%)	Kon.		Úč. (%)	Kon.		Kon.		Úč. (%)	Kon.		Úč. (%)	Kon.		Úč. (%)
		p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l	p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l		p mg/l	m mg/l	
< 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	-	-	-	-	-	-
2001 - 10000	Nízko zatěžovaná aktivace se stabilní nitrifikací a se simultánním srážením fosforu + mikrosíta či jiná filtrace	70	120	80	18	25	90	20	30	8	15	80	-	-	-	2	5	75
10001 - 100000	Nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutričních + terciální stupeň včetně srážení fosforu eventuelně dávkovací externího substrátu	60	100	80	14	20	90	18	25	-	-	-	14	25	70	1.5	3	80
> 100000	Nízko zatěžovaná aktivace s odstraňováním nutričních + terciální stupeň včetně srážení fosforu, dávkování externího substrátu	55	90	85	10	15	95	14	20	-	-	-	10	16	75	0.7	2	85

5 Chemie fosforu

5.1 Původ fosforu

Fosfor má několik druhů původů. Z přírodních zdrojů se fosfor do vod, dostává z půd nebo zvětralých hornin, jimiž jsou například apatit, variscit, strengit a vivianit. Fosfor se do vod dostává zvětváním těchto půd a hornin. Dalším zdrojem fosforu ve vodách je antropogenní fosfor, který je produkován lidskou činností. Nejčastějším zdrojem jsou mycí prostředky, prací a čisticí prostředky. Velkým zdrojem jsou také fosforečná hnojiva, která se plošně používají v zemědělství (Pitter, 2015). Podle některých odhadů se ročně dostává na území České republiky do povrchových vod asi 10 000 až 20 000 tun polyfosforečnanu, které se v odpadních vodách vlivem chemické a biologické hydrolýzy mění na orthofosforečnany (Kočí a kol.). Dále se v odpadních vodách objevuje fosfor, který je produktem organismů. Člověk za jeden den vyprodukuje 1,5 g, avšak tato hodnota v odpadních vodách se ještě navýší na 2 g díky prostředkům používaných v domácnostech (Pitter, 2015).

5.2 Formy fosforu ve vodách

Formy, ve kterých se fosfor objevuje ve vodách, jsou. Z chemického hlediska se fosfor může vyskytovat jako organický i anorganický. Podle rozpustnosti lze jeho formy dělit na rozpustné a nerozpustné (online cit. [3]). Ve vodách určujeme celkový fosfor, fosfor vázaný a orthofosforečnanový (Pitter, 2015).

Fosfor celkový

Jedná se o veškerý fosfor v odpadních vodách a to, jak o fosfor nerozpuštěný, tak fosfor rozpuštěný, jehož formy mohou být organické a anorganické. Fosfor celkový se stanoví mineralizací např. kyselinou sírovou nebo kyselinou dusičnou za varu (Pitter, 2015).

Orthofosforečnany

Při stanovování množství rozpuštěných orthofosforečnanů jsou z důvodu nepřesnosti měření změřeny i části fosforu vázaného v organických i anorganických sloučenin. Tím se obsah orthofosforečnanů zdánlivě zvětšuje. Přesněji by, jsme měli tedy mluvit o rozpuštěném reaktivním fosforu, avšak se používá spíše zkrácený termín orthofosforečnany (Pitter, 2015).

Rozpuštěný nereaktivní fosfor

Rozpuštěný fosfor dále tvoří rozpuštěný nereaktivní fosfor. Tento fosfor nelze přímo stanovit absorpční spektrofotometrií. Je tvořen rozpuštěným organicky vázaným fosforem a polyfosforečnany. Tyto sloučeniny je nutné nejdříve převést kyselou hydrolýzou za varu na orthofosforečnany to platí především pro polyfosforečnany. Nebo oxidačním rozkladem pro organicky vázaný fosfor (Pitter, 2015).

Biologicky dostupný fosfor

Další formou je biologicky dostupný fosfor. Ukázalo se totiž, že fytoplankton využívá nejenom rozpuštěný orthofosforečnanový fosfor, ale i orthofosforečnany adsorbované na povrchu nerozpuštěných látek (Pitter, 2015).

Nerozpuštěný anorganicky vázaný fosfor

Nerozpuštěný anorganicky vázaný fosfor je tvořen převážně fosforečnany Mg, Fe, Al a Ca. Ty jsou buď chemicky či sorpčně vázanými na jiných anorganických nebo organických nerozpuštěných látkách anebo jsou volně dispergovány (Pitter, 2015).

Anorganicky vázaný fosfor

Anorganicky vázaný fosfor se ve vodách obvykle vyskytuje v jednoduché nebo komplexní formě orthofosforečnanů nebo polyfosforečnanů v iontové nebo neiontové formě. Z orthofosforečnanů to jsou buď jednoduché nebo komplexní formy zejména PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ a další. Z polyfosforečnanů jsou to zejména difosforečnany a trifosforečnany jako například $\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$, $\text{HP}_2\text{O}_7^{3-}$, $(\text{CaP}_2\text{O}_7)^{2-}$ a další (Pitter, 2015).

5.3 Vliv fosforu ve vodách

Zdroje znečišťující povrchové vody fosforem jsou bodové zdroje, hlavně odpadní vody vyústění kanalizace, dále plošné, ke kterým se dá zařadit smyv z polí a poté ještě difuzní, kterými jsou horniny s vysokým obsahem fosforu (Holba, 2011). Fosfor ve vodách způsobuje eutrofizaci. Eutrofizaci lze popsat jako proces změny vod vlivem obohacení živinami. Zvýšené množství fosforu má negativní vliv na kvalitu vody, kdy podporuje růst sinic, které produkují řadu toxinu (Fiala, 2016). Při velkém množství fosforu ve vodách dochází k silnému procesu eutrofizace, která způsobuje to, že ve vodách je odčerpáván kyslík, čímž dochází k úhynu živočichů v tocích, nádržích a jezerech. V současné době se legislativa nijak nezaměřuje na množství vypouštěného fosforu do povrchových vod, pro čistírny odpadních vod v kategorii do 2000 EO. Ministerstvo životního prostředí se chystá vytvořit nové normy, kterými by bylo vypouštění fosforu v odpadních vodách do povrchových vod zpoplatněno, čímž se předejde eutrofizaci vod (Foller, 2016).

6 Metody odstraňování fosforu

Fosfor z odpadních vod na KČOV lze odstraňovat fyzikálně-chemickým procesem, nepřímou metodou za využití mokřadních rostlin či s využitím specifických typů filtračních materiálů. Existují i metody biologické, které využívají speciální typy mikroorganismů a bakterií.

Mezi fyzikálně-chemické procesy zahrnujeme technologie, které přímo odstraňují fosfor, jakožto nežádoucí nutrient, za pomoci chemických srážedel, která fungují na fyzikálně-chemických principech. Nejčastějšími chemikáliemi, které se používají ke srážení fosforu na čistírnách odpadních vod patří sole železa a hliníku, mezi další srážedla můžeme uvést například vápno a to ve formě $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Nepřímá metoda s využitím mokřadní vegetace se uplatňuje především na zemních filtrech u kořenových resp. vegetačních čistíren odpadních vod. Ovšem primární funkcí těchto filtrů není odstraňování fosforu a tak je jejich účinnost v tomto ohledu velmi omezená až zanedbatelná (Holba, 2011). K odstraňování fosforu nejen ve filtračním poli vegetačních čistíren mohou sloužit i různé speciální filtrační materiály, které využívají svou sorpci.

Poslední z uvedených možností je odstranění biologické, u kterého je využíváno bakterií které mají zvýšenou spotřebu fosforu (Rous a Zima, 2015).

Jednou z možností jak ovlivnit účinnost odstraňování fosforu je různé řazení filtračních polí a to jak horizontálních, tak vertikálních v různých kombinacích (Józwiakowski a kol., 2018).

6.1 Kombinace filtračních polí

V Polsku bylo prováděno měření mezi lety 1992 až 2016 na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod, které byly buď s jedním horizontálním filtračním polem, nebo byly hybridní. Hybridní řazení se skládalo z vertikálně protékaného filtračního pole a horizontálně protékaného filtračního pole.

Pro jednostupňovou horizontálně protékanou vegetační čistírnu odpadních vod se ukázala její účinnost při odstraňování fosforu přibližně 66 % (Józwiakowski a kol., 2018). V České republice probíhalo podobné měření na vegetační kořenové čistírně odpadních vod s horizontálním filtračním polem. Toto měření probíhalo 18 let a bylo zjištěno, že průměrná účinnost odstraňování fosforu byla 59 % a to stabilně během celého období měření (Vymazal, Březinová, 2014).

Pro hybridní vegetační kořenovou čistírnu odpadních vod byla účinnost odstranění fosforu vyšší. Na takovémto systému se účinnost pohybovala okolo 89 %. Při měření koncentrace přítékajícího fosforu na čistírny odpadních vod se hodnoty pohybovaly mezi 8,2 až 39,8 mg/l. Na odtocích byly koncentrace mezi hodnotami 0,1 až 11,3 mg/l. Většina z měřených KČOV

měla na odtoku koncentraci pod 1 mg/l fosforu. Pro takto navrženou vegetační kořenovou čistírnu odpadních vod je vhodné připojit k ní další technologii pro odstraňování fosforu. Takovéto vegetační kořenové čistírny odpadních vod by našly uplatnění v oblastech, kde je potřeba zvýšené účinnosti na odstraňování fosforu, ale u dnes již vybudovaných vegetačních kořenových čistíren odpadních by se jednalo o velký zásah, kdy by bylo potřeba vybudovat celé nové filtrační pole (Józwiakowski a kol., 2018).

6.2 Odstraňování fosforu solemi železa a hliníku

Chemické odstraňování fosforu pomocí solí hliníku a železa funguje na principu srážení. Při tomto procesu dochází ke změně rozpuštěného anorganického fosforu na málo rozpustné fosforečnany kovů a zároveň se tvoří hydroxidy kovů. Dochází ke vzniku vloček, které na sebe váží fosforečnany a současně odstraňují organické látky. Celý tento proces se nazývá koagulace (Hlavínek a kol., 2006). V praxi se při srážení fosforu solemi hliníku a železa pH odpadní vody neupravuje a používáme vodu s přibližně neutrální hodnotou, i když reakce by probíhaly účinněji v kyselějším prostředí. S porovnáním jsou účinnější sole železa než, hlinité sole. Při srážení fosforu je nutné, aby srážecí činidlo bylo v mírném přebytku. Látková koncentrace by tak měla být v poměru 1:1,5 u železa asi 1:2,7 (Pitter, 2015). Chemické srážení fosforu se obvykle používá u čistíren odpadních vod, u nichž je požadavek na koncentraci vypouštěného fosforu maximálně 1,0 mg/l. V současné době existují dva základní způsoby kde přidávat srážedlo a to buď těsně před druhým stupněm čištění, nebo přidávat srážedlo na začátku prvního a následně před druhým stupněm tím se dosahuje nejvyšší účinnosti. Při požadované koncentraci fosforu ve vodách nad 2 mg/l postačuje dávka 1 mol srážedla na 1 mol fosforu při ošetření v prvním stupni čištění. Pokud chceme dosáhnout koncentrace 0,3 až 1,0 mg/l pak je potřeba zvýšit dávku srážedla na rozmezí 1,2 až 4,0 mol pro jeden mol fosforu (online cit. [4]).

Tabulka 6 Hmotnost prvků v gramech na mol

Název prvku	vzorec	g/mol
Chlorid železnatý	FeCl ₂	126.75
Síran železitý	Fe ₂ (SO ₄) ₃	399.91
Chlorid železitý	FeCl ₃	126.75
Síran železnatý	FeSO ₄	151.92
Síran hlinitý	Al ₂ (SO ₄) ₃ *14H ₂ O	594.45
Chlorid hlinitý	AlCl ₃	133.33
Hlinitan sodný	Na ₂ Al ₂ O ₄	163.94
Síran hlinito-amonný	Al ₂ (SO ₄) ₃ (NH ₄) ₂ SO ₄ *12H ₂ O	690.58

Srážení fosforu je složitý proces, protože je doprovázen dalšími chemickými a fyzikálními procesy a sorbcí, tím nám vznikají sraženiny různých složení (Hlavínek a kol., 2006).

Technologie srážení pomocí solí železa a hliníku se běžně využívá na aktivačních čistírnách.

6.2.1 Sole železa

K solím železa používaným na ČOV patří chlorid železitý (FeCl_3), síran železnatý ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), chlorid železnatý (FeCl_2) a síran železitý (FeSO_4) (Hlavínek a kol., 2006).

Chlorid železnatý (FeCl_2)

Jedná se o našedlou látku nebo o zeleně zbarvené krystaly. Má omezené možnosti využití kvůli jeho nestálosti na vzduchu (online cit. [20]).

Síran železitý ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)

Pro čištění odpadních vod se používá ve formě roztoku. Jedná se o žíravý roztok hnědé barvy a se slabým kyselím zápachem (online cit. [22]).

Chlorid železitý (FeCl_3)

Pro čištění odpadních vod se používá ve formě roztoku, který je světlehnědé barvy se slabým zápachem chloru (online cit. [21]).

Síran železnatý (FeSO_4)

Pro čištění odpadních vod se používá v pevném stavu ale i jako roztok. V pevném stavu se jedná, o zelené krystaly, které časem žloutnou, až hnědnou. Roztok má barvu do žluta (online cit. [19]).

Tato technologie má výhodu, že k jejímu doplnění k již fungující KČOV nejsou potřeba velké investiční náklady ani větší konstrukční úpravy.

6.2.2 Sole Hliníku

K solím hliníku používaným na ČOV patří síran hlinitý ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), chlorid hlinitý (AlCl_3), Hlinitan sodný ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$) a síran hlinito-amonný ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (Hlavínek a kol., 2006).

Síran hlinitý ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$)

Pro čištění odpadních vod se používá v pevném stavu ale i jako roztok. V pevném stavu se jedná, o bílý prášek nebo jako bílé granule. V tekutém stavu se jedná o čirý a bezbarvý roztok (online cit. [18]).

Chlorid hlinitý (AlCl_3)

Jedná se o pevnou látku, která má žlutou barvu. Její pach je pronikavý (online cit. [29]).

Hlinitan sodný ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$)

Pro čištění odpadních vod se používá v pevném stavu, ale je dostupný i jako roztok. Jedná se o roztok slámové barvy (online cit. [23]).

Síran hlinito-amonný ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)

Značen zkratkou ACS.

K dalším solím hliníku používaným pro čištění odpadních vod patří Polyaluminiumchlorid neboli PAX který se velmi často používá ve formě roztoku (online cit. [18]).

Tato technologie má stejnou výhodu na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod jako měly soli železa a to tu že pro její dodatečné zařazení na KČOV nejsou potřeba velké investiční náklady ani velké konstrukční změny KČOV.

6.2.3 Využití technologie srážení solemi železa a hliníku na vegetačních ČOV

Na vegetačních čistírnách se tato metoda výzkumně využívá například v Rakousku, kde byl proveden výzkum, cílem kterého byla potřeba zlepšit jakost vypouštěné vody z přírodní čistírny odpadních vod do recipientu. Jednalo se o vegetační čistírnu pro 60 EO s vertikálním pulzně zatěžovaným filtrem. Cílové množství vypouštěného P pro tuto KČOV bylo stanoveno na hodnotu 1,6 mg/l. Jako srážedlo byla zvolená sůl hliníku konkrétně hlinitan sodný ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$). Po třech letech výzkumu se povedlo tohoto množství dosáhnout, ale bylo zapotřebí dávku srážedla zvýšit na 3 až 3,5 násobek vypočítaného množství. Celý tento proces nám ale zvýšil roční provozní náklady, u KČOV pro 25 EO o 38 % a u KČOV pro 60 EO o 15 % (Lauschmann a kol., 2013).



Obr. 10 Příklad srážení z Rakouska (archiv ÚVHK)

6.3 Odstraňování fosforu vápnem

Celý tento proces využívá stejných principů jako odstraňování fosforu pomocí solí hliníku a železa. Avšak při používání vápna je potřebná následná neutralizace, aby se pH odpadní vody nezvýšilo. Na rozdíl od solí hliníku a železa je vhodnější prostředí v alkalické oblasti, při tom by pH mělo být vyšší jak 10,5, to nám zaručuje dobré oddělení sraženiny. Vhodné řazení této technologie je jako terciální stupeň (Hlavínek a kol., 2006).

6.3.1 Využití technologie srážení vápnem na vegetačních ČOV

Toto řešení není ideální pro KČOV z důvodu náchylnosti některých druhů rostlin na vyšší pH a proto se v praxi neuplatňuje.

6.4 Odstraňování fosforu Poly-P bakterie

K biologickým metodám odstraňování fosforu patří využívání Poly-P bakterii. Tyto bakterie potřebují pro svůj životní cyklus fosfor, který ve zvýšené míře akumulují do své buněčné struktury. Díky tomu je zastoupení fosforu v sušině až 10 %. Zároveň nedochází k zasolení vyčištěné odpadní vody. Velikou nevýhodou této metody je potřeba pečlivého řízení provozu a zároveň velká náchylnost na změny prostředí v procesu. Kvůli této složitosti použití je tato metoda prakticky nepoužitelná na vegetačních čistírnách odpadních vod (Holba, 2011). U klasických čistíren odpadních vod se Poly-P bakterie nachází v aktivovaném kalu

a to převážně z rodu *Acinetobacter*. Pro to, aby byly Poly-P bakterie schopny ukládat polyfosforečnany, je zapotřebí přítomnost substrátu, který bude obsahovat nízkomolekulární organické látky, a zároveň se budou nacházet v anaerobním prostředí. Tyto látky jsou hlavně nižší mastné kyseliny (Hlavínek a kol. 2006).

6.4.1 Využití technologie Poly-P bakterií na vegetačních ČOV

Z důvodu složitosti řízení procesu čištění odpadních vod při využití technologie Poly-P bakterií, se tento způsob odstranění fosforu nejeví jako vodný při využití na vegetačních čistírnách, na nichž se proces čištění hůře řídí.

6.5 Metody využívající speciální filtrační materiály

Materiály, které se k tomuto účelu mohou používat, jsou buď přírodního původu, materiály přírodní z částečnou technologickou úpravou nebo vedlejší produkty průmyslu či produkty přímo k tomuto účelu vytvořené. K přírodním materiálům patří hlavně vápenec, dolomit, břidlice a Apatit. K materiálům s částečnou technologickou úpravou patří především vypalované mušle, vypalované ropné břidlice a pálená opuka. Mezi materiály, jež jsou vedlejšími produkty průmyslu, patří strusky a popílky. K materiálům, které jsou vyrobeny přímo za účelem odstranění fosforu z vody, patří speciální expandované jíly – LWA, LECA a Filtra P (Rous a Zima, 2015). Většina, ze jmenovaných materiálů, byla testována pouze v laboratorních podmínkách a pouze malá část z těchto materiálů byla testována v terénních podmínkách. Velmi slibné výsledky se ukázaly u různých druhů strusek, lehkých expandovaných jílu a umělých materiálu jakým je Wollastonit (Johansson Westholm, 2006). V Číně byl proveden výzkum, jenž měl zlepšit schopnost vegetačních kořenových čistíren odpadních vod odstraňovat fosfor. V dnešní době zde bránilo rozvoji této metody čištění odpadních vod to, že KČOV nebyly schopny splňovat požadované normy. K zlepšení této schopnosti bylo použito materiálu s obsahem hořčíku, magnesit a magnesium, které se použily místo původních substrátů ve filtračních polích. Zjištěná účinnost na filtračních polích s magnesiem dosahovala, až 93,3 % což bylo zlepšení v průměru o 17,5 % až 18,6 % více než u původních směsí. U materiálu z magnesitu byla účinnost až 90,4 % u původního materiálu se pohybovala okolo 58,8 až 65,1 %. Tyto výsledky nám ukazují, že materiály s obsahem hořčíku by v budoucnu mohli najít v této problematice uplatnění (Lan a kol., 2017).

Dolomit

Dolomit je materiál, který byl studován jak v laboratořích, tak i v terénu. Při pokusech se zjistilo, že odstranění fosforu na KČOV bylo při jeho využití o 30 až 50 % vyšší (Johansson Westholm, 2006).

Vápenec

Vápenec podobně jako dolomit byl testován jak laboratorně, tak i na experimentálních KČOV. Z těchto pokusů bylo zjištěno, že vápenec nemá dobré sorpční vlastnosti a jeho využití pro čistírenské účely je velmi omezené. Při pokusech s použitím na filtračním poli byla účinnost odstranění fosforu v rozmezí 28 až 51 %. (Johansson Westholm, 2006).

Opuka

Další materiál, který byl zkoumán za účelem odstraňování fosforu z odpadních vod, byla opuka. Výzkumy ukázaly, že její vlastnosti se zlepšují, pokud dojde k jejímu vypálení, i přesto se ale materiál nedoporučuje k použití (Johansson Westholm, 2006).

Wollastonit

Wollastonit, jako další materiál s potenciálem sorbovat fosfor byl zkoumán v laboratořích, kde dosahoval velmi vysokých účinností. Avšak při pokusech na KČOV byly výsledky o něco horší, což bylo přičítáno proměnlivým vlastnostem přitékající odpadní vody. I přes tyto výsledky je tento materiál považován za vhodný k čištění odpadních vod. Při použití Wollastonitu v práškové podobě na filtračním poli byla průměrná účinnost odstranění fosforu 45 % při periodě 175 dnů (Johansson Westholm, 2006).

Struska

Z odpadních látek, které byly zkoumány jak laboratorně, tak v terénu byly strusky. U nich se prokázala dobrá účinnost při odstraňování fosforu z vody. Nejlepších výsledků se struskou bylo dosaženo v laboratorních podmínkách, kdy čištěný roztok měl podstatně vyšší koncentraci fosforu, než jaká je u běžných odpadních vod. Při pokusu na filtračním poli kdy voda byla v systému 15 měsíců se účinnost odstranění fosforu pohybovala okolo 60 %. (Johansson Westholm, 2006).

Popílký

Další odpadní materiál, který má potenciál k sorpci fosforu, jsou popílký, ale v současné době nebyly provedeny terénní výzkumy a laboratorní výzkumy, které by ukázaly, zda je jejich sorpční schopnost nějak omezená (Johansson Westholm, 2006).

Průmyslově vyráběné materiály

Materiály, které jsou vyráběny přímo za účelem sorpce fosforu, původně sloužily k jiným účelům, až následná zjištění jejich vhodnosti pro odstraňování P vedlo k jejich výrobě právě pro tento účel. K těmto materiálům patří například LWA (Light-weight aggregates). Ty se vyrábí pálením jílu při teplotách vyšších jak 1000°C. Používání těchto materiálů je ale stále sporné i přes jejich účinnost při odstraňování P z odpadních vod je zde problém vysoké energetické náročnosti materiálu na jejich výrobu (Johansson Westholm, 2006).

6.5.1 Využití technologie speciálních typů materiálů na filtračních polích ČOV

Tato technologie by se dala na současných vegetačních čistírnách odpadních vod využít, avšak problém je v tom, že je vyžadováno vyměnit celou filtrační náplň. Další velkou nevýhodou je postupné vyčerpání sorpční schopnosti filtračního materiálu, které nastane v průběhu několika let provozu. S tímto problémem se pojí i potřeba následného vytěžení filtračního materiálu a dalšího nakládání s ním, např. jeho skládkování na skládkách nebezpečného odpadu. Tyto negativa danou technologii značně prodražují a snižují její reálnou možnost použití v praxi.

6.6 Odstraňování fosforu pomocí mokřadních rostlin

Rostliny na vegetačních čistírnách odstraňují fosfor tak, že jej akumulují do své struktury, fosfor je důležitý nutrient pro růst rostlin (Holba, 2011). KČOV bývají osázeny z pravidla těmito rostlinami rákos obecný, orobinec širokolistý a úzkolistý, zblochan vodní, chrastice rákosovitá, skřípinec jezerní, zevar vzpřímený a sítina rozkladitá (online cit. [17]).

Tabulka 7 Hodnoty produkce sušiny a akumulace živin v rákosovinách (online cit. [16])

Druh	sušina g/m	N	P	K	Ca	Mg
rákos obecný	2960	2.8	0.28	1.7	0.29	0.17
orobinec úzkol.	4000	1.8	0.38	1.97	0.73	0.18
orobinec širok.	3600	1.9	0.32	1.5	0.52	0.18
zevar vzpřím.	1880	2.55	0.48	4.1	1.23	0.29
puškvorec ob.	1250	3.1	0.47	3.7	0.85	0.48
skřípinec jez.	4200	1.7	0.41	2	0.23	0.15
zblochan vodní	2960	1.8	0.3	2.3	0.19	0.13
kamyšík přím.	870	1.9	0.35	2.7	0.63	0.6

Rákos obecný (*Phragmites australis*)

Rákos obecný je 1 až 4 m vysoká tráva, která má mohutná přímá stébla, s listy tvaru čepele (online cit. [12]). Přirozeně se vyskytuje ve stojatých vodách anebo ve velmi pomalu tekoucích, také se vyskytuje v bažinách vlhkých loukách a prameništích. Rákos se vyskytuje celosvětově, vyjma polární oblasti. Využívá se k mnoha dalším účelům, než pouze jako mokřadní rostlina vhodná k osázení na vegetační čistírny odpadních vod, například jako krmivo pro koně nebo podestýlka, dále má estetické využití (online cit. [26]).



Obr. 11 Rákos obecná (online cit. [26])

Orobinec širokolistý (Typha latifolia)

Jedná se o vytrvalou bylinu výšky asi 1 až 2,5 m (online cit. [12]). Má dvouřadé čárkovité listy květy v hustých válcovitých palicích. Vyskytuje se hlavně na březích stojatých a pomalu tekoucích vod v písčitých až bahnitých půdách. Je rozšířená hlavně v nížinách takřka v celé Evropě Asii a severní Americe. V současné době se uplatňuje hlavně na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod, ale dříve se používal například místo peří do peřin (online cit. [26]).



Obr. 12 Orobinec širokolistý (online cit. [26])

Zevar vzpřímený (*Sparganium erectum*)

Jedná se o vytrvalou bylinu, která dorůstá výšky 30 až 150 cm. Má mečovité tuhé listy a květy ve shlucích kulovitěho tvaru (online cit. [13]). Vyskytuje se na březích rybníků tůní a bažin. Roste téměř v celé Evropě, Asii a severní Americe (online cit. [26]).



Obr. 13 Zevar vzpřímený (online cit. [26])

Sítina rozkladitá (*Juncus effusus*)

Jedná se o vytrvalou bylinu, která dorůstá výšky 30 až 120 cm. Má přímou rýhovanou lodyhu s 30 až 60 žebry je bez listů. Má řídké květenství (online cit. [24]). Vyskytuje se v bažinách, na březích anebo lesních cestách. V Česku roste od nížin až po podhorské oblasti (online cit. [26]).



Obr. 14 Sítina rozkladná (online cit. [26])

Orobinec úzkolistý (*Typha angustifolia*)

Jedná se o vytrvalou bylinu, která dorůstá výšky 1 až 3 m. Má úzké čárkovité listy, květy jsou složeny ze dvou částí, které jsou od sebe odděleny. Květy mají tvar palic. Orobinec úzkolistý se vykytuje hlavně na březích stojatých vod nebo pomalu tekoucích vod, nebo ve vodních příkopech a mokřinách (online cit. [27]). Výskyt je podobný jako výskyt Orobince širokolistého. Stejně tak se dříve používal jako náhražka peří v peřinách dnes je jeho hlavní využití hlavně u vegetačních kořenových čistíren odpadních vod (online cit. [25]).



Obr. 15 Orobinec úzkolistý (online cit. [25])

Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*)

Jedná se o vytrvalou bylinu, která dorůstá výšky 0,8 až 2,5 m. Má přímá silná stébla, květy mají často načervenalou barvu. Vyskytuje se hlavně na březích vodních toků, v lužních lesích a rákosovinách (online cit. [28]). Rostlina má velké požadavky na vodu, dodnes se v USA používá ke zpevnování svahu a snížení eroze. U nás se začala používat až s používáním vegetačních kořenových čistíren odpadních vod (online cit. [25]).



Obr. 16 Chrostice rákosovitá (online cit. [15])

Zblochan vodní (*Glyceria maxima*)

Jedná se o travinu, která dorůstá výšky 0,8 až 2 m. Má silná stébla, která jsou až 20 mm široká, její klasy mají žlutou až fialovou barvu (online cit. [6]). Vyskytuje se hlavně na okrajích rybníků a na vlhkých loukách. Uplatnění nalézá hlavně při zpevňování břehu u vodních ploch. A dnes také na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod (online cit. [15]).



Obr. 17 Zblochan vodní (online cit. [15])

Skřípinec jezerní (*Schoenoplectus lacustris*)

Jedná se o vytrvalou rostlinu, která dosahuje výšky až 3 m. Má silnou kulovitou lodyhu, kterou z části obklopují listy. Květy má větvené a jsou složeny jak z jednotlivých tak i ze svazčitých klásků. Vyskytuje se hlavně na březích pomalu tekoucích vod a stojatých vod.

Hlavní oblasti kde roste, je severní část Evropy, u nás se vykytuje v oblastech nížin až středních polohách (online cit. [15]).



Obr. 18 Skřípinec jezerní (online cit. [15])

6.7 Shrnutí metod pro srážení fosforu

Na základě provedené rešerše bylo provedeno shrnutí vybraných metod do přehledné tabulky, která stručně popisuje výhody a nevýhody každé z uvedených metod a její potenciální možné využití na vegetačních čistírnách odpadních vod.

Tabulka 8 posouzení metod

Metoda		Výhody	Nevýhody	Využití na KČOV
Chemické srážení	Sole hliníku	<ul style="list-style-type: none"> Proces snadno ovladatelný Nízké náklady na konstrukci KČOV 	<ul style="list-style-type: none"> Dochází k zasolování odpadních vod Vznik chemické sraženiny, kterou je nutné dále likvidovat 	Technologie má dobré předpoklady na využití na KČOV
	Sole železa	<ul style="list-style-type: none"> Proces snadno ovladatelný Nízké náklady na konstrukci KČOV 	<ul style="list-style-type: none"> Nebezpečí vzniku sloučenin s korozivními účinky na beton Vznik chemické sraženiny, kterou je nutné dále likvidovat 	
	Vápnó	<ul style="list-style-type: none"> Nízké náklady na změnu konstrukce KČOV 	<ul style="list-style-type: none"> Potřeba vyššího pH Nelze použít kvůli rostlinám na fil. poli 	Na vegetačních čistírnách nepoužitelná
Filtrační materiál	Dolomit	<ul style="list-style-type: none"> Dostupný materiál Účinnost zvýšena o 30 až 50 % na KČOV 	<ul style="list-style-type: none"> Po čase dochází k vyčerpání sorpční schopnosti 	Je vhodným materiálem pro použití na KČOV

	Vápenec	<ul style="list-style-type: none"> Dostupný materiál 	<ul style="list-style-type: none"> Omezené sorpční vlastnost Účinnost 28 až 51% 	Materiál není zcela vhodný pro KČOV
	Opuka	<ul style="list-style-type: none"> Dostupný materiál Po vypálení zlepšené vlastnosti 	<ul style="list-style-type: none"> Nízká účinnost Nízká sorpce 	Nedoporučuje se pro použití na KČOV
	Wollastonit	<ul style="list-style-type: none"> Dostupný přírodní materiál 	<ul style="list-style-type: none"> Citlivý na proměnlivost vlastností odpadních vod 	Považován za vhodný k použití na KČOV
	Struska	<ul style="list-style-type: none"> Dobrá sorpce materiálu Jedná se o odpadní látku 	<ul style="list-style-type: none"> Pro vyšší účinnost potřeba vyšší koncentrace fosforu 	Materiál má dobré předpoklady pro použití na KČOV
	Popílký	<ul style="list-style-type: none"> Předpoklad dobré sorpce 	<ul style="list-style-type: none"> Není proveden výzkum 	Prozatím nebyly podrobně zkoumány
	Prům. vyráběné materiály	<ul style="list-style-type: none"> Dobrá sorpce materiálu 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké náklady na jejich výrobu 	Sporné využití na KČOV kvůli vysokým výrobním nákladům
Bio. Metoda	Poly P bakterie	<ul style="list-style-type: none"> Nezasolení odpadních vod Vysoký obsah fosforu v sušině 	<ul style="list-style-type: none"> Náročné řízení procesů Náchylnost na změny obsahu fosforu Náchylné na změny prostředí 	Na KČOV nepoužitelná
	Mokřadní vegetace	<ul style="list-style-type: none"> Estetický ráz Nezávislé na řízení KČOV 	<ul style="list-style-type: none"> Velmi omezená účinnost Potřeba zpracovávat vzniklou biomasu 	Na KČOV Použity na filtračních polích
	Hybridní systém	<ul style="list-style-type: none"> Dnes používané u nových KČOV 	<ul style="list-style-type: none"> U již provozovaných velké náklady na zbudování Technologie není s jistotou spolehlivá 	Vhodné pro nově budované KČOV

7 KČOV Dražovice

7.1 Dražovice

Tato kořenová čistírna odpadních vod byla uvedena do provozu v roce 2000. Aktuálně se s kapacitou 850 EO řadí do kategorie ČOV pro 501-2000 EO. Během svého provozu prošla čistírna řadou rekonstrukcí, mezi které lze zmínit odstranění zakolmatované vrstvy na horizontálních polích, úpravou odlehčovací komory, i výstavbou nového typu vertikálního filtru. Doposud na ní nebylo vybudováno zařízení, které by bylo primárně určeno k odstraňování fosforu. Dražovická čistírna se skládá z mechanického předčištění, z hlavního čistícího stupně tvořeného systémem filtračních polí, a to jak z horizontálních filtrů, tak i z vertikálního filtru. Poslední technologický stupeň tvoří biologická stabilizační nádrž pro terciální dočištění, z které voda následně odtéká do recipientu místní vodoteče. Filtrační pole na této KČOV jsou osázena chrasticí rákosovitou, rákosem obecným a kosatcem žlutým.



Obr. 19 Vertikální filtr na KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)

Vegetační kořenová čistírna odpadních vod byla původně, vybaveny pouze horizontálními filtry, které ovšem nebyly dostatečně účinné při odstraňování znečištění ve vodách. Proto došlo k následnému vybudování vertikálních filtračních polí.



Obr. 20 Horizontální filtr KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)



Obr. 21 Česle na KČOV Dražovice (archiv ÚVHK)

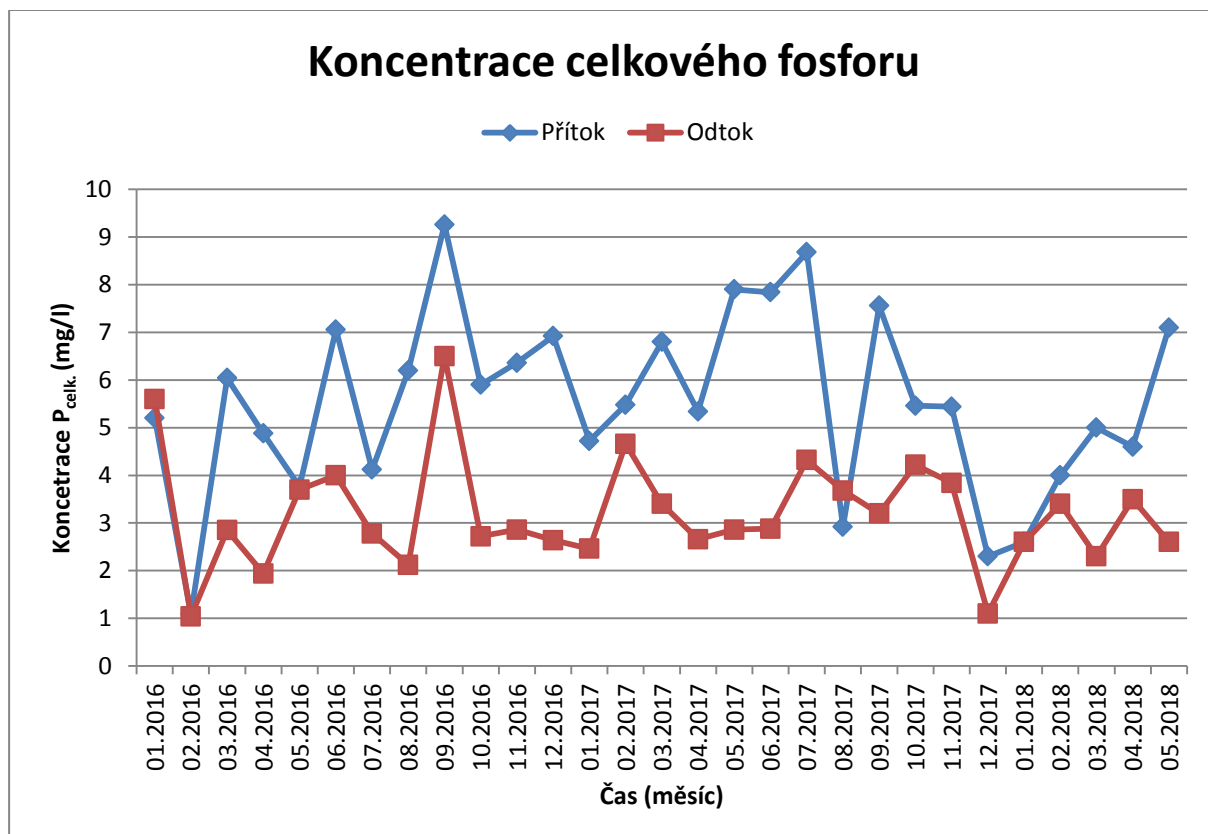
7.2 Vyhodnocení měření

Na dražovické KČOV probíhal sběr dat od ledna 2016 do prosince 2018, který pro obec zajišťovala akreditovaná laboratoř. Sledovány byly ukazatele znečištění BSK_5 , $CHSK_{Cr}$, NL a $N-NH_4$ a celkový fosfor, u něhož probíhalo měření od ledna 2016 do května 2018, odběr vzorků probíhal na přítoku do čistírny a na jejím odtoku. Rozbory byly prováděny měsíčně, k dispozici tak je celkem 29 měření z období tří let pro fosfor a 36 měření pro zbylé ukazatele.

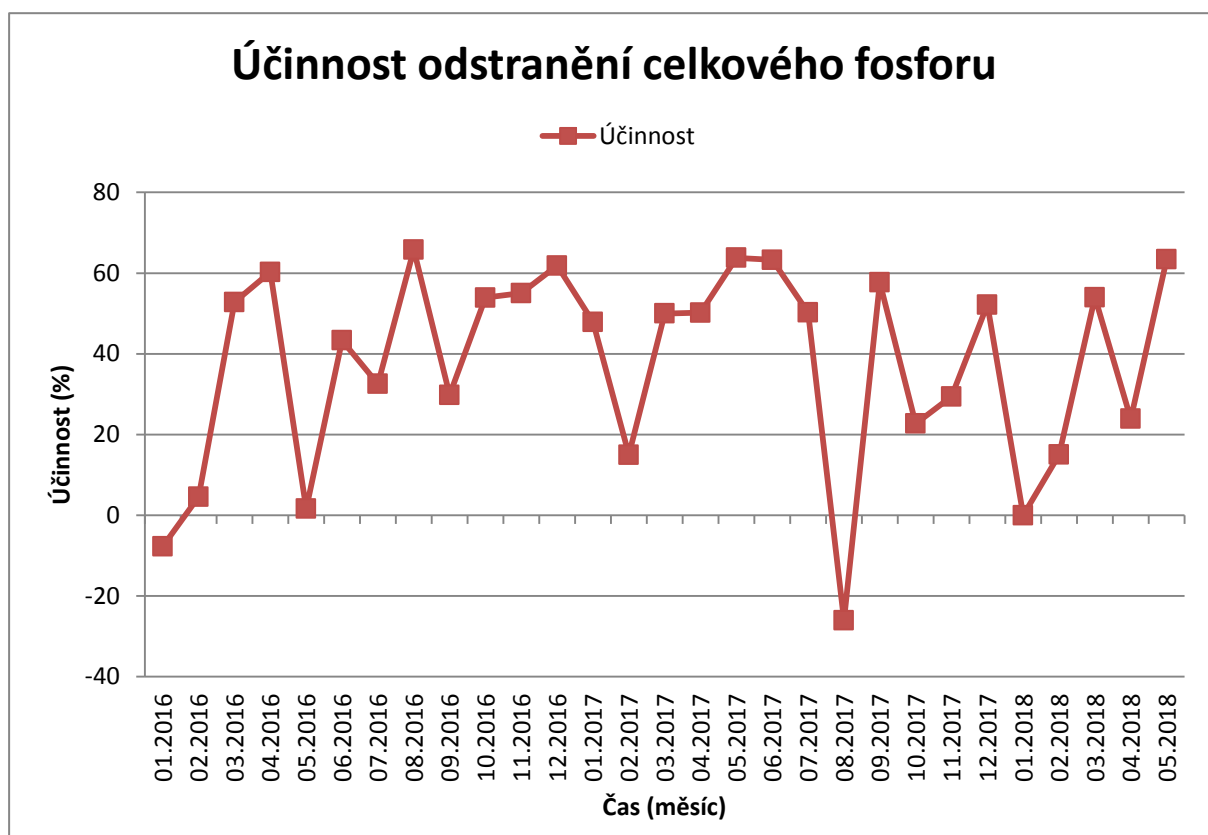
Emisní standardy celkového fosforu pro kořenovou čistírnu této velikosti nejsou dle NV 401/2015 Sb. stanoveny, proto uvažujeme jako hraniční limitní hodnotu dle emisních standardů pro kategorii ČOV 2001 až 10000 EO. Ty nám stanovují průměrnou hodnotu celkového fosforu ve vypouštěné odpadní vodě na 3 mg/l a maximální hodnotu na 8 mg/l. Při srovnání s odebranými vzorky jsme zjistili, že za celé období měření nebyla tato hodnota u vypouštěné vody překročena.

Při srovnání z BAT limity (NV 401/2015 Sb.), které jsou stanoveny na 2 mg/l průměrné a 5 mg/l maximální koncentrace celkového fosforu ve vypouštěné odpadní vodě, byla hodnota překročena u dvou vzorků z dvaceti devíti. Konkrétně u vzorku z ledna 2016, kde byla překročena o 0,6 mg/l, a ze září 2016, kdy byla překročena o 1,5 mg/l.

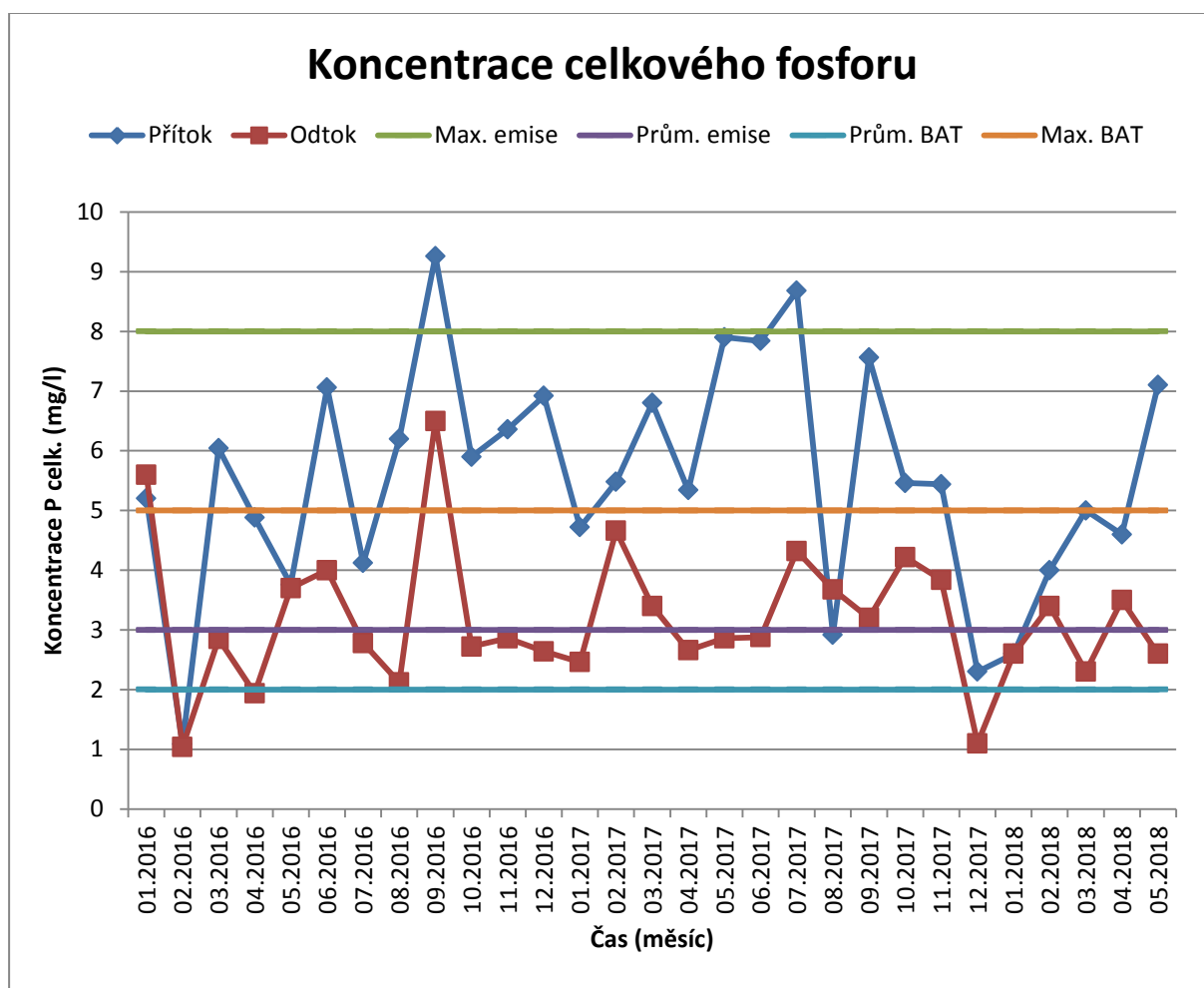
Při porovnání hodnot koncentrace celkového fosforu v přítékající a odtékající odpadní vodě ve všech 29 měření, došlo ke snížení obsahu fosforu na odtoku z čistírny u 26 vzorků. Účinnost odstranění znečištění se pohybovala od 1,6 % do 63,80 %. U jednoho vzorku se koncentrace fosforu nezměnila a u dvou byla naměřená hodnota na odtoku z ČOV dokonce větší než tomu bylo na přítoku. Tento nesoulad může být způsoben dlouhou dobou zdržení odpadní vody při průtoku technologickou linkou KČOV, která se pohybuje v řádech dní.



Obr. 22 Koncentrace fosforu na přítoku a odtoku z KČOV Dražovice



Obr. 23 Účinnost odstranění celkového fosforu na KČOV Dražovice

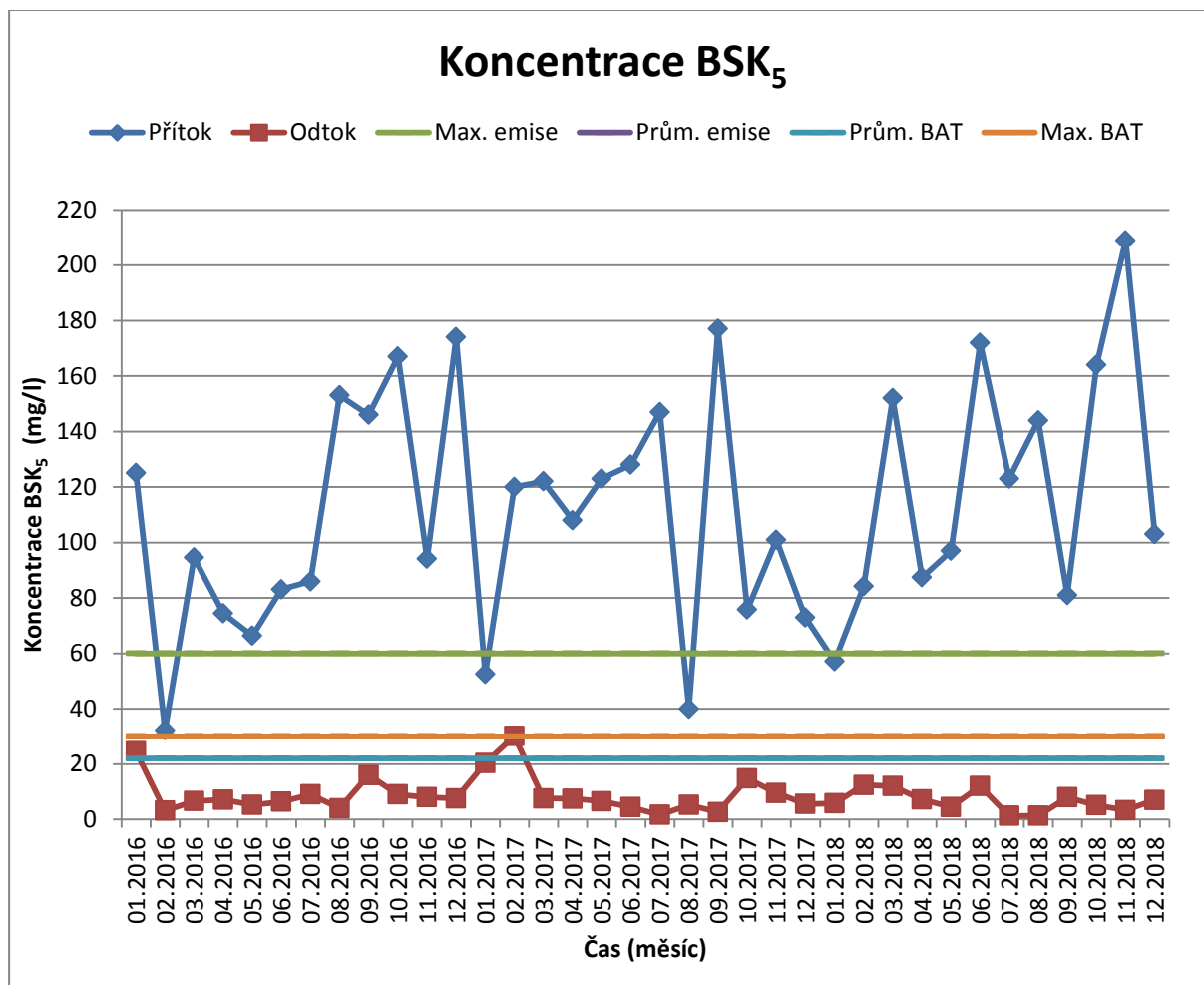


Obr. 24 Koncentrace celkového fosforu na KČOV Dražovice + BAT limity a emisní standardy

Průměrná účinnost odstraňování celkového fosforu byla 37,46 %, orientační hodnoty udávané normou ČSN 75 6402 jsou pro vertikální filtr 5 až 25 %. Přesto by se na této KČOV mělo, navrhnou opatření, které by snížilo množství vypouštěného fosforu do recipientu.

Ukazatel BSK₅

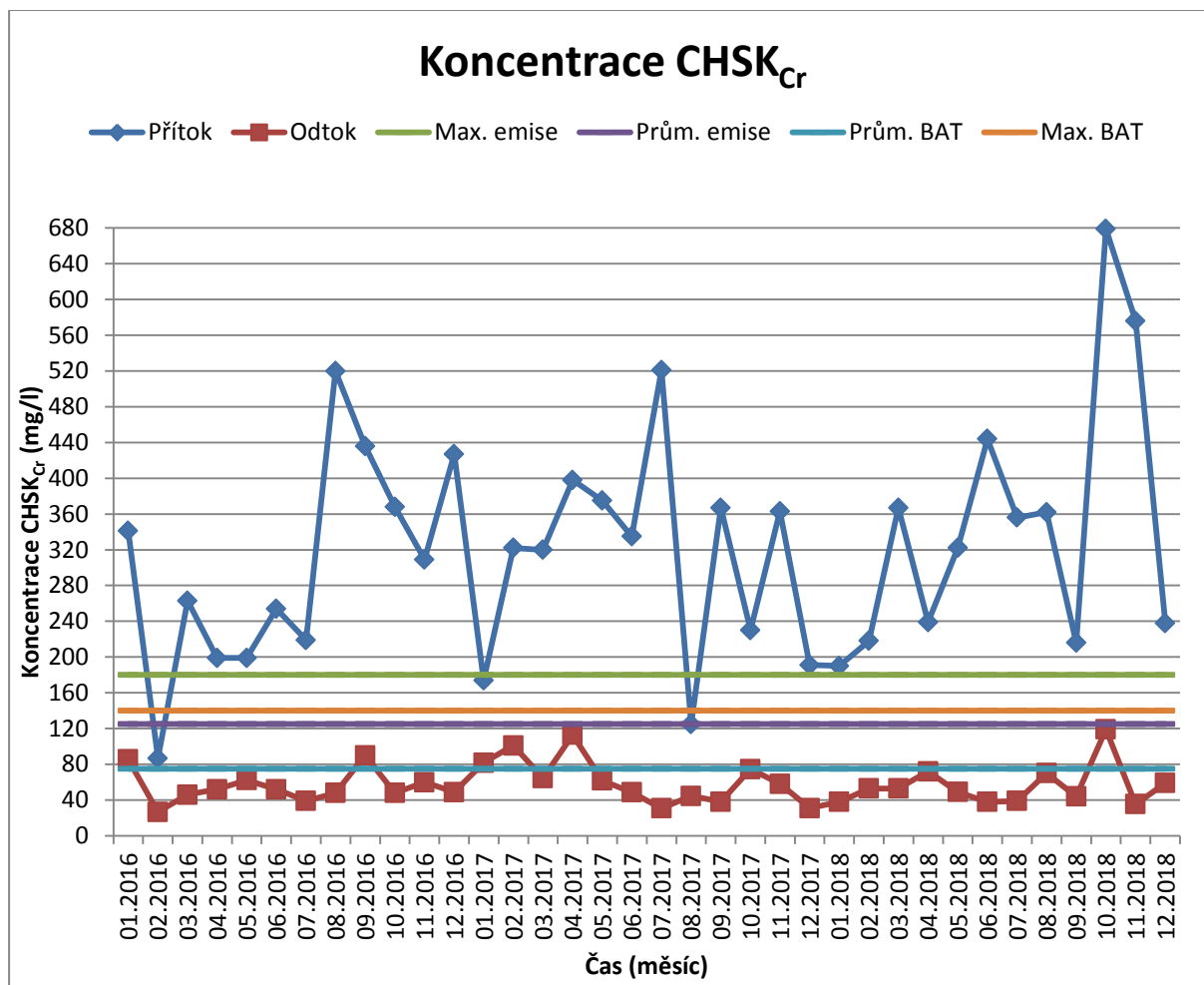
Pro vyhodnocení ukazatele znečištění BSK₅ byly použity emisní standardy pro kategorii ČOV 501 až 2000 EO dle NV 401/2015 Sb. Pro tuto kategorii jsou emisní standardy stanoveny jako 30 mg/l BSK₅ pro průměrné emise a 60 mg/l pro maximální emise BSK₅. Při porovnání všech 36 vzorků jsme zjistili, že pouze jeden vzorek překročil průměrnou hodnotu 30 miligramů a to o 0,1 mg/l BSK₅ a to v únoru 2017. Účinnost odstranění znečištění pro tento ukazatel se pohybovala v rozmezí od 61,14 % až k 99,10 %. Celková účinnost odstraňování BSK₅ byla 91,17 %. Dle ČSN 75 6402 jsou orientační hodnoty pro vertikální filtr 60 až 90 %. Z výsledků jsme zjistili, že KČOV nařízení vlády pro tento ukazatel splňuje bez potíží.



Obr. 25 Koncentrace BSK₅ na KČOV Dražovice + emisní standardy + BAT

Ukazatel CHSK_{Cr}

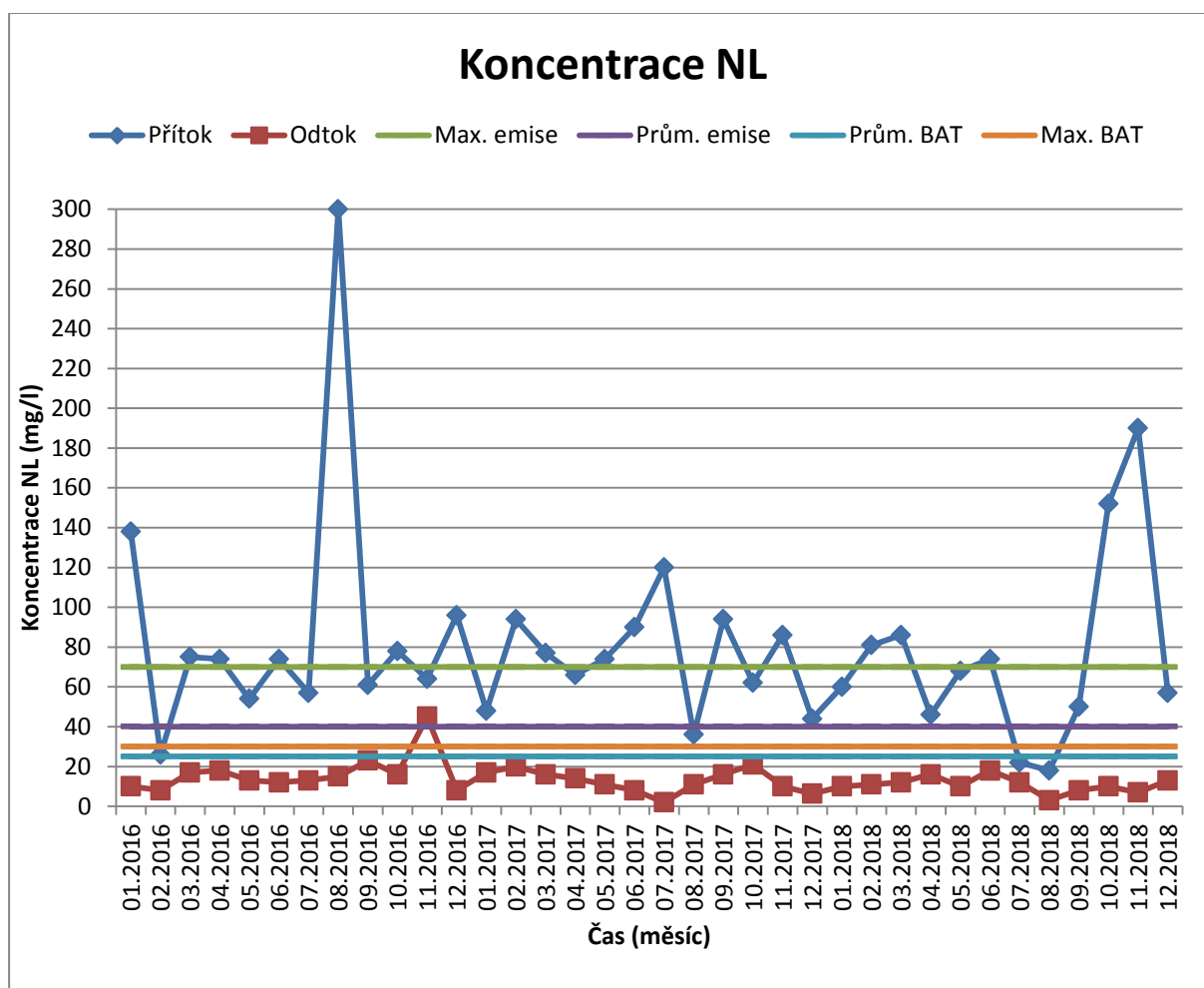
K dalším sledovaným ukazatelům patřilo CHSK_{Cr}. Pro tento ukazatel jsou stanoveny emisní standardy pro kategorii ČOV 501 až 2000 EO dle NV 401/2015 Sb. na hodnoty průměrné 125 mg/l CHSK_{Cr} a hodnotu maximální 180 mg/l CHSK_{Cr}. Při porovnání všech 36 vzorků jsme zjistili, že žádný vzorek nepřekročil průměrnou emisní hodnotu 125 mg/l CHSK_{Cr}. Účinnost se pohybovala v rozmezí od 52,99 % až k 94,09 %. Celková účinnost odstranění organického znečištění ve sledovaném období vyjádřená právě ukazatelem CHSK_{Cr} byla 79,74 %. Dle ČSN 75 6402 jsou orientační hodnoty pro vertikální filtr 40 až 70 %. Z výsledků jsme zjistili, že i pro tento ukazatel splňuje dražovická čistírna požadované limity.



Obr. 26 Koncentrace CHSK_{Cr} na KČOV Dražovice + emisní standardy + BAT

Ukazatel NL

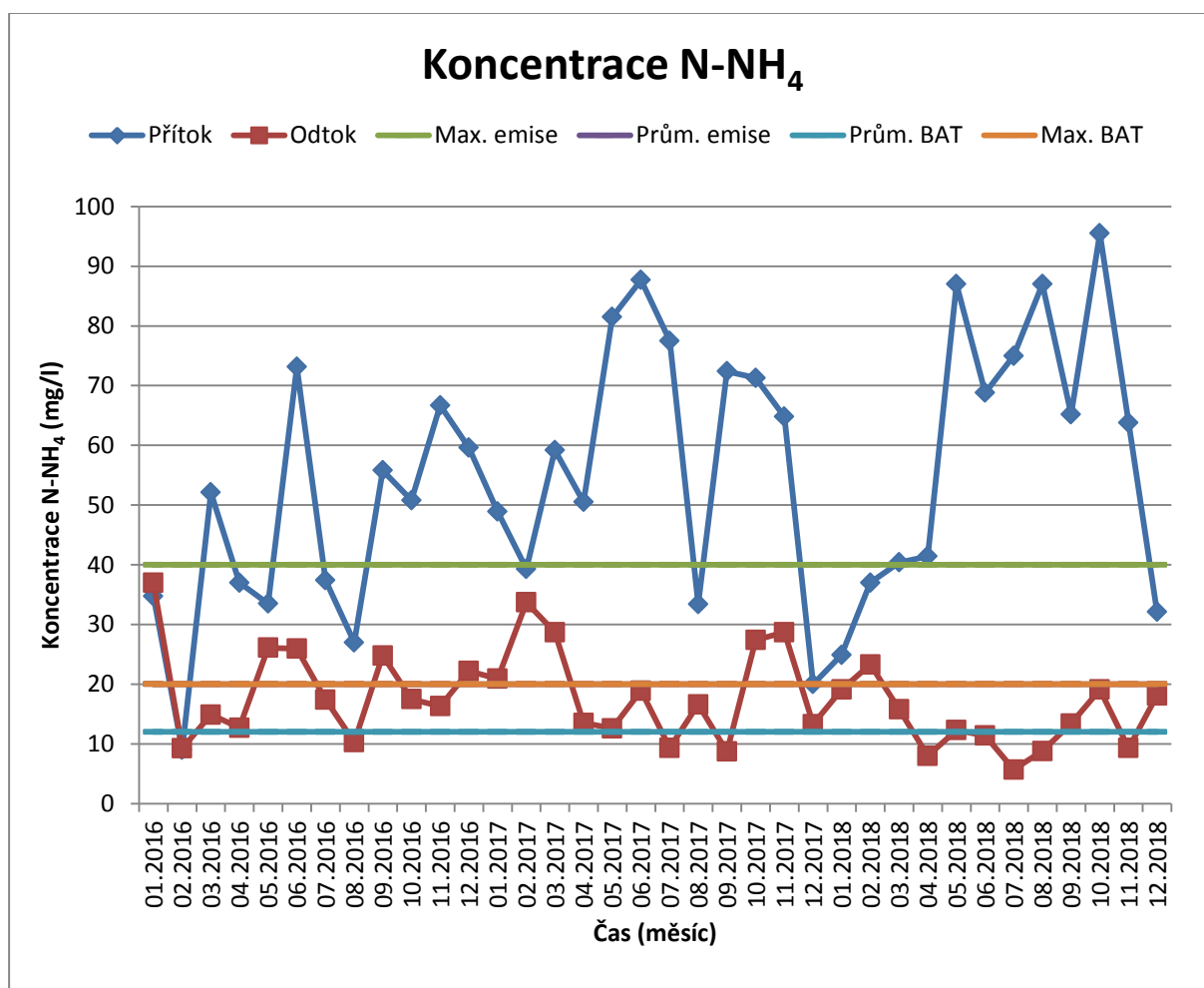
Při měření NL jsme použili emisní standardy pro kategorii ČOV 501 až 2000 EO dle NV 401/2015 Sb. Pro tuto kategorii jsou emisní standardy stanoveny jako 40 mg/l NL pro průměrné emise a 70 mg/l pro maximální emise NL. Při porovnání všech 36 vzorků jsme zjistili, že pouze jeden vzorek překročil průměrnou hodnotu 40 mg/l a to o 5,0 mg/l NL, k tomuto překročení došlo v listopadu 2016. Účinnost odstranění nerozpuštěných látek se pohybovala v rozmezí od 29,69 % až k 98,33 %. Celková účinnost odstraňování NL za sledované období byla 78,90 %. Dle ČSN 75 6402 jsou orientační hodnoty pro vertikální pulzně zatěžovaný filtr 40 až 70%. I pro tento ukazatel znečištění splňuje čistírna bez problému požadované limity.



Obr. 27 Koncentrace NL + emisní standardy + BAT

Ukazatel N-NH₄

K dalším měřeným ukazatelům patřil N-NH₄. Pro tento ukazatel jsou stanoveny emisní standardy pro kategorii ČOV 501 až 2000 EO dle NV 401/2015 Sb. na hodnoty průměrné 20 mg/l N-NH₄ a hodnotu maximální 40 mg/l N-NH₄. Při porovnání všech 36 vzorků jsme zjistili, že jedenáct vzorků překročilo průměrnou emisní hodnotu 20 mg/l N-NH₄. Účinnost se pohybovala v rozmezí od -6,48 % až k 92,40 %. Celková účinnost odstraňování N-NH₄ byla 60,21 %. Dle ČSN 75 6402 jsou orientační hodnoty pro vertikální filtr 70 až 90 %. Pro čistírnu by se mělo navrhnout řešení, které by snížilo množství vypouštěného N-NH₄. Avšak toto řešení není předmětem této práce.



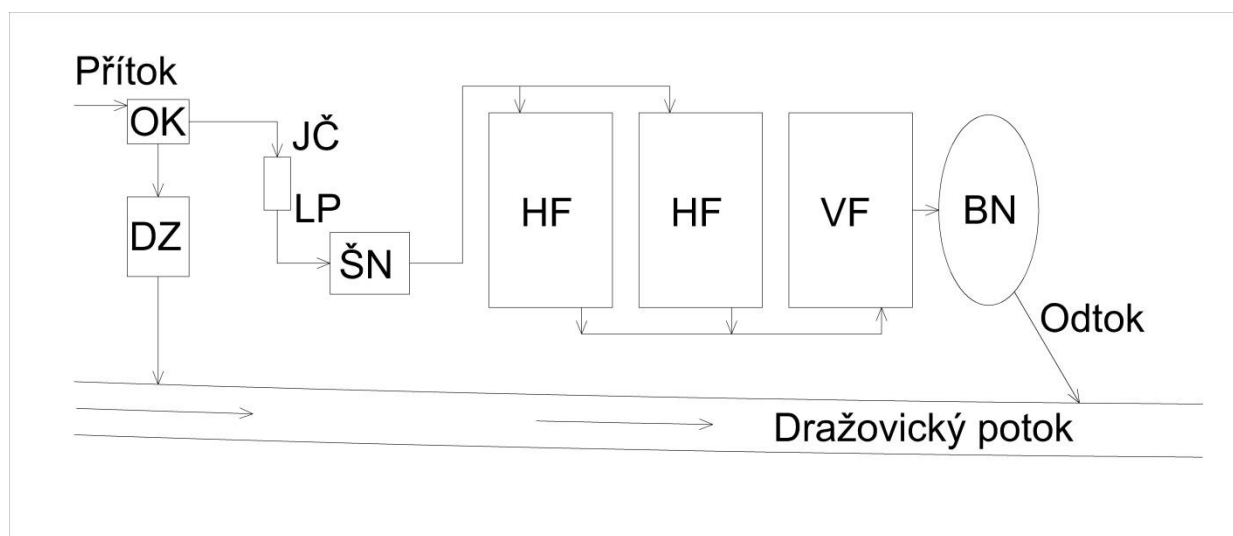
Obr. 28 Koncentrace N-NH₄ + emisní standardy + BAT

Jak ukazují jednotlivé výsledky pro sledované ukazatele, dražovická vegetační čistírna odpadních vod bez problému zvládá odstraňovat BSK₅, CHSK_{Cr}, NL v limitech nařízení vlády NV 401/2015 Sb. Největší problémy nastaly u N-NH₄ a P_{celk}. Ukazatel N-NH₄ není předmětem řešení této bakalářské práce, důležité je však zmínit, že odstranění amoniakálního znečištění zaznamenává na této čistírně v posledním roce měření výrazné zlepšení, a to díky zprovoznění vertikálního filtračního pole. Pro ukazatel P_{celk} jsme použili hodnoty pro kategorii čistírny odpadních vod 2001 -10000 EO, protože pro kategorii ve které se KČOV nachází, nejsou limity stanoveny. Pro tuto kategorii ukazatel P_{celk} také nevyhovoval NV 401/2015 Sb. a to i po zprovoznění vertikálního filtru. Tento problém je do jisté části ovlivněn tím, že stále na vertikální filtrační pole přitéká pouze polovina čistěné vody. Při dostavbě zbývající části vertikálního filtračního pole lze předpokládat, především na základě poznatků zmíněných v rešeršní části o hybridních vegetačních ČOV, že dojde ke snížení koncentrace vypouštěného fosforu. Ale není zajištěno, že nebude docházet k výkyvům koncentrací na odtoku. A proto by bylo vhodné, doplnit vegetační kořenovou

čistírnu odpadních vod o technologii, která bude přímo zaměřena na odstraňování fosforu z této KČOV. Čímž zajistí stabilní koncentrace na odtoku KČOV.

7.3 Návrh technologie pro odstranění fosforu

I přesto, že aktuálně nejsou na provozovatele KČOV Dražovice kladeny požadavky pro snížení koncentrace fosforu ve vypouštěné odpadní vodě, je vhodné nad tou technologií uvažovat. Hlavním důvodem může být obecný pozitivní dopad na životní prostředí, který by zvýšení čistící účinnosti pro ukazatel fosforu nastal a dále také předvídaní budoucího vývoje v oblasti zpřísnění legislativy, které by na základě stále častějších diskusí odborníků mělo v oblasti odstraňování fosforu nastat.



OK	Odlehčovací komora
DZ	Dešťová zdrž
JČ	Jemné česle
LP	Lapák písku
ŠN	Štěrbinová nádrž
HF	Horizontální filtr
VF	Vertikální filtr
BN	Biologická nádrž

Obr. 29 Původní uspořádání KČOV Dražovice

Na základě rešerše různých metod a technologií pro odstranění fosforu na čistírnách odpadních vod, bych jako vhodnou technologii pro tuto čistírnu navrhl fyzikálně-chemické srážení fosforu. To zejména z toho důvodu, že se tato technologie osvědčila i jiných typů komunálních čistíren odpadních vod pro malé kategorie a jsou s ní dlouhodobé zkušenosti.

Dokonce v Rakousku používají srážení solemi hliníku i na kořenové čistírně odpadních vod. K dalším výhodám může patřit její jednoduchá instalace do již fungující linky dražovické čistírny, dostupnost jednotlivých komponent i samotného srážedla a také celkem jednoduché provozování, které vyžaduje pouze zdroj elektrické energie.

Důležitým faktorem, pro správnou účinnost této technologie, je její vhodné umístění na technologické lince čistírny. Vhodným místem k instalaci zařízení pro srážení fosforu je její zařazení za jemné česle tak, aby v prostoru lapáku písku došlo k promíchání flokulantu s odpadní vodou a současně aby lapák písku mohl již účinně separovat vzniklou sraženinu. Hlavním místem ukládání sraženiny bude ovšem štěrbinová nádrž. Díky tomu se v ní bude hromadit větší množství kalu, což bude vyžadovat častější vyvážení kalového prostoru štěrbinové nádrže

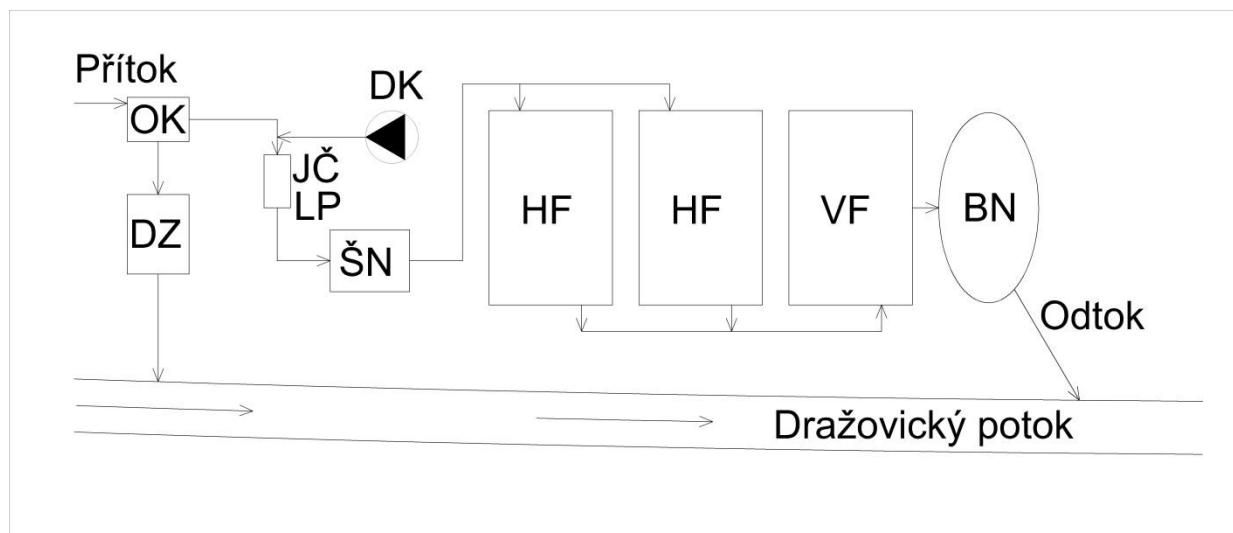
V tomto prostoru by se umístilo dávkovací čerpadlo. Ideálním řešením přívodu elektrické energie je instalace solárního panelu. Navržené řešení je zobrazeno na schématu Obr. 31.



Obr. 30 Nádrž na srážedlo a solární panel na pohon čerpadla příklad z Rakouska (archiv ÚVHK)

Při porovnání srážedel z hliníku a železa jsme zjistili, že u dávkování solí železa je potřeba méně srážedla než je tomu u solí hliníku. Z ekonomického hlediska se jeví jako vhodnější varianta použít soli železa, u nichž bude zapotřebí menší množství srážedla při stejném obsahu fosforu na přítoku na vegetační kořenové čistírně odpadních vod Dražovice. Avšak na základě zkušeností z Rakouska, kde jsou jako koagulanty na vegetačních čistírnách používány sole hliníku, a také z důvodu možnosti vzniku nežádoucích sekundárních sloučenin

při dávkování solí železa v anaerobních podmínkách, které mají korozivní účinek na beton, bude vhodnějším flokulantem vybraný typ solí hliníku. Vzhledem k použitému čerpadlu je vhodné použít přímo roztok, čímž opět snížíme náročnost celé technologie a nebudeme potřebovat další technické zařízení pro vytváření roztoků z pevných srážedel. Jako ideální srážedlo se jeví Polyaluminiumchlorid neboli PAX.



- OK Odlehčovací komora
- DZ Dešťová zdrž
- JČ Jemné česle
- LP Lapák písku
- ŠN Štěrbínová nádrž
- HF Horizontální filtr
- VF Vertikální filtr
- BN Biologická nádrž
- DK Dávkování koagulantu pohon čerpadla zajištěn solárními panely

Obr. 31 Navržené řešení uspořádání KČOV Dražovice

Příkladem setu, který by se používal na domovních čistírnách odpadních vod je set od firmy Envi-Pur který se skládá z čerpadla, časového spínače, zásobní nádrže a hadice na rozvod koagulantu (online cit. [2]).



Obr. 32 Set na srážení fosforu (online cit. [2])

Takovéto opatření by mělo při správném dávkování koagulantu zajistit na odtoku z KČOV koncentrace fosforu pod limitní 2 mg/l. K tomu by mělo stačit dávkování do 1 ml koagulantu na litr znečištěné vody, jak jsme zjistili na základě provedené rešerše. Ideální by bylo, kdyby se odtokové koncentrace fosforu pohybovaly celoročně pod hranicí 1 mg/l a účinnost srážení se pohybovala kolem 90 %.

Předpokladem pro reálné zavedení srážecí jednotky do systému čistírny v Dražovicích by bylo laboratorní testování a následný zkušební provoz přímo na lince KČOV, na základě kterého byla technologie srážení průběžně optimalizovaná.

8 Závěr

Fosfor má velmi neblahý vliv na kvalitu vod na území České republiky, spolu s dusíkem se jedná o nutrienty, které nejvíce zapříčiňují eutrofizaci povrchových vod. Ta má velmi negativní vliv na faunu, floru a celkový ekosystém vod, přispívá ke zvýšenému růstu rostlin ve vodách, čímž snižuje obsah kyslíku, a tím zapříčiní úhyn živočichů. Legislativní požadavky v NV 401/2015 Sb. nijak nestanovují limity pro odstraňování fosforu v kategoriích čistíren odpadních vod do velikosti 2000 EO. Jak ukázala odborná rešerše, stále více se zvětšuje tlak na zpřísnění těchto limitů, jak z ekologických důvodů, tak ze strany samotné odborné společnosti.

Na základě stanovených cílů práce, byla provedena rešerše metod a technologií vhodných pro srážení fosforu na vegetačních čistírnách odpadních vod. Jak se ukázalo, existují i konkrétní zahraniční studie, které popisují dobré výsledky v odstranění fosforu přímo na vegetačních čistírnách, využitím vhodné kombinace filtračních polí, kterému se říká hybridní systém. Jedná se o KČOV, na kterých jsou za sebou řazena horizontální a vertikální filtrační pole. Cílem je navrhnout takto vegetační kořenové čistírny odpadních vod i v našich podmínkách. Avšak zavést takovéto řešení u starších KČOV je často finančně nákladné a vyžaduje to velké technické zásahy do samotné vegetační kořenové čistírny odpadních vod.

K nejlepšímu možností, jak odstraňovat fosfor na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod, se řadí způsob využití fyzikálně-chemických metod. Nejvhodnější řešení je srážení solemi železa a hliníku, které se běžně využívá na klasických čistírnách odpadních vod. Největší výhodou tohoto systému je jeho dlouhodobá udržitelnost a malé konstrukční změny na KČOV. Při použití této technologie nastává problém se zvýšeným množstvím vzniklého kalu. To se dá vyřešit změnou četností odvozu kalu ze šterbinové nádrže anebo její konstrukční úpravou. Naproti tomu jsme zjistili, že srážet fosfor vápnem se na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod nehodí k použití kvůli své potřebě vyššího pH, to má negativní vliv na rostlinou osádku filtračních polí.

Poly-P bakterie se ukázaly být pro použití na vegetačních kořenových čistírnách odpadních vod jako nevhodné. Jsou velmi složité na řízení svých metabolických pochodů a na vegetačních kořenových čistírnách nejsme schopni zařídit dostatečné podmínky pro jejich správnou funkci. Navíc pro KČOV je typický požadavek na jejich jednoduchost, což s tímto typem technologie není možné docílit.

Další se zkoumaných technologií byly různé speciální materiály filtračních polí. U nich se jeví jako jejich největší nevýhoda postupná ztráta sorpční schopnosti materiálu a následná potřeba jej vyměnit. Tento proces se ovšem pohybuje v řádu až 20 let. Navíc se ukázalo, že velká část těchto materiálů prošla pouze laboratorními zkouškami, ale jejich použití v praxi

ještě stále neproběhlo, což znamená, že není zcela jasné, jaká ve skutečnosti bude jejich účinnost na KČOV. Výhodou se ukázalo, že se takto dají využít odpadní materiály z průmyslu, díky čemuž nedochází k jejich okamžitému skládkování, ale mohou se po značně dlouhou dobu používat pro účely čištění vod. Materiály vyráběné uměle, přímo za tímto účelem, jsou ovšem dosti kontroverzní, protože k jejich výrobě je potřeba velkého množství energie, což je nejen prodražuje, ale zároveň vyvstává otázka, zdali je vůbec potřeba je vyrábět.

Poslední uvedenou možností jak odstraňovat fosforu, je s využitím mokřadních rostlin. Tento způsob má jen velmi omezené možnosti, a tak působí spíše jako doplňkový k ostatním technologiím, neboť filtrační pole jsou osázena rostlinami.

Z jednotlivých zmíněných metod a technologií se jako nejvhodnější, pro stávající i nově navrhované vegetační kořenové čistírny odpadních vod, jeví metoda srážením solemi hliníku a železa. Díky své jednoduchosti ji lze zařadit i do již fungujícího systému. Pro rychlou orientaci v jednotlivých technologiích byla vytvořena přehledná tabulka.

V další části práce bylo provedeno vyhodnocení čistící účinnosti vybrané vegetační čistírny odpadních vod. Jednalo se o KČOV Dražovice, která spadá do kategorie ČOV do 2000 EO. Přesto, že takováto čistírna nemá dle aktuální legislativy povinnost dodržovat limitní koncentrace pro celkový fosfor, byl proveden návrh vhodné technologie, která by zajistila jeho účinné odstranění. Na základě vyhodnocení chemických analýz jsme zjistili, že dražovická KČOV dnes bez problému vyhoví požadavkům NV 401/2015 Sb. pro ukazatele BSK_5 , $CHSK_{Cr}$ a NL. Ukazatel $N-NH_4$ zaznamenal výrazné zlepšení po zprovoznění vertikálního filtračního pole. Pro ukazatel P_{celk} není v NV 401/2015 Sb. stanovena limitní hodnota pro danou velikost KČOV, z tohoto důvodu jsme pro posouzení použili limitní hodnoty pro vyšší kategorii 2001 – 10000 EO. To je v souladu s předpokladem zpřísnění nařízení vlády a požadavků na kvalitu vypouštěné odpadní vody. Při srovnání s limitními hodnotami pro zvolenou kategorii jsme zjistili, že jim koncentrace fosforu nevyhoví a je potřeba provést opatření, které sníží množství vypouštěného fosforu z KČOV. Navrhli jsme srážení fosforu pomocí solí hliníku PAX.

9 Seznam citací

1. ČSN 75 6402. Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel. Praha: Český normalizační institut
2. 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. In: *Sbírka Zákonů*. 401/2015 Sb.
3. FIALA, Daniel. *Boj o fosfor: aneb pracují všichni vodohospodáři na plný výkon?* [online]. 4.5.2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/boj-o-fosfor/>
4. FOLLER, Jan. *Fosfor: žhavé téma, které „hýbe“ Evropou, ale v ČR jsme stále schopni je účinně uchládit* [online]. 28.11.2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/fosfor/>
5. HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN, Retr PRAX, Petr HLUŠTÍK a Radim MIFEK. STOKOVÁNÍ A ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD MODUL 2: čištění odpadních vod. Brno, 2006.
6. HOLBA, Marek. *Vhodné technologie recyklace fosforu z povrchových a odpadních vod* [online]. 4.2.2011 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/7128-vhodne-technologie-recyklace-fosforu-z-povrchovych-a-odpadnich-vod>
7. JOHANSSON WESTHOLM, Lena. *Substrates for phosphorus removal—Potential benefits for on-site wastewater treatment?: Water Research* [online]. 2006, , 23-36 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.006>. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135405006354>
8. JÓŹWIAKOWSKI, Krzysztof, Michał MARZEC, Alina KOWALCZYK-JUŚKO, Magdalena GZIŃSKA-GÓRNA, Aneta PYTKA-WOSZCZYŁO, Arkadiusz MALIK, Agnieszka LISTOSZ a Magdalena GAJEWSKA. *25 years of research and experiences about the application of constructed wetlands in southeastern Poland: Ecological Engineering* [online]. 2019, , 440-453 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.013>. ISSN 0925-8574. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857418304610>
9. KADLEC, Robert H. a Scott D. WALLACE. *Treatment wetlands*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2009. ISBN 978-1-56670-526-4.

10. KOČÍ, Vladimír, Jiří BURKHARD, Blahoslav MARŠÁLEK a . *EUTROFIZACE NA PŘELOMU TISÍCILETÍ* [online]. Ústav chemie ochrany prostředí VŠCHT Praha [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [www:http://ekotoxikologie.sweb.cz/toxlab/knihovna/eutrofizace.htm](http://ekotoxikologie.sweb.cz/toxlab/knihovna/eutrofizace.htm)
11. KRIŠKA, Michal a Miroslava NĚMCOVÁ. *Kořenové čistírny odpadních vod: Metodická příručka pro návrh a realizaci*. 2015. Vysoké učení technické v Brně.
12. KRÖPFELOVÁ, Lenka, Jan VYMAZAL, Jaroslav ŠVEHLA a Jana ŠTÍCHOVÁ. *Removal of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech Republic: Environmental Pollution* [online]. 2009, , 1186-1194 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.003>. ISSN 0269-7491. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974910800674X>
13. LAN, Wei, Jian ZHANG, Zhen HU, Mingde JI, Xinwen ZHANG, Jianda ZHANG, Fazhan LI a Guoging YAO. *Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study: Chemical Engineering Journal* [online]. 2018, , 209-214 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.150>. ISSN 1385-8947. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717318648>
14. LAUSCHMANN, Robert E., Markus LECHNER, Thomas ERTL a Guenter LANGERGRABER. *Experiences with pre-precipitation of phosphorus in a vertical flow constructed wetland in Austria* [online]. 1.5.2013 [cit. 2019-05-20]. DOI: 67 (10): 2337–2341. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2013.103>. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23676407#>
15. MATYSÍKOVÁ, Jana. *Česle a síta* [online]. 26.6.2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/285.cesle-a-sita>
16. PELIKÁM, Petr. *Kořenové čistírny odpadních vod* [online]. 13.12.2004 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/2287-korenove-cistirny-odpadnich-vod>
17. PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
18. ROUS, Vít a Jiří ZIMA. *Likvidace fosforu - PhosphoReduc* [online]. 2015 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/274832027_Likvidace_fosforu_-_PhosphoReduc

19. ŠÁLEK, Jan, Michal KRIŠKA, Oldřich PÍREK, Miloš ROZKOŠNÝ a Zdeňka ŽÁKOVÁ. *Vegetační kořenové čistírny* [online]. 20.6.2013 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/10058-vegetacni-korenove-cistirny>
20. VYMAZAL, Jan. *Kořenových čistíren v Evropě přibývá* [online]. 11. 6. 2003 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.moderniobec.cz/korenovych-cistiren-v-evrope-pribyva/>
21. VYMAZAL, Jan. *Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Ten case studies from the Czech Republic: Ecological Engineering* [online]. 2011, , 54-63 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.11.028>. ISSN 0925-8574. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857409003310>
22. VYMAZAL, Jan a Tereza BŘEZINOVÁ. *Long term treatment performance of constructed wetlands for wastewater treatment in mountain areas: Four case studies from the Czech Republic: Ecological Engineering* [online]. 2014, , 578-583 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.075>. ISSN 0925-8574. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857414003747>

9.1 Seznam internetových zdrojů

- [1] <http://freedomsway.org/earth-month-great-meadows-national-wildlife-refuge/> [cit. 2019-05-10].
- [2] <http://www.aquacon.cz/cistirny-odpadnich-vod/prislusenstvi-cov/chemicke-srazeni-fosforu-pro-cov-set.html> [cit. 2019-05-10].
- [3] <http://www.rybarstvi.eu/dok%20rybari/anionty.pdf> [cit. 2019-02-09]
- [4] <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-wwtp9-02.pdf> [cit. 2019-05-10].
- [5] https://www.dumachalupa.cz/forum/odpady-a-cisticky/vicekomorovy-septik-septik-sl-do-3-kubiku-88512/?stranka_oblast=0 [cit. 2019-05-10].
- [6] <https://www.rybarskyrozcestnik.cz/atlasy/zblochan-vodni-glyceria-maxima/> [cit. 2019-05-20].

- [7] http://dekonta.cz/wp-content/uploads/2017/07/Hybridni_korenove_cistirny_odpadnich_vod.pdf [cit. 2019-03-04].
- [8] http://kzei.fsv.cvut.cz/pdf/HHZI_07.pdf [cit. 2019-03-05].
- [9] https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=2187 [cit. 2019-03-09].
- [10] <http://kzei.fsv.cvut.cz/pdf/2016-2017/pvh2/COV.pdf> [cit. 2019-03-09].
- [11] http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Radka_2010/mc.html [cit. 2019-05-10].
- [12] <http://www.kcov-rostliny.cz/Bahennirostliny.php#rakos> [cit. 2019-05-20].
- [13] <https://abecedazahrady.dama.cz/katalog-rostlin/zevar-vzprimeny> [cit. 2019-03-09].
- [14] <https://www.asio.cz/cz/356.biologicke-nadrze-vyuzivane-k-cisteni-a-docistovani-odpadnich-vod> [cit. 2019-03-20].
- [15] <https://botany.cz/cs/> [cit. 2019-05-10].
- [16] <http://pece.zf.jcu.cz/docs/prednasky/Funkce-a-vyuziti-makrofyt-8913bcb97c.pdf> [cit. 2019-04-07].
- [17] <http://www.korenova-cisticka.cz/o-korenovkach/fungovani/Korenova-cisticka%E2%80%93korenova-cistirna%E2%80%93rostliny-pro-korenovou-cisticku.html> [cit. 2019-04-07].
- [18] <http://www.prochemie.cz/chemikalie.htm> [cit. 2019-04-07].
- [19] <http://www.lach-ner.com/siran-zeleznaty-heptahydrat-c-500-gr/d-71290/> [cit. 2019-04-07].
- [20] <https://www.oqema.cz/web/structure/katalog-produktu-chlorid-zeleznaty-roztok-311202001000-15.html> [cit. 2019-04-07].
- [21] <http://krizport.firebrno.cz/ohrozeni/chlorid-zelezity> [cit. 2019-04-07].
- [22] <http://krizport.firebrno.cz/ohrozeni/siran-zelezity-pix-113> [cit. 2019-04-07].
- [23] <https://www.oqema.cz/web/structure/katalog-produktu-hlinitan-sodny-tekuty-310600201000-15.html> [cit. 2019-04-07].
- [24] <https://www.ryby-jezirka.cz/sitina-rozkladita-juncus-effusus.html> [cit. 2019-04-28].
- [25] <http://www.kvetenacr.cz/index.asp> [cit. 2019-05-10].
- [26] <http://botanika.wendys.cz/> [cit. 2019-05-10].
- [27] <https://www.priroda.cz/lexikon.php?detail=726> [cit. 2019-05-20].

- [28] <http://www.agrostis.cz/kapesni-atlas-trav/chrastice-rakosovita-phalaris-arundinacea-1> [cit. 2019-05-20].
- [29] <http://www.lach-ner.com/chlorid-hlinity-bezvody-pa-100-gr/d-72373/> [cit. 2019-05-20].

10 Seznam obrázků

- Obr. 1 Mokřad Great Meadows (online cit. [1])
- Obr. 2 česle KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 3 Lapák písku KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 4 Vícekomorový septik (online cit. [5])
- Obr. 5 Štěrbínová usazovací nádrž (online cit. [11])
- Obr. 6 Schéma horizontálního filtru KČOV (Šálek a kol., 2013)
- Obr. 7 Horizontální filtrační pole KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 8 Schéma vertikálního filtru KČOV (Šálek a kol., 2013)
- Obr. 9 Vertikální filtrační pole KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 10 Příklad srážení z Rakouska (archiv UVHK)
- Obr. 11 Rákos obecná (online cit. [26])
- Obr. 12 Orobinec širokolistý (online cit. [26])
- Obr. 13 Zevar vzpřímený (online cit. [26])
- Obr. 14 Sítina rozkladná (online cit. [26])
- Obr. 15 Orobinec úzkolistý (online cit. [25])
- Obr. 16 Chrastice rákosovitá (online cit. [15])
- Obr. 17 Zblochan vodní (online cit. [15])
- Obr. 18 Skřípinec jezerní (online cit. [15])
- Obr. 19 Vertikální filtr na KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 20 Horizontální filtr KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 21 Česle na KČOV Dražovice (archiv UVHK)
- Obr. 22 Koncentrace fosforu na přítoku a odtoku KČOV Dražovice
- Obr. 23 Účinnost odstranění fosforu na KČOV Dražovice
- Obr. 24 Koncentrace fosforu na KČOV Dražovice + BAT limity a emisní standardy
- Obr. 25 Koncentrace BSK₅ na KČOV Dražovice + emisní standardy + BAT
- Obr. 26 Koncentrace CHSK_{Cr} na KČOV Dražovice + emisní standardy + BAT
- Obr. 27 Koncentrace NL + emisní standardy + BAT
- Obr. 28 Koncentrace N-NH₄ + emisní standardy + BAT
- Obr. 29 Původní uspořádání KČOV Dražovice

Obr. 30 Nádrž na srážedlo a Solární panel na pohon čerpadla příklad z Rakouska (archiv ÚVHK)

Obr. 31 Navržené řešení uspořádání KČOV Dražovice

Obr. 32 Set na srážení fosforu (online cit. [2])

11 Seznam tabulek

Tabulka 1 Složení vrstev vertikálního filtru (ČSN 75 6402, 2017)

Tabulka 2 Emisní standardy (NV 401/2015 Sb., 2015)

Tabulka 3 Přípustná minimální účinnost čištění vypouštěných odpadních vod v % (NV 401/2015 Sb., 2015)

Tabulka 4 Počet přípustných nevyhovujících vzorků (NV 401/2015 Sb., 2015)

Tabulka 5 BAT limity (NV 401/2015 Sb., 2015)

Tabulka 6 Hmotnost prvků v gramech na mol

Tabulka 7 Hodnoty produkce sušiny a akumulace živin v rákosvinách (online cit. [16])

Tabulka 8 posouzení metod

12 Seznam použitých zkratek

BSK ₅	Biologická potřeba kyslíku
ČOV	Čistírny odpadních vod
EO	Ekvivalentních obyvatel
CHSK _{Cr}	Chemická spotřeba kyslíku
KČOV	Kořenové čistírny odpadních vod
NL	Nerozpuštěné látky
N-NH ₄	Amoniakální dusík
P _{celk.}	Celkový fosfor
ÚVHK	Ústav vodního hospodářství krajiny