

Účinné metody srážení fosforu v odpadních vodách

Ing. Jan Foller, Vodárenská akciová společnost, a.s., foller@vasqr.cz

Souhrn

Příspěvek přináší přehled možnosti srážení fosforu v odpadních vodách a možnosti intenzifikace technologie čistíren odpadních vod úpravou a využitím nových postupů. Rozebírá problematiku možných poruch procesu z fyzikálně-chemického a technologického hlediska a na praktických příkladech naznačuje řešení.

Úvod

Fosfor hraje klíčovou úlohu v „živé přírodě“, jako základní biogenní prvek. Podobně, jako u ostatních základních biogenních prvků, můžeme i u fosforu pro ilustraci naznačit jeho zdánlivý koloběh v přírodě. Zatím co další tři základní biogenní prvky: H, O, N, procházejí přes všechna skupenství, koloběh fosforu v přírodě má významné specifikum. Za běžných přírodních podmínek totiž nevznikají žádné plynné ani kapalné sloučeniny fosforu (všechny takové člověkem připravené, jsou mimořádně toxické), ale jeho koloběh probíhá pouze prostřednictvím distribuce různých rozpuštěných a nerozpuštěných solí, za účasti dalších prvků (Ca, Mg, Fe, Al). Velmi zjednodušeně to lze popsat například následujícím schématem:

- I. přírodní fosfáty – rozpustné fosfáty – rostliny – živé organismy
- II. živé organismy + O₂ = oxid uhličitý + biomasa + rozpustné fosfáty + (Ca, Mg, Fe) = přírodní fosfáty

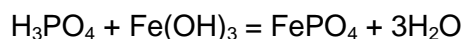
Problémem u koloběhu fosforu je to, že ložiska přírodních fosfátů jsou jinde než jejich spotřebitel a produkt čištění odpadních vod, které lze chápat jako součást tohoto koloběhu intenzifikovanou člověkem, tedy rozpustné i nerozpustné fosfáty, vzniká ve zředěné formě nebo odtéká s vodou do moří, kde dochází k poslední fázi koloběhu, tedy ke srážení a sedimentaci. Zde je však fosfor zatím bez reálné možnosti opětovného využití.

Koloběh fosforu tedy teoreticky existuje, ale zatím fosfor většinou pouze spotřebováváme a vytěžujeme z dostupných zdrojů a zbytečně ztrácíme v nedostupných zdrojích. Při hodnocení úrovně funkce čistíren odpadních vod je pak obsah fosforu jedním z významných měřítek znečištění odtékajících odpadních vod, jehož význam v poslední době zaslouženě stoupá (vyjadřuje se většinou pouze, jako P_{celk.}). Chceme-li alespoň částečně fosfor v této oblasti recyklovat, musíme se zaměřit také na jeho účinné zachycení v odtékajících vodách, tedy na metody čištění. Kromě biologických postupů jsou to především účinné metody chemického srážení.

Chemické srážení fosforu a mechanismy spojených reakcí

O chemickém srážení fosforu bylo napsáno mnoho odborných statí a článků a není cílem této práce jejich množství opakováním známých faktů zbytečně rozšiřovat. Z tohoto důvodu zde uvedeme pouze základní a pro další výklad důležité skutečnosti.

Srážení fosforu v odpadních vodách solemi trojmocného železa není jednoduchou srážecí reakcí, jakou by naznačovala níže uvedená stechiometrická rovnice.



Vzhledem k existenci tří disociačních stupňů kyseliny fosforečné a tří disociačních stupňů hydroxidu železitého a také díky oxidačně-redukčním vlastnostem sloučenin železa, tvořících reverzibilní redox-systém, se jedná o komplexní proces značně ovlivněný reakčními podmínkami, především hodnotou pH, ORP, koncentrací aktivovaného kalu, přítomností komplexotvorných látek, hlavně pak koncentrací reagujících složek a podmínkami jejich distribuce – mícháním. Výsledný efekt těchto naznačených dějů je řízen „podmíněným“ součinem rozpustnosti vznikajících sráženin, který není fyzikálně-chemickou konstantou, ale je charakteristický pro konkrétní dané podmínky v reakčním prostředí v daném okamžiku, kdy se ustavuje chemická rovnováha. Z těchto důvodů se v provozní praxi používá běžně, při standardním srážení fosforu až tři a půl molární nadbytek srážedla, obecně solí Me⁺³ (Fe, Al), aby bylo dosaženo požadovaného efektu. Příčinou je právě i řada bočných reakcí obecně zpomalujících ustálení

rovnováhy a tím vznikající rozdíl mezi teoretickou zbytkovou koncentrací fosforu (ortofosforečnanů), danou součinem rozpustnosti stanoveným za standardních podmínek a skutečnou dosaženou koncentrací. Důležitá v tomto případě musí být i reakční doba, tedy doba kontaktu sraženin hydroxidů železa s biologicky rozkládanými sloučeninami, kdy je výsledným produktem rozkladu fosfor uvolněný ve „srazitelné“ formě ortofosforečnanů.

Samotný proces srážení probíhá následovně. Při hodnotě pH vyšší než 2,8 již nelze předpokládat v roztoku existenci iontu Fe^{+3} , začínají se ihned po nadávkování srážedla tvořit různé formy hydratovaných komplexních sloučenin ve formě micel, například solů $Fe(OH)_3$. S ohledem na prostředí a relativně malou počáteční koncentraci srazitelného fosforu je důležité, aby se ionty fosforečnanu dostaly k micelle hydroxidu co nejdříve. Míra difuze je totiž závislá na velikosti částic – shluků molekul této dispergované soustavy. Vzhledem k tomu, že je rovnovážná koncentrace železa při disociaci hydroxidu železitého asi o řád vyšší než při disociaci fosforečnanu železitého, viz tabulka, lze předpokládat jako první reakci vznik fosforečnanu železitého a teprve potom hydroxidu. Toto však platí pouze pro přechodný koloidní stav kdy je krystalické jádro tvořené molekulou fosforečnanu nebo hydroxidu obklopeno pouze několika molekulami vnější aktivní vrstvy micely tvořené například molekulami $FeOCl$. Vlivem tepelného pohybu těchto koloidních částic a srážek dochází k vybití části povrchové energie a nastává fáze koagulace, při které se začínají uplatňovat hlavně Van der Waalovy a gravitační síly a tepelný pohyb ztrácí na významu. Menší částice z počátku procesu se rozpouštějí a větší vlivem nepřetržité rekrytalizace rostou až do viditelné formy vloček. Z popsaného je zřejmé, že kromě fyzikálně – chemických podmínek, jejichž důsledkem je konečná hodnota podmíněného součinu rozpustnosti, potažmo dosažená úroveň srážení fosforu, musí mít významný vliv i konečné provedení srážecího reaktoru a způsob vedení procesu srážení – míchání. Zatím co ve vodárenství je tato problematika podrobně studována, problematice reaktorů pro oddělené srážení fosforu doposud taková pozornost věnována nebyla.

V následující tabulce je pro doplnění a ilustraci uvedeno několik převzatých fyzikálně – chemických údajů k vlastnostem nerozpustných sloučenin železa, hliníku a fosforu, které v čistírenství a v odpadních vodách mohou reálně vznikat a tím výsledek procesu významně ovlivňovat.

Vybrané nerozpustné sloučeniny

Sloučenina	Rozpustnost v mol/l	Součin rozpustnosti (K_s)
Hydroxid železnatý	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-15}$
Uhličitan železnatý	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$
Sulfid železnatý	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-18}$
Hydroxid železitý	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$3,2 \cdot 10^{-38}$
Fosforečnan železitý	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-22}$
Hydroxid hlinitý	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-32}$
Fosforečnan hlinitý	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$5,8 \cdot 10^{-19}$

Obecné faktory ovlivňující účinnost chemického srážení fosforu

Přesto, že byl proces chemického srážení fosforu v odpadních vodách výše podrobně teoreticky i prakticky popsán, uvádíme v následující tabulce stručné shrnutí faktorů ovlivňujících funkci tohoto stupně a jejich mechanismy působení. Je zřejmé, že je nutné vnímat tyto faktory v kontextu posuzování celé ČOV.

Faktory ovlivňující účinnost srážení fosforu

Faktor	Přibližný vliv
pH	S vyšší hodnotou pH stoupá rozpustnost fosforečnanů vlivem hydrolyzy, skutečný dopad závisí na srážedle (Al, Fe).
Stupeň disociace kyseliny fosforečné	Stupeň disociace kyseliny fosforečné a tím možná existence různých směsí fosforečnanů, odpovídajících disociačním stupňům kyseliny fosforečné v závislosti na pH. Možnost vzniku rozpustnějších solí a komplexních sraženin.
Přítomná forma sloučenin fosforu	Fosfor může být v odpadních vodách přítomen kromě organicky vázaného v biomase v řadě fosfátů, polyfosfátů, fosfolipidů a podobně, s různou rozpustností a možnostmi interakce se srážedlem.

Iontová síla roztoku	Obecně koncentrace inertních solí, které se nezúčastní srážecích reakcí, ale zvyšuje rozpustnost sraženin.
Konkurenční reakce	Pokud je v roztoku přítomna látka, která tvoří s železem nebo hliníkem málo rozpustnou sůl nebo málo disociovaný komplex, snižuje se účinek srážení v poměru disociačních konstant těchto konkurenčních reakcí. Takovými látkami mohou být například EDTA, některé vícesytné aminy a řada přírodních organických sloučenin. Obecně také vliv rozpuštěné CHSK.
Sorbční děje	Obecně se má za to, že zlepšují účinky srážení.
Kinetika reakcí	Obecně rychlost srážení a doba zrání sraženin před separací.
Povrchový náboj částic	Povrchový náboj částic vznikajících a již přítomných může stabilizovat přechodně vznikající koloidy, bránit koagulaci a vzniku separovatelných sraženin.

Simultánní srážení fosforu

Nejstarším a zatím nejrozšířenějším způsobem srážení fosforu na čistírnách odpadních vod je simultánní srážení dávkováním srážedel (soli Al a Fe), přímo do aktivačních nádrží biologického stupně nebo do libovolného místa technologické linky ve více bodech. Dávka srážedla a výsledek postupu jsou dány především empirickou zkušeností provozovatele s tím, že v případě problémů na stokové síti dochází často k nepředvídatelným odchylkám od jinak přijatelného průměru dosahovaných odtokových koncentrací.

Vysvětlit tento stav se snaží například zkoumání vlivu koncentrace biomasy – aktivovaného kalu na dosaženou zbytkovou koncentraci celkového fosforu v kombinaci různých molárních poměrů Me^{+3}/P , při simultánním srážení za laboratorně simulovaných podmínek dávkování srážedel před dosazovací nádrž, což je technologické řešení, které se preferuje především z ekonomických důvodů a za běžných podmínek se na řadě stávajících čistíren odpadních vod provozuje. Jako srážedlo byly použity: síran železitý, $Fe_2(SO_4)_3$, 41%–ní roztok (PIX 113) a síran hlinitý $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 - 18 H_2O$ granulát. K přípravě pracovních roztoků byly, jak bylo uvedeno výše, použity běžné komerční chemikálie z nabídky firmy KEMIFLOC. Naměřené výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách a pro větší názornost jsou vyjádřeny i v grafech. Jednotlivé sloupce tabulky a křivky grafů odpovídají sledovaným molárním poměrům $Me^{+3}/P_{celk.}$.

Vliv koncentrace aktivovaného kalu při simultánním srážení je zřejmý u obou použitých srážedel. Lepší výsledky pokusu byly dosaženy při použití síranu železitého. Tato skutečnost koresponduje i s teoretickými předpoklady o vlivu pH a dalších interakcí na výslednou koncentraci $P_{celk.}$. V praxi se pohybují dosahované limitní hranice koncentrací $P_{celk.}$ při odděleném srážení trojmocným železem v rozmezí 0,02 – 0,1 mg/l a při simultánním srážení v hodnotách asi 0,3 – 1,0 mg/l.

Výsledky srážení fosforu v závislosti na koncentraci kalu

Srážení fosforu síranem hlinitým						
molární poměr Al/P		P celk. mg/l				
		1	1,5	2	2,5	3,5
Koncentrace kalu	0	1,82	1,16	0,62	0,32	0,13
	1,57	2,48	1,22	1,42	0,4	0,19
	3,14	2,9	1,44	1,5	0,62	0,26
	6,28	3	1,64		1	0,49

$P_{celk.}$ v surové vodě 3,6 mg/litr.

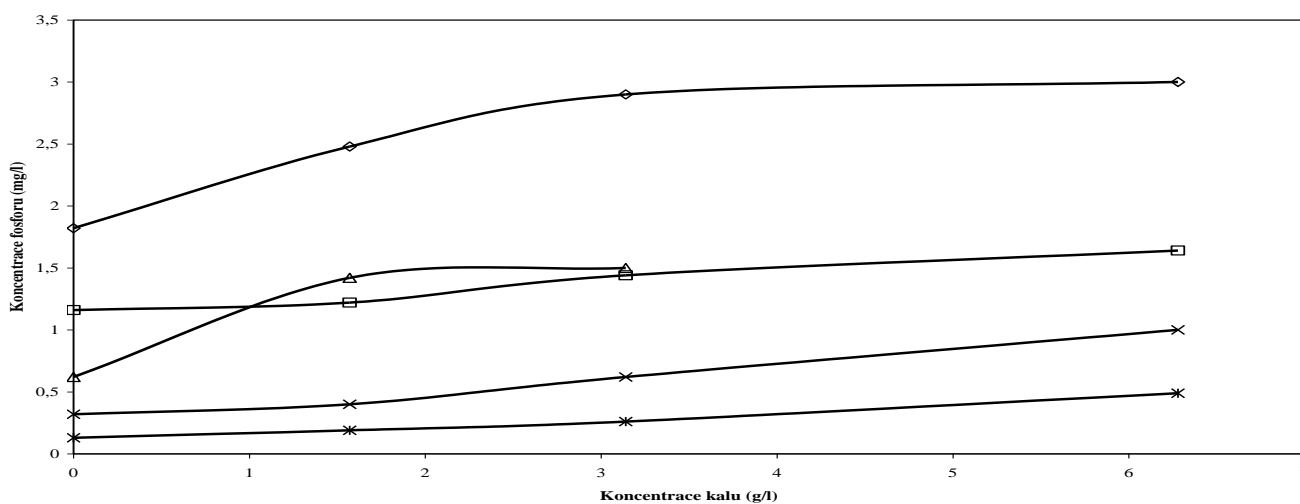
Výsledky srážení fosforu v závislosti na koncentraci kalu

Srážení fosforu síranem železitým					
molární poměr Fe/P		P celk. mg/l			
		1	1,5	2	2,5

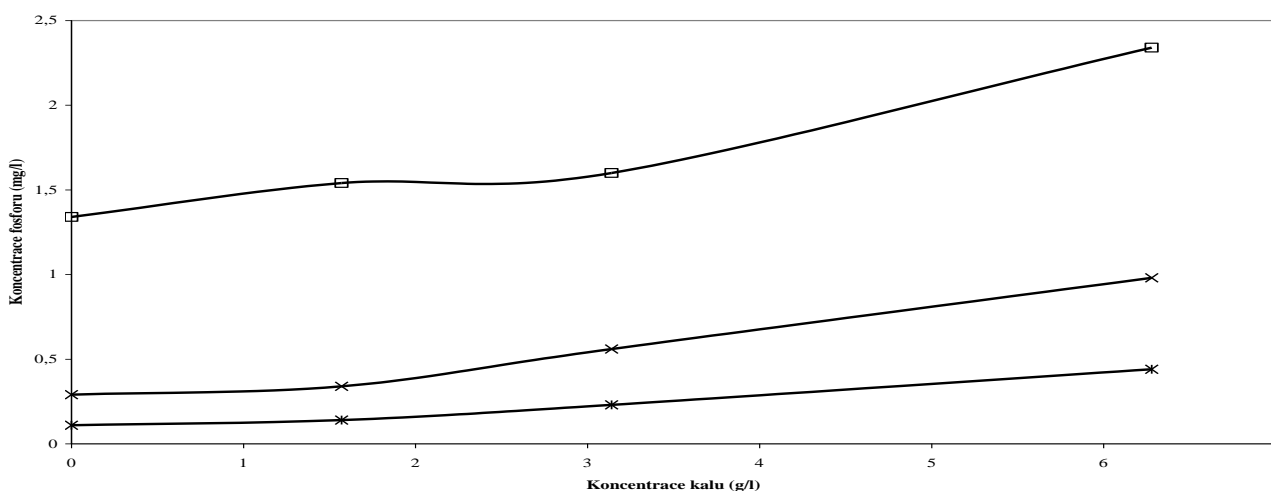
Koncentrace kalu	0		1,34		0,29	0,11
	1,57		1,54		0,34	0,14
	3,14		1,6		0,56	0,23
	6,28		2,34		0,98	0,44

$P_{celk.}$ v surové vodě 3,6 mg/litr.

Srážení fosforu síranem hlinitým



Srážení fosforu síranem železitým



Oddělené srážení fosforu – terciální stupeň

Oddělené srážení fosforu eliminuje řadu negativních vlivů na vznikající sraženiny, způsobených biomasou v aktivačních nádržích. Tyto vlivy můžeme demonstrovat na poloprovozním zařízení, improvizovaném poloprovozním třetím stupni čištění, při dvou různých způsobech separace vznikajících kalů a za různých molárních poměrů Me^{+3}/P a potom na konkrétních výsledcích provozu čistírny odpadních vod se třetím stupněm čištění s odděleným srážením.

Pro zkoušky na poloprovozním zařízení, pak byly použity pouze upravené roztoky síranu železitého, stejně jako na reálné čistírně odpadních vod (PIX 113). Provozní podmínky poloprovozního zařízení byly nastaveny tak, aby byla zajištěna střední hydraulická doba zdržení v egalizační nádrži asi 50 min, rychlost pískové filtrace byla 2,0 m/h. Voda použitá pro poloprovozní zkoušky byla biologicky předčištěna na čistírně odpadních vod typu „Sigma KOMBIBLOK“ o projektované kapacitě cca 6000 EO. Napojená kanalizace je jednotná. Průměrné výsledky zatížení a funkce této čistírny jsou zřejmé z následující tabulky.

Parametry čištění odpadních vod před odděleným srážením fosforu

Znečištění	Přítok	Odtok
Průtok	519,7 m ³ /d	
BSK₅	145	3,8
CHSK	309	24,8
NL	136	4,0
N – NH₄	41,7	2,53
N – NO₃	0,09	16,9
N – NO₂	0,34	0,77
P_{celk.}	6,8	3,5
pH	8,08	7,5

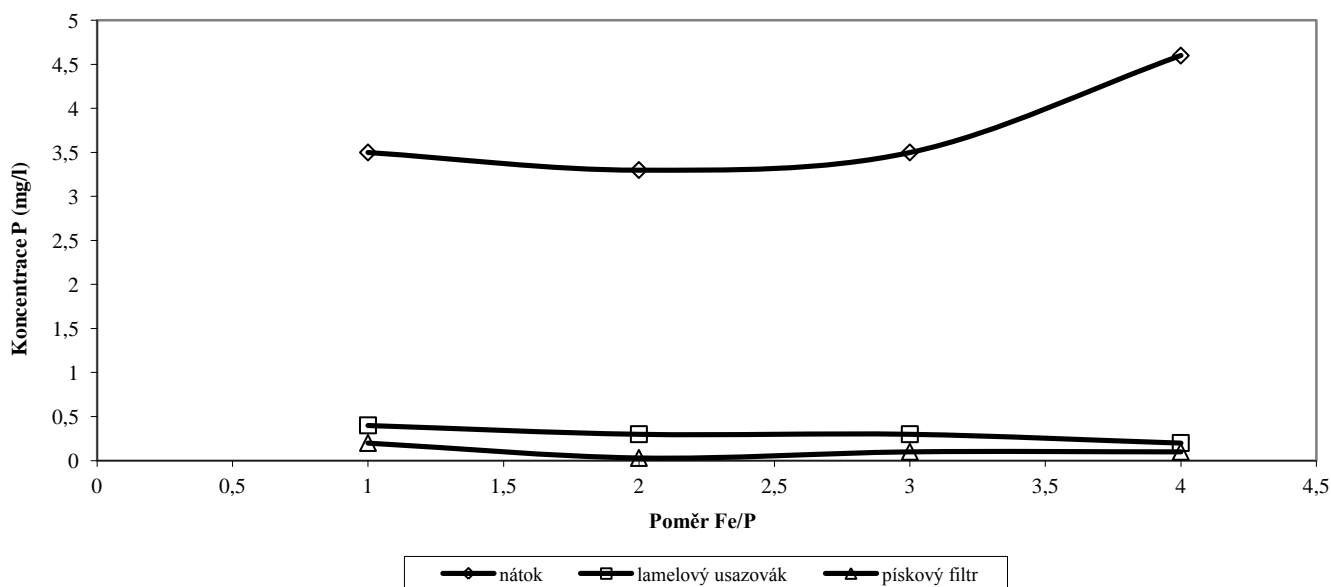
Voda byla čerpána z dosazovací nádrže. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v následující tabulce. V tabulce uvedené hodnoty jsou znázorněny také v následujícím grafu.

Výsledky odděleného srážení fosforu – poloprovozní zkouška

Profil	Molární poměr Fe/P			
	1	2	3	4
Nátok	3,5	3,3	3,5	4,6
Lamelový usazovák	0,4	0,3	0,3	0,2
Pískový filtr	0,2	0,03	0,1	0,1

Průběhy koncentrací fosforu v měřených profilech

Srážení síranem železitým



Jak je zřejmé z grafického vyjádření a naměřených hodnot, ani při použití síranu železitého nedosahujeme v případě čistírny odpadních vod s popsáním typem mírně alkalických vod i při relativně dobrém čistícím efektu, bez pískové filtrace hodnoty P_{celk.} 0,15 mg/l, která byla vytyčena, jako cílové kritérium. Nepomohla ani relativně dlouhá doba zdržení v egalizační nádrži, což podle některých autorů umožňuje snížit dávkování srážedla nebo zlepšuje efekt separace. Přesto jsou zjištěné hodnoty podobné

laboratorním testům ve vyčištěné vodě. Dále jsou uvedeny dosažené provozní výsledky čistírny, jejíž třetí stupeň byl navržen na základě výše popsaného poloprovozního experimentu.

Technologické parametry ČOV:

Biologický stupeň

Počet aktivačních nádrží	2
Objem aktivace – celkový	628 m ³
Rozměry dosazovacích nádrží	5,5 x 5,5 m
Počet nádrží	2

Terciální stupeň

Koagulační nádrž	30 m ³
Lamelový separátor	Envites, LB 10
Počet zařízení	1 ks
Kapacita zařízení	14 l/s
Max. krátkodobé přetížení	24 l/s
Sedimentační plocha	10,5 m ²

Kalové hospodářství

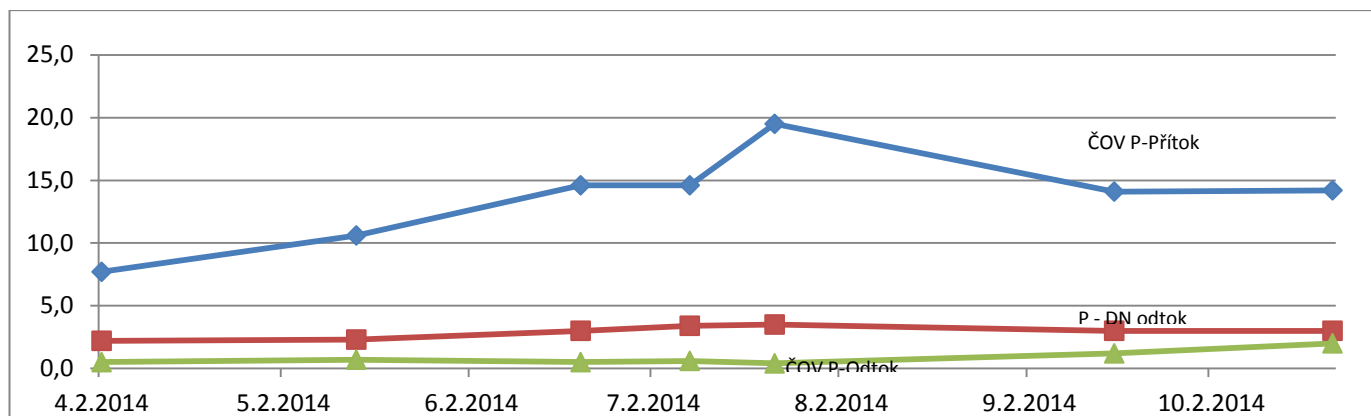
Celkový objem provzdušňovaných nádrží	180 m ³
Počet nádrží	3
Odvodnění kalu malou mobilní odstředivkou	2,5 m ³ /hod

Doba zdržení v koagulační nádrži se pohybuje v rozmezí 45 – 60 minut. Voda s chemickým kalem odtéká na lamelový separátor, kde dojde k oddělení chemického kalu. Vyčištěná voda odtéká přímo do recipientu. Účinnost odstraňování celkového fosforu na ČOV je patrna z následující tabulky a grafu.

Výsledky odděleného srážení fosforu – reálný provoz

Oddělené srážení fosforu na ČOV 2100 EO									
Datum	P- přítok	P z DN	P- odtok	PIX 113	Q	Fosfor nátok	Fe	Mol. poměr	Účinnos t
	mg/l	mg/l	mg/l	ml/hod	m ³ /hod	g/hod	g/hod	P : Fe	%
2.4.2014	7,7	2,2	0,5	750	15,1	116	450	3,3	93,5
14.5.2014	10,6	2,3	0,7	500	18	191	300	1,3	93,4
20.6.2014	14,6	3,0	0,5	750	10,2	149	450	2,6	96,6
8.7.2014	14,6	3,4	0,6	750	13,8	201	450	1,9	95,9
22.7.2014	19,5	3,5	0,4	1000	11,8	230	600	2,2	97,9
16.9.2014	14,1	3,0	1,2	500	15,9	224	300	1,1	91,5
22.10.2014	14,2	3,0	2,0	500	22,5	320	300	0,8	85,9
Průměr:	13,6	2,9	0,8	678,6	15,3	204,5	407,1	1,9	93,5

Průběh odstraňování fosforu (mg/l)

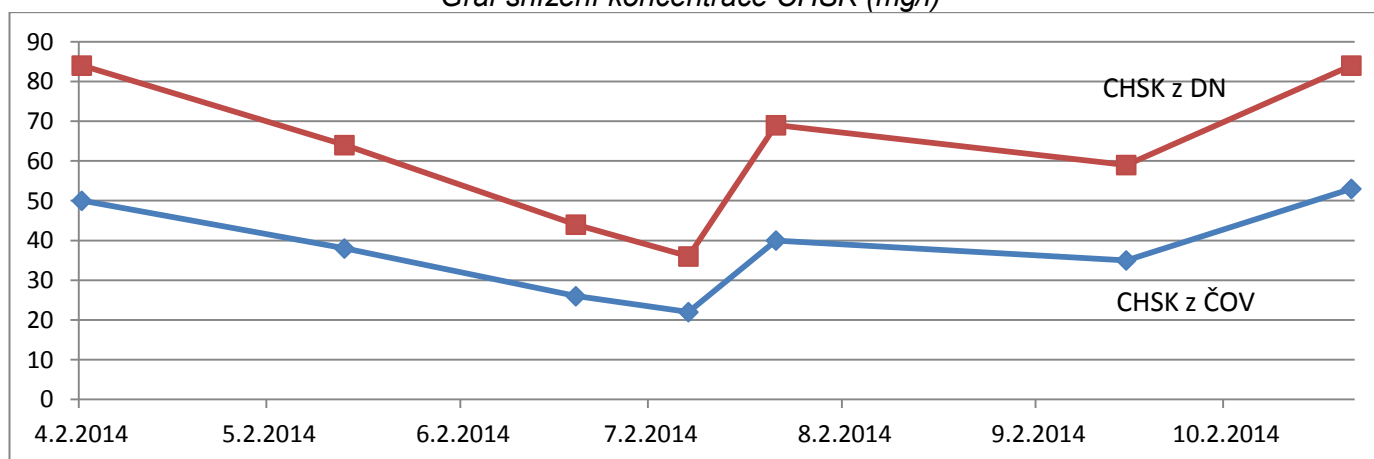


Vzhledem k tomu, že na třetím stupni čistírny odpadních vod dochází také k dalšímu dočištění vlivem sorbce na vznikajících sraženinách, jsou v následující tabulce uvedeny výsledky snížení CHSK, které jsou také znázorněny na grafu. V tabulce odstranění CHSK je také uvedena výsledná koncentrace NL na odtoku z čistírny. V uvedených výsledcích je možné spatřovat dostatečný argument pro podporu stavby těchto technologických uzlů ve zvláště citlivých lokalitách, zde Moravský kras.

Výsledky odděleného srážení fosforu – odstraněná CHSK

III. stupeň - odstranění CHSK						
Datum	Q	CHSK DN	CHSK za lam.	CHSK úbytek	Účinnost	NL
	m ³ /hod	mg/l	mg/l	mg/l	%	mg/l
2.4.2014	15,1	50	34	16	32,0	4
14.5.2014	18,0	38	26	12	31,6	2
20.6.2014	10,2	26	18	8	30,8	7
8.7.2014	13,8	22	14	8	36,4	4
22.7.2014	11,8	40	29	11	27,5	2
16.9.2014	15,9	35	24	11	31,4	12
22.10.2014	22,5	53	31	22	41,5	4
Průměr:	15,3	37,7	25,1	12,6	33,0	5,0

Graf snížení koncentrace CHSK (mg/l)



Srážení fosforu železitými kaly

Jak vyplývá z konstatování uvedených výše, je fosforečnan železitý nejméně rozpustnou sraženinou železa, která přichází v běžném prostředí biologických čistíren odpadních vod v úvahu. Z toho lze usoudit, že pokud budou do prostředí se srážitelnými ortofosforečnany dávkovány rozpustnější

sloučeniny železa a bude-li prostředí mít dostatečné oxidační podmínky – přítomnost rozpuštěného kyslíku, musí se koncentrace celkového rozpuštěného fosforu snižovat. Toto bylo potvrzeno vyhodnocením tří čistíren odpadních vod, na které byly kanalizací přiváděny bez přesného dávkování dlouhodobě železité kaly z praní vodárenských filtrů. Výsledky z běžného provozu jsou spolu s výsledky srážení dávkováním PIX 113 na čtvrté z uvedených čistíren uvedeny v následující tabulce.

Neřízené srážení fosforu vodami z praní filtrů obsahujícími hydroxidy železa

Srážení fosforu železitými kaly						
ČOV	Množství odpadních vod z ČOV (m ³)	Produkce pitné vody v napojené ÚV (m ³)	Fosfor-přítok (mg/l)	Fosfor-odtok (mg/l)	Fosfor-odstraněný celkem (t/r)	Fosfor-odstraněný chemicky (t/r)
I.	4792498	3721248	13,43	0,85	60,29	36,17
II.	363384	252288	9,78	1,26	3,10	1,86
III.	2781481	2956052	16,9	0,8	44,78	26,87
IV.*	111561	-	10,99	1,64	1,04	0,62
* Referenční ČOV s chemickým srážením síranem železitým - PIX 113						

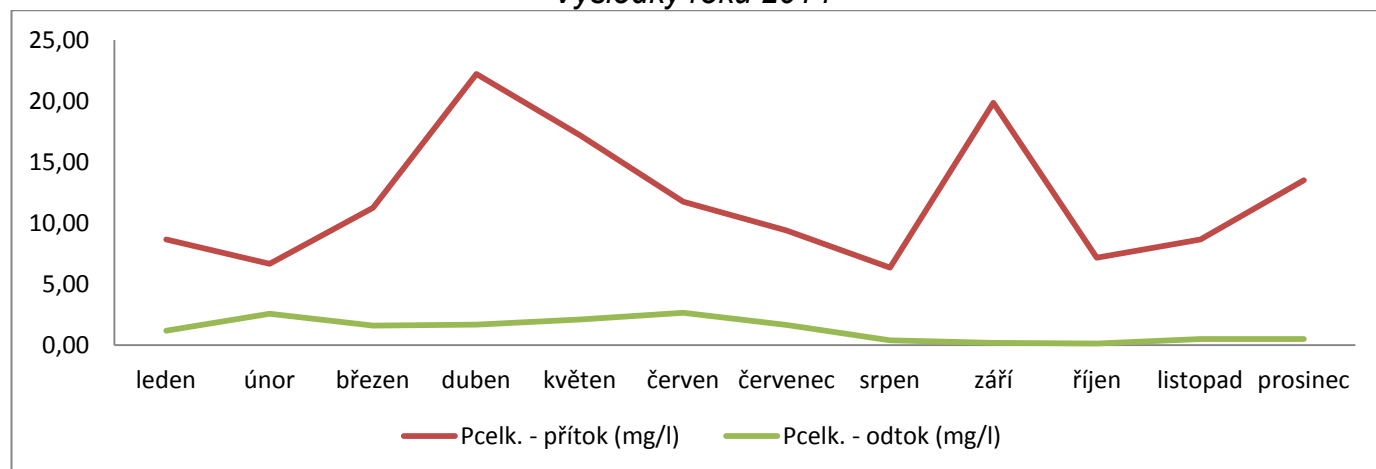
V následující tabulce je pro jednotlivé ČOV uvedena celková účinnost odstranění fosforu na ČOV a molární poměr fosfor : železu, po odečtení 40 % fosforu vázaného biologicky.

Účinnost neřízeného srážení fosforu a molární poměry

ČOV	Molární poměr P : Fe	Účinnost odstranění P _{Celk.}
I*	1 : 2,14	93,67
II	1 : 1,51	87,12
III	1 : 0,96	95,03
IV**	1 : 2,50	85,08

Na základě uvedených rozborů výsledků byl realizován na ČOV asi 20000 EO projekt srážení fosforu s řízeným dávkováním železa ve formě železitých kalů, který tuto hypotézu potvrdil. Zkušenosti z tohoto projektu jsou aplikovány na dalších čistírnách odpadních vod s obdobnými výsledky, jak jsou uvedeny v následujících grafech.

Výsledky roku 2014



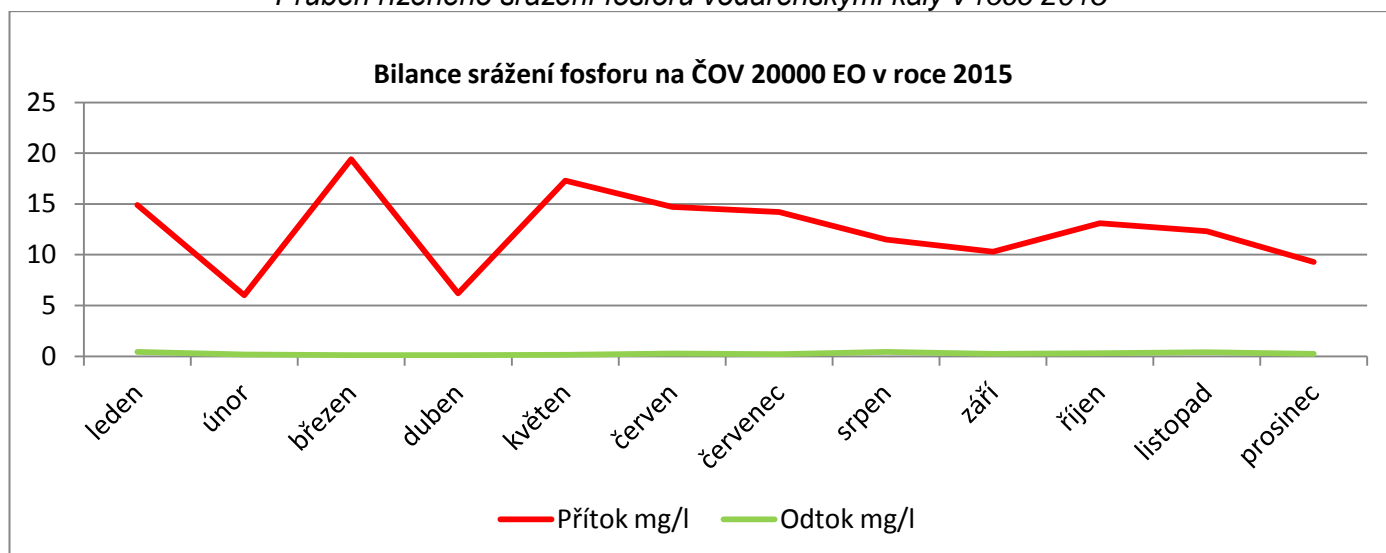
Srážení kaly bylo zahájeno v srpnu 2014 a pokračuje dodnes, jako standardní proces bez dávkování přípravku PIX 113. Výsledky roku 2015 jsou znázorněny i v příložené tabulce a grafu.

Účinnost řízeného srážení fosforu vodárenskými kaly v roce 2015

Bilance srážení fosforu ČOV 20000 EO v roce 2015

Datum	Přítok mg/l	Odtok mg/l
leden	14,9	0,44
únor	6,0	0,16
březen	19,4	0,12
duben	6,2	0,11
květen	17,3	0,15
červen	14,7	0,27
červenec	14,2	0,22
srpen	11,5	0,44
září	10,3	0,24
říjen	13,1	0,29
listopad	12,3	0,41
prosinec	9,3	0,23

Průběh řízeného srážení fosforu vodárenskými kaly v roce 2015



V současné době jsou do projektu zařazeny další asi tři ČOV, kde se testují podmínky pro aplikaci železitých kalů ke srážení fosforu. Experiment je realizován asi od října 2015. Výsledky jsou uvedeny v příložené tabulce.

Řízené srážení vodárenskými kaly na dalších čistírnách odpadních vod

Průměrné výsledky Pcelk. za období říjen – prosinec 2015

ČOV	Přítok mg/l	Odtok mg/l	Účinnost %
I.	4,76	1,05	77,94
II.	9,97	0,81	91,88
III.	8,97	0,39	95,65

Závěr

Záměrem tohoto referátu bylo ukázat na reálných výsledcích z provozu i poloprovozních zkoušek, že je možné v případě biologických čistíren komunálních odpadních vod učinit v poměrně krátké době účinná opatření vedoucí k významnému snížení odtokových koncentrací fosforu, a to v řadě případů i bez nezbytných investičních opatření na vlastní technologické lince čistírny. V textu použité výsledky jsou převzaty z původních prací autora, věnovaných jednotlivým diskutovaným problémům. Z důvodu omezeného prostoru nejsou zde uváděny některé technologické podrobnosti a konkrétní postupy, které

jsou stále předmětem dalšího výzkumu. K tomu, aby bylo možné chemické srážení fosforu označit za jednu z možných cest recyklace fosforu, je také nezbytné studovat například mechanismy využití takto zachyceného fosforu opět rostlinami. Je logické, že kaly z čistíren odpadních vod bude stále výhodné po nezbytné úpravě, přednostně využívat k aplikacím do půdy.