

Zkušenosti s odstraňováním fosforu a dezinfekcí v terciárním stupni čištění na NVL ÚČOV Praha

Lenka Charvátová, Jakub Kovařík, Milan Lánský, Jan Lukeš, Jiří Rosický, Martin Srb, Petr Sýkora, Pavel Válek

Potřeba modernizace ÚČOV Praha byla zvažována již v 80. letech 20. století. Po roce 1990 bylo zřejmě, že bude třeba zvažovat modernizaci v lokalitě Císařského ostrova. Vlastní prostor pro stavbu byl umožněn devastací pozemků v této lokalitě při povodních 2002. V té době se již potřeba zásadní modernizace Ústřední čistírny odpadních vod Praha jevila jako naléhavá. Důvodem byla snaha o plnění požadavků na kvalitu vypouštěné vyčištěné odpadní vody, které se ČR zavázala plnit v rámci svého vstupu do EU.

S cílem zajistit Praze moderní a ekologicky šetrnou infrastrukturu byla přijata komplexní strategie celkové přestavby Ústřední čistírny odpadních vod (ÚČOV). Tato strategie zahrnuje výstavbu kapacitní čistírny, která nejen splní přísné požadavky na kvalitu vyčištěné vody, ale také optimalizuje energetickou účinnost celého procesu. Vzhledem k rozsahu a složitosti projektu byla jeho příprava a realizace rozfázována do několika etap.

V roce 2018 byla do zkušebního provozu uvedena tzv. Nová vodní linka ÚČOV Praha (NVL), která je první etapou stavby č. 6963, Celková přestavba a rozšíření ÚČOV na Císařském ostrově. Od tohoto okamžiku je ÚČOV Praha tvořena dvěma mechanicko-biologickými vodními linkami: Stávající vodní linkou (SVL) a NVL, která je navíc vybavena terciárním stupněm čištění a od roku 2021 i UV dezinfekcí. Obě linky v souběhu zajišťují čištění cca 92 % odpadních vod z hlavního města Prahy, jak uvádí tabulka 1.

Pro obě vodní linky slouží v rámci ÚČOV Praha společné Kaldenauer a energetické hospodářství, jehož rekonstrukce a modernizace je samostatnou etapou celkové přestavby a rozšíření ÚČOV na Císařském ostrově. NVL je od 1. 1. 2022 v trvalém provozu s výjimkou části dezinfekce vyčištěných odpadních vod, která je ve zkušebním provozu do 31. 12. 2025.

Cílem tohoto článku je představit zkušenosti s provozem terciárního stupně čištění, které nabývá na důležitosti zejména v návaznosti na revizi směrnice EU o požadavcích na čištění odpadních vod [2]. Revize směrnice předpokládá úpravu limitů u ČOV nad 150 000 EO k roku 2039 a k roku 2045 i u ČOV nad 10 000 EO v citlivých oblastech.

Prahová hodnota pro terciární čištění se předpokládá pro $N_{\text{celk}} = 8 \text{ mg/l}$ (účinnost 80 %) a pro $P_{\text{celk}} = 0,5 \text{ mg/l}$ (90 %) pro ČOV > 150 000 EO a $N_{\text{celk}} = 10 \text{ mg/l}$ (80 %) a $P_{\text{celk}} = 0,7 \text{ mg/l}$ (87,5 %) pro aglomerace mezi 10 000 a 150 000 EO [3].



Obr. 1: Schéma NVL ÚČOV Praha

Základní údaje NVL a popis možností srážení fosforu

NVL má projektovanou kapacitu 806 250 EO. Odpadní vody jsou za česlemi mechanicky předčištěny v lamelových sedimentačních nádržích Densadeg 4D (D4D, 20 700 m³), které mají integrovaný lapák písku a tuků. Biologické čištění odpadních vod probíhá ve čtyřech identických aktivačních nádržích, viz obrázek 1. Každá nádrž se skládá z třístupňového kaskádového procesu s aktivovaným kalem – ALPHA (3 anoxické a oxické zóny v sérii, celkem 147 584 m³). Do denitrifikačních sekcí je přiváděna odpadní voda v poměru D1 : D2 : D3 = 39 : 33 : 28 %, přičemž vratný kal je přiváděn pouze do první denitrifikační sekce. Do denitrifikačních sekcí lze dávkovat externí substrát. Aktivační směs z biologického stupně čištění natéká do 40 podélných dosazovacích nádrží (DN, 64 800 m³).

Vratný kal je podroben oxické regeneraci ve dvou regeneračních nádržích (14 840 m³). Jedna regenerace je společná pro dvě aktivační nádrže. Každá regenerace se skládá ze 4 sekcí, v první a v poslední lze měnit oxické a anoxické podmínky, prostřední sekce jsou pouze oxické. Do regenerační zóny je rovněž přiváděna odpadní voda z odvodnění vyhnílého kalu pro využití procesu bioaugmentace nitrifikace in-situ.

Proces čištění odpadních vod je na NVL vybaven chemickým odstraňováním fosforu. Jako srážedlo je používán síran železitý (41 %). Dávkování koagulantu je možné celkem na třech místech. Při dešťových nátocích (nad 3,6 m³/s) je dávkován koagulant do nátoky odpadní vody do D4D z důvodu povinnosti snížení koncentrace CHSK min. o 35 % během procesu primárního předčištění. Srážení fosforu je dále možné v nátoky na DN. Poslední a do budoucna hlavní možností je srážení v terciárním stupni čištění (TSC) v lamelových sedimentačních nádržích Densadeg 2D (D2D, 8 400 m³).

Posledním technologickým stupněm čištění odpadních vod je hygienické zabezpečení vycištěné odpadní vody z TSC pomocí UV lamp (176 ks).

Technické údaje: Kapacita mechanického předčištění činí 7,1 m³/s. Z toho jsou v případě srážkových událostí odlehčovány až 3 m³/s mechanicky předčištěné vody do Vltavy. Hydraulická kapacita biologického stupně, TSC a UV lamp je 4,1 m³/s. Biologický stupeň má navíc hydraulickou kapacitu až 6 m³/s po

dobu jedné hodiny pro pokrytí období, kdy bude SVL odstavena a rekonstruována a vody původně čištěné na SVL budou čištěny na NVL.

Vybrané odtokové limity jsou pro NVL stanoveny takto: $N_{celk} = 10$ mg/l roční průměr, $P_{celk} = 0,8$ mg/l roční průměr, NL = p 20 mg/l, m 30 mg/l.

Popis D2D a základní parametry

Terciární čištění (TSC) probíhá na NVL ve třech lamelových usazovacích nádržích D2D.

TSC slouží především ke snížení koncentrace fosforu na odtoku, druhotně je možné jej využít i k zachytu unikajících nebezpečných látek (NL) z dosazovacích nádrží. Odstraňování zbytkové koncentrace biologického kalu v terciárním stupni je však na NVL chápáno pouze jako případná možnost a nikoli jako běžný stav či účel.

Nátoková komora každého D2D je osazena dvěma stavidly, jedno slouží k uzavření nátoky do příslušného D2D a druhé umožňuje obtok dané nádrže D2D pro případ nutnosti odstavení nádrže.

Zařízení D2D uvedené na obrázku 2 se skládá z koagulační komory (1), flokulačního reaktoru (2), nátoky do sedimentační části (3) a sedimentačního prostoru (4). Hladina sedimentační části je vybavena plastovou lamelovou vestavbou pro zvýšení

Tabulka 1: Vycištěné odpadní vody v roce 2023 [1]

ÚČOV Praha	Množství vycištěné odpadní vody [m ³]	Podíl na celkovém množství vycištěné odpadní vody v PVK [%]
Stávající vodní linka (SVL)	46 219 250	39 %
Nová vodní linka (NVL)	63 448 300	53 %
ÚČOV celkem	109 667 550	92 %

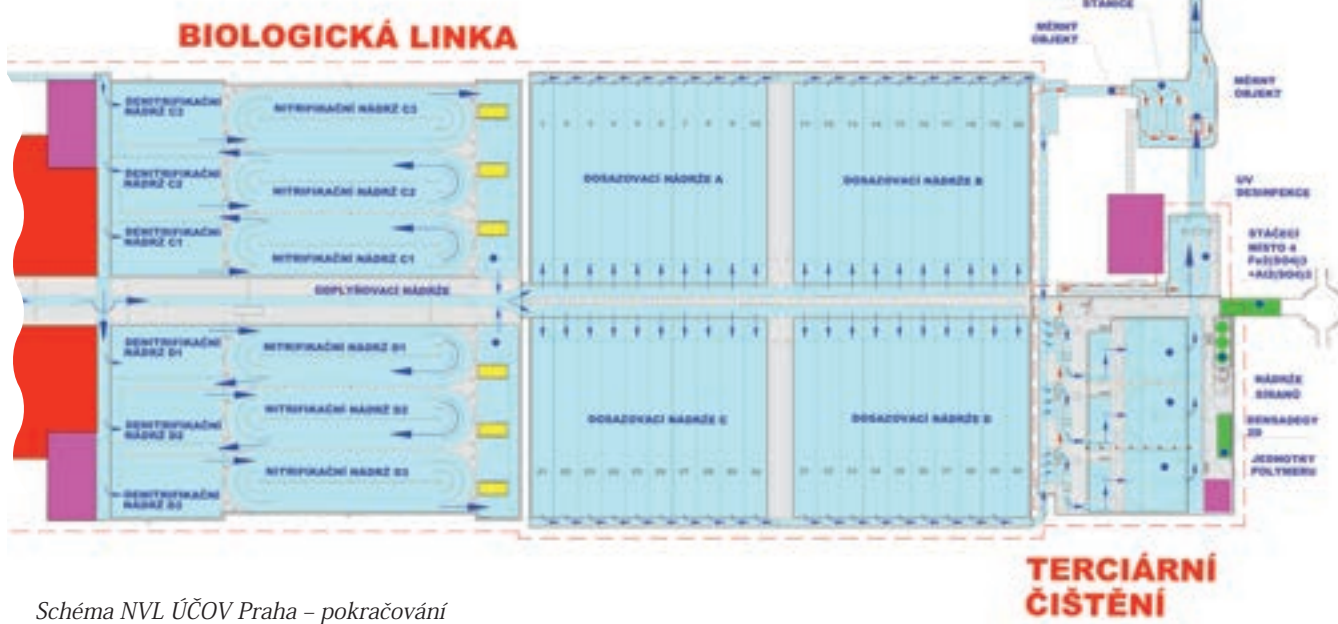


Schéma NVL ÚČOV Praha – pokračování

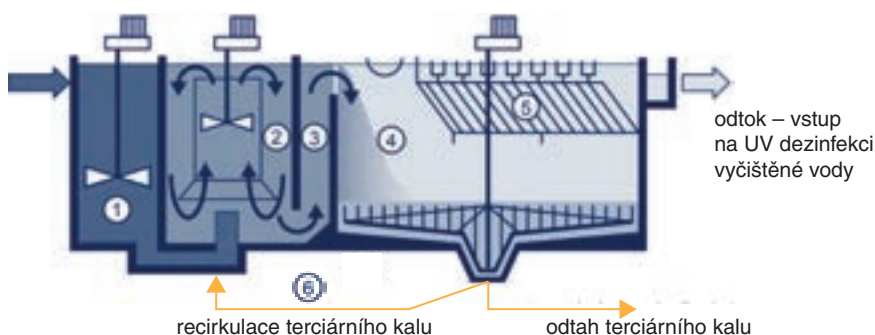
účinné plochy (5). Ze dna je odčerpáván terciární kal, přičemž část kalu je možné vnitřní recirkulací (6) čerpat ze sedimentačního prostoru do flokulační části.

Z hladiny D2D jsou v případě potřeby odtahovány plovoucí látky, které jsou posouvány vzduchem ke sklopnému žlabu manuálním zapínáním vzduchu a ručním naklopením sběrného žlabu.

Do první koagulační komory je zavedeno potrubí dávkování koagulantu. Flokulant je dávkován do spodní části flokulačního reaktoru.

Dávkování koagulantu

Z celkového spotřebovaného množství koagulantů PIX 113 (na bázi síranu železitého) a PIX XL2A (na bázi síranu železitohlinitého) bylo za dobu provozu NVL dávkováno do mechanického předčištění 1,6–13,0 %, jak ukazuje tabulka 2.



Obr. 2: Schéma nádrže Densadeg 2D [4]

Tabulka 2: Rozložení dávkovaného množství koagulantu na NVL

Rok	Mechanické předčištění (PIX 113) [%]	Biologický stupeň a TSČ (PIX113 a PIX XL2A) [%]	PIX XL2A (pouze z množství na biologický stupeň a TSČ) [%]	Preferované dávkovací místo koagulantu
2019	2,0	98,0	15,8	TSČ
2020	1,6	98,4	11,6	TSČ
2021	3,2	96,8	39,6	TSČ
2022	13,0	87,0	14,0	před DN
2023	8,5	91,5	0,0	před DN
1–8 2024	9,0	91,0	0,0	před DN

Tabulka 3: Specifická spotřeba koagulantu a roční průměrné koncentrace fosforu na NVL

Parametr	2021	2023
celková specifická spotřeba PIX na NVL [t/t odstraněného P _{celk}]	14,88	8,50
celková specifická spotřeba PIX na biologii [t/t odstraněného P _{celk}]	17,23	9,16
prům. konc. P _{celk} na přítoku na NVL [mg/l]	6,10	6,98
prům. konc. P _{celk} na přítoku na biologii NVL [mg/l]	5,20	6,03
prům. konc. P _{celk} na přítoku na TSČ [mg/l]	1,20	0,67
prům. konc. P _{celk} na odtoku [mg/l]	0,60	0,71
prům. konc. P-PO ₄ na přítoku na NVL [mg/l]	2,40	2,74
prům. konc. P-PO ₄ na přítoku na biologii NVL [mg/l]	2,50	2,98
prům. konc. P-PO ₄ na přítoku na TSČ [mg/l]	1,00	0,48
prům. konc. P-PO ₄ na odtoku [mg/l]	0,31	0,50

Razantně významnější část koagulantu je dávkována do TSČ nebo do biologického stupně před DN nebo v kombinaci do obou míst. Dokud byl dávkován i koagulant PIX XL2A, tvořila jeho část 11,6–39,6 % z množství koagulantu pro srážení fosforu v biologickém stupni a v TSČ, který byl vždy dávkován pouze před DN. Z důvodu zjištění nereaktivity vláknitého mikroorganismu Microthrix p. na hlinitý koagulant [5] na jaře 2022 (četnost 5, sušina byla 3,2 g/l a KI 225 ml/g) nebyl od června 2022 do současnosti PIX XL2A dávkován.

Pro srovnání spotřeby koagulantu na požadované snížení koncentrace celkového fosforu byly pro potřeby tohoto článku vybrány z dosavadního provozu NVL 2 roky (2021 a 2023), které se od sebe významně liší místem srážení fosforu.

V roce 2021 probíhalo srážení fosforu především v TSČ s výjimkou krátkých období při používání PIX XL2A na potlačení Microthrix p. V roce 2021 již nebylo vstupující zatížení tolik ovlivněno pandemií covidu-19, jako tomu bylo v případě roku 2020. V roce 2023 probíhalo srážení fosforu výhradně v nátoku na DN a nebyl používán PIX XL2A. Oproti roku 2021 bylo v přítoku na NVL v roce 2023 vyšší zatížení P_{celk}, a to o 5,8 %. V celém dosavadním provozu NVL je srážení fosforu řízeno ručně podle vizuálně sledovaného online měření koncentrace P-PO₄ před a za TSČ. V tomto ohledu se oba porovnávané roky od sebe neliší.

Tabulka 3 uvádí specifickou spotřebu koagulantu a koncentrace fosforu v jednotlivých stupních čištění OV.

Z porovnání spotřeby koagulantu dávkovaného pro snížení koncentrace fosforu vstupujícího do biologického stupně je zcela zřejmé, že při výhradním srážení fosforu v TSČ v roce 2021 byla specifická spotřeba PIX 17,23 t/t odstraněného P_{celk}, tedy vyšší o 46,8 % oproti výhradnímu srážení v nátoku na DN v roce 2023 (9,16 t/t odstraněného P_{celk}). Z porovnání specifické spotřeby koagulantu vztažené na celkové vstupní zatížení fosforem (14,88 t/t a 8,5 t/t) je zřejmé, že výše uvedený rozdíl ve specifické spotřebě koagulantu není dán vyšším podílem dávkovaného koagulantu do mechanického předčištění v roce 2023 (8,5 %) oproti roku 2021 (3,2 %), viz tabulka 2, ale výraznou roli hraje právě volba místa srážení fosforu.

Zkušenosti s vlivem terciárního kalu na zahušťování primárního kalu

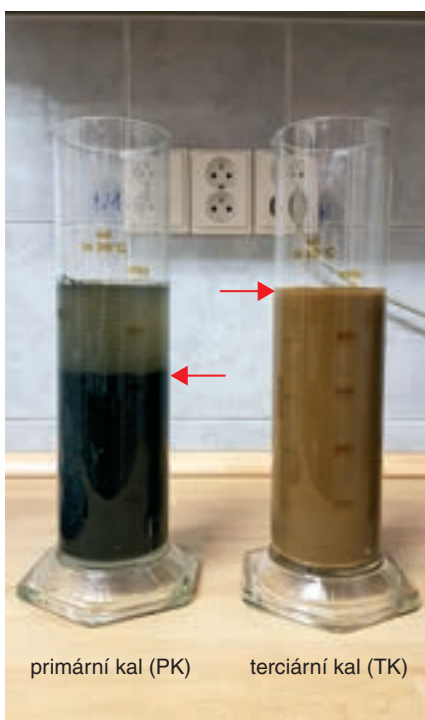
Zásadní jsou zkušenosti se zpracováním terciárního kalu (TK), který vzniká při srážení fosforu v TSČ. Terciární kaly jsou z nádrží D2D čerpány do nádrže s primárními kaly (PK), kde dochází k jejich smísení a směs volně natéká do tří gravitačních zahušťovacích nádrží (ZN, 3 × 250 m³). Během let, kdy bylo provozováno TSČ, bylo zjištěno, že při produkci TK dochází ke zhoršení zahušťovacích vlastností směsného kalu (PK a TK) s kritickým dopadem na dostatečnou kapacitu

tu a účinnost procesu předzahuštění směsných kalů v ZN. Požadované zahuštění směsných kalů na 6 % veškerých látek (VL) pro optimální provoz vyhnívacích nádrží bylo dosahováno velmi obtížně, a to i přes vyšší dávku flokulantu 4,5–5,0 kg/t VL. V případě odstavení TŠC a zahájení simultánního srážení fosforu v nátoku na DN bylo pozorováno výrazné zlepšení procesu předzahuštění PK v ZN. Pro lepší porozumění vlivu TK na proces předzahuštění bylo provedeno srovnání prosté sedimentace PK a TK (obrázek 3). Výsledek jednoznačně ukázal téměř nulovou sedimentaci TK (1,2 % VL, 37,1 % VLŽŽ – ztráta žíháním). Dále byla provedena řada flokulačních a sedimentačních testů s obsahem TK ve směsném kalu 4–30 obj. %. Testované dávky flokulantu byly 0,2–2,5 kg/t VL a testovány byly flokulanty A120 a C494.

Dosaženo bylo těchto výstupů:

- Čím vyšší byl podíl TK ve směsi, tím horší byly separační vlastnosti směsného kalu (viz obrázek 4), který znázorňuje stav po třicetiminutové sedimentaci s flokulantem A120 a dávkou 1,0 kg/t.
- Laboratorně dochází k zásadnímu zhoršení separačních vlastností kalu při objemu TK nad 10 obj. %.
- Provozně bylo pozorováno zhoršení separačních vlastností při objemu TK nad 4 obj. %. V ZN byly vysoké kalové mraky a docházelo k úniku NL přepadem odsazené vody.
- Při podílu TK 20 obj. % bez přidavku flokulantu nedocházelo téměř k žádné separaci kalu.
- Čím je vyšší podíl TK ve směsném kalu, tím se zvyšuje dávka flokulantu potřebná k dosažení požadovaného zahuštění.

V reakci na tato zjištění byla technologie zahuštění směsných kalů doplněna



Obr. 3: Sedimentace primárního kalu a terciárního kalu po 30 minutách

o strojní zahuštění kalu zahušťovacími stoly [6], kde k zahuštění kalů dochází oddělením filtrátu přes síto s mezerou 0,6 mm. Tímto způsobem byla navýšena zahušťovací kapacita NVL a flexibilita provozu např. pro období odstávky a rekonstrukce SVL, kdy budou na NVL čerpány všechny odpadní vody či další mimořádné situace.

Praktické zkušenosti – recirkulace kalu, zanášení lamel, korozivní vlastnosti koagulantu

Provozem TŠC bylo potvrzeno, že dávkování koagulantu v podobě síranu železitého představuje vysoké nároky na materiálové řešení technologie. Mimo vlastního ředění síranu a vhodného zaústění dávkovacího potrubí pro zamezení nerozpuštěných úsad na potrubí odpadní vody je třeba věnovat významnou pozornost i volbě materiálu vlastního přírodního potrubí odpadní vody. Důvodem je mimo běžných korozivních vlivů zvýšené riziko související s korozivními vlastnostmi v přítomnosti železitých bakterií v odpadní vodě s umocněním koroze při vyšším obsahu chloridů. Pro tyto účely je vhodné materiálové řešení konzultovat s odbornými experty z oboru koroze a protikorozní ochrany [7].

Tabulka 4: Sledování hygienizace za UV lampami na odtoku z NVL

Ukazatel	Min.	Max.	Průměr	Účinnost (%)
počet odběrů zákal	-	-	25	-
absorbance (při 254 nm)	1,1	2,6	1,8	-
<i>E. coli</i> (KTJ/100 ml)	0,135	0,243	0,181	-
termotolerantní kóliiformní bakterie (KTJ/100 ml)	0	1 500	296	98
enterokoky (KTJ/100 ml)	100	4 000	572	99
	100	1 800	508	90

Tabulka 5: Dílčí vyhodnocení spotřeby el. energie na hygienizaci UV lampami (pro období hodnocené dle tabulky 4)

Spotřeba elektrické energie na provoz UV lamp	Min.	Max.	Průměr	Jednotka
měsíční	43 129	50 762	46 499	kWh/měsíc
denní	1 391	1 637	1 529	kWh/d
na 1 000 m ³ hygienizované vody	8	10	9	kWh/1 000 m ³



Obr. 4: Testování sedimentace při různých poměrech primárního a terciárního kalu

V rámci NVL byl nakonec problém korozivních vlivů na přívodním potrubí do D2D eliminován použitím vnitřní ochranné vrstvy dvousložkovým nátěrem typu polyurea.

Z provozního hlediska je vhodné realizovat i další prvky údržby zejména pro separaci plovoucích látek z flokulační zóny a čištění lamel od zachycených nerozpuštěných látek (ostřík shora, případně zavedení tlakového vzduchu zespodu) tak, aby tyto prvky umožnily automatizovaný kontinuální provoz TSC. Podrobnější a další praktické informace související např. s recirkulací kalu jsou dostupné v [8].

UV lampy

Zařízení pro hygienizaci odtoku z TSC je řešeno pomocí 176 UV lamp osazených do dvou betonových kanálů s možným bezpečnostním obtokem. Nátok na UV lampy je regulován pro každý kanál jedním nátokovým a odtokovým stavidlem. Odtokovým stavidlem je automaticky udržována i požadovaná hladina vody v prostoru UV lamp.

Jednotlivé UV lampy jsou uspořádány do čtyř samostatných jednotek, kde každá je dále tvořena tzv. 3 podjednotkami (banky). Každá jednotka disponuje vlastním měřením dávky záření a celkově je provoz automatizován možným snižováním/zvyšováním výkonu jednotlivých jednotek. Pro každou UV lampu je k dispozici signalizace pro zobrazení jejího stavu (porucha/počet motohodin).

Ochrana UV lamp a nátoku je zajištěna tzv. děrovaným usměrňovačem. Na nátoku na UV lampy je mimo průtoku a hladin kontinuálně měřena také transmitance. Proti zabránění tvorby pěny, která vzniká zejména v důsledku dávkování flokulantu do TSC, byla před vstup vody na UV lampy instalována tryska s ostříkem provozní vodou. Technologie UV dezinfekce je ve zkušebním provozu od 5. 10. 2021.

Z dílčího měsíčního sledování v rámci 25 odběrů zkušebního provozu vyplývá (tabulka 4), že lze dosahovat vysoké účinnosti hygienického zabezpečení odtoku a průměrných hodnot *E. coli* na úrovni několika jednotek KTJ/1 ml, to znamená cca 300 KTJ/100 ml. To odpovídá třídě C dle nařízení EU 2020/741 o minimálních požadavcích na opětovné využívání vody.

Z dílčího vyhodnocení zkušebního provozu dle spotřeby samostatných elektroměrů pro UV lampy vyplývá (tabulka 5), že průměrně se spotřeba elektrické energie pohybuje okolo 9 kWh/1 000 m³ hygienizované vody s výstupy zabezpečení dle tabulky 4.

Závěr

Dosavadními zkušenostmi z provozu třetího stupně čištění bylo potvrzeno, že pomocí technologie Densadeg 2D lze zajistit účinné srážení fosforu na aktuálně požadovaný limit 0,8 mg/l

P_{celk} jako roční průměr, přičemž bylo krátkodobě vyzkoušeno i dosažení nižších hodnot na úrovni 0,5 mg/l P_{celk} .

V rámci NVL se ukázalo jako velmi výhodné kombinovat srážení fosforu v různých technologických stupních: na mechanickém stupni při srážkových událostech, na biologické lince (simultánní srážení) a na terciárním stupni čištění.

S ohledem na plnění limitů dle nové směrnice EU lze předpokládat potřebu další provozní optimalizace TSC na NVL, např. automatizace dávkování koagulantu, související nároky na čištění lamel a odtahu plovoucích látek, ověření logistických možností závozu a kapacitní skladování chemikálií atd.

Z dílčího vyhodnocení provozu UV lamp je zřejmé, že lze dosahovat očekávaného hygienického zabezpečení při spotřebě cca 9 kWh/1 000 m³ hygienizované vody.

Literatura

- <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/odpadni-voda/>
- https://www.consilium.europa.eu/en/press/releases/2024/01/29/urban-wastewater-council-and-parliament-reach-a-deal-on-new-rules-for-more-efficient-treatment-and-monitoring/?utm_source=dsms-auto&utm_medium=email&utm_campaign=Urban+wastewater%3a+Council+and+Parliament+reach+a+deal+on+new+rules+for+more+efficient+treatment+and+monitoring
- Wanner F, Zrubková M, Sýkora P, Žák V. Směrnice o čištění městských odpadních vod. *Sovak* 2024;33(7–8):2–11.
- <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/flocculators-settling-tanks-flotation-units/settling-tanks/sludge-recirculation-settling-tank-thickener-the-densadeg>
- Wagner DS, Peces M, Nierychlo M, Mielczarek AT, Thornberg D, Nielsen PH. Seasonal microbial community dynamics complicates the evaluation of filamentous bulking mitigation strategies in full-scale WRRFs. *Water Research* 2022;216:118340. ISSN 0043-1354.
- <https://www.suezwaterhandbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/thickening/direct-thickening-screen-on-biological-sludge-of-different-concentration-GDD-GDE>
- Kreislová K, Gejplová H, Fialová P. Materiály a korozní rizika v prostředí čistíren odpadních vod. *Sborník konference Řešení extrémních požadavků na čištění odpadních vod. Blansko* 2022;143–156. ISBN 978-80-11-01510-7.
- Charvátová L, Kovařík J. Zkušenosti s odstraňováním fosforu a dezinfekcí v terciárním čištění NVL ÚČOV. *Sborník přednášek ze semináře Nové metody a postupy při provozování ČOV XXVIII. Seč (CZ)*, 23.–24. 4. 2024.

*Ing. Lenka Charvátová, Ph.D., Ing. Milan Lánský, Ph.D.,
Ing. Bc. Martin Srb, Ph.D., Ing. Petr Sýkora, Ph.D.
Pražské vodovody a kanalizace, a. s.*

*Ing. Jakub Kovařík, Mgr. Jan Lukeš, Ing. Jiří Rosický,
Ing. Pavel Válek, MBA
Pražská vodohospodářská společnost a. s.*