



VODA
2025

16. BIENÁLNÍ
KONFERENCE CZWA
17.–19. ZÁŘÍ 2025
LITOMYŠL



*Výřez ze soch Olbrama Zoubka
v klášterní zahrádě v Litomyšli*

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

30
1995~2025

CzWA®



WWW.BIENALKACZWA.CZ

PROHLÁŠENÍ

Za věcnou správnost, obsahovou, jazykovou a grafickou úroveň příspěvků v tomto sborníku zodpovídají autoři. Stanoviska a doporučení obsažená v příspěvcích jsou názory a doporučení jejich autorů a nemusí nezbytně vyjadřovat stanoviska CzWA.

NÁZEV: Sborník příspěvků 16. bienální konference CzWA 2025

POČET STRAN: 644

© Kolektiv autorů, 2025

Editoři © Ivana Kabelková 2025, Andrea Benáková 2025, Jana Nábělková 2025, Vojtěch Bareš 2025

VYDAVATEL © Asociace pro vodu ČR z.s., Traťová 574/1, 619 00 Brno; 2025

ISBN 978-80-908629-5-1

Nitritace skládkových odpadních vod v provozním měřítku

Vodička O.^{1*}, Došková E.¹, Švehla P.², Andreides M.³, Dolejš P.³

¹Vodovody a kanalizace Pardubice, a.s., Provozovna BČOV Pardubice, Stará obec 313, 533 54 Rybitví

²Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Kamýcká 129, Praha 6 - Suchbát

³DHI a.s., Na vrších 1490/5, 100 00 Praha - Vršovice

*autor pro korespondenci, email: oldrich.vodicka@vakpce.cz

ABSTRAKT

Příspěvek představuje zkušenosti z prvního roku provozu SBR technologie zpracovávající skládkové odpadní vody. Současně shrnuje tříletý laboratorní výzkum zaměřený na zpracování fugátu a skládkových vod biologickými procesy. Provozní zařízení zpracovává skládkové odpadní vody bez jejich ředění a bez dávkování chemie na úpravu pH. Při zatížení 0,11 kg(N-amon)/(m³.den) bylo dosaženo odstranění 62 g(N-amon)/(m³.den) tj. téměř 60 %. Z odstraněného množství amoniakálního dusíku přešlo 75 % na dusitanový dusík. Cílem bylo uvést nově vybudované zařízení do stabilního provozu a získat data pro následné využití biologických technologií nitritace/denitritace, případně částečná nitritace/Anammox.

KLÍČOVÁ SLOVA

AOB; fugát; nitritace; matematické modelování; skládkové odpadní vody; SBR

1. ÚVOD

Problematika externích odpadních vod bohatých na dusík

Skládkové odpadní vody (SOV) případně další OV vysoce zatížené amoniakálním dusíkem (fugát z bioplynových stanic) jsou často čištěny v rámci aktivační linky. Tato praxe však má svoje limity a může představovat riziko nárůstu koncentrace celkového dusíku na odtoku z ČOV.

Vysoká poptávka po čištění skládkových vod, existence bioplynové stanice v areálu BČOV a volná kapacita BČOV Pardubice nás vedla k přebudování jedné z nevyužitých aktivačních nádrží na zařízení pro oddělené zpracování SOV případně dalších OV vysoce zatížených amoniakálním dusíkem.

Možným řešením, jak zvýšit bezproblémový příjem těchto odpadních vod s extrémně vysokým obsahem sloučenin dusíku je jejich separátní předčištění s následným dočištěním na hlavní aktivační lince. Za tímto účelem je možno aplikovat proces ANAMMOX, který je ve světě dnes již poměrně běžně využíván pro čištění kalové vody (Karmann et al., 2024), či postup nitritace/denitritace (Jenicek et al., 2004; Švehla, 2004).

Nitritace, resp. nitritace/denitritace jako postup odstranění dusíku z odpadních vod

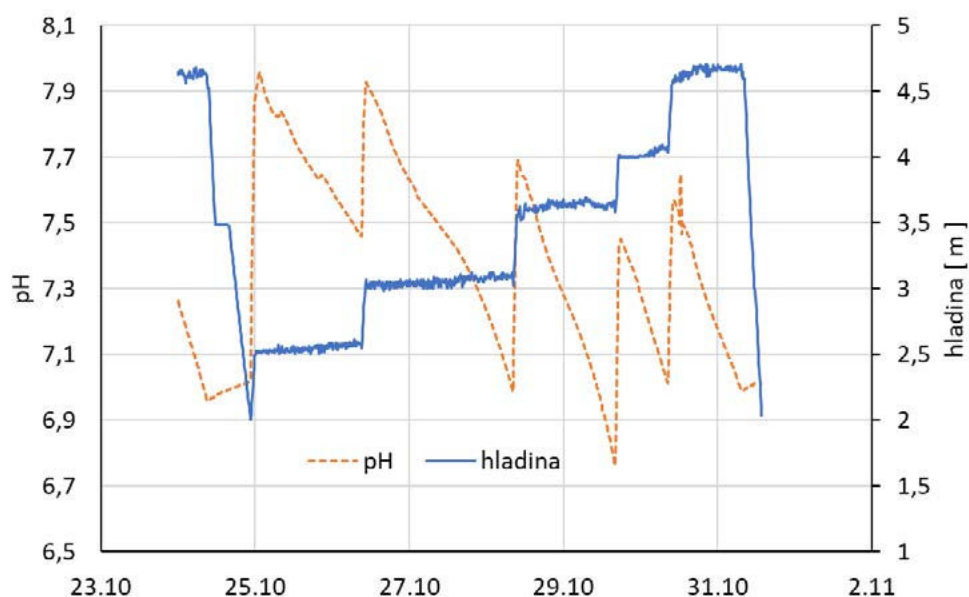
Postup nitritace/denitritace vychází z tradičního přístupu k odstraňování dusíku z odpadních vod nitrifikací a následnou denitrifikací. Je založen na selektivní inhibici nitrifikačních organismů (NOB – Nitrite Oxidizing Bacteria) při zachování vysoké aktivity nitrifikačních organismů (AOB – Ammonia Oxidizing Bacteria). Tato inhibice může být dosažena různými způsoby, mezi nejběžnější patří limitovaná koncentrace rozpuštěného kyslíku, krátká doba zdržení kalu či toxický účinek volného amoniaku (FA – Free Ammonia) a volné kyseliny dusité (FNA – Free Nitrous Acid). Toto řešení přináší možnost úspory až 25 % kyslíku potřebného pro nitrifikaci a až 40 % organického substrátu potřebného pro denitrifikaci. Postup byl nejen v zahraničí, ale také v rámci ČR v laboratorních podmínkách již před mnoha lety úspěšně aplikován jako metoda pro oddělené čištění kalové vody (Jenicek et al., 2004; Švehla, 2004) a posléze

otestován i v poloprovozním měřítku (Radechovský et al., 2015), nicméně dosud se v ČR nedočkal provozní aplikace.

2. MATERIÁL, METODY A POPIS ZAŘÍZENÍ

Popis technologie a provozu

Původní aktivační nádrž byla přebudována na čtyři samostatné nádrže (AN13.1-13.4), každá o objemu 1 000 m³. Každá z nich může sloužit jako samostatný SBR reaktor (Sequencing Batch Reactor). Dvě z těchto nádrží jsou zakryté a vybavené systémem odtahu vzdušiny, která je dále čištěna pomocí fotokatalytické jednotky. Další aktivační nádrž (AN14) byla rekonstruována pro příjem a retenci SOV. Její celkový objem přesahuje 4 000 m³. Voda z retenční nádrže AN14 může být čerpána do libovolné nádrže AN13.x. Dále je možná inokulace nádrží z přilehlé aktivační linky. Předčištěná voda je řízeně čerpána k dočištění na biologické lince. Technologie je vybavena i nádrží na alkalizační činidlo, tu však nevyužíváme a proces provozujeme bez externí úpravy pH. Tím je limitována účinnost odstranění amoniakálního dusíku.



Obr. 1. Průběh pracovního cyklu.

Typický průběh jednoho cyklu SBR reaktoru je znázorněn na obrázku 1. Po odsazení kalu a snížení hladiny na minimální hodnotu (1,5 – 2,0 m) je načerpána první dávka SOV. Další dávky následují po poklesu pH na určitou hodnotu. Velikost dávky se volí podle předpokládaného vnosu alkality, tak aby prostředí v nádrži zůstalo v příznivé oblasti pH. Zpravidla jedna dávka činí zvýšení hladiny o 0,2 m až 0,5 m, přičemž 0,5 m odpovídá objemu přibližně 100 m³.

Monitoring procesu

Nádrže jsou osazeny sondami pro měření pH, koncentrace rozpuštěného kyslíku (O₂) a ISE amoniakálního dusíku (N-amon). V uzavřených nádržích jsou navíc instalovány ISE sondy pro měření N-NO₃. Pro řízení procesu se dále sledují hladiny, průtok vzduchu a objem odpadní vody a kalu. Vzorkování a laboratorní analýzy probíhají denně. Pro řízení dávkování SOV se využívá především online měření pH a kyslíku a výsledky laboratorních analýz.

Zpracovávání vody

Skládkové vody jsou na čistírnu dopravovány autocisternami a vypouštěny do retenční nádrže AN14, kde dochází k jejich homogenizaci a částečnému vyrovnání koncentrací. Čištění skládkových odpadních vod bylo zahájeno v listopadu 2023. Před realizací popsaného technologického stupně předčištění SOV bylo možné přijmout k čištění na BČOV do 9 000 m³ SOV ročně. Během roku 2024, který je možno považovat za zkušební, jsme zpracovali přes 33 000 m³ skládkových vod. To je množství stále nižší, než je poptávka po čištění skládkových odpadních vod.

Průměrné hodnoty SOV jsou uvedeny níže, je však třeba poznamenat, že kvalita SOV se významně mění a viditelně a nepředpokladatelně ovlivňuje účinnost procesu jejich čištění. V dosavadním provozu jsou čištěny SOV samostatně bez ředění nebo s minimálním ředěním. Vodivost není pravidelně měřena. Pro představu níže uvedené průměrné hodnoty RAS odpovídají vodivosti cca 14-18 mS/cm.

Tab. 1. Složení skládkových odpadních vod

Rok	pH	KNK 7 mmol/l	KNK 4,5 mmol/l	CHSK f. mg/l	NL mg/l	RL mg/l	RAS mg/l	N-amon mg/l	N _{celk.} mg/l
2024	8	18	110	4500	1060	21400	18700	1252	1700
2025	8	24	143	4400	2000	21800	19000	1330	1770

Ačkoli laboratorní výzkumy jednoznačně prokázaly nutnost a benefity jejich ředění fugátem z BPS po zahuštění čistírenských kalů, nebylo z provozních důvodů toto doporučení využito. Fugát v našem případě obsahuje značné množství mikroplastů jimiž by byly reaktory zanášeny. Hlavním důvodem pro ředění skládkových výluhů je vysoký obsah RAS (respektive vysoká salinita či vodivost). Z literatury (Soliman 2018) je známo, že tento parametr může významně ovlivňovat aktivitu AOB. Přičemž inhibičně působí již hodnoty RAS nad 5000 mg/l (Zhang et al., 2015). Vedlejším cílem naší praxe bylo zjistit účinnost nitritace při těchto extrémních podmínkách a použít je pro porovnání s provedeným laboratorním výzkumem za účelem nalezení optimálního poměru mísení z pohledu maximálního množství likvidovatelných SOV.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

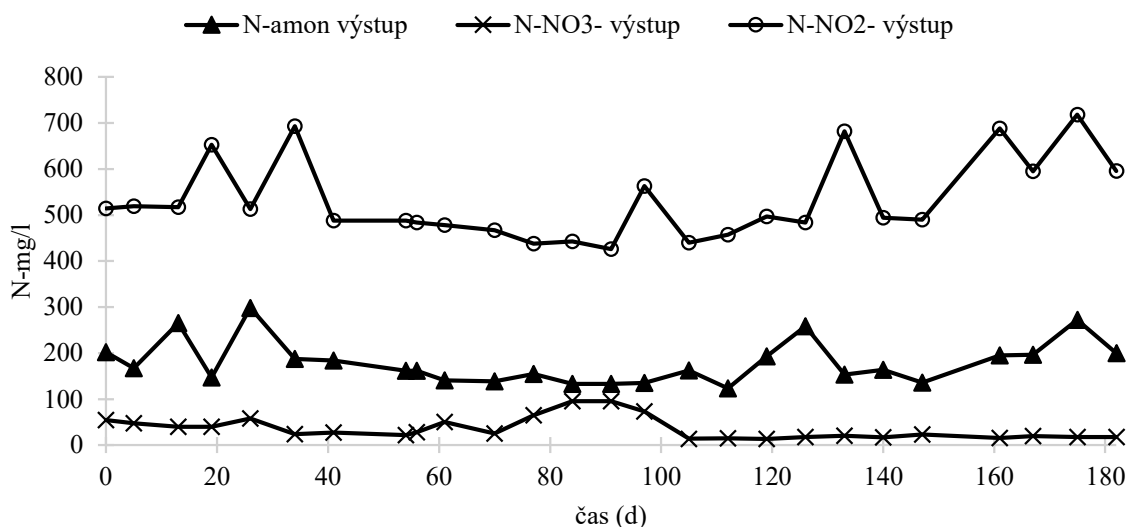
Výsledky laboratorního výzkumu

V letech 2017 – 2019 probíhal na pracovišti KAVR ČZU laboratorní výzkum zaměřený na simulaci zpracování směsi fugátu produkované v rámci BČOV Pardubice a skládkového výluhu dováženého jako externí odpadní voda do této ČOV za účelem návrhu řešení uplatnitelného v reálném provozu BČOV. Za účelem eliminace negativního vlivu skládkového výluhu na zainteresované mikroorganismy byl skládkový výluh v rámci těchto experimentů fugátem ředěn (objemově 3 díly fugátu na jeden díl skládkového výluhu). Cílem experimentů bylo ověřit možnost zpracování směsi skládkového výluhu a fugátu, přičemž uvažovány byly různé varianty biologických postupů vedoucích k odstranění sloučenin dusíku ze zpracováváné směsi, zejména nitritace odděleně od hlavní linky a následná denitritace v hlavní lince čištění, sekvence nitritace/denitritace odděleně od hlavní linky čištění a postup částečná nitritace/ANAMMOX probíhající taktéž odděleně od hlavní linky čištění.

Experimenty probíhaly s využitím dvoustupňového laboratorního modelu simulujícího částečnou nitritaci (první stupeň) a ANAMMOX proces (druhý stupeň). Nitritace byla

simulována v systému SBR a následný ANAMMOX proces byl realizován v reaktoru pracujícím na principu směšovací aktivace. V obou reaktorech byla využita biokultura ve formě suspenze, resp. aktivovaného kalu. Objemové zatížení nitrifikačního reaktoru N-amon činilo průměrně $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ a byl provozován při laboratorní teplotě ($25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$). Koncentrace O_2 v nitrifikačním reaktoru nebyla cíleně limitována, průměrně se pohybovala mezi $4,7 \text{ mg/l}$ na začátku cyklu a $6,7 \text{ mg/l}$ na konci cyklu.

Směs fugátu a skládkového výluhu vstupující do nitrifikačního reaktoru obsahovala v období popisovaném v rámci tohoto příspěvku, které trvalo 182 dnů, N-amon průměrně v koncentraci 630 mg/l . V reaktoru byla efektivně potlačena tvorba N-NO_3^- , jeho průměrná odtoková koncentrace činila ve sledovaném období průměrně 33 mg/l při koncentraci N-NO_2^- dosahující průměrně 545 mg/l (Obrázek 2). Zastoupení N-NO_2^- mezi konečnými produkty nitrifikace tak dosahovalo v průměru cca 94 %. To dokazuje, že v systému byla minimalizována aktivita NOB při zachování dostatečné aktivity AOB. Klíčovým faktorem pro selektivní inhibici NOB byla v daných podmínkách patrně kombinace vysoké koncentrace volného amoniaku (FA – Free Ammonia) a volné kyseliny dusité (FNA – Free Nitrous Acid), resp. silné kolísání koncentrace těchto látek v průběhu cyklů SBR, ve kterých nitrifikační reaktor pracoval (Švehla et al., 2014). Účinnost oxidace N-amon byla v daných podmínkách limitována nedostatečnou neutralizační kapacitou zpracovávané směsi. Průměrně dosahovala cca 70 %. Za účelem jejího zvýšení by v daných podmínkách bylo zapotřebí dávkovat alkalizační činidlo (Jenicek et al., 2004; Švehla, 2004), popřípadě kombinovat v jednom reaktoru nitrifikaci s denitrifikací, při které dochází k nárůstu pH (Švehla, 2004).



Obr. 2. Koncentrace základních forem dusíku v odtoku z nitrifikačního reaktoru.

V rámci provozu soustavy nitritace/ANAMMOX bylo v ANAMMOX reaktoru dosaženo průměrné účinnosti odstranění N-celk přesahující 90 % (Švehla et al. 2018).

Na základě výsledků provedených laboratorních experimentů bylo možno jednoznačně konstatovat, že aplikace procesu nitritace, popřípadě jeho vhodné kombinace s denitrifikací či ANAMMOX procesem pro zpracování směsi kalové vody a skládkového výluhu v reálném provozu BČOV je možná. Bylo potvrzeno, že inhibiční vliv látek obsažených ve skládkovém výluhu je možno eliminovat ředěním skládkového výluhu, přičemž kromě fugátu je možno pochopitelně k ředění využít i jiné proudy vody dostupné v objektu BČOV. V případě záměru

instalace provozního reaktoru pro nitritaci lze předpokládat uspokojivý provoz v širokém rozmezí různých technologických parametrů (teplota, pH, zatížení dusíkem atd.). Jako dobře realizovatelná se jeví i možnost kombinace nitritace s denitrací a to v hlavní lince BČOV i samostatně v rámci odděleného čištění (Švehla et al., 2018).

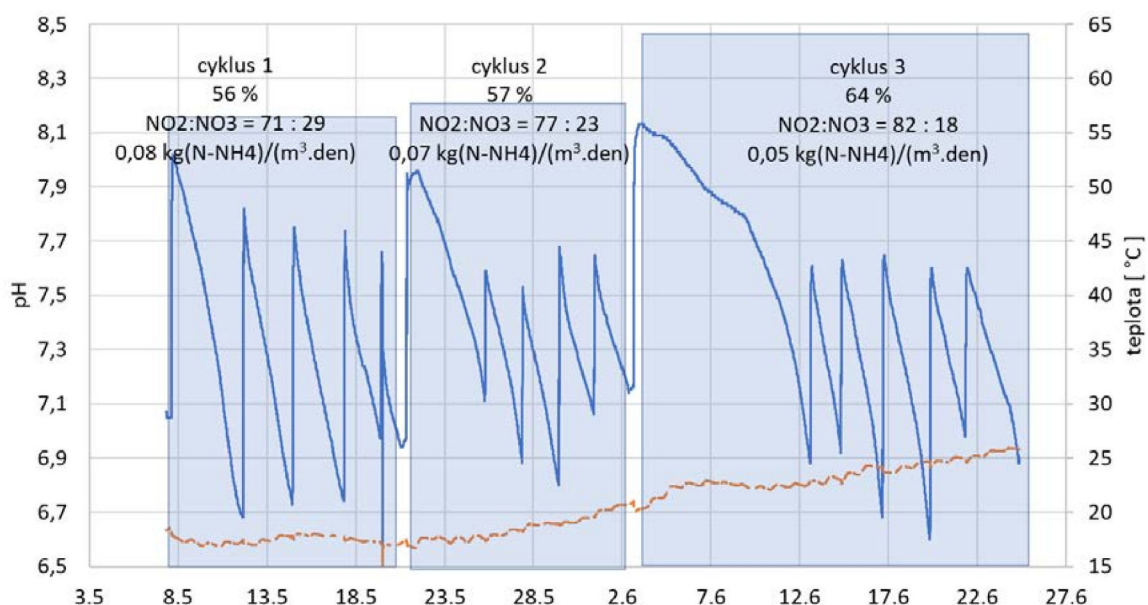
Provozní výsledky

Provoz nitritace SOV jsme zahájili v říjnu 2023. Byly zkoušeny dva způsoby zapracování nitritace, jeden s inokulací kalem z aktivační linky BČOV a druhý bez inokulace. Adaptace a nárůst funkční kultury byl ovlivněn chladným obdobím roku, proto o adaptaci kultury v pravém slova smyslu můžeme mluvit spíše až od dubna 2024. Nicméně i zima 24/25 ukázala, že při déletrvajícím provozu při nízkých teplotách v nádržích (pod 12 °C) sice dochází k výraznému snížení rychlosti procesu, ale kumulace dusitanů je při těchto podmínkách stále významná (až 80% N končí na dusitanech).

Od září 2024 dosahuje proces poměrně stabilních výsledků, které můžeme typicky demonstrovat pro pracovní cyklus znázorněný na Obr. 1. Celý cyklus trval sedm dní a v jeho průběhu se pohybovala teplota v rozmezí 17,5 - 19,0 °C. Zatížení dusíkem činilo 0,11 kg(N-amon)/(m³.den) a bylo dosaženo odstranění 62 g(N-amon)/(m³.den) tj. téměř 60 %. Z odstraněného množství amoniakálního dusíku přešlo 75 % na dusitanový dusík. Množství kalu během cyklu bylo asi 1 700 kg (NLžž).

Hodnota celkového zatížení reaktoru dusíkem není vysoká. Jak bylo uvedeno výše, během laboratorního výzkumu, kdy byla SOV ředěna čtyřikrát fugátem, bylo dosahováno zatížení přibližně 0,4 kg(N-amon)/(m³.den). Vzhledem k prostředí neředěných SOV je však akceptovatelná.

Pokud to kvalita SOV dovolí, tzn., pokud je příznivý poměr dusíku a neutralizační tlumivé kapacity, je možné snížením zatížení dospět k vyššímu stupni odstranění N-amon. To je patrné z Obr. 3. Současně se zlepšil poměr konverze ve prospěch N-NO₂⁻. Toto zlepšení je ale patrně důsledkem skutečnosti, že proces probíhal v příznivějších oblastech pH.



Obr. 3. Průběh pH a teploty během třech cyklů s uvedením účinnosti odstranění amoniakálního dusíku, poměru dusitanů a dusičnanů a zatížení

Dosavadní provoz prokázal možnost udržení stabilního nitrifikačního procesu v SBR režimu pro úpravu SOV za účelem získání vhodného přítoku pro případný ANAMMOX reaktor.

4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROCESU

Matematické modelování nitrifikace je výhodnou strategií, která může pomoci rozklíčovat potřeby daného provozu pro dosažení maximální možné účinnosti nitrifikace. Pomocí nakalibrovaného modelu lze predikovat kvalitu odtoku při změně složení odpadní vody a následně spočítat dávku potřebného alkalizačního činidla pro udržení stabilního provozu. V této práci byl pro účely modelování využit software WEST, ve kterém byl na míru potřebám Pardubické ČOV zhotoven blok SBR se specifickým systémem čerpání.

Vstupní dataset

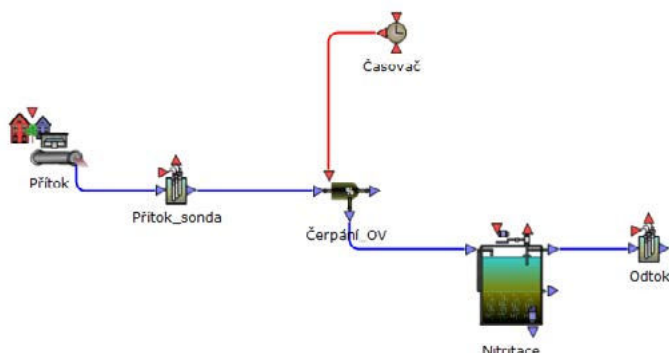
Vstupem do modelu byl tříletý historický dataset průměrných koncentrací skládkových vod, zpracovaný samostatným frakcionačním modelem jednotlivých forem dusíku a organických látek.

Tab. 2. Kvalita skládkových vod –průměr 2022-24 (hodnoty v mg/l)

CHSK	Ncelk.	N-amon	Pcelk.	PO43-	NL	NLžž
2830	957	697	22,6	10,7	2242	1212

Schéma modelu

Model nitrifikace sestává ze zdroje vstupní odpadní vody (SOV), časovačem řízeného čerpadla na nátok odpadní vody, kontrolního senzoru a samotného nitrifikačního reaktoru typu SBR.



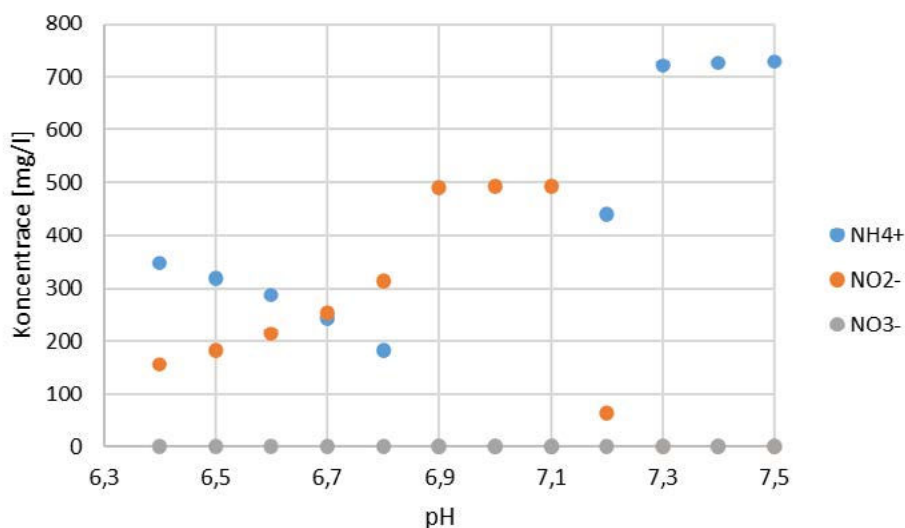
Obr. 4. Schéma základního modelu nitrifikace v BČOV Pardubice

Výsledky matematického modelu

Při hledání optimálních provozních podmínek jsme vycházeli z informace, že odtokové koncentrace N-amon dle historických dat ze sondy se v průměru pohybují okolo 250 mg/l. Poměr koncentrace N-amon a N-NO_2^- je dle diskuze s technologem zhruba 50:50. Simulace ustáleného stavu se k těmto výsledkům přiblížila při teplotě 15 °C a pH 6,7, kdy se koncentrace N-amon v odtoku ustálila na 244 mg/l a koncentrace N-NO_2^- na 253 mg/l při úplném potlačení produkce N-NO_3^- .

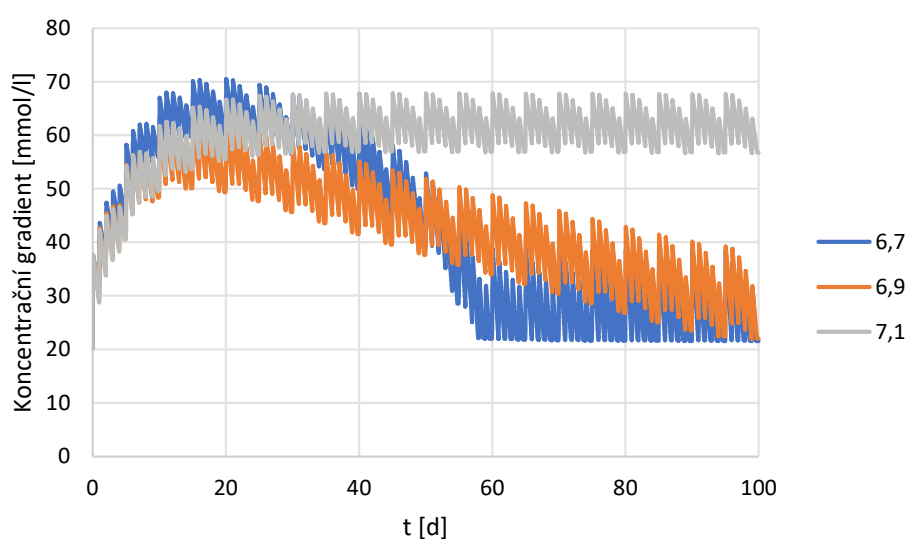
Jako klíčový parametr ovlivňující provoz nitrifikace se často uvádí pH. Aktivita NOB klesá při pH okolo 6,8 (Owaes a kol, 2024). Inhibice NOB však není způsobena přímo hodnotou pH, ale koncentracemi volného amoniaku a volné dusité kyseliny (Anthonisen a kol., 1976), jejichž rovnovážné množství závisí na pH. Z hlediska inhibice NOB by se tedy nitrifikace měla dle teorie optimálně provozovat při průměrném pH okolo 6,8. Pardubická ČOV provozuje nitrifikaci při pH 7,4. V našem modelu při tomto pH již neprobíhá žádná konverze N-amon na N-NO_2^- a N-NO_3^- .

Nejvyšší výtěžek N-NO_2^- byl dosažen při pH 6,9 – 7,1 (koncentrace N-NO_2^- odečtena na konci SBR cyklu při fixně nastaveném pH). Veškerá literatura použitá v přehledovém článku Owaes a kol., 2024 je v laboratorním měřítku a počítá s nízkou koncentrací (desítky – nižší stovky mg/l N-amon). V případě vysokého zatížení se může rovnováha posouvat směrem k nižším hodnotám pH. Vedle zatížení N-amon mohou odolnost systému vůči změnám pH ovlivňovat i další proměnné, například objemové zatížení nebo zatížení aktivovaného kalu, což může být předmětem dalšího zkoumání.



Obr. 5. Vliv pH na koncentraci jednotlivých forem dusíku při teplotě 15°C

Z rozdílu koncentrací alkalinity mezi jednotlivými čerpáními v reaktoru model umožňuje dopočítat dávku alkalizačního činidla potřebnou k udržení nastaveného pH. Obrázek 6 zachycuje průběh koncentračního vektoru $C[\text{S_Alk}]$ v mmol $\text{CaCO}_3\text{eq/l}$ v závislosti na pevně nastavené udržovací hodnotě pH. Pro tento výpočet byla vstupní alkalinita S_Alk_In nastavena na 100 mmol/l.



Obr. 6. Vliv pH na alkalinitu systému při 15 °C a při vstupní alkalinitě 100 g/m³

Shoda výsledků simulací s poznatky z literatury potvrzuje potenciál modelu jako spolehlivého a užitečného nástroje pro predikci účinnosti nitritace. Při správné kalibraci může model zároveň sloužit jako podpora při nastavování provozních strategií jako je např. dávkování chemikálií.

5. ZÁVĚRY

Na základě dat a zkušeností získaných během více než ročního provozu nádrží pro nitritaci SOV můžeme konstatovat následující:

- I bez přísadků neutralizačních činidel a ředění skládkových vod lze dosáhnout účinnosti odstranění kolem 60 % při dostatečné konverzi na N-NO_2^- umožňující případné další zpracování technologií ANAMMOX.
- Získaná data společně s poznatky z literatury umožňují použití modelu, jako spolehlivého a užitečného nástroje pro predikci účinnosti nitritace a možností nastavování provozních strategií jako je např. dávkování chemikálií.
- Získané výsledky je možno využít k optimalizaci biochemických procesů vedoucích k transformaci sloučenin dusíku v prostředí s extrémně vysokým obsahem N-amon (kromě skládkového výluhu například také fermentační zbytek z provozu bioplynových stanic či jeho kapalná frakce – fugát).

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován v rámci řešení projektu SQ01020303. Autoři děkují za finanční podporu.

SEZNAM LITERATURY

- Anthonisen, A. et al.: Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 48, pp. 835–852 (1976).
- Ganigué, R., et al.: Long-term operation of a partial nitritation pilot plant treating leachate with extremely high ammonium concentration prior to an anammox process. *Bioresour Technol* 100, pp. 5624–5632 (2009).
- Jenicek, P., et al.: Factors affecting nitrogen removal by nitritation/denitritation. *Water Sci. Technol.* 5–6, 73–79 (2004).
- Karmann, C. et al.: Advances in nitrogen removal and recovery technologies from reject water: Economic and environmental perspectives. *Bioresour. Technol.* 391, 129888 (2024).
- Kouba V., et al.: Jak ušetřit na odstraňování dusíku na ČOV (10 let zahraničních zkušeností s procesem anammox). *SOVAK* 4/2018, pp. 14/146-21/153 (2018).
- Owaes, M., Gani, K. M., Kumari, S., Seyam, M., & Bux, F. (2024). Implementation of partial nitrification in wastewater treatment systems by modifications in operational strategies— a review. *Environmental Technology Reviews*, 13(1), 379–397. <https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2354518>
- Radechovský J. et al.: Zkrácená nitrifikace kalové vody v pokusné poloprovozní jednotce. *Vodní hospodářství* 65/3, pp. 10-12 (2015).
- Soliman, M., Eldyasti, A. Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB): opportunities and applications—a review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 17, 285–321 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9463-4>
- Svehla, P. et al.: Inhibition effect of free ammonia and free nitrous acid on nitrite-oxidising bacteria during sludge liquor treatment: influence of feeding strategy. *Chem. Pap.* 68, 871–878 (2014).
- Švehla, P.: Oddělené biologické čištění kalové vody. *Doktorská disertační práce*. VŠCHT Praha (2004).
- Švehla, P. et al.: Zpracování externích odpadních vod s vysokým obsahem dusíku za využití procesu ANAMMOX či jiných inovativních biologických postupů. *Sborník z konference Odpadové vody 2018*. 313–318 (2018).
- Zhang, Y., Chen, L., Dai, T. et al. The influence of salinity on the abundance, transcriptional activity, and diversity of AOA and AOB in an estuarine sediment: a microcosm study. *Appl Microbiol Biotechnol* 99, 9825–9833 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6804-x>