



ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

**Identifikace parametrů pro výstavbu
nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát
a úspěšnou iniciaci nitrifikačního procesu**

certifikovaná metodika

Pavel Švehla a kol.



© Česká zemědělská univerzita v Praze
Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ
165 00 Praha-Suchbát
<http://www.af.czu.cz>

Vydavatelství Česká zemědělská univerzita v Praze

ISBN 978-80-213-3075-7

Praha 2021

Certifikovaná metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu
NAZV č. QK1710176

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

**Identifikace parametrů pro výstavbu nitrifikačního
reaktoru zpracovávajícího fugát
a úspěšnou iniciaci nitrifikačního procesu**

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Pavel Švehla a kol.

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Dedikace: Ke zpracování certifikované metodiky bylo použito výsledků výzkumných aktivit realizovaných v rámci řešení výzkumného projektu NAZV QK1710176 „Dvoustupňová úprava kapalné frakce fermentačního zbytku umožňující racionální využití živin a vody“.

Kolektiv autorů:

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.¹
Ing. Pavel Míchal, Ph.D.¹
prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc., dr. h. c.¹
Ing. Tomáš Rosenberg, Ph.D.¹
Ing. Jan Procházka, Ph.D.²

¹ČZU v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

²Agro Podlesí, a.s.

Identifikace parametrů pro výstavbu nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát a úspěšnou iniciaci nitrifikačního procesu

Pavel Švehla a kol.

Vydání první, 2021

Vydavatelství: Česká zemědělská univerzita v Praze

Tisk Powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha Suchdol, www.powerprint.cz

Obálka: Poloprovozní nitrifikační reaktor zpracovávající fugát (foto: Pavel Míchal)

© Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, FAPPZ ČZU v Praze

Kamýcká 129, 165 00 Praha 6 - Suchdol

tel.: +420 224 382 736, <http://www.af.czu.cz>

ISBN 978-80-213-3075-7

Abstrakt

Fugát je kapalnou frakcí fermentačního zbytku neboli digestátu vznikajícího jako vedlejší produkt při provozu zemědělských bioplynových stanic. Vzhledem k vysoké koncentraci amonného N je náchylný ke ztrátám dusíku. Nitrifikace může být využita jako postup zpracování fugátu vedoucí k minimalizaci ztrát dusíku, přičemž může být efektivně kombinována s následným tepelným zahuštěním nitrifikovaného fugátu a tak vést ke snížení nákladů na skladování a transport fugátu. Tato certifikovaná metodika je zaměřena na návrh vhodného technologického uspořádání biologického reaktoru pro nitrifikaci fugátu v plně provozních podmínkách reálných bioplynových stanic a na postup při zahájení provozu tohoto reaktoru schopného zpracovat veškerou denní produkci fugátu či její část. Jsou presentovány různé varianty lišící se zejména v přístupu k řízení fáze zapracování biologického procesu nitrifikace a v technologických parametrech procesu, je zohledněna variabilita místních podmínek panujících v objektech konkrétních bioplynových stanic. Vychází se při tom z dosavadních výsledků výzkumu realizovaného v laboratorních a poloprovozních podmínkách, v rámci kterého byly dříve identifikovány optimální podmínky prostředí nezbytné pro úspěšný průběh nitrifikace fugátu.

Klíčová slova: Fermentační zbytek, fugát, nitrifikace, technologické uspořádání, zapracování procesu

Abstract

Fugate represents a liquid phase of digestate (LPD) produced as a by-product of the operation of agricultural biogas plants. Due to high concentrations of ammonia N is sensitive to nitrogen losses. Nitrification could be used as the method of fugate treatment which enables minimization of nitrogen losses during the handling with the fugate. It could be also effectively combined with subsequent thermal thickening of nitrified LPD. By this way, it could also support the decrease of the costs for fugate storage and transport. This certified methodology is focused on the presentation of suitable technological arrangements of the nitrification reactor and on the method of the initiation of the treatment process in such system serving for fugate treatment in full-scale conditions prevailing on real biogas plants. Different variants varying mainly in the method of the start-up phase of the biological process and in the technological parameters of the system are presented. The variability of the conditions prevailing in concrete biogas plants are taking into account. For these purposes, previous results of laboratory and pilot-scale experiments defining optimal conditions essential for successful operation of the nitrification process in the environment of the fugate were used.

Keywords: Digestate, liquid phase of digestate, nitrification, technological arrangement, start-up phase of the process

OBSAH

I. Cíl metodiky	1
II. Vlastní popis metodiky	1
2.1. Úvod	1
2.2. Dostupná technologická řešení pro nitrifikaci fugátu	3
2.3. Dosavadní zkušenosti s aplikací procesu nitrifikace jakožto metody pro zpracování fugátu	8
2.4. Obecné zásady pro výstavbu nitrifikačního reaktoru sloužícího ke zpracování fugátu	8
2.5. Inicie nitrifikačního procesu	10
2.6. Výkonnost systému	12
2.7. Účinnost převedení N-amon na oxidované formy dusíku a zastoupení konečných produktů nitrifikace	13
2.8. Monitoring stavu procesu a k tomu potřebné vybavení	14
2.9. Vliv místních podmínek	15
2.10. Optimalizace parametrů reaktoru z pohledu bezproblémového zapracování biologického procesu	16
III. Srovnání novosti postupů	28
IV. Popis uplatnění metodiky	28
V. Ekonomické aspekty	29
VI. Seznam použité literatury	33
VII. Seznam publikací, které předcházely metodice	34
VIII. Jména oponentů a názvy jejich organizací	35
IX. Dedikace	35
X. Ostatní náležitosti certifikované metodiky	35

I. Cíl metodiky

Cílem metodiky je vytvořit podklady pro volbu optimálního technologického uspořádání nitrifikačního reaktoru pro zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku (tzv. fugátu) v provozních podmínkách reálných bioplynových stanic, který by byl schopen zpracovat veškerou denní produkci fugátu, popřípadě její požadovanou část. Důraz je kladen nejen na konstrukci nádrže a její základní technologické parametry, ale zejména na postup zapracování biologického procesu probíhajícího v tomto reaktoru. Zohledněna je variabilita podmínek panujících v různých objektech zemědělských bioplynových stanic. Certifikovaná metodika shrnuje vybrané poznatky vyplývající z řešení projektu NAZV č. QK1710176, přičemž vychází z dříve publikovaných výsledků dlouhodobého výzkumu realizovaného v laboratorních a poloprovozních podmínkách, v rámci kterých byly v obecné rovině definovány optimální podmínky pro průběh nitrifikačního procesu.

II. Vlastní popis metodiky

2.1. Úvod

2.1.1. Původ fugátu a jeho základní vlastnosti

Vedlejším produktem provozu bioplynových stanic je tzv. fermentační zbytek označovaný také jako digestát. Jedná se o suspenzi biologicky těžko rozložitelné organické hmoty, která odolala anaerobním rozkladným procesům probíhajícím v biologickém reaktoru bioplynové stanice a kapalné fáze. Sušina fermentačního zbytku obvykle nepřesahuje 10 %. V řadě případů je fermentační zbytek v objektech zemědělských bioplynových stanic separován na pevnou složku (separát) a kapalnou frakci (tzv. fugát). Fugát je zpravidla přímo aplikován na zemědělskou půdu jako zdroj živin pro výživu rostlin. Nakládání s fugátem s sebou ale přináší celou řadu problémů (Al Seadi et al., 2013). Relativně malý podíl sušiny (většinou < 5 %) ve velkém objemu balastní vody výrazně navyšuje náklady na přepravu a následnou aplikaci fugátu, což je spojeno i se zvýšeným rizikem zhutnění půdy častým pojezdem cisternových vozidel. Při skladování fugátu i přímo během jeho aplikace na půdu uniká do ovzduší NH_3 , což je nežádoucí jak z environmentálního, tak z ekonomického hlediska (ztráta dusíku jakožto živiny) (Butterbach-Bahl et al., 2011; Nicholson et al., 2017; Perazzolo et al., 2017; Renard et al., 2004).

2.1.2. Využití nitrifikace k minimalizaci ztrát dusíku při manipulaci s fugátem

Nitrifikace může být využita jako metoda vedoucí k minimalizaci ztrát dusíku při skladování fugátu a při jeho aplikaci na půdu (Botheju et al., 2010; Švehla et al., 2017; Švehla et al., 2020). Jedná se o biochemický proces, při kterém je amoniakální dusík (N-amon) nejprve činností nitrifikačních organismů (AOB – Ammonium Oxidising Bacteria) převáděn na N-NO_2^- , který následně nitrifikační organismy (NOB – Nitrite Oxidising Bacteria) transformují na N-NO_3^- . Oxidovaný dusík ve formě N-NO_3^- , resp. N-NO_2^- , není na rozdíl od amoniaku těkavý a z tohoto hlediska je možno ho považovat za „stabilní“ formu bezpečnou z pohledu ztrát dusíku při skladování fugátu a jeho aplikaci na zemědělskou půdu. Z hlediska potenciálního provozu systému pro nitrifikaci fugátu za účelem minimalizace ztrát dusíku je zásadní také skutečnost, že v první (nitrifikační) fázi procesu nitrifikace je uvolňování iontů H^+ (Pitter, 1999; Švehla et al., 2020). Tato skutečnost vede při nitrifikaci ve vodním prostředí obsahujícím extrémně vysoké koncentrace N-amon při relativně nízké hodnotě kyselinové neutralizační kapacity (což jsou typické vlastnosti fugátu) k poklesu hodnoty pH (Pitter, 1999; Jenicek et al., 2004). Díky tomu může nitrifikace ztráty dusíku při manipulaci s fugátem snížit i v případě, že zdaleka ne veškerý N-amon obsažený původně ve fugátu je převeden na oxidované formy. Pokles pH vyvolaný průběhem nitrifikačního procesu totiž vede k radikálnímu snížení zastoupení těkavého NH_3 , který přechází na netěkavý NH_4^+ (Anthonisen et al., 1976; Pitter, 1999).

2.1.3. Využití nitrifikace k následnému zakoncentrování živin obsažených ve fugátu

Zpracování fugátu nitrifikací může být využito také jako předstupeň pro jeho tepelné zahuštění využitelné ke snížení objemu fugátu a z něj plynoucímu poklesu nákladů na skladování a transport fugátu (Švehla et al., 2020). Abychom při tepelném zahušťování zamezili únikům amoniaku do destilátu, je nutné nejprve upravit hodnotu pH fugátu do mírně kyselé oblasti ($\leq 6,0$). Nejjednodušší metodou, jak tohoto cíle dosáhnout, je dávkování minerální kyseliny do fugátu (Chiumenti et al., 2013). Nevýhodou tohoto přístupu je však vysoká spotřeba chemikálií a z ní plynoucí provozní náklady. Problémem může být i okyselení půdy po aplikaci takto upraveného fugátu (Rorison, 1973). Nabízí se však možnost „stabilizace“ dusíku vedoucí k jeho udržení v tepelně zahuštěném produktu právě s využitím nitrifikace, která převede N-amon, resp. jeho významnou část, na netěkavé oxidované formy dusíku a zároveň vede k poklesu pH (viz výše). Aplikace metody zpracování fugátu založené na nitrifikaci amoniakálního dusíku obsaženého v surovém fugátu a následném tepelném zahuštění nitrifikovaného fugátu využívajícím přebytkové teplo produkované v rámci provozu BPS může z výše nastíněných důvodů kromě minimalizace ztrát dusíku při manipulaci s fugátem přinést i potřebné zakoncentrování živin do proudu tepelně zahuštěného

nitrifikovaného fugátu majícího charakter komplexního kapalného hnojiva. Předpokládá se, že destilát bude možno využít jako procesní vodu, například pro optimalizaci obsahu sušiny v substrátu vstupujícím do anaerobního reaktoru bioplynové stanice. Tím dojde k omezení spotřeby za tímto účelem běžně používané pitné vody.

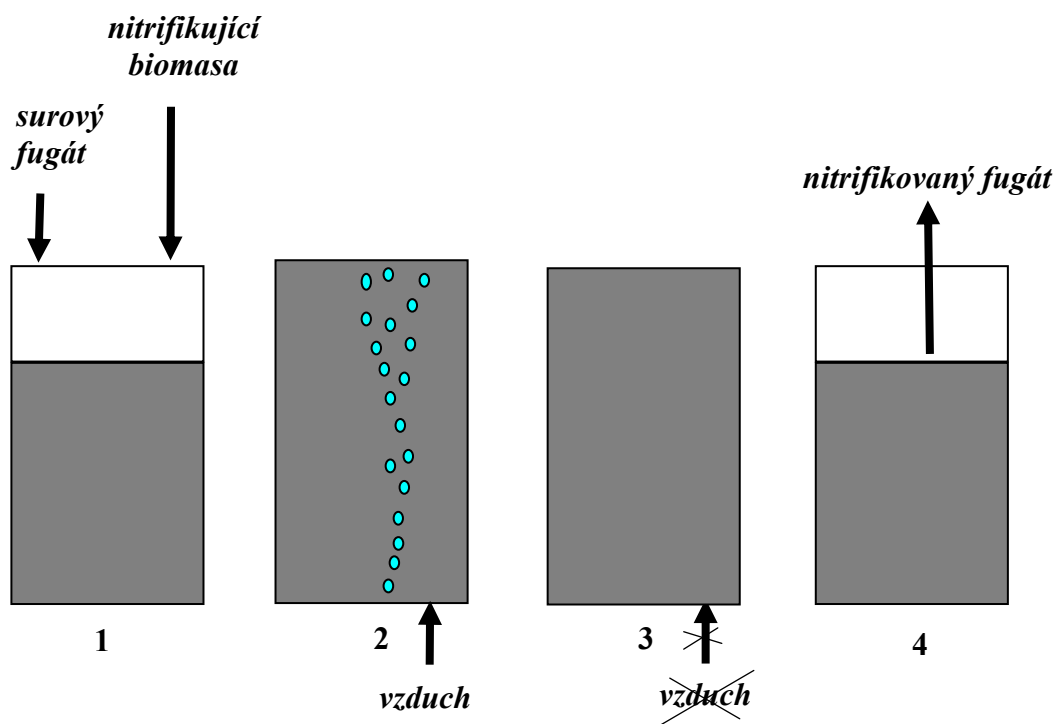
2.2. Dostupná technologická řešení pro nitrifikaci fugátu

Podobně jako i další řízené biologické procesy probíhající ve vodním prostředí, může i nitrifikace fugátu probíhat v biologických reaktorech různého technologického uspořádání. Vycházet přitom můžeme z řešení používaných konvenčně při čištění odpadních vod (Chudoba et al., 1991). Podmínky, kterým je vystavena nitrifikující biomasa, se přitom za předpokladu aplikace různých technologických variant mohou dramaticky lišit. Z tohoto důvodu může volba technologického uspořádání reaktoru pro nitrifikaci fugátu velmi významným způsobem ovlivňovat průběh nitrifikačního procesu a jeho efektivitu.

Jak již bylo uvedeno výše, nitrifikace je aerobní proces, pro jehož uspokojivý průběh je potřeba udržet dostatečně vysokou koncentraci kyslíku v biologickém reaktoru. Proto je v každém případě nezbytné do nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát dodávat dostatečné množství kyslíku, tedy zajistit intenzivní aeraci systému.

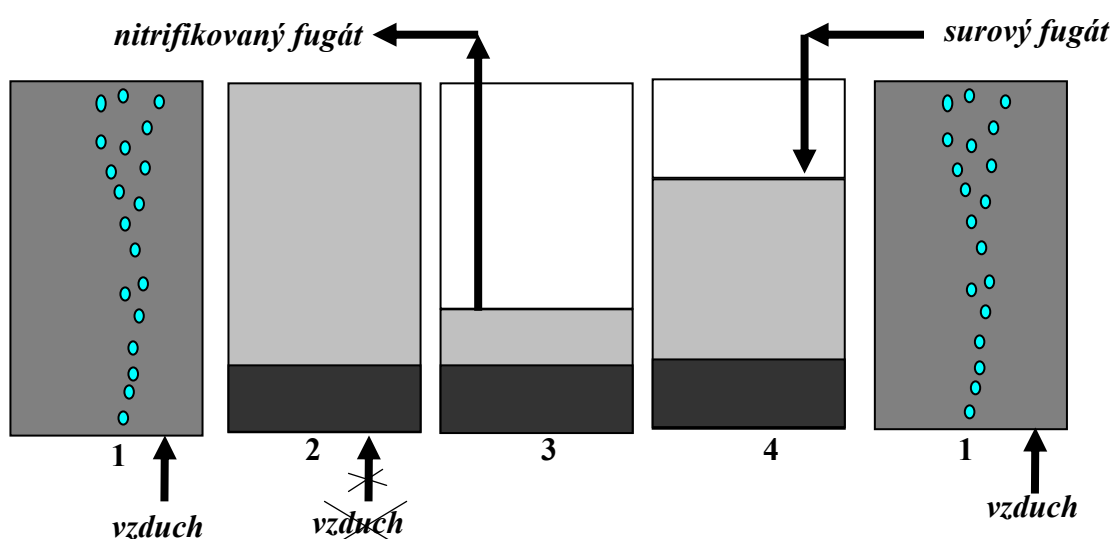
Zásadní význam má z pohledu aktivity různých skupin mikroorganismů způsob průtoku fugátu biologickým reaktorem. V úvahu teoreticky přichází z tohoto pohledu tři základní varianty uspořádání nitrifikačního reaktoru – jednorázový systém, systém se semikontinuálním průtokem a systém s kontinuálním průtokem (Chudoba et al., 1991).

V případě jednorázového procesu je biologický reaktor naplněn fugátem, je přidána nitrifikující biomasa, a tím je (za předpokladu zajištění aerobních podmínek dodáváním vzduchu) zahájen nitrifikační proces. Ten je ukončen po převedení veškerého N-amon na oxidované formy dusíku, nebo v důsledku zastavení činnosti nitrifikačních organismů z důvodu pro ně nepříznivých podmínek. S dalším využitím nitrifikační biomasy se v případě jednorázového systému nepočítá. Schematické vyjádření průběhu zpracování fugátu v jednorázovém systému je k dispozici na obrázku 1.



Obrázek 1: Schematické znázornění funkce jednorázového systému
(1 – napouštění surového fugátu, 2 – provzdušňování a probíhající nitrifikace, 3 – ukončení procesu zpracování fugátu, 4 – odběr nitrifikovaného fugátu)

Při semikontinuálním průtoku nitrifikačním reaktorem je fugát dávkován do reaktoru v určitých periodách, přičemž mezi jednotlivými dávkami fugátu do systému není přiváděn. Periodicky se opakují i fáze odběru zpracovaného fugátu z reaktoru. Reaktory pracující na principu semikontinuálního průtoku bývají v praxi označovány jako SBR (Sequencing Batch Reactor, viz obrázek 2). V podstatě se jedná o periodické opakování jednorázového procesu.



Obrázek 2: Schematické znázornění funkce SBR systému zpracovávajícího fugát
(1 – pracovní fáze, 2 – fáze sedimentace, 3 – fáze odčerpávání nitrifikovaného fugátu, 4 – fáze napouštění surového fugátu)

V pracovní fázi cyklu SBR je zajištěna aerace systému, která garantuje přísun kyslíku k nitrifikačním bakteriím a zároveň i promíchávání zpracovávaného fugátu. Aby bylo možno v SBR systému zachovat dlouhodobě dostatečné množství nitrifikující biomasy, zařazuje se za pracovní část cyklu fáze sedimentace (fáze 2 v obr. 2). Předpokládá se, že v této fázi sedimentuje aktivní nitrifikační biomasa ke dnu reaktoru a dochází tak k jejímu oddělení od zpracovávaného fugátu. Poté je z hladiny, resp. z horní části reaktoru, odváděn nitrifikovaný fugát, který je odčerpáván k dalšímu zpracování (fáze 3), přičemž hlavní podíl nitrifikační biomasy zůstává na dně reaktoru. Po odčerpání zpracovaného fugátu může dojít k nadávkování vhodného množství surového fugátu (fáze 4) a celý pracovní cyklus reaktoru se může opakovat. Připadají v úvahu i různé modifikace pracovního cyklu SBR. Při hydraulické době zdržení zpracovávaného fugátu převyšující při teplotě 20 °C a vyšší 5 dnů je například možno provozovat reaktor bez sedimentační fáze, předpokládá se, že denní nárůst nitrifikačních bakterií za těchto podmínek převyšuje ztrátu nitrifikační biomasy odtokem z reaktoru. K napouštění surového fugátu může docházet i během pracovní fáze, resp. v jejím začátku. SBR systém sloužící k nitrifikaci fugátu je možno provozovat stejným způsobem jako biologický reaktor pro čištění odpadních vod, tedy jako klasický aktivační systém s biomasou obsahující nitrifikační mikroorganismy kultivovanou ve formě suspenze nebo jako biofilmový reaktor, ve kterém je suspenzní biomasa kombinována s kulturou obsahující nitrifikační bakterie kultivované ve formě biofilmu rostoucího na povrchu vhodného nosiče biomasy (Chudoba et al., 1991).

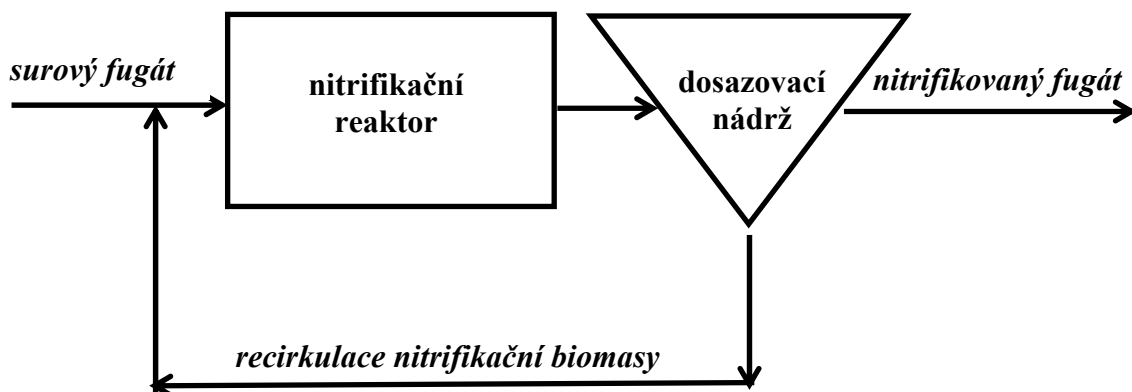
Semikontinuální systém je charakteristický významnými výkyvy v podmínkách, kterým jsou nitrifikační organismy vystaveny v průběhu jednotlivých cyklů systému SBR (Chudoba et al., 1991; Svehla et al., 2014). Při zpracování fugátu je potřeba počítat zejména s intenzivním kolísáním hodnoty pH v průběhu cyklu SBR. Ty jsou způsobeny tím, že surový fugát vykazuje zpravidla slabě zásaditou reakci s pH v rozmezí 7,5 – 8,5 (Whelan et al., 2010), přičemž v průběhu pracovního cyklu reaktoru dochází k poklesu pH v důsledku produkce H^+ v první fázi nitrifikace, tedy při nitritaci (Pitter, 1999). Zároveň v průběhu pracovního cyklu SBR dochází k poklesu koncentrace N-amon v reaktoru, neboť dochází k jeho postupné transformaci na oxidované produkty nitrifikace. Z těchto důvodů dosahuje na začátku pracovního cyklu SBR maxima koncentrace volného amoniaku (FA – Free Ammonia), která při dané koncentraci N-amon roste s rostoucí hodnotou pH (Anthonisen et al., 1976). V průběhu pracovního cyklu SBR pak koncentrace FA v důsledku poklesu aktuální koncentrace N-amon a poklesu pH postupně klesá. To je velice důležité z hlediska životních podmínek nitrifikačních organismů. Přestože je N-amon, potažmo FA pro ně substrátem, od určité koncentrace FA již na ně působí inhibičně či dokonce toxicky. Přitom, NOB jsou na přítomnost FA v prostředí podstatně citlivější než AOB (Anthonisen et al., 1976; Svehla et al., 2014). V systému SBR zpracovávajícím

s využitím nitrifikačního procesu fugát se tedy může stát, že extrémně vysoká koncentrace FA na začátku pracovního cyklu ohrozí uspokojivý průběh nitrifikačního procesu. V případě, že v daných podmínkách budou schopny aktivity odolnější AOB a zároveň dojde k potlačení činnosti NOB, začne se v reaktoru hromadit dusitanový dusík N-NO_2^- , který se za určitých okolností může stát i dominantním konečným produktem nitrifikace. Jeho koncentrace je pak pochopitelně nejvyšší na konci cyklu SBR, kdy je zároveň v systému nejnižší hodnota pH. Za těchto podmínek se dále silně zvyšuje inhibiční tlak vůči nitrifikačním organismům, neboť v průběhu cyklu v důsledku popsaných dějů dochází k radikálnímu nárůstu aktuální koncentrace volné kyseliny dusité (FNA – Free Nitrous Acid). Ta je dalším silným inhibitorem nitrifikačního procesu, přičemž i v jejím případě platí, že velice citlivé jsou na její přítomnost zejména NOB (Anthonisen et al., 1976; Svehla et al., 2014; Svehla et al., 2017; Švehla et al., 2020). Při záměru využít SBR systém pro nitrifikaci fugátu je nezbytné počítat s popsanými jevy.

Funkce reaktoru s kontinuálním průtokem (obrázek 3) je založena na skutečnosti, že fugát je ve vhodném množství do systému přiváděn nepřetržitě (kontinuálně), přičemž kontinuální je i odběr zpracovaného fugátu z reaktoru. V případě kontinuálního průtoku nitrifikačním reaktorem mohou nastat dvě extrémní situace. Buď dochází v systému k ideálnímu promíchávání celého objemu zpracovávaného fugátu a fugát díky tomu vykazuje identické vlastnosti v celém objemu reaktoru, nebo odpovídají hydraulické poměry v reaktoru tzv. pístovému toku (Chudoba et al., 1991). Při pístovém toku jsou mikroorganismy vystaveny podmínkám v podstatě identickým jako v případě semikontinuálního průtoku, v závislosti na místě v reaktoru, ve kterém se mikroorganismus nachází, tedy dochází ke změnám podmínek, kterým je tento mikroorganismus vystaven. Na začátku nádrže je ve zpracovávaném fugátu (podobně jako na začátku cyklu SBR) nejvyšší koncentrace FA, na konci reaktoru naopak v případě přítomnosti N-NO_2^- v prostředí roste koncentrace FNA. Oproti tomu, při ideálním promíchávání realizovaném v systému označovaném jako směšovací aktivace (CSTR systém – Completely Stirred Tank Reactor) jsou podmínky v reaktoru v celém objemu konstantní, nedochází k jakýmkoliv jejich výkyvům, přičemž podmínky stabilně odpovídají podmínkám na konci cyklu SBR, resp. na konci nádrže s kontinuálním průtokem pracující na principu pístového toku. Ve skutečnosti systémy s kontinuálním průtokem vykazují vždy vlastnosti mající charakter obou uvedených extrémních variant, ale jsou zpravidla projektovány tak, aby se silně blížily jedné z nich.

Podobně jako tomu je v případě SBR, také nitrifikační reaktor pro zpracování fugátu s kontinuálním průtokem (lhostejno, zda CSTR či systém na principu pístového toku) je možno provozovat s biomasou kultivovanou ve formě suspenze. V takovém případě je potřeba za vlastní nitrifikační reaktor zařadit tzv. dosazovací nádrž sloužící

k separaci zpracovaného fugátu od nitrifikační biomasy, která je následně recirkulována zpět do reaktoru, viz obrázek 3 (Chudoba et al., 1991).



Obrázek 3: Schematické znázornění funkce systému pro zpracování fugátu s kontinuálním průtokem

Vzhledem k omezené účinnosti separace biomasy od fugátu v dosazovací nádrži způsobené konzistencí fugátu a vzhledem ke zvýšení náročnosti výstavby systému s dosazovací nádrží a k nutnosti recirkulace biomasy se však jako racionálnější cesta k udržení aktivní biomasy v reaktoru jeví přidavek vhodného nosiče biomasy do nitrifikačního reaktoru a využití kombinace biomasy kultivované v suspenzi s biomasou narostlou na nosič ve formě biofilmu (Chudoba et al., 1991), viz obrázek 4.



Obrázek 4: Schematické znázornění funkce systému pro zpracování fugátu pracujícího na principu kombinace biomasy kultivované v suspenzi a v biofilmu

Při hydraulické době zdržení fugátu v nitrifikačním reaktoru dosahující při teplotě nad 20 °C alespoň 5 dnů se dokonce jeví jako reálná varianta funkce systému bez dosazovací nádrže i bez dodání nosiče biomasy, tedy provozování reaktoru v režimu chemostatu, viz obrázek 5 (Chudoba et al., 1991). Za těchto podmínek se totiž předpokládá, že rychlost růstu nitrifikačních organismů v reaktoru je vyšší než ztráty mikroorganismů odváděných odtokem z reaktoru s nitrifikovaným fugátem.



Obrázek 5: Schematické znázornění funkce systému pro zpracování fugátu pracujícího na principu chemostatu

Vzhledem k tomu, že fugát je v rámci provozu BPS zpravidla produkován dlouhodobě, je zřejmé, že aplikace jednorázového procesu pro nitrifikaci fugátu nepředstavuje příliš racionální řešení. Jednorázový systém má i další nevýhody, například velmi omezené možnosti postupné kultivace odolné kultury schopné nitrifikace v extrémních podmínkách panujících v prostředí fugátu (Švehla et al., 2017; Švehla et al., 2020). Proto má v praxi smysl uvažovat pouze o využití systémů s kontinuálním, nebo semikontinuálním průtokem s tím, že jako nejrationálnější se z výše nastíněných důvodů jeví kontinuální systém pracující v režimu CSTR.

2.3. Dosavadní zkušenosti s aplikací procesu nitrifikace jakožto metody pro zpracování fugátu

V ČR ani ve světě dosud nejsou v provozním měřítku žádné zkušenosti s aplikací procesu nitrifikace pro zpracování fugátu za účelem optimalizace využití v něm obsažených živin. V rámci dlouhodobých laboratorních testů a navazujících poloprovozních zkoušek však bylo jednoznačně prokázáno, že proces může být bez větších problémů iniciován i v prostředí obsahujícím fugát. Potvrzena byla i možnost dlouhodobého stabilního provozu nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát, přičemž bylo zjištěno, že regulací technologických a fyzikálně-chemických parametrů procesu je možno řídit účinnost převedení N-amon na oxidované formy dusíku i zastoupení N-NO_3^- i N-NO_2^- mezi konečnými produkty nitrifikace (Švehla et al., 2017; Švehla et al., 2020). Navzdory literárním předpokladům (Pitter, 1999), bylo zjištěno, že problémem nemusí být ani velice nízká hodnota pH v nitrifikačním reaktoru dosahující 4,5. Nitrifikace může s poměrně vysokou rychlostí přeměny N-amon dosahující až $0,7 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ probíhat i přes extrémně vysoké hodnoty CHSK ve fugátu pohybující se v řádu desítek tisíc mg/l (Švehla et al., 2020).

Možnost udržení vysoké aktivity nitrifikačních organismů v prostředí fugátu a dosažitelnost uspokojivého dlouhodobého provozu nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát byly v laboratorních a posléze i poloprovozních podmínkách jednoznačně potvrzeny (Švehla et al., 2020). Dalším úkolem, který bude spojen s řešením poměrně zásadních komplikací, je transformace procesu do provozních podmínek panujících v objektech reálných zemědělských bioplynových stanic a konstrukce reaktoru, který bude v rámci dané bioplynové stanice schopen zpracovat veškerou denní produkci fugátu, popřípadě její požadovanou část. Právě návrh postupů vedoucích k řešení tohoto úkolu je předmětem předkládané certifikované metodiky.

2.4. Obecné zásady pro výstavbu nitrifikačního reaktoru sloužícího ke zpracování fugátu

Předpokládá se výstavba nitrifikačního reaktoru v podobě betonové nádrže vybudované pod úrovní povrchu, popřípadě i nad úrovní povrchu. Tuto nádrž je zapotřebí

umístit tak, aby bylo možné co nejsnadněji do ní odvádět surový fugát. V závislosti na místních podmínkách se předpokládá instalace zařízení pokud možno v blízkosti separátoru fermentačního zbytku. Přestože v zásadě je možno pro zpracování fugátu nitrifikací využít i systém SBR či reaktor s kontinuálním průtokem blížící se svou hydraulickou charakteristikou pístovému toku i další varianty, v dalším textu se počítá s provozem reaktoru v podmínkách blížících se ideálnímu promíchávání v systému CSTR bez dosazovací nádrže, tedy provozovaného jako chemostat. Ten se jeví pro dané účely jako nejvhodnější z hlediska minimalizace inhibičních vlivů způsobených toxickými formami dusíku a z hlediska náročnosti instalace systému. S výhodou je možno tento systém provozovat s nosičem biomasy, který díky tvorbě biofilmu může podpořit průběh nitrifikačního procesu (viz kapitola 2.2).

Nádrž sloužící jako nitrifikační reaktor pro zpracování fugátu (obrázek 6) je potřeba vybavit rozvodem tlakového vzduchu, který zajistí aerobní podmínky nezbytné k uspokojivému průběhu procesu nitrifikace. Homogenizace fugátu a potřebný kontakt v něm obsaženého N-amon s nitrifikační biomasou budou také zajištěny provzdušňováním. Zdrojem tlakového vzduchu bude dmychadlo, z něj bude vzduch rovnoměrně rozváděn na celou plochu dna reaktoru. Distribuce vzduchových bublin do fugátu bude zajištěna vhodnými aeračními elementy (Chudoba et al., 1991).

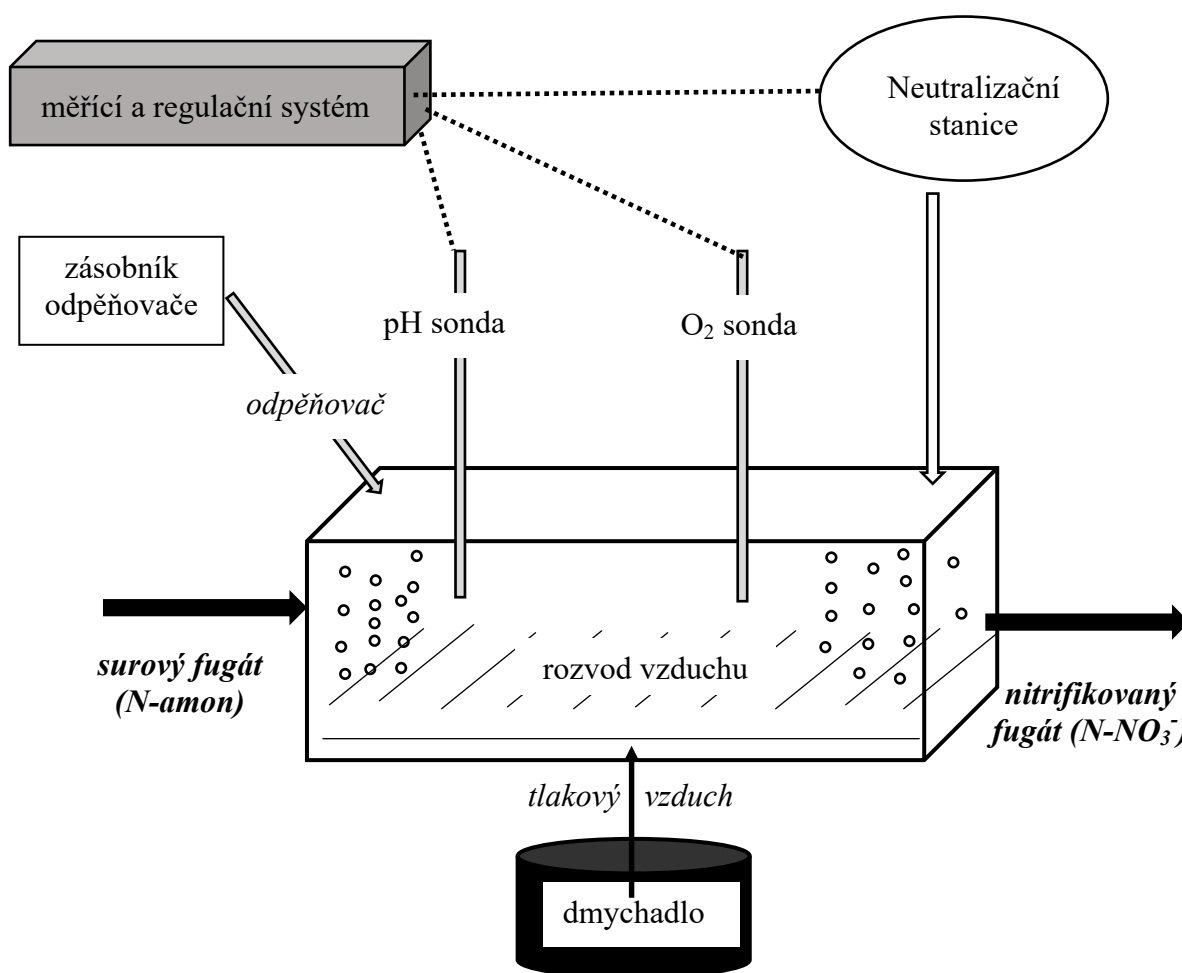
Při výstavbě reaktoru je zapotřebí zajistit kontinuální měření hodnoty pH v reaktoru a koncentrace kyslíku. Současně je nutné instalovat systém schopný v reaktoru udržovat potřebnou hodnotu pH (dávkování vápna či jiného alkalického činidla) a koncentraci kyslíku (řízení intenzity dodávání tlakového vzduchu z dmychadla). K tomu je možno využít běžné měřicí a regulační systémy dostupné na trhu. Je potřeba počítat s rizikem zvýšené tvorby pěny při provzdušňování fugátu v nitrifikačním reaktoru. Proto je nutno zajistit zásobník odpěňovače a z něj tuto látku do reaktoru dávkovat.

Průtok zpracovávaného fugátu reaktorem je účelné realizovat gravitačně – samospádem.

Základní vybavení reaktoru vychází z konstrukce tzv. aktivačních nádrží provozovaných běžně v rámci čištění odpadních vod (Chudoba et al., 1991). Jako optimální postup se při projektování reaktoru pro konkrétní bioplynovou stanici jeví oslovit společnost, která má zkušenosti s výstavbou tzv. aktivačních nádrží provozovaných v rámci městských i průmyslových čistíren odpadních vod. Ta může podle postupů navržených v rámci této metodiky vytvořit detailní projekt pro vybudování reaktoru. V každém případě se důrazně doporučuje před instalací systému provést laboratorní (popřípadě v závislosti na možnostech poloprovozní) testy přesně simulující stav v daném objektu BPS a teprve na základě jejich výsledků identifikovat optimální parametry pro zapracování nitrifikačního reaktoru a jeho dlouhodobou funkci v provozních podmínkách.

Z provozních důvodů může být výhodné rozdělit objem nitrifikačního reaktoru pro zpracování fugátu na několik paralelně provozovaných sekcí. Za těchto podmínek je minimalizováno riziko celkového kolapsu zařízení pro nitrifikaci fugátu, neboť v případě zhoršení funkce v jedné ze sekcí je možno velice rychle využít biomasu ze zbývajících sekcí k re-inokulaci problémové sekce. Zároveň toto řešení přináší možnost racionálnějšího přístupu k zapracování reaktoru, viz kapitoly 2.10.2. až 2.10.4.

Z hlediska vlastního provozu reaktoru se jako stěžejní jeví způsob iniciace nitrifikačního procesu, výkonnost reaktoru, účinnost převedení N-amon na oxidované formy dusíku a zastoupení konečných produktů nitrifikace. Zásadní měrou se pak na postupu instalace nitrifikačního reaktoru pro zpracování fugátu a na volbě jeho parametrů budou podílet místní podmínky panující v objektu konkrétní BPS. Těmto aspektům je věnován následující text.



Obrázek 6: Základní uspořádání nitrifikačního reaktoru pro zpracování fugátu

2.5. Iniciace nitrifikačního procesu

V rámci dosud realizovaných laboratorních a poloprovozních experimentů bylo opakovaně ověřeno, že zásadní je z hlediska stability provozu nitrifikačního reaktoru a z hlediska vlastností zpracovaného fugátu úspěšné zvládnutí fáze zapracování reak-

toru (Svehla et al, 2017; Švehla et al., 2020). Během této fáze je potřeba z inokula použitého pro zaočkování reaktoru postupně vyselektovat odolnou nitrifikující kulturu schopnou vysoké aktivity v extrémních podmínkách panujících v prostředí fugátu.

Jako inokulum pro zahájení provozu nitrifikačního reaktoru je v případě dodržení požadovaných hygienických opatření možno s výhodou použít tzv. aktivovaný kal, což je biomasa kultivovaná ve formě suspenze, která je odpovědná za proces biologického čištění v objektech mechanicko-biologických čistíren odpadních vod (Chudoba et al., 1991). V takovém případě je zapotřebí využít biomasu, o které je známo, že obsahuje dostatek nitrifikačních organismů. Tomuto požadavku zpravidla bez problémů vyhovuje aktivovaný kal z každé městské, resp. obecní, čistírny odpadních vod o velikosti větší než 500 EO (ekvivalentních obyvatel). Výhodné může být v případě dostupnosti i využití aktivovaného kalu odebraného v objektu průmyslové čistírny odpadních vod zpracovávající biologickou cestou odpadní vody se zvýšeným obsahem N-amon. V takovém případě je však nezbytné brát zřetel nejen na riziko výskytu patogenních mikroorganismů, ale také na riziko přítomnosti rizikových látek v aktivovaném kalu. V případě, že bude takový materiál k dispozici, se jako ideální zdroj inokula jeví biomasa z již provozovaného nitrifikačního reaktoru sloužícího ke zpracování fugátu v rámci provozu jiné bioplynové stanice (kapitola 2.10.5.). Tento scénář je však samozřejmě realizovatelný až po uvedení řešené technologie do praxe. Existuje také možnost kultivace vhodné biomasy v rámci poloprovozního zařízení omezené velikosti a následné využití vzniklé kultury pro zapracování provozního zařízení schopného zpracovat veškerou denní produkci fugátu, popřípadě její požadovanou část (kapitola 2.10.4.).

Pro dosažení bezproblémového průběhu nitrifikace s dusičnanovým dusíkem jako dominantním konečným produktem nitrifikace je klíčové, aby v okamžiku zahájení nitrifikačního procesu inokulum získané z biologického stupně čistírny odpadních vod nebylo podrobena příliš vysoké koncentraci FA ani FNA. Z tohoto pohledu se osvědčila varianta, kdy fugát je pozvolna přidáván do nitrifikačního reaktoru, ve kterém je původně obsaženo čisté inokulum. Fugát musí být do reaktoru dávkován v množství, které bude odpovídat zatížení systému dusíkem, při kterém budou organismy obou stupňů nitrifikace (AOB i NOB) schopny okamžitě zpracovávat veškerý svůj substrát (N-amon v případě AOB a N-NO_2^- v případě NOB) přítomný aktuálně v reaktoru. Toto realizovatelné zatížení systému ve fázi zapracování reaktoru bude při tom velice variabilní a závislé na celé řadě faktorů (aktuální teplota, vlastnosti použitého inokula, chemické složení zpracovávaného fugátu atd.). Za účelem minimalizace negativního působení FA a FNA v okamžiku zahájení provozu reaktoru se doporučuje v této fázi udržovat pH v reaktoru na hodnotě okolo 7,0.

2.6. Výkonnost systému

Dosažitelný výkon je naprosto zásadním parametrem nitrifikačního reaktoru pro zpracování fugátu, který bude rozhodující měrou determinovat náklady spojené s instalací a provozem systému. Bude přitom silně závislý na místních podmínkách panujících v areálu dané konkrétní BPS. Z tohoto pohledu bude velice důležité chemické složení fugátu, zásadní význam může mít také funkce separátoru fermentačního zbytku (vyšší obsah nerozpuštěných látek může výkon systému snížit).

Velmi důležitá bude z pohledu výkonu nitrifikačního reaktoru teplota, která determinuje rychlost všech biochemických procesů. Nitrifikační organismy, které mají klíčovou roli z pohledu funkce nitrifikačního reaktoru, jsou při tom na teplotu obzvláště citlivé (Chudoba et al., 1991; Pitter, 1999). Při teplotě okolo 20 °C je dle výsledků získaných v rámci studie Švehla et al. (2020) možno v optimálních podmínkách počítat s tím, že systém bude schopen transformovat cca 0,7 kg N-amon/(m³·d). Jako kritická hodnota teploty se dosud jeví cca 17 °C. Pod touto hodnotou se každý (byť i velmi mírný) pokles teploty může projevit i několikanásobným snížením výkonu systému. S cílem zajistit celoročně dostatečný výkon systému se jako ideální jeví varianta využití přebytečného tepla produkovaného v rámci provozu BPS k vyhřívání nitrifikačního reaktoru v zimním období. V případě záměru využít teplo produkované v rámci bioplynové stanice k zahřívání nitrifikačního reaktoru je zapotřebí technické řešení tohoto kroku konzultovat v závislosti na místních podmínkách se společností zabývající se dodávkou technologických celků pro bioplynové stanice, popřípadě pro čistírny odpadních vod. Je také zapotřebí v maximální možné míře využít vysoké teploty surového fermentačního zbytku, který opouští anaerobní reaktor BPS (ten je v ČR nejčastěji provozován v mesofilním režimu při teplotě v rozmezí 30 – 40 °C, někdy i více). Z hlediska provozu nitrifikačního reaktoru pro zpracování fugátu a jeho výkonu se tak jeví jako optimální provozovat separaci digestátu na separát a fugát bezprostředně po tom, co digestát anaerobní reaktor opustí a vyprodukovaný fugát okamžitě přepouštět do nitrifikačního reaktoru. V rámci předkládané metodiky se předpokládá celoroční provoz nitrifikačního reaktoru při teplotě v rozmezí 18 – 28 °C. Průběh poloprovozních experimentů naznačuje, že proces probíhající v daných podmínkách v nitrifikačním reaktoru může být exotermní, tudíž může docházet k samovolnému zahřívání směsi v reaktoru. I tuto skutečnost je možno využít za účelem maximalizace výkonu zařízení.

Konečný výkon nitrifikačního reaktoru ale nemusí být limitován pouze aktivitou mikroorganismů zainteresovaných v procesu nitrifikace. Je potřeba počítat s tím, že hlavním limitním faktorem určujícím výkon reaktoru může být i provzdušňování nitrifikačního reaktoru dostatečným přísunem kyslíku k nitrifikačním organismům. Přestup kyslíku z plynné fáze do fugátu může být zhoršen zejména přítomností většího množství inertních pevných částic. Důležitou roli může hrát také obsah biologicky

degradabilních organických látek ve fugátu. Při jejich vysokých koncentracích dochází pochopitelně v provzdušňovaném nitrifikačním reaktoru k jejich biologickému rozkladu v důsledku aktivity aerobních heterotrofních mikroorganismů spojené s intenzívní spotřebou kyslíku. V důsledku snižující se rozpustnosti kyslíku ve vodě s rostoucí teplotou nelze vyloučit ani situaci, kdy nárůst teploty v reaktoru může snížit dostupnost kyslíku v něm a následně snížit výkon systému.

Na kvantifikaci výkonu reaktoru pro zpracování fugátu je možno nahlížet z různých pohledů. Obecně je výkon každého biologického reaktoru dán množstvím substrátu, které jsou mikroorganismy schopny transformovat. V případě nitrifikačního reaktoru pro zpracování fugátu se tedy jedná o množství N-amon, které jsou mikroorganismy schopné v 1 m³ reaktoru za jeden den přetvořit na oxidované formy dusíku. Z hlediska provozovatele BPS však patrně bude zásadní informací spíše to, jaké množství fugátu bude reaktor schopen denně zpracovat, tedy bude ho zajímat zejména hydraulická doba zdržení fugátu v reaktoru, která bude v závislosti na denní produkci fugátu v objektu dané BPS určovat potřebný objem reaktoru. Z pohledu množství fugátu, které bude možno v reaktoru denně zpracovat, je faktorem, který může výkon systému významným způsobem ovlivnit, koncentrace N-amon ve fugátu. Pokud budeme například počítat s tím, že koncentrace N-amon ve fugátu bude pouze 1 g/l, pak při rychlosti konverze N-amon 0,7 kg/(m³·d) bude zapotřebí dosáhnout hydraulické doby zdržení fugátu v reaktoru cca 1,4 dne. V případě, že ale bude koncentrace N-amon ve fugátu dosahovat 5 g/l, bude potřebná doba zdržení činit 7,1 dne. To je poměrně zásadní skutečnost pro potenciální návrh výstavby nitrifikačního reaktoru v provozních podmínkách. Pokud budeme uvažovat například hypotetickou BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m³, dojdeme k tomu, že zatímco při koncentraci N-amon 1 g/l si vystačíme s objemem reaktoru cca 28 m³, při koncentraci N-amon 5 g/l již budeme potřebovat nádrž o objemu cca 142 m³.

2.7. Účinnost převedení N-amon na oxidované formy dusíku a zastoupení konečných produktů nitrifikace

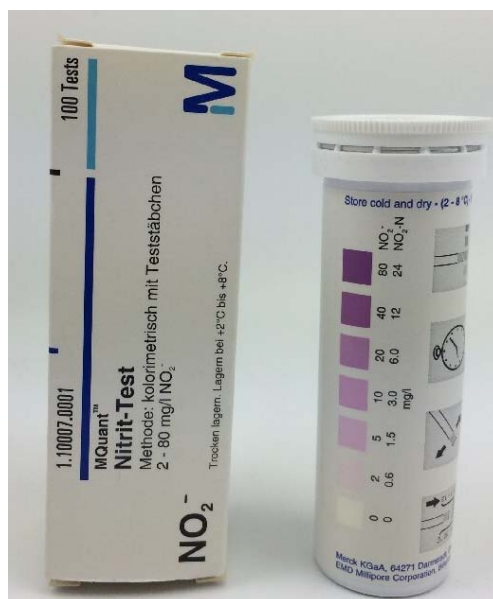
Z hlediska dalšího nakládání s nitrifikovaným fugátem, tedy fugátem, který prošel zpracováním v nitrifikačním reaktoru, budou stěžejními parametry popisujícími funkci nitrifikačního reaktoru a kvalitu vystupujícího nitrifikovaného fugátu účinnost převedení N-amon na oxidované formy a zastoupení konečných produktů nitrifikace v tomto materiálu. Za účelem minimalizace ztrát dusíku těkáním amoniaku je pochopitelně žádoucí, aby účinnost převedení N-amon na oxidované formy dusíku byla co nejvyšší. Při provozu nitrifikačního reaktoru závisí účinnost převedení N-amon na oxidované formy dusíku zejména na aktuálním zatížení reaktoru dusíkem a na hodnotě pH, významnou roli může hrát také koncentrace kyslíku, která by neměla klesat

pod 2 mg/l, teplota a chemické složení fugátu. V rámci laboratorních i poloprovozních experimentů bylo zjištěno, že za vhodných podmínek může účinnost převedení N-amon na oxidované formy stabilně a dlouhodobě s rezervou přesahovat 90 %. Zároveň je možno docílit zastoupení N-NO_3^- mezi konečnými produkty nitrifikace přesahující 95 % (Švehla et al., 2020).

Preferovaným finálním produktem nitrifikace fugátu v případě aplikace nitrifikovaného fugátu na zemědělskou půdu ať již přímo nebo po tepelném zahuštění je N-NO_3^- . Přítomnost N-NO_2^- je v těchto případech nežádoucí z hlediska jeho toxicity vůči živým organismům včetně rostlin (Court et al., 1962; Singh et al., 2007). Nevhodný je N-NO_2^- i z hlediska většího rizika sekundárních ztrát dusíku denitrifikací, které může N-NO_2^- jakožto meziprodukt denitrifikačního procesu (Chudoba et al., 1991) podlehnout podstatně snáze než N-NO_3^- . Pokud má být produkován N-NO_3^- bez významné akumulace N-NO_2^- , je nezbytné v nitrifikačním reaktoru udržovat stabilní podmínky umožňující plnou aktivitu AOB i NOB. Zejména je potřeba se vyvarovat skokových změn pH vedoucích ke kolísání koncentrace FA a/nebo FNA v systému. Zároveň je zapotřebí pracovat při nelimitované koncentraci rozpuštěného kyslíku, která by neměla poklesnout pod 2 mg/l. Zatížení systému dusíkem je nutno přizpůsobit místním podmínkám panujícím v objektu dané konkrétní BPS a aktuální teplotě. Z laboratorních i poloprovozních experimentů jednoznačně vyplývá, že regulace pH v nitrifikačním reaktoru umožňuje stabilní průběh procesu, přičemž může vést k optimalizaci účinnosti převedení N-amon na oxidované formy i k maximalizaci zastoupení N-NO_3^- mezi konečnými produkty nitrifikace (Švehla et al., 2020).

2.8. Monitoring stavu procesu a k tomu potřebné vybavení

Za účelem regulace pH v reaktoru je zapotřebí zajistit nepřetržité měření hodnoty pH. Kontinuálně je potřeba sledovat také koncentraci kyslíku v reaktoru. Je možno využít na trhu běžně dostupné měřicí a regulační systémy vybavené vhodnými čidly pro stanovení pH a koncentrace rozpuštěného kyslíku. Výhodou je případná možnost kontinuálního měření koncentrace základních chemických forem dusíku. V každém případě je nutno v pravidelných intervalech sledovat koncentraci N-NO_2^- v reaktoru, jejíž zvýšené hodnoty jsou nežádoucí. Sledování tohoto parametru se z hlediska minimalizace rizika narušení průběhu biologického procesu v reaktoru jeví jako naprosto zásadní. K orientačnímu stanovení aktuální koncentrace N-NO_2^- je možno použít snadno dostupné kolorimetrické „papírkové“ testy (obrázek 7).



Obrázek 7: Kolorimetrické testy pro orientační stanovení koncentrace $N\text{-NO}_2^-$

Ve fázi zpracování reaktoru se doporučuje toto stanovení realizovat jednou denně, ve fázi stabilního provozu postačí frekvence rozborů cca 2x za týden. Kompletní rozborů za účelem kvantifikace koncentrace jednotlivých forem dusíku a dalších parametrů (CHSK atd.) se v období stabilního provozu doporučuje v intervalu 1x za dva týdny.

2.9. Vliv místních podmínek

Jak již bylo opakovaně naznačeno v předcházejících kapitolách, postup při instalaci systému pro nitrifikaci fugátu a základní přístupy k provozu nitrifikačního reaktoru budou v mnoha ohledech silně závislé na místních podmínkách panujících v objektu dané BPS. Místní podmínky, zejména vlastnosti fermentačního zbytku, resp. fugátu, dostupnost prostoru pro instalaci zařízení atd. budou ovlivňovat nejen výkonnost reaktoru a ekonomickou náročnost instalace a provozu reaktoru, ale také kvalitu a vlastnosti nitrifikovaného fugátu a další parametry zařízení. Bez detailního zhodnocení podkladových materiálů každé potenciální instalace a bez předcházející laboratorní/poloprovozní simulace procesu není možno seriózně definovat optimální parametry zařízení. Zásadní význam má pro volbu strategie pro řízení procesu nitrifikace fugátu zamýšlené nakládání s výstupem procesu, tedy s nitrifikovaným fugátem. Důležité je, zda se počítá s následným tepelným zahušťováním nitrifikovaného fugátu či nikoliv.

V následujících kapitolách jsou presentovány základní vlastnosti nitrifikačního reaktoru, který by mohl být instalován v objektu hypotetické bioplynové stanice, u které jsou známy hlavní skutečnosti ovlivňující parametry systému. Zároveň se předpokládá, že proběhly laboratorní testy, na základě kterých mohlo být určeno cílové provozní zatížení systému a další charakteristiky. Hlavní pozornost je přitom

věnována způsobu zapracování reaktoru a z něj plynoucím nárokům na konstrukci zařízení. Fáze zapracování reaktoru se jeví jako stěžejní pro jeho uspokojivou funkci v rámci dlouhodobého provozu (Švehla et al., 2017; Švehla et al., 2020). Tuto iniciační fázi provozu systému je přitom možno uspokojivě řešit různými způsoby.

Postup vedoucí k určení parametrů systému bude v případě jakékoliv jiné konkrétní BPS vycházet z nastíněných řešení, pouze je potřeba zohlednit podmínky platné v dané situaci. Mezi tyto podmínky patří zejména koncentrace N-amon ve zpracovávaném fugátu a denní produkce fugátu v objektu dané BPS.

2.10. Optimalizace parametrů reaktoru z pohledu bezproblémového zapracování biologického procesu

V případě záměru řídit nitrifikační proces takovým způsobem, aby jeho dominantním finálním produktem byl N-NO_3^- se jeví jako optimální projektovat nitrifikační reaktor tak, aby se hydraulické podmínky co nejvíce blížily systému CSTR. Předpokládá se aplikace varianty založené na provozu reaktoru s biomasou kultivovanou ve formě suspenze s možností její kombinace s biofilmem rostoucím na vhodném nosiči biomasy v režimu chemostatu bez recirkulace nitrifikační biomasy (viz kapitola 2.2.).

2.10.1. Rychlé zapracování bez nutnosti rozdělení objemu reaktoru do sekcí

Při zahájení provozu nitrifikačního reaktoru v objektu reálné BPS je pochopitelně možno postupovat analogicky jako v případě laboratorních a poloprovozních zkoušek popsanych v práci Švehla et al. (2020). Je tedy možno nádrž, která bude sloužit jako nitrifikační reaktor pro zpracování fugátu v provozních podmínkách naplnit inokulem, typicky nitrifikujícím aktivovaným kalem odebraným v biologickém stupni čištění odpadních vod, a poté zahájit dávkování fugátu. Konkrétní postup zapracování bude samozřejmě silně závislý na místních podmínkách a je zapotřebí ho naplánovat na základě výsledků předchozích laboratorních/poloprovozních simulací kopírujících věrně situaci v objektu dané konkrétní bioplynové stanice.

Pokud má například dojít k zahájení provozu reaktoru pro nitrifikaci veškeré produkce fugátu v objektu hypotetické BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m^3 při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu 3,0 g/l, může být postup zapracování reaktoru následující:

Na základě realizace předběžných laboratorních testů bylo navrženo konstruovat reaktor na objemové zatížení dusíkem dosahující ve fázi stabilního provozu $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. To při dané denní produkci fugátu s danou koncentrací N-amon znamená, že reaktor bude ve fázi stabilního provozu pracovat při hydraulické době zdržení 6 dnů. V případě záměru provozovatele BPS zpracovat v reaktoru veškerou denní produkci fugátu to tedy bude znamenat nutnost vybudovat reaktor o objemu

120 m³. Při zahájení provozu se tento reaktor naplní z ½ (tedy na objem 60 m³) nitrifikujícím aktivovaným kalem. Následně se zahájí dávkování fugátu s intenzitou odpovídající počátečnímu zatížení dusíkem 0,05 kg/(m³·d) v podmínkách s regulací pH na 7,0. To při aktuálním objemu 60 m³ bude odpovídat 1,0 m³ fugátu za den. V tomto režimu bude reaktor pracovat po dobu 10 dnů, přičemž se objem tekutiny v reaktoru zvýší na 70 m³. Následně se průtok po dobu 10 dnů zvýší na 2 m³ za den, čímž bude po tomto období dosaženo objemu 90 m³. Po dobu dalších 10ti dnů bude průtok zvýšen na 4 m³ s tím, že v rámci této periody bude po cca osmi dnech celý reaktor (120 m³) zaplněn. Dále budou následovat další čtyři desetidenní periody, přičemž v rámci těchto period bude průtok reaktorem postupně zvyšován na 6, 8, 12 a 16 m³. Po dalších 10ti dnech bude průtok zvýšen na 20 m³/d, čímž bude dosaženo zpracování veškeré denní produkce fugátu. Celkově bude tedy zapracování reaktoru až do fáze jeho plného výkonu trvat cca 70 dnů s tím, že po celé toto období je potřeba počítat s poměrně vysokým obsahem inokula (tedy aktivovaného kalu) v produktu vystupujícím z nitrifikačního reaktoru. V následujícím období provozu reaktoru (dalších cca 80 - 100 dnů) by pak mohlo probíhat postupné snižování nastavené hodnoty pH v reaktoru ze 7,0 až na cca 4,5 a selekce nitrifikačních organismů směrem ke kultuře schopné vykazovat vysokou aktivitu i v podmínkách s extrémně nízkou hodnotou pH. Nejprve by v desetidenních periodách byl systém provozován postupně při hodnotách 6,5 a 6,0. Následovaly by cca třicetidenní periody s hodnotami pH 5,5 a 5,0. Následně by bylo možné přikročit k poklesu požadované hodnoty pH na cílových 4,5. V období změn v nastavené hodnotě pH by již ale odtok z reaktoru vykazoval vlastnosti optimální z hlediska jeho aplikace na zemědělskou půdu.

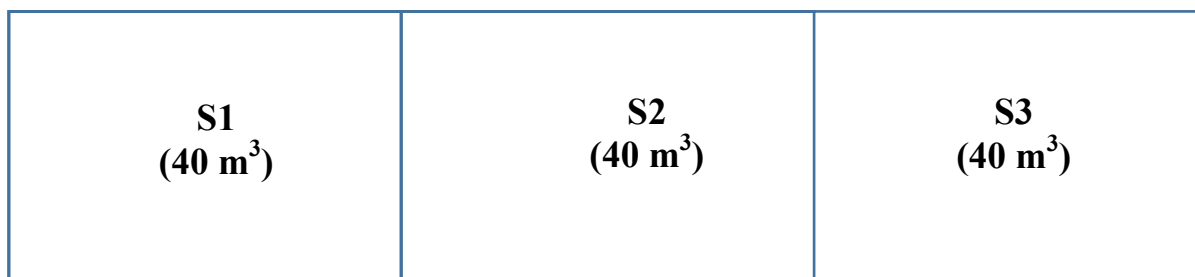
Nastíněné řešení povede k poměrně rychlému zapracování systému. Zároveň však v praxi přináší poměrně zásadní problémy. Pomineme-li nutnost zajistit a transportovat množství aktivovaného kalu z ČOV dosahující v závislosti na místních podmínkách desítky až stovky m³, mohou nastat i problémy s nakládáním s odtokem z nitrifikačního reaktoru. Je potřeba si uvědomit, že při zapracování reaktoru popsaným způsobem by poměrně dlouho (několik desítek dnů až několik měsíců) z reaktoru odcházel nitrifikovaný fugát, který by byl v poměrně vysokém poměru zředěn aktivovaným kalem použitým jako inokulum. Nakládání s takovým materiálem by přitom bylo patrně problematické.

2.10.2. Rozdělení reaktoru do paralelně provozovaných sekcí stejné velikosti

Z výše nastíněných důvodů se jeví jako smysluplné uvažovat o alternativních postupech zapracování reaktoru. Jako poměrně racionální se jeví řešení založené na rozdělení objemu budovaného reaktoru pro nitrifikaci do několika sekcí a postupném zaplňování těchto sekcí nitrifikovaným fugátem. Za těchto podmínek by bylo možno v jedné sekci o objemu podstatně menším než je objem celého nitrifikačního reaktoru vykultivovat mikrobiální kulturu schopnou v daných podmínkách efektivně zapracovat

vávat fugát a touto kulturou postupně zaplnit další sekce nitrifikačního reaktoru. Pokud se opět vrátíme k úvaze o zahájení provozu reaktoru pro nitrifikaci veškeré produkce fugátu v objektu hypotetické BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m^3 při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu $3,0 \text{ g/l}$, mohlo by zapracování reaktoru proběhnout následujícím způsobem:

I v tomto případě samozřejmě platí, že budeme potřebovat reaktor o objemu 120 m^3 a že pro stabilní provoz reaktoru bude potřeba zajistit hydraulickou dobu zdržení zpracovávaného fugátu 6 dnů. Reaktor o celkovém objemu 120 m^3 by však v tomto případě byl rozdělen příčkami na 3 stejně velké navzájem propojitelné/uzavíratelné sekce o objemu 40 m^3 (S1 – S3, viz obrázek 8).



Obrázek 8: Rozdělení reaktoru pro nitrifikaci fugátu do sekcí o stejném objemu

Prvotní inokulace by proběhla v S1. Přitom by bylo dostačující zajistit 20 m^3 nitrifikujícího kalu, který by byl napuštěn právě do S1. Následně se zahájí dávkování fugátu do S1 s intenzitou odpovídající počátečnímu zatížení dusíkem $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ v podmínkách s regulací pH na 7,0. To při aktuálním objemu kapaliny v S1 odpovídajícím 20 m^3 bude odpovídat cca $0,3 \text{ m}^3$ fugátu za den. V tomto režimu bude reaktor pracovat po dobu 10 dnů, přičemž se objem tekutiny v reaktoru zvýší na cca 23 m^3 . Následně se průtok po dobu 10 dnů zvýší na $0,6 \text{ m}^3$ za den, čímž bude po tomto období dosaženo objemu 29 m^3 . Po dobu dalších 10 dnů trvající periody bude průtok zvýšen na $1,2 \text{ m}^3$ s tím, že v průběhu této periody bude celá sekce S1 (40 m^3) zaplněna. V tomto okamžiku bude $\frac{1}{2}$ objemu kapaliny obsažené v S1 přečerpána do S2. Od tohoto okamžiku bude celkové množství surového fugátu dávkovaného do reaktoru rozděleno rovnoměrně do S1 a S2. Po skončení aktuální desetidenní periody budou následovat další dvě desetidenní periody, přičemž v rámci těchto period bude průtok reaktorem postupně zvyšován na $1,8$ a $2,7 \text{ m}^3/\text{d}$. V průběhu periody s průtokem $2,7 \text{ m}^3/\text{d}$ dojde k naplnění celé sekce S2. V tomto okamžiku bude z každé ze sekcí S1 a S2 odčerpána $\frac{1}{3}$ jejich objemu (cca $13,3 \text{ m}^3$) do S3. Od tohoto okamžiku bude celkové množství surového fugátu dávkovaného do reaktoru rozděleno rovnoměrně do S1, S2 a S3. Následovat bude dalších šest desetidenních period, v rámci kterých bude průtok postupně zvyšován na 4 ; 6 ; 9 ; 12 ; 16 a $20 \text{ m}^3/\text{d}$. V rámci první z těchto etap dojde k naplnění všech sekcí, tedy celého reaktoru a odtok z reaktoru se stane finálním výstupem využitelným k aplikaci na půdu. Při stabilním provozu reaktoru

s denním průtokem fugátu 20 m^3 bude fugát dávkován rovnoměrně do všech sekcí, tedy do každé z nich bude přiváděno cca $6,7 \text{ m}^3$ za den. Vzhledem k menšímu množství kalu použitého pro inokulaci systému (cca 17 % celkového objemu nitrifikačního reaktoru) se nepředpokládají větší problémy s využitím tohoto materiálu.

Celkově bude za popsanych podmínek zapracování reaktoru až do fáze jeho plného výkonu trvat cca 110 dnů s tím, že problém s nakládáním s odtokem z reaktoru, tedy nitrifikovaným fugátem by neměl být významný. Počítá se také s tím, že v rámci této periody bude možno nejen docílit požadovaného výkonu, ale zároveň i snížit provozní hodnotu pH z původních 7,0 na cca 5,5. Toto snížení bude realizováno ve třech krocích, přičemž nejprve dojde po 60ti dnech k poklesu na 6,5, následně po 75ti dnech na 6,0 a po 90ti dnech na 5,5. Další pokles pH bude realizován již při plném výkonu reaktoru, přičemž 120. den po zahájení provozu bude dosaženo hodnoty pH 5 a po 150ti dnech cílové hodnoty 4,5.

Provoz reaktoru rozděleného na více sekcí má výhodu v tom, že jednotlivé sekce je možno provozovat paralelně a v případě kolapsu biologického procesu v jedné ze sekcí by bylo možno obsah ostatních sekcí využít jako inokulum pro velice rychlé obnovení procesu v problematické sekci.

2.10.3 Rozdělení reaktoru do paralelně provozovaných sekcí různé velikosti

Tato varianta vychází z předchozího řešení, přičemž ve srovnání s ním dochází k další významné redukci množství inokula potřebného pro iniciaci provozu reaktoru. I v tomto případě budeme uvažovat o zahájení provozu reaktoru pro nitrifikaci veškeré produkce fugátu v objektu hypotetické BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m^3 při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu 3,0 g/l. Řešení by v tomto případě mohlo být následující:

Opět budeme potřebovat reaktor o celkovém objemu 120 m^3 a hydraulická doba zdržení zpracovávaného fugátu bude činit 6 dnů. V tomto případě však objem reaktoru bude rozdělen příčkami na 3 navzájem propojitelné/uzavíratelné sekce o různém objemu (S1 – objem 10 m^3 ; S2 – objem 30 m^3 ; S3 – objem 80 m^3 , viz obrázek 9).

Prvotní inokulace by proběhla v S1. Přitom by bylo dostačující zajistit 5 m^3 nitrifikujícího kalu, který by byl napuštěn právě do S1. Následně se zahájí dávkování fugátu do S1 s intenzitou odpovídající počátečnímu zatížení dusíkem $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ v podmínkách s regulací pH na 7,0. To při aktuálním objemu kapaliny v S1 odpovídajícím 5 m^3 bude odpovídat cca $0,08 \text{ m}^3$ fugátu za den. V tomto režimu bude reaktor pracovat po dobu 10 dnů, přičemž se objem tekutiny v reaktoru zvýší na cca $5,8 \text{ m}^3$. Následně se průtok po dobu 10 dnů zvýší na $0,2 \text{ m}^3$ za den, čímž bude po tomto období dosaženo objemu $7,8 \text{ m}^3$. Po dobu dalších 10ti dnů bude průtok zvýšen na $0,4 \text{ m}^3$ s tím, že v rámci této periody bude po cca šesti dnech celá sekce S1 (10 m^3) zaplněna. V tomto okamžiku bude veškerá kapalina obsažená v S1 přečerpána do S2 a surový

fugát bude dále přiváděn do této sekce. Po skončení aktuální desetidenní periody budou následovat další dvě desetidenní periody, přičemž v rámci těchto period bude průtok reaktorem postupně zvyšován na 0,6 a 0,9 m³/d. V této fázi se celý objem kapaliny (cca 27 m³) přečerpá do S3, přičemž do S3 bude zaveden také vstupní surový fugát. Následovat budou další 3 desetidenní periody, v rámci kterých bude průtok postupně zvyšován na 1,4; 2,0 a 2,8 m³/d. V rámci poslední z těchto etap dojde k naplnění S3, nitrifikovaný fugát bude z S3 částečně přečerpán do S1 a S3 tak, aby kapacita všech sekcí byla naplněna cca ze 67 %. Surový fugát bude od tohoto okamžiku rozváděn do všech sekcí v množství odpovídajícím podílu dané sekce na celkovém objemu reaktoru.

S1 (10 m³)	S2 (30 m³)	S3 (80 m³)
--	--	--

Obrázek 9: Rozdělení reaktoru pro nitrifikaci fugátu do jednotlivých sekcí o různém objemu

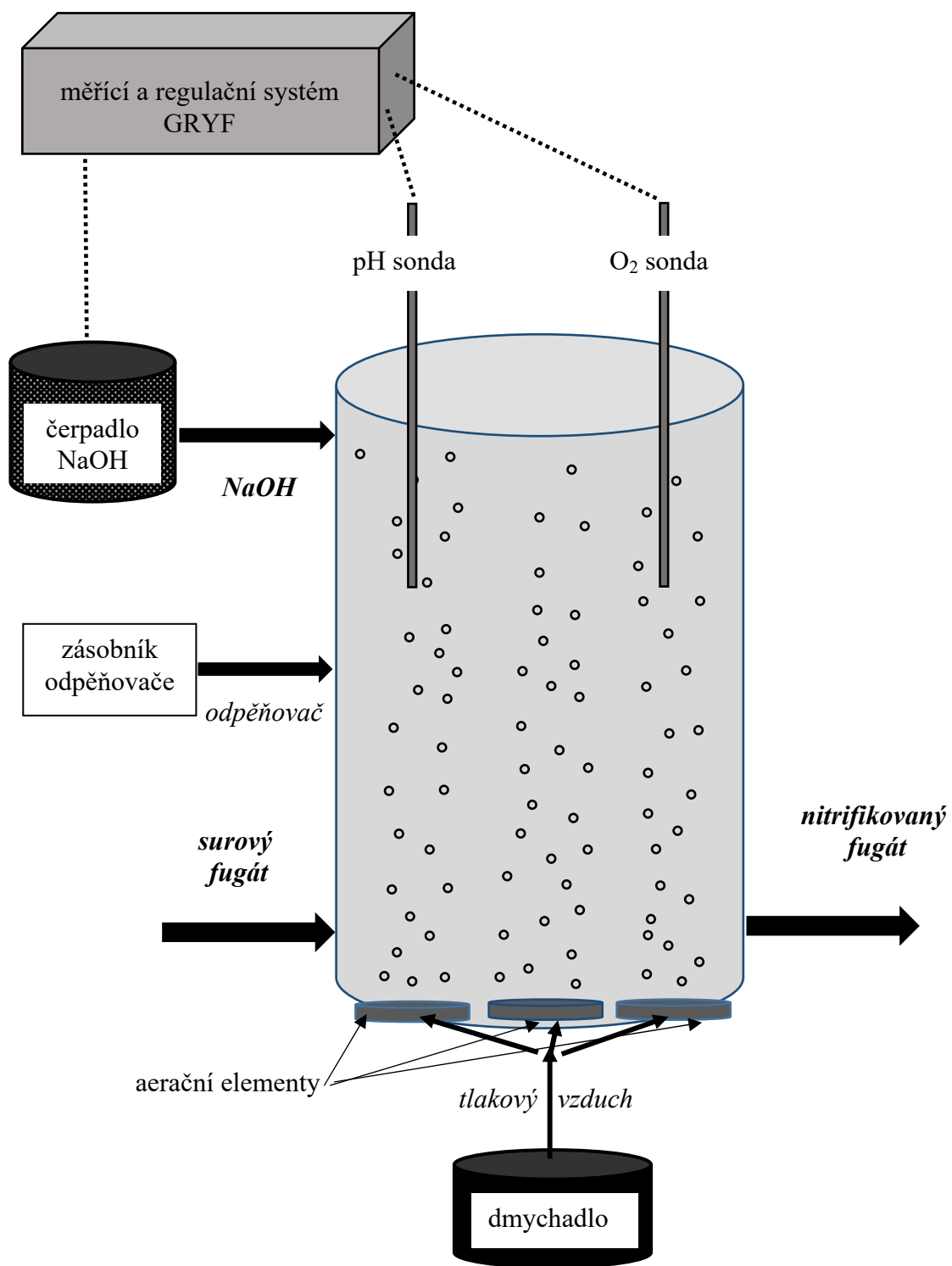
Jakmile budou všechny sekce zaplněny, stane se odtok z reaktoru finálním výstupem využitelným k aplikaci na půdu. Vzhledem k minimálnímu množství kalu použitého pro inokulaci systému se nepředpokládají sebemenší problémy s využitím tohoto materiálu. Za účelem dosažení požadovaného denního průtoku (20 m³/d) bude následovat dalších 6 desetidenních period, v rámci kterých bude denní průtok postupně zvyšován na 4, 6, 9, 12, 16 a 20 m³/d. Celkově bude za popsanych podmínek zapracování reaktoru až do fáze jeho plného výkonu trvat cca 130 dnů s tím, že nenastane problém s nakládáním s odtokem z reaktoru. Počítá se také s tím, že v rámci této periody bude možno nejen docílit požadovaného výkonu, ale zároveň i snížit provozní hodnotu pH z původních 7,0 na cca 5,0. Toto snižování by proběhlo ve čtyřech krocích obdobně jako v případě reaktoru rozděleného na sekce stejné velikosti. Finální hodnoty 4,5 pak bude možno docílit nejpozději 30 dnů po dosažení požadovaného výkonu reaktoru.

Popsané řešení má samozřejmě výhody (i nevýhody) vyplývající z řešení prezentovaného v rámci předcházející kapitoly. Hlavní předností ve srovnání s ním je minimalizace množství potřebného inokula, nevýhoda může spočívat v nutnosti nerovnoměrné distribuce fugátu do jednotlivých sekcí a v nepatrném prodloužení celkové doby zapracování systému.

2.10.4. Využití mobilní jednotky pro kultivaci nitrifikační biomasy

Tento postup je založen na předpokladu, že před vlastním uvedením nitrifikačního reaktoru do provozu bude v areálu řešené bioplynové stanice umístěna poloprovozní jednotka, která následně poslouží k inokulaci provozního zařízení. S výhodou je možno za tímto účelem využít mobilní zařízení, které bude schopno iniciovat proces postupně v areálech různých bioplynových stanic. Poté, co proběhne zapracování reaktoru v rámci dané bioplynové stanice, bude tedy možno mobilní jednotku transportovat do objektu jiné bioplynové stanice a tam zahájit zapracování dalšího nitrifikačního reaktoru schopného zpracovat veškerou denní produkci fugátu. Jako tato mobilní jednotka může posloužit například poloprovozní nitrifikační reaktor pro zpracování fugátu vyvinutý v rámci řešení projektu NAZV č. QK1710176. Diskutovaná varianta přináší možnost realizovat zdlouhavou kultivaci vhodné kultury ve velice malém objemu a navíc zcela mimo vlastní systém, který bude sloužit v provozních podmínkách jako nitrifikační reaktor pro zpracování veškeré denní produkce fugátu či její požadované části.

Základní schéma mobilní jednotky je uvedeno na obrázku 10. Vlastní poloprovozní reaktor je zachycen na obrázku 11. Systém pracuje na principu CSTR v režimu chemostatu, tedy bez recirkulace nitrifikační biomasy (kapitola 2.2). Pracovní objem tohoto reaktoru činí 1 m³. Hodnotu pH a koncentraci rozpuštěného kyslíku je možno měřit a regulovat s využitím systému GRYF XBP (GRYF HB, spol. s r.o.). Dle požadované hodnoty pH je systém schopen spustit čerpadlo s roztokem NaOH, který zajistí dosažení požadované hodnoty v reaktoru. Transport tekutin zajišťují peristaltická čerpadla PCD 1082 a PCD 21 (Kouřil dávkovací čerpadla, ČR). Vzduch zajišťující aerobní podmínky v reaktoru je do systému vháněn pomocí membránového dmychačla Secoh JDK-S-500 (Secoh, Japonsko). Rovnoměrnou distribuci vzduchových bublin v celém objemu reaktoru zajišťují tři aerační elementy Edi FlexAir Disc 9“ Micro, (Environmental Dynamics Inc., USA).



Obrázek 10: Základní schéma mobilní jednotky pro kultivaci nitrifikační biomasy



Obrázek 11: Poloprovozní reaktor využitelný jako součást mobilní jednotky pro kultivaci nitrifikační biomasy zpracovávající fugát

Zpracování biologického procesu probíhajícího v popsané mobilní jednotce může probíhat paralelně s výstavbou provozního reaktoru v areálu dané bioplynové stanice. Tím by byly eliminovány časové prodlevy spojené s iniciací procesu v takto malém objemu. Při zahájení provozu mobilní jednotky by celý objem reaktoru této jednotky byl naplněn inokulem, předpokládáme použití aktivovaného kalu odebraného v biologickém stupni městské čistírny odpadních vod. Poté by došlo k zahájení dávkování fugátu. Další postup by pak pochopitelně vycházel z místních podmínek, dále uvádíme modelovou situaci pro hypotetickou konkrétní BPS. Před vlastní iniciací procesu v mobilní jednotce se za účelem minimalizace času nezbytného pro dosažení optimálních parametrů systému jako účelné jeví realizovat simulaci procesu v laboratorních podmínkách.

Předpokládáme opět situaci, ve které bude naším záměrem realizovat nitrifikaci veškeré produkce fugátu v objektu hypotetické BPS o instalovaném elektrickém vý-

konu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m^3 při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu $3,0 \text{ g/l}$. Z laboratorních testů vyplynulo jako optimální cílové zatížení nitrifikačního reaktoru dusíkem $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. V takovém případě by zapracování poloprovozního reaktoru a následně provozního zařízení schopného zpracovat veškerou denní produkci fugátu mohlo proběhnout následujícím způsobem:

Fugát bude do mobilní jednotky zpočátku dávkován s intenzitou odpovídající počátečnímu zatížení dusíkem $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ v podmínkách s regulací pH na 7,0. Při dané koncentraci N-amon ve fugátu $3,0 \text{ g/l}$ a objemu reaktoru 1 m^3 to bude znamenat počáteční průtok cca 17 l za den. V tomto režimu bude reaktor pracovat po dobu 10 dnů. Následně se průtok po dobu 10 dnů zvýší na 35 l za den a v rámci dalších desetidenních period postupně na 50, 70, 100, 130 a 170 l . Tím bude po 50ti dnech dosažen cílový výkon reaktoru cca $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. Současně s nárůstem zatížení poloprovozního reaktoru bude snižována provozní hodnota pH. Po třiceti dnech dojde k jejímu snížení ze 7,0 na 6,5, po čtyřiceti pěti dnech na 6,0 a po šedesáti dnech na 5,5. V rámci provozu mobilní jednotky po dobu dalších 60ti dnů (již při cílovém zatížení dusíkem $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) bude možno docílit další selekci nitrifikačních organismů směrem k odolné kultuře schopné vysoké aktivity i při extrémně nízkých hodnotách pH a provozní hodnotu pH bude možno upravit na 4,5. Jakmile toho bude dosaženo, začneme odtok z mobilní jednotky shromažďovat do IBC kontejneru situovaného za ní. Nitrifikovaný fugát zachycený v IBC kontejneru bude následně využit k inokulaci plně provozního reaktoru pro nitrifikaci fugátu. Doporučuje se zajistit provzdušňování IBC kontejneru umožňující dosáhnout v této nádobě koncentraci kyslíku alespoň 1 mg/l .

Předpokládá se analogické členění plně provozního reaktoru jako v případě uvedeném v kapitole 2.10.3. To znamená, že reaktor, jehož celkový objem bude vzhledem k návrhovým podmínkám činit 120 m^3 , bude rozdělen na tři sekce o objemu 10 (S1), 30 (S2) a 80 m^3 (S3). Po naplnění celého objemu IBC kontejneru bude celý jeho obsah odčerpán do S1. Zároveň bude do S1 zaveden odtok z mobilní jednotky (průtok cca $0,17 \text{ m}^3/\text{d}$) a surový fugát, také v množství odpovídajícím průtoku $0,17 \text{ m}^3/\text{d}$. Takto bude v okamžiku zahájení procesu v S1 dosaženo zatížení dusíkem analogické jako v mobilní jednotce s tím, že s rostoucím objemem směsi v reaktoru bude zatížení postupně snižováno, a díky tomu bude možné postupně zvyšovat průtok surového fugátu. Po pěti dnech by měl být objem směsi v S1 cca $2,7 \text{ m}^3$ a průtok surového fugátu bude možno zvýšit na cca $0,46 \text{ m}^3/\text{d}$. Po další 5ti denní periodě bude denní průtok surového fugátu možno zvýšit na $0,80 \text{ m}^3/\text{d}$. V této fázi bude zaplněna sekce S1. V okamžiku, kdy k tomu dojde, bude veškerá kapalina obsažená v S1 přecherpána do S2 a bude zahájeno postupné naplňování sekce S2. V dalších pětidenních periodách bude možno denní průtok surového fugátu postupně zvyšovat na 1,4 a $2,4 \text{ m}^3$, přičemž na konci periody s denním průtokem $2,4 \text{ m}^3$ dojde k úplnému zaplně-

ní S2. V okamžiku, kdy k tomu dojde, bude veškerá kapalina obsažená v S2 přečerpána do S3 a bude zahájeno postupné naplňování sekce S3. Dále budou následovat další dvě pětidenní periody, v rámci kterých bude docházet k postupnému zvyšování průtoku surového fugátu na 4,2 a 7,2 m³ za den, přičemž v průběhu periody s denním průtokem 7,2 m³ dojde k úplnému zaplnění S3 o objemu 80 m³. V této fázi bude tedy celková kapacita provozního reaktoru (120 m³) zaplněna ze dvou třetin. V okamžiku, kdy k tomu dojde, bude z S3 část směsi přepuštěna do S1 a S2 tak, aby objem kapaliny představoval ve všech sekcích 2/3 z jejich celkové kapacity. V sekci S1 bude tedy cca 6,7 m³, v sekci S2 20 m³ a v sekci S3 cca 53,3 m³ zpracovávaného fugátu. Od tohoto okamžiku bude surový fugát do jednotlivých sekcí přiváděn v množství odpovídajícím jejich podílu na celkovém objemu provozního reaktoru. Do S1 bude tedy přiváděno cca 8,3 % zpracovávaného množství, do S2 cca 25 % a do S3 cca 66,7 % z celkového množství surového fugátu přiváděného do systému. Zároveň bude dále pokračovat zvyšování průtoku zpracovávaného fugátu, přičemž v následujících pětidenních periodách dojde postupně k jeho navýšení na 12,5 a 20,0 m³ za den. Tím bude po 45ti dnech od zahájení plnění S1 dosaženo zpracování veškeré denní produkce fugátu. Jakmile budou všechny sekce zaplněny, stane se odtok z reaktoru finálním výstupem využitelným k aplikaci na půdu. Po celou dobu fáze zapracování provozního reaktoru bude do plně provozního reaktoru přidáván také odtok z poloprovozního reaktoru za účelem obohacování systému o nitrifikační bakterie. Poté již bude možno tento proud odstavit, neboť množství nitrifikačních organismů s ním přicházejících do plně provozního reaktoru již bude z pohledu celkového objemu plně provozního reaktoru zanedbatelné. Přestože fáze zapracování mobilní jednotky bude dosti časově náročná (bude trvat cca 4 měsíce), fáze zapracování provozního reaktoru již bude poměrně rychlá a za výše popsanych podmínek bude trvat cca 45 dnů. To představuje ve srovnání s výše uvedenými variantami zapracování reaktoru značnou výhodu.

2.10.5. Využití inokula z již funkční provozní jednotky pro zpracování fugátu

Tato varianta počítá s tím, že v době výstavby nitrifikačního reaktoru v objektu dané BPS již bude v provozu podobné zařízení v areálu jiné BPS. Taková skutečnost může významným způsobem usnadnit zapracování dalších reaktorů pro nitrifikaci fugátu. Přestože je potřeba počítat s tím, že rozdíly v místních podmínkách panujících v objektech dvou řešených BPS mohou být významné a z těchto důvodů bude potřeba určitý čas pro dosažení cílové aktivity nitrifikačních mikroorganismů, je možno očekávat, že proces zapracování systému bude ve srovnání s předcházejícími variantami významně urychlen. I zde pochopitelně přicházejí v úvahu různé varianty řešení, níže je v krátkosti nastíněn postup za předpokladu, že objem reaktoru bude, resp. nebude, rozdělen na více sekcí. Stále předpokládáme, že hodláme zpracovávat fugát z BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m³ při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu 3,0 g/l, celkový objem nitrifikačního reaktoru

bude činit 120 m^3 , hydraulická doba zdržení fugátu v reaktoru 6 dnů a cílové zatížení nitrifikačního reaktoru dusíkem $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. Jako inokulum bude využit „čerstvý“ odtok ze stávajícího nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát, který prošel tímto reaktorem v ideálním případě maximálně 1 týden před odběrem. Předpokládá se, že toto inokulum je schopné vykazovat uspokojivou aktivitu při pH 4,5.

Za předpokladu, že nitrifikační reaktor nebude rozdělen do jednotlivých sekcí, můžeme postupovat například takto:

Při zahájení provozu se tento reaktor naplní z $\frac{1}{2}$ (tedy na objem 60 m^3) nitrifikovaným fugátem sloužícím jako inokulum. Následně se zahájí dávkování fugátu s intenzitou odpovídající $\frac{1}{2}$ cílového zatížení dusíkem, tedy $0,25 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ v podmínkách s regulací pH na 4,5, což bude zároveň cílová hodnota pH. Při aktuálním objemu 60 m^3 bude za daných podmínek průtok zpracovávaného fugátu činit 5 m^3 fugátu za den. V tomto režimu bude reaktor pracovat po dobu 10 dnů, přičemž se objem tekutiny v reaktoru zvýší na 110 m^3 . Následně se průtok po dobu 10 dnů zvýší na 8 m^3 za den. V rámci tohoto období dojde k zaplnění celého reaktoru a od tohoto momentu bude v zásadě možné nitrifikovaný fugát odtékající z reaktoru využívat přímo jako zdroj živin pro výživu rostlin, popřípadě může docházet k jeho dalšímu zpracování. Následovaly by další tři desetidenní periody, v rámci kterých by byl průtok surového fugátu postupně zvýšen na 12, 16 a 20 m^3 za den. Tím by již po cca 40ti dnech bylo možno zpracovat veškerou denní produkci fugátu za cílových podmínek procesu.

V případě, že by objem provozního nitrifikačního reaktoru (120 m^3) byl rozdělen například na tři stejně velké sekce o objemu 40 m^3 (viz obrázek 8), byl by postup zapracování systému v podstatě stejný jako v případě reaktoru bez rozdělení do sekcí (viz předcházející odstavec), s tím rozdílem, že množství fugátu dávkované aktuálně do jednotlivých sekcí by bylo mezi tyto sekce po celou dobu rovnoměrně rozděleno. I v tomto případě platí, že plného výkonu reaktoru by bylo dosaženo po cca 40ti dnech. Celkové množství fugátu dávkovaného do reaktoru za jeden den by v jednotlivých desetidenních periodách činilo postupně 5, 8, 12 a 16 m^3 . Do každé sekce by v rámci jednotlivých period byla dávkována $\frac{1}{3}$ z tohoto množství fugátu. I v tomto případě platí, že po cca 40ti dnech od zahájení provozu reaktoru by bylo možno zpracovat veškerou denní produkci fugátu, tedy 20 m^3 za den.

2.10.6. Zapracování biologického procesu – porovnání jednotlivých variant

Každá z výše presentovaných strategií zapracování procesu nitrifikace v reaktoru zpracovávajícím v provozních podmínkách fugát má pochopitelně své specifické výhody i typické nedostatky. Ačkoliv se všechny jeví jako využitelné, konečná volba konkrétní varianty bude determinována zejména místními podmínkami panujícími v objektu dané konkrétní BPS. Zmíněné varianty jsou pouze popisy určitých modelů-

vých situací, v řadě ohledů je možno v praxi jednotlivé navržené strategie vzájemně kombinovat a/nebo různě modifikovat. Výhody a nevýhody navržených strategií jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1: Strategie pro zapracování nitrifikačního reaktoru - porovnání variant

varianta zapracování	výhody	nevýhody
bez členění na sekce; inokulace kalem z ČOV	• technicky nenáročné	• dlouhá doba zapracování • problematické vlastnosti nitrifikovaného fugátu po zaplnění reaktoru • v případě kolapsu procesu nutno zapracovat znovu celý reaktor
členění na stejně velké sekce; inokulace kalem z ČOV	• snížení množství potřebného inokula • lepší vlastnosti nitrifikovaného fugátu • v případě kolapsu procesu v jedné sekci možno řešit rychlou inokulací z ostatních sekcí	• technicky náročnější pro výstavbu i provoz • vlastnosti nitrifikovaného fugátu po zaplnění reaktoru stále nejsou optimální
členění na různě velké sekce; inokulace kalem z ČOV	• minimalizace množství potřebného inokula • uspokojivé vlastnosti nitrifikovaného fugátu po zaplnění reaktoru • v případě kolapsu procesu v jedné sekci možno řešit rychlou inokulací z ostatních sekcí	• technicky náročnější pro výstavbu i provoz • nerovnoměrné dávkování fugátu do jednotlivých sekcí • prodloužení fáze zapracování reaktoru
využití mobilní jednotky pro kultivaci nitrifikační biomasy	• minimalizace času potřebného k zapracování provozního reaktoru • minimální potřebné množství inokula • ideální vlastnosti nitrifikovaného fugátu ihned po zaplnění provozního reaktoru • minimalizace času potřebného k zapracování provozního reaktoru	• nutnost dlouhodobého provozu poloprovozní jednotky • nutnost členění provozního reaktoru na různě velké sekce a problémy z toho plynoucí
inokulace fugátem z již funkční provozní jednotky pro zpracování fugátu	• ideální vlastnosti nitrifikovaného fugátu ihned po zaplnění reaktoru • minimalizace času potřebného k zapracování provozního reaktoru • možno aplikovat s členěním provozního reaktoru na sekce i bez něj	• dosud není v provozu žádné zařízení využitelné jako zdroj inokula

2.10.7. Zapracování biologického procesu – shrnutí

V rámci předcházejících kapitol byly presentovány možnosti postupu zapracování nitrifikačního reaktoru zpracovávajícího fugát v provozních podmínkách bioplynové stanice, ve které panují určité modelové podmínky. Je zřejmé, že konkrétní postup se při každé případné instalaci systému bude lišit v závislosti na proměnlivosti místních podmínek. Je velice pravděpodobné, že v některých případech nebude možno dosáhnout uváděných hodnot zatížení nitrifikačního reaktoru dusíkem, popřípadě zmiňovaných hodnot pH. Nelze vyloučit, že za účelem maximalizace výkonu reaktoru bude zapotřebí například zvýšit provozní hodnotu pH, popřípadě zvýšit zastoupení nitrifikačních bakterií v reaktoru přidávkou nosiče biomasy, což umožní nárůst biofilmu v reaktoru (viz kapitola 2.2.). Vždy bude možno vycházet z nastíněných postupů zapracování reaktoru, nicméně bude zapotřebí zohlednit místní podmínky a provést nejprve simulaci procesu v laboratorních či poloprovozních podmínkách.

III. Srovnání novosti postupů

Nitrifikace byla představena jako postup aplikovatelný pro zpracování fugátu vznikajícího při provozu bioplynových stanic teprve v posledních letech. Je zřejmé, že přestože jsou podmínky panující ve fugátu pro běžné nitrifikační organismy krajně nevhodné, je možno vhodným technologickým přístupem k řízení provozu nitrifikačního reaktoru dosáhnout vysoké aktivity těchto mikroorganismů. Tato skutečnost byla opakovaně potvrzena v rámci dřívějších studií vycházejících z laboratorních a poloprovozních simulací procesu (Svehla et al., 2017; Švehla et al., 2020). Jako v praxi těžko realizovatelná se však dosud jevila iniciace procesu v plně provozních podmínkách reálné BPS. Bez detailního popisu návrhů technologických podmínek pro zapracování systému a jeho stabilní provoz realizovatelných v praxi by byla navržená technologie v zásadě bezcenná. Předkládaná certifikovaná metodika přináší právě zmíněné dosud chybějící informace nezbytné pro instalaci zařízení pro nitrifikaci fugátu v objektech reálných BPS, které bude schopné zpracovat veškerou denní produkci fugátu či její požadovanou část.

IV. Popis uplatnění metodiky

Tato certifikovaná metodika shrnuje návrhy pro technické, resp. technologické, řešení systému pro nitrifikaci fugátu v plně provozních podmínkách. Primárně je určena provozovatelům zemědělských či jiných BPS, kterým přináší shrnutí variant, které přicházejí v úvahu pro racionalizaci využití živin obsažených ve fugátu.

Postupy presentované v rámci této certifikované metodiky mohou být využity společnostmi zabývajícími se konstrukcí a dodávkou technologických celků pro zemědělské bioplynové stanice, vzhledem k povaze procesů probíhajících v nitrifikač-

ním reaktoru zpracovávajícím fugát lze předpokládat i zájem subjektů orientovaných primárně na distribuci systémů pro čištění odpadních vod. Předkládaná metodika nemá ambici sloužit jako finální projekt, podle kterého bude přímo realizována výstavba reaktoru. Příprava takových podkladů je v kompetenci zmíněných společností. Předkladatelé metodiky jsou však přesvědčeni, že vzhledem k poměrně velké náročnosti provozu systému na teoretické znalosti a na zkušenosti s řízením průběhu biologického procesu probíhajícího v reaktoru jsou postupy navržené v rámci metodiky nezbytným podkladem pro zahájení přípravy finálního projektu, který bude realizován vhodnou společností.

Identifikace vhodných variant pro zpracování fugátu může ve svém konečném důsledku vést k plošnější aplikaci separace digestátu na separát a fugát v objektech BPS, neboť současné problémy spojené s nakládáním s fugátem, jeho omezené využití, resp. absence vhodných postupů jeho zpracování jako odpadní vody, odrazují řadu provozovatelů BPS od instalace zařízení pro separaci fermentačního zbytku na pevnou a kapalnou frakci.

Informace presentované v rámci této certifikované metodiky mohou být cenné i pro zemědělskou praxi, neboť přináší potenciální technologická řešení pro minimalizaci ztrát dusíku v případě využívání fugátu, resp. fermentačního zbytku, jakožto zdroje dusíku pro výživu rostlin a pro minimalizaci negativních vlivů nakládání s fugátem na stav životního prostředí.

V neposlední řadě může být tato certifikovaná metodika zdrojem informací pro výzkumné pracovníky a studenty vysokých škol zaměřené na oblasti provozu BPS, výživy rostlin a čištění specifických typů odpadních vod, pro které může být mimo jiné i zajímavou inspirací pro navazující výzkumné aktivity.

V. Ekonomické aspekty

V souladu s úvahami presentovanými v rámci předcházejících kapitol stále předpokládáme, že hodláme zpracovávat veškerou produkci fugátu z BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m³ při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu 3,0 g/l. Celkový objem nitrifikačního reaktoru bude činit 120 m³, hydraulická doba zdržení fugátu v reaktoru bude 6 dnů a cílové zatížení nitrifikačního reaktoru dusíkem bude dosahovat 0,5 kg/(m³·d).

Investiční náklady spojené s instalací systému pro nitrifikaci fugátu budou spojeny s výstavbou nitrifikačního reaktoru. Za předpokladu, že objem reaktoru nebude rozdělen na jednotlivé sekce, bude možno novou nádrž uvedené velikosti vybudovat za cca 860 000 tis. Kč. V případě rozdělení objemu nádrže na tři sekce vzrostou náklady na cca 1 200 000 Kč. Čerpadla pro dávkování fugátu a příslušenství k nim bude možno zajistit s náklady cca 1 100 000 Kč. V případě dávkování do nádrže rozdělené na tři sekce by pak došlo k nárůstu těchto nákladů na cca 1 400 000 Kč. V řadě přípa-

dů však nebude zapotřebí budovat pro nitrifikaci fugátu kompletně novou nádrž, nýbrž bude možno pro instalaci nitrifikačního reaktoru využít stávající skladovací prostory pro fermentační zbytek, resp. pro fugát, popřípadě jiné volné prostory, které budou pouze vhodným způsobem upraveny.

Podstatnou složkou investičních nákladů bude pořízení dmychadel pro aeraci nitrifikačního reaktoru a zařízení pro distribuci tohoto vzduchu do nádrže (potrubí pro rozvod vzduchu, aerační elementy). Nároky na výkon dmychadel budou silně ovlivněny místními podmínkami, zejména funkcí separátoru digestátu, chemickým složením fugátu a provozní teplotou. Na základě výsledků dosud provedených testů je možno náklady na pořízení dmychadel sloužících k provzdušňování nádrže uvedené velikosti v závislosti na místních podmínkách odhadnout v rozsahu cca 3 000 000 – 7 200 000 Kč, přičemž tyto náklady budou v každém případě představovat největší část celkových investičních nákladů spojených s instalací systému. Systém pro distribuci vzduchu do výše specifikované nádrže je možno pořídit za cca 350 000 Kč, aerační elementy cca za 300 000 Kč. V případě výstavby samostatné odhlučněné a tepelně izolované budovy, kde budou umístěna dmychadla (tzv. „dmychárny“) je potřeba počítat s dalším nárůstem investičních nákladů o cca 3 000 000 – 4 000 000 Kč.

Investiční náklady budou samozřejmě spojeny také s instalací měřicího a regulačního systému pro provoz reaktoru (měření a regulace hodnoty pH a koncentrace kyslíku v reaktoru, provoz neutralizační jednotky pro dávkování vápna, dávkování fugátu). Předpokládaná cena takového systému je cca 1 000 000 Kč. Vlastní neutralizační stanice bude spojena s výdaji pohybujícími se okolo 250 000 Kč.

V případě záměru provozovatele BPS vyhřívat v zimních měsících nitrifikační reaktor pak pochopitelně přibudou náklady na rozvod tepla z kogenerační jednotky dané BPS do nitrifikačního reaktoru. Předpokládané náklady s tím spojené je možno pro reaktor daných parametrů odhadnout na 1 000 000 Kč.

Za předpokladu úmyslu zvýšit efektivitu biologického procesu vložení nosiče biomasy do reaktoru dané velikosti dojde ke zvýšení nákladů o dalších cca 450 000 Kč.

Celkové investiční náklady bude z výše nastíněných důvodů zapotřebí kalkulovat vždy individuálně podle místních podmínek panujících v objektu dané BPS. Z výše nastíněných úvah vyplývá, že celkové investiční náklady spojené s instalací nitrifikačního reaktoru o objemu 120 m³ sloužícího ke zpracování veškeré produkce fugátu v rámci modelové BPS definované na začátku této kapitoly se mohou pohybovat v rozmezí od cca 6,30 do cca 17,15 mil. Kč (viz tabulka 2).

Tabulka 2: Odhad minimálních a maximálních investičních nákladů na výstavbu reaktoru pro zpracování veškeré produkce fugátu v rámci modelové BPS

	Minimální náklady (Kč)	Maximální náklady (Kč)
Výstavba/úprava nádrže	300 000	1 200 000
Čerpadla fugátu + příslušenství	1 100 000	1 400 000
Dmychadla	3 000 000	7 200 000
Distribuce vzduchu	350 000	350 000
Aerační elementy	300 000	300 000
Budova pro dmychadla	-	4 000 000
Měřicí a regulační systém	1 000 000	1 000 000
Neutralizační stanice	250 000	250 000
Rozvod tepla	-	1 000 000
Nosič biomasy	-	450 000
Celkem	6 300 000	17 150 000

V rámci kalkulací presentovaných v tabulce 2 se předpokládá, že v případě minimálních nákladů nebude nutno budovat novou nádrž pro výstavbu nitrifikačního reaktoru, postačí drobnější úpravy v areálu BPS (viz výše). V případě minimálních nákladů se zároveň předpokládá, že nebude zapotřebí objem reaktoru dělit na více sekcí. Velice kvalitní separace digestátu na fugát a separát v této variantě zajistí minimální obsah inertních pevných částic ve fugátu, což spolu s nízkým obsahem biologicky rozložitelných organických látek ve fugátu sníží nároky na výkon dmychadel. V této variantě se vzhledem k nižším nárokům na výkon dmychadel také nepředpokládá nutnost výstavby samostatné budovy pro dmychadla. Předpokládá se, že nebude zapotřebí instalovat systém pro vyhřívání zpracovávaného fugátu v zimním období a zároveň nebude do reaktoru instalován nosič biomasy.

Oproti tomu varianta s maximálními investičními náklady je spojena s výstavbou nádrže pro nitrifikační reaktor, jejíž objem bude rozdělen na tři paralelně provozované sekce. Nároky na výkon dmychadel jsou významným způsobem zvýšeny v důsledku vyššího obsahu inertních částic, resp. biologicky rozložitelných látek, ve fugátu. S vyššími nároky na dmychadla je spojena také nutnost výstavby samostatné budovy pro umístění dmychadel. V této variantě se také předpokládá nutnost vyhřívání v zimním období nitrifikační reaktor pro zpracování fugátu a také se počítá s nutností podpořit růst nitrifikačních organismů vložím nosiče biomasy do reaktoru.

Provozní náklady budou také velice variabilní a závislé na místních podmínkách, zejména na fyzikálně-chemických vlastnostech zpracovávaného fugátu. Mohou být spojeny s případným dávkováním vápna či jiného činidla pro regulaci pH v reaktoru a odpeňovače pro minimalizaci vzniku pěny v nitrifikačním reaktoru. V rámci laboratorního a poloprovozního experimentu bylo zjištěno, že spotřeba NaOH může činit od cca 3 kg až do cca 30 kg na 1 m³ fugátu zpracovaného v nitrifikačním reaktoru. Pokud uvažíme molární hmotnosti NaOH a Ca(OH)₂ a skutečnost, že NaOH je jedno-

sytnou zásadou, kdežto $\text{Ca}(\text{OH})_2$ je dvojsytnou zásadou, dojdeme ke spotřebě $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cca 2,8 – 27,90 kg na 1 m³ zpracovaného fugátu. Při ceně $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 3 Kč/kg a za předpokladu zpracování 20 m³ fugátu za den to představuje náklady cca 168 – 1 674 Kč. Náklady na odpěňovač vycházejí z dosud provedených testů při ceně odpěňovače 80 Kč/kg cca 5 - 100 Kč na 1 m³ zpracovaného fugátu, za podmínek uvedených na začátku této kapitoly (denní produkce fugátu 20 m³) tedy cca 100 – 2 000 Kč za den. Při provozu výše popsaného reaktoru o objemu 120 m³ pro zpracování veškeré produkce fugátu v rámci BPS o instalovaném elektrickém výkonu 0,5 MW a denní produkci fugátu 20 m³ při průměrné koncentraci N-amon ve fugátu 3,0 g/l je v souladu s výše presentovanými úvahami možno počítat s denními náklady na alkalizační činidlo a na odpěňovač v rozmezí cca 268 – 3 674 Kč. Při ceně dusíku 20 Kč/kg je tedy zřejmé, že jen provozní náklady na alkalizační činidlo a odpěňovač mohou za jistých okolností významně převyšovat finance uspořené za dusík. Ty byly odhadnuty v rámci studie Švehla et al., 2021. Na druhou stranu může optimalizace provozu nitrifikačního reaktoru vést k minimalizaci těchto nákladů, přičemž za určitých podmínek nelze dokonce vyloučit možnost, že se obejdeme kompletně bez dávkování zásady i odpěňovače.

Další provozní náklady budou spojeny s nutností dodávky elektrické energie pro aeraci nitrifikačního reaktoru a případně také tepelné energie pro vyhřívání tohoto reaktoru. Zde je ale potřeba zdůraznit, že elektrická i tepelná energie je produkována přímo v objektu BPS, přičemž u tepelné energie se počítá s tím, že je volně k dispozici, neboť pro ni aktuálně není jiné využití. Dle dostupných materiálů je možno odhadnout stálou spotřebu elektrické energie (spojené zejména s provozem dmychadel) na cca 33 – 100 kW. V rámci BPS o instalovaném výkonu 0,5 MW tak může v souvislosti s provozem zařízení pro zpracování fugátu dojít ke spotřebě cca 7 – 20 % elektrické energie generované danou BPS. Za předpokladu, že by na energii spotřebovanou v tomto systému bylo možné dále čerpat „zelený bonus“, což se jeví jako pravděpodobné, by denní ztráta způsobená uvedenou spotřebou energie dosahovala cca 830 – 2 500 Kč. V případě, že by „zelený bonus“ nebylo možné čerpat, je potřeba počítat s cca čtyřnásobným nárůstem ztráty.

Jak vyplývá z výše uvedených konstatování, ekonomické aspekty instalace a provozu zařízení pro nitrifikaci fugátu za účelem minimalizace ztrát dusíku, resp. za účelem jeho využití jako předstupeň pro tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu, je zapotřebí vyhodnocovat s využitím znalosti místních podmínek panujících v objektu dané konkrétní BPS. Pro objektivní vyhodnocení nákladů na instalaci a provoz zařízení pro nitrifikaci fugátu se jeví jako nezbytné realizovat nejprve laboratorní či (pokud možno) poloprovozní zkoušky simulující věrně místní podmínky.

V rámci ekonomických rozvah je potřeba také zohlednit environmentální aspekt navrhované technologie. Ta má potenciál zabránit únikům významného množství

NH₃ do atmosféry. V současné době není tomuto problému orgány státní správy věnována významnější pozornost. Nicméně, v blízké budoucnosti lze předpokládat vznik legislativních předpisů, které přinesou určité limity pro znečišťování ovzduší emisemi vznikajícími při nakládání s produkty živočišné výroby i při provozu bioplynových stanic. V takovém případě by presentované řešení přineslo možnost úspory financí související s potenciálními sankcemi za nesplnění zmíněných limitů. V případě zavedení opatření pro ochranu ovzduší a vyhlášení limitů pro emise znečišťujících látek je navíc možno předpokládat možnost čerpání dotací na opatření vedoucí k minimalizaci znečišťování. To by patrně zásadním způsobem ovlivnilo ekonomickou rozvahu zaměřenou na potenciální instalaci systému pro zpracování fugátu nitrifikací, podobně jako rostoucí ceny ropy, na které je navázána cena dusíkatých minerálních hnojiv.

VI. Seznam použité literatury

- Al Seadi, T., Drosch, B., Fuchs, W., Rutz, D., Janssen, R. (2013). The Biogas Handbook - Science, Production and Applications. Chapter 12 – Biogas digestate quality and utilization. Woodhead Publishing Limited. DOI: 10.1533/9780857097415.2.267.
- Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., Srinath, E. G. (1976). Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal WPC*. 48 (5), 835-852.
- Botheju, D., Svalheim, Ø., Bakke, R. (2010). Digestate nitrification for nutrient recovery. *Open Waste Management*. 3. 1-12.
- Butterbach-Bahl, K., Gundersen, P., Ambus, P., Augustin, J., Beier, C., Boeckx, P., et al. (2011). Nitrogen processes in terrestrial ecosystems. In: Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B., editors. *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, 99-125.
- Court, M.N., Stephens, R.C., Wais, J.S. (1962). Nitrite toxicity arising from the use of urea as a fertilizer. *Nature*. 194. 1263-1265.
- Chudoba, J., Dohányos, M., Wanner, J. (1991). Biologické čištění odpadních vod, SNTL Praha.
- Chiumenti, A., da Borso, F., Chiumenti, R., Teri, F., Segantin, P. (2013). Treatment of digestate from a co-digestion biogas plant by means of vacuum evaporation: tests for process optimization and environmental sustainability. *Waste Management*. 33 (6). 1339-1344.
- Jenicek, P., Svehla, P., Zabranska, J., Dohanyos, M. (2004). Factors affecting nitrogen removal by nitrification/denitrification. *Water Science and Technology*. 49 (5-6). 73-79.
- Nicholson, F., Bhogal, A., Cardenas, L., Chadwick, D., Misselbrook, T., Rollett, A., Taylor, M., Thorman, R., Williams, J. (2017). Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost applications to agricultural land. *Environmental Pollution*. 228. 504-516.
- Perazzolo, F., Mattachini, G., Riva, E., Provolo, G. (2017). Nutrient losses during winter and summer storage of separated and unseparated digested cattle slurry. *Journal of Environmental Quality*. 46(4). 879-888.
- Pitter, P. (1999). *Hydrochemie*. Vydavatelství VŠCHT, Praha.
- Renard, J.J., Calidonna, S.E., Henley, M.V. (2004). Fate of ammonia in the atmosphere - a review for applicability to hazardous releases. *Journal of Hazardous Materials*. 108. 29-60.
- Rorison, I. H. (1973). The effect of extreme soil acidity on the nutrient uptake and physiology of plants. In: Dost, H. (ed.). *Acid Sulphate Soil. Proceedings of the International Symposium on Acid Sulphate Soils*. Publication 18. Vol. 1. International Institute Land Reclamation and Improvement. Wageningen. p. 223-254.
- Singh, M., Pabbi, S., Bhattacharya, A.K., Singh, A.K. (2007). Nitrite accumulation in coastal clay soil of India under inadequate subsurface drainage. *Agricultural Water Management*. 91. 78-85.

- Svehla, P., Bartacek, J., Pacek, L., Hrnčirova, H., Radechovsky, J., Hanc, A., Jenicek, P. (2014). Inhibition effect of free ammonia and free nitrous acid on nitrite-oxidising bacteria during sludge liquor treatment: influence of feeding strategy. *Chemical Papers*. 68(7). 871-878.
- Svehla, P., Radechovska, H., Pacek, L., Michal, P., Hanc, A., Tlustos, P. (2017). Nitrification in a completely stirred tank reactor treating the liquid phase of digestate: The way towards rational use of nitrogen. *Waste Management*. 64. 96-106.
- Švehla a kol. (2021). Minimalizace ztrát dusíku při nakládání s kapalnou frakcí fermentačního zbytku s využitím procesu nitrifikace. *Certifikovaná metodika. ČZU v Praze, Praha. V tisku.*
- Whelan, M.J., Everitt, T., Villa, R. (2010). A mass transfer model of ammonia volatilisation from anaerobic digestate. *Waste Management*. 30. 1808-1812.

VII. Seznam publikací, které předcházely metodice

- Míchal, P. (2018). Optimalizace provozu zemědělských bioplynových stanic s využitím alternativních substrátů a inovativních metod pro zpracování fermentačního zbytku. *Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.*
- Míchal, P., Švehla, P., Tlustoš, P. (2017). Zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku biologickou nitrifikací a tepelným zahuštěním. *Waste Forum*. 10. 299-309.
- Míchal, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P., Švehla, P. (2018). Shrnutí dosavadních výsledků výzkumu v oblasti zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku nitrifikací a následným tepelným zahuštěním. *Sborník z konference Kaly a Odpady 2018, Brno, 20. – 21. 6. 2018, s. 201-205, ISBN 978-80-263-1408-0.*
- Míchal, P., Švehla, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P. (2018). Dvoustupňová úprava kapalné frakce fermentačního zbytku spočívající v jeho nitrifikaci a následném tepelném zahuštění. *Sborník z konference Odpadové Vody 2018, Štrbské Pleso, Slovensko, 17. – 19. 10. 2018, s. 178-183, ISBN 978-80-973196-0-1.*
- Míchal, P., Vargas, C.M.L., Tlustoš, P., Švehla, P. (2019). How to maintain stable nitrification process in the extreme conditions prevailing in the environment of the liquid phase of digestate. *Sborník z konference 10th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, Rhodes, 19. – 21. 6. 2019, s. 1-2.*
- Nováková, S. (2019). Vliv podmínek panujících v nitrifikačním reaktoru na průběh biologické úpravy kapalné frakce fermentačního zbytku. *Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.*
- Svehla, P., Radechovska, H., Pacek, L., Michal, P., Hanc, A., Tlustos, P. (2017). Nitrification in a completely stirred tank reactor treating the liquid phase of digestate: The way towards rational use of nitrogen. *Waste Management*. 64. 96-106.
- Svehla, P., Vargas, C.M.L., Michal, P., Tlustos, P. (2020). Nitrification of the liquid phase of digestate can help with the reduction of nitrogen losses. *Environmental Technology & Innovations*. 2020, 17. 100514.
- Svehla, P., Vargas, C.M.L., Michal, P., Tlustos, P. (2020). Thermal thickening of nitrified liquid phase of digestate for production of concentrated complex fertiliser and high-quality technological water. *Journal of Environmental Management*. 276. 111250.
- Švehla a kol. (2021). Minimalizace ztrát dusíku při nakládání s kapalnou frakcí fermentačního zbytku s využitím procesu nitrifikace. *Certifikovaná metodika. ČZU v Praze, Praha. V tisku.*
- Vargas, C.M.L. (2018). Optimization of Two-Stage Treatment of the Liquid Phase of Digestate. *Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.*
- Vargas, C.M.L., Švehla, P., Míchal, P., Tlustoš, P. (2018). Porovnání ztrát dusíku při skladování surového a nitrifikovaného fugátu produkovaného v rámci provozu bioplynových stanic. *Sborník z konference Odpadové vody 2018, Štrbské Pleso, Slovensko, 17. – 19. 10. 2018, s. 178-183, ISBN 978-80-973196-0-1.*

- Vargas, C.M.L. (2018). Optimization of Two-Stage Treatment of the Liquid Phase of Digestate. conference ELLS Scientific Student Conference 2018, Wageningen, Nizozemí, 9. – 10. 11. 2018, poster.
- Vargas, C.M.L., Švehla, P., Míchal, P., Tlustoš, P. (2019). Nitrifikace jako postup zpracování fúgátu vedoucí ke snížení ztráty dusíku během jeho skladování. Sborník z konference Odpadové forum 2019, Hustopeče, 19. – 21. 3. 2019, s. 1-10, ISBN: 978-80-85990-33-1.

VIII. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Posudek odborníka v daném oboru vypracoval:

Ing. Jaroslav Kára, CSc. (kara.jaroslav@seznam.cz)

Výzkumný ústav zemědělské techniky, v. v. i.

Drnovská 507, 161 01 Praha 6

Posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy vypracovala:

Ing. Michaela Budňáková (michaela.budnakova@mze.cz)

Ministerstvo zemědělství ČR (oddělení zemědělských vstupů)

Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1

IX. Dedikace

„Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu/podpory na rozvoj výzkumné organizace č. QK1710176 s názvem: Dvoustupňová úprava kapalně frakce fermentačního zbytku umožňující racionální využití živin a vody“.

X. Ostatní náležitosti certifikované metodiky

V souladu se závazným *Postupem pro uznání výsledků typu „N_{met} – Metodika“*, který vydalo Ministerstvo zemědělství – Odbor vědy, výzkumu a vzdělávání dne 1. února 2018, jsou v následujících podkapitolách uvedeny další požadované údaje nebo doplňující informace.

Podíly na vzniku předkládané metodiky

Na zpracování a finalizaci předkládaného výstupu projektu (certifikované metodiky) se členové řešitelského týmu s rolí spoluautorů metodiky zúčastnili níže uvedeným podílem: Pavel Švehla (50%), Pavel Míchal (20%), Pavel Tlustoš (15%), Tomáš Rosenberg (10%), Jan Procházka (5%).

Osvědčení odborného orgánu státní správy

Osvědčení o uznání certifikované metodiky vydalo Ministerstvo zemědělství ČR v prosinci 2020 (osvědčení č.: 64702/2020-MZE-18145).