

Diplomová práce

Vývoj pletených osnovních distančních struktur pro čištění odpadních vod

Studijní program:

N0723A270001 Textilní inženýrství

Autor práce:

Bc. Adéla Kdýrová

Vedoucí práce:

Ing. Irena Lenfeldová, Ph.D.

Katedra technologií a struktur

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Vývoj pletených osnovních distančních struktur pro čištění odpadních vod

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Adéla Kdýrová
<i>Osobní číslo:</i>	T21000029
<i>Studijní program:</i>	N0723A270001 Textilní inženýrství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra technologií a struktur
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši v oblasti nosičů biomasy aplikovaných v čistírnách odpadních vod (ČOV). Zaměřte se rovněž na konstrukční možnosti vazeb poskytovaných dvoulůžkovými rašlovými stroji a vazebné struktury, které by se daly využít při vývoji textilního nosiče pro ČOV.
2. Navrhněte konstrukce osnovních oboulúčkových pletenin, které by se mohly využívat jako nosiče biomasy. Konstrukce specifikujte s různými návleky a pevnými podélnými okraji.
3. V laboratořích KTT vyrobte sérii nosičů a charakterizujte jejich strukturální parametry. Analyzujte rovněž vstupní materiály.
4. Pomocí bioreaktoru proveďte laboratorní testování vybraných nosičů a pokuste se provést analýzu kolonizovaných vzorků.
5. Zhodnoťte vliv rozdílné konstrukce vytvořených nosičů, popř. vliv struktury multifilu, z hlediska růstu biomasy v rámci laboratorního testování. Pokuste se charakterizovat predikce pro navrhování konstrukce nosičů biomasy pro ČOV.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] KYOSEV, Y. Warp knitted fabrics construction. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2020]. ISBN 978-1-4987-8016-2.
[2] HAVLÍČEK, K., NECHANICKÁ, M., LEDERER, T., KOLČAVOVÁ SIRKOVÁ, B. Analysis of nitrifying bacteria growth on two new types of biomass carrier using respirometry and molecular genetic methods, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, ACADEMIC PRESS INC ELSEVIER SCIENCE, 11 pages, ISSN: 0147-6513, n. 12, [online], 2021

Vedoucí práce: Ing. Irena Lenfeldová, Ph.D.
Katedra technologií a struktur

Datum zadání práce: 27. dubna 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 2. června 2023

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Brigita Kolčavová Sirková,
Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Na prvním místě chci poděkovat své vedoucí práce Ing. Ireně Lenfeldové, Ph.D. za veškerou pomoc při zpracování práce a ochotu s jakou se mi věnovala. Dále chci poděkovat Ing. Karlu Havlíčkovi, Ph.D. za odborné rady a trpělivost, Ing. Martině Ryvolové za neochvějný úsměv jakým nás provázela při konzultacích a v neposlední řadě celé Textilní fakultě, zejména pak Katedře technologií a struktur, za poskytnuté zázemí a odborné vedení v průběhu studií. Za podporu a „pošouchnutí“ správným směrem děkuji své rodině a blízkým, kteří trpělivě překonávali veškeré nepohody se mnou. Bez Vás bych nebyla tam kde jsem a nikdy bych nenašla svou životní vášeň.

Anotace

Diplomová práce byla vytvořena za účelem zhodnocení růstu biomasy na textilních nosičích vytvořených technologií osnovního pletení. Nosiče vyrobené v rámci experimentu jsou určeny především pro nitrifikační proces, při kterém se z odpadní vody odstraňují zbytkové formy dusíku. Rešeršní část prozkoumává oblasti biologického čištění odpadních vod se zaměřením na MBBR systémy, proces nitrifikace, využití nosičů ve zmíněných systémech, vývoj textilních nosičů a využití osnovní pletařské technologie. Experimentální část se zaměřuje na návrh a výrobu několika typů nosičů lišících se zejména použitou vazbou, které jsou dále testovány v laboratorním nitrifikačním reaktoru. V průběhu experimentu se na nosičích vytváří biofilm odstraňující nežádoucí látky. Jeho aktivita a složení je dále zkoumána pomocí metod respirometrie a molekulárně genetických testů. Zhodnocení tvorby biofilmu na konkrétních částech pleteniny je zkoumáno pomocí obrazové analýzy. Z hlediska struktury jsou nosiče definovány pomocí parametrů jako je délka nitě v očku, hustota řádků a sloupků, hmotnost, rozměry a měrný povrch. Výstupem práce je zhodnocení vlivu použitých vazeb na tvorbu biofilmu a určení dalšího směřování vývoje mikrovláknenných nosičů.

Klíčová slova

čištění odpadních vod, nitrifikace, nosič biomasy, osnovní pletenina

Annotation

This thesis was produced in order to evaluate biomass growth on textile carriers created by warp knitting technology. Carriers produced during the experiment are intended for the nitrification process in which residual forms of nitrogen are removed from wastewater. In the research is explored area of biological wastewater treatment with a focus on MBBR systems, nitrification, use of carriers in mentioned systems, development of textile carriers and use of warp knitting technology. Experimental part is focused on design and production of several types of carriers with different structure which are tested in nitrification reactor. During experimental testing in the reactor biofilm removing undesirable substances is formed. Activity and constitution of the biofilm is examined using methods respirometry and molecular genetic tests. The evaluation of the biofilm formation on knitted structure is investigated using image analysis. Carriers structure is defined by parameters such as material consumption, weight, dimensions or surface area. The output of this work is evaluation of the fabric structure influence on the biofilm formation and determination of future development of microfiber carriers.

Key words

wastewater treatment, nitrification, biomass carrier, warp knitted structure

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	11
1 Úvod.....	13
2 Biologické čištění odpadních vod	14
2.1 Moving Bed Biofilm reaktor	14
2.2 Nitrifikace.....	15
2.3 Nosiče biomasy	15
2.3.1 Vývoj vláknenných nosičů	16
2.4 Analýza biofilmu.....	18
2.4.1 Respirometrie	18
2.4.2 Molekulárně genetické metody	18
2.4.3 Obrazová analýza	18
3 Pletařská technika a vazby	19
3.1 Rašlový pletací stroj.....	19
3.2 Vazební možnosti.....	20
3.2.1 Filetové vazby	20
3.2.2 Polosíťovaná struktura	21
3.2.3 Distanční pleteniny.....	22
3.3 Zajištění hladkých okrajů pleteniny	24
4 Parametry	25
4.1 Ekvivalentní průměr vlákna	25
4.2 Tvarový faktor průřezu podle Malinowské	25
4.3 Měrný povrch	25
5 Analýza vstupních materiálů.....	27
5.1 Metodika a podmínky testování	27
5.1.1 Jemnost.....	27
5.1.2 Zákrut	27
5.1.3 Řezy.....	27
5.2 Vyhodnocení	28
5.2.1 Jemnost a zákrut multifílu	28
5.2.2 Parametry vláken.....	28
6 Návrh vazeb	30

6.1	Požadavky na strukturu nosiče	30
6.2	Návrhy	30
6.3	Návlek kladecích přístrojů	30
6.3.1	Návlek 1	30
6.3.2	Návlek 2	31
6.4	Kladení v přechodové části	31
6.5	Kladení ve vzorové části	32
6.6	3D vizualizace	38
7	Výroba	39
7.1.1	Příprava materiálu pro pletení	39
7.1.2	Pletení nosičů	39
7.1.3	Příprava vzorků pro testování	39
8	Předpokládané chování nosičů	40
8.1.1	Předpoklad uchycení biomasy	40
8.1.2	Předpoklad spotřeby materiálu	40
9	Strukturální analýza nosičů	41
9.1	Metodika	41
9.1.1	Spotřeba délkových textilií	41
9.1.2	Hustota pleteniny	42
9.1.3	Hmotnost nosiče	42
9.1.4	Rozměr a efektivní plocha	43
9.1.5	Měrný povrch	43
9.2	Vyhodnocení	43
9.2.1	Spotřeba délkových textilií	44
9.2.2	Hustota pleteniny	46
9.2.3	Hmotnost nosiče	47
9.2.4	Rozměr a efektivní plocha	48
9.2.5	Měrný povrch	49
10	Poloprovozní testování v reaktoru	51
11	Analýza účinnosti nosičů	53
11.1	Metodika a podmínky testování	53
11.1.1	Respirometrie	53
11.1.2	Molekulárně genetické metody	53

11.1.3	Obrazová analýza	54
11.2	Vyhodnocení	58
11.2.1	Respirometrie	58
11.2.2	Molekulárně genetické metody	59
11.2.3	Obrazová analýza	65
12	Směrování dalšího vývoje nosičů.....	68
13	Závěr	70
14	Seznam použité literatury.....	71
	Seznam příloh	74
	Přílohy	75

Seznam použitých zkratek a symbolů

AOB	nitrifikační bakterie oxidující amoniak
CT	computed tomography
CXI	Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace TUL
ČOV	čištění odpadních vod
DNA	deoxyribonukleová kyselina
FT	Fakulta textilní
HDPE	high-density polyethylene
HDPP	high-density polypropylen
HSV	barevný prostor Hue, Saturation, Value
IS	interval spolehlivosti
KMI	katedra Materiálového inženýrství
KP	kladeční přístroj
KPJ	kladení pod jehlami
KTT	katedra Technologií a struktur
MBBR	moving bed biofilm reactor
NGS	New Generation Sequencing
NH ₄ -N	amoniakální dusík
NOB	nitrifikační bakterie oxidující dusitany
O ₂	kyslík
ot.	otáčky
PE	polyetylen
PES	polyester
PP	polypropylen
PU	polyuretan
qPCR	kvantitativní polymerázová řetězová reakce
RGB	barevný prostor Red, Green, Blue
TUL	Technická univerzita v Liberci

A	povrch pláště vláken	[m ²]
a	střední měrný povrch směsi	[m ² ·kg ⁻¹]
a _i	měrný povrch jednotlivých komponent	[m ² ·kg ⁻¹]
d _e	ekvivalentní průměr vlákna	[mm]
g _i	hmotnostní podíl jednotlivých komponent	[-]
l	délka 1 nitě ve vzorku	[m]
L	souhrnná délka vláken ve vzorku	[m]
m _i	hmotnost jednotlivých komponent	[kg]
N	počet osnovních nití	[-]
n	počet vláken ve svazku	[-]
o	obvod skutečného průřezu vlákna	[mm]
q	tvarový faktor průřezu	[-]
s	plocha příčného řezu vlákna	[mm ²]
t	jemnost vláken	[tex]
ρ	hustota vláken	[kg·m ⁻³]

1 Úvod

Rozmach lidské činnosti ovlivňuje život na celé planetě, proto je na naší zodpovědnosti zmírnit jeho dopady. Součástí Zelené dohody pro Evropu, tzv. Green deal, je také snížení znečištění vody, ochrana ekosystémů a lepší nakládání s odpady. [1] V návaznosti na tyto cíle jsou legislativně zvyšovány požadavky na čistotu vody s nižšími koncentracemi dusíku. [2] Současné možnosti na čištění daných sloučenin mohou být limitující svou účinností, proto je snaha vyvinout nové efektivnější metody, které by bylo možné aplikovat v čistírnách odpadních vod. Příležitost se skrývá v mikrovlákněných materiálech, které se při zakomponování do vhodného útvaru stávají vysoce účinnými pro proces nitrifikace. Efektivita textilních nosičů byla v rámci vývoje prototypu prokázána, další rozvoj se zaměřuje na zjednodušení výroby při současném zachování účinnosti.

Cílem této diplomové práce je prozkoumání vlivu vazeb, tedy struktury pleteniny, na schopnost tvorby biofilmu v samotných nosičích. Pro analýzu jsou použité vazby podrobně rozebrány z hlediska návrhů a strukturálních parametrů. Vyrobené nosiče jsou testovány v laboratorním nitrifikačním reaktoru a současně je sledována aktivita a složení mikroorganismů uchycených ve struktuře pleteniny. Poznatky budou přínosné pro následné směřování dalšího vývoje.

- Kam se dostal současný vývoj mikrovlákněných nosičů biomasy?
- Jakým způsobem se odlišují návrhy nosičů z vazebného hlediska?
- Projeví se použitá vazba nosiče na délce nitě v očku, hustotě řádků a sloupků, měrném povrchu případně jiných parametrech?
- Liší se složení mikroorganismů a aktivita příslušného biofilmu jednotlivých nosičů?
- Kde se v pletené struktuře nejlépe kultivuje biofilm?

2 Biologické čištění odpadních vod

S rozvojem průmyslu stoupá znečištění odpadních vod a zároveň se stoupajícími ekologickými požadavky se klade důraz na jejich čištění. Cílem čištění odpadních vod (ČOV) je zajištění dostatečné kvality vody pro její vypuštění do přírodních toků případně znovupoužití. [3] Prvním krokem čištění je odstraňování hrubých nečistot formou usazování, flotace či filtrace. [4] Jako druhá fáze je zavedeno tzv. biologické čištění, během kterého dochází k odstranění látek organických, dusíkatých, fosforu a síry. [3] Po vyčištění následuje kontrola kvality vody. Voda splňující přísné limity může být vypuštěna zpět do přírody, případně znovu použita v domácnostech a průmyslu.

Principem biologického čištění jsou na sebe navazující biochemické oxidačně-redukční reakce. [4] Během aktivního procesu dochází k promísení odpadní vody s aktivovaným kalem za současného provzdušňování (aerace) či recirkulace pro zvýšení koncentrace biomasy v systému. Tímto způsobem dojde k zefektivnění čištění a proces se zkracuje. Aktivovaný kal se následně separuje od vyčištěné vody a znovu se použije. [4]

Biomasa je soubor mikroorganismů, které odstraňují organické i anorganické nečistoty. Její složení je velice komplexní a v každém systému unikátní. Základní složkou těchto kultur jsou buňky jejichž genetická informace je uložena v DNA, podle níž lze určit typy buněk a organismů obsažených v biomase. Ke své životaschopnosti potřebují neustále přijímat živiny z prostředí, ve kterém se vyskytují. [3]

Organismy biomasy se uspořádávají v suspenzi nebo se připojují na nosič (kameny, písek, polymerní nosiče aj.) ve formě biofilmu¹. Separace biomasy od odpadní vody je náročnější v suspendovaném či kombinovaném systému, kdy je nutné využít sedimentace v usazovacích nádržích. [3]

Systémy biologického čištění dělíme na aerobní a anaerobní. Aerobní procesy probíhají za přítomnosti vzduchu spolu s tvorbou biomasy. Anaerobní procesy na rozdíl od předchozích aerobních probíhají bez přístupu vzduchu a při čištění vznikají zejména bioplyny (např. methan). Produkce biomasy v anaerobních systémech probíhá také, produkce je však mnohem nižší. [4] Stejně podmínky v celém objemu reaktoru jsou zajištěny provzdušňováním nebo recirkulací. [3]

Mezi starší aerobní biofilmové systémy řadíme např. biologické kolony zkrápěné, ponořené případně rotační. Většina starších systémů má těleso nosiče pevně ukotvené. [4]

2.1 Moving Bed Biofilm reaktor

Moving bed biofilm reactor (MBBR) neboli reaktor s plovoucím ložem patří mezi novější biofilmové systémy pracuje s volně se pohybujícími nosiči biomasy. První nosiče použité v MBBR systému byly K-series od AnoxKaldnes. [5] Systém byl vyvinut koncem 80. let v Norsku a používá se například při odstraňování uhlíku a dusíku z odpadních vod, nebo při oxidaci amoniaku. [5, 6]

¹ Imobilizovaná biomasa

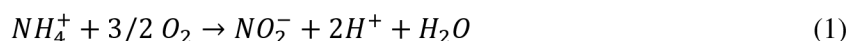
Starší systémy, např. biologické kolony, ponořené biologické kolony nebo rotační biofilmové reaktory skýtají nevýhodu v podobě nerovnoměrné distribuce biofilmu. [5] Výhodou MBBR systémů je zvýšení výkonu s minimálními náklady, odpadající recirkulace kalu (biomasa je ve formě biofilmu uchycena na nosičích) a proplachování (méně zanášeni), vyšší odolnost biofilmu vůči nepříznivým vlivům pH, teploty apod. Mezi nevýhody MBBR řadíme vyšší náklady na energii pro provzdušňování. [5]

2.2 Nitrifikace

Přítomnost anorganického dusíku v odpadních vodách je nežádoucí z pohledu následného vypouštění do vod přírodních. Nadměrný přísun tohoto dusíku způsobuje nežádoucí růst zelených organismů jako jsou sinice. Zbytky dusičnanů² mohou být nebezpečné v pitné vodě pro děti kojeneckého věku. [4]

K odstranění zbytkového amoniakálního dusíku slouží proces nitrifikace. Probíhá ve dvou fázích – oxidace amoniaku na dusitan (nitritace), oxidace dusitanu na dusičnany (nitratice). [4, 7]

a) nitritace



b) nitratice



Pro tyto procesy hrají svou roli zejména nitrifikační mikroorganismy dvou typů – AOB³ oxidující amoniak a NOB⁴ oxidující dusitan. [8] Nitrifikační bakterie jsou pomalu rostoucí a preferují růst ve formě biofilmu. [6] Množství bakterií typu AOB se v systému vyskytuje zpravidla méně než NOB. [8] S rychlejším růstem AOB by se v systému hromadily dusitany a prostředí by se stalo toxické, proto je potřeba udržovat pH vhodné pro tvorbu bakterií rodu NOB pohybující se kolem 7,2 – 7,6. [4] Nitrifikaci řadíme do procesů aerobních, protože zmíněné AOB a NOB potřebují ke své distribuci přítomný kyslík. [3]

2.3 Nosiče biomasy

Nosná média sloužící k zachycení a kolonizaci biomasy musí splňovat určitá kritéria. Struktura musí být dostatečně propustná s co největším použitelným měrným povrchem. Snaha je zajistit dostatečný prostor pro růst mikroorganismů, zároveň zamezit nadbytečnému zarůstání nosičů, které snižuje využitelnost měrného povrchu a tím i efektivitu čištění. Procentuální zaplnění prostoru reaktoru (plnění), tedy počet nosičů v reaktoru, ovlivňuje míru provzdušnění a přístup znečištěné vody k biofilmu. [3]

Kolonizace mikroorganismů probíhá zejména v chráněných prostorech, které nejsou vystaveny mechanickému namáhání proudem vody a vzájemným narážením nosičů. Povrchy vystavené namáhání jsou osidlovány také, ale spíše formou tenké vrstvy právě kvůli zmíněné abrazi. [6] Měrná

² Dusičnany se odstraňují denitrifikací následující po procesu nitrifikace.

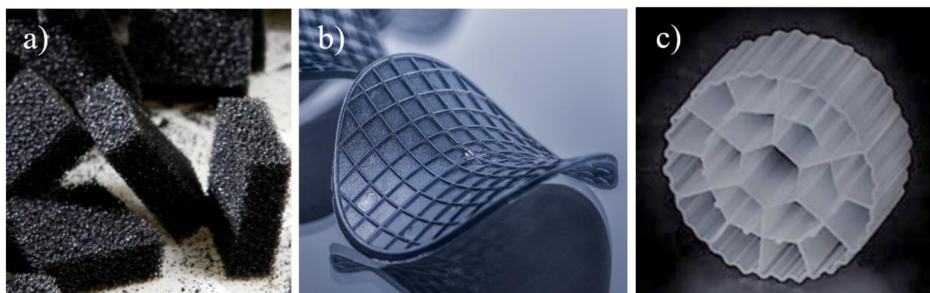
³ Nitrosomonas, Nitrosococcus a Nitrosocystis [4]

⁴ Nitrospira, Nitrobacter, Nitrocastis [4]

hmotnost (hustota) nosiče by se měla pohybovat kolem hustoty vody pro jeho snazší pohyblivost. Nosiče by měly být trvanlivé, odolné vůči otěru, chemicky stabilní jakož i cenově dostupné. [6]

Současně využívané nosiče a vývoj se soustředí na nosná média z polymerů ve formě pěnových houbiček nebo pevných prvků různých tvarů a velikostí (Obr. 1). Vývoj se zaměřuje na zajištění větší chráněné plochy. [6] Pěnové houbičky se obvykle vyrábí z PU nebo PES či PE pěny. Jejich účinnost se snižuje vzájemným obrušováním hran a zarůstáním vnitřních pórů v důsledku čehož se snižuje využitelný měrný povrch. [6]

Pevné nosiče vznikají zejména vytlačováním nebo lisováním plastů. Nejvyužívanější jsou AnoxKaldnes. [9] Existuje však řada dalších, např. Mutag BioChip, Hel-X a další. Výzkumy těchto typů nosičů jsou zaměřeny na tvar s ohledem na zvyšování využitelného specifického povrchu, ale také na materiálové složení, případně modifikace povrchu. Současné využívané materiály jsou HDPE, HDPP, případně recyklovaný HDPE. [6] Výčet nosičů zdaleka není kompletní, existuje celá řada typů, tvarů. Uvedené nosiče byly vybrány z hlediska rozmanitosti. Přehledy dalších nosičů jsou uvedené např. v (Di Biase, 2019), (Morgan-Sagastume, 2018), (Mazur, 2020), (Křiklavová, 2013), (McQuarrie, 2011).



Obr. 1: Příklad nosičů – a) pěnový nosič, b) AnoxKaldnesTM Z, c) AnoxKaldnesTM K3 [8, 10, 11]

2.3.1 Vývoj vláknenných nosičů

Vláknenné nosiče poskytují prostředí pro zachycení kalu v aktivační fázi. Filamenty představují vhodnou strukturu pro kolonizaci bakteriemi, a to zejména jedná-li se o multifily s vysokým měrným povrchem. V současné době jsou na TUL vyvíjeny dva typy nosičů – nano a mikro vláknenný.

2.3.1.1 Nano vláknenné nosiče

Nano vláknenné struktury pro čištění odpadních vod byly studovány v práci (Křiklavová, 2013), (Havlíček, 2022). Nosiče prokázaly v rámci výzkumu vyšší účinnost a současně vyšší relativní zastoupení nitrifikačních bakterií než komerčně dostupné nosiče K3 AnoxKaldnes. Přestože je biofilm na tomto nosiči vystaven proudění, uchycení ve struktuře je prokazatelně silné. [8] V porovnání s mikrovláknennými nosiči zachytává nano vláknenná struktura méně kalu ve fázi aktivace. [7, 8]

2.3.1.2 Mikrovláknenné nosiče

Vývoj mikrovláknenných nosičů probíhá na KTT FT TUL ve spolupráci s Oddělením technologie životního prostředí CXI. Nosiče prošly postupnou proměnou a nadále je snaha tyto struktury rozvíjet. Součástí vývoje je jejich cenová dostupnost spojená s jednoduchostí výroby a tím i konkurenceschopnost na trhu.

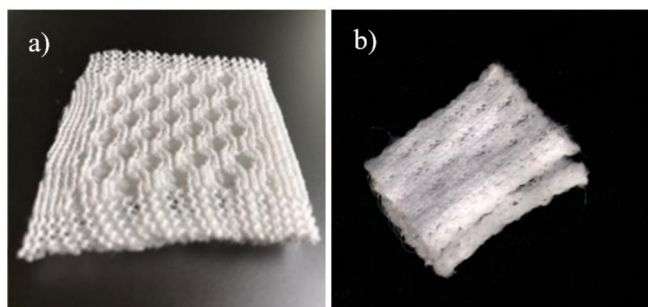
2.3.1.2.1 Materiály vhodné pro kolonizaci

Vývoji mikrovláknenného nosiče formou distanční pleteniny předcházelo studování vhodných délkových textilních materiálů pro osidlování bakteriemi nitrifikačního typu. Příznivé prostředí pro kolonizaci poskytují zejména porézní struktury multifilamentů s vysokým měrným povrchem. Osidlování multifilu probíhá mezi jednotlivými fibrilami, kde je prostředí chráněné vůči namáhání prouděním. Oproti tomu monofily jsou pro kolonizaci zcela nevhodné kvůli hladkému povrchu vystavenému proudění a malému měrnému povrchu. [14] Samotná struktura multifilu, jako je průměr jednotlivých fibril a meziprostorů související se zaplněním, ovlivňuje tvorbu příslušných bakterií. U PES filamentů byla prokázána nejlepší kultivace nitrifikačních bakterií, záchyt však byl prokázán i na PP filamentech. [15]. Na obou z uvedených materiálech je prokázána navíc kolonizace bakterií pro odstraňování uhlíku. [16]

2.3.1.2.2 Pletené nosiče

Mikrovláknenné nosiče ve formě osnovní oboulicní pleteniny s filetovou vazbou byly vyvinuty na TUL v rámci projektu HyHi. Distanční⁵ pleteniny poskytují vhodnou krytou strukturu a osnovní pletenina má navíc omezenou paratelnost. Využití filetové vazby navíc podporuje proudění kapaliny dovnitř kryté struktury. Snaha byla zakomponovat co největší délku filamentů do struktury nosiče, proto byl multifil zapojen i do spojovací vrstvy distanční pleteniny, avšak z obavy z jejího zarůstání a problematice při výrobě bylo od tohoto upuštěno. [17, 18] Větší délka multifilu v nosiči se dá zajistit i jinými způsoby, například kladení multifilu o více roztečí.

Materiál pro vzorky se vybral s ohledem na možnosti stroje a vhodnost kolonizace. U prvních vzorků (nosič PES/PES) byl použit PES multifil 167 dtex/36 x 2, později s požadavkem na plovoucí nosiče se přešlo na PP multifil 167 dtex/32 x 2 SZ – 75 S. Monofil byl PES s průměrem 0,1 mm, hrubší monofil s průměrem 0,2 mm vytváří příliš tuhou pleteninu s drsným povrchem. [8, 18]



Obr. 2: a) nosič PES/PES, b) nosič PP/PES [8, 18]

Nosiče PES/PES (Obr. 2a) byly vyráběny na rašlovém stroji ve dvou spojených pásech, které se oddělovaly podélně a příčně stříhem. Vzorová část s filetovou vazbou byla navržena jako obdélníková oblast obklopená shora a zespodu střížnými částmi s trikotovou vazbou. Rozdílná spotřeba ve vzorové a střížové části způsobovala při pletení problémy v podobě nepřesného odhazování oček. Pro pletení je napnutí osnovy zásadní, a protože se podávání i odtah na stroji nastavují pro celou pleteninu stejné, byly navrženy změny ve výrobě.

Pro využití plně šíře stroje, zrychlení a zjednodušení výroby prototypu se přešlo k pletení úzkých pruhů dílčích nosičů s otevřenými okraji (mezi pruhy 2 jehly vynechány), ve které se pokračuje

⁵ Distanční pleteniny jsou rozebrány v kap. 3.2.3 *Distanční pleteniny*.

i v současné době. Pletenina, ze které se vystříhovaly nosiče PES/PES byla fixována ve fixační komoře na KMI FT TUL při 180 °C. Kvůli změně materiálu (PES → PP) a snaze výrazně zlevnit a zjednodušit výrobu, bylo od fixace upuštěno.

Nosiče PP/PES (Obr. 2b), u kterých byly aplikovány změny pro zjednodušení výroby, jsou blíže popsány v (Havlíček, 2022), (Kolčavová Sirková, 2023). Jejich výhodou je výrazné zachycení bakterií v aktivačním procesu přispívající k rychlejší kultivaci bakterií. [8] Účinnost tohoto typu nosiče byla prokázána rovněž z dlouhodobého hlediska. [7, 18] V návaznosti na tyto nosiče byla provedena experimentální část této práce zabývající se vývojem nosiče. Návrhy jsou aplikovány na strukturu PP/PES nosičů a budou popsány v pozdějších kapitolách.

2.4 Analýza biofilmu

Pro vyhodnocení biofilmu jakožto komplexního systému mikroorganismů se používají kombinace různých metod. Sledovat lze množství a zastoupení druhů bakterií, aktivitu biofilmu a jeho rozložení na daném nosiči.

2.4.1 Respirometrie

Respirometrií se nepřímo určuje aktivita a kinetika systému skrze rychlost spotřeby kyslíku (respirace) a celkové množství kyslíku spotřebovaného na oxidaci substrátu. Při měření je zabráněno přístupu vzduchu, systém je však provzdušňován. Spotřebovaný kyslík je kontinuálně indikován pomocí respirometru. Detektory měří změnu koncentrace plynů a lze pomocí ní specifikovat aktivitu biofilmu na konkrétním typu nosiče v pravidelném časovém rámci, přičemž větší spotřeba kyslíku indikuje větší aktivitu biofilmu. [7, 19]

2.4.2 Molekulárně genetické metody

Molekulárně genetické metody slouží k určení množství a druhu bakterií vyskytujících se v biofilmu. Zejména je snahou zjistit výskyt bakterií typu AOB a NOB, které jsou v procesu nitrifikace zásadní. [7]

Kvantitativní polymerázová řetězová reakce (qPCR) v reálném čase slouží ke stanovení množství DNA sledovaných bakterií. V případě nitrifikace jsou sledovány bakterie typu AOB a NOB. Metoda využívá fluorescenčního signálu, který se zvyšuje s množstvím DNA. [7]

Metoda New Generation Sequencing (NGS) je založená na masivním paralelním sekvenování fragmentů DNA v jednom vzorku současně. Umožňuje určit složení organismu, v našem případě celkové složení biofilmu. [20]

2.4.3 Obrazová analýza

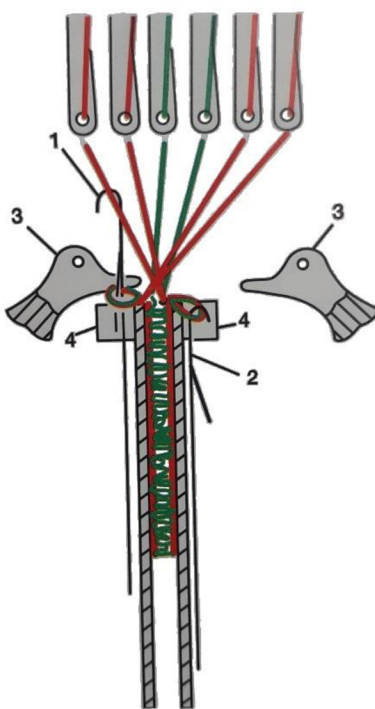
Rozložení biofilmu na nosiči lze zkoumat pomocí obrazové analýzy. Metoda slouží pouze k doplnění informací získaných o konkrétním složení, protože jej hodnotí pohledem na povrch nikoli dovnitř struktury. Účelem je objektivní rozlišení zřejmých barevných rozdílů a tím detekování oblastí biofilmu. Odstíny bílé a šedé odpovídají samotnému nosiči, odstíny žluté až hnědé odpovídají biofilmu. Identifikace jednotlivých oblastí na snímcích probíhá pomocí prahování. Pro vyhodnocení je nutné oddělit oblasti nosiče a oblast biofilmu. Oddělení nosiče od pozadí je možné pomocí prahování na intenzitě jasu. Pro oddělení biofilmu se ukázalo nejvhodnější prahování v barevném prostoru HSV. Vyhodnocováno je plošné zaplnění nosiče biofilmem. [12]

3 Pletařská technika a vazby

Osnovní pletařská technologie je pro tvorbu nosičů vhodná svou možností zakomponovat do struktury dlouhé úseky filamentů, zároveň poskytuje dostatečně prodyšnou strukturu pro proudění odpadní vody a svou omezenou paratelností zajišťuje stálost struktury.

3.1 Rašlový pletací stroj

Rašlový stroj se řadí spolu s osnovními a galonovými stávkami mezi osnovní pletací stroje. Vyskytuje se v jednolůžkové a dvoulůžkové variantě (Obr. 3). Pro výrobu oboulicních distančních pletenin jakožto nosičů biomasy se používá dvoulůžkový rašl. [21]



Obr. 3: Pracovní ústrojí dvoulůžkového rašlu s jazýčkovými jehlami – 1) a 2) jazýčková jehla, 3) platiny, 4) jehelní lůžko [22]

Pracovní ústrojí sestává z jazýčkových pletacích jehel uložených zády k sobě v jehelních lůžkách a kladecích přístrojů (KP). [23] K zabránění nežádoucího uzavírání jazýčku jehel slouží srážecí drát. Uzavírací funkci platin nutných na jednolůžkových rašlech může přebrat jehelní lůžko s odhozovou hranou. Přítomnost platin na dvoulůžkovém rašlu má však výhodu v tom, že lze plést delší úseky, kdy neprovazují obě lůžka. [24]

Principem tvorby pleteniny na osnovních pletacích strojích je kladení osnov na jehly, které se pohybují společně a vytváří očka. Osnovní nitě jsou navlečené v jednotlivých kladecích jehlách – jedna kladeční jehla, jedna osnovní nit. Kladeční jehly jsou připevněny na kladeční přístroj, který vykonává hromadný pohyb podle zadané vazby. Každý KP má individuální návlek, který může být plný nebo dílčí. [25]

Základem kladení na osnovních pletacích strojích jsou charakteristické pohyby KP – výkyv a posuv. Posuv pod jehlami, výkyv mezi jehlami, posuv nad jehlami a výkyv mezi jehlami zpět. [26, 27] Na dvoulůžkových rašlech provádí KP více pohybů mezi jehlami, aby nedocházelo ke kolizi kladecích a pletacích jehel. [21, 25, 26] Nejprve plete přední lůžko, poté zadní. [23]

Cyklus pletení na dvoulůžkovém rašlu: [21, 24]

- a) *základní poloha*
- b) *uzavření* – jehly předního lůžka se zvednou do uzavírací polohy, zatímco zadní lůžko drží pleteninu u odhozové hrany
- c) *kladení* – KP vykývne, posune se podle požadované vazby nad jehlami a vykývne zpět
- d) *nanášení* – jehly klesají, očko staré pleteniny překlopí jazýček a začne se na něj nanášet
- e) *odhoz* – jehly klesají dál, očko staré pleteniny přepadne přes hlavu jehly
- f) *zatahování* – dalším poklesem jehly je zatažena požadovaná délka očka
- g) Následuje posuv KP pod jehlami a stejný proces pletení se opakuje pro zadní lůžko.

3.2 Vazební možnosti

Následující kapitola je věnována vazbám s otevřenou strukturou a distančním pleteninám. V předchozích výzkumech mikrovláknenných nosičů byly využity filetové vazby tvořící horní a spodní vrstvu distanční pleteniny, protože svou otevřenou strukturou evokovaly komerčně dostupné nosiče. Zároveň otvory v pleteninách může proudit odpadní voda, čímž je zajištěn kontakt biofilmu s nežádoucími látkami, které je potřeba odstranit.

Nefixované pleteniny mají tendenci se formovat do tvaru s nejmenším napětím. Tím dochází ke stáčení a zešikmení oček. „Vyrovnané“ pleteniny může být docíleno použitím vhodného kladení jednoduché vazby nebo vazeb dvojitých, kdy se ke kladení využívají dva KP. Dvojitě osnovní pleteniny se používají ke snížení tažnosti pletenin, zvýšení jejich pevnosti i ke zlepšení jiných např. užitných vlastností. Stejnoseměrně nebo protiseměrně lze kombinovat vazby stejného, rozdílného typu či vazby libovolně vytvořené. [26]

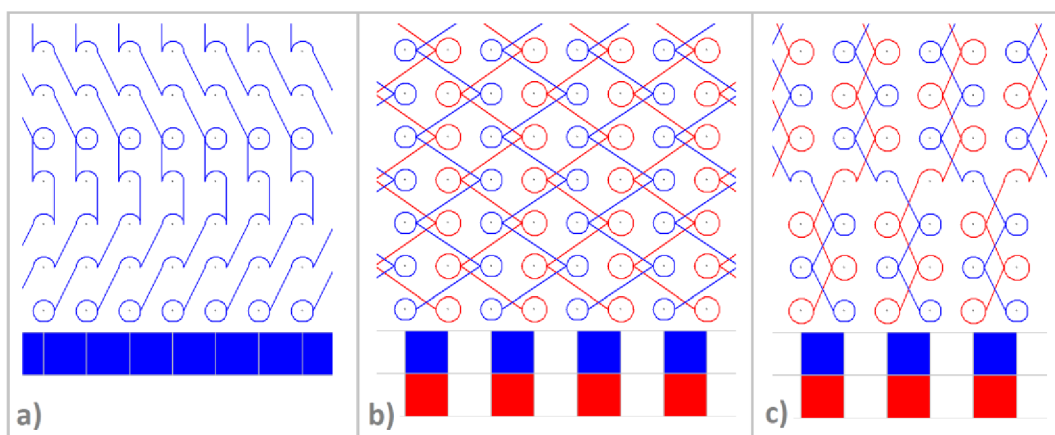
Při navrhování vazby spolu s návlekem musí být dodrženo neustále kladení minimálně jedné nitě na zvolenou jehlu. Pokud by na určité jehle došlo k vynechávání kladení, jazýček jazýčkové jehly zůstane zavřený a nebude vznikat požadovaný sloupek. [21]

3.2.1 Filetové vazby

Pro filetové vazby jsou typické otvory vzniklé nespojením sousedních sloupků oček v určité části. Jejich velikost je dána počtem řádků, ve kterých nebyly sloupky provázány. Vytvářet se dají struktury s řídkým nebo s hustým rozložením otvorů za použití jednoho, dvou, případně více KP. Návlek je zpravidla dílčí (např. 1:1, 2:1), ale může se objevit i návlek plný. [26] Variabilita filetových vazeb spočívá v možnosti vytvoření různě velkých nebo různě rozmístěných otvorů vůči sobě (nad sebou, diagonálně), ale také v tvorbě ploch hladké pleteniny mezi otvory, které může být využito právě ve prospěch zajištění většího množství materiálu v pletenině.

Jednopřístrojové filetové vazby (Obr. 4a) využívají kombinace řetízkového a trikotového/postupného kladení. Použít se dá i kladení přes dvě jehly. Otvory vznikají v celém řádku a pletenina je v těchto místech řídká. [26]

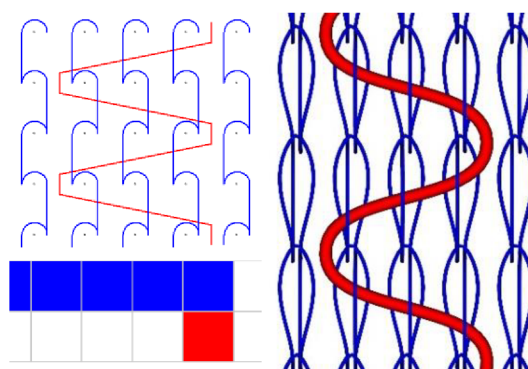
Dvoupřístrojové filetové vazby (Obr. 4b a 4c) jsou více variabilní a mohou vznikat různými způsoby. Zpravidla se v tomto typu vazby objevuje protisměrné kladení dvou KP s dílčím návlekiem kladoucí stejnou vazbu zrcadlově obrácenou. [26] Struktura pleteniny je díky protisměrnému kladení stejné vazby rovnoměrná a symetrická. Pro vytvoření filetové vazby je možné využít také žakáru a vytvořit otvory lokálně zkráceným kladením (trikotové kladení nahrazeno částečně řetízkem). [27]



Obr. 4: Příklady filetových vazeb podle [26] - a) jednopřístrojový filet, b) dvoupřístrojový filet v suknové vazbě s malými otvory, c) dvoupřístrojový filet s velkými otvory

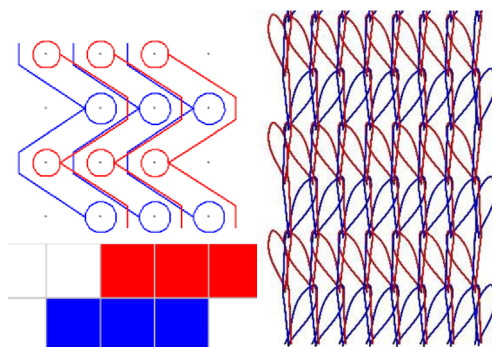
3.2.2 Polosíťovaná struktura

Pro vysvětlení polosíťované struktury je zapotřebí nejprve porozumět tzv. kladení pod jehlami (KPJ), při kterém se na daných jehlách nevytváří očka. KPJ musí být kombinováno s dalšími typy vazeb např. s řetízkem (Obr. 5). Při tomto typu kladení nedochází k posuvu kladecích jehel v pozici nad jehlami, čímž nedojde k nakladení nitě do hlavy jehly. [28] Jedná se o určitý typ útkového kladení s tím rozdílem, že kladení v tomto případě není realizováno v celé šíři. KPJ se klade pouze o omezený počet roztečí, a to s ohledem na možnosti příslušného stroje. [26] Důležité je respektovat pořadí kladecích přístrojů, aby byla nit KPJ správně uchycena mezi spojovací klíčkou a očkem. KPJ bude klást kladecí přístroj mezi jehelním lůžkem a očkotvorným KP. [23, 25] Podrobnější pravidla pro tvorbu KPJ jsou uvedena v [25]. KPJ se používá zejména při produkci elastických pletenin, zdravotnických obvazů, dekorativním bytovém textilu případně při tvorbě krajkoviny.



Obr. 5: Řetízek provázaný KPJ podle [25] – vlevo – kladení, vpravo – provázání 3D

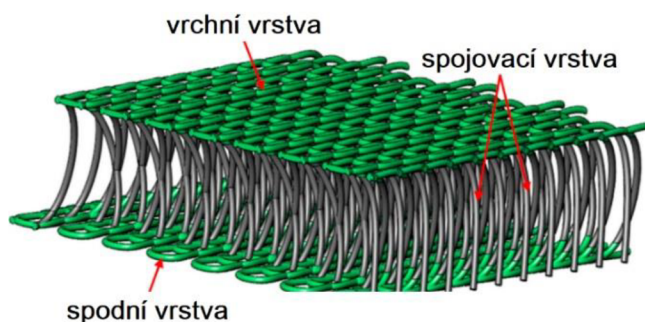
Polosíťovaná struktura vzniká pomocí dvou KP z nichž oba střídají očkovorné kladení s KPJ (Obr. 6). Vzniká tak vazba tvořená očky a propletenými spojovacími kličkami. KPJ v tomto případě není chyceno mezi jehelní lůžko a spojovací kličku. Nit vytvoří nejprve očko a poté se posune po spojovacích kličkách do fixní polohy, čímž vznikne polosíťovaná struktura. [26] Použitím této vazby v distančních pleteninách by došlo k zafixování KPJ v jiné poloze, čímž by se změnila struktura vazby, nebyla by polosíťovaná.



Obr. 6: Polosíťovaná struktura podle [25] – vlevo – kladení (plný návlek), vpravo – provázání

3.2.3 Distanční pleteniny

Osnovní distanční pleteniny jsou oboustranné pleteniny tvořené na dvoulůžkových pletacích strojích, využívající více kladečních přístrojů, z nichž část klade buď na přední, na zadní nebo na obě lůžka. [25] Tvoří je dvě vrstvy textilie, které jsou propojeny rubní stranou⁶ k sobě (Obr. 7). [23] Tloušťka textilie je variabilní, ovlivnitelná nastavitelnou vzdáleností jehelních lůžek, kladením a použitým materiálem. [23, 25] Dostatečně tuhý materiál (zpravidla monofil) provazující obě lůžka spojovací vrstvou způsobuje odstup vrstev, tedy distanci pleteniny. Výsledná pletenina má mezi spodní a vrchní vrstvou dutý prostor, který může být vyplněn plynem, pevnou látkou nebo kapalinou. [21] Ve své konečné podobě se distanční pleteniny používají například jako popruhy batohů, vycpávky košíčků podprsenek, obuv nebo potahové textilie bytového nábytku. [21]



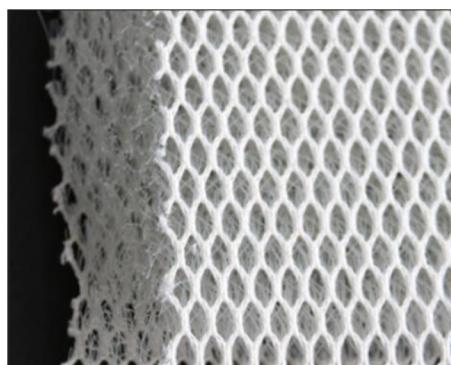
Obr. 7: Průřez distanční pleteninou [29]

⁶ Na technickém rubu pleteniny jsou vidět spojovací kličky, na technickém líci jsou vidět očka.

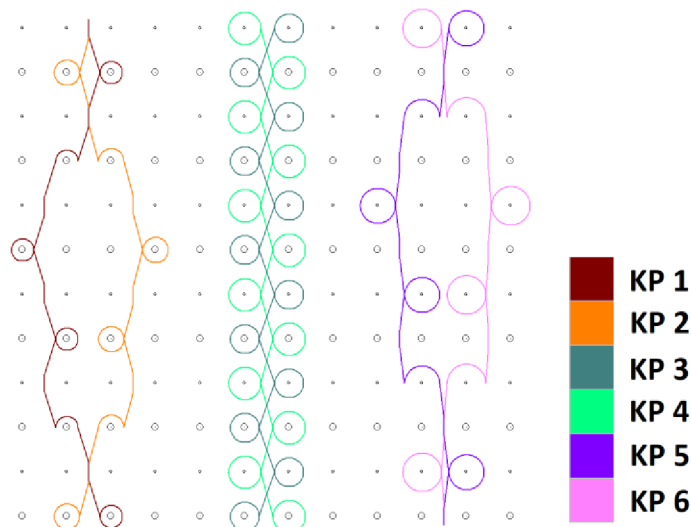
3.2.3.1 Distanční síťované pleteniny

Filetové vazby je možné využít i v distančních pleteninách. Přirozené otvory filetu spolu s distancí zajišťují lehkou provzdušněnou strukturu s dobrou cirkulací vzduchu. Tím, že distanční pletenina disponuje dvěma propojenými textiliemi, je možné vytvořit dvě vrstvy s rozdílným vzhledem a strukturou. Docílit se tak dá například pleteniny s hladkou vazbou na jedné straně a filetovým provázáním na druhé straně. [25]

Distanční síťované pleteniny se používají v již zmíněných popruzích a zádech batohů nebo ve sportovní obuvi pro zlepšení komfortu nošení. [25] Příklad distanční síťované pleteniny je na obr. 8. Ukázka kladení stejné vazby v obou vrstvách distanční pleteniny je na obr. 9 – doupřístrojový filet kladený protisměrně s využitím dílčího návleku 1:1, spojovací KP 3 a 4 kladou protisměrně trikot na obě lůžka. [25]



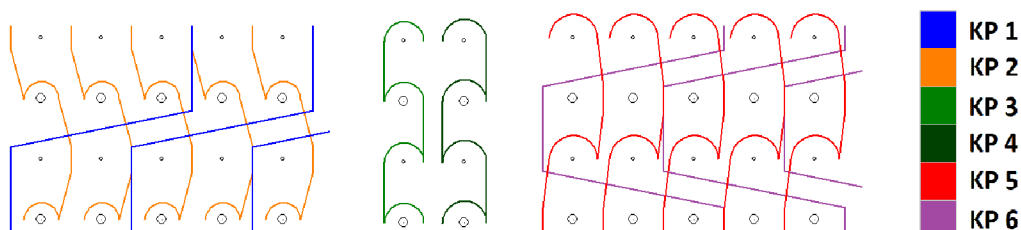
Obr. 8: Příklad distanční síťované pleteniny [30]



Obr. 9: Distanční síťovaná pletenina podle [25] – KP 1, 2, 5, 6 (návlek 1:1), KP 3, 4 (plný návlek)

3.2.3.2 Klazení pod jehlami v distanční pletenině

Distanční pleteniny nemusí být síťované, lze do nich aplikovat i KPJ. Vazba může poskytnout výhodu ve volnější, méně stlačené struktuře nití. Ukázka klazení je na obr. 10 – na předním a zadním lůžku je použito klazení řetízku (plný návlek) a KPJ (návlek 1:1). [25]



Obr. 10: KPJ v distanční pletenině podle [25] – KP 1, 6 (návlek 1:1), KP 2, 3, 4, 5 (plný návlek)

3.3 Zajištění hladkých okrajů pleteniny

U běžných pletenin vznikají velice často nevzhledné zubaté okraje způsobené „částečným“ klazením na okrajovou jehlu (popř. více jehel). Při střídání klazení a neklazení na vybranou jehlu dochází nejprve k vytvoření záchyty a poté k jeho odhození. Odhazovaný záchyt zavře jazýček jehly a při dalším klazení nit sjede po jehle. Nedokonalé zaplétání krajů je provázáno jinou spotřebou nitě, jiným napnutím případně přebytkem nitě v kraji pleteniny. [26]

Těmto okrajům se dá předcházet několika způsoby. Jednopřístrojové pleteniny mohou využít navlečení elastického materiálu v krajních jehlách KP. Elastický materiál po odhozu kraj stáhne. Další možností je vyřazení okrajových pletacích jehel z činnosti. Současně s oběma způsoby musí být materiál pro kraje odvíjen ze samostatných cívek. Vytvoření rovných okrajů u dvou a vícepřístrojových vazeb je možné docílit správnou kombinací klazení a návleku KP. [26]

4 Parametry

4.1 Ekvivalentní průměr vlákna

Ekvivalentní průměr vlákna odpovídá průměru kruhu, jehož plocha je stejná jako plocha příčného řezu vlákna. [31]

$$d_e = \sqrt{\frac{4s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4t}{\pi\rho}} \quad (3)$$

d_e ekvivalentní průměr vlákna [mm],

s plocha příčného řezu vlákna [mm²],

t jemnost vláken [tex],

ρ hustota vláken [kg·m⁻³].

4.2 Tvarový faktor průřezu podle Malinowské

Tvarový faktor vyjadřuje poměr obvodu skutečného průřezu vlákna a obvodu kruhu s ekvivalentním průměrem. Minimální hodnota 0 odpovídá situaci, kdy reálné vlákno má ideální tvar válce. Pro všechna ostatní vlákna platí $q > 0$. [31]

$$q = \frac{o}{\pi d_e} - 1 \quad (4)$$

q tvarový faktor průřezu [-],

o obvod skutečného průřezu vlákna [mm],

d_e ekvivalentní průměr vlákna [mm].

4.3 Měrný povrch

Měrný povrch vláken je vyjádřen jako povrch vláken na jednotku hmoty. Vyjadřuje se tedy jako poměr povrchu pláště vláken a jejich hmotnosti (6). Vztah lze rozvinout pomocí tvarového faktoru podle Malinowské, ekvivalentního průměru vlákna a jeho délky. [32] Pokud se jedná o multifilový svazek v osnovní pletenině, musí být ve vztahu zahrnut navíc počet fibril ve svazku a počet osnovních nití dané struktury (7). [33] Pro vlákenné směsi platí vztah (8) pro výpočet středního měrného povrchu vláken, kde je zahrnut hmotnostní podíl jednotlivých komponent a jejich dílčí měrný povrch. [34]

Celkový měrný povrch multifilu pro nosič se považuje za maximální. Vychází z definice volné struktury nití, kdy se jednotlivé fibrily nedotýkají. Měrný povrch se dá měřit metodou B. E. T, která využívá povrchové adsorpce plynových molekul. Tato metoda zaznamená i mikrotrhliny ve fibrile, hodnoty tak zpravidla vychází vyšší než vypočtené. [33] Pro zjištění měrného povrchu je možné využít i CT snímání, jímž se nasnímá vzorek, naprahuje se povrch a objem a měrný povrch se dále dopočítá z příslušných vztahů. [18]

$$A = o \cdot L \cdot 10^{-3} = \pi d_e (1 + q) \cdot L \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

$$a_i = \frac{A}{m_i} = \frac{\pi d_e (1 + q) \cdot L \cdot 10^{-3}}{m_i} \quad (6)$$

$$L = n \cdot N \cdot l \quad (7)$$

$$a = \sum g_i \cdot a_i \quad (8)$$

- A* povrch pláště vláken [m²],
o obvod skutečného průřezu vlákna [mm],
L souhrnná délka vláken ve vzorku [m],
d_e ekvivalentní průměr vlákna [mm],
q tvarový faktor podle Malinowské [-],
a_i měrný povrch jednotlivých komponent [m²·kg⁻¹],
m_i hmotnost jednotlivých komponent [kg],
n počet vláken ve svazku [-],
N počet osnovních nití [-],
l délka 1 nitě ve vzorku [m],
a střední měrný povrch směsi [m²·kg⁻¹],
g_i hmotností podíl jednotlivých komponent [-].

5 Analýza vstupních materiálů

Označení použitých materiálů:

monofil PES 0,1 mm (1360 kg/m³) [35]

multifil PP 167dtex/32x2 SZ – 75 S (800-900 kg/m³) [35]

Monofil je označen pouze průměrem fibrily. Multifil se skládá ze dvou svazků tvarovaných nepravým zákrutem (označení SZ), z nichž každý má jemnost 167 dtex, obsahuje 32 fibril a společně jim je udělen ochranný zákrut směru S (75 m⁻¹). Kolonizace bakteriemi vybraných materiálů byla prokázána, stejně tak i použitelnost při zaplétání.

5.1 Metodika a podmínky testování

Materiály byly aklimatizovány při teplotě 20,4 °C a 48 % vlhkosti vzduchu.

5.1.1 Jemnost

Jemnost byla zjišťována podle normy ČSN EN ISO 2060. Na vijáku bylo navinuto 100 m a přádenko bylo zváženo. Měření bylo provedeno 10x. [36]

U monofilů se zpravidla neuvádí jemnost, pouze průměr fibrily. Proto byla jemnost měřena pouze u multifilu.

5.1.2 Zákrut

Zákruty byly zjišťovány podle normy ČSN EN ISO 2061 nepřímou metodou. Na zákrutoměru byl rozkroucen svazek délky 0,5 m do překroucení, předpětí bylo 0,5 cN/tex, provedeno bylo 20 měření. [37]

5.1.3 Řezy

Pomocí metody řezů a následně obrazové analýzy byly zjištěny parametry vláken potřebné k vypočtení měrného povrchu nití v nosiči. Zjišťovanými parametry byly: počet fibril ve svazku, skutečný obvod, ekvivalentní průměr fibril a tvarový faktor podle Malinowské. Řezy byly připraveny a vyhodnoceny podle interní normy IN-46-108-01/01. [38]

Monofil byl spolu s pomocným materiálem (bavlněná vlákna) protažen otvorem v kovové destičce. Přecházející materiál byl seříznut žiletkou. Destička byla vložena pod mikroskop a byly nasnímány řezy.

Multifil byl hodnocen analýzou měkkých řezů. Připraveno bylo 30 řezů. Vzorky byly odebírány z přádenka bez rozkroucení svazku. Struktura byla nejprve zafixována ve směsi smáčecího prostředku Spolion 8 a trochou disperzního lepidla Duvilax. Druhé fixování proběhlo po uplynutí 24 hodin po zaschnutí směsi stejných prostředků jako při první fixaci v poměru 1:1. Třetí fixace proběhla po uplynutí 24 hodin pouze disperzním lepidlem. Po uplynutí dalších 24 hodin byly vzorky zality směsí vosku a parafinu v plechové vaničce a zmrazeny. Jednotlivé bločky byly seříznuty a nařezány mikrotomem. Tloušťka řezů byla 15 μm a z každého zalitého bločku byl vyhodnocován jeden řez.

5.2 Vyhodnocení

5.2.1 Jemnost a zákrut multifilu

Označení materiálu: PP multifil 167 dtex/32 x 2 SZ – 75 S

Označená jemnost multifilu (v tomto případě 167 dtex) se uvádí pro jeden svazek před zkroucením. Družené svazky by tedy měly jemnost 33,4 tex. Víme, že jemnost skané nitě je ovlivněna seskáním vlivem zkroucení. Délka jednotlivých fibril, tím i hmota, je s vyšším zákrutem na metr větší. Vzhledem k jemnosti jednotlivých fibril a tvarování multifilu bylo nemožné rozkroutit svazky přímou metodou (tedy do nulového zákrutu) a odečíst seskání. Proto bude v dalších částech práce, zejména při zjišťování měrného povrchu, uvažované seskání zanedbáno. Zjištěné hodnoty jemnosti multifilu a jeho zákrut jsou uvedeny v tab. 1.

Data byla zpracována ve statistickém programu BlueSky Statistics. Naměřená data jemnosti i zákrutu splňovala normalitu, která byla potvrzena Shapiro-Wilkovým testem. Zjišťován byl průměr a 95 % interval spolehlivosti (IS). Pokud byla zadána hodnota, byla se souborem naměřených dat porovnána t-testem.

Tab. 1: Jemnost a zákrut multifilu

	průměr	95 % IS	zadáno
Jemnost celého svazku [tex]	35,65	<35,51; 35,8>	33,4
Zákrut [m⁻¹]	78,4	<73,59; 83,21>	75

Zjištěná jemnost celého svazku je vyšší než předepsaná jemnost, která uvažuje pouze svazky družené nikoli zakroucené. Vyšší hodnota jemnosti odpovídá větší hmotě na daný úsek.

Naměřené hodnoty počtu zákrutů odpovídají zadané hodnotě 75 m⁻¹.

Seskání nebylo v rámci měření počtu zákrutů zjišťováno, protože multifily se při snaze o ojednocení a urovnání vláken do rozkroucení zamotávaly do sebe.

5.2.2 Parametry vláken

Snímky řezů byly vyhodnoceny v obrazové analýze NIS Elements. Binární plocha jednotlivých vláken byla vybrána v Editoru binární vrstvy a pomocí Vyplnění autodetekcí byly vybrány řezy jednotlivých vláken. Nevhodné fibrily u multifilu (např. šikmo seříznuté, rozmazané) byly z hodnocení vyřazeny. Měřením byl zjištěn obvod vláken a ekvivalentní průměr. Z naměřených parametrů byl poté vypočítán tvarový faktor Malinowské. Počet fibril v multifilu byl spočítán interaktivně na jednotlivých řezech. Zadaný počet fibril multifilu je 32x2, celkem tedy 64 vláken v celém svazku. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

Data byla zpracována v programu BlueSky Statistics. Naměřená data splňovala normalitu, která byla potvrzena Shapiro-Wilkovým testem. Zjišťován byl průměr a 95 % interval spolehlivosti (IS).

Tab. 2: Parametry vláken

	Monofil PES		Multifil PP	
	průměr	95 % IS	průměr	95 % IS
obvod [μm]	346,96	<343,65; 350,26>	98,58	<97,59; 99,57>
ekvivalentní průměr [μm]	108,25	<107,24; 109,27>	30,39	<30,1; 30,69>
tvarový faktor Malinowská [-]	0,0178	<0,0138; 0,0218>	0,032	<0,0304; 0,0337>
počet fibril	1	-	61,5	<60,7; 62,3>

Výrobce uvádí 64 fibril v multifilovém svazku, naměřené hodnoty jsou prokazatelné nižší. Při řezání a zkoumání řezů pod mikroskopem mohlo dojít k uvolnění jednotlivých vláken, která se pravděpodobně posunula mimo zkoumaný obraz.

6 Návrh vazeb

6.1 Požadavky na strukturu nosiče

Vývoj nosiče vychází ze získaných poznatků předchozích let, kdy byl hledán vhodný prototyp mikrovlákněného nosiče, a dále možnosti porovnání dat z vyhodnocení experimentálního měření. Následující body byly vstupními parametry, které zásadně omezovaly škálu návrhů vazeb.

1. vstupní materiál – PP multifil, PES monofil
2. návlek všech KP
3. nastavení stroje – rychlost podávání, odtahu a pletení
4. střída vzoru
5. finalizace nosiče – oddělovací proces formou stříhu, relaxace pleteniny

Pro realizace experimentální výroby a testování nosičů se použil jeden vybraný návlek a stejná střída kvůli srovnání nosičů se změnou kladení a z časové náročnosti změny návleku.

6.2 Návrhy

Zajištění cenové dostupnosti a vysokého měrného povrchu nosiče je zásadní pro osidlování struktury biofilmem. Většího měrného povrchu lze docílit dodáním více materiálu na 1 nosič. Rychlejší příprava, výroba a finalizace může zajistit cenovou dostupnost nosiče na trhu.

Návrh nosičů ve formě distanční pleteniny vychází z předchozího vývoje prototypu nosiče PP/PES, navržen je na 24 sloupků a 36 řádků. Vazba v obou vrstvách distanční pleteniny je stejná. Nosiče sestávají z přechodové (12 řádků) a vzorové (24 řádků) části. Změna vazby byla navržena pouze pro vzorovou část, vazba v přechodové části zůstala stejná. V návrzích byly použity zejména filetové vazby s otvory, a to z důvodu okysličování prostředí mezi vrstvami distanční pleteniny pro správnou tvorbu a funkčnost biofilmu. Navrženo bylo celkem 7 vazeb.

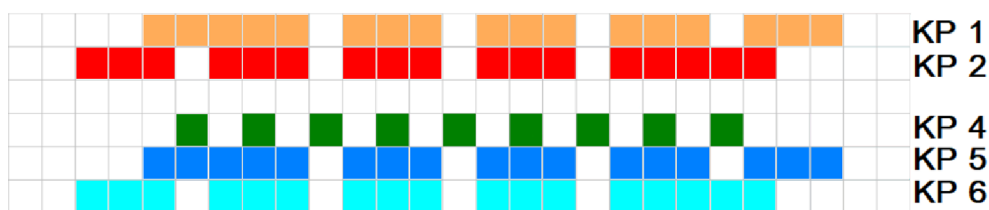
Kladeční přístroje 1, 2, 5 a 6 kladou PP multifil. KP 4 klade PES monofil a pro všechny návrhy je kladení tohoto KP beze změny. Vazby byly zakresleny v programu *TexMind Warp Knitting Patter Editor*, stejně tak i následná vizualizace pleteniny pro lepší představu vznikajících otvorů.

6.3 Návlek kladečních přístrojů

6.3.1 Návlek 1

Návlek 1 vychází z neměnného návleku prototypu nosiče PP/PES, který značně omezuje možnosti kladení.

KP 4 je navlečen 1:1, KP 1, 2, 5 a 6 je navlečen 3:1 podle obr. 11 s úpravou okrajů pásu nosiče tak, že se na krajní jehle ve výsledku nevytvoří očka, ale zůstanou zde volnější nitě. Pro více pásů nosičů se uvedený návlek opakuje s vynecháním 2 jehel, aby nedošlo k jejich nežádoucímu propojení.



Obr. 11: Návlek 1 pro jeden pás nosiče

6.3.2 Návlek 2

Omezené možnosti kladení způsobené neměnným návlekiem 1 vycházejícím z prototypu nosiče PP/PES a zachováním počtu řádků a sloupků pro jeden nosič vedly k návrhu jiného kladení s jiným počtem sloupků.

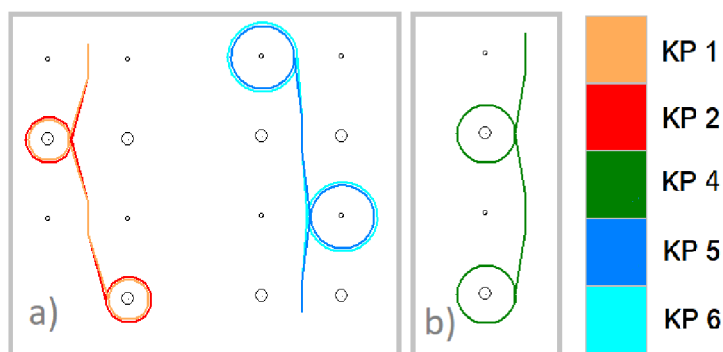
KP 1, 4, 5 jsou navlečeny 1:1, KP 2, 3, 6 jsou navlečeny v poměru 5:1 podle obr. 12. Stejně jako u návleku 1 bylo upraveno navlečení krajů jednotlivých KP pro jeden pás nosičů tak, aby na se na okrajové jehle nevytvářela očka. Pro více pásů platí rovněž opakování znázorněného návleku s vynecháním 2 jehel.



Obr. 12: Návlek 2 pro jeden pás nosiče

6.4 Kladení v přechodové části

Kladení v přechodové části je pro všechny navržené nosiče stejné. KP 1, 2, 5 a 6 kladou stále na stejná lůžka jako ve vzorové části stejnosměrně trikot tak, že vzniká hladká pletenina bez otvorů. KP 4 kladou v přechodové části řetězky pouze na přední lůžko (Obr. 13b). Zobrazené kladení na obr. 13a znázorňuje kladení pro KP 1, ekvivalentně však kladou KP 2. KP 5 a 6 kladou stejnou vazbu, pouze na zadní lůžko.

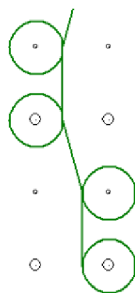


Obr. 13: Přechodová část – a) trikotové kladení pro KP 1, 2, 5, 6 (návlek 3:1); b) řetězkové kladení pro KP 4 (návlek 1:1)

6.5 Kladení ve vzorové části

Pro vazby 1-5 byl použit návlek 1, pro vazbu 6 byl použit návlek 2. Vazby 1-3 a 5-6 byly navrženy jako vazby filetové a platí pro ně, že KP 1, 2 kladou protisměrně stejnou vazbu na předním lůžku, KP 5, 6 kladou stejnou vazbu jako předchozí KP na zadní lůžko. Vazba 4 byla navržena bez otvorů a platí pro ni, že všechny KP kladou stejnosměrně stejnou vazbu.

Kladení KP 4 je pro všechny vazby stejné. Ve vzorové části klade KP 4 střídavě trikot podle obr. 14 na obě lůžka, čímž vzniká provázání obou vrstev pleteniny a tím její distance. Prostor vzniklý spojovací vrstvou je potřebný k proudění odpadní vody a růstu biofilmu.



Obr. 14: Trikotové kladení KP 4 na obě lůžka (návlek 1:1)

Následující odstavce se věnují návrhu kladení pro KP 1, 2, 5 a 6.

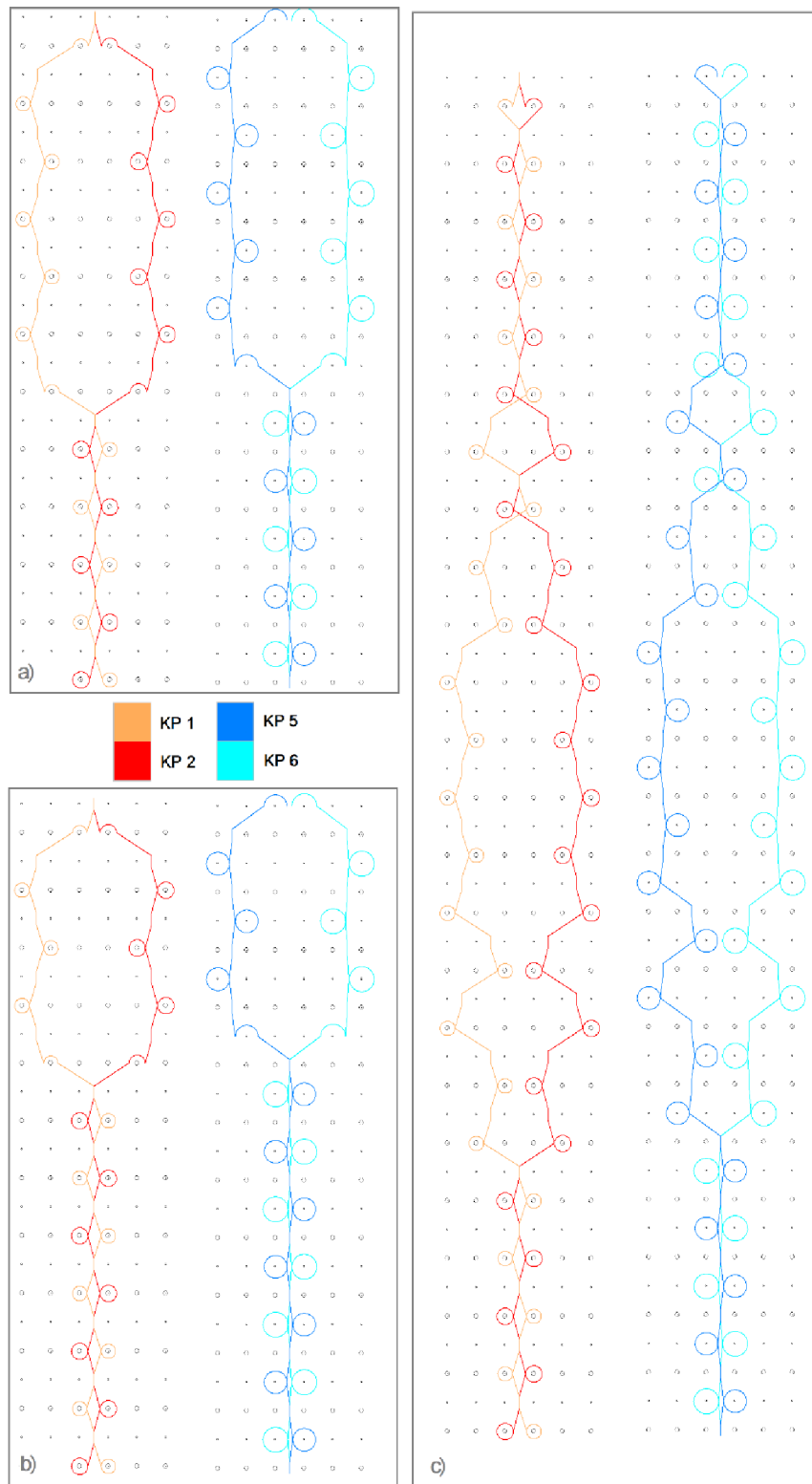
Vazba 1 (Obr. 15a) a 2 (Obr. 15b) byly navrženy na 12 řádků a daná střída se v nosiči opakuje 2x. V průběhu kladení jsou kombinovány spojovací kličky o 1 a o 2 rozteče, přičemž do počtu těchto kliček se dané vazby neliší. Pro jeden kladeční přístroj je v celé vazné části nosiče celkem 20 spojovacích kliček o 1 rozteč a 4 spojovací kličky o 2 rozteče. Rozdíl mezi vazbou 1 a 2 je ve velikosti otvorů. Vazba 1 byla navržena s diagonálně rozmístěnými stejně velkými otvory (stejný počet řádků pro neprovázané sloupky). Vazba 2 byla navržena s různě velkými otvory diagonálně rozmístěnými, přičemž v obou vrstvách pleteniny se střídala řada větších s řadou menších otvorů.

Vazba 3 (Obr. 15c) byla navržena na 24 řádků a v nosiči se opakuje 1x. V průběhu kladení jednoho KP se v celé vazné části vyskytuje 16 spojovacích kliček o 1 rozteč a 8 spojovacích kliček o 2 rozteče. Ve vazbě se objevují tři velikosti otvorů (odlišný počet řádků pro neprovázané sloupky). Menší otvory neprovazující pouze v 1 řádku vznikly kvůli snaze o prodloužení hladké části pleteniny mezi řadami větších otvorů. Ideou delší hladké části pleteniny mezi otvory je zajištění většího počtu delších kliček ve vazbě a tím potenciálně zajistit větší množství materiálu v nosiči pro obsazení biomasou.

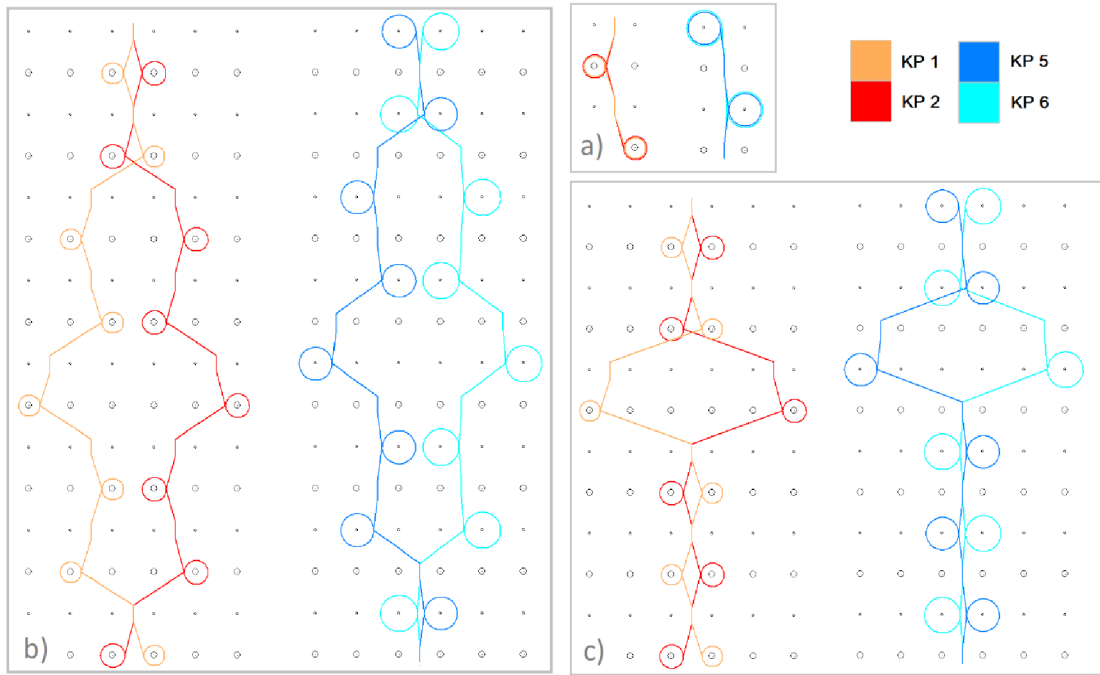
Vazba 4 (Obr. 16a) byla navržena jako hladká pletenina bez otvorů formou trikotového kladení. Ve vazbě jsou pouze spojovací kličky o 1 rozteč, přičemž v celé vazné části nosiče jich je pro jeden KP celkem 24. Tato vazba byla navržena pro porovnání s filetovými vazbami kvůli své jednoduché výrobě.

Vazba 5 (Obr. 16b) byla navržena na 8 řádků a v nosiči se opakuje 3x. V průběhu kladení jednoho KP se v celé vazné části vyskytuje 12 spojovacích kliček o 1 rozteč a 12 spojovacích kliček o 2 rozteče. Ve vazbě se objevují různě velké otvory (odlišný počet řádků pro neprovázané sloupce). Stejně jako u vazby 3 byla snaha prodloužit hladkou plochu pleteniny mezi řadami větších otvorů, čímž vznikly menší otvory neprovazující v 1 řádku.

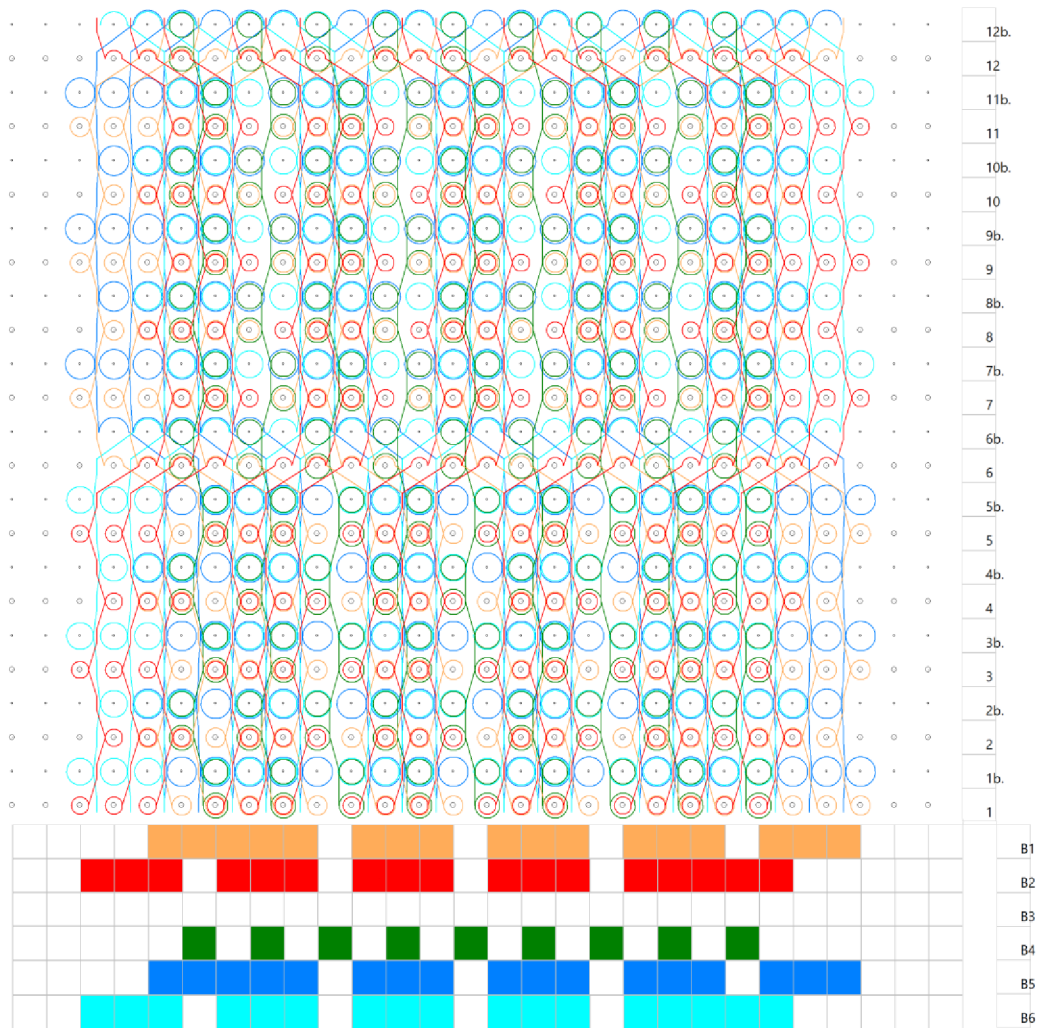
Vazba 6 (Obr. 16c) byla navržena na 6 řádků a v nosiči se opakuje 4x. V průběhu kladení jednoho KP se v celé vazné části vyskytuje 16 spojovacích klíček o 1 rozteč a 8 spojovacích klíček o 3 rozteče. Ve vazbě jsou kombinovány větší otvory s malými otvory neprovazující pouze v 1 řádku. Podobně jako u vazby 3 malé otvory vznikly ve snaze o rozšíření plochy hladké pleteniny vedle jednotlivých otvorů s cílem zajistit větší množství materiálu pro obsazení biomasou.



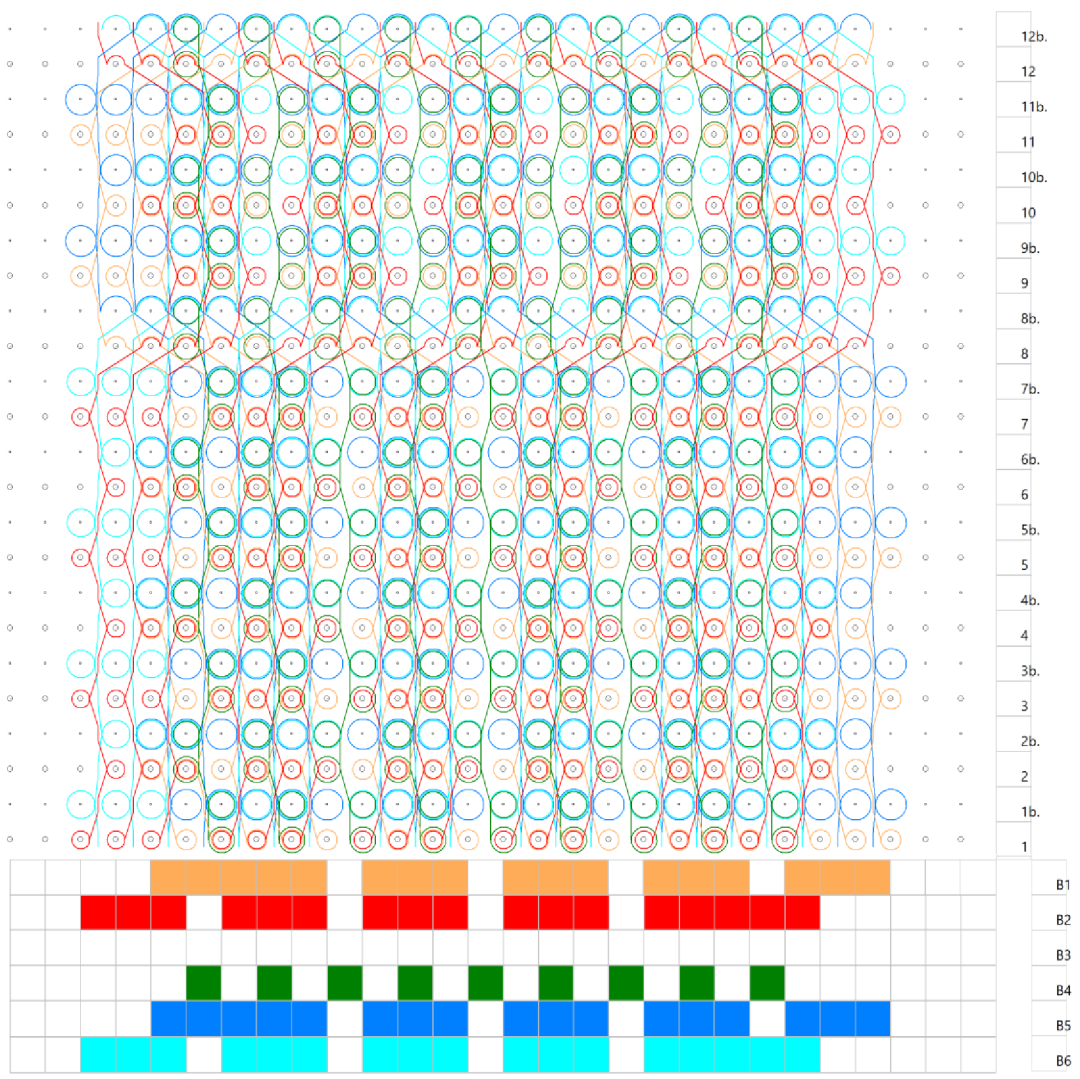
Obr. 15: Zápis kladení KP 1, 2, 5 a 6 (návlek 3:1) – a) vazba 1, b) vazba 2, c) vazba 3



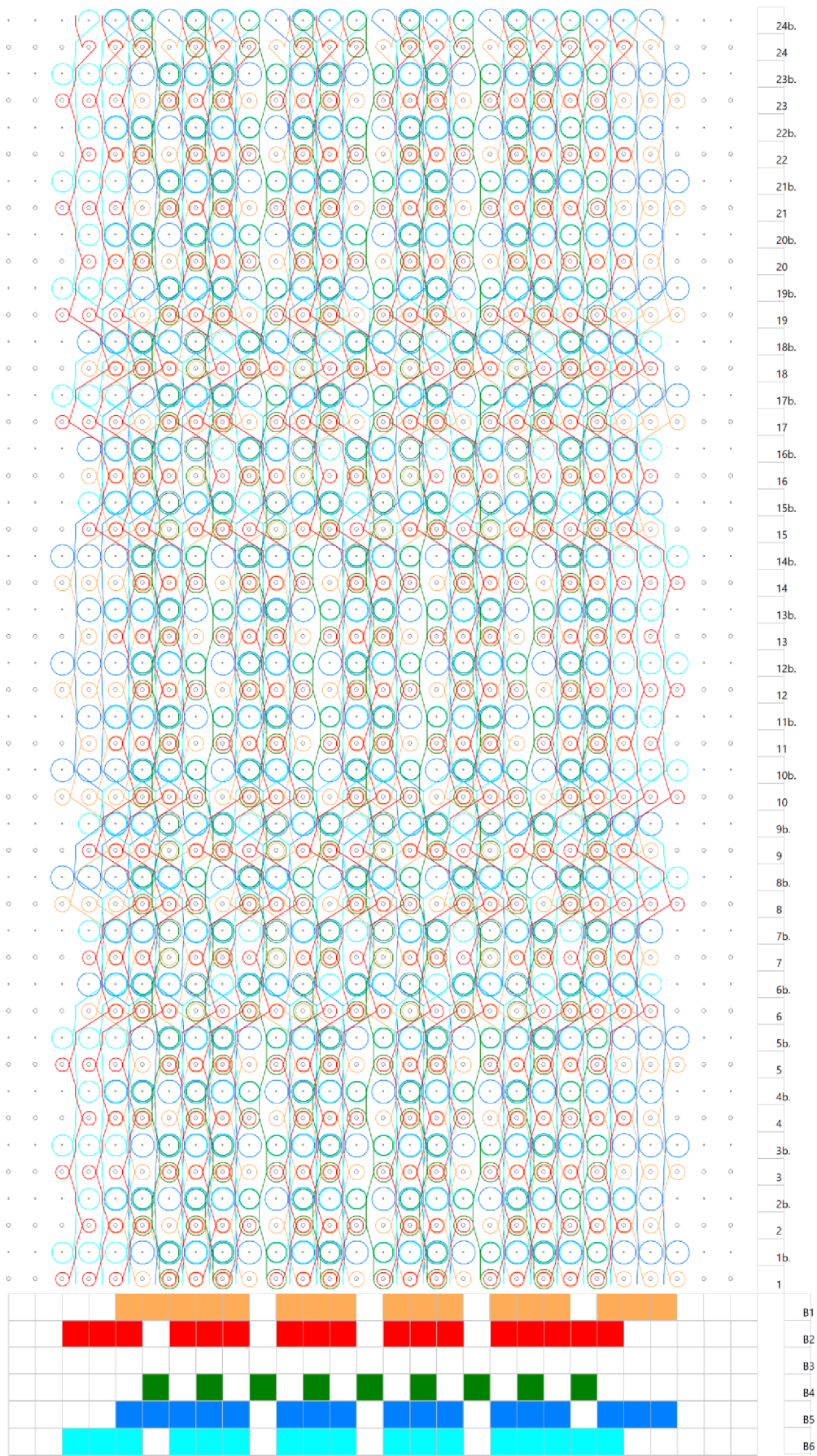
Obr. 16: Zápis kladení KP 1, 2, 5, 6 – a) vazba 4 (návlek 3:1), b) vazba 5 (návlek 3:1), c) vazba 6 (návlek 5:1)



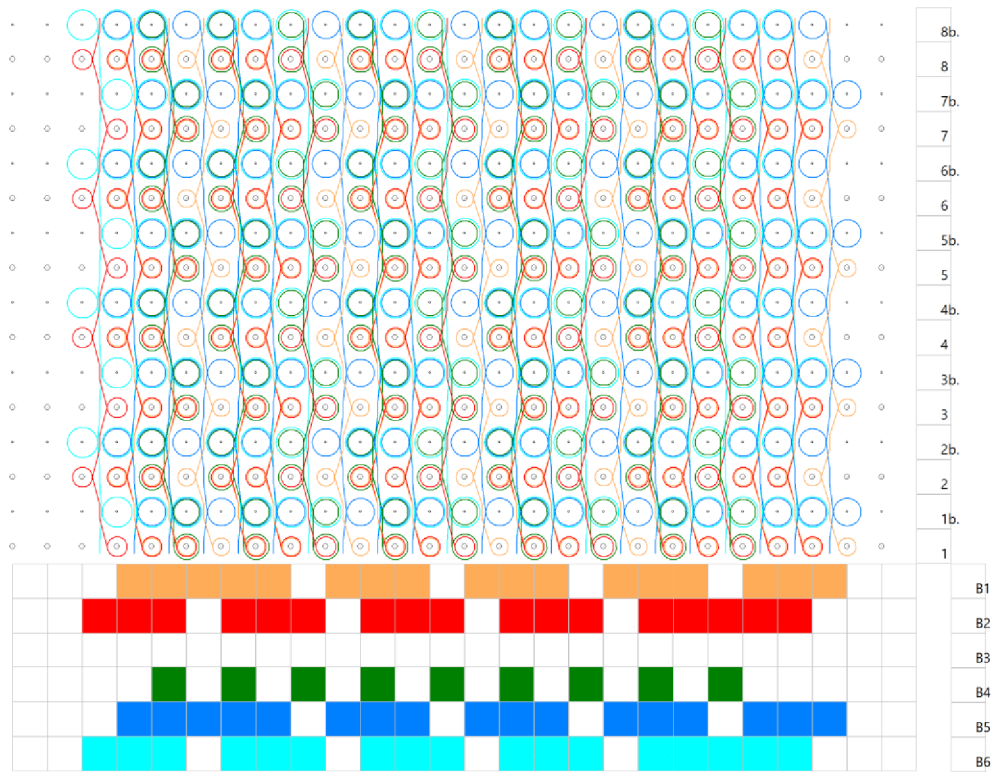
Obr. 17: Vazba 1 – 1x střída vzorové části pro jeden nosič



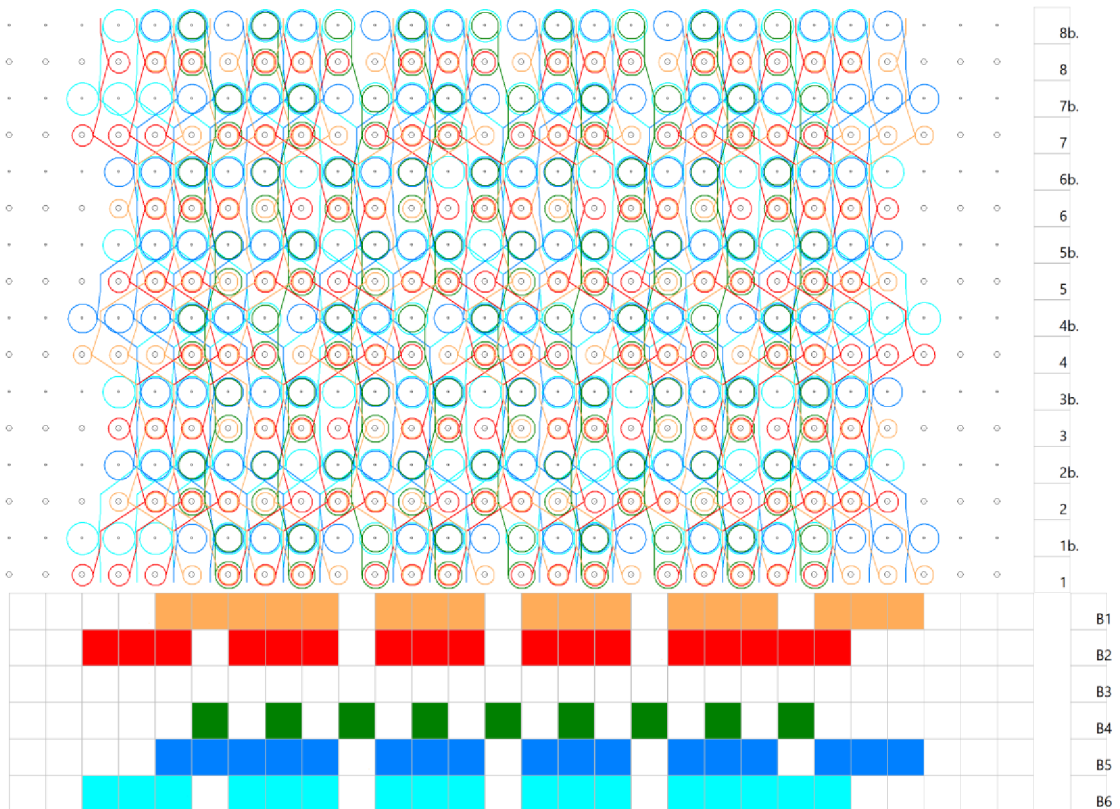
Obr. 18: Vazba 2 – 1x střída vzorové části pro jeden nosič



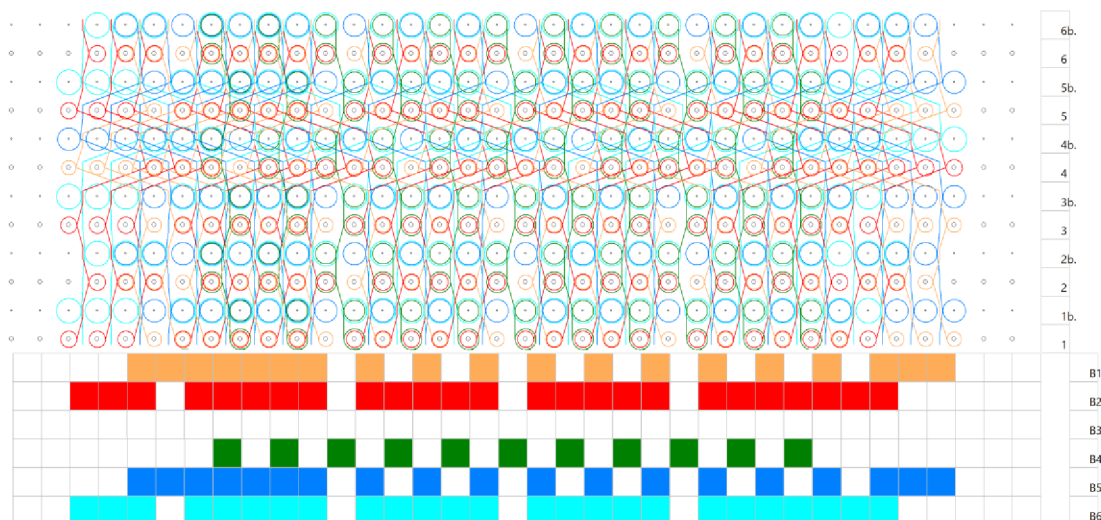
Obr. 19: Vazba 3 – 1x střída vzorové části pro jeden nosič



Obr. 20: Vazba 4 – 4x střída vzorové části pro jeden nosič



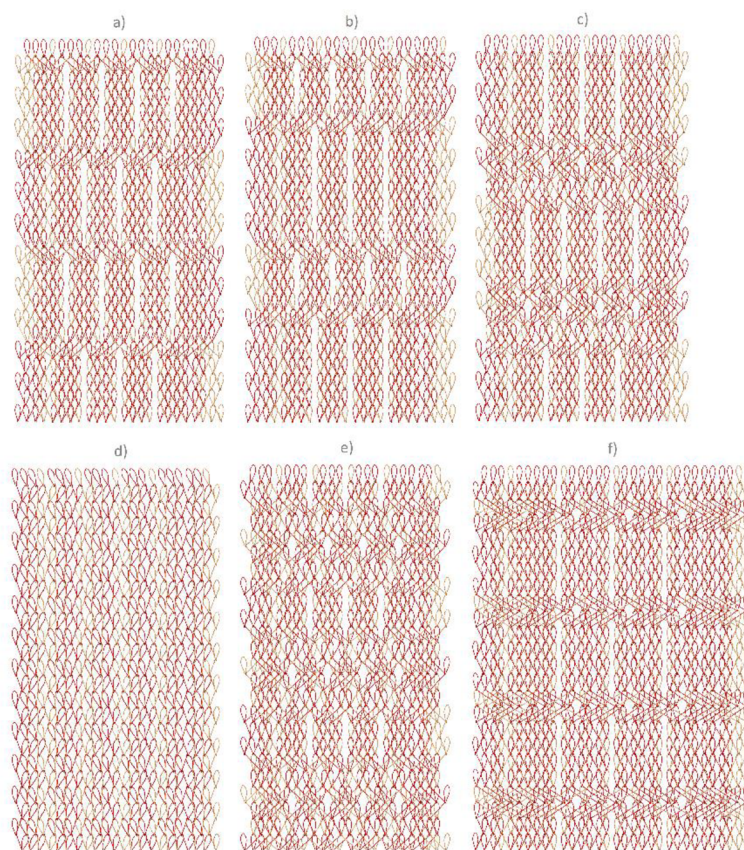
Obr. 21: Vazba 5 – 1x střída vzorové části pro jeden nosič



Obr. 22: Vazba 6 – 1x střída vzorové části pro jeden nosič

6.6 3D vizualizace

Vazby v provázání byly vykresleny v programu *TexMind Warp Knitting Patter Editor* kvůli vizualizaci rozdílného rozložení otvorů. Reálnou pleteninu je náročné vykreslit, a to z důvodu složitého nastavování příslušných parametrů (zejména rozměry oček) tak, aby nedocházelo k nepatřičným překryvům nití. Skutečný vzhled je navíc ovlivněn relaxací pleteniny. Na obr. 23 je vzhled pleteniny vazné části nosiče na jedné straně. Při snaze vizualizovat oboustranní pleteninu byl shluk nití velmi nepřehledný, otvory byly nerozeznatelné.



Obr. 23: 3D vizualizace provázání – a) vazba 1, b) vazba 2, c) vazba 3, d) vazba 4, e) vazba 5, f) vazba 6

7 Výroba

Tvorba nosičů byla realizována v poloprovozní laboratoři KTT sekce pletení. Výroba, strukturální analýza i testování v poloprovozním reaktoru bylo realizováno pouze pro nosiče s vazbou 1-4. V dalších kapitolách, bude použito kratší označení nosič 1-4 dle použité vazby (př. nosič 1 = nosič s vazbou 1). Vyrobené nosiče 1-3 se liší velikostí a rozložením otvorů. Nosič 4 s hladkou vazbou byl vyroben pro posouzení nutnosti samotné přítomnosti otvorů.

7.1.1 Příprava materiálu pro pletení

Pro experimentální výrobu byly zajištěny 4 osnovní vály pro kladení multifilu. Monofil byl přesoukán na cívky, které byly připravené tak, aby se zamezilo sesmekávání hladkého materiálu. Z cívek na cívečnici byly monofily vedeny ke stroji.

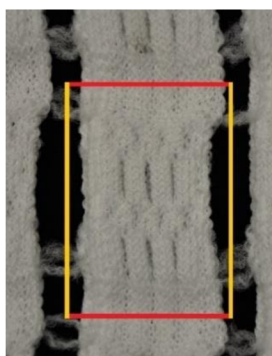
7.1.2 Pletení nosičů

Vzorky byly vyráběny na dvoulůžkovém rašlovém stroji Rius Minitronic s dělením 12E, pracovní šíří 812 mm a šesti kladecími přístroji. Nosiče se pletou ve úzkých pásech s využitím celé šíře stroje. Vzdálenost lůžek byla pro všechny pletené vzorky stejná – 6 mm. Celkem se vyrobily a otestovaly 4 vazby. Dvě kladecí lišty pletly na předním lůžku (KP 1, KP 2), dvě na zadním lůžku (KP 5, KP 6) a jedna provazovala obě lůžka (KP 4). Pro testování bylo vyrobeno cca 80 vzorků od každé vazby.

Nosiče 1-3 byly vyráběny při stejném nastavení příváděcích i odváděcích válců. Z důvodu chybového odhazování rádků byla pro nosič 4 snížena podávací rychlost cca o 5 %.

7.1.3 Příprava vzorků pro testování

Po sejmutí pleteniny ze stroje musely být vzorky připraveny do podoby konečných nosičů. Realizovány byly podélné a příčné stříhy podle obr. 24. Podélným stříhem se oddělovaly jednotlivé pásy nosičů u návrhů, kdy jedna osnova multifilu přesahovala svým kladením do sousedního nosiče (výjimku tvoří nosič 4, kde přesah kladení nebyl). Podélné stříhy byly realizovány bez zásahu do pevných okrajů pásů. Kusy nosičů byly poté z pásů získány jedním příčným stříhem v přechodové části, aby nedošlo k poškození otvorů filetové vazby a zásahu do distančního kladení monofilu. Pro další testování byly vyřazeny nosiče z krajních sloupců a veškeré vadné kusy – např. s olejovými skvrnami, chybou v pletenině. Vystřižené nosiče nebyly podrobeny fixaci ani dalším úpravám ve snaze zajistit levnější výrobu. Z předchozího vývoje prototypu textilního nosiče vyplývá, že fixace pleteniny není nutná pro účinnost nosiče.



Obr. 24: Fotografie spojených vzorků s liniemi stříhu (červeně – příčné stříhy, žlutě – podélné stříhy)

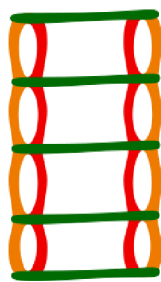
8 Předpokládané chování nosičů

8.1.1 Předpoklad uchycení biomasy

Struktura distanční pleteniny použitá při výrobě nosičů je navržena tak, aby pro kolonizaci biomasou zajistila přístup co největší plochy krytých míst chráněných před vnějšími mechanickými vlivy. Ve spojovací části pleteniny se kladl monofil, dvě vrstvy jsou tvořeny jednoduchými, dvojitými až trojitými očky z multifilu a monofilu. Monofil je také očkotvárný.

Výrazné zachycení biomasy ve struktuře PP multifilu a omezená kolonizace PES monofilu již byla prokázána v předchozích výzkumech, jak bylo zmíněno v kap. 2.3.1.2 *Mikrovláknenné nosiče*. Předpoklad uchycení biomasy vychází z volného uspořádání jednotlivých filamentů tvořících multifil, který má pro tuto strukturu předpoklady. Zakomponování multifilu do pleteniny s sebou ovšem nese jistá omezení a potlačení volné struktury. Vlivem tvorby oka a použití více nití kladených na stejnou jehlu dochází ke stlačení struktury, a to zejména v ohybových částech oček. Přestože byla prokázána nevhodnost monofilu při obsazování povrchu biomasou, je nutné vzít tuto možnost v úvahu. Vycházíme-li z prokazatelného zachycení biofilmu na vnitřní straně nosičů K3 AnoxKaldnes tvořených pevným polymerovým blokem, je pravděpodobné, že díky krytí monofilu v mezivrstvě tvořící distanci, bude PES monofil také obsazen. Uchycení biomasy na pletenině bude zkoumáno obrazovou analýzou. Metody zkoumající složení a aktivitu biofilmu neumožňují odseparovat dané prvky a prozkoumat je zvlášť.

Schéma uchycení biomasy v nosiči na obr. 25 znázorňuje barevně oblasti, kde je předpokládán růst biomasy. Červeně je vyznačena vnitřní rubová část, kde je předpokládán největší růst biofilmu. Oranžově je označen líc, kde se předpokládá nízké zachycení kvůli mechanickému namáhání v reaktoru. Zeleně jsou označeny monofily spojující vrstvy distanční pleteniny, kde nelze blíže specifikovat předpoklad uchycení biomasy.



Obr. 25: Schéma průřezu distanční pleteninou a předpokládané uchycení biomasy (červená – vysoké zachycení, oranžová – nízké zachycení, zelená – nelze specifikovat)

8.1.2 Předpoklad spotřeby materiálu

Spotřeba délkových útvarů, zkoumaná v experimentální části práce, je v osnovních pleteninách ovlivněna délkou spojovací kličky, odtahem, podáváním aj. Délka spojovací kličky závisí na délce posunu příslušného kladečního přístroje. Očekává se větší spotřeba nití u pletenin s vyšším počtem kliček kladených o více roztečí.

9 Strukturální analýza nosičů

Vyrobené nosiče byly podrobeny analýze struktury ve snaze prozkoumat jakým způsobem ovlivňuje změna vazby dané parametry. Zkoumána byla zejména vazná část nosičů, kde se měnila vazba. Pro nosiče byly zjišťovány následující parametry: spotřeba délkových útvarů, hustota pleteniny, hmotnost nosiče, rozměr, efektivní plocha a měrný povrch. Parametry byly zjišťovány po minimálně týdenním uvolnění pleteniny ze stroje, kvůli zajištění dostatečně relaxované struktury.

9.1 Metodika

9.1.1 Spotřeba délkových textilií

Spotřeba nití v nosiči byla zjišťována skrze délku nitě v očku, která je brána jako průměrná hodnota sestávající z jehelního oblouku, stěn očka a spojovací klíčky mající v průběhu kladení proměnlivou délku. Kvůli atypičnosti pleteniny byla tato délka zjišťována experimentálně třemi metodami – A, B a C, které jsou popsány v následujících kapitolách. Metoda A pracovala se zaplétáním značek a jejich zkoumáním při pletení přímo na stroji, metodou B se vizuálně zkoumalo zaplétání značek z metody A po upletení vzorků a metoda C pracovala s vypáranými nitěmi z nosičů. Ze zjištěných délek byla spočtena spotřeba nití všech KP pro jeden nosič (zvláště PP multifil a PES monofil). Větší množství materiálu indikované větší spotřebou nití v nosiči zajišťuje více míst pro potenciální obsazení biomasou.

9.1.1.1 Metoda A – zaplétání značek a zápis čísel

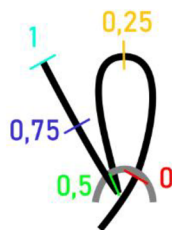
Na stroji byly na napnuté osnově multifilu⁷ zakresleny dvě značky ve vzdálenosti 15 cm. Značeny byly nitě v různých kladecích jehlách kladecího přístroje KP1 vždy ve stejné poloze KP kvůli dodržení stejného napětí. Do vazné části bylo zapleteno 10 značených úseků pro každý typ nosiče rychlostí 40 ot./min⁸. Pokud došlo během zaplétání značek k zastavení stroje, např. z důvodu přetrhu osnovy, bylo dané měření vyřazeno. V softwaru stroje je možné sledovat čísla pozic, ve kterých se právě nachází kladecí přístroje, přičemž 36 řádků je zapsáno 144 očíslovanými pozicemi. Pro každé měření byla zaznamenána čísla při zaplétání první a druhé značky. Z těchto čísel byl následně spočítán počet oček, která byla upletena na zaznačeném úseku. Délka byla následně přepočtena na jedno očko.

9.1.1.2 Metoda B – vizuální zkoumání umístění zaplétaných značek

Při vizuálním zkoumání umístění značek vytvořených metodou A bylo zaznamenáno, kde v pletenině se značky nachází po upletení. Zjištěn byl počet oček na zaplétané délce 15 cm. Vlivem rozptí líhového fixu do multifilu byly značky delší, snahou bylo posoudit jejich střed. Značky se nacházely v různých místech očka – ve spojovací klíčce, jehelním nebo platinovém oblouku. Proto byla navržena metodika, jak posuzovat jejich umístění.

⁷ Pro monofil měření neproběhlo z důvodu náročnosti značení osnovy na stroji a sledování zaplétaných značek u KP vyskytujících se dál od kraje stroje.

⁸ 40 ot./min odpovídá vytvoření 40 oboulicních řádků (tj. 1 řádek = zaplétání na obou lůžkách)



Obr. 26: Číselné značení pro umístění značky v očku.

Počátek očka zaznačený číslem 0 nebo číslem předchozího řádku je v místě protnutí jehelního oblouku starého očka a přechodu staré spojovací kličky do platinového oblouku a poté stěny nového očka. Konec celého očka je brán jako přechod spojovací kličky a přechod do nového očka, označen je číslem daného řádku. Na přechodu očka ve spojovací kličku byla k číslu předchozího řádku přidána 0,5. Polovina spojovací kličky byla označena číslem předchozího řádku s přidáním 0,75 a jehelní oblouk s přidáním 0,25. V případě umístění značky ve stěnách očka bylo přihlédnuto ke směru, kde se nachází větší část značky. Číselné rozdělení očka je na obr. 26, příklad zaznamenání umístění značek je v tab. 3. Z číselného umístění byl spočten počet ok, které se upletly na zaznačeném úseku 15 cm a dále délka nitě v 1 očku.

Tab. 3: Příklad číselného označení a umístění značek v pletenině

značka	číselně označené umístění	umístění
1.	2,75	ve 3. řádku v polovině spojovací kličky
2.	23	ve 23. řádku na přechodu spojovací kličky do nového očka

9.1.1.3 Metoda C – páření a měření napnuté nitě

Z nosiče byly vypárány multifily i monofily. Vypáráno bylo celkem 10 nosičů od každé vazby. Z každého nosiče byla změřena délka 2 multifilů a 2 monofilů. Celkem tedy bylo změřeno 20 multifilů a 20 monofilů pro každou vazbu. Filament byl uchycen pomocí dvou prstů, maximálně natažen a změřen pravítkem. Napnutí bylo subjektivní.

9.1.2 Hustota pleteniny

Vedle délky nitě v očku se mezi základní parametry pleteniny řadí hustota řádků, sloupků a hustota celková. Vzhledem k atypičnosti pleteniny ve formě úzkých pruhů, které se navíc stříhají na malé kusy nosičů, je hustota pleteniny zjišťována formou počítání oček na 2 cm ve středu vazné části. Úzká pletenina neumožňuje měření hustoty řádků a sloupků podle normy ČSN EN 14971[39], proto byla navržena alternativní metodika měření.

9.1.3 Hmotnost nosiče

Vzorky byly klimatizovány při teplotě 21 °C a 52 % vlhkosti vzduchu. Hmotnost byla zjišťována vážením nití po rozpáření jednotlivých nosičů. Vypárané monofilamenty a multifilamenty byly zváženy oddělené, celková hmotnost nosiče je uvedena jako součet hmotností obou komponent.

9.1.4 Rozměr a efektivní plocha

Efektivní plocha je plošný rozměr, ve kterém je rozložen bakteriální film. Brán je jako plocha na vnitřní straně nosiče, kde se očekává největší tvorba biofilmu. Jde o rozměr určený k přepočtu respirometrických dat aktivity biofilmu rozebraný v kap. 11 *Analýza účinnosti nosičů*, kvůli porovnání účinnosti jednotlivých nosičů, které se ustálily na jiných rozměrech.

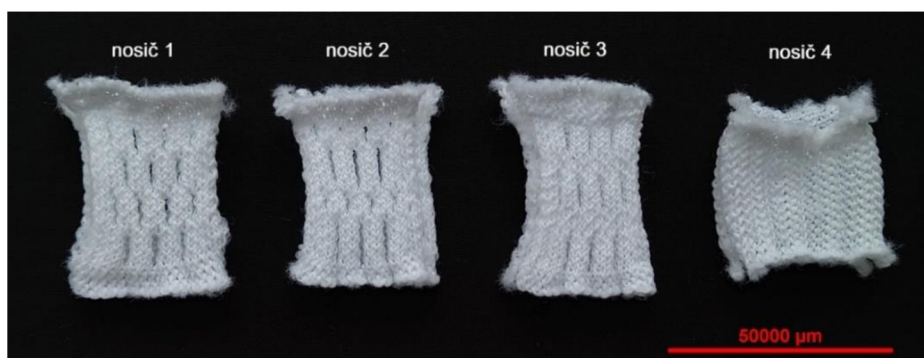
Snahou bylo zjistit celý rozměr uvolněného ustáleného vzorku. Vlivem neprovázání obou lůžek monofilem v krajích docházelo ke stáčení pleteniny, které se projevilo na všech hranách vzorků. Stočené okraje byly nenásilně rozvinuty, krajová oka byla uchycena špendlíkem na podložce a rozměr byl změřen pravítkem. Možnou další metodou by mohlo být spočtení rozměrů z hustot sloupků a řádků, ale hodnoty byly zjišťovány pouze pro střed vazné části. Hustota v krajích je ovlivněna návlekm (boční hrana) a kladením (přechodová část).

9.1.5 Měrný povrch

Pro celkovou účinnost nosiče je podstatné, jakou plochu mohou bakterie osídlit. Měrný povrch jednotlivých komponent (PP multifil, PES monofil) byl počítán z parametrů zjištěných při analýze vstupních materiálů a z experimentálně zjišťované spotřeby délkových útvarů v nosiči (metoda A, B, C) podle vztahu (5) – (7). Hodnota seskání, která mírně ovlivňuje délku fibril ve svazku, byla zanedbána. Měrný povrch celého nosiče byl počítán z průměrných hodnot měrného povrchu dílčích komponent a jejich hmotnostního podílu podle vztahu (8). Ve výpočtu celkového měrného povrchu byl vždy zkombinován měrný povrch multifilu s použitím spotřeby z metody A, B, C a měrný povrch monofilu s použitím spotřeby monofilu zjištěné metodou C.

9.2 Vyhodnocení

V tab. 4 jsou shrnuty informace o otvorech jednotlivých nosičů. Nosič 1 má všechny otvory stejně velké. Nosič 2 má dva typy otvorů, menší a větší. Nosič 3 má víc typů otvorů, malé otvory neprovazující pouze v 1 řádku jsou na první pohled v pletenině nepatrné a vznikly při snaze prodloužit část hladké pleteniny mezi většími otvory. Dále jsou v nosiči 3 otvory neprovazující v 5 a 6 řádcích, na první pohled se však velikost otvorů jeví stejná. Nosič 4 byl navržen bez otvorů. Délka otvorů byla spočtena z experimentálně zjištěné hustoty řádků a je pouze pro orientační představu. Dále jsou v tab. 4 uvedené počty kliček o 1 a 2 rozteče pro jeden KP v celé vazné části. Nosič 1 a 2 má stejný počet kliček o 1 i 2 rozteče, nosič 3 má více kliček o 2 rozteče a nosič 4 má pouze spojovací kličky o 1 rozteč. V nosičích se také střídají jednoduchá a dvojitá multifilová oka. V nosiči 4 jsou umístěna ve sloupkách nad sebou, ostatní nosiče mají jednoduchá oka rozmístěna náhodněji.



Obr. 27: Vzhled upletených nosičů 1-4

Tab. 4: Shrnutí informací o vyrobených nosičích – kladení vazby a otvory

	Nosič 1	Nosič 2	Nosič 3	Nosič 4
Počet neprovazujících řádků otvoru	5	3/7	1/5/6	0
Počet otvorů na 1 nosič⁹	28 (28)	16/12 (28)	14/14/6 (34)	0 (0)
Délka otvoru [mm]	5,67	4/9,33	1,43/7,14/8,57	0
Počet spojovacích klíčků o 1 rozteč ve vazné části	20	20	16	24
Počet spojovacích klíčků o 2 rozteče ve vazné části	4	4	8	0

9.2.1 Spotřeba délkových textilií

Délka nitě odpovídající průměrnému očku pleteniny stanovená metodami A, B a C je uvedena v tab. 5 a graficky je znázorněna na obr. 28. Hlavní snahou bylo zjistit délky multifilu ve vazné části, kde dochází ke změně vazby. Na obr. 29 graficky znázorněn vliv počtu spojovacích klíčků o 2 rozteče na délku nitě v očku. Celková spotřeba nití v jednom nosiči (17 nití PP multifilu, 9 nití PES monofilu) je uvedena v tab. 5 a na Obr. 28.

Data byla zpracována v programu BlueSky Statistics. Naměřená data splňovala normalitu, která byla potvrzena Shapiro-Wilkovým testem, vybočující data byla odstraněna. Zjišťován byl průměr a 95 % interval spolehlivosti (IS). Soubory dat byly mezi sebou porovnány ANOVOU. Mezi metodami A a B se očekávala lineární závislost z důvodu sledování stejných značených úseků. Závislost byla ověřována Pearsonovým testem korelačního koeficientu a příslušná korelace je uvedena v tab. 6.

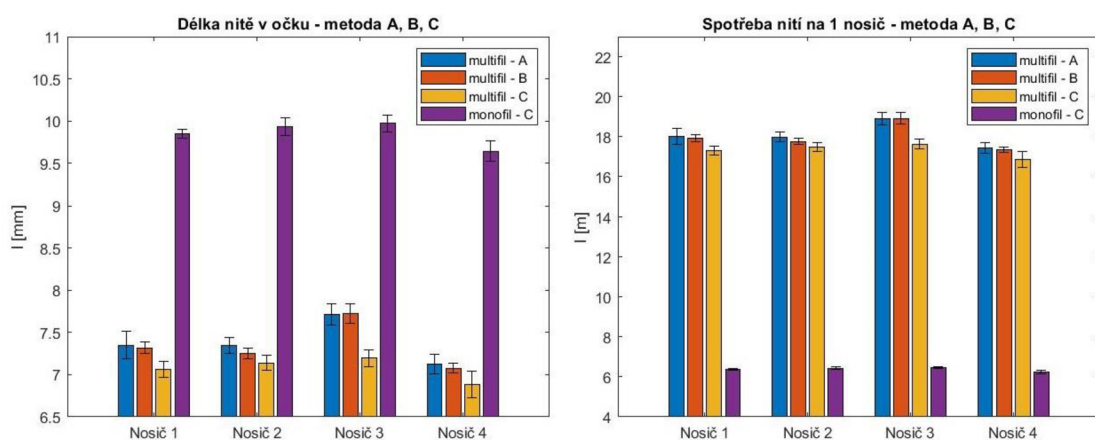
Tab. 5: Délka nitě v očku a celková spotřeba nití na 1 nosič – průměrná délka (95 % IS) – metoda A, B, C

Délka nitě v očku [mm]	Nosič 1	Nosič 2	Nosič 3	Nosič 4
Multifil – A	7,35 (7,19; 7,51)	7,35 (7,25; 7,44)	7,72 (7,59; 7,84)	7,12 (7,01; 7,24)
Multifil – B	7,32 (7,25; 7,39)	7,25 (7,18; 7,31)	7,73 (7,61; 7,84)	7,08 (7,02; 7,13)
Multifil – C	7,06 (6,97; 7,16)	7,14 (7,05; 7,23)	7,19 (7,10; 7,29)	6,88 (6,72; 7,04)
Monofil – C	9,85 (9,80; 9,90)	9,93 (9,83; 10,04)	9,97 (9,87; 10,07)	9,64 (9,52; 9,77)
Délka nitě v nosiči [m]				
Multifil – A	17,99 (17,60; 18,39)	17,98 (17,75; 18,22)	18,89 (18,58; 19,20)	17,44 (17,16; 17,72)
Multifil – B	17,91 (17,75; 18,08)	17,75 (17,59; 17,91)	18,91 (18,63; 19,20)	17,33 (17,20; 17,46)
Multifil – C	17,29 (17,06; 17,53)	17,48 (17,25; 17,71)	17,61 (17,37; 17,85)	16,84 (16,46; 17,23)
Monofil – C	6,38 (6,35; 6,42)	6,44 (6,37; 6,50)	6,46 (6,40; 6,52)	6,25 (6,17; 6,33)

⁹ V závorce je celkový počet otvorů na nosič.

Metoda A i B: Statisticky nevýznamné rozdíly v délce nitě v očku jsou mezi nosičem 1 a 2. Významně delší nit v očku má nosič 3, naopak nižší hodnoty byly zaznamenány u nosiče 4.

Metoda C: Metoda skýtá nevýhody v napnutí nití, které je individuální, a ve střihání dílů nosičů, které nebylo možné provést pokaždé ve stejném místě. V délce nitě v očku se navíc projevilo kladení v přechodové části, kde jsou pouze spojovací klíčky o 1 rozteč. V délce monofilu se projevilo kladení na obě lůžka, proto jsou hodnoty vyšší než u délky multifilu. Statisticky významné rozdíly byly zaznamenány u délky multifilu v očku mezi nosiči 2 a 4 a mezi nosiči 3 a 4. Mezi ostatními porovnávanými nejsou významné rozdíly v délce multifilu. U nosiče 4 byly kromě kratších multifilů zaznamenány také kratší monofily, a to z důvodu sníženého podávání, které bylo pro tento nosič nastaveno kvůli správnému kladení nití do hlavy jehly. Mezi ostatními nosiči nebyly zaznamenány rozdíly v délce monofilu.



Obr. 28: Graf délky nitě v očku (vlevo) a celkové spotřeby nití na 1 nosič (vpravo) – metoda A, B, C



Obr. 29: Graf vlivu počtu spojovacích klíčků o 2 rozteče na délku nitě v očku

U všech nosičů byla zaznamenána kratší délka nitě v očku zjištěná metodou C. Významnost rozdílu v porovnání s metodami A a B se projevila pouze u nosiče 1 a 3. Mezi metodami A a B se neprokázaly významné rozdíly. Očekávaná pozitivní korelace metod se projevila pouze u nosiče 3, přestože u všech typů nosičů byly zkoumány stejné značky. Příčinou může být pohyblivost kladecích přístrojů a pletacích jehel při zkoumání zapletení značek přímo na stroji, zkreslení značek vlivem rozpětí lihového fixu a posunutím jednotlivých fibril vůči sobě, čímž byly značky prodlouženy.

U všech metod bylo zaznamenáno zvýšení délky nitě v očku s vyšším počtem delších spojovacích kliček o 2 rozteče ve vazné části.

Celková spotřeba multifilu v nosiči se pohybuje mezi 16,8 a 16,9 m, monofilu mezi 6,2 a 6,5 m. Rozdílnost hodnot koresponduje s délkou nitě v 1 očku – nosič 3 má větší a nosič 4 menší spotřebu multifilu než zbylé typy.

Tab.: 6: Korelační matice délky nitě v očku – metoda A a B – Pearsonův korelační koeficient

Pearsonův korelační koeficient [-]					
Nosič 1	Multifil – A	Multifil – B	Nosič 2	Multifil – A	Multifil – B
Multifil – A	1	0,58	Multifil – A	1	0,35
Multifil – B	0,58	1	Multifil – B	0,35	1
Nosič 3	Multifil – A	Multifil – B	Nosič 4	Multifil – A	Multifil – B
Multifil – A	1	0,75	Multifil – A	1	-0,17
Multifil – B	0,75	1	Multifil – B	-0,17	1

9.2.2 Hustota pleteniny

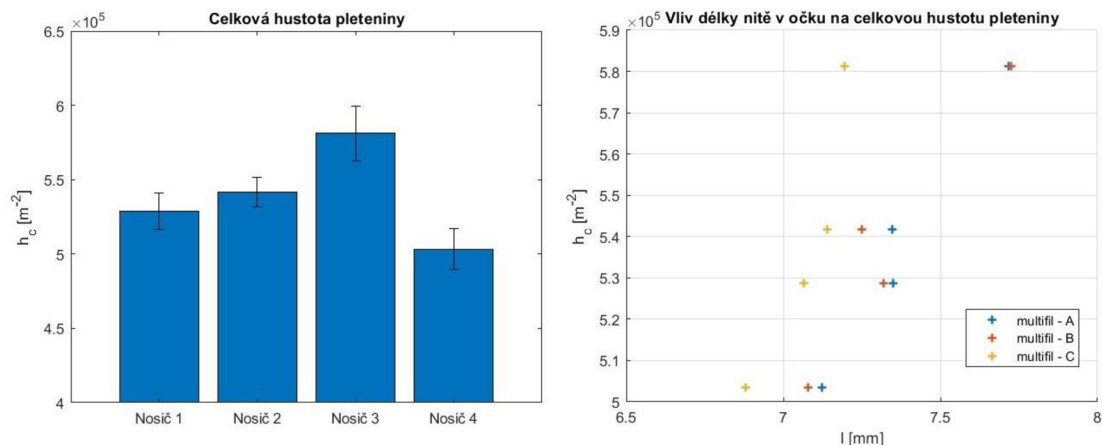
Po uvolnění vzorků ze stroje a jejich dodatečném finálním zpracování došlo k relaxaci struktury. Zjišťované hodnoty hustoty řádků, sloupků a celková hustota pleteniny jsou uvedeny v tab. 7 a graficky jsou znázorněny v grafu na obr. 30.

Data byla zpracována ve statistickém programu BlueSky Statistics. Testována byla normalita dat pomocí Shapiro-Wilkova testu, která nebyla potvrzena pro hustotu řádků a sloupků, vybočující data byla odstraněna. Zjišťován byl průměr, medián, 95 % IS. Hustoty řádků a sloupků nepochází z normálního rozdělení. Pro hustotu řádků a sloupků byly mezi sebou porovnávány mediánové hodnoty pomocí Kruskal-Wallisova testu. U hustoty celkové byla potvrzena normalita dat, hodnoty byly hodnoceny ANOVOU.

Tab. 7: Hustoty pleteniny

medián	Nosič 1	Nosič 2	Nosič 3	Nosič 4
Hustota řádků [m⁻¹]	750	750	700	1038
Hustota sloupků [m⁻¹]	700	738	838	500
průměr (95 % IS)				
Hustota celková [m⁻²]	528750 (516635; 540865)	541813 (531984; 551641)	581250 (562891; 599610)	503375 (489677; 517073)

Hustota řádků nosiče 1 a 2 se statisticky neliší, ostatní se liší. Největší hustotu řádků vykazují nosič 4, nejmenší hustotu řádků nosič 3. Hustota sloupků všech nosičů se statisticky liší. Největší hustotu sloupků vykazují nosič 3, nejmenší nosič 4. Celková hustota pleteniny se statisticky neliší pouze mezi nosiči 1 a 2. Nosič 3 vyazuje vyšší, nosič 4 nižší celkovou hustotu pleteniny. S delší nití v očku byla zaznamenána vyšší celková hustota pleteniny.



Obr. 30: Graf celkové hustoty pleteniny (vlevo) a vlivu délky nitě v očku na celkovou hustotu pleteniny (vpravo)

9.2.3 Hmotnost nosiče

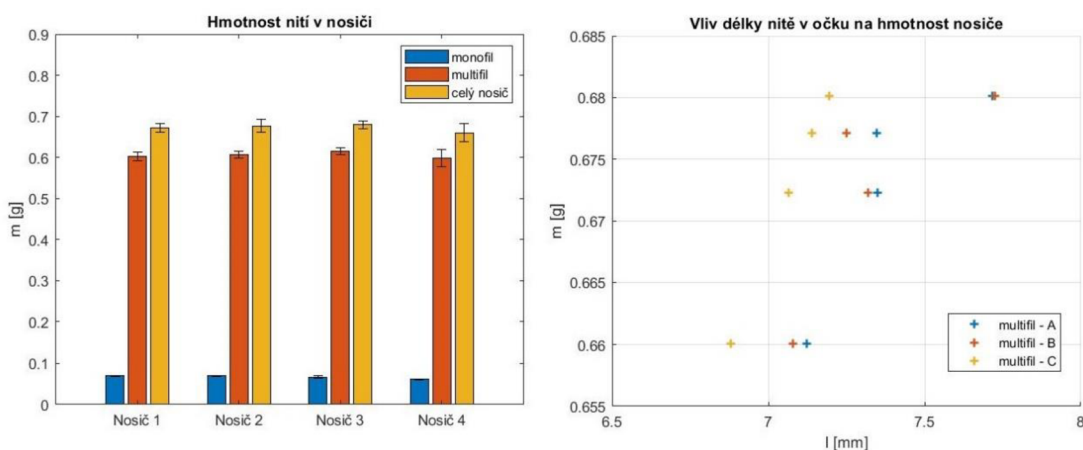
Hmotnost byla zjišťována zejména kvůli prozkoumání vlivu délky nitě v očku na celkovou hmotnost nosiče. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 8 a grafické znázornění je na obr. 31.

Data byla zpracována v programu BlueSky Statistics. Naměřená data splňovala normalitu, která byla potvrzena Shapiro-Wilkovým testem, vybočující data byla odstraněna. Zjišťován byl průměr a 95 % interval spolehlivosti (IS). Soubory dat byly mezi sebou porovnány ANOVOU.

Tab. 8: Hmotnostní charakteristiky nosiče – průměrná hodnota (95 % IS)

	Nosič 1	Nosič 2	Nosič 3	Nosič 4
Hmotnost multifilu [g]	0,6027 (0,5922; 0,6131)	0,6068 (0,599; 0,6145)	0,6145 (0,606; 0,6229)	0,5989 (0,5783; 0,6196)
Hmotnost monofilu [g]	0,0696 (0,0688; 0,0704)	0,0700 (0,0691; 0,0709)	0,0671 (0,0646; 0,0696)	0,0612 (0,0597; 0,0626)
Hmotnost celková [g]	0,6723 (0,6617; 0,6829)	0,6771 (0,6606; 0,6937)	0,6801 (0,6705; 0,6898)	0,6601 (0,6385; 0,6817)
Plošná hmotnost nosiče [g/m²]	510,80	527,00	594,70	503,99
Hmotnostní podíl PP multifil	0,9	0,9	0,9	0,9
Hmotnostní podíl PES monofil	0,1	0,1	0,1	0,1

Hmotnost monofilu se neliší pro nosič 1 a 2, nosič 3 vykazuje nepatrně nižší hodnoty. Toto snížení hodnot pro nosič 3 mohlo být způsobeno náhodným stříhem, kdy mohlo dojít k oddělení kratší části pleteniny, tedy i kratších monofilů. Výrazně nižší hmotnost monofilu vykazuje nosič 4. V tomto případě je snížení hodnot způsobeno kratší délkou nitě v očku zapříčiněné nutným snížením podávání materiálu pro správné pletení. Váhové rozdíly multifilu a celkové hmotnosti mezi různými typy nosičů jsou statisticky nevýznamné. S delší nití v očku byly zaznamenány vyšší hodnoty hmotnosti nosiče. Přestože se změna vazby projevila při hodnocení délky nitě v očku, významný vliv na hmotnost nosičů změna vazby nemá.



Obr. 31: Graf hmotnosti nití v nosiči (vlevo) a vlivu délky nitě v očku na hmotnost nosiče (vpravo)

9.2.4 Rozměr a efektivní plocha

Rozměrové parametry nosiče byly použity při výpočtu jeho efektivní plochy zjišťované pro hodnocení respirometrických¹⁰ charakteristik. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 9. Boční hrany nosiče se stáčely směrem dovnitř ke spojovací vrstvě distanční pleteniny, hrany v přechodové části se stáčely směrem ven.

Data byla zpracována v programu BlueSky Statistics. Normalita dat byla ověřena pomocí Shapiro-Wilkova testu, vybočující data byla odstraněna. Zjišťovány byly průměrné hodnoty, 95 % IS. Soubory byly mezi sebou testovány ANOVOU.

Tab. 9: Rozměry nosičů – průměrná hodnota (95 % IS)

	Nosič 1	Nosič 2	Nosič 3	Nosič 4
Délka nosiče [cm]	4,57 (4,50; 4,64)	4,54 (4,48; 4,61)	4,63 (4,53; 4,73)	3,25 (3,09; 3,41)
Šíře nosiče [cm]	2,88 (2,81; 2,95)	2,83 (2,75; 2,91)	2,47 (2,42; 2,52)	4,03 (3,98; 4,08)
Efektivní plocha [cm²]	26,32 (25,77; 26,87)	25,59 (24,60; 26,59)	22,86 (22,53; 23,19)	26,19 (24,88; 27,51)

¹⁰ viz. kap. 11.1.1 Respirometrie

Vlivem relaxace nosiče výrazně změnily svoje rozměry. V délce se statisticky liší pouze nosič 4 zkrátit, ostatní nosiče mezi sebou nemají rozdíly. V šířce se mezi sebou neliší pouze nosiče 1 a 2, nosič 3 je širší a nosič 4 je užší. Významně menší efektivní plochu nabývá nosič 3, ostatní nosiče se neliší.

9.2.5 Měrný povrch

Měrný povrch je pro nosiče pouze orientační, protože se ve výpočtu kombinují experimentálně zjištěné spotřeby délkových materiálů různými metodami. V hodnotách pro celý nosiče se mohla odrazit spotřeba monofilu, která byla zjištěna pouze metodou C. Hodnoty měrného povrchu jednotlivých komponent i celého nosiče jsou uvedeny v tab. 10, grafické znázornění je na obr. 32, kde je znázorněn i vliv délky nitě v očku na celkový měrný povrch nosiče.

Data byla zpracována v programu BlueSky Statistics. Naměřená data splňovala normalitu, která byla potvrzena Shapiro-Wilkovým testem, vybočující data byla odstraněna. Zjišťován byl průměr a 95 % interval spolehlivosti (IS). Soubory dat byly mezi sebou porovnány ANOVOU.

Tab. 10: Měrný povrch nosičů – průměrná hodnota (95 % IS)

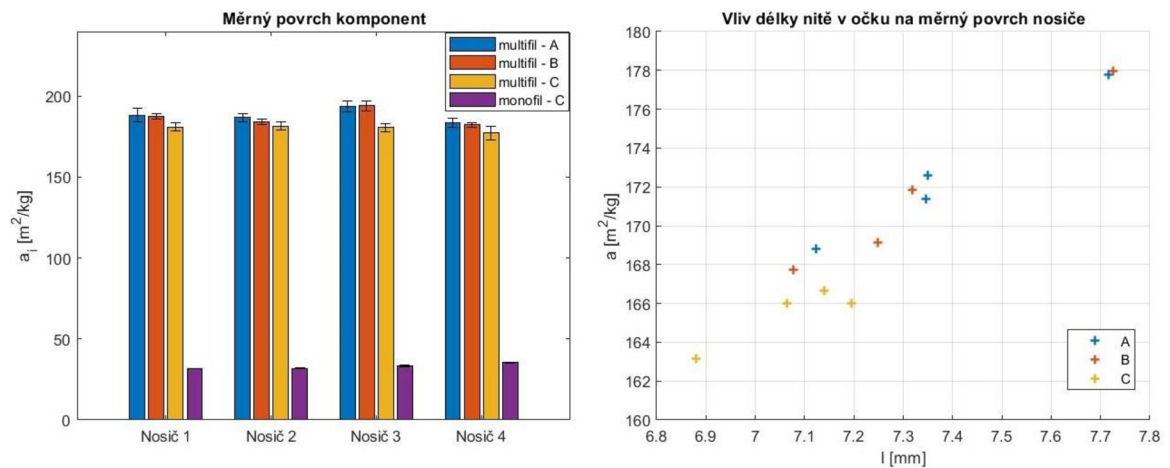
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	Nosič 1	Nosič 2	Nosič 3	Nosič 4
Multifil – A	188,26 (184,11; 192,40)	186,88 (184,41; 189,36)	193,83 (190,61; 197,04)	183,62 (180,71; 186,52)
Multifil – B	187,44 (185,72; 189,15)	184,42 (182,74; 186,09)	194,06 (191,13; 196,98)	182,43 (181,06; 183,81)
Multifil – C	180,92 (178,46; 183,39)	181,64 (179,29; 184,00)	180,73 (178,27; 183,18)	177,35 (173,27; 181,42)
Monofil – C	31,74 (31,58; 31,90)	31,82 (31,48; 32,16)	33,33 (33,00; 33,66)	35,34 (34,89; 35,79)
Celý nosič – A	172,60	171,38	177,78	168,79
Celý nosič – B	171,87	169,16	177,99	167,72
Celý nosič – C	166,00	166,66	165,99	163,15

Měrný povrch multifilu spočtený z jeho spotřeby metodou A se pro nosič 1 a 2 projevil bez významného rozdílu. U nosiče 4 byla zaznamenána nižší hodnota měrného povrchu multifilu, významnost však byla prokázána pouze v porovnání s nosičem 3, který vykazoval vyšší hodnoty než zbylé typy nosičů. Významnost rozdílů byla ovlivněna kombinací experimentálně zjištěné hmotnosti a spotřeby komponent v nosiči.

Nevýznamné rozdíly měrného povrchu multifilu mezi nosiči 1 a 2 byly prokázány i při použití spotřeby multifilu z metody B. Nižší hodnota měrného povrchu multifilu byla u nosiče 4, v porovnání s nosičem 2 však byl rozdíl nepatrný. Nosič 3 měl větší měrný povrch multifilu než zbylé nosiče.

Při použití spotřeby multifilu zjištěné metodou C nebyly patrné rozdíly měrného povrchu multifilu různých nosičů. Měrný povrch monofilu byl bez rozdílu pouze mezi nosiči 1 a 2. Nosič 3 a 4 vykazovaly vyšší hodnoty měrného povrchu monofilu, což mohlo být způsobeno kombinací experimentálně zjištěné hmotnosti a spotřeby.

Z grafu na obr. 32 je patrné, že s větší délkou nitě v očku byl zaznamenán větší měrný povrch nosiče. Skutečnost vyplývá i ze vztahu pro výpočet měrného povrchu.

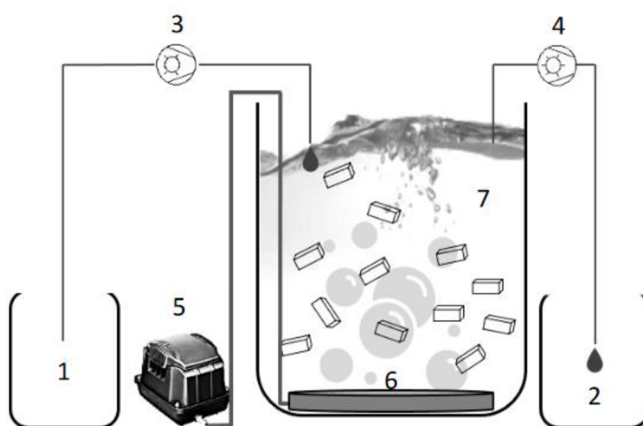


Obr. 32: Graf měrného povrchu jednotlivých komponent v nosiči (vlevo) a vlivu délky nitě v očku na měrný povrch nosiče (vpravo)

10 Poloprovozní testování v reaktoru

Poloprovozní testování v reaktoru bylo realizováno na Oddělení technologie životního prostředí CXI. Testování probíhalo v reaktoru typu MBBR kolony pro post-nitrifikaci, tedy dočišťování¹¹ odpadní vod. Reaktor byl provozován od 11. 11. 2022 do 16. 2. 2023. Doba zdržení začínala na 12 h a byla postupně snižována. V průběhu provozu reaktoru byl průběžně kontrolován chemismus nátoky, odtoku a pH. Dále byly z reaktoru odebírány vzorky na respiometrii, molekulární a obrazovou analýzu.

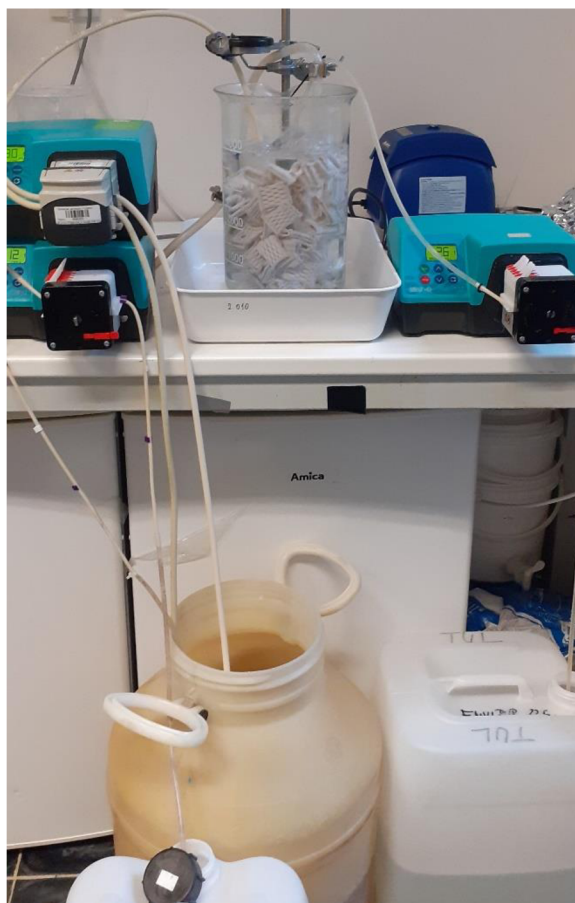
Součástí prototypu reaktoru byla skleněná nádoba o celkovém objemu 5 l (objem vody 4 l). Provzdušňování systému 24 hodin denně zajišťoval provzdušňovací element instalovaný na dně nádoby napojený na dmychadlo (SERA air 550 R plus). Do reaktoru s nosiči byla kontinuálně přiváděna odstátá kohoutková voda, do které se přidaly amonné ionty (10-20 mg/l $\text{NH}_4^+\text{-N}$) a fosfátový pufr (10-20 mg/l PO_4^{3-}P), pH bylo udržováno v neutrální oblasti pomocí hydrogenuhličitanu sodného (40 mg/l). Na začátku experimentu byl do reaktoru přidán aktivovaný kal z nitrifikační nádrže ČOV Amazon, který byl po 3 dnech odstraněn. Kontinuální provoz byl zajišťován peristaltickými čerpadly (Watson Marlow Sci-Q323).



Obr. 33: Schéma biologického reaktoru nitrifikace – 1) nádoba s nátokem, 2) nádoba pro zachycování odtoku, 3) čerpadlo nátoky, 4) čerpadlo odtoku, 5) aerátor, 6) vzdušnicí kámen, 7) vlastní reaktor s médiem a testovanými nosiči biomasy [7]

Testovány byly celkem 4 typy nosičů za stejných podmínek v jednom reaktoru. Účinnost mikrovlákněného pleteného nosiče v porovnání s komerčně používanými nosiči již byla prokázána v předchozích výzkumech. Cílem experimentu je zanalyzovat tvorbu biofilmu z hlediska rozdílných vazeb v nosiči. Plnění reaktoru bylo 25 % - 15 nosičů od každého typu, celkem 60 nosičů. Aktivita a složení biofilmu uchyceného na jednotlivých nosičích byla sledována pomocí respiometrie a molekulárně genetických testů.

¹¹ Eliminace nízkých koncentrací nežádoucích látek.



Obr. 34: Fotografie zapojení reaktoru

11 Analýza účinnosti nosičů

Biofilm je komplexní systém mikroorganismů, k jehož vyhodnocení se dá přistoupit více způsoby. Účinnost systému byla potvrzena kontrolou koncentrace amoniakálního dusíku v nátoku a odtoku reaktoru. V nátoku se koncentrace $\text{NH}_4^+\text{-N}$ pohybovala kolem 10 mg/l, v odtoku byly koncentrace po stabilizaci nižší než 0,5 mg/l. Zároveň nedocházelo k akumulaci dusitanů v odtoku. Hodnoty z kontroly chemismu jsou uvedeny v Příloze A. Jako primární metody pro vyhodnocení biofilmu na nosičích bylo v této práci využito metody respirometrie pro vyhodnocení aktivity biofilmu, molekulárně genetické metody (qPCR a NGS) pro vyhodnocení složení a zastoupení bakterií. Pro doplnění vyhodnocení a prozkoumání uchycení biofilmu na struktuře pleteniny byla použita obrazová analýza, která zkoumá pouze povrchovou strukturu.

11.1 Metodika a podmínky testování

11.1.1 Respirometrie

Aktivita biofilmu uchyceného na nosičích byla testována pomocí respirometrie bez separace biofilmu od nosného média. Celkem proběhlo 5 testů – 11., 27., 47., 87. a 97. den. Vyhodnocována byla rychlost spotřeby O_2 , která je dána aktivitou mikroorganismů. Kyslík je spotřebováván pro oxidaci amoniakálního dusíku, kde O_2 funguje jako akceptor elektronů. Hodnoceny byly vždy 2 vzorky od každého typu nosiče. Vlivem relaxace změnily nosiče své rozměry, proto byla respirometrická data přepočtena na jednotku plochy pomocí efektivní plochy. Měření probíhalo do ukončení aktivity biofilmu, kdy byla provedena analýza zbytkových forem dusíku potvrzující ukončení nitrifikace.

Měření probíhalo pomocí přístroje Micro Oxymax – Columbus, kde bylo do 450 ml lahve přelito 200 ml odtoku z ČOV, přidány byly 2 ml fosfátového pufru, 10 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ (ze zásobního roztoku o koncentraci 1,9 g na 100 ml) a 2 kusy daných nosičů.

11.1.2 Molekulárně genetické metody

Pro určení konkrétního zastoupení bakterií v biofilmu slouží metody postavené na molekulárně genetických metodách. Pro experimentální testování byly zvoleny metody qPCR a NGS. Sledován byl zejména výskyt nitrifikačních bakterií typu AOB a NOB.

Během provozu reaktoru byly odebrány vzorky celkem 7x – 5., 14., 28., 47., 66., 87. a 97. den. Z každého typu nosiče bylo vystřiženo dostatečné množství pleteniny zahrnující části s různě dlouhými spojovacími kličkami pro kvalitnější vyhodnocení biofilmu. Vzorky byly zmrazeny a analyzovány po ukončení reaktoru. Pro porovnání byl na konci experimentu odebrán i vzorek suspenze z reaktoru z něžž byla odfiltrována biomasa.

Všechny vzorky byly vloženy do lyzační zkumavky izolačního kitu NucleoSpin Soil (Macherey-Nagel, Německo), kterým byla následně provedena izolace DNA.

Pomocí fluorometru Qubit® 2.0 a soupravy Qubit™ dsDNA BR Assay Kit (Invitrogen, USA) byla měřena koncentrace DNA ve vzorcích dle pokynů výrobce. Analýza metodou qPCR byla provedena z izolované DNA na přístroji LightCycler® 480 (Roche, Švýcarsko). Jako fluorescenční zdroj bylo použito fluorescenční barvivo typu SYBR Green.

Pomocí markerů, které jsou podrobněji uvedeny v tab. 11, bylo testováno celkové bakteriální oživení (marker U16SRT), přítomnost bakterie rodu *Nitrosomonas* (marker *amoA*), archeálního genu amoniak monooxygenázy (marker arch *amoA*), bakterie rodu *Nitrospira* (marker *NxrB*, *NSR*), bakterie rodu *Nitrobacter* (marker *Nitrob.*).

Tab. 11: Seznam testovaných markerů

Cílová skupina	Marker	Gen	Sekvence markeru (3' → 5')	Zdroj
bakterie	U16SRT	16S rRNA	F: ACTCCTACGGGAGGCAGCAGT R: TATTACCGGGCTGCTGGC	(Clifford a kol., 2012)
AOB	<i>amoA</i>	amoniak monooxygenáza, <i>Nitrosomonas</i> sp.	F: GGGGTTTCTACTGGTGGT R: CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC	(Rotthauwe a kol., 1997)
AOA	arch <i>amoA</i>	amoniak monooxygenáza, Archaea	F: STAATGGTCTGGCTTAGACG R: GCGGCCATCCATCTGTATGT	(Francis a kol., 2005)
NOB	NSR	16S rRNA <i>Nitrospira</i> sp.	F: CCTGCTTTCAGTTGCTACCG R: GTTTGCAGCGCTTTGTACCG	(Dionisi a kol., 2002)
NOB	Nitrob.	16S rRNA <i>Nitrobacter</i> sp.	F: ACCCCTAGCAAATCTCAAAAAACCG R: CTTACCCCGAGTCGCTGACC	(Graham a kol., 2007)
NOB	<i>nxrB</i>	nitrit oxidoreduktáza β subjednotka, <i>Nitrospira</i> sp.	F: TACATGTGGTGGAAACA R: CGGTCTGGTCRATCA	(Pester a kol., 2013)

Celkové bakteriální složení biofilmu na příslušných nosičích bylo určeno metodou Ion Torrent sekvencování¹². Měření koncentrace DNA je prováděno na připravených vzorcích pomocí polovodičového čipu na základě změny pH.

11.1.3 Obrazová analýza

Metoda obrazové analýzy slouží k objektivnímu zhodnocení uchycení biofilmu na nosičích pomocí plošného zaplnění oblasti biofilmem. Snaha byla podívat se hlavně na strukturu vazby tvořenou multifily, a to jak z vnější i vnitřní části nosiče, za tímto účelem byly vzorky rozstříženy. Objektivní hodnocení uchycení biofilmu na spojovacích klíčcích monofilů nacházejících se uvnitř nosiče nebylo možné provést bez porušení biofilmu či zkreslení vyhodnocení. Biofilm byl narušen rozstřížením nosiče, navíc nebylo možné vhodně nasnímat podélné pohledy střížených monofilů bez nutnosti oddělení těchto částí od zbytku pleteniny. Monofily navíc vykazovaly jistou průhlednost, čímž se mohl objevovat biofilm uchycený na jiných částech pod nimi a zkruslit tak vyhodnocení.

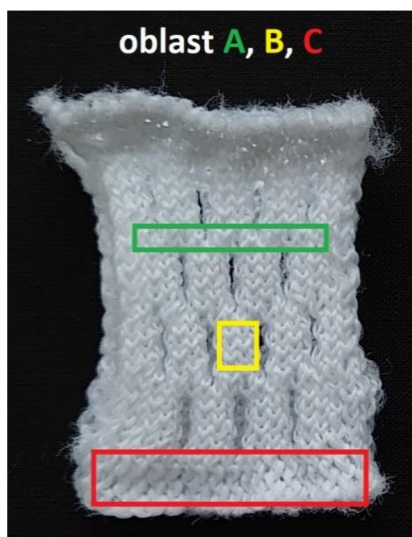
11.1.3.1 Snímání

Aby mohla být posouzena pletenina jako celek s možností rozlišit konkrétní prvky pleteniny (očka, spojovací klíčky atd.), byly snímky pořizovány na makroskopu s digitální kamerou Jenoptik ProgRes CT3 v laboratoři FT TUL. Při mikroskopickém snímání by hrozilo špatné rozlišení prvků pleteniny, zejména v oblastech s vytvořenou vrstvou biofilmu, která v těchto místech kryje strukturu nosičů.

Snímání probíhalo 20. 12. 2022 a 21. 2. 2023 na vlhkých nosičích (odběr 6. a 14. týden), po vysušení totiž mikroorganismy v biofilmu odumírají. Od každého typu nosiče byl zkoumán 1 vzorek při daném odběru z vnější i vnitřní strany (celkem 2 x 4 nosiče s biofilmem + 1 bez biofilmu). Pro porovnání a ověření metody byl nasnímán i jeden nosič bez biofilmu.

¹² Metoda je podrobněji popsána v literatuře [40].

Nosiče s filetovou vazbou byly rozděleny na oblasti zájmu *A*, *B*, *C* podle obr. 35 a to z důvodu výskytu různě dlouhých spojovacích kliček. Oblast *A* nacházející se mezi řadami otvorů obsahuje spojovací kličky o 2 rozteče, oblast *B* nacházející se vedle jednotlivých otvorů obsahuje spojovací kličky o 1 rozteč, oblast *C* je v přechodové části. U nosiče 2 byly navíc rozlišeny oblasti *Ba*) vedle malých otvorů a *Bb*) vedle velkých otvorů pro porovnání. V nosiči 4 se tyto oblasti nevyskytovaly proto byly zkoumány střídající se sloupky jednoduchých (oblast *D*) a dvojitých oček (oblast *E*).



Obr. 35: Oblasti zájmu na nosiči pro vyhodnocování uchycení biofilmu

Dodatečně byly vzorky z uvedených odběrů podrobeny snímání po zaschnutí biofilmu pomocí konfokálního mikroskopu Lext OLS 5000. Vzorky byly fixovány k břidlicové podložce oboustrannou lepicí páskou kvůli vyrovnání stočených okrajů a zamezení kolize vzorku s objektivy. Přichycením nosičů k podložce došlo ke znehodnocení biofilmu v oblasti *C*, která dále nebyla snímána. Snímání větší části pleteniny pro rozpoznání jednotlivých prvků pleteniny bylo časově náročné a problematické. Přestože byly nosiče uchyceny, docházelo k nežádoucímu pohybu vzorků a pohybu při snímání.

11.1.3.2 Prahování snímků

Před prahováním byla u snímků upravena intenzita jasu a vyvážení bílé v prostředí Nis Elements. Pro výpočet plošného zaplnění biofilmem byly prahováním získány binární oblasti nosiče s biofilmem a samotného biofilmu. Oblasti se ukládaly do jednotlivých vrstev:

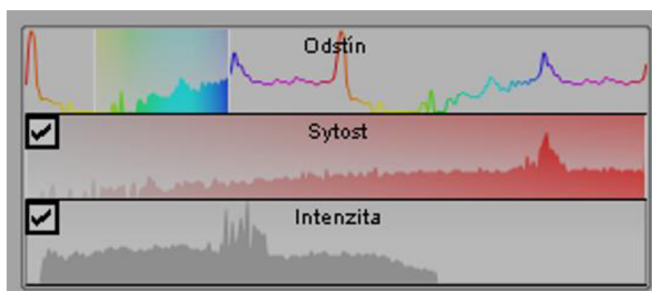
- I oblast nosiče s biofilmem
- II oblast nosiče s biofilmem bez monofilu
- III oblast biofilmu získaná prahováním HSI
- IV oblast nosiče bez biofilmu
- V oblast samotného biofilmu

Vrstva I oddělující celý nosič s biofilmem od pozadí byla získána prahováním pomocí intenzity jasu. Na vnitřní straně jsou na snímcích patrné čnicí monofily vzniklé rozstřížením nosiče. Monofily byly z vyhodnocované oblasti nosiče manuálně odstraněny a tím vznikla vrstva II. Následně byl obraz převeden z barevného prostoru RGB do prostoru HSV¹³, ve kterém se dá snáze oddělit oblast

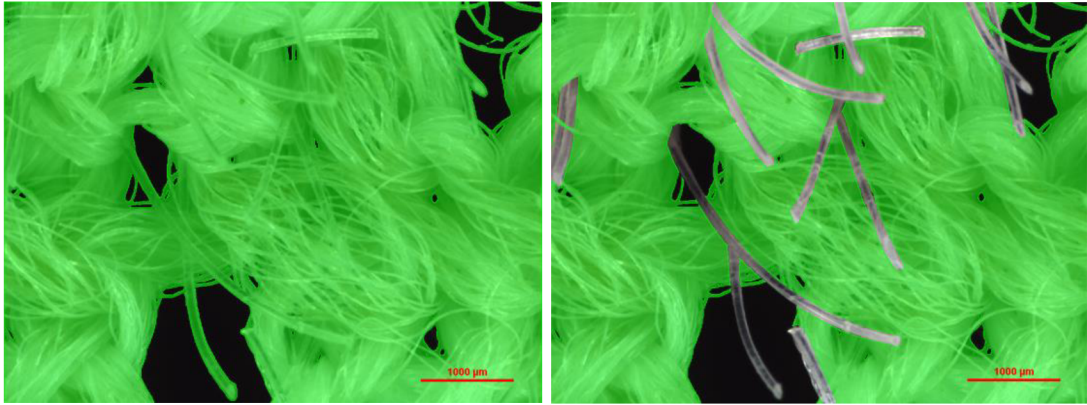
¹³ V Nis Elements označováno HSI, ale jedná se o stejný barevný prostor.

biofilmu od nosiče. Prahováním na kanálu HSV podle nastavení křivek na obr. 36 byla získána vrstva III, která zasahovala i do monofilů vyřazených z hodnocení. Vrstva IV byla získána odečtením vrstvy III od vrstvy II. Pro získání čisté oblasti biofilmu (bez oblastí monofilu, pozadí a nosiče), tedy vrstvy V, byla odečtena vrstva IV od vrstvy II. Při závěrečném odečítání vrstev byl obraz převeden zpět do barevného prostoru RGB, kvůli větší přehlednosti obrazu a kontrole, zda získané vrstvy odpovídají požadovaným oblastem. Vrstvy I-V jsou ukázané na Obr. 37-40 pomocí překryvových obrazů.

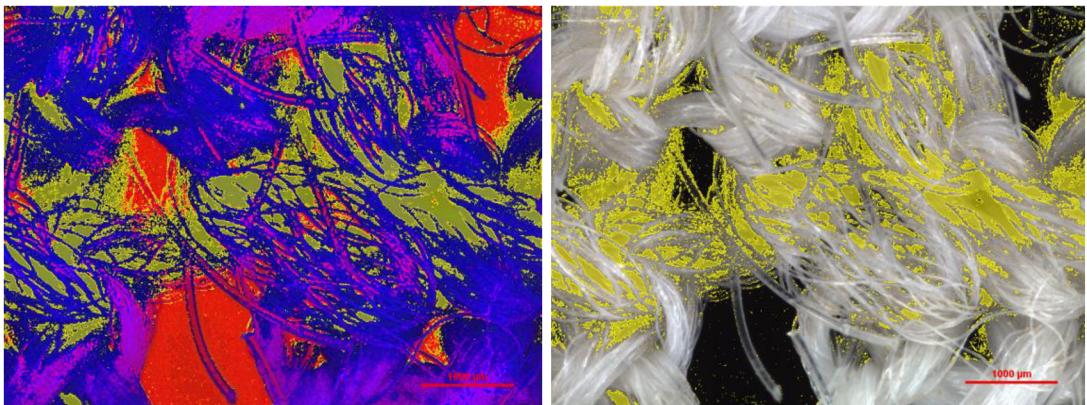
Pro vyhodnocení plošného zaplnění biofilmem byla potřeba získat podíl plochy biofilmu a plochy nosiče s biofilmem. V Nis Elements proběhlo měření obsahu ploch v jednotlivých vrstvách I-V, data byla exportována do Excelu, kde byl dopočítán podíl plochy vrstvy V a vrstvy II.



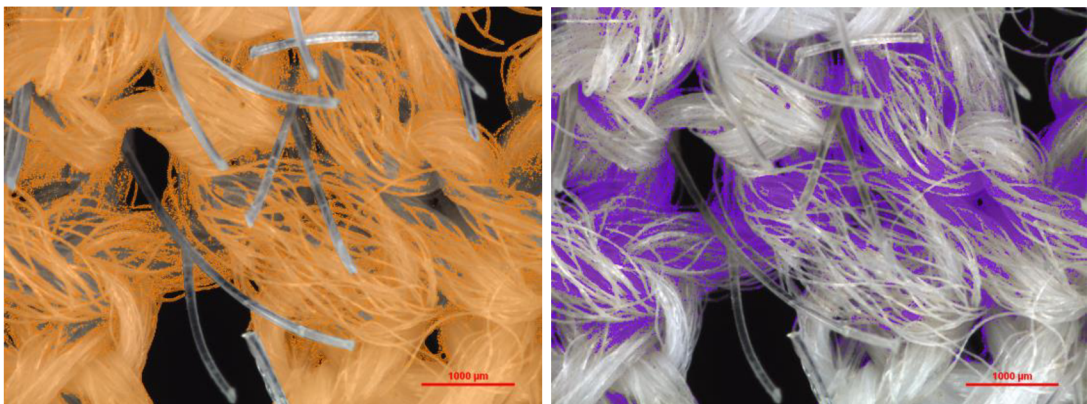
Obr. 36: Nastavení prahování na kanálu HSV



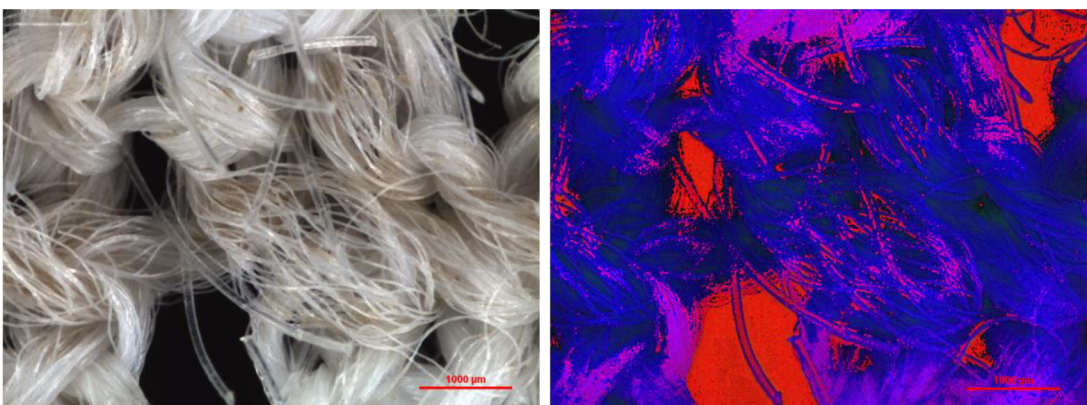
Obr. 37: Překryvový obraz – vrstva I (vlevo zeleně) a II (vpravo zeleně)



Obr. 38: Překryvový obraz – vrstva III (žlutě) – vlevo obraz HSV, vpravo obraz RGB



Obr. 39: Překryvový obraz – vrstva IV (vlevo oranžově) a V (vpravo fialově)

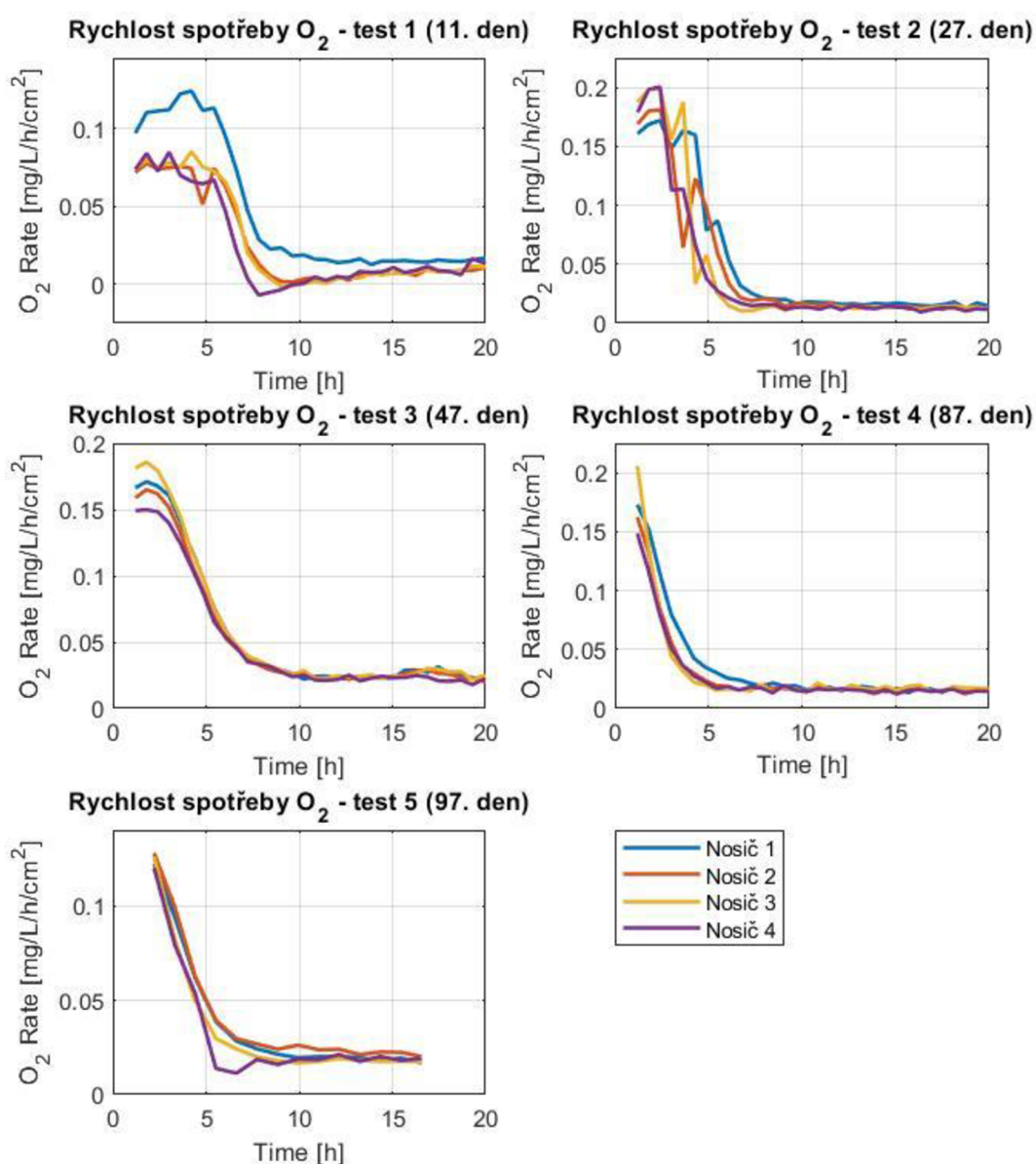


Obr. 40: Snímek nosiče – obraz RGB (vlevo), obraz HSV (vpravo)

11.2 Vyhodnocení

11.2.1 Respirometrie

Výsledky respirometrických měření, jsou znázorněny v grafech na obr. 41. Pokles křivky indikuje zpomalení rychlosti spotřeby kyslíku způsobené snížením koncentrace odbourávaného amoniakálního dusíku. Měření z počátku experimentu (test 1-2) bylo ovlivněno dodaným aktivovaným kalem, který se uchytil ve struktuře nosiče. Ustálení a stabilizace systému byla ustanovena po 27. dnu od spuštění bioreaktoru. Výsledky testů 3-5 se pro jednotlivé nosiče téměř shodují. Není zde patrný vliv změny vazebné struktury na tvorbu biofilmu a aktivitu nitrifikačních bakterií. U každého nosiče docházelo k rychlému vývoji biofilmu a účinnost nitrifikace byla pro všechny nosiče vysoká.

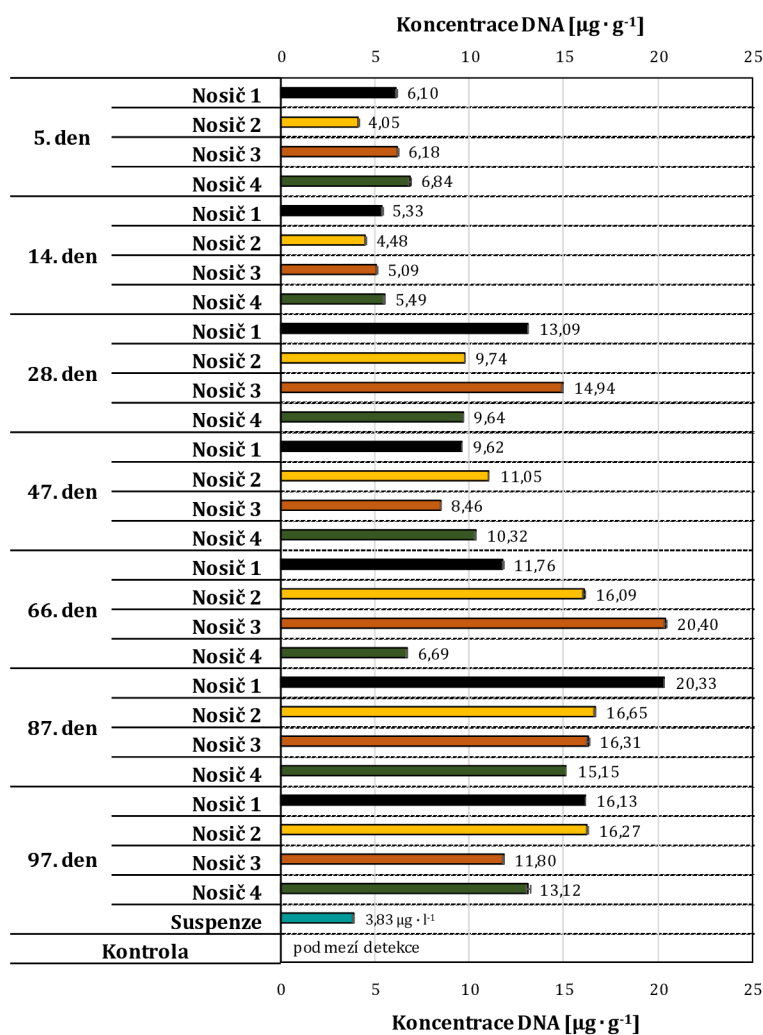


Obr. 41: Výsledky respirometrických dat – rychlost spotřeby O_2 – test 1-5

11.2.2 Molekulárně genetické metody

Výsledky qPCR analýzy (tzv. Ct hodnoty) jsou interpretovány pomocí heatmapy průměrných Ct hodnot a relativní kvantifikace. Výsledky z NGS analýzy jsou interpretovány skrze procentuální zastoupení jednotlivých rodů mikroorganismů v celkovém bakteriálním složení.

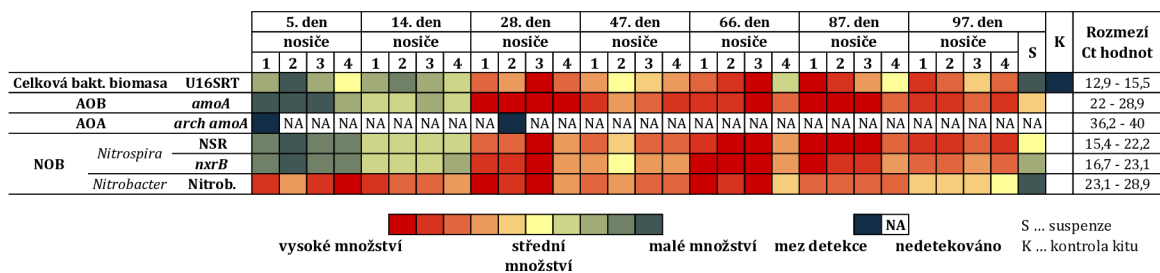
Na obr. 42 je znázorněna koncentrace DNA na vzorcích přepočtená na množství odebraného vzorku nosiče.



Obr. 42: Koncentrace DNA na vzorcích z provozu MBBR přepočtená na množství vzorku nosiče odebraného pro izolaci DNA

Průměrné Ct hodnoty jsou interpretovány heatmapou na obr. 43. Čím nižší je Ct hodnota, tím větší je množství cílové DNA ve vzorku a naopak (např. marker U16SRT – čím nižší Ct hodnota, tím větší bylo celkové bakteriální oživení, přítomno tedy bylo větší množství bakteriální biomasy ve vzorku). Maximální hodnota odpovídající nulové detekci je 40. Průměrně Ct hodnoty byly rozděleny následovně na dvě množiny – nižší než 36 (rozděleno na 10 podmnožin) a rovné/vyšší než 36 (zařazeny na hranici detekce). Interval s nejnižšími Ct hodnotami byl klasifikován jako „vysoké množství, průměrné hodnoty jako „střední množství“, hodnoty na hranici detekce jako „malé množství, hodnoty rovné 40 jako „nedetekováno. Heatmapa obsahuje navíc rozmezí průměrných Ct hodnot jednotlivých markerů pro jejich přibližné srovnání. Všechny markery sledující přítomnost bakterií AOB (*amoA*) a NOB (*nxrB*, *NSR*, *Nitrob.*) specifických pro nitrifikaci

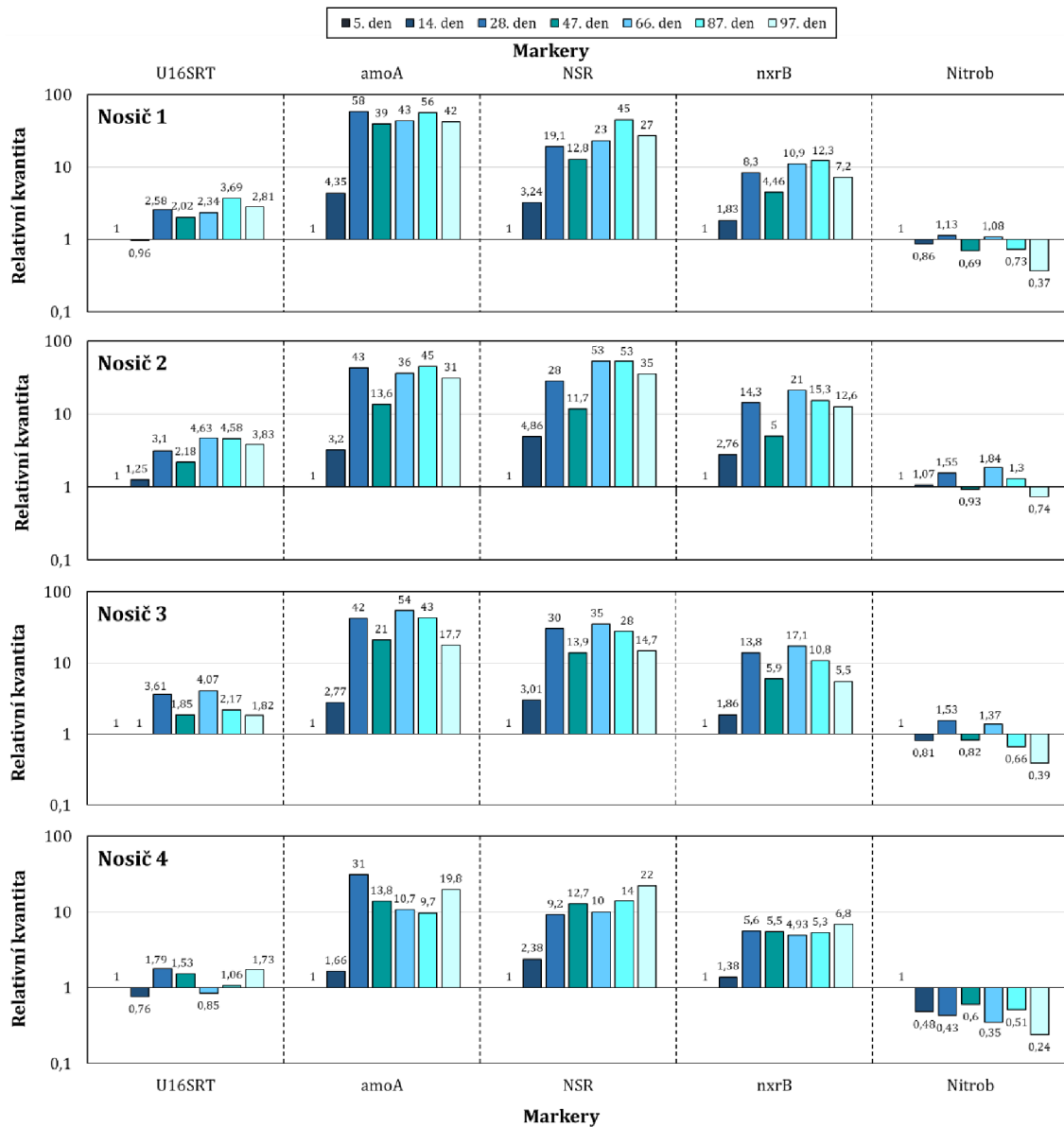
byly detekovány na nosičích již po 5 dnech od zahájení experimentu. Jejich nárůst byl zaznamenán v počáteční fázi vývoje biofilmu (5.-28. den). Marker *arch amoA* byl zaznamenán pouze ve dvou odebraných vzorcích na hraně detekce, ve všech ostatních případech nebyl detekován. Ve vzorku suspenze (označení S) odebraném na konci fungování reaktoru bylo v porovnání s nosiči ze stejného odběru pozorováno nižší množství celkové a testované specifické bakteriální biomasy. Ve vzorku kontroly kitu (označení K) byl na hraně detekce detekován marker celkového bakteriálního oživení (*U16SRT*).



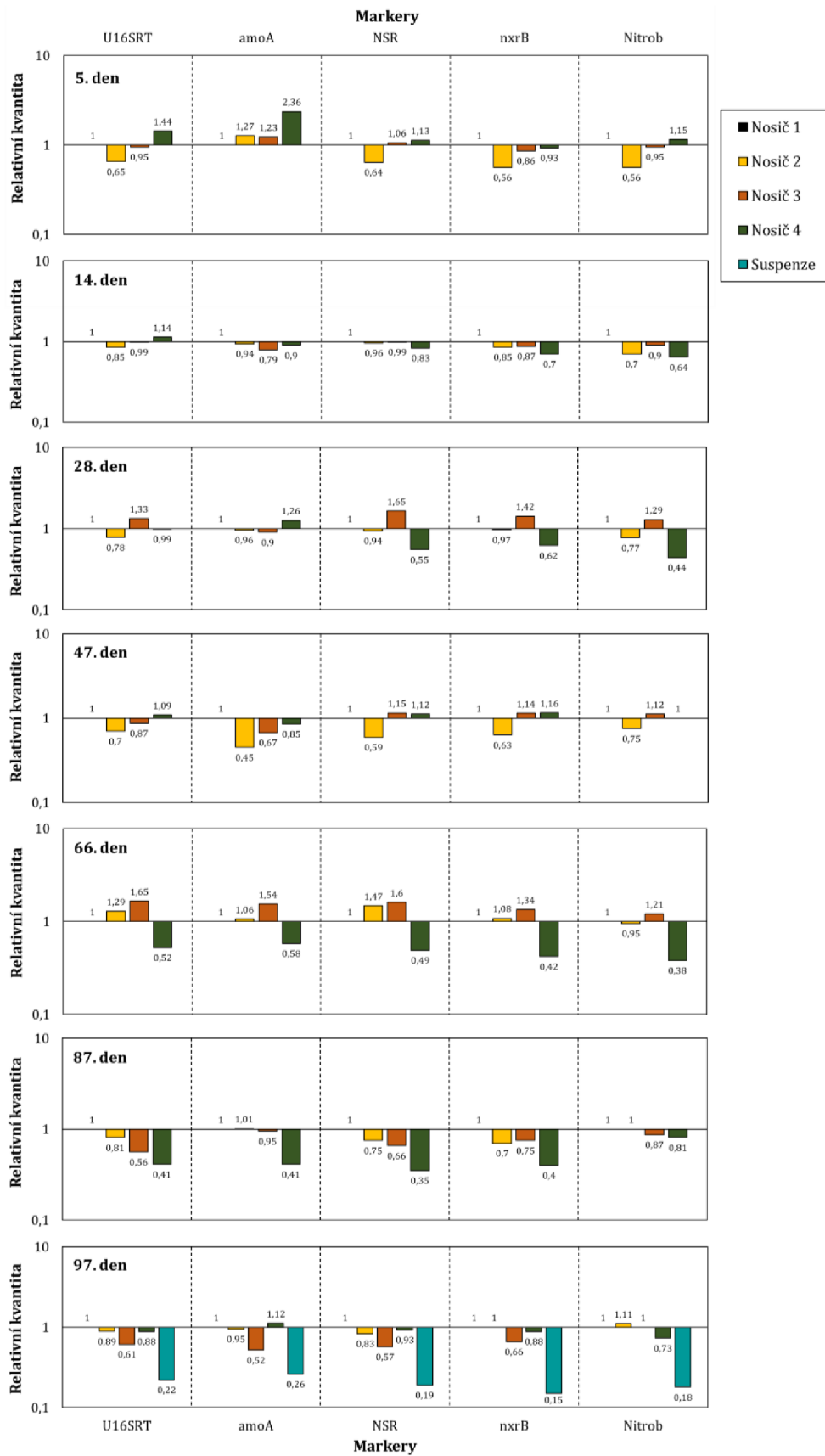
Obr. 43: Heatmapa průměrných Ct hodnot testovaných biologických markerů u všech vzorků odebraných během provozu systému MBBR

Pomocí relativní kvantifikace na obr. 44 popisující relativní změnu množství daného markeru vůči referenčnímu vzorku (v tomto případě nosiče z 1. odběru – 5. den) je vyjádřeno množství celkové a specifické bakteriální biomasy na nosičích v průběhu experimentu. V prvních třech odběrech (5.-28. den) byl na všech nosičích zaznamenán postupný nárůst nitrifikačních bakterií AOB *Nitrosomonas* (*amoA*) a NOB *Nitrospira* (*NSR*, *nxB*) indikující počáteční vývoj biofilmu. Stabilní biofilm na povrchu nosičů indikuje množství nitrifikačních bakterií po 28. dnu, které se výrazně neměnilo. V průběhu experimentu se mírně zvýšilo celkové bakteriální oživení na všech nosičích kromě nosiče 4, na kterém bylo na podobné úrovni během celého experimentu. Množství bakterií NOB *Nitrobacter* (*Nitrob.*) se v průběhu experimentu výrazně neměnilo.

Pomocí relativní kvantifikace na Obr. 45 popisující relativní změnu množství daného markeru vůči referenčnímu vzorku (v tomto případě nosiče 1 z příslušného odběru) je vyjádřeno množství celkové a specifické bakteriální biomasy mezi různými typy nosičů. Rozdíly v množství celkové i specifické bakteriální biomasy byly mezi jednotlivými typy nosičů zanedbatelné ve všech odběrech. Ve vzorku suspenze odebraném při posledním odběru bylo zaznamenáno očekávané nižší množství celkové i specifické biomasy v porovnání s nosiči.



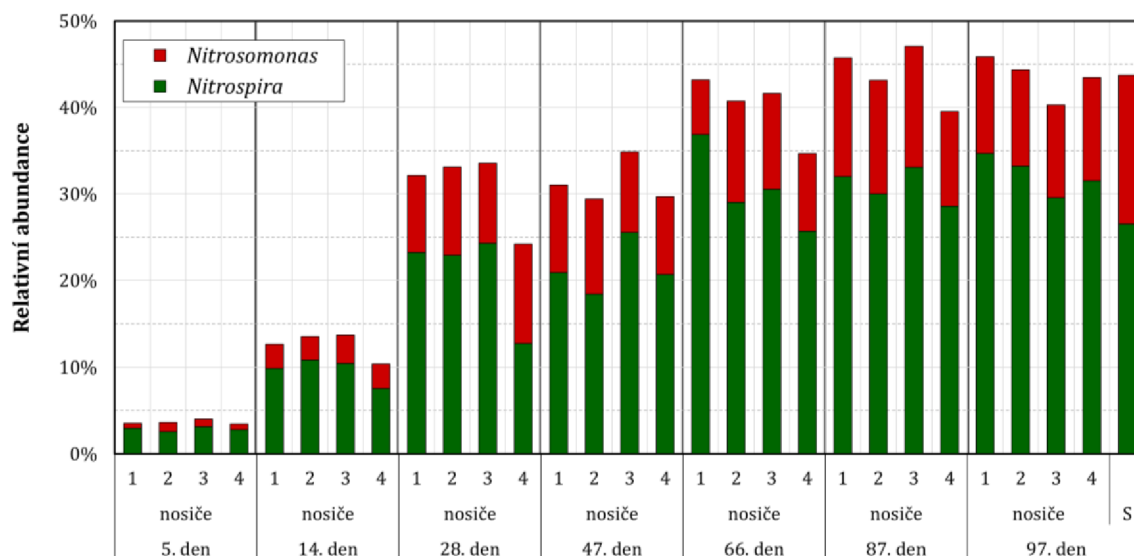
Obr. 44: Relativní kvantifikace celkové a specifické bakteriální biomasy na jednotlivých typech nosičů v průběhu experimentu vůči nosičům z 1. odběru



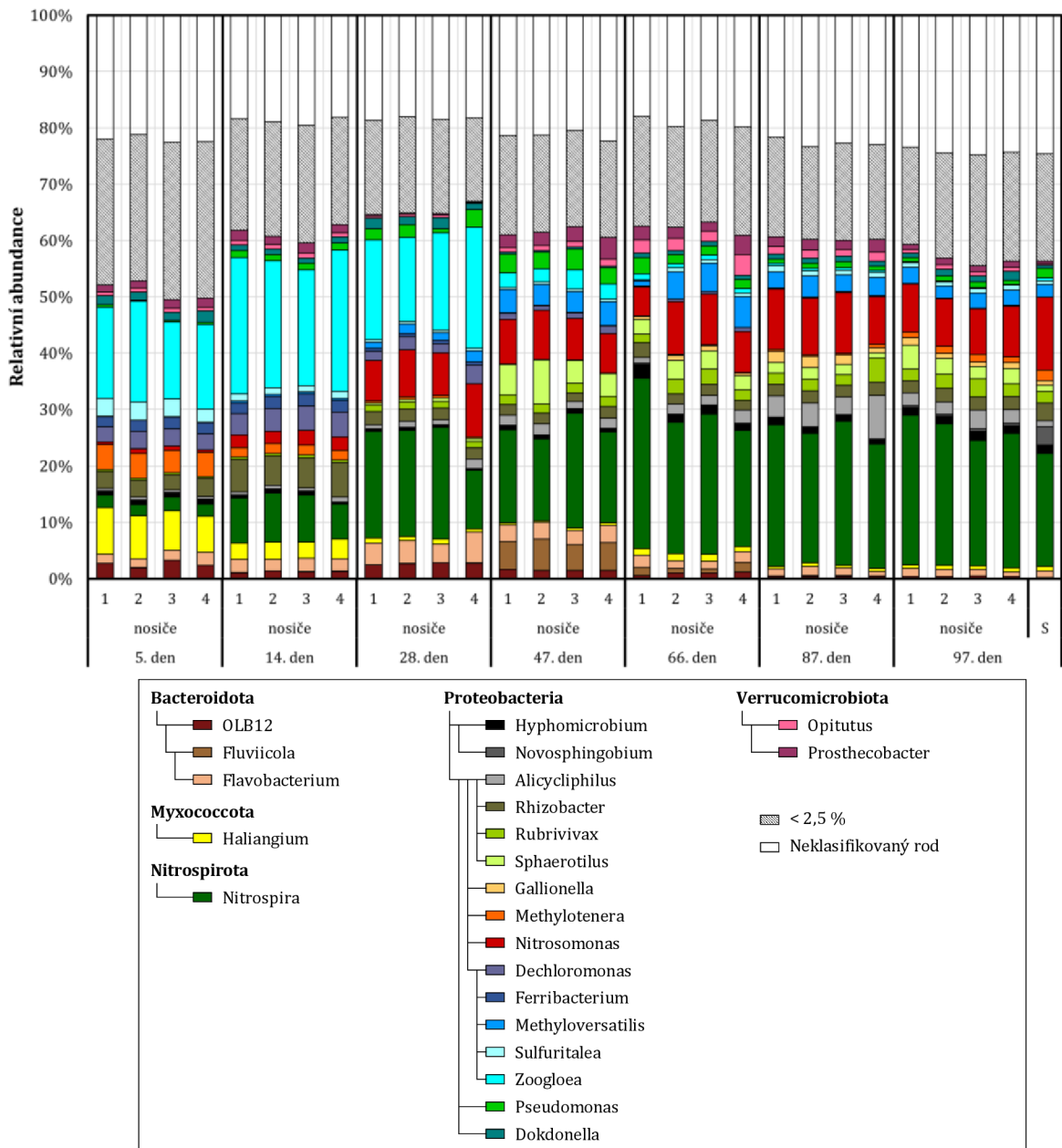
Obr. 45: Relativní kvantifikace celkové a specifické bakteriální biomasy mezi různými typy nosičů v jednotlivých odběrech, kde referenčním vzorkem byl nosič 1 z daného odběru

Výsledky NGS analýzy jsou znázorněny pomocí OTU grafů, které zobrazují procentuální zastoupení mikroorganismů ve vzorcích nosičů a suspenze odebraných v průběhu fungování reaktoru. V grafu na Obr. 46 je znázorněno zastoupení nitrifikačních bakterií, které jsou z hlediska nitrifikačního procesu nejvýznamnější. Graf na Obr. 47 zobrazuje bakteriální populaci nejčastěji zastoupených rodů a slouží ke sledování rozdílnosti či podobnosti mezi jednotlivými vzorky.

Zachycen byl postupný nárůst nitrifikačních bakterií AOB *Nitrosomonas* a NOB *Nitrospira* z ~3 % na ~30 % v odběrech 5.-28. dne (Obr. 46). Pouze mírné zvýšení bylo po 28. dnu zaznamenáno pro bakterie NOB. Pokles zastoupení byl zaznamenán u rodu *Zoogloea* v odběrech 28.-97. dne, který se vyskytuje pouze v aktivovaném kalu (Obr. 47). Přítomnost těchto bakterií indikuje počáteční záchyt suspendovaného kalu na nosičích a po 28. dnu jeho postupné vymývání a vývoj vlastního biofilmu. Celkové složení bakteriálního biofilmu si je mezi nosiči různého typu velmi podobná. Jediný zaznamenaný rozdíl mezi nosiči byl v nižším zastoupení nitrifikačních bakterií na nosiči 4 při několika odběrech, které může indikovat pomalejší tvorbu biofilmu způsobenou absencí přítomnosti otvorů filetové vazby. Zastoupení nitrifikačních bakterií na nosiči 4 byl při konečném odběru velice podobný zbylým nosičům. Složení suspenze odebrané z reaktoru při jeho ukončení bylo velice podobné jako biofilm na nosičích a mohlo jej způsobit uvolnění buněk z biofilmu.



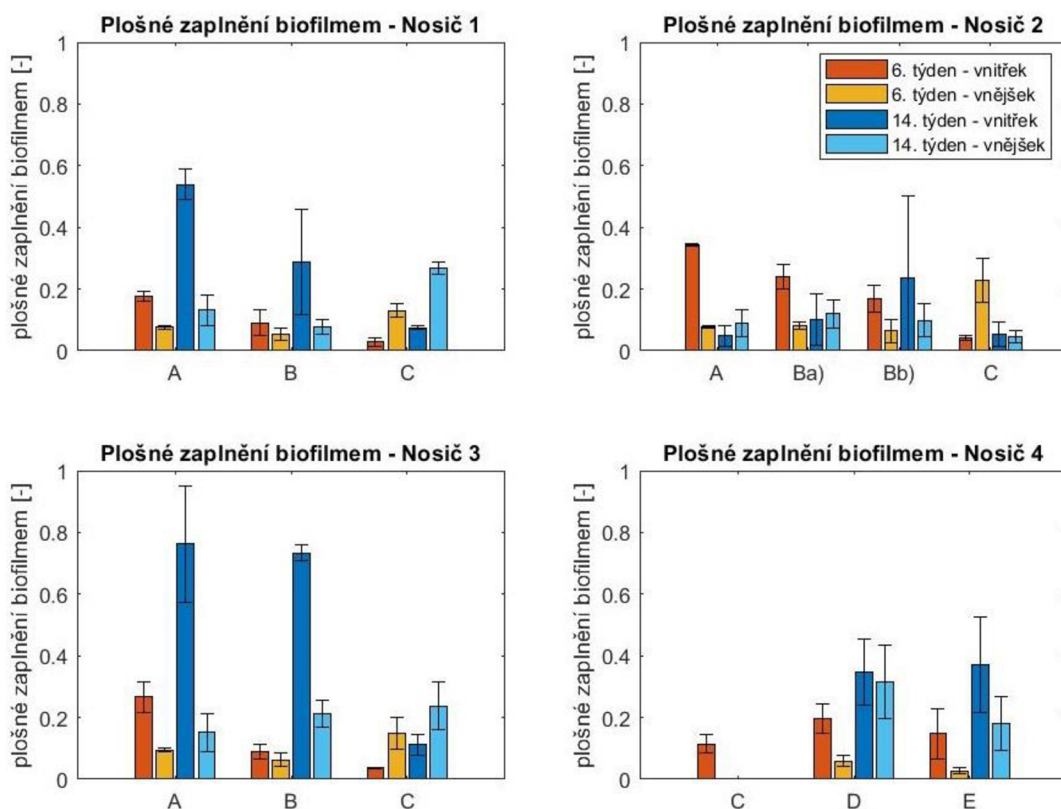
Obr. 46: Relativní zastoupení AOB *Nitrosomonas* a NOB *Nitrospira* ve vzorcích nosičů a suspenze odebraných během provozu systému MBBR



Obr. 47: Relativní zastoupení mikroorganismů ve vzorcích nosičů a suspenze odebraných během provozu systému MBBR – znázorněny mikroorganismy na úrovni rodu s abundancí > 2,5 %

11.2.3 Obrazová analýza

Hodnocení plošného zaplnění biofilmem na nosičích v jednotlivých oblastech si kladlo za cíl zjistit lokaci biofilmu potřebnou pro úpravu kladení stávající vazby. Metoda hodnotí pouze šíření biofilmu po povrchu pleteniny. Absence hodnocení krytých oblastí mezi jednotlivými fibrilami může mít zásadní vliv na vyhodnocení. Prvky pleteniny jsou však natolik malé, že je nelze od sebe oddělit. Hodnoty plošného zaplnění biofilmem jsou uvedeny v tab. 15 a 16 v příloze B. Grafické znázornění je na obr. 48. Snímky oblastí jednotlivých nosičů jsou v příloze B na obr. 54-57.



Obr. 48: Plošné zaplnění nosičů biofilmem z vnitřní i vnější strany v 6. a 14. týdnu

V odběru z 6. týdne bylo u většiny nosičů zaznamenáno rozdílné plošné zaplnění biofilmem mezi vnější a vnitřní stranou, výjimkou je nosič 1 a 3 oblast B, kde jsou rozdíly nevýznamné. Vyšší plošné zaplnění biofilmem bylo u oblastí A a B na vnitřní straně v porovnání s vnějškem. Opačně tomu bylo u oblastí C, kde bylo vyšší plošné zaplnění na vnější straně kvůli stáčení okrajů zajišťující ochranu vnější části hrany. Naopak vnitřní část C byla vystavena působení proudění, proto se zde biofilm šířil méně. U nosiče 4 nebylo možné nasnímat oblast C pro všechny odběry kvůli nemožnosti vyrovnat okraj pleteniny. Na vnitřní straně bylo u všech nosičů zaznamenáno větší plošné zaplnění biofilmem oblastí A v porovnání s oblastí B, které mohlo být dáno výskytem delších spojovacích klíčků v oblasti A s volnější strukturou (Obr. 49). Na vnější straně nebyly zaznamenány téměř žádné rozdíly v plošném zaplnění biofilmem mezi jednotlivými oblastmi zájmu. U nosiče 4, kde se vyskytovaly jiné oblasti zájmu než u nosiče 1-3, bylo zaznamenáno vyšší plošné zaplnění biofilmem oblastí D, rozdíl v porovnání s oblastí E pro vnitřek i vnějšek je však nevýznamný. Oblast Ba) a Bb) rozlišené navíc u nosiče 2 nevykázaly rozdíl v plošném zaplnění biofilmem, který se zde šířil velice podobně.

V odběru ze 14. týdne bylo zaznamenáno větší plošné zaplnění oblastí *A* a *B* pro vnitřní stranu v porovnání s vnější, pro oblast *C* naopak, ovšem pouze pro nosič 1 a 3. U nosiče 2 byly zaznamenány téměř nevýznamné rozdíly v plošném zaplnění vnitřku a vnějšku. U nosiče 4 byl rozdíl mezi plošným zaplněním biofilmem vnitřní a vnější strany zaznamenán pouze pro oblast *E*. V oblasti *D* se biofilm držel i na vnější straně patrně díky uvolněnější struktuře multifilu těchto oček (Obr. 51). Rozdíl v plošném zaplnění oblastí *A* a *B* je u tohoto odběru pro nosič 1 a 3 nevýznamný, biofilm se postupem času rozrůstá i na těsnější strukturu kratších spojovacích klíček.

U všech nosičů s výjimkou nosiče 2 byl pozorován nárůst plošného zaplnění biofilmem ve 14. týdnu oproti 6. týdnu pro oblast *A* a *B* na vnitřní straně, pro oblast *C* na vnější straně. Oblasti vystavené mechanickému namáhání vyznačující se nižším plošným zaplněním nevykázaly rozdíly při mezi odběry ze 6. a 14. týdnu. U nosiče 2 byly ve 14. týdnu oproti 6. zaznamenány na vnitřní straně nižší hodnoty plošného zaplnění biofilmem, a to kvůli omezenému lokálnímu šíření biofilmu patrně (Obr. 52). Největší nárůst biofilmu mezi odběry z 6. a 14. týdne byl u nosiče 3 oblast *B* (Obr. 50). U nosiče 4 vyšly vyšší hodnoty ve 14. týdnu zejména pro vnější stranu.

Porovnání výsledků mezi typy nosičů bylo realizováno pouze pro nosič 1-3, které jsou rozděleny na ekvivalentní oblasti zájmu. Pro odběr ze 6. týdne bylo vyšší plošné zaplnění biofilmem v oblasti *A* na vnitřní straně nosiče 1 v porovnání s nosičem 2, v oblasti *B* bylo vyšší plošné zaplnění na vnitřní straně nosiče 2, v oblasti *C* nebyly na vnitřní straně žádné rozdíly, na vnější straně nebyly v tomto odběru zaznamenány žádné významné rozdíly. Pro odběr ze 14. týdne bylo nejvyšší plošné zaplnění v oblasti *A* i *B* na vnitřní i vnější straně nosiče 3. Nosič 2 vykazoval nejnižší hodnoty plošného zaplnění, vymyká se v chování osídlení biofilmem oproti ostatním nosičům, protože se zde biofilm viditelně šířil jen na lokálních místech. Je možné, že pro obrazovou analýzu byl vybrán nosič, který mohl být skrze otevřené okraje vystaven proudění způsobující nechtěný oplach biofilmu z vnitřní strany. Přestože v plošném zaplnění biofilmem jsou mezi nosiči rozdíly, jejich účinnost stejně jako složení biofilmu a zastoupení nitrifikačních bakterií bylo prokázáno jinými metodami bez rozdílu.

Z obr. 50 je podle subjektivního vizuálního hodnocení patrné rozrůstání biofilmu i na spojovací klíčky monofilu. Z důvodů zmíněných v kap. 11.1.3 *Obrazová analýza* nebyly monofily hodnoceny objektivně.

Volnější struktura (delší spojovací klíčky, jednoduchá očka) umožňuje pravděpodobně rychlejší tvorbu biofilmu. Sevřenější části jsou však časem osídleny také. Zároveň bylo potvrzeno šíření biofilmu na kryté vnitřní části nosičů. Je nutné brát v úvahu omezení metodiky pouze na zkoumání vnějšího povrchu pleteniny, nikoli vnitřní strukturu multifilů, které ji tvoří.



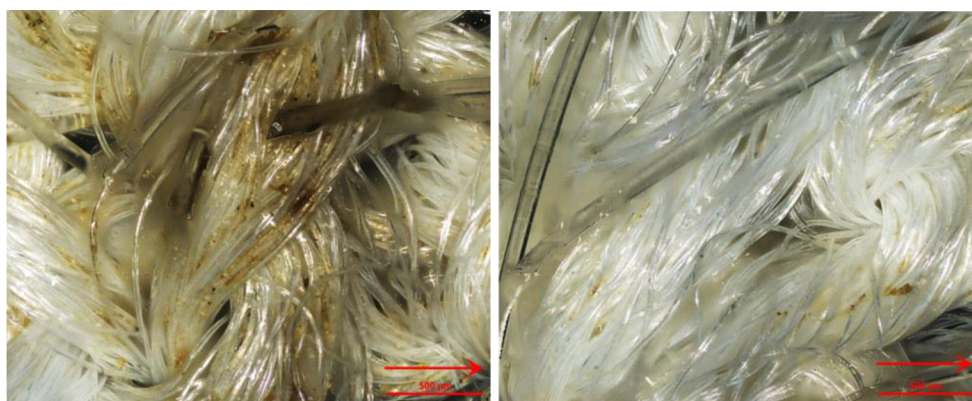
Obr. 49: Makroskopický snímek nosiče 1 - odběr ze 6. týdne – oblast A (vlevo), oblast B (vpravo)



Obr. 50: Makroskopický snímek nosiče 3 – oblast B – odběr ze 6. týdne (vlevo), ze 14. týdne (vpravo)



Obr. 51: Mikroskopický snímek nosiče 4 – odběr ze 14. týdne – jednoduché očko (vlevo), dvojité očko (vpravo)



Obr. 52: Mikroskopický snímek nosiče 2 – odběr ze 14. týdne – oblast A (vlevo i vpravo)

12 Směřování dalšího vývoje nosičů

Z výsledků analýzy účinnosti nosičů, složení biofilmu a zastoupení nitrifikačních bakterií vyplývá nevýznamný vliv změny kladení i přítomnosti otvorů filetové vazby. Z hodnocení obrazové analýzy naopak vyplývá vyšší plošné zaplnění biofilmem volnější struktury pleteniny. Proto by bylo vhodné směřovat další vývoj nosičů na hladkou pleteninu a zároveň uvolnit strukturu navržením vazby s delšími spojovacími kličkami případně více jednoduchými očky.

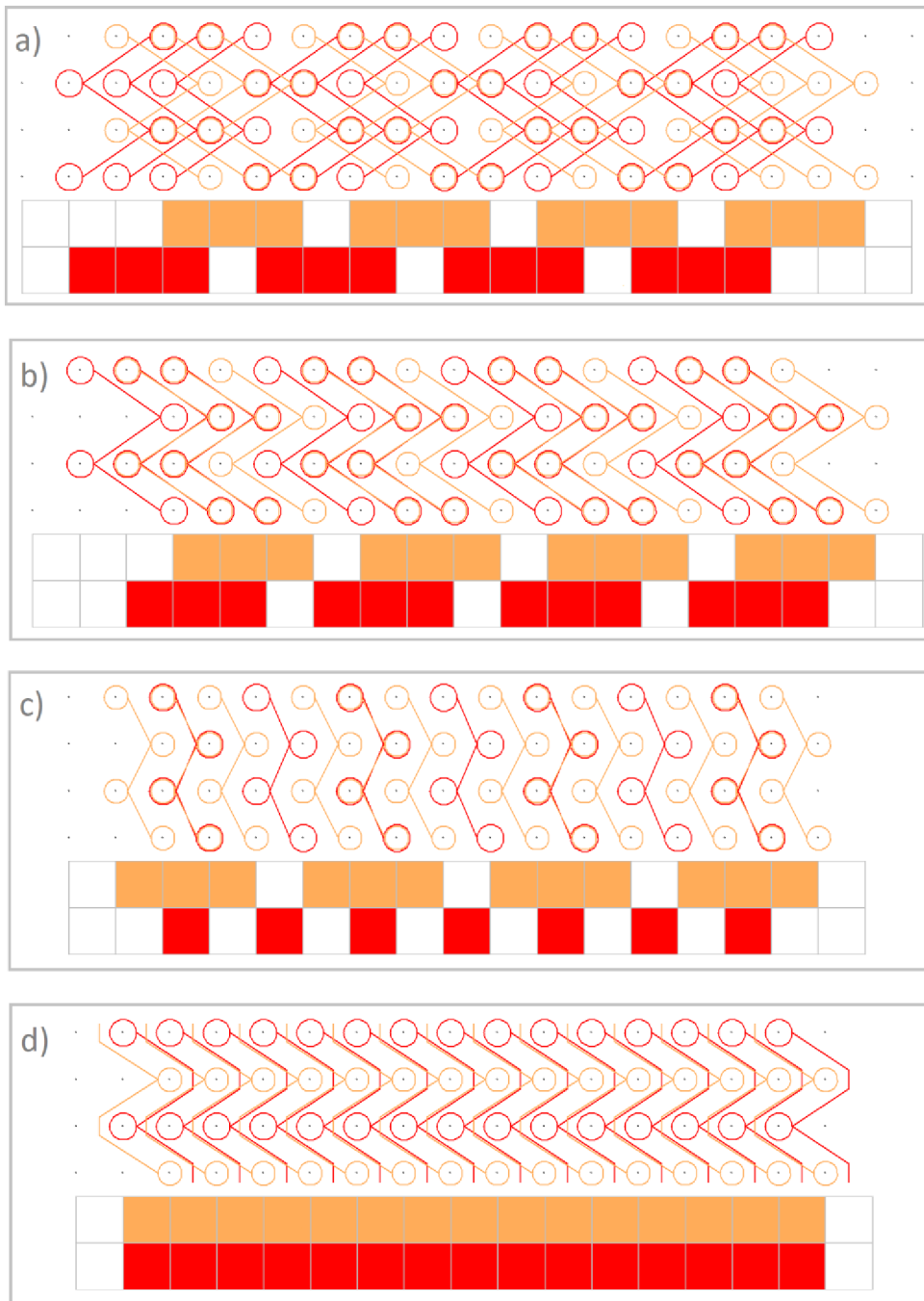
Uvedené vazby byly navrženy co nejjednodušeji pro zajištění stejnoměrné spotřeby nití, která by umožnila plynulou výrobu nosičů. Návrhy jsou znázorněny na obr. 53. Kladení je zapsáno pro přední lůžko z důvodu větší přehlednosti. Pro využití v nosiči musí být vazba přepsána pro dvě lůžka s tím, že vazební provázání obou stran bude stejné.

Vazby 7 (Obr. 53a) a 8 (Obr. 53b) byly navržena se stávajícím návlekem KP 3:1. Obě vazby využívají kladení sukna, u vazby 7 je kladeno protisměrně, u vazby 8 stejnosměrně. Ve vazbě se tedy vyskytují pouze spojovací kličky o 2 rozteče. Při protisměrném kladení vznikají v pletenině dodatečně malé otvory neprovázané v jednom řádku. Stejnosměrné kladení zajišťuje hladkou pleteninu.

Vazba 9 (Obr. 53c) byla navržena v návaznosti na vazbu 4, která byla experimentálně testována, s úpravou návleku – KP 1 (3:1), KP 2 (1:1). Ve vazbě je použito kladení trikotu a změna návleku jednoho z kladecích přístrojů vedla ke zvýšení počtu jednoduchých oček s volnější strukturou, ale také ke snížení počtu osnovních nití, tedy materiálu, v nosiči.

Vazba 10 (Obr. 53d) navazuje na strukturu zmíněnou v kap. 3.2.2 *Polosíťovaná struktura*. Ve vazbě se střídá očkotvorné kladení s KPJ, které umožňuje tvorbu jednoduchých oček. Navržené kladení aplikované do distanční pleteniny by mělo zajistit zachycení spojovacích kliček za spojovací vrstvu monofilu. Ve výsledku by měla pletenina získat dostatečně volnou strukturu jak oček, tak spojovacích kliček.

Je otázkou, zda se na účinnosti nosičů projeví prodloužení spojovacích kliček v hladké pletenině, zvýšení počtu jednoduchých oček případně změna návleku spojená s nižším/vyšším počtem nití v pletenině. Prodloužení spojovacích kliček u hladké pleteniny povede pravděpodobně k méně prodyšné struktuře, která by nemusela zajistit dostatečné okysličování tvořeného biofilmu. Možným řešením by mohlo být zvětšení distance pleteniny. Zvýšení počtu jednoduchých oček by naopak okysličování zajistit mělo, problematický zde může být úbytek materiálu vlivem snížení počtu osnovních nití, které redukuje počet míst pro potenciální obsazení bakteriemi. Změna množství materiálu v nosiči může ovlivnit i jeho hmotnost a může mít vliv na případné vznášení či potápění vzorků v reaktoru.



Obr. 53: Navržené vazby – a) vazba 7, b) vazba 8, c) vazba 9, d) vazba 10

13 Závěr

Práce si kladla za cíl prozkoumat vliv změny vazebného provázání na strukturální parametry navrhovaných nosičů pro nitrifikační proces ČOV, účinnost a bakteriální složení tvořeného biofilmu jakož i jeho lokalizaci v pletenině.

V rešeršní části je rozebrán proces nitrifikace, využívané a vyvíjené nosiči biomasy a vazební možnosti osnovního pletení využitelné v distančním pletení při vývoji pleteného nosiče. V řadě výzkumů byla prokázána vhodnost multifilamentů v ČOV, jakož i vyšší účinnost prototypu mikrovláknenného nosiče v porovnání s komerčně využívanými plastovými nosiči.

V rámci experimentální části práce bylo navrženo celkem 6 nosičů se změnou kladení z toho 4 byly vyrobeny. Navrženy byly filetové vazby s otvory a pro srovnání vlivu přítomnosti otvorů byl vyroben nosič s hladkou vazbou.

Ve strukturální analýze nosičů byl hodnocen vliv změny kladení na strukturální parametry pleteniny – spotřeba délkových textilií, hustota pleteniny, hmotnost nosiče, rozměr, efektivní plocha a měrný povrch. Z poznatků vyplývá, že změna počtu delších klíček ve vazebném kladení ovlivňuje spotřebu nití v nosiči, hustotu pleteniny a měrný povrch. Změna délky nití v nosiči spojená se změnou množství materiálu se však neprojeví na celkové hmotnosti nosiče.

Vyrobene nosiče byly testovány v poloprovozním nitrifikačním reaktoru typu MBBR, který si klade za cíl odstranit zbytkové množství amoniakálního dusíku v odpadní vodě. Po ukončení testování byla analyzována účinnost nosičů pomocí metody respirometrie a složení biofilmu pomocí metody qPCR a NGS. Nitrifikace probíhala bez problémů po celou dobu experimentu.

Z hlediska tvorby biofilmu a účinnosti nosičů v nitrifikačním procesu nebyl shledán zásadní rozdíl mezi jednotlivými typy, což potvrzuje ustálená rychlost spotřeby kyslíku zjištěná metodou respirometrie, podobné zastoupení nitrifikačních bakterií i složení celého bakteriálního konsorcia zjišťované pomocí molekulárně genetických testů. U každého typu nosiče docházelo k rychlému nárůstu a vývoji biofilmu s požadovanými nitrifikačními bakteriemi. Všechny testované typy nosičů navržené s rozdílným kladením se jeví jako vhodné a účinné pro adhezi nitrifikačních bakterií a následný vývoj biofilmu.

Z hodnocení uchycení biofilmu na pletenině pomocí obrazové analýzy vyplývá vyšší uchycení biofilmu na vnitřní straně nosiče, která je dostatečně chráněna před nechtěným vymýváním biofilmu. Zároveň bylo zaznamenáno vyšší uchycení biofilmu na volnějších částech pleteniny, konkrétně na delších spojovacích klíčkách a jednoduchých očkách. Metoda ovšem zkoumá pouze povrchovou strukturu nosičů. S ohledem na nevýznamné rozdíly účinnosti a složení biofilmu, jakož i přechází výzkumy zkoumající uchycení biofilmu ve struktuře mikrovláknenných svazků, se bakteriální biofilm tvoří i uvnitř struktury multifilu, který mu poskytuje vhodné chráněné prostředí.

Přestože byl zaznamenán vliv rozdílného kladení na strukturální parametry pleteniny, z hlediska účinnosti a tvorby biofilmu se rozdíly neprojevíly. Přítomnost otvorů tvořených filetovou vazbou se zdá být nadbytečná, pletenina sama o sobě poskytuje dostatečnou prodyšnost svými očky. Dalším směrováním vývoje mikrovláknenných nosičů by mohly být hladké vazby bez otvorů, které by mohly zajistit jednodušší a levnější výrobu a tím zajistit cenovou konkurenceschopnost mikrovláknenných nosičů na trhu.

14 Seznam použité literatury

- [1] *Ochrana životního prostředí* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/protecting-environment-and-oceans-green-deal_cs
- [2] *EXECUTIVE SUMMARY OF THE IMPACT ASSESSMENT REPORT* [online]. Brusel, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-10/Executive%20summary%20of%20the%20impact%20assessment%20accompanying%20the%20proposal.pdf>
- [3] CERVANTES, Francisco J., Spyros G. PAVLOSTATHIS a Adrianus C. van HAANDEL. *Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters: principles and applications*. London: IWA publishing, 2006. Integrated environmental technology series. ISBN 1-843391-14-7
- [4] DOHÁNYOS, Michal, Jan KOLLER a Nina STRNADOVÁ. *Čištění odpadních vod*. Druhé vydání. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-316-5
- [5] DI BIASE, Alessandro, Maciej S. KOWALSKI, Tanner R. DEVLIN a Jan A. OLESZKIEWICZ. *Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review*. Journal of Environmental Management [online]. 2019, 247, 849-866 [cit. 2023-03-23]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2019.06.053
- [6] MORGAN-SAGASTUME, Fernando. *Biofilm development, activity and the modification of carrier material surface properties in moving-bed biofilm reactors (MBBRs) for wastewater treatment*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology [online]. 2018, 48(5), 439-470 [cit. 2023-03-23]. ISSN 1064-3389. Dostupné z: doi:10.1080/10643389.2018.1465759
- [7] HAVLÍČEK, Karel. *Vývoj a aplikace kompozitního nanovlákněného nosiče biomasy pro environmentální biotechnologie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2022. Disertační práce
- [8] HAVLÍČEK, Karel, Magda NECHANICKÁ, Tomáš LEDERER a Brigita KOLČAVOVÁ SIRKOVÁ. *Analysis of nitrifying bacteria growth on two new types of biomass carrier using respirometry and molecular genetic methods*. Ecotoxicology and Environmental Safety [online]. 2021, 225 [cit. 2023-03-23]. ISSN 01476513. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112795
- [9] MAZUR, Agata a Krzysztof CHMIELOWSKI. *SUPPORTING THE WATER RESERVOIR RESTORATION PROCESSES BY USING SELECTED TYPE OF BIOLOGICAL BEDS*. Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus [online]. 2020, 19(3), 83-98 [cit. 2023-03-23]. ISSN 16440765. Dostupné z: doi:10.15576/ASP.FC/2020.19.3.83
- [10] IFAS carrier. In: *LEVAPOR Biofilm Technologie* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://levapor.com/levapor-an-ideal-mbbr-ifas-carrier/>
- [11] Z-MBBR carrier. In: *AnoxKaldnes – Veolia Water Technologies* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: https://www.anoxkaldnes.com/sites/g/files/dvc4056/files/document/2020/09/AnoxKaldnes_Z-MBBR_Folder.pdf

- [12] KŘIKLAVOVÁ, Lucie. Vývoj nanovláknenného nosiče pro hybridní bioreaktory s imobilizovanou biomasou a využití obrazové analýzy pro hodnocení biofilmových struktur. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Disertační práce
- [13] MCQUARRIE, James P. a Joshua P. BOLTZ. Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design, and Performance. *Water Environment Research* [online]. 2011, 83(6), 560-575 [cit. 2023-03-23]. ISSN 10614303. Dostupné z: doi:10.2175/106143010X12851009156286
- [14] HAUZEROVÁ, Šárka. Vliv struktury multifilu na testování bakteriálních biofilmů při čištění odpadních vod. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Bakalářská práce.
- [15] SVOBODOVÁ, Lucie, Karel HAVLÍČEK, Magda NECHANICKÁ, et al. Microfiber structure for enhanced immobilization of nitrifying bacteria in a post-nitrification reactor. *Environmental Technology & Innovation* [online]. 2021, 21 [cit. 2023-03-23]. ISSN 23521864. Dostupné z: doi:10.1016/j.eti.2021.101373
- [16] JURECSKA, Laura, Katalin BARKÁCS, Éva KISS, Gergő GYULAI, Tamás FELFÖLDI, Balázs TÖRŐ, Róbert KOVÁCS a Gyula ZÁRAY. Intensification of wastewater treatment with polymer fiber-based biofilm carriers. *Microchemical Journal* [online]. 2013, 107, 108-114 [cit. 2023-03-23]. ISSN 0026265X. Dostupné z: doi:10.1016/j.microc.2012.05.028
- [17] PETŘÍKOVÁ, Lucie. Pletené struktury pro čištění odpadních vod. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. Bakalářská práce
- [18] KOLČAVOVÁ SIRKOVÁ, Brigita, Irena LENFELDOVÁ, Karel HAVLÍČEK, Martina RYVOLOVÁ, Monika VYŠANSKÁ, Tomáš LEDERER a Petra JIRÁSKOVÁ. Warp knitted spacer microfiber biomass carrier for wastewater treatment. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2023, 53 [cit. 2023-03-23]. ISSN 1528-0837. Dostupné z: doi:10.1177/15280837231154533
- [19] DŘÍMAL, Pavel a Jaromír HOFFMANN. Automatizovaný systém kontinuálního sledování aerobního biologického rozkladu látek ve vodním i půdním prostředí. *Chemické listy* [online]. 2008, 102, 139–147 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2008_02_139-147.pdf
- [20] GRADA, Ayman a Kate WEINBRECHT. Next-Generation Sequencing: Methodology and Application. *Journal of Investigative Dermatology* [online]. 2013, 133(8), 1-4 [cit. 2023-03-28]. ISSN 0022202X. Dostupné z: doi:10.1038/jid.2013.248
- [21] SPENCER, David J. *Knitting technology: a comprehensive handbook and practical guide*. Third edition. Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2001. ISBN 1-58716-121-4
- [22] WEBER, Marcus Oliver a Klaus-Peter WEBER. *Wirkerei und Strickerei: Technologien – Bindungen – Produktionsbeispiele*. 6., völlig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Frankfurt am Main: Dfv Mediengruppe Fachbuch, [2014]. ISBN 978-3-86641-299-6
- [23] RAY, Sadhan Chandra. *Fundamentals and advances in knitting technology*. New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt, 2012. Woodhead Publishing India in textiles. ISBN 978-93-80308-16-6
- [24] DANĚK, Vratislav. *Stroje a technologie osnovního pletení*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1984

- [25] KYOSEV, Yordan. *Warp knitted fabrics construction*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2020. ISBN 978-1-4987-8016-2
- [26] SOVADNÍK, František. *Technologie osnovního pletení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982
- [27] KOVÁŘ, Radko. *Teorie pletení*. 2. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1986
- [28] KOVÁŘ, Radko. *Pletení*. Vydání třetí. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, Katedra textilních struktur, 2005. ISBN 80-7083-812-4
- [29] ZHI, Chao, Mingjuan DU, Zhaoling SUN, Mengjie WU, Xiaoyi HE, Jianguang MENG a Lingjie YU. *Warp-Knitted Spacer Fabric Reinforced Syntactic Foam: A Compression Modulus Meso-Mechanics Theoretical Model and Experimental Verification*. *Polymers* [online]. 2020, 12(2) [cit. 2023-05-16]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12020286
- [30] High Distance Mesh Spacer. In: *Karl Mayer* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.karlmayer.com/en/support/textile-consulting/virtual-showroom/high-distance-mesh-spacer/>
- [31] NECKÁŘ, Bohuslav. *Příze: tvorba, struktura, vlastnosti*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00213-3
- [32] NECKÁŘ, Bohuslav. *Morfologie a strukturní mechanika obecných vlákněných útvarů*. Vyd. 2. V Liberci: Technická univerzita, Textilní fakulta, 2001. ISBN 80-7083-473-0
- [33] NECKÁŘ, Bohuslav a Dipayan DAS. *Theory of structure and mechanics of fibrous assemblies*. New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt, 2012. Woodhead publishing India in textiles. ISBN 978-1-84569-791-4
- [34] NECKÁŘ, Bohuslav. *Vlákna a vlákněné útvary 1 „Definice a souvislosti“*. Struktura a vlastnosti textilií. FT TUL. Liberec. 2018. [cit. 2023-03-23] Dostupné z: <http://elearning.tul.cz>
- [35] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. [2. vydání]. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1
- [36] ČSN EN ISO 2060. *Textilie. Nitě na návinech. Zjišťování jemnosti (délkové hmotnosti) pásmovou metodou*. 1997. Třídící znak: 800702
- [37] ČSN EN ISO 2061. *Textilie – Zjišťování zákrutů nití – Metoda přímého počítání*. 2016. Třídící znak: 800709
- [38] IN-46-108-01/01. *Doporučený postup tvorby příčných řezů. Měkké a tvrdé řezy*. 2002.
- [39] ČSN EN 14971. *Textilie – Pleteniny – Zjišťování počtu oček na jednotku délky a na jednotku plochy*. 2006. Třídící znak: 800886)
- [40] ANSORGE, Wilhelm J. *Next-generation DNA sequencing techniques*. *New Biotechnology* [online]. 2009, 25(4), 195-203 [cit. 2023-05-29]. ISSN 18716784. Dostupné z: doi:10.1016/j.nbt.2008.12.009

Seznam příloh

Příloha A: Chemismus reaktoru v průběhu experimentu

Příloha B: Obrazová analýza – plošné zaplnění biofilmem

Přílohy

Příloha A: Chemismus reaktoru v průběhu experimentu

Tab. 12: Nátok do reaktoru

Datum	NH ₄ ⁺ -N [mg/l]	PO ₄ ³⁻ -P [mg/l]	NaHCO ₃ [mg/l]
11.11.2022	9,73	15,2	50
18.11.2022	7,5	15,1	50
21.11.2022	11,6	15,1	50
25.11.2022	17,9	14,1	40
30.11.2022	9,98	14,5	60
05.12.2022	12,9	17,6	60
09.12.2022	12,7	20,4	60
12.12.2022	10,0	20,1	60
19.12.2022	12,4	19,2	60
23.12.2022	9,1	19,1	60
28.12.2022	13,5	19,3	60
02.01.2023	10,5	19,5	60
09.01.2023	10,5	18,7	60
13.01.2023	11,3	16,8	60
18.01.2023	10,4	17,3	60
23.01.2023	12,1	17,5	60
27.01.2023	13,7	10,7	60
01.02.2023	12,6	18,1	60
06.02.2023	12,5	18,1	60
10.02.2023	8,05	19,0	60

Tab. 13: Odtok z reaktoru

Den	Nefiltrovaná CHSK [mg/l]	Filtrovaná CHSK [mg/l]	NO ₂ ⁻ -N [mg/l]	NO ₃ ⁻ -N [mg/l]	NH ₄ ⁺ -N [mg/l]
0	-	-	-	-	-
4	24,6	11,1	0,551	6,63	1,98
11	7,21	13,5	0,218	12,0	0,265
17	-	-	0,015	18,7	1,37
19	7,25	10,7	0,961	14,4	2,25
26	14,5	-	0,164	12,7	<0,015
33	50,7	-	0,068	15,4	0,046
40	-	-	2,64	11,3	0,060
47	-	-	0,1	9,0	0,05
53	-	-	0,17	13,5	0,067
60	-	10,8	0,173	12,0	1,54
67	-	2,03	0,065	12,3	0,027
74	7,34	27,4	0,037	12,7	0,038
81	17,7	-	0,033	14,7	0,024
89	16,1	-	0,116	15,2	0,050
95	8,55	6,66	0,205	15,4	0,040

Tab. 14: Parametry v reaktoru

Parametry v reaktoru		
Den	pH	Další
11.11.2022	7	Spuštění reaktoru (inokulace) – 3 dny provozováno s kalem, HRT = 12 h
15.11.2022	8,3	HRT = 12 h, reaktor již provozován čistě jako MBBR (bez kalu), odebrány vzorky na MO
22.11.2022	7,61	HRT nastaveno na 6 hodin, odebrány vzorky na MO, respirometrie
28.11.2022	6,8→7	HRT 6 hodin
30.11.2022	6,7	HRT 6 hodin
8.12.2022	7,5	HRT 6, odebrány vzorky na MO, respirometrie
14.12.2022	7,5	HRT = 6 hodin
20.12.2022	-	Odebrány vzorky na MO
21.12.2022	7,4	HRT = 6 hodin
28.12.2022	7,5	HRT = 6 hodin, Odebrány vzorky na MO, respirometrie
03.01.2023	7,4	HRT = 6 hodin
10.01.2023	7,5	HRT = 6 hodin
16.01.2023	-	HRT = 6 hodin, Odebrány vzorky na MO
17.01.2023	7,5	HRT = 6 hodin
24.01.2023	7,4	HRT = 6 hodin
31.01.2023	7,5	HRT = 6 hodin
06.02.2023	7,4	HRT = 6 hodin, Odebrány vzorky na MO, respirometrie
08.02.2023	7,3	HRT = 6 hodin
15.02.2023	7,4	HRT = 6 hodin
16.02.2023	7,4	Respirometrie, Odebrány vzorky na MO, Ukončení reaktoru

Příloha B: Obrazová analýza – plošné zaplnění biofilmem

Tab. 15: Plošné zaplnění biofilmem – odběr ze 6. týdne – průměrná hodnota (95 % IS)

Plošné zaplnění 6. týden [m ⁻¹]		vnitřek	vnějšek
Nosič 1	A	0,177 (0,160; 0,193)	0,077 (0,071; 0,082)
	B	0,090 (0,049; 0,132)	0,052 (0,032; 0,070)
	C	0,028 (0,014; 0,042)	0,130 (0,109; 0,151)
Nosič 2	A	0,344 (0,339; 0,348)	0,078 (0,074; 0,081)
	Ba)	0,240 (0,202; 0,277)	0,081 (0,070; 0,093)
	Bb)	0,169 (0,124; 0,215)	0,064 (0,025; 0,102)
	C	0,042 (0,033; 0,051)	0,227 (0,155; 0,298)
Nosič 3	A	0,266 (0,217; 0,315)	0,095 (0,090; 0,100)
	B	0,089 (0,065; 0,113)	0,063 (0,042; 0,083)
	C	0,036 (0,033; 0,040)	0,148 (0,097; 0,199)
Nosič 4	C	0,114 (0,085; 0,142)	-
	D	0,197 (0,149; 0,245)	0,059 (0,041; 0,078)
	E	0,147 (0,067; 0,227)	0,037 (0,028; 0,047)

Tab. 16: Plošné zaplnění biofilmem – odběr ze 14. týdne – průměrná hodnota (95 % IS)

Plošné zaplnění 14. týden [m ⁻¹]		vnitřek	vnějšek
Nosič 1	A	0,539 (0,489; 0,589)	0,131 (0,067; 0,206)
	B	0,289 (0,119; 0,459)	0,078 (0,043; 0,148)
	C	0,075 (0,068; 0,082)	0,268 (0,247; 0,289)
Nosič 2	A	0,048 (0,015; 0,080)	0,088 (0,045; 0,131)
	Ba)	0,010 (0,016; 0,183)	0,120 (0,075; 0,165)
	Bb)	0,235 (-0,034; 0,503)	0,098 (0,044; 0,152)
	C	0,054 (0,014; 0,094)	0,045 (0,023; 0,066)
Nosič 3	A	0,762 (0,576; 0,949)	0,151 (0,091; 0,211)
	B	0,734 (0,706; 0,761)	0,212 (0,170; 0,254)
	C	0,112 (0,078; 0,146)	0,238 (0,159; 0,317)
Nosič 4	C	-	-
	D	0,348 (0,217; 0,527)	0,315 (0,196; 0,435)
	E	0,372 (0,241; 0,455)	0,180 (0,094; 0,265)

Nosič 1		oblast A		oblast B		oblast C	
vnitřek	6. týden						
	14. týden						
vnějšek	6. týden						
	14. týden						








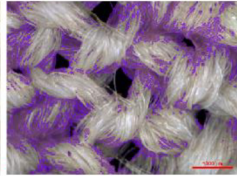

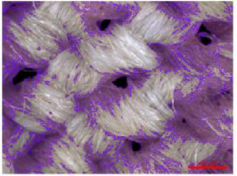








Obr. 54: Vyhodnocované snímky nosiče 1 ze 6. a 14. odběru – oblast A, B, C – vnitřek, vnějšek (fialové oblasti – překryvový obraz biofilmu)

Nosič 2		oblast A		oblast Ba)		oblast Bb)		oblast C	
vnitřek	6. týden								
	14. týden								
vnějšek	6. týden								
	14. týden								

Obr. 55: Vyhodnocované snímky nosiče 2 ze 6. a 14. odběru – oblast A, Ba), Bb), C – vnitřek, vnějšek (fialové oblasti – překryvový obraz biofilmu)

Nosič 3		oblast A		oblast B		oblast C	
vnitřek	6. týden						
	14. týden						
vnějšek	6. týden						
	14. týden						

Obr. 56: Vyhodnocované snímky nosiče 3 ze 6. a 14. odběru – oblast A, B, C – vnitřek, vnějšek (fialové oblasti – překryvový obraz biofilmu)

Nosič 4		oblast C	oblast D	oblast E
vnitřek	6. týden	 	 	 
	14. týden		 	 
vnějšek	6. týden		 	 
	14. týden		 	 

Obr. 57: Vyhodnocované snímky nosiče 4 ze 6. a 14. odběru – oblast C, D, E – vnitřek, vnějšek (fialové oblasti – překryvový obraz biofilmu)