

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Fakulta rybnářství a ochrany vod
Ústav akvakultury a ochrany vod

Diplomová práce

**Vliv alternativních zdrojů bílkovin v rybím krmivu na
růst ryb a rostlin ve dvousmyčkovém akvaponickém
systému**

Autor: Bc. Ondřej Nikl

Vedoucí diplomové práce: doc. Jan Mráz, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Radek Gebauer, Ph.D.

Studijní program a obor: Zemědělská specializace, Rybnářství a ochrana
vod

Forma studia: Kombinovaná

Ročník: 2

České Budějovice, 2023

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích 10. 5. 2023

Ondřej Nikl

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Janu Mrázovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Radku Gebauerovi, Ph.D. za metodické vedení, cenné rady a především za ochotu a vstřícnost pomoci, kdykoliv o to byli požádáni. Dále děkuji MSc. Anilu Axelu Tellbüscherovi a MSc. Koushiku Royovi, Ph.D. za přátelské konzultace související s tématem práce. Velký dík patří také technikům z akvaponického skleníku Ing. Pavlu Frantovi a p. Karlu Procházkovi, kteří se významným dílem na realizaci experimentu podíleli.

Největší poděkování však patří mé ženě Petře, bez jejíž podpory bych nyní nemohl děkovat nikomu jinému.

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Fakulta rybnářství a ochrany vod

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej NIKL**
Osobní číslo: **V21N001K**
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Rybnářství a ochrana vod**
Téma práce: **Vliv alternativních zdrojů bílkovin v rybím krmivu na růst ryb a rostlin ve dvousmyčkovém akvaponickém systému**
Zadávací katedra: **Ústav akvakultury a ochrany vod**

Zásady pro vypracování

Cílem diplomové práce bude vypracovat literární rešerši zaměřenou na problematiku výživy ryb a rostlin v akvaponických systémech a provést experiment zaměřený na vliv různých krmiv na růst ryb a rostlin v dvousmyčkové akvaponii.

V rámci vypracování DP bude v první řadě zpracována literární rešerše zaměřená na problematiku výživy ryb a rostlin v akvaponických systémech. Hlavní kapitoly budou zaměřeny na: Specifika výživy v akvaponii; nutriční požadavky ryb; složení surovin a obsah živin včetně mikroprvků v komerčních rybích krmivech; využití krmiv a v nich obsažených živin rybami a jejich vylučování v různých formách; obsah živin v odpadní vodě a kalech z RAS; možnosti mineralizace a dalších úprav odpadní vody a kalů; nutriční požadavky rostlin a jejich naplnění v akvaponickém živném roztoku; možnosti doplnění živin v akvaponickém živném roztoku; vliv úpravy pH a zdrojové vody na kvalitu nutričních roztoků; negativní a pozitivní látky a faktory v akvaponické vodě a možnosti jejich ovlivnění.

Hlavní náplní práce bude provedení krmného experimentu v akvaponické hale FROV JU. Bude zaměřen na porovnání produkční účinnosti krmiv s různými proteinovými zdroji na růst ryb a rostlin ve dvousmyčkové akvaponii. Bude posuzována produkční účinnost krmiv, obsah vyloučených živin do vody a kalu, mineralizovatelnost kalů, nutriční složení živných roztoků a růst rostlin. Zjištěná data budou porovnána s dostupnou literaturou. Na závěr bude provedeno komplexní zhodnocení testovaných krmiv a budou navržena opatření pro jejich vylepšení.

Práce bude probíhat v akvaponické hale a v laboratořích ÚAOV.

Práce bude finančně podporována projektem OP rybnářství CZ.10.2.101/2.1/0.0/19_016/0000985 Optimalizace technologie akvaponické farmy pro zvýšení produkce ryb a zlepšení kvality vody.

Rozsah pracovní zprávy: **500-100 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M., (Eds) 2019. Aquaponics Food Production Systems. Springer, Cham, Switzerland, 619 s.
Graber, A., Junge, R., 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246: 147-156.
Lennard, W., 2017. Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production. Wilson Lennard, 375 s.

- Lunda, R., Roy, K., Másílko, J., Mráz, J., 2019. Understanding nutrient throughput of operational RAS farm effluents to support semi-commercial aquaponics: Easy upgrade possible beyond controversies. *Journal of Environmental Management* 245: 255-263.
- Mráz, J., Lunda, R., Stejskal, V., 2018. Konstrukce akvaponických recirkulačních systémů. Certifikovaná metodika. Edice Metodik, FROV JU, Vodňany, č. 171.
- Mráz, J., Tůmová, V., Gebauer, R., Kalous, L., 2018. Management akvaponických systémů. Certifikovaná metodika. Edice Metodik, FROV JU, Vodňany, č. 172.
- Resh, H.M., 2016. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. 7. vydání. CRC Press, Boca Raton, 560 s.
- Roy, K., Kajgrová, L., Mráz, J., TILAFed: a comprehensive database for tailoring aquaponics nutrition and circular nutrients management. *New Biotechnology*, In press
- Roy, K., Mráz, J., 2020. Digestibility of protein feeds for Tilapia. Ověřená technologie. Edice Metodik, FROV JU, Vodňany, č. 186.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Mráz, Ph.D.**
Ústav akvakultury a ochrany vod

Konzultant diplomové práce: **Ing. Radek Gebauer, Ph.D.**
Ústav akvakultury a ochrany vod

Datum zadání diplomové práce: **21. ledna 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **2. května 2023**

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Literární přehled.....	9
2.1 Akvaponie	9
2.1.1 Princip	9
2.1.2 Systémy	9
2.1.3 Trendy, výzvy a perspektivy	11
2.2 Výživa ryb.....	12
2.2.1 Anatomie gastrointestinálního traktu	12
2.2.2 Fyziologie trávení ryb	14
2.2.3 Živiny, jejich metabolismus a vylučování	16
2.2.4 Nutriční požadavky ryb.....	23
2.2.5 Alternativní zdroje proteinů	31
2.2.6 Specifika výživy ryb v akvaponii.....	40
2.3 Výživa rostlin v akvaponii.....	41
2.3.1 Živiny	41
2.3.2 Nutriční požadavky rostlin	43
2.3.3 Příjem živin kořenovým systémem	45
2.3.4 Specifika výživy rostlin v akvaponii.....	47
2.4 Voda a kaly v akvaponickém systému.....	49
2.4.1 Obsah živin v odpadní vodě a kalech z RAS	50
2.4.2 Úprava odpadní vody a kalů	55
2.4.3 Možnosti doplnění živin v akvaponickém živném roztoku	58
2.4.4 Negativní a pozitivní látky a faktory v akvaponické vodě a možnosti jejich ovlivnění.....	63
2.5 Současný stav výzkumu akvaponických krmiv.....	65
2.6 Komerční krmiva	66
3 Materiál a metodika.....	68
3.1 Cíle práce	68
3.2 Pokusný materiál.....	68
3.3 Krmný pokus	68
3.3.1 Design pokusu	68
3.3.2 Experimentální krmiva.....	69

3.3.3	Hodnocení produkční účinnosti krmiv	71
3.4	Voda a kaly v RAS	71
3.5	Mineralizace	73
3.6	Pěstební pokus	74
3.6.1	Design pokusu	74
3.6.2	Hodnocení růstu rostlin	74
3.7	Statistické vyhodnocení	76
4	Výsledky	77
4.1	Produkční účinnost krmiv	77
4.2	Vody a kaly v RAS	78
4.2.1	Celková sušina (TS) a celkové nerozpuštěné látky (TSS)	78
4.2.2	Obsah živin	79
4.3	Mineralizace	80
4.4	Pěstební pokus	82
4.4.1	Hodnocení růstu	82
4.4.2	Celkové nerozpuštěné látky (TSS) v živných roztocích	83
5	Diskuze	84
5.1	Produkční účinnost krmiv	84
5.2	Možné úpravy krmiv	85
5.3	Voda a kaly v RAS	87
5.4	Mineralizace	89
5.5	Pěstební pokus	90
6	Závěr	92
7	Literatura	94
8	Seznam zkratk	109
9	Abstrakt	111
10	Abstract	112

1 Úvod

Jak roste světová populace, zvyšují se též nároky na produkci potravin. Předpokládá se, že do roku 2050 bude na Zemi téměř 10 miliard lidí a spotřeba potravin vzroste o 70 % (Ranganathan a kol., 2016). To vše se děje v době probíhajících klimatických změn, narušování ekosystémů a úbytku biodiversity (IPCC, 2023).

Zvyšující se spotřeba potravin bude vytvářet velký tlak na zdroje, zejména na půdu, vodu a živiny. Existuje tedy naléhavá potřeba hledat alternativní, udržitelné a spolehlivé metody jak tyto potraviny zabezpečit (Goddek a kol., 2019a).

Nejrychleji rostoucím odvětvím produkujícím potraviny živočišného původu je akvakultura. Tento růst má však i negativní důsledky: nepříznivé dopady na životní prostředí, sociální konflikty mezi uživateli půdy a vodních zdrojů, neudržitelná produkce rybí moučky (FM) a oleje (FO) pro krmné účely apod. (FAO, 2023a).

Udržitelnost by měla zohledňovat tři klíčové aspekty: ekologickou přijatelnost, sociální spravedlnost a ekonomickou životaschopnost (Robaina a kol., 2019).

Akvaponické systémy mají velký potenciál překonávat problémy spojené s udržitelností jako je omezená dostupnost vody, znečištění životního prostředí, rostoucí náklady na hnojiva či vyčerpání úrodné půdy (Yep a Zheng, 2019). Akvaponie může přispět k potravinové bezpečnosti nejen v aridních a semiaridních oblastech, ale i ve velkých městských aglomeracích (Goddard a Al-Abri, 2018; Specht a kol., 2019).

Velkou výzvou v akvaponii je vytvořit udržitelné krmivo, které by co nejvíce respektovalo nutriční požadavky ryb i rostlin, a současně nezatěžovalo životní prostředí nevyužitými živinami. Má-li být akvaponie udržitelná, je nutno zkoumat a vyvíjet krmiva využívající místo rybí moučky alternativní zdroje proteinů. Za tímto účelem budou navržena tři izoproteinová a izokalorická krmiva: krmivo A bude obsahovat konvenční suroviny včetně FM, krmivo B bude využívat rostlinné proteiny a FM bude nahrazena moučkou ze sladkovodních ryb, krmivo C bude složeno z udržitelných a lokálních zdrojů proteinů.

Cílem této práce je: (1) vyhodnotit produkční účinnost navržených krmiv (2) vyhodnotit obsah živin ve vodě, kalech a živných roztocích a jejich vliv na růst rostlin, (3) navrhnout možnosti úpravy složení krmiv.

2 Literární přehled

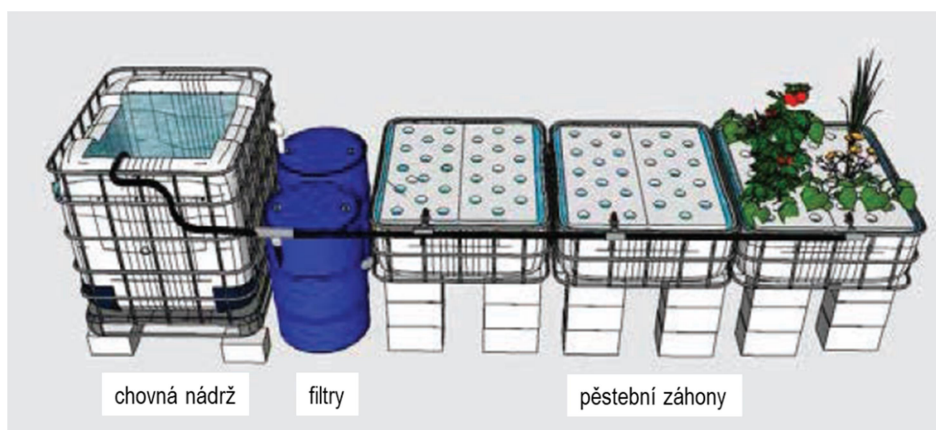
2.1 Akvaponie

2.1.1 Princip

Akvaponie propojuje dvě technologie: chov vodních živočichů v recirkulačních akvakulturních systémech (RAS) a bezpůdní pěstování rostlin v hydroponii. Součástí systému je biofiltr, v němž nitrifikační bakterie mění amoniak na dusičnany (Junge a kol., 2017). Většina živin potřebných pro růst rostlin pochází z odpadních látek, které se do systému dostávají krměním vodních živočichů (Palm a kol., 2018). Toto uspořádání umožňuje efektivnější využití živin a vody a minimalizuje vypouštění odpadních látek do okolního prostředí (Mráz a kol., 2018a). Produkční možnosti akvaponie jsou srovnatelné s individuálně provozovanými RAS a hydroponickými systémy. V některých případech (nedostatek vody a půdy) jsou i efektivnější (Somerville a kol., 2014).

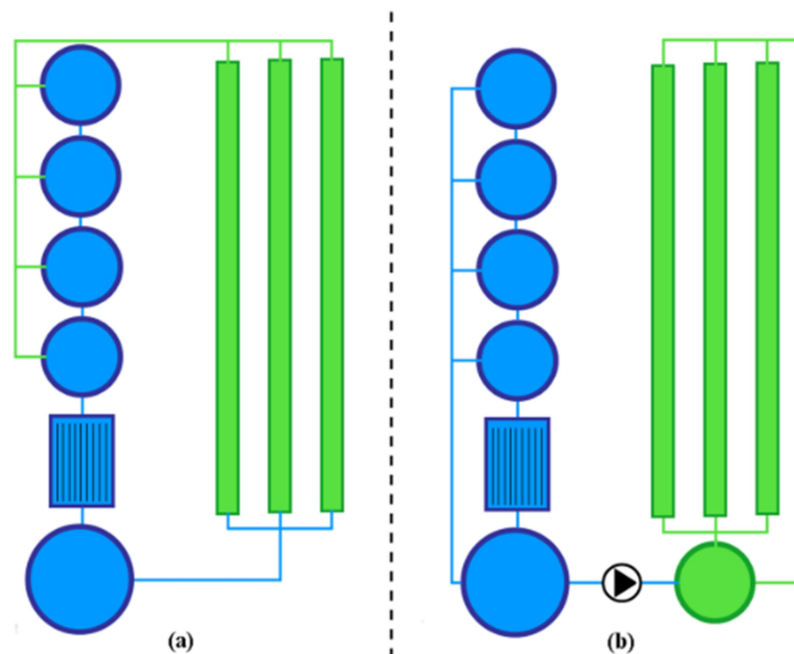
2.1.2 Systémy

V klasické akvaponii je produkce ryb a rostlin propojena v jediné recirkulační smyčce (Monsees a kol., 2017b). Podstatou úspěšné akvaponie je především udržení rovnováhy celého ekosystému. Musí tedy existovat rovnováha mezi množstvím ryb, množstvím rostlin a velikostí biofiltru, tzn. množstvím bakterií (Somerville a kol., 2014). Tato koncepce však s sebou přináší řadu nevýhod, především systémové kompromisy v optimálních produkčních parametrech (např. pH). Vzhledem k jednoduchosti a nižším investičním nákladům ale může nalézt svoje uplatnění zejména v domácí a komunitní produkci potravin (Palm a kol., 2019). Příklad jednoduchého jednosmyčkového systému je zobrazen na obr. 1.



Obr. 1: Jednoduchý jednosmyčkový akvaponický systém (Somerville a kol., 2014)

Tento design je v současnosti nahrazován modernějším pojetím, v němž jsou RAS a hydroponie provozovány nezávisle ve dvou smyčkách (Mráz a kol., 2018a). Obě technologie mají svoji samostatnou recirkulaci (viz obr. 2). To umožňuje lépe reagovat na specifické nároky ryb a rostlin na živiny i životní prostředí a lépe recyklovat živiny z kalu (Goddek a kol., 2019b). Monsees a kol. (2017b) porovnávali v pilotní studii produkci v jednosmyčkovém a dvousmyčkovém systému. Prokázali, že produkce tlamouna nilského (*Oreochormis niloticus*) byla v obou případech srovnatelná, ale výnos rajčat (*Solanum lycopersicum*) byl hydroponické části dvousmyčkového systému o 36 % vyšší než v jednosmyčkovém systému. Autoři to připisují zejména nezávislé regulaci pH a možnosti efektivněji doplňovat chybějící živiny v akvaponickém živném roztoku.



Obr. 2: Jednosmyčkový (a) a dvousmyčkový (b) akvaponický systém. Modrá část znázorňuje RAS a zelená akvaponickou část (NFT). V jednosmyčkovém systému voda neustále cirkuluje z RAS do hydroponické části a zpět. Ve dvousmyčkovém je voda z RAS prostřednictvím jednocestného ventilu dodávána do akvaponie, ale ne zpět (Monsees a kol., 2017b).

Jednoduché RAS se skládají z chovných nádrží, ze kterých voda proudí do mechanické filtrace, kde se odstraní pevné částice (kal). Dále prochází biofiltrem, kde je zbavována amoniaku a poté odtéká do retenční nádrže, odkud je čerpadlem dopravována zpět do chovných nádrží. Složitější systémy mohou mít zařazeny jednotky pro dezinfekci vody (UV, ozonizace), denitrifikaci (odstranění dusičnanů), flotaci (odstranění velmi jemných suspendovaných částic) a odplynění (odstranění N_2 a CO_2), (Mráz a kol., 2018b).

Mezi hlavní prvky hydroponického systému patří pěstební záhony a retenční nádrž, do které lze aplikovat chybějící živiny a přípravky na úpravu pH. V pěstebních záhonech mohou být různé druhy substrátu (perlit, vermikulit, keramzit, kokosová vlákna apod.), který je v pravidelných intervalech zaplavován (medium-based system). Další variantou je raftový systém (deep water culture, DWC), v němž jsou rostliny ukotveny v panelech (např. z polystyrenu) plovoucích na hladině 20-30 cm hlubokých nádrží. Dalším akvaponickým kultivačním systémem jsou koryta nebo trubky, kde je výška hladiny pouze 1-2 cm (nutrient film technique, NFT) (Maucieri a kol., 2019). Pro produkci plodové zeleniny se nejčastěji využívají kapénkové systémy (drip systems). Rostliny jsou zakořeněné v plastových rukávcích se skelnou vatou nebo kokosovým vláknem a vyživované pomocí tenkých hadiček (Mráz a kol., 2018b).

2.1.3 Trendy, výzvy a perspektivy

Obliba akvaponie vzrůstá. V komerční sféře jsou stále populárnější dvousmyčkové systémy. V hydroponické části se nejčastěji využívá substrát nebo DWC. Nejoblíbenějšími rybami jsou *O. niloticus*, kapr obecný (*Cyprinus carpio*) a keříčkovec červenolemý (*Clarias gariepinus*), z rostlin je to pak především listová zelenina a bylinky (Yep a Zheng, 2019).

Velkou výzvou v akvaponii je zajištění vyvážené výživy pro rostliny (Yep a Zheng, 2019). V této souvislosti je nutno zkoumat složení krmiv pro ryby a složení a rozpustnost kalů, které z nich vznikají (Shaw a kol., 2022b; Gebauer a kol., 2023). Dalším důležitým aspektem, který potřebuje budoucí výzkum, je úloha mikroorganismů podporujících příjem živin rostlinami. Také nebylo dosud zkoumáno využití polokulturních obsádek, který by mohly produkovat vyváženější spektrum živin (Yep a Zheng, 2019).

Nejvíce matoucí oblastí, se kterou se provozovatelé akvaponických systémů potýkají, jsou regulační úpravy a legislativa (Goddek a kol., 2019a). Jsou nedostatečné, často si odporují a nejsou harmonizované. Např. v USA a Austrálii mohou být akvaponické produkty certifikovány jako organické, v EU to však možné není.

Akvaponii lze využít i v místech, kde by jinak produkce potravin nebyla možná (Goddek a kol., 2019a). Je to jeden z možných přístupů, který nabízí řešení problémů souvisejících se změnou klimatu, ztrátou úrodnosti půdy a biodiverzity či nedostatkem zdrojů a vody. Akvaponie má tedy velký potenciál hrát v budoucnu ve výrobě potravin významnou roli (Junge, a kol. 2017).

2.2 Výživa ryb

Výživu lze chápat jako oblast fyziologie zaměřenou na definování vztahů mezi příjmem potravy a výsledným růstem (Moraes a de Almeida, 2020). Pro tvorbu optimálních krmiv, odpovídajících požadavkům jednotlivých druhů ryb, je tedy nutné především pochopení jejich trávicích procesů. Tyto procesy závisí na vývojových stádiích ryb a liší se s ohledem na podmínky prostředí. Další pozornost je nutno věnovat zejména osudu krmiva v trávicím traktu, interakcím mezi jednotlivými složkami krmiv a obranným mechanismům ve střevě (NRC, 2011).

2.2.1 Anatomie gastrointestinálního traktu

Odlišnosti v anatomii a morfologii gastrointestinálního traktu (GIT) jednotlivých druhů ryb jsou větší než u jakéhokoliv jiného živočišného kmene (NRC, 2011). Trakt lze obecně rozdělit do tří hlavních částí. První část (foregut) se skládá z úst, hltanu, jícnu a žaludku. Druhá část (midgut) je tvořena středním střevem s pylorickými přívěsky a třetí část (hindgut) distálním střevem ústícím do řitního otvoru. Moraes a de Almeida (2020) řadí do střední části GIT ještě související orgány (játra, slinivku a žlučník). Většina ryb se líhne s přímým jednoduchým trávicím traktem bez žaludku a do komplikovanějších struktur se vyvíjí až během larválního a juvenilního stadia. Konkrétní podoba GIT u jednotlivých druhů ryb se vyvinula evolucí a byla ovlivněna zejména druhem přijímané potravy (NRC, 2011).

Small (2022) a NRC (2011) rozlišují čtyři typy GIT (viz obr. 3).

Karnivorní ryby mají často velká koncová ústa s dobře vyvinutými zuby. Jejich GIT se vyznačuje velkým žaludkem umožňujícím chemické i mechanické zpracování potravy a krátkým střevem s pylorickými přívěsky. Typickými představiteli jsou např. lososovité ryby.

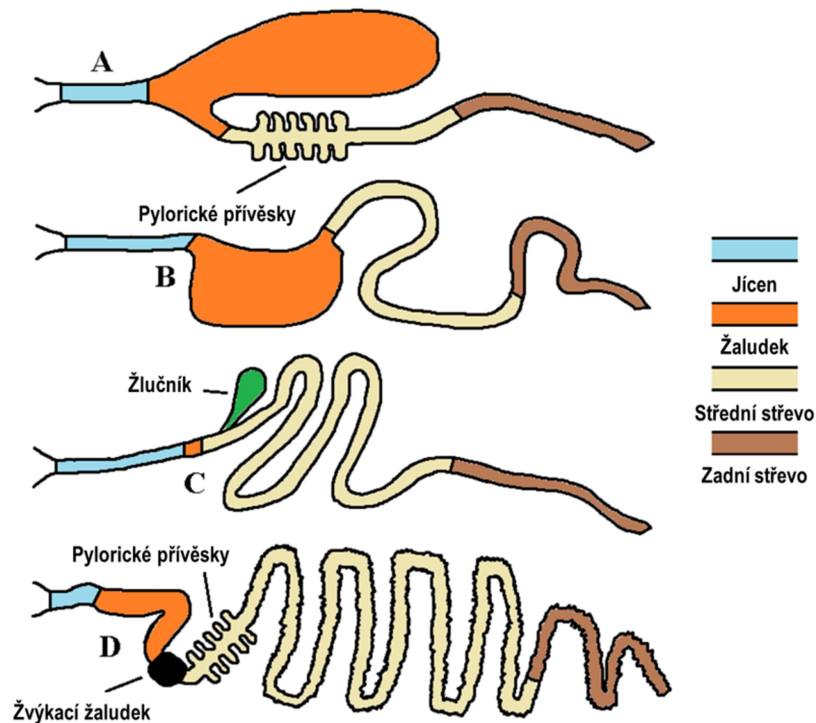
Detrivorní ryby mají spodní ústa a jednodílný nebo dvoudílný žaludek. Druhy s jednodílným žaludkem mají dlouhé střevo. Jednodílný žaludek neumožňuje mechanické rozměňování potravy, ale poskytuje kyselé prostředí pro trávení. Dvoudílný žaludek má navíc část, v níž k mechanickému zpracování potravy dochází.

GIT omnivorních druhů ryb představuje přechod mezi striktními karnivory a herbivory. Druhy preferující živočišné zdroje živin mají vakovitý žaludek a kratší střevo (např. *C. gariiepinus*). Druhy, jejichž potravu tvoří převážně rostlinná hmota, mohou rozměňovat potravu požerákovými zuby (*dentes pharyngei*) a mají delší střevo. Žaludek je nahrazen žaludeční rozšířeninou (*bulbus intestinalis*), která ovšem slouží

pouze k dočasnému uložení potravy a neposkytuje žádnou trávicí funkci (Small, 2022). Takto utvářenou trávicí soustavu má např. *C. carpio*.

Trávicí soustava herbivorních ryb postrádá žaludek a je typická dlouhým střevem, které poskytuje větší plochu pro trávení a absorpci obtížně stravitelných rostlinných buněk. Trávení u ryb bez žaludku probíhá v neutrálním nebo zásaditém prostředí (Dvořák a kol., 2020). Představitelem herbivorních ryb je např. amur bílý (*Ctenopharyngodon idella*).

Nejběžnějším způsobem získávání potravy planktivorních ryb je mechanická filtrace přes žaberní filtrační aparát. V morfologii trávicího traktu konzumentů fytoplanktonu a zooplanktonu jsou patrné zjevné rozdíly. Např. menhaden atlantský (*Brevoortia tyrannus*) živící se fytoplanktonem má desetkrát delší střevo a 400 pylorických přívěsků ve srovnání se sleděm obecným (*Clupea harengus*), jehož potravou je zooplankton, a který má jen deset pylorických přívěsků (Small, 2022). Mezi planktivorní ryby patří dále např. tolstolobec pestrý (*Hypophthalmichthys nobilis*) či tolstolobik bílý (*Hypophthalmichthys molitrix*). GIT planktivorních ryb obsahuje žvýkací žaludek (gizzard), který má podobnou funkci jako u ptáků: mlít a drtit potravu (Wilson a Castro, 2011).



Obr. 3: Trávicí soustava ryb s různou preferencí potravy: A – karnivorní ryby, B – detritivorní a omnivorní ryby preferující živočišné živiny, C – herbivorní a omnivorní ryby preferující rostlinné živiny, D – planktivorní ryby (Eliasson, 2015)

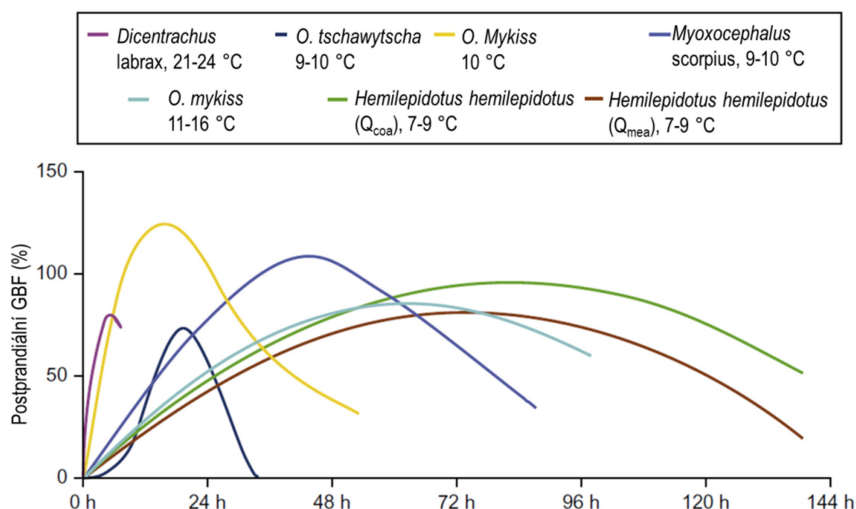
2.2.2 Fyziologie trávení ryb

Trávení je proces solubilizace a degradace látek na menší složky, které mohou být transportovány přes střevní stěnu (NRC, 2011). Trávení a vstřebávání živin se u jednotlivých druhů ryb liší v důsledku rozdílů v morfologii trávicího traktu, enzymatické aktivitě, pH střev apod. a dále závisí na vnějších faktorech, zejména teplotě (Lall a Dumas, 2015).

V rybích ústech se nenacházejí žádné slinné žlázy (Moraes a de Almeida, 2020). Chemické trávení u ryb, které mají žaludek, začíná až v tomto orgánu, a to produkcí žaludečních šťáv. Hlavními složkami jsou pepsinogen a kyselina chlorovodíková (HCL) (NRC, 2011). Pepsinogen je proenzym, který je sám neaktivní a vlivem kyselého prostředí v žaludku se ihned mění na pepsin. HCL snižuje pH až na hodnoty 2,0-3,0 v důsledku čehož dochází k denaturaci bílkovin a zahájení hydrolýzy. Tok kyselého tráveniny do střeva stimuluje produkci sekretinu, který spouští produkci žluče a hydrogenuhličitanů, čímž dochází k úpravě pH ve střevě na hodnoty okolo 7,0. Trávení potravy a její následné vstřebávání je závislé na přítomnosti a dostupnosti vhodných enzymů na správných místech GIT (Moraes a de Almeida, 2020).

Zásadní význam pro trávení, vstřebávání a distribuci živin má také průtok krve trávicí soustavou (gastrointestinal blood flow, GBF). Regulace postprandiální GBF (po krmení) je důležitá ze dvou důvodů. Za prvé musí zajistit odpovídající zásobení GIT tkáně kyslíkem a živinami, a současně odvádět CO₂ a odpadní látky. Za druhé GBF zajišťuje transport živin z potravy do jater a dalších částí těla (Seth a kol., 2011). Po příjmu potravy se GBF zvyšuje (viz obr. 4). Načasování a trvání postprandiální reakce se u jednotlivých druhů ryb liší zejména s ohledem na teplotu vody, množství a strukturu potravy.

Pro využití živin je důležitým faktorem trávicí tranzitní čas, který závisí především na motilitě střev, druhu potravy a podílu jednotlivých živin v ní. U ryb, které mají žaludek, je doba průchodu tráveniny GI traktem ovlivněna i vyprazdňováním žaludku (Moraes a de Almeida, 2020). Zvýšený tok stravitelných proteinů, lipidů a sacharidů do distální části střeva inhibuje motilitu střev. Rozpustné nestravitelné uhlohydráty (např. algináty, guarová guma) a plnidla (např. zeolit) snižují rychlost pohybu tráveniny. Nerozpustná vláknina (např. celulóza) naopak rychlost zvyšuje (NRC, 2011). Vyprazdňování žaludku může být ovlivněno množstvím a formou škrobu. Více škrobu vyprazdňování zpomaluje. Tentýž efekt mají extrudovaná krmiva ve srovnání s granulovanými, což souvisí se stupněm želatizace škrobu (Kaushik a kol., 2022).



Obr. 4: Postprandiální změna GBF u ryb (Seth a kol., 2011)
(Q_{coa} – průtok krve tepnou *arteria celiaca*, Q_{mea} – průtok krve tepnou *arteria mesenterica*)

Výše uvedené poznatky lze využít při vývoji a výrobě krmiv s cílem optimalizovat trávicí tranzitní čas, a tím i využití živin. Dále je nutno zohlednit skutečnost, že se gastrointestinální trakt, fyziologie trávení a trávicí kapacita během ontogeneze mění (Kolkovski a kol., 2009). Zejména výživa larválních stádií je tak velká výzva, neboť krmivo musí být kompatibilní s aktuální trávicí kapacitou (NRC, 2011).

Na trávení, absorpci a metabolismus u ryb má velký vliv také střevní mikrobiom (Small, 2022). Přes 90 % mikrobiomu tvoří bakterie. Produkují trávicí enzymy, které jsou využitelné i hostitelem. Fermentují nestravitelné sacharidy za vzniku mastných kyselin s krátkým řetězcem (short chain fatty acids, SCFA), které mimo jiné slouží jako zdroj energie, ovlivňují metabolismus glukózy a lipidů či zlepšují obranyschopnost organismu. Bakterie dále syntetizují vitaminy (např. ze skupiny B) a samy se stávají hodnotným zdrojem bakteriálního proteinu.

Mikrobiální diverzita souvisí s úrovní býložravosti (Li a kol., 2018). U býložravých ryb je obvykle vyšší. Vyšší koncentrace se nachází v distálních částech střeva. Jejich celkové množství je však nižší než u homoiotermních živočichů (NRC, 2011). Složení je také rozdílné u sladkovodních a mořských ryb (Talwar a kol., 2018). Střevní mikrobiom je dynamický a lze ovlivňovat výživou (Refstie a Åsgård, 2009). K pozitivnímu ovlivnění mikrobiomu je možno použít zejména probiotika a prebiotika (Turchini a kol., 2022). Prebiotika (např. fruktooligosacharidy) jsou látky pro hostitele nestravitelné, které však stimulují bakterie. Probiotická suplementace zahrnuje přímé podání živých mikroorganismů (např. *Bacillus*, *Lactobacillus* či *Saccharomyces*). Častá je také synbiotická suplementace, tedy kombinace těchto dvou produktů.

2.2.3 Živiny, jejich metabolismus a vylučování

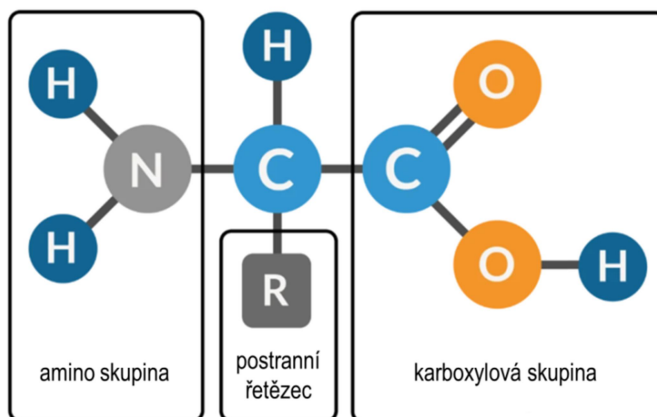
Živiny jsou složky krmiv, které jsou důležité pro metabolismus, optimální růst, reprodukci a zdravotní stav. Uvolňují se trávením zkonsumovaného krmiva a vstřebáváním v trávicím traktu. Mohou být také produktem metabolismu daného živočicha (Lall a Dumas, 2015). Moraes a de Almeida (2020) je dělí do dvou skupin: makroživiny (proteiny, lipidy, sacharidy) a mikroživiny (vitaminy, minerály).

2.2.3.1 Proteiny

Proteiny jsou složité organické sloučeniny dusíku nepostradatelné pro život (Molina-Poveda, 2016). Tvoří 65-75 % sušiny rybího těla (Mai a kol., 2022b). Mají četné strukturální a metabolické funkce (NRC, 2011). Jsou součástí svalů, kostí i orgánů. Vyskytují se v hormonech a metabolických meziproduktech (např. acetát a pyruvát). Mnoho proteinů jsou enzymy. Některé proteiny plní důležitou funkci v buněčné signalizaci, imunitních reakcích či v buněčném cyklu. Podle Kodíčka a kol. (2018) mají zásadní vliv na vytváření a udržování osmotického tlaku a udržování stálého pH v cytosolu a tělních tekutinách.

Proteiny se skládají z aminokyselin (AMK) spojených peptidovými vazbami. I když existuje asi 300 AMK, pouze 20 jich tvoří většinu proteinů (viz tab. 1). Kodíček a kol. (2018) je označují jako proteinogenní. AMK, které živočichové nejsou schopni sami syntetizovat, se nazývají esenciální (Moraes a de Almeida, 2020).

Aminokyseliny jsou substituční deriváty karboxylových kyselin, které mají v uhlíkovém řetězci jednu nebo více aminoskupin (Kodíček a kol., 2018). Všechny proteinogenní AMK obsahují stejnou sekvenci, ve které je na centrální atom C navázána aminoskupina NH_2 , karboxylová skupina COOH a postranní řetězec R, který jednotlivé AMK odlišuje (viz obr. 5).



Obr. 5: Struktura aminokyselin (Bell-Young, 2021)

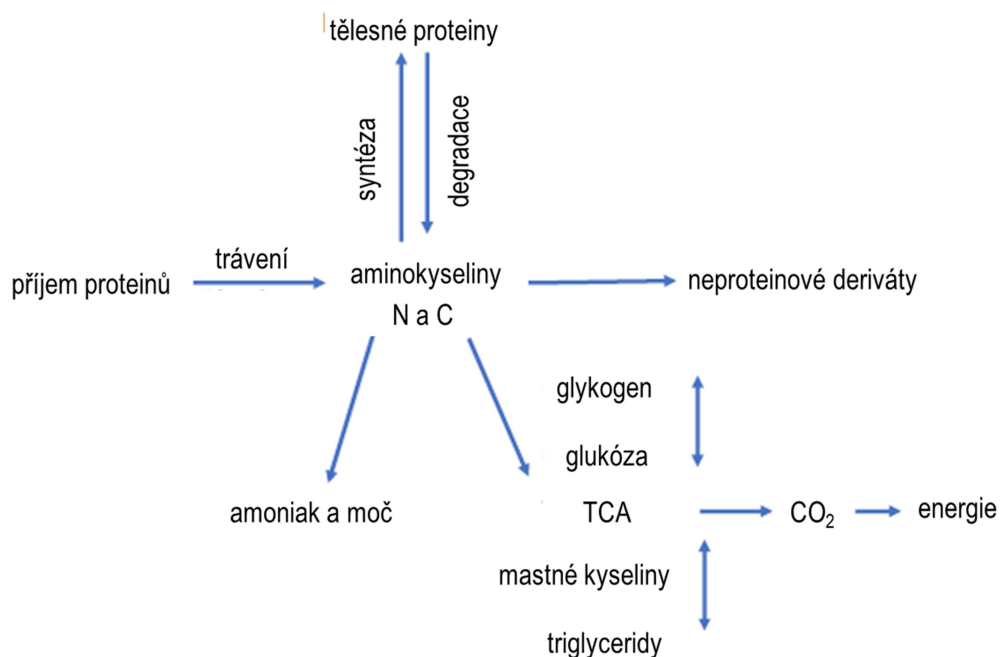
Pro strukturu a fungování proteinů má charakter postranních řetězců zásadní význam. Podle jejich vlastností můžeme AMK rozdělit do čtyř skupin: nepolární (I), polární nenabitě (II), polární kyselé (III) a polární bazické (IV).

Tab. 1: Proteinogenní aminokyseliny (upraveno dle Kodíček a kol., 2018; Mai a kol., 2022b)

Esencialita	Aminokyselina	Skupina	Zkratka	Kód	Obsah dusíku (%)	Ideální aminokyselinový profil ^a
esenciální	arginin	IV	ARG	R	32,16	84,6±2,50
	histidin	IV	HIS	H	27,08	26,8±7,24
	isoleucin	I	ILE	I	10,68	53,4±6,19
	leucin	I	LEU	L	10,68	92,1±11,20
	lysin	IV	LYS	K	19,16	100
	methionin	I	MET	M	9,39	39,4±7,72
	fenylalanin	I	PHE	F	8,48	53,1±1,68
	threonin	II	THR	T	11,76	60,6±7,33
	tryptofan	I	TRP	W	13,72	11,6±1,46
	valin	I	VAL	V	11,96	63,5±2,11
neesenciální	alanin	I	ALA	A	15,72	-
	asparagin	II	ASN	N	21,2	-
	aspartát	III	ASP	D	10,52	-
	cystein	II	CYS	C	11,56	12,8±3,62
	glutamát	III	GLU	E	9,52	-
	glutamin	II	GLN	Q	19,17	-
	glycin	II	GLY	G	18,66	-
	prolin	I	PRO	P	12,16	-
	serin	II	SER	S	13,33	-
	tyrosin	II	TYR	Y	7,73	38,6±5,86

^a blíže viz kap. 2.2.4.1

Metabolismus proteinů a AMK je znázorněn na obr. 6. Po příjmu krmiva jsou proteiny tráveny a hydrolyzovány na AMK a peptidy různých velikostí (Mai a kol., 2022b). Ty jsou absorbovány a transportovány do cílových tkání, kde jsou využity pro somatický růst nebo metabolickou funkci. AMK jsou primárně zabudovány do proteinu, nebo degradovány, aby poskytly energii. Degradace zahrnuje vyloučení dusíku ve formě amoniaku a moči a katabolismus uhlíkového skeletu, zejména prostřednictvím trikarboxylové kyseliny (TCA). U rostoucích živočichů syntéza převyšuje degradaci. Pokud jsou tyto procesy v rovnováze, dochází k ukládání či akreci. Degradace proteinů je hlavním prostředkem pro udržování homeostázy během hladovění. Proces trávení a absorpce proteinů je ovlivněn řadou faktorů, např. druhem a vývojovým stadiem ryb, zdrojem a složením proteinů či zpracováním krmiva.



Obr. 6: Metabolismus proteinů a aminokyselin (Mai a kol., 2022b)

Štěpení proteinů je prováděno proteolytickými enzymy se specifickými účinky na polypeptidový řetězec (Moraes a de Almeida, 2020). Za počáteční částečnou hydrolyzu proteinů v žaludku zodpovídá v kombinaci s HCL již zmíněný pepsin. Hydrolyza dále pokračuje působením alkalických proteáz trypsinu a chemotrypsinu, což jsou hlavní trávicí enzymy vylučované v přední části střeva. Do procesu se zapojují také např. pankreatické enzymy kolagenáza a elastáza. Všechny tyto proteázy se doplňují, každá působí na jiné peptidové vazby. Na aktivitu proteáz a tím i na stravitelnost proteinů má velký vliv teplota a dále např. salinita či obsah kyslíku (Mai a kol., 2022b).

Stravitelnost je termín používaný pro hodnocení využití krmiva nebo živiny. Hodnoty stravitelnosti jsou nepostradatelné, základní parametry pro formulaci krmiva. Protože je sběr exkrementů ve vodě obtížný, používá se pro stanovení stravitelnosti nepřímá *in vivo* metoda založená na přítomnosti nestravitelného a netoxického indikátoru v testovaném krmivu. Nejčastěji se jedná o oxid chromitý nebo oxid yttria. Koeficient zdánlivé stravitelnosti živiny nebo energie (apparent digestibility coefficient, ADC) se spočítá dle rovnice (Bai a kol., 2022):

$$ADC(\%) = \left(1 - \frac{\text{obsah indikátoru v krmivu}}{\text{obsah indikátoru ve výkalech}} \times \frac{\text{obsah živiny ve výkalech}}{\text{obsah živiny v krmivu}} \right) \times 100$$

Tato metoda však nebere v úvahu endogenní exkreci (slizniční buňky, enzymy, mikrobiom apod.). Pro eliminaci tohoto vlivu musí být zařazeno srovnání s kontrolním

krmivem. Při stanovení stravitelnosti jednotlivých surovin se porovnává referenční krmivo s krmivem, které se skládá z referenčního krmiva (70 %) a z testované suroviny (30 %). Stanovuje se podle rovnice (Bai a kol., 2022):

$$ADC \text{ suroviny} = ADC \text{ krmiva} \left((ADC \text{ krmiva} - ADC \text{ ref. krmiva}) \times \left(\frac{0,7xDR}{0,3xDI} \right) \right)$$

Kde: DR je % nebo $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ referenčního krmiva, DI je % nebo $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ testované suroviny.

Hlavními konečnými produkty katabolismu AMK jsou amoniak, oxid uhličitý a hydrogenuhličitan (NRC, 2011). Protože je amoniak vysoce toxický, přeměňují ho vyšší obratlovci na močovinu, kterou vylučují močí. Ryby však mají velmi efektivní způsob vylučování amoniaku prostřednictvím žaber, takže nemusejí vynakládat tolik energie na přeměnu amoniaku na močovinu. Většina ryb vylučuje přes 80 % dusíku ve formě amoniaku a to v 75-90 % žábami. Čistá retence dusíku z krmiva je u ryb 30-40 %, dochází zde tedy k velkým ztrátám (Lall a Dumas, 2015).

Produkty vzniklé štěpením proteinů jsou transportovány pomocí aminokyselinových transportérů přes střevní epitel do cílových tkání a orgánů.

Hlavní anaboličnou funkcí AMK je syntéza tkáňových proteinů, peptidů a dalších látek obsahujících dusík. Polypeptidové řetězce jsou syntetizovány na základě genetického kódu, jehož základními jednotkami jsou kodony složené ze tří nukleotidů (Snustad a Simmons, 2017). Úspěšnost syntézy konkrétního proteinu závisí na dostupnosti potřebných aminokyselin (Molina-Poveda, 2016).

2.2.3.2 Lipidy

Lipidy jsou velice heterogenní skupinou organických sloučenin, které jsou obtížně rozpustné ve vodě, ale velmi dobře rozpustné v organických rozpouštědlech (Kodíček a kol., 2018). Jsou koncentrovaným zdrojem energie a ve srovnání se sacharidy poskytují asi 2,25 krát více energie (viz tab. 2).

Tab. 2: Energetické hodnoty makroživin (upraveno dle Molina-Poveda, 2016)

Makroživina	kcal·g ⁻¹	kJ·g ⁻¹
lipidy	9,4	39,5
proteiny	5,65	23,7
sacharidy	4,15	17,2

Energie není živina a je získávána během metabolické oxidace organických živin absorbovaných z potravy nebo z energetických rezerv v těle ryby (Mareš a kol., 2015).

Metabolizovatelnost lze tedy chápat jako schopnost živiny poskytnout energii. Pro hodnocení obsahu energie v krmivech se používá brutto energie (BE), která se stanovuje kalorimetricky. Dále je to stravitelná energie (DE), což je BE snižená o energii výkalů. Metabolizovatelná energie (ME) je DE ponížena o energii žaberních a močových ztrát, v praxi se ovšem příliš nevyužívá, protože je u ryb obtížně stanovitelná. Nejčastěji se využívá DE a pro některé ryby jsou pro odhad této energie stanoveny příslušné koeficienty. Např. pro *O. mykiss* je to:

$$DE = 0,0168 \times NL + 0,0335 \times \text{lipidy} + 0,0084 \times BNLV$$

Kde: NL jsou dusíkaté látky, BNLV jsou bezdusíkaté látky výtažkové.

Turchini a kol. (2022) uvádějí jako jednu z možných klasifikací lipidů, jejich rozdělení na neutrální a polární. Neutrální zahrnují monoacylglyceroly, diacylglyceroly, triacylglyceroly, volné mastné kyseliny, vosky a steroly. Nejběžnější lipidem v rybím těle je triacylglycerol (TAG). Mezi polární lipidy patří fosfolipidy, sfingolipidy a glycerofosfolipidy. Podle NRC (2011) hrají neutrální lipidy převážně roli v transportu a skladování energie a polární plní zejména roli strukturní.

Většina lipidů jsou komplexní sloučeniny, které obsahují mastné kyseliny (NRC, 2011). Turchini a kol. (2022) je dělí do tří tříd:

- nasycené mastné kyseliny (saturated fatty acids, SFA),
- mononenasycené mastné kyseliny (monounsaturated fatty acids, MUFA),
- polynenasycené mastné kyseliny (polyunsaturated fatty acids, PUFA).

PUFA lze pak dále dělit např. podle polohy první dvojné vazby od methylového konce na omega-3 (n-3 PUFA) a omega-6 (n-6 PUFA) mastné kyseliny.

Molina-Poveda (2016) a NRC (2011) se shodují, že trávení lipidů se uskutečňuje především v proximální části střeva a pylorických přívěscích, pokud jsou přítomny. Hlavním zdrojem enzymů (lipáz a fosfolipáz) je pankreas nebo hepatopankreas. Mezi hlavní produkty štěpení patří volné mastné kyseliny, acylglyceroly či lysofosfolipidy (NRC, 2011). Hydrolyzované produkty jsou dále solubilizovány nebo emulgovány v micelách žlučových solí. Poté difundují střevní sliznicí a jsou absorbovány enterocyty. TAG může být zcela rozložen na mastné kyseliny a glycerol, který není vázán na micely a difunduje přímo. Volné mastné kyseliny mohou být transportovány v krvi navázané na plazmatický albumin (Molina-Poveda, 2016). Většina lipidů je však transportována krví ve formě lipoproteinů.

Přebytek lipidů v potravě se ukládá v tukových buňkách. Důležitým místem pro ukládání lipidů u ryb jsou játra a svalovina (Turchini a kol., 2022). Tento proces závisí na druhu ryby, věku, sezónnosti a hojnosti potravy. Tuky v tukové tkáni se stávají zdrojem energie v případě, že byly vyčerpány jiné zdroje z potravy nebo glykogenu (Molina-Poveda, 2016). Tuková tkáň je také schopna syntetizovat lipidy ze sacharidů a oxidovat mastné kyseliny. Lipidy jsou zde trvale v dynamickém stavu, neboť jsou průběžně syntetizovány a degradovány. Tak jako ostatní obratlovci, nedokáží ani ryby syntetizovat omega-3 a omega-6 PUFA a musejí je přijímat v potravě (NRC, 2011). Lipidy obecně jsou velmi dobře tráveny a přecházejí do tkání, takže se jich prostřednictvím exkrementů vylučuje jen malé množství (Molina-Poveda, 2016).

2.2.3.3 Sacharidy

Sacharidy jsou polyhydroxylované aldehydy nebo ketony, jejichž molekuly se skládají z atomů uhlíku, kyslíku a vodíku, přičemž poslední dva prvky jsou přítomny ve stejném poměru jako ve vodě (Molina-Poveda, 2016). Mohou se také vyskytovat v kombinaci s nesacharidovými molekulami a tvořit např. glykolipidy a glykoproteiny (Kaushik a kol., 2022).

Podle NRC (2011) lze sacharidy klasifikovat podle stupně polymerace jako: cukry (monosacharidy a disacharidy obsahující jednu nebo dvě molekuly), oligosacharidy (3-9 monosacharidů) a polysacharidy (10 a více monosacharidů).

Polysacharidy dělíme do dvou skupin: homopolysacharidy (jsou tvořeny jedním typem monosacharidů) a heteropolysacharidy (skládají se z více typů monosacharidů). Polysacharidy jsou převládajícím typem sacharidů v přírodě. Plní dvě základní funkce: energetickou (např. škrob, glykogen) a strukturní (např. celulóza, chitin).

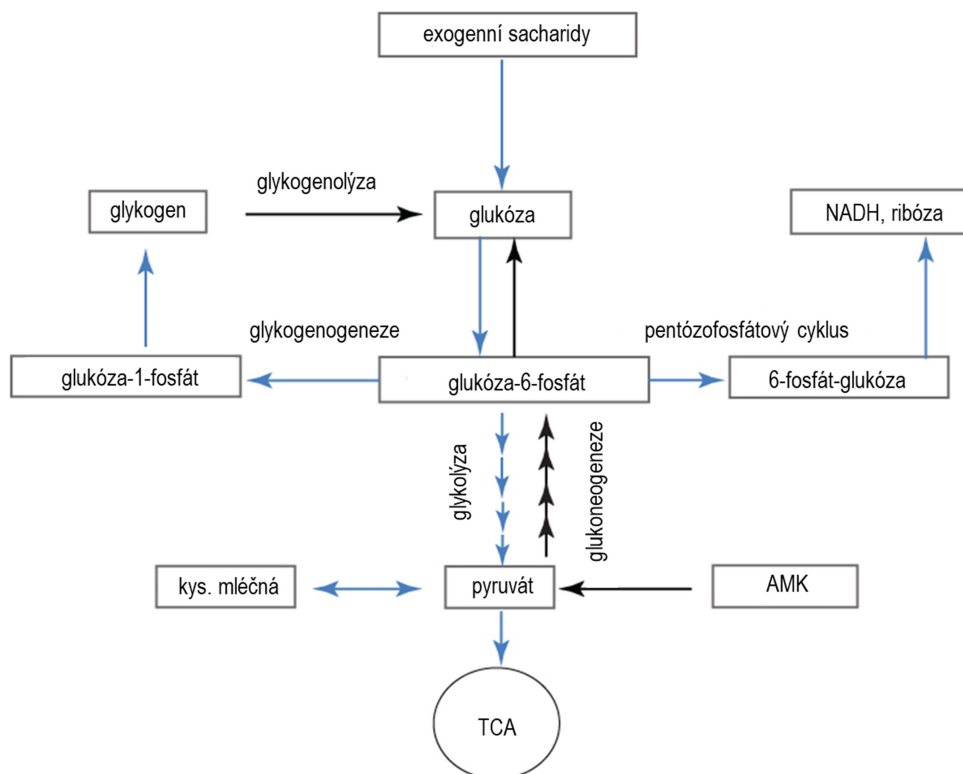
Škrob využívají rostliny jako hlavní zásobní zdroj energie. Glykogen má pro živočichy podobný význam jako škrob pro rostliny (Molina-Poveda, 2016). Funguje jako snadno dostupný zdroj energie. Je uložený v játrech (1-12 % hmotnosti jater) a ve svalech (< 1 %). Není dlouhodobě skladovatelný. Celulóza je lineární řetězec molekul glukózy. Podle NRC (2011) patří s β -glukany, pektiny a gumami mezi neškrobové polysacharidy (nonstarch polysaccharides, NSP). Chitin je heteropolysacharid, který je považován za druhou nejrozšířenější sloučeninu po celulóze (Kaushik a kol., 2022). Vyskytuje se v exoskeletu hmyzu a vodních bezobratlých živočichů.

Trávení sacharidů umožňují především dva typy enzymů: pankreatické amylázy a disacharidázy (např. maltáza a sacharáza) nacházející se ve střevním epitelu (Kaushik

a kol., 2022). Amyláza se vyskytuje u všech ryb, včetně hlubinných karnivorních ryb, v jejichž přirozené potravě se škrob nikdy nevyskytuje (Moraes a de Almeida, 2020). Chitin je hydrolyzován žaludeční chitinázou, příp. chitobiázou v pylorických přívěscích (Kaushik a kol., 2022). Celulózu nelze hydrolyzovat žádným živočišným enzymem (Molina-Poveda, 2016).

Během hydrolyzy jsou sacharidy štěpeny na monosacharidy, jež jsou následně absorbovány enterocyty (Kaushik a kol., 2022). Hlavním produktem trávení sacharidů je glukóza. Metabolismus glukózy je zřejmý z obr. 7. Nadbytek glukózy se ukládá ve formě glykogenu během glykogeneze, transformuje se na lipidy nebo je vylučován močí a žábry. U ryb krmených krmivem obsahujícím škrob je vylučování glukózy nízké a zvyšuje se s molekulární složitostí zkrmovaných sacharidů (NRC, 2011).

Přeměna sacharidů na energii probíhá prostřednictvím glykolýzy, při které se jeden mol glukózy přemění na dva moly pyruvátu. Homeostáza glukózy je řízena hormonálně působením epinefrinu, který ovlivňuje poměr glukagon : inzulin. Glukagon je hormon produkováný pankreatem při hladovění, který stimuluje rozklad glykogenu na glukózu. Dále stimuluje též syntézu glukózy v játrech a v menší míře i v ledvinách. Naopak inzulin, produkováný pankreatickými B buňkami během krmení, stimuluje ukládání glukózy do glykogenu (Molina-Poveda, 2016).



Obr. 7: Metabolismus glukózy (Hemre a Deng, 2015).

2.2.3.4 Mikroživiny

Vitaminy lze definovat jako organické sloučeniny, které jsou v malém množství potřebné pro růst, reprodukci, zdraví a život ryb. Tvoří 5-8 % nákladů na krmivo, ale zodpovídají za 100 % buněčného metabolismu ostatních živin (Molina-Poveda, 2016). Podle jejich rozpustnosti se dělí do dvou hlavních skupin: vitaminy ve vodě rozpustné (B komplex, cholin a vitamin C) a v tucích rozpustné (vitamin A, D, E a K).

Vitaminy rozpustné ve vodě se po vstřebání neukládají v organismu ve významném množství a jsou vylučovány močí. Oproti tomu vitaminy rozpustné v tucích se ukládají v těle a mají nízkou rychlost vylučování (Mai a kol., 2022a). Při nadměrném příjmu mohou vykazovat i toxicitu (Molina-Poveda, 2016).

Minerály jsou přirozeně se vyskytující anorganické prvky, které se dělí do dvou skupin: makroprvky (Ca, P, Mg, Na, K, Cl) a mikroprvky (např. Fe, Cu, Mn, Zn, Se, I, Co, Mo), (Lall, 2022). Tvoří 3-5 % tělní hmoty (Mareš a kol., 2015).

Ovlivňují buněčný metabolismus (např. transport kyslíku, dýchání, aktivitu enzymů), tvorbu kosterní soustavy, koloidní systémy (např. osmotický tlak, viskozitu, difúzi), acidobazickou rovnováhu apod. (Lall a Dumas, 2015).

Minerály mohou být přijímány nejen v potravě, ale také absorbovány z vody žábrami a kůží (Somerville a kol., 2014). V organismu jsou ukládány do zásoby a v době potřeby jsou uvolňovány a transportovány na místo potřeby (Mareš a kol., 2015). Přebytečné minerály jsou vylučovány ve formě solí primárně specializovanými chloridovými buňkami v žábrách a kůží prostřednictvím aktivního transportu. Další soli odcházejí exkrementy. Menší množství dvojmocných iontů vylučují ledviny močí. (NRC, 2011).

2.2.4 Nutriční požadavky ryb

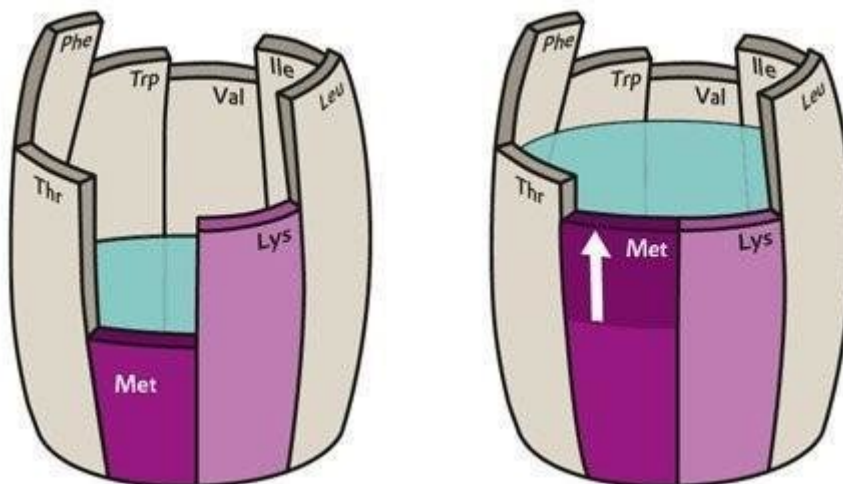
2.2.4.1 Proteiny

Nutriční požadavky ryb na proteiny se liší zejména s ohledem na to, zda se jedná o ryby teplomilné nebo chladnomilné, mořské či sladkovodní a karnivorní nebo omnivorní. Dále jsou ovlivněny věkem, fyziologickou kondicí a zdrojem proteinů (Molina-Poveda, 2016).

Použití pojmu „nutriční požadavky na proteiny“ je poněkud zavádějící, protože se jedná ve skutečnosti o požadavky především na aminokyseliny (Li a Robinson, 2015).

Ideální protein je takový, který poskytuje přesnou rovnováhu AMK potřebných pro maximální růst (Mai a kol., 2022b). Koncept ideálního proteinu vychází z Liebigova

zákona minima, podle něhož je růst limitován živinou, která je v minimu a ostatní živiny nemohou být využity, přestože jich je dostatek (viz obr. 8). Limitujícím faktorem bývá nejčastěji lysin nebo methionin, ale mohou to být i další AMK v závislosti na surovině a druhu ryby.



Obr. 8: Liebigův zákon (Einarsson a kol., 2019)

Ideální protein se stanoví poměrem esenciálních AMK vůči lysinu na základě analýzy celého těla daného druhu (NRC, 2011). Možnou nevýhodou spoléhání se na celotělový AMK profil je, že nezohledňuje rozsáhlý katabolismus AMK v trávicím traktu (Mai a kol., 2022b). Ideální AMK profil splňující nutriční požadavky ryb je uveden v tab. 1 (kap. 2.2.3).

Kvalitu proteinů lze odhadnout pomocí chemického skóre (chemical score, CS) a indexu esenciálních AMK (indispensable amino acid index, IAAI). Výpočet lze provést pomocí následujících rovnic (Bai a kol., 2022):

$$CS = \frac{\% \text{ první limitující AMK v testovaném proteinu}}{\% \text{ AMK ve vaječném proteinu}} \times 100$$

$$IAAI = \frac{ARG (TP)}{ARG (VP)} + \frac{HIS (TP)}{HIS (VP)} + \dots + \frac{VAL (TP)}{VAL (VP)} \times 100$$

Kde: TP je testovaný protein, VP je vaječný protein.

Aby byly proteiny efektivně využity a nedocházelo k nadměrnému vylučování amoniaku, je důležitá znalost optimálního poměru obsahu proteinů a stravitelné energie (Molina-Poveda, 2016). Ten závisí především na druhu a věku (viz tab. 3). Tento poměr vyjadřuje nutriční požadavky racionálněji než hrubý protein (NRC, 2011).

Tab. 3: Optimální poměr proteinů a energie u vybraných druhů ryb (upraveno dle Molina-Poveda, 2016)

Druhy ryby	Protein/energie (mg·kcal ⁻¹)	Hmotnost ryb	Zdroj
<i>S. salar</i>	97	plůdek	Storebakken (2002)
	80	1,0-2,5	Storebakken (2002)
	67-71	2,5-5,0 kg	Einen a Roem (1997)
<i>C. carpio</i>	97-116	4,3 g	Takeuchi a kol. (1979)
<i>O. mosambicus</i>	100	5,2 g	El-Dahhar a Lovell (1995)

Obsah proteinů v tkáních a krmivu se obvykle měří stanovením obsahu dusíku a vynásobením koeficientem 6,25, protože panuje obecný předpoklad, že proteiny obsahují 16 % N (Lall a Dumas, 2015). NRC (2011) však upozorňuje, že se jedná o zjednodušený pohled, který může vést k chybě až 10-20 %. Obsah proteinů ve vybraných surovinách je uveden v tab. 4.

Tab. 4: Obsah makroživin ve vybraných surovinách (upraveno dle Molina-Poveda, 2016)

Surovina	Sušina (g·kg ⁻¹)	Proteiny (g·kg ⁻¹)	Lipidy (g·kg ⁻¹)	Popel (g·kg ⁻¹)	Sacharidy (g·kg ⁻¹)	Brutto energie (MJ·kg ⁻¹)
Pšeničný šrot	905	117	20	9	160	16,7
Pšeničný lepek	924	656	40	7	133	21,2
Sójový šrot	909	416	196	53	336	23,4
Sójový proteinový koncentrát	920	871	-	4	14	66,0
Hrachový šrot	903	257	12	28	703	18,6
Drůbeží moučka	919	559	109	147	104	21,3
Krevní moučka	887	844	1	16	0	20,4
Masokostní moučka	950	560	88	324	27	19,3
Krill mletý	917	687	129	117	0	21,5
Rybí moučka (sardel)	926	668	75	186	4	21,8

S výjimkou sójového šrotu je většina rostlinných proteinů považována z hlediska esenciálních aminokyselin za nutričně nevyvážené. Tento nedostatek se při výrobě krmiv obvykle řeší používáním živočišných mouček a suplementací krystalických aminokyselin (Lall a Dumas, 2015). Používání krystalických forem je však méně efektivní. Pravděpodobně to souvisí s chutností, změnou pH, vyluhováním a rychlejší metabolizací, při níž však nejsou AMK využity pro biosyntézu proteinů (Mai a kol., 2022b).

Rostlinné proteiny jsou pro ryby navíc i obtížně stravitelné, protože jsou obaleny škrobem, což omezuje působení enzymů (NRC, 2011). Jejich stravitelnost lze zvýšit např. mletím nebo tepelnou úpravou. Nicméně nadměrná tepelná úprava může mít i negativní vliv. Reakcí mezi redukcujícími sacharidy (např. fruktózou) a aminokyselinami může docházet ke vzniku komplexních sloučenin, které jsou odolné vůči působení enzymů, a AMK jsou tak pro ryby nedostupné (Lall a Dumas, 2015). Tento proces se nazývá Maillardova reakce. Může při ní docházet i ke vzniku antinutričních a toxických látek (Mai a kol., 2022b).

Nutriční požadavky vybraných druhů ryb na AMK a stravitelný protein jsou uvedeny v tab. 8.

2.2.4.2 Lipidy

Většina ryb nedokáže syntetizovat PUFA řady n-3 a n-6 a musejí je získávat z potravy (Lall a Dumas, 2015). Podle NRC (2011) patří mezi esenciální mastné kyseliny (EFA) sladkovodních a diadromních druhů ryb kyselina α -linolenová (18:3n-3) a kyselina linolová (18:2n-6). Pro mořské druhy jsou esenciální PUFA s dlouhým řetězcem (LC-PUFA), a to kyselina eikopentaenová (EPA, 20:5n-3) a kyselina dokosaheptaenová (DHA, 22:6n-3). Rozdíl mezi uvedenými skupinami ryb je v tom, zda dokáží syntetizovat LC-PUFA z PUFA (Turchini a kol., 2022).

Zdrojem lipidů v krmivech bývá nejčastěji rybí olej různého původu (olej z celých ryb, z rybí moučky, z vnitřností apod.), rostlinné oleje, lecitin či drůbeží tuk. Jejich stravitelnost přesahuje 90 % (Mareš a kol., 2015). Vybrané zdroje jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5: Obsah EFA (%) ve vybraných surovinách (upraveno dle Molina-Poveda, 2016)

EFA	Rybí olej		Živočišný tuk		Rostlinný olej		
	sardel	makrela	hovězí	drůbeží	sójový	lněný	kukuřičný
18:2n-6	1	4	3	20	57	19	58
18:3n-3	1	1	1	1	7	56	1
20:5n-3	12	13	0	0	0	0	0
22:6n-3	12	8	0	0	0	0	0

Mezi příznaky nutričního deficitu EFA patří hniloba ploutví, myokarditida, snížení rychlosti růstu, zhoršená konverze krmiva, šokový syndrom, deformity plůdku a vysoká úmrtnost. Nedostatek EFA ovlivňuje i reprodukční schopnosti ryb. Snižuje oplozenost, líhivost a míru přežití potomstva (Lall a Dumas, 2015).

Lipidy snadno podléhají oxidačním změnám kvůli reakcím s volnými radikály (Turchini a kol., 2022). Aby se oxidaci zabránilo, přidávají se do krmiv syntetické nebo

přirozené antioxidanty. Mezi syntetické patří butylhydroxytoluen (BHT), butylhydroxyanisol (BHA) či ethoxyquin. Z přírodních lze jmenovat např. tokoferoly, karotenoidy, flavonoidy a vitamin C (Lall a Dumas, 2015). Oxidace snižuje nutriční hodnotu krmiva. Takto znehodnocené krmivo může způsobit i zdravotní problémy. Riziko rychlé oxidace lze snížit i vhodným skladováním (Mareš a kol., 2015).

2.2.4.3 Sacharidy

Ryby nemají zvláštní požadavky na sacharidy v potravě (NRC, 2011). I bez jejich přítomnosti jsou schopny přežít a růst. Je to pravděpodobně proto, že mohou glukózu efektivně syntetizovat glukoneogenezí z aminokyselin a glykogenolýzou glykogenu uloženého v játrech a svalech.

Kvůli nedostatku sacharidů ve vodním prostředí je metabolismus ryb lépe adaptován na využití proteinů a lipidů jako zdrojů energie (Moraes a de Almeida, 2020). Stravitelnost sacharidů se liší v závislosti na druhu ryb, podmínkách prostředí, typu sacharidů a technologickém zpracování krmiva. Neotropické ryby mohou efektivněji využívat komplexní sacharidy (např. škrob či dextrin), zatímco pro ryby mírného pásma a mořské ryby jsou vhodnější monosacharidy a disacharidy. Také herbivorní a omnivorní ryby dokážou trávit a metabolizovat sacharidy lépe než ryby karnivorní.

V krmivářské terminologii patří mezi sacharidy vláknina a bezdusíkaté látky výtažkové (BNLV). Mezi nejvýznamnější polysacharidy ve výživě ryb patří škrob a vláknina. V krmivu tvoří vláknina balastní část, důležitou pro naplnění trávicího traktu (Mareš a kol., 2015).

Škrob je homopolysacharid složený výhradně z glukózy. Molekuly škrobu jsou uspořádány do semikrystalických granulí. Obsah škrobu a velikost granulí se liší podle botanického druhu (viz tab. 6).

Granule se skládají z amyulózy a amylopektinu. Amylóza tvoří vnitřní část granule a je ve vodě rozpustná. Amylopektin tvoří plášť granule, je téměř nerozpustný a je náchylnější k enzymatickému štěpení. Podíl těchto dvou látek tedy ovlivňuje stravitelnost. Vliv na stravitelnost má i velikost granulí. Menší granule mají větší kontaktní plochu pro enzymy (Molina-Poveda, 2016).

Škrob je nerozpustný ve studené vodě, ale při zahřívání bobtná, voda proniká vnější vrstvou a narušuje strukturu granulí. Amylóza a část amylopektinu se vyluhují a vytvářejí viskózní suspenzi. Tento proces je známý jako želatinizace (NRC, 2011). Využívá se zejména při extruzi, při níž vlivem tepla a tlaku dojde nejen k želatinizaci

škrobů, ale i k jejich expanzi. Vzniká tak jakási stabilní porézní matrice, v níž jsou vázány proteiny. Díky poréznosti lze jednoduše zvyšovat obsah lipidů v krmivu nástřikem nebo ve vakuovacím zařízení. Velikost expanze také ovlivňuje to, zda bude krmivo plavat nebo se potápět (Molina-Poveda, 2016).

Tab. 6: Obsah škrobu a charakteristiky vybraných surovin (upraveno dle NRC, 2011)

Surovina	Obsah škrobu (%)	Teplota želatinizace (°C)	Velikost škrobové granule (µm)	Obsah amylózy (%)
ječmen	58,7	51-60	20-25	22
pšenice	65-68	58-64	22 (2-26)	26 (23-27)
kukuřice	69	63-72	35-40	21-28
brambory	73	59-68	40 (15-100)	20-23
rýže	88	-	-	17-22

Vláknina je pro ryby nestravitelná. Její vyšší množství (u lososovitých ryb nad 2,5 %, u kaprovitých ryb nad 8 %) snižuje stravitelnost ostatních živin (Mareš a kol., 2015). Stravitelnost celulózy je dokonce i u *C. idella* nulová (Kaushik a kol., 2022). Stravitelnost vybraných druhů sacharidů je uvedena v tab. 7.

Tab. 7: Koeficient zdánlivé stravitelnosti škrobu (apparent digestibility coefficient, ADC) u vybraných zdrojů sacharidů (upraveno dle NRC, 2011)

Druh ryby	Zdroj sacharidů	Zpracování	Obsah v krmivu (g/kg)	ADC (%)
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	bramborový škrob	granulace	270	5
	kukuřičný škrob	granulace	280	34
	pšeničný škrob	granulace	260	58
	pšeničný škrob nativní a želatinizovaný (3:1)	extruze	280	78
<i>Salmo salar</i>	bramborový škrob	extruze	180	46
	pšeničný škrob	extruze	120	72
<i>Cyprinus carpio</i>	pšeničný škrob nativní a želatinizovaný (3:1)	extruze	280	89
<i>Oreochromis nioticus</i> x <i>O. aureus</i>	pšeničný škrob	granulace	280	96

Použití sacharidů v krmivech pro ryby je tedy odůvodněné, neboť jsou nejlevnějším zdrojem energie, takže je možno ušetřit lipidy a proteiny efektivněji využít pro růst. Sacharidy navíc zvyšují konverzi krmiv a svými pojivovými vlastnostmi zlepšují jejich soudržnost (NRC, 2011; Molina-Poveda, 2016). V moderních krmivech pro lososovité ryby se obsah sacharidů pohybuje v rozmezí 15-28 % (Mareš a kol., 2015). Negativní vliv sacharidů na zdravotní stav pstruha duhového nebyl prokázán (NRC, 2011).

2.2.4.4 Mikroživiny

Ryby mají, ve srovnání s homoiotermními živočichy, na **vitaminy** menší nutriční požadavky. Většina druhů ryb si je však, s výjimkou vitamínu C, nedokáže syntetizovat a musí je přijímat v potravě (Mareš a kol., 2015). Tato skutečnost je ovlivněna i omezenou aktivitou střevního mikrobiomu (Moraes a de Almeida, 2020).

Avitaminózy hrozí zejména v intenzivních chovech, v nichž není dostatek přirozené potravy (Somerville a kol., 2014). Mezi typické příznaky avitaminózy patří snížený příjem krmiva, snížený růst, chudokrevnost a specifické příznaky pro jednotlivé vitaminy. Oproti tomu hypervitaminóza vitamínů A a D byla běžně vyvolávána zkrmováním tuleních a velrybích jater bohatých na tyto vitaminy (Mai a kol., 2022a).

Minerály si ryby také nedokáží syntetizovat a musejí je získávat v potravě nebo absorpcí z vody. Na rozdíl od vitamínů, které mohou být degradovány různými vlivy (např. teplota, pH, vyluhování) si minerální látky zachovávají svoji chemickou strukturu (Molina-Poveda, 2016).

Stanovení přesných nutričních požadavků komplikuje výměna iontů žábrami a kůží (Lall a Dumas, 2015). Navíc některé mikroprvky jsou potřebné v tak malých koncentracích, že je obtížné zajistit pro experiment krmivo a vodu bez zkoumaného prvku (Lall, 2022).

Nejčastěji se v krmivech sleduje obsah Ca a P (Mareš a kol., 2015). Zatímco potřebu vápníku mohou ryby částečně krýt absorpcí z vody, fosfor musí být obsažen v krmivu. Ovšem v rostlinných krmivech se vyskytuje nejčastěji ve formě fytátů, v nichž je pro ryby nedostupný, protože nemají vhodné enzymy, které by je hydrolyzovaly. Fytáty navíc díky svým antinutričním účinkům snižují stravitelnost i dalších živin. Využití takto vázaného P lze zvýšit suplementací fytáz do krmiva (Lall, 2022). Aktivita fytáz je však výrazně ovlivněna pH v trávicím traktu, bude tedy rozdílná u ryb se žaludkem a bez něho (Kumar a kol., 2011). Stravitelnost P je jedním ze zásadních parametrů při hodnocení krmiva, jednak z pohledu ryb, jednak z pohledu eutrofizace vod (Bai a kol., 2022).

Dlouhodobě základním a vyváženým zdrojem minerálních látek v krmivech pro ryby je rybí moučka (Mareš a kol., 2015). Suplementace potřebných vitamínů, chybějících minerálů a případně dalších látek se nejčastěji provádí formou premixů aplikovaných do krmiv.

Konkrétní požadavky vybraných druhů ryb jsou uvedeny v tab. 8.

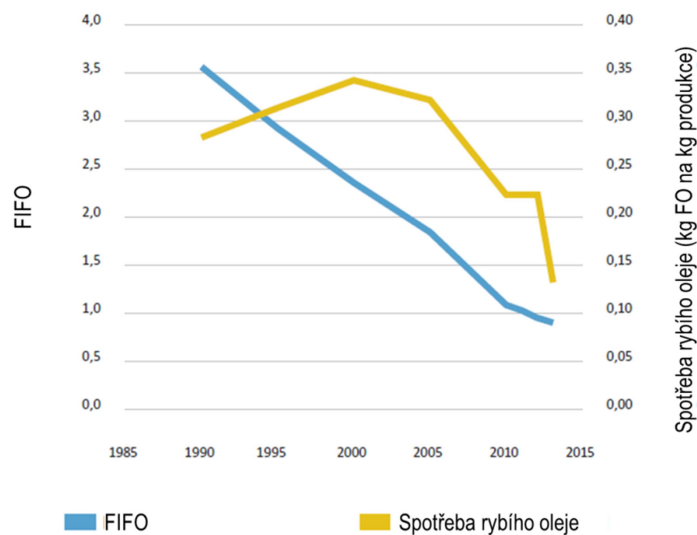
Tab. 8: Nutriční požadavky vybraných druhů ryb (upraveno dle NRC, 2011)

Živina	<i>C. carpio</i>	<i>Oreochromis spp.</i>	<i>O. mykiss</i>
stravitelná energie (kcal·kg ⁻¹)	3200	3400	4200
stravitelné proteiny (%)	32	29	38
arginin (%)	1,7	1,2	1,5
histidin (%)	0,5	1,0	0,8
izoleucin (%)	1,0	1,0	1,1
leucin (%)	1,4	1,9	1,5
lysin (%)	2,2	1,6	2,4
methionin (%)	0,7	0,7	0,7
methionin + cystin (%)	1,0	1,0	1,1
fenylalanin (%)	1,3	1,1	0,9
fenylalanin + tyrosine (%)	2,0	1,6	1,8
threonin (%)	1,5	1,1	1,1
tryptofan (%)	0,3	0,3	0,3
valin (%)	1,4	1,5	1,2
n-3 LC-PUFA (%)	R	R	0,4-0,5
18:3n-3 (%)	0,5-1,0	NT	0,7-1,0
18:2n-6 (%)	1,0	0,5-1,0	1,0
vápník (%)	0,34	0,7 ^a	NR
hořčík (%)	0,05	0,06	0,05
fosfor (%)	0,7	0,4	0,7
železo (mg·kg ⁻¹)	150	85	NT
mangan (mg·kg ⁻¹)	12	7	12
zinek (mg·kg ⁻¹)	15	20	15
vitamin A (mg·kg ⁻¹)	1,2	1,8	0,75
vitamin D (μg·kg ⁻¹)	NT	9	40
vitamin E (mg·kg ⁻¹)	100	60	50
vitamin K (mg·kg ⁻¹)	NT	NT	R
thiamin (mg·kg ⁻¹)	0,5	NT	1
riboflavin (mg·kg ⁻¹)	7	6	4
vitamin B ₆ (mg·kg ⁻¹)	6	15	3
kyselina pantothenová (mg·kg ⁻¹)	30	10	20
niacin (mg·kg ⁻¹)	28	26	10
biotin (mg·kg ⁻¹)	1	0,06	0,15
vitamin B ₁₂ (mg·kg ⁻¹)	NR	NR	R
folacin (mg·kg ⁻¹)	NR	1	1
cholin (mg·kg ⁻¹)	1500	1000	800
myonositol (mg·kg ⁻¹)	440	400	300
vitamin C (mg·kg ⁻¹)	45	20	20

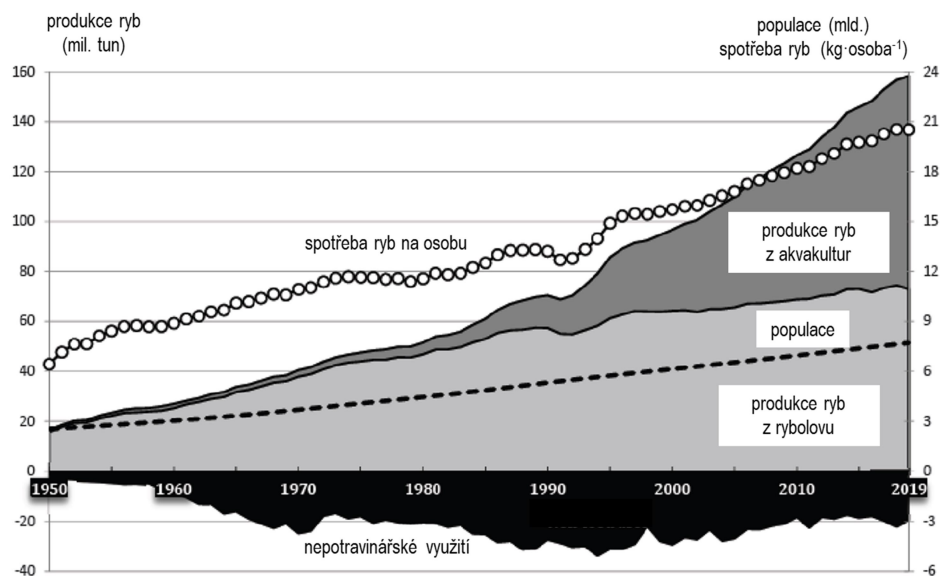
^a požadováno pokud není vápník ve vodě, NT – nebylo testováno, NR – není požadováno, R – je požadováno, ale není kvantifikováno

2.2.5 Alternativní zdroje proteinů

V minulosti tvořila základ krmiv, zejména pro karnivorní druhy ryb, rybí moučka a rybí olej. V 90. letech minulého století byl obsah FM v těchto krmivech vyšší než 60 %. V moderních krmivech pro lososovité ryby je to již méně než 20 %. Obsah FO poklesl z 24 % na méně než 10 % (Ytrestøyl a kol., 2015). Přestože tedy významně klesá spotřeba FM i FO vztažená k hmotnosti produkce (FIFO, fish in:fish out ratio, viz obr. 9), globální spotřeba těchto surovin v posledních letech více méně stagnuje. Podle FAO (2021) bylo v letech 2010-2019 na výrobu FM a FO ročně spotřebováno průměrně cca 15,7 mil. tun celých ryb, přičemž nejméně to bylo v roce 2014 (14,0 mil. tun) a nejvíce v roce 2011 (18,9 mil. tun). Je to proto, že se zvyšuje lidská populace a spotřeba ryb na osobu (viz obr. 10).



Obr. 9: Spotřeba FM a FO při produkci *O. mykiss* ve Finsku (Robaina a kol., 2019)



Obr. 10: Světová produkce a spotřeba ryb (FAO, 2021)

Abychom snížili tlak na rybolov a ochránili biologickou rozmanitost i udržitelné využívání přírodních zdrojů, budou výrobci nuceni stále více využívat alternativy k rybí moučce a rybímu oleji (Tacon a kol., 2011). Nutriční hodnoty alternativních zdrojů jsou však obecně nižší s ohledem na obsah esenciálních živin, antinutričních a obtížně stravitelných látek, což staví výrobce před velké výzvy (Hardy a Kaushik, 2022).

Při hledání alternativních zdrojů proteinů je nutno vzít na zřetel, že snížením obsahu FM v krmivu dojde také ke snížení obsahu minerálů a esenciálních mastných kyselin (NRC, 2011). Při tvorbě receptur krmiv vhodných pro akvaponii je nutno zohlednit taktéž nutriční požadavky rostlin (Robaina a kol., 2019). Řešení těchto problémů má navíc i ekonomický aspekt. Proteiny jsou totiž nejdražší složkou krmiv (Li a Robinson, 2015). Obsah proteinů ve vybraných surovinách je uveden v tab. 9.

Jako alternativní zdroje proteinů v krmivech pro ryby lze využít např.:

Rostlinné proteiny

➤ **Sója** – Podle Mareše a kol. (2015) je sója luštinatá (*Glycine max*) v současnosti nejvýznamnějším krmivem rostlinného původu. V krmivech pro omnivorní druhy se dlouhodobě používá sójový šrot (Hardy, 2009). Avšak jeho využití pro karnivorní druhy je omezené, protože obsahuje antinutriční látky a vysoké množství nestravitelných složek, které způsobují záněty trávicího traktu a ovlivňují obsah vody v exkrementech a rychlost průchodu tráveniny traktem. Antinutriční látky, jakými jsou např. saponiny, kyselina fytová či inhibitor trypsinu, lze eliminovat technologickým zpracováním a suplementací vhodných doplňků. Obsah nerozpustných sacharidů lze řešit šlechtěním nových odrůd. Podle Hardyho (2009) jsou vynikající alternativou FM sójové proteinové koncentráty. Kromě relativně vysokého obsahu kyseliny fytové, který je řešitelný suplementací fytázy, neobsahují žádné další negativně působící látky. Obecným problémem u sóji je malý obsah methioninu, který je možno upravit přidáním krystalické formy a vhodnou kombinací dalších zdrojů proteinů. Kaushik a kol. (1995) prokázali, že v krmivu pro *O. mykiss* může nahradit sójový proteinový koncentrát až 67 % FM aniž by došlo ke snížení růstových parametrů a využití živin. Oproti tomu náhrada sójovou moukou (až 50 %) růst snížila. V krmivu pro kranase Dumerilova (*Seriola dumerili*) lze nahradit až 50 % FM sójovým šrotem (Hossain a kol., 2018). Suplementace inosinem může zlepšit stravitelnost, imunitní reakce, odolnost proti stresu a zdravotní stav ryb. Pervin a kol. (2020) konstatovali, že lze sójovým šrotem nahradit až 75 % FM v krmivu pro *O. niloticus* bez negativních účinků na růst, zdravotní stav

a aktivitu trávicích a antioxidačních enzymů. K podobným závěrům došli i Ahmad a kol. (2020), kteří testovali tuto alternativu na *O. niloticus* chovaných ve slané vodě (36,1-40,8 ‰). Negativní účinky však pozorovali již od nahrazení 50 % FM. V krmivu pro mořský druh robalo bělavý (*Centropomus viridis*) lze sójovým šrotem úspěšně nahradit až 45 % FM (Arriaga-Hernández a kol., 2021). Autoři doporučují extruzní úpravu krmiva, suplementaci fytázou a věnovat pozornost vyvážení AMK profilu.

➤ **Obiloviny** – V krmivech pro ryby se používá kukuřičná lepková mouka, která při dobrém zpracování obsahuje až 80 % proteinů (Hardy, 2009). Nevýhodou je nižší obsah lysinu. Vhodnou kombinací se sójovým proteinem, který má méně methioninu, se však AMK profil dá optimalizovat. Khalifa a kol. (2016) ve své studii prokázali, že použitím 100 g kukuřičného proteinového koncentrátu lze nahradit až 534 g FM v jednom kg krmiva pro *O. niloticus* bez negativního vlivu na růst a zdravotní stav ryb. Pšenice a ječmen jsou si podobné z hlediska živin, ale více se používá pšenice, protože obsahuje méně vlákniny. Vhodné jsou lepkové mouky a proteinové koncentráty (Hardy, 2009). Glencross a kol. (2012) zkoumali stravitelnost obilovin (např. pšenice, ječmen, oves, triticales, čirok aj.) v extrudovaných krmivech pro latese stříbřitého (*Lates calcarifer*). Přestože stravitelnost proteinů často přesahovala 100 %, využití těchto surovin je limitováno stravitelností škrobu, která se pohybovala mezi 18 % (čirok) a 96,5 % (odrůda ječmene s nízkým obsahem škrobu).

➤ **Lupina** – Přestože existuje asi 200 druhů lupiny, v krmivech pro ryby se běžně používá především *Lupinus albus*, *L. angustifolius*, *L. luteus* a *L. mutabilis*. Stravitelnost proteinů je obvykle vysoká (> 90 %), zejména po odstranění NSP např. loupáním (Glencross, 2016). Yones (2010) nahrazoval extrudovanou loupanou lupinou (*L. albus*) FM v krmivu pro *O. niloticus* × *O. mossambicus*. Výsledky potvrdily, že lze nahradit až 50 % FM touto surovinou bez nepříznivých účinků na růst, stravitelnost a krevní charakteristiky. Tabrett a kol. (2012) testovali různé kultivary *L. albus* a *L. angustifolius* v krmivu pro *L. calcarifer*. Krmivo obsahovalo 30 % lupiny. Konstatovali, že šrot z loupané lupiny *L. albus* je vhodný i pro karnivorní druhy ryb. K podobným závěrům dospěli i Glencross a kol. (2010), kteří potvrdili vhodnost *L. mutabilis* v krmivu pro *O. mykiss*. Glencross a kol. (2008) hodnotili během tří let 76 různých vzorků *L. angustifolius*, kterými nahrazovali FM v krmivu pro *O. mykiss*. Prokázali, že i v rámci jedné suroviny existuje velká variabilita a to zejména stravitelnosti.

➤ **Hrách** – Ačkoli je hrách setý (*Pisum sativum*) ze stejné čeledi jako sója a lupina, odlišuje se od nich složením. Má nižší obsah proteinů, nízký obsah tuků a vyšší obsah

sacharidů. Výhodou je, že obsahuje signifikantně více škrobu a méně NSP (Glencross, 2016). Stravitelnost proteinů z hrachového šrotu, jehož bylo v krmivu pro druh smuha japonská (*Argyrosomus japonicus*) 50 %, byla 89,9 %. Protože je hrách bohatší na škrob a proteiny, oproti např. pšenici, mohl by v extrudovaných krmivech sloužit jako alternativní zdroj pojiva (Booth a kol., 2013). V krmivech pro *O. mykiss* může hrachový protein nahradit 25 % FM (Demirci a kol., 2021). Magalhães a kol. (2018) srovnávali stravitelnost evropských druhů luštěnin (cizrna, hrách, bob, lupina, hrachor a vikev) v extrudovaných krmivech pro juvenilní *O. mykiss* a *O. niloticus*. Krmivo obsahovalo vždy 30 % šrotu dané luštěniny. Autoři prokázali, že stravitelnost proteinů byla vždy vyšší u *O. mykiss*. Stravitelnost hrachu zde byla 93,3 %, což byla nejvyšší hodnota. U *O. niloticus* to bylo 87,9 %. Nižší stravitelnost vykázal jen hrachor.

➤ **Řepka** – Přestože je primárním produktem z brukve řepky (*Brassica napus*) olej, je řepka také cenným zdrojem proteinů. Podobně jako sója a lupina obsahuje řepka málo škrobu (Glencross, 2016). Sallam a kol. (2021) hodnotili použití řepkového šrotu obsahujícího 31 % proteinů jako náhradu FM v krmivech pro *O. niloticus* a tlamouna galilejského (*Sarotherodon galilaeus*). Výsledky prokázaly, že lze nahradit až 20 % FM v krmivu pro *S. galileus* a až 10 % v krmivu pro *O. niloticus*, a zlepšit tím růstové vlastnosti. *O. niloticus* vykazoval oproti *S. galileus* lepší hodnoty ve všech růstových parametrech. Se zvyšující se koncentrací řepky se snižovala koncentrace amoniaku ve vodě. Ngo a kol. (2016) zkoumali vliv nahrazení FM řepkovými výlisky a řepkovým extrahovaným šrotem v krmivu pro *L. calcifer*. Krmivo obsahovalo 10 %, 20 % nebo 30 % dané suroviny. Autoři hodnotili růst, konverzi krmiva, biochemické a fyziologické parametry. Konstatují, že přijatelná úroveň výlisků v krmivu je 20 %. U extrahovaného šrotu je to 30 %. Ngo a kol. (2015) dodávají, že obsah proteinů je v extrahovaném šrotu vyšší (až 42,3 %) než ve výliscích (34,8 %). Také stravitelnost je ve šrotu signifikantně vyšší (až 86,6 %) oproti výliskům (63,1 %).

➤ **Makrořasy** – Hodar a kol. (2020) uvádějí, že jsou řasy výbornou alternativou FM, protože jsou zdrojem nejen potřebných AMK, ale i omega-3 a omega-6 mastných kyselin. Bylo prokázáno, že i malý podíl řas v krmivu je prospěšný pro růst a zdravotní stav ryb. Podle Naiela a kol. (2021) makrořasy obsahují bioaktivní složky, jakými jsou komplexní sacharidy laminarin a fukoidan, které mají pozitivní zdravotní účinky. Makrořasy a jejich extrakty jsou také zdrojem antibakteriálních látek, takže je lze využít v profylaxi i terapii proti patogenním bakteriím. Vysoké dávky však mohou mít

antinutriční účinky. Bezpečný limit pro dobrý růst, imunitu a zmírnění stresu je 50-75 g·kg⁻¹.

➤ Mezi další alternativní rostlinné zdroje proteinů patří např. tolíce vojtěška (*Medicago sativa*), výlisky nebo extrahované šroty ze semen bavlníku bylinného (*Gossypium herbaceum*), (Ayadi a kol., 2012). Obsahují však antinutriční látky, málo lysinu a methioninu a vysoký obsah vlákniny. Ali a kol. (2003) doporučují v krmivech pro *O. niloticus* používat max. 5 % vojtěškové moučky. El-Saidy a Gaber (2004) uvádějí, že lze bavlníkovým šrotem zcela nahradit FM v krmivu pro juvenilní *O. niloticus*, pokud je přidáno Fe v poměru 1:1 vůči gossypolu (inhibitor enzymů). Dalším alternativním zdrojem proteinů může být okřehek menší (*Lemna minor*). Opiyo a kol. (2022) zkoumali vhodný obsah úsušků okřehku v krmivu pro *O. niloticus*. Varianta s 15 % okřehku obsahujícího 26,58 % proteinů nevykazovala významné rozdíly v růstu a konverzi krmiva vůči kontrole. Navíc zařazení *L. minor* do krmiva bez jakýchkoliv živočišných složek významně zvýšilo obsah LC-PUFA v tělech ryb. Což dokazuje, že *L. minor* je vhodným zdrojem 18:3n-3 pro endogenní biosyntézu LC-PUFA. Velichkova a kol. (2020) použili v akvaponickém systému do krmiva pro *C. carpio* okřehek *L. minuta*, který byl v systému pěstován jako součást biofiltru. Varianta s 5 % okřehku vykazovala oproti kontrole lepší růst a konverzi krmiva. Zařazením *L. minuta* do krmiva také došlo k signifikantnímu snížení obsahu NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻ a PO₄⁻ ve vodě. Potenciál okřehku ale i dalších vodních rostlin v RAS a akvaponii potvrzují i další autoři (Espinosa-Moya a kol., 2018; Martínez-Yáñez a kol., 2018).

Živočišné proteiny

➤ **Drůbeží moučka** – Palupi a kol. (2020) testovali krmiva pro *O. niloticus*. Krmiva obsahovala 0 %, 5 %, 10 %, 20 % a 30 % drůbeží moučky, kterou postupně nahrazovali FM. V krmivu se 30 % drůbeží moučky již nebyla žádná FM. Experiment prokázal, že růst, přežití a složení těla (proteiny, lipidy, AMK) nebyly významně odlišné od kontroly. Aydin a kol. (2015) však upozorňují, že náhrada FM drůbeží moučkou nepříznivě ovlivňuje kvalitu rybího masa v důsledku snížení obsahu LC-PUFA. Během jejich pokusu došlo, v důsledku náhrady 0-100 % FM drůbeží moučkou v krmivu pro *O. niloticus*, k poklesu obsahu kyseliny dokosahexaenové (z 12,2 % na 0,4 %) a kyseliny eikopentaenové (z 4,4 % na 0,4 %) ve svalovině ryb.

➤ **Krevní moučka** – Ayadi a kol. (2012) uvádějí, že krevní moučka obsahuje 80-98,8 % vysoce kvalitního proteinu s obsahem lysinu 6,9-8,0 %. Stravitelnost proteinů

u *O. mykiss* může dosahovat v závislosti na zpracování až 99 % (Bureau a kol. 1999). Otubusin (1987) testoval krmiva pro *O. niloticus* s obsahem 10 %, 25 % a 50 % krevní moučky. Nejúčinnější z hlediska průměrného hmotnostního přírůstku a průměrné hmotnosti ryb byl obsah 10 %.

➤ **Péřová moučka** – podle Ayadi a kol. (2012) má péřová moučka 89,6-92,4 % proteinů a nižší obsah lysinu a methioninu než FM. Bureau a kol. (1999) uvádějí, že stravitelnost proteinů obsažených v péřové moučce se u *O. mykiss* pohybuje v rozmezí 81-87 %. Do obsahu 15 % péřové moučky v krmivu pro *O. mykiss* nedošlo k negativnímu ovlivnění růstu a konverze krmiva (Bureau a kol., 2000). Roy a Mráz (2020) uvádějí ADC péřové moučky pro *O. niloticus* 79,87 %.

➤ **Masokostní moučka** – Masokostní moučka má několik výhod: vysoký obsah proteinů, příznivý AMK profil, využitelný obsah stravitelných minerálů (zejména P a Ca) a malý obsah antinutričních látek (Hodar a kol. 2020; Suloma a kol., 2013). Stravitelnost proteinů v masokostní moučce v krmivech pro *O. mykiss* se pohybuje v rozsahu 83-89 % (Bureau a kol., 1999). Podle Bureau a kol. (2000) může krmivo pro *O. mykiss* obsahovat až 24 % masokostní moučky (tj. 25 % stravitelného proteinu), aniž by došlo k ovlivnění růstu. Dochází však k malému, ale významnému snížení konverze krmiva. Özkan Yilmaz a kol. (2015) nahradili v krmivu pro juvenilní *O. niloticus* cca 30 % FM sójovým šrotem nebo masokostní moučkou. Zjistili, že ačkoliv se v jednotlivých variantách obsah proteinů ve svalovině významně nelišil, signifikantně nižší byl obsah svalového glykogenu ve variantě krmené masokostní moučkou. Z toho lze vyvodit, že masokostní moučka je méně vhodným alternativním zdrojem proteinů, zejména z hlediska využití a mobilizace energetických rezerv během stresu.

➤ **Hmyz** – většina volně žijících ryb konzumuje hmyz jako součást své přirozené potravy. V současnosti se hmyzí moučky v krmivech používají obvykle do obsahu 30 %. Krmné pokusy dokazují, že by mohly nahradit 25-100 % sójové a rybí moučky bez nežádoucích účinků (Hodar a kol., 2020). Barroso a kol. (2014) zkoumali 16 různých druhů hmyzu potenciálně využitelných jako alternativa FM v krmivech pro ryby. Analyzovaný hmyz měl vyšší podíl tuku a méně proteinů než FM. S výjimkou histidinu, threoninu a lysinu má hmyz podobný AMK profil jako FM, přičemž nejpodobnější má řád Diptera. Velmi se však liší obsah mastných kyselin typu n-3, které u hmyzu prakticky chybí. Oproti FM obsahuje hmyz více omega-6 a MUFA. Podle Ferrer Llagostera a kol. (2019) lze tento problém řešit odtučněním moučky, obohacením substrátu pro chov hmyzu vedlejšími rybími produkty nebo zkrmováním krmiva

s potřebným obsahem FA během poslední fáze chovu ryb před uvedením na trh. Chitin a jeho deriváty spolu s dalšími účinnými látkami v exoskeletu hmyzu, jako jsou antimikrobiální peptidy, hrají zásadní roli v imunomodulaci vodních organismů a mohou mít velký vliv na zdravotní stav ryb (Mousavi a kol., 2020; Nogales-Mérida a kol., 2019). Hmyz se snadno chová a jeho chov má malý dopad na životní prostředí (Ferrer Llagostera a kol., 2019). V EU je povoleno sedm druhů krmného hmyzu (EU, 2017): bráněnka *Hermetia illuscens*, moucha domácí (*Musca domestica*), potemník moučný (*Tenebrio molitor*), potemník stájový (*Alphitobius diaperinus*), cvrček domácí (*Acheta domestica*), cvrček krátkokřídý (*Grylloides sigillatus*) a cvrček banánový (*Grallus assimilus*). Melenchón a kol. (2022) nahradili 50 % FM v krmivu pro *O. mykiss* moučkou z *H. illuscens* nebo *T. molitor*. Nejlepší růstové vlastnosti včetně kontroly vykazovala varianta s *T. molitor*. Žádná z alternativ neměla negativní vliv na zdravotní stav ryb. Ve filetech byl pozorován mírně vyšší obsah proteinů. Zarantonello a kol. (2021) zkoumali důsledky náhrady 50 % FM moučkou z *T. molitor* v krmivu pro jesetera sibiřského (*Acipenser baerii*). Oproti kontrole vykazovala varianta s hmyzem horší růst, přežití, nižší obsah lipidů a glykogenu v játrech, a to především v důsledku nízké chuťové akceptace krmiva. Alves a kol. (2021) krmili *O. niloticus* krmivem, které obsahovalo 0 %, 15 % nebo 30 % moučky z larev potemníka brazilského (*Zophobas morio*). Autoři dospěli k závěru, že zařazení alespoň 15 % uvedené hmyzí moučky pozitivně ovlivňuje imunitu při zachování růstu a konverze krmiva. ADC hmyzí moučky může mít pro *O. niloticus* 78,98 % (Roy a Mráz, 2020).

➤ **Krill** – Moučka z krillu (*Euphausiacea*) obsahuje 60 % proteinů s vyváženým AMK profilem, 25 % lipidů (včetně EPA a DHA) a astaxanthin. Je bohatá na chitin z exoskeletu, volné aminokyseliny a nukleotidy. Působí jako atraktant, zlepšuje růst a odolnost vůči stresu. Zlepšuje kvalitu filetu a zdravotní stav ryb (Hodar a kol., 2020). Gaber (2005) během svého experimentu krmil *O. niloticus* krmivem, které obsahovalo 0-6 % krillu jako jediný zdroj živočišných proteinů. Kontrola obsahovala 20 % FM. Krill zvýšil oproti kontrole růst až o 31,9 %. Stravitelnost živin a energie rostla se zvyšujícím se obsahem krillu. Krill také významně ovlivnil složení celého těla. Autor konstatuje, že suplementace již 1,5 % krillu v krmivu může zvýšit příjem krmiva, růst a konverzi krmiva. Yoshitomi a kol. (2006) zkoumali vliv náhrady FM krillem (0 %, 7 %, 15 % a 30 %) na přírůstek hmotnosti, specifickou rychlost růstu (SGR) a příjem krmiva u *O. mykiss*. Do obsahu krillu 15 % byly tyto parametry srovnatelné s kontrolou, ale při obsahu 30 % krillu došlo k jejich poklesu. Autoři si to vysvětlují tím, že

v důsledku zvýšené koncentrace fluoridů došlo k jejich ukládání do obratlových kostí, a to nepříznivě ovlivnilo jejich vývoj. Následně Yoshitomi a kol. (2007) nahrazovali FM moučkou z těl krunýřovky krillové (*Euphausia superba*), kterou vyrobili po odstranění exoskeletonů, čímž snížili obsah fluoru z 870 ppm na 230 ppm. FM byla v jednotlivých variantách nahrazena krillem v rozsahu 0-100 %. Ve všech variantách byl růst *O. mykiss*, příjem a konverze krmiva i hepatosomatický index srovnatelný s kontrolou. Studie tak prokázala, že takto upravený krill měl nutriční hodnotu srovnatelnou s FM.

Mikroorganismy

➤ Mezi jednobuněčné organismy využitelné jako alternativní zdroje proteinů patří bakterie, houby (zejména kvasinky), mikrořasy a kombinace těchto skupin tvořící mikrobiální biofloky a agregáty (Glencross a kol., 2020b). Storebakken a kol. (2004) prokázali, že lze nahradit v krmivu pro *S. salar* až 25 % FM bakteriálním proteinem z bakterií kultivovaných v zemním plynu. Vidakovič a kol. (2020) konstatují, že lze v krmivech pro *O. mykiss* nahradit až 40 % FM kvasinkami *Saccharomyces cerevisiae* a *Wickerhamomyces anomalus* bez negativních účinků na růst, stravitelnost a zdravotní stav ryb. Krmivo obsahující 15 g·kg⁻¹ kvasnicového extraktu bohatého na nukleotidy a β-glukan významně zvýšilo SGR *O. niloticus* (Hassaan a kol., 2018). Velasquez a kol. (2016) prokázali, že náhrada 30 % FM jednobuněčnou řasou *Arthrospira platensis* zlepšila růst, konverzi krmiva a zdravotní stav juvenilní *O. niloticus*. Azim a Little (2008) krmili *O. niloticus* krmivem bez obsahu živočišných složek. Ryby chované v nádržích s biofloccem vykazovaly růst o 45 % vyšší než v nádržích bez bioflocu. Využití bioflocu ve výživě lososovitých ryb zatím nebylo testováno (Glencross a kol., 2020b).

Výsledné složení krmiva s nižším obsahem FM není pouhým využitím alternativního zdroje, ale měl by to být především výsledek hledání vhodných kombinací surovin, které splňují nejen požadavky na živiny, ale i další kritéria. Mezi ně patří zejména ekonomická životaschopnost a environmentální udržitelnost. Suroviny musí být trvale dostupné v potřebném množství a vyrovnané kvalitě, nesmí obsahovat kontaminanty a další nežádoucí látky. Takováto krmiva by měla být součástí celkové alternativní strategie (zahrnující nutriční, technologické, technické a chovatelské postupy), která by mohla pomoci transformovat využívání mořských zdrojů v akvakultuře (Turchini a kol., 2019; Glencross a kol., 2020a).

Tab. 9: Obsah proteinů, esenciálních AMK a vybraných minerálů v surovinách používaných při výrobě krmiv (upraveno dle NRC, 2011)

Surovina	Proteiny (%)	Arg (%)	His (%)	Ile (%)	Leu (%)	Lys (%)	Met (%)	Phe (%)	Thr (%)	Trp (%)	Val (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Fe ^a
Sójový extrahovaný šrot	44,0	3,23	1,17	1,99	3,42	2,83	0,61	2,18	1,73	0,61	2,4	0,28	0,31	0,03	0,13	0,04	48
Sójový proteinový koncentrát	63,63	4,64	1,58	2,94	4,92	3,93	0,81	3,28	2,47	0,84	3,06	0,65	2,11	0,3	0,29	0,04	140
Kukuřičný lepek	63,7	1,9	1,2	2,3	9,4	1,07	1,9	3,8	2,0	0,3	2,7	0,44	0,29	0,07	0,07	0,05	229
Kukuřičný šrot	8,5	0,4	0,25	0,29	1,0	0,24	0,18	0,42	0,29	0,07	0,42	0,28	0,33	0,03	0,11	0,01	33
Pšeničný lepek	80,7	3,8	2,0	3,7	6,3	4,9	1,6	4,5	1,6	1,05	4,0	0,26	0,1	0,14	0,03	0,03	52
Pšeničný šrot	14,8	0,6	0,17	0,69	1,0	0,4	0,25	0,78	0,69	0,48	0,69	0,37	0,43	0,04	0,12	0,02	35
Lupinový šrot	30,4	3,38	0,77	1,38	2,43	1,54	0,27	1,22	1,2	0,26	1,29	0,54	1,1	0,22	0,19	0,02	54
Řepkový extrahovaný šrot	38,0	2,32	1,1	1,51	2,6	2,02	0,77	1,5	1,5	0,46	1,94	1,01	1,22	0,63	0,51	0,07	142
Hrachový proteinový koncentrát	55,0	4,83	1,3	2,15	3,75	3,75	0,41	2,56	1,85	0,49	2,35	0,84	1,96	0,09	0,22	0,01	85
Slunečnicový extrahovaný šrot	32,3	2,93	0,92	1,44	2,34	1,2	0,82	1,66	1,33	0,44	1,74	0,86	1,07	0,36	0,68	0,02	254
Vojtěškové úsušky	17,1	0,77	0,33	0,81	1,28	0,85	0,27	0,8	0,71	0,34	0,88	0,23	2,38	1,4	0,29	0,1	404
Extrahovaný bavlníkový šrot	41,7	4,18	1,07	1,45	2,32	1,6	0,58	2,18	1,34	0,53	1,9	1,17	1,39	0,17	0,41	0,04	208
Kelpa	8,9	0,1	-	-	0,09	0,04	0,1	-	0,03	-	-	0,16	2,3	1,2	0,85	2,4	566
<i>Arthrospira platensis</i>	57,5	4,15	1,09	3,21	4,95	3,03	1,15	2,78	2,97	0,93	2,97	0,12	1,36	0,12	0,2	1,05	285
Drůbeží moučka	55,91	4,32	1,05	2,3	4,27	3,32	1,29	1,66	2,14	-	3,65	0,61	1,16	0,27	0,27	0,07	142
Péřová moučka	83,3	5,8	0,7	4,15	6,94	1,81	0,5	4,12	3,85	0,55	4,55	1,83	0,39	3,51	0,18	0,82	442
Masokostní moučka	50,9	3,6	0,96	1,7	3,2	2,6	0,67	1,7	1,7	0,26	2,25	4,98	0,65	9,99	0,41	0,63	606
Krevní moučka	88,6	2,65	5,0	0,8	10,3	7,1	1,0	5,1	3,8	1,0	5,2	0,3	0,15	0,41	0,15	0,38	2769
Rybí moučka (sled)	72,0	3,73	1,53	3,64	4,69	7,3	2,3	2,68	2,49	0,67	3,26	1,67	1,08	2,2	0,14	0,59	114
Krill	58,8	3,47	1,23	2,82	4,41	4,17	1,76	2,53	2,53	0,53	2,82	0,29	0,09	0,46	0,23	0,73	10
Moučka z krevet	39,5	1,54	0,51	0,91	1,62	1,66	0,55	0,99	3,24	0,24	1,03	1,6	0,7	6,3	0,7	1,7	64
Pivovarské kvasnice	42,6	2,2	1,09	2,15	3,13	3,22	0,74	1,83	2,2	0,56	2,39	1,36	1,69	0,14	0,24	0,07	109

^a (mg·kg⁻¹)

2.2.6 Specifika výživy ryb v akvaponii

Krmivo je v akvaponii základním zdrojem živin, ale neobsahuje všechny živiny potřebné pro rostliny (Lennard a Goddek, 2019).

Z předchozích kapitol vyplývá, že je vhodnější koncipovat akvaponický systém jako dvousmyčkový a v něm používat krmivo respektující zejména nutriční požadavky a welfare ryb, protože živiny pro rostliny lze doplnit solemi v hydroponické smyčce, příp. v RAS formou pH pufrů, bez obav, že by uškodily rybám (Lennard a Goddek, 2019). Nedostatek živin pro rostliny je sice možno řešit zvyšováním jejich koncentrace v akvaponických krmivech, ale existuje zde mnoho protichůdných faktorů a některé látky mohou být pro ryby i toxické (Robaina a kol., 2019). Nevhodné složení krmiva může způsobovat akumulaci iontů (např. NaCl) nebo rizikových prvků v systému (Maucieri a kol., 2019).

Zdá se, že nerovnováha živin v akvaponii je důsledkem spíše chemických procesů než nevyváženosti vstupů (Tellbüscher, 2023). Během těchto procesů může docházet ke srážení (precipitaci) živin, a tím ke snížení jejich dostupnosti pro rostliny. Precipitací ovlivněné živiny (zejména Ca, Fe, P, Mn, Cu a Zn) nemá smysl přidávat do krmiva, pokud nejsou nezbytné pro ryby. Naopak živiny dobře rozpustné (např. K, Mg) je možno přidávat jak ve formě surovin bohatých na danou živinu (např. sójový lecitin obsahuje v sušině 13 % K), tak ve formě solí. Otázkou však zůstává, zda není smysluplnější přidávat soli přímo do systému např. prostřednictvím pH pufrů.

Vhodnější se tedy zdá manipulovat živinami prostřednictvím alternativních zdrojů. Aby byla akvaponie udržitelná, musí být udržitelné i použité suroviny. Tzn. především musí být nahrazena rybí moučka a rybí olej alternativami s nízkou uhlíkovou stopou (Robaina a kol., 2019).

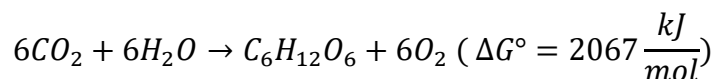
Téměř 65-75 % N a P z krmiva zůstává rybami nevyužito a zůstává v systému, P především v kalech a N především ve vodě (Lennard a Goddek, 2019). Při návrhu akvaponického krmiva je s tímto nutno počítat a v praxi je udržitelnější snažit se o maximální mobilizaci a využití těchto živin, než předimenzovávat jejich obsah v krmivu.

Důležitá je i technika krmení. Při častějším krmení nedochází k přetěžování biofiltru a živiny jsou uvolňovány rovnoměrněji. Také např. stabilní podmínky chovu (zejména teplota) ovlivňují metabolismus, a tím i stabilitu vyplavování živin (Ebeling a Timmons, 2012).

2.3 Výživa rostlin v akvaponii

2.3.1 Živiny

Zelené rostliny jsou eukaryotické fotoautotrofní organismy, které transformují sluneční energii do organických sloučenin. Fotosyntézu lze popsat rovnicí:



Mezi limitující faktory růstu rostlin patří zejména světlo, voda, teplota a rostlinné živiny (Vaněk a kol., 2012).

Čerstvá rostlinná hmota obsahuje 80-95 % vody (Resh, 2013). Konkrétní hodnota je závislá na řadě faktorů (druh rostliny, teplota, vlhkost vzduchu apod.), proto se analýza živin v rostlinném materiálu provádí v sušině. Více než 90 % sušiny tvoří uhlík (C), kyslík (O) a vodík (H), které pocházejí z vody (H₂O) a plynného oxidu uhličitého (CO₂). Necelých 10 % sušiny je tedy tvořeno všemi ostatními prvky, které je nutno dodat v živném roztoku.

Prvky je možno rozdělit na esenciální a neesenciální (Kirkby, 2023). Esenciální jsou uvedeny v tab. 10. Arnon a Stout (1939) definovali jako esenciální prvek ten, který splňuje tři kritéria:

- Jeho nedostatek znemožňuje rostlině dokončit životní cyklus (nezbytnost).
- Tento nedostatek je specifický pro daný prvek a nelze ho napravit jiným prvkem (nezastupitelnost).
- Prvek se přímo podílí na výživě rostliny (je zapojen do metabolismu).

Rostlinné živiny jsou anorganického původu a lze je podle obsahu prvků rozdělit do tří skupin (Vaněk a kol., 2012):

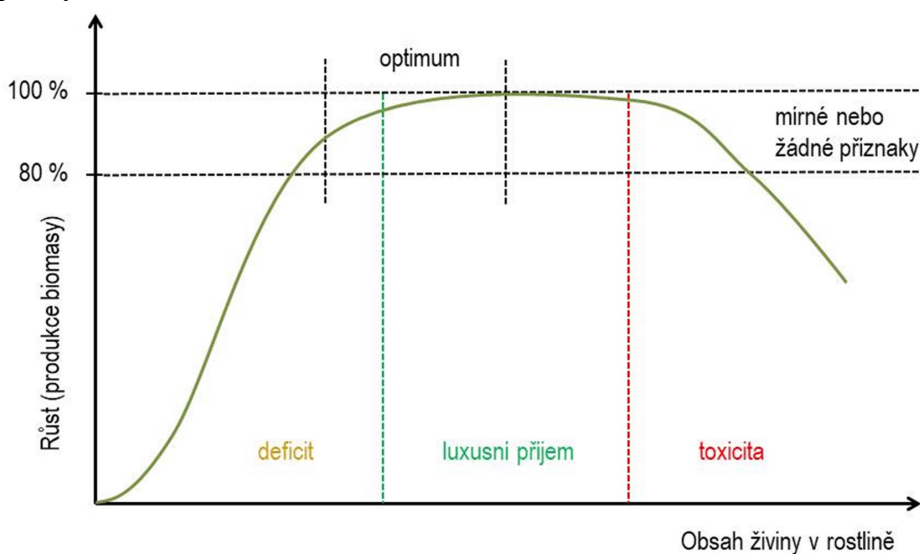
- Makroprvky, které se v rostlinách vyskytují v desetinách procenta až desítkách procent (C, O, H, N, P, K, Ca, Mg, S).
- Mikroprvky vyskytující se zpravidla s obsahem nižším než 0,05 % (obsah se většinou uvádí v ppm). Patří sem Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni.
- Prvky užitečné, pro něž je charakteristické, že je nepotřebují všechny rostlinné druhy (např. Co, Na, Al, Si).

Mengel a Kirby (2001) navrhují dělit živiny podle jejich biochemických vlastností a fyziologických funkcí. Vaněk a kol. (2012) však upozorňují, že podobná klasifikace naráží na určité problémy zejména proto, že některé živiny plní v rostlinách více funkcí.

Tab. 10: Přehled esenciálních živin (upraveno dle Epstein a Bloom, 2005; Resh, 2013; Naz, 2023)

	Prvek	Symbol	Forma	Obsah v sušině (%)	Hlavní funkce
makroprvky	uhlík	C	CO ₂	45	tvorba struktury rostliny
	kyslík	O	O ₂ , H ₂ O	45	produkce energie, respirace, tvorba struktury
	vodík	H	H ₂ O	6	retence vody, regulace pH, syntéza sacharidů
	dusík	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1,5	chlorofyl, nukleové kyseliny, proteiny
	draslík	K	K ⁺	1,0	aktivace enzymů, osmotická rovnováha
	vápník	Ca	Ca ²⁺	0,5	buněčné stěny, nukleové kyseliny, aktivace enzymů
	fosfor	P	H ₂ PO ₄ ⁻ HPO ₄ ²⁻	0,2	produkce energie (ATP), nukleové kyseliny
	hořčík	Mg	Mg ²⁺	0,2	chlorofyl
	síra	S	SO ₄ ²⁻	0,1	nukleové kyseliny, proteiny
mikroprvky	železo	Fe	Fe ³⁺ , Fe ²⁺	0,01	syntéza chlorofylu, přenos energie
	chlór	Cl	Cl ⁻	0,01	fotosyntéza, osmotická rovnováha
	mangan	Mn	Mn ²⁺	0,005	syntéza chlorofylu, přenos energie
	bór	B	BO ₃ ²⁻ B ₄ O ₇ ²⁻	0,002	stabilizace buněčné stěny
	zinek	Zn	Zn ²⁺	0,002	aktivace enzymů
	měď	Cu	Cu ²⁺ , Cu ⁺	0,0006	respirace, oxidace, redukce
	molybden	Mo	MoO ₄ ²⁻	0,00001	enzymy
	nikl	Ni	Ni ²⁺	0,00001	enzymy

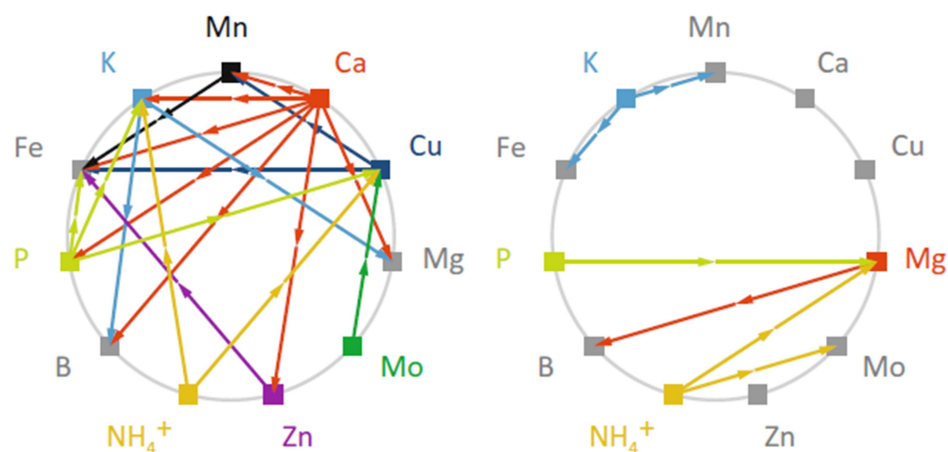
Také ve výživě rostlin platí tzv. Liebigův zákon minima (blíže viz kap. 2.2.4). Rostlina tedy může využít plný produkční potenciál jen tehdy, když jsou všechny živiny na optimální úrovni (Roy a kol., 2006). Obsah živiny v rostlině ovlivňuje její růst. Tento vliv je patrný na obr. 11.



Obr. 11: Závislost růstu na obsahu živiny (Epstein a Bloom, 2005; Vaněk a kol., 2012)

V případě deficitu živiny je omezena produkce biomasy. S rostoucím obsahem živiny se výrazně zvyšuje i růst rostliny. Při dosažení optimální koncentrace se již přírůstek biomasy nezvyšuje a živina se může hromadit v pletivech. Jakmile je překročena hranice únosného obsahu, působí živina již negativně. Může omezovat růst, příjem dalších živin a při větších koncentracích působit i toxicky (Vaněk a kol., 2012).

Živiny musí být pro optimální růst rostlin vyvážené. Vysoký obsah jedné živiny může ovlivnit biologickou dostupnost druhé (Rakocy a kol., 2006). Maucieri a kol. (2019) uvádějí, že je dostupnost živin v bezpůdních pěstebních systémech vzájemně ovlivněna synergickými a antagonistickými vztahy (viz obr. 12). Z obrázku je zřejmé, že např. přebytek fosforu může blokovat vstřebávání K, Cu a Fe. Naopak vyšší obsah draslíku zlepšuje dostupnost Fe a Mn.



Obr. 12: Antagonistické (vlevo) a synergické vztahy (vpravo) mezi živinami (Maucieri a kol., 2019)

2.3.2 Nutriční požadavky rostlin

Ideální metodou diagnostiky nutričního stavu rostlin je periodické provádění tkáňových analýz a analýz živných roztoků. Výhodou tkáňové analýzy oproti analýze živin v roztoku je, že ukazuje, co rostlina skutečně absorbovala (Resh, 2013). Porovnáním naměřených hodnot s optimální úrovní živin (viz tab. 11) lze zajistit výživu odpovídající nutričním požadavkům jednotlivých druhů rostlin (Morgan, 2021).

Alternativou k nákladným a pomalým laboratorním analýzám je vizuální diagnostika symptomů nutričních deficitů (Resh, 2013). Nedostatek nebo nadbytek některé esenciální živiny se projeví specifickým symptomem. Mezi symptomy patří např. zpomalení růstu, chlorózy, nekrózy či deformace listů. Některé živiny (N, K, P, Mg, Zn) jsou v rostlině mobilní. V případě deficitu se přesouvají ze starších listů do

oblasti aktivního růstu, takže se příznaky deficitu projeví na starších listech. Deficit nemobilních živin (Ca, S, Fe, Mn, Cu, B) bude patrný nejprve na listech nových. Je však nutno zdůraznit, že pokud se tyto symptomy projeví, bude nějakou dobu trvat, než se zdravotní stav rostliny zlepší, případně může dojít i k jejímu poškození. Jakmile je porucha výživy identifikována, lze podniknout kroky k její nápravě. V případě hydroponie tedy následuje úprava živného roztoku, příp. rychlejší foliární aplikace. Díky ní se můžeme také vyhnout nežádoucí reakci mezi sloučeninami a vzniku špatně rozpustných komplexů. Nutriční požadavky vybraných rostlin jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 11: Obsah živin v tkáních zdravých rostlin (upraveno dle Resh, 2013; Saha a kol. 2016; Morgan, 2021)

Živina	Salát	Bazalka	Rajče	Jahoda
N (%)	3,0-6,0	5,21±0,11	4,5-5,5	2,6-3,5
P (%)	0,8-1,3	1,63±0,05	0,6-1,0	0,25-0,35
K (%)	5,0-10,8	0,69±0,02	4,0-5,5	1,0-2,0
Ca (%)	1,1-2,1	2,92±0,13	1,5-2,5	0,7-1,5
Mg (%)	0,3-0,9	0,45±0,02	0,4-0,6	0,25-0,40
S (%)	0,2-0,3	0,3±0,01	0,6-2,0	0,15-0,35
Na (%)	0,0-0,3	0,086±0,082	0,08-0,15	0,02-0,10
Fe (ppm)	130-600	99,1±3,8	80-150	100-200
Mn (ppm)	20-150	92,7±3,6	70-150	200-500
B (ppm)	25-40	37,6±1,6	35-60	30-100
Zn (ppm)	60-120	65,4±2,2	30-45	30-80
Cu (ppm)	7-17	15,9±0,74	4-6	5-12

Tab. 12: Nutriční požadavky vybraných rostlin (upraveno dle Resh, 2013; Resh, 2023)

Živina (mg·L ⁻¹)	Salát	Okurka			Rajče		
		I	II	III	A	B	C
N v NO ₃ ⁻	165	128	267	255	169	137	177
P v PO ₄ ³⁻	50	27	55	55	49	49	49
K	210	175	350	400	201	351	379
Ca	190	100	220	200	240	200	214
Mg	45	20	40	45	50	60	50
S v SO ₄ ²⁻	65	26	53	82	119	196	145
Fe	4	2	3	2	2,5	2,5	2,5
Mn	0,5	0,8	0,8	0,8	0,58	0,58	0,58
Cu	0,1	0,07	0,07	0,1	0,15	0,15	0,15
Zn	0,1	0,1	0,1	0,33	0,4	0,4	0,3
B	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
Mo	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05

Fáze: paprika – vývoj do první okurky (I), vývoj stonkových plodů (II), vývoj plodů na postranních výhonech (II); rajče - sadba (A), raný růst (B), plodící rostliny (C).

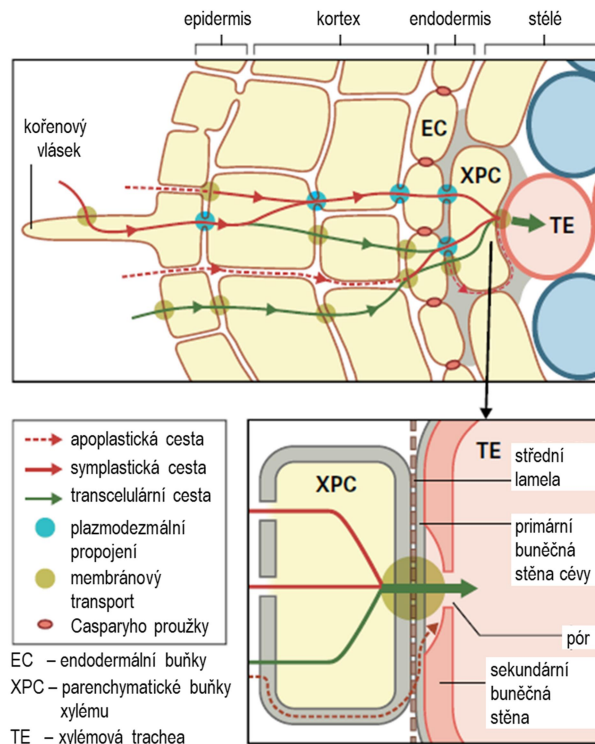
2.3.3 Příjem živin kořenovým systémem

Rostliny přijímají většinu živin z vodných roztoků (z půdy, substrátu či živných roztoků) ve formě iontů. Na příjmu živin se podílí především oblast kořenového vlášení, která až několiksetkrát zvyšuje povrch kořene. Ionty pronikají do mezibuněčných prostorů kořenů na principu difuze podmíněné osmotickými tlaky (Vaněk a kol., 2012).

Bhatla (2018) uvádí, že jakmile jsou živiny absorbovány kořeny, mohou dosáhnout cévních svazků třemi cestami: apoplastickou, symplastickou nebo transcelulární (viz obr. 13).

Apoplastická cesta prochází volnými prostory v buněčných stěnách a mezibuněčnými prostory. Je blokována Caspariho proužky v endodermis, které jsou impregnovány ligninem a suberinem. Slouží k regulaci příjmu vody a živin a současně chrání rostlinu před patogeny a toxiny.

Symplastická cesta začíná absorpcí živin z vnějšího prostředí do buňky epidermis přes plazmatickou membránu. Transport živin z buňky do buňky probíhá prostřednictvím plasmodezmálních propojení. Plasmodezmy jsou kanálky vystlané plazmolenou, které propojují sousední buňky skrze buněčnou stěnu. Plasmodezmou prochází výběžek endoplazmatického retikula (dezmotubulus). Na něm a na vnitřní stěně membrány se nacházejí proteiny, které vytvářejí jakési síto, na němž dochází k regulaci vstupujících látek podle velikosti molekuly.

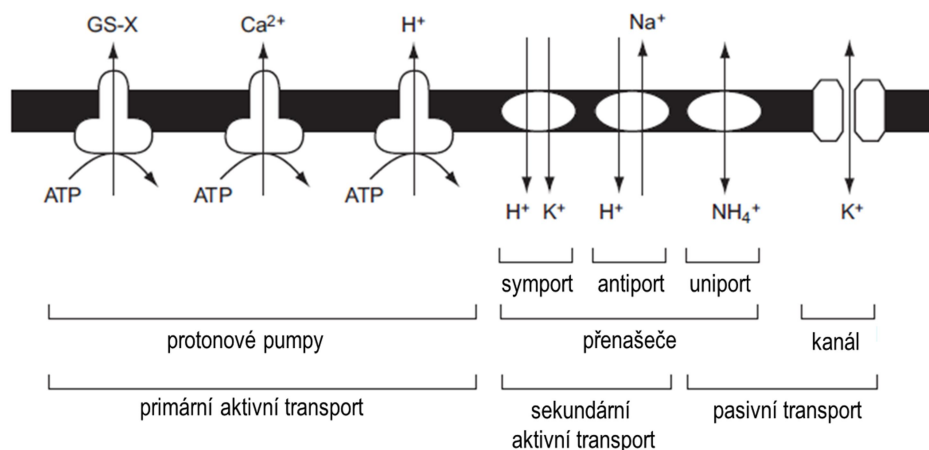


Obr. 13: Cesty živin v kořeni (Patrick a kol., 2015)

V případě transcelulární cesty musí živiny překonat plazmatickou membránu. Ta je hydrofobní povahy a je selektivně propustná. Volně propustná je např. pro molekuly CO_2 , N_2 a O_2 . Menší nenabitě molekuly (např. H_2O) mají omezenou propustnost. Nabité a větší molekuly (např. cukry) neprocházejí membránou přímo, ale prostřednictvím transportních proteinů zabudovaných do lipidové dvojvrstvy (Patrick a kol., 2015; Bhatla, 2018).

Coskun a White (2023) dělí transportní proteiny do tří skupin (viz obr. 14):

- Primární aktivní transportéry (protonové pumpy), které transportují rozpuštěné látky proti elektrochemickému gradientu pomocí hydrolyzy energetického substrátu (adenosintrifosfát, ATP).
- Sekundární aktivní transportéry, které využívají toku protonů H^+ pro přenos živiny proti jejímu elektrochemickému gradientu buď ve stejném směru (symport) nebo ve směru opačném (antiport).
- Pasivní transportéry, které katalyzují pohyb rozpuštěných látek ve směru elektrochemického gradientu.



Obr. 14: Transportní proteiny (Coskun a White, 2023)

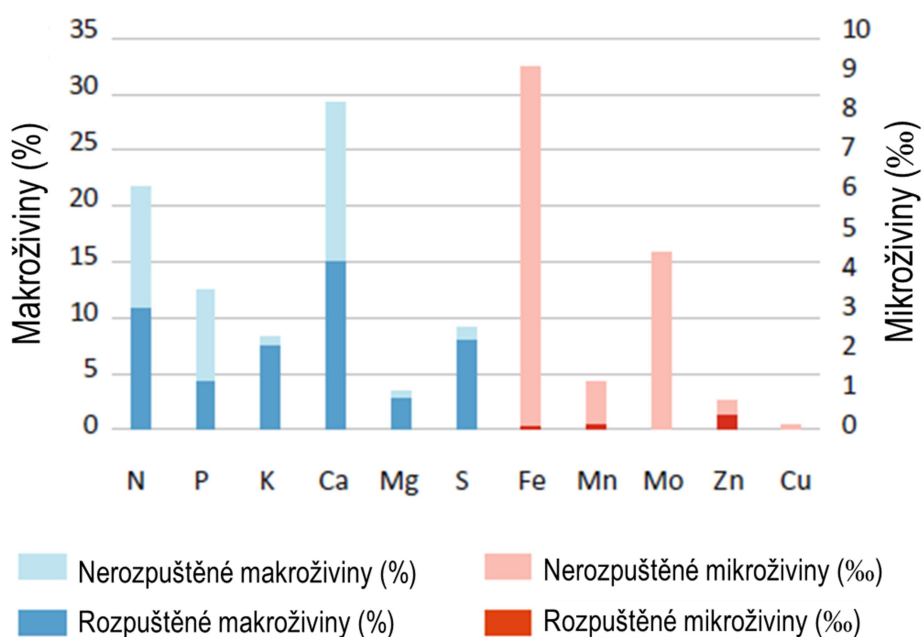
Vaněk a kol. (2012) odhadují, že za vteřinu pronikne kanálem 10^6 až 10^8 iontů, přenašečem cca 1000 iontů a pumpou okolo 100 iontů.

Transport vody a živin z kořenů do listů a výhonku probíhá především v xylému, a to na základě kořenového vztlaku a gradientu vodního potenciálu (White a Ding, 2023). Pro distribuci živin a asimilátů v rostlině má dále velký význam transport ve floému. Ten je řízen gradientem osmotického tlaku a může probíhat i proti gradientu vodního potenciálu (Schulze a kol., 2019). Tento mechanismus je využit i při mimokořenové výživě rostlin.

2.3.4 Specifika výživy rostlin v akvaponii

V akvaponických systémech je koncentrace živin pocházejících z produktů rybiho metabolismu výrazně nižší a nevyvážená ve srovnání s hydroponickými živnými roztoky (Maucieri a kol., 2019). Tyto systémy obvykle obsahují dostatek dusičnanů, ale pro optimální růst rostlin je nedostatečný obsah draslíku a fosforu. Také obsah vápníku a železa bývá limitován. Mezi koncentrací živin dodávaných do systému rybami a nutričními požadavky rostlin panuje silná nerovnováha (Lennard, 2017). Řada živin je také vázána v komplexních sloučeninách, a aby byly pro rostliny dostupné, musí být nejprve uvolněny do jednoduchých forem (Mráz a kol., 2018b). Aby akvaponické systémy fungovaly efektivně, je tedy nutno sledovat chemické složení procesní vody a přidávat živiny v koncentracích a poměrech odpovídajících požadavkům konkrétních druhů rostlin (Maucieri a kol., 2019).

Dalším specifikem akvaponie je, že se liší obsah živin v procesní vodě a kalech (viz obr. 15). Některé makroživiny (např. N, P, K) se vyskytují ve vodě i v sedimentech, ale např. Fe, Mn či Mo se zde nachází téměř výhradně v nerozpuštěné formě, a jsou tak pro rostliny nedostupné.



Obr. 15: Poměr rozpuštěných a nerozpuštěných živin (Palm a kol., 2019)

Lunda a kol. (2019) ve své práci prokázali, že pouze dusík je obsažen ve vodě i kalech v koncentraci dostatečné pro běžně pěstované rostliny (viz obr. 16). Naopak pro dosažení optimálních koncentrací např. draslíku je nutno zařadit doplňkové hnojení a mobilizaci draslíku z kalů.

Plodina	N		P		K		Mg		Ca		S		Fe		Zn		B		Cu		Mo	
	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG	WW	SLG
Okurka	Green	Green	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Green	Green	Yellow	Black	Red	Green	Yellow	Black
Chilli	Green	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Yellow	Green	Red	Black	Red	Green	Red	Black
Salát	Green	Green	Red	Green	Red	Yellow	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Green	Green	Yellow	Black	Red	Green	Yellow	Black
Rajče	Green	Green	Red	Green	Red	Yellow	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Yellow	Green	Red	Green	Yellow	Black	Red	Green	Yellow	Black

Green	plně adekvátní obsah, není nutná <u>suplementace</u>
Light Green	dostatečný obsah, není nutná <u>suplementace</u>
Yellow	nedostatečný obsah, nutná částečná <u>suplementace</u>
Red	deficientní obsah, nutná kompletní <u>suplementace</u>
Black	nedekovatelný obsah, nutná kompletní <u>suplementace</u>

WW – odpadní voda, SLG - kal

Obr. 16: Využitelnost živin z RAS v porovnání se standardní hydroponickou výživou (upraveno dle Lundy a kol., 2019)

Resh (2013) a Rakocy a kol. (2006) se shodují, že je v hydroponických systémech doporučován celkový obsah rozpuštěných látek (total dissolved solids, TDS) 1000-1500 ppm. To odpovídá vodivosti roztoku $1,5-3,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. V akvaponii stačí podstatně nižší hodnoty TDS (200-400 ppm), protože jsou živiny generovány nepřetržitě.

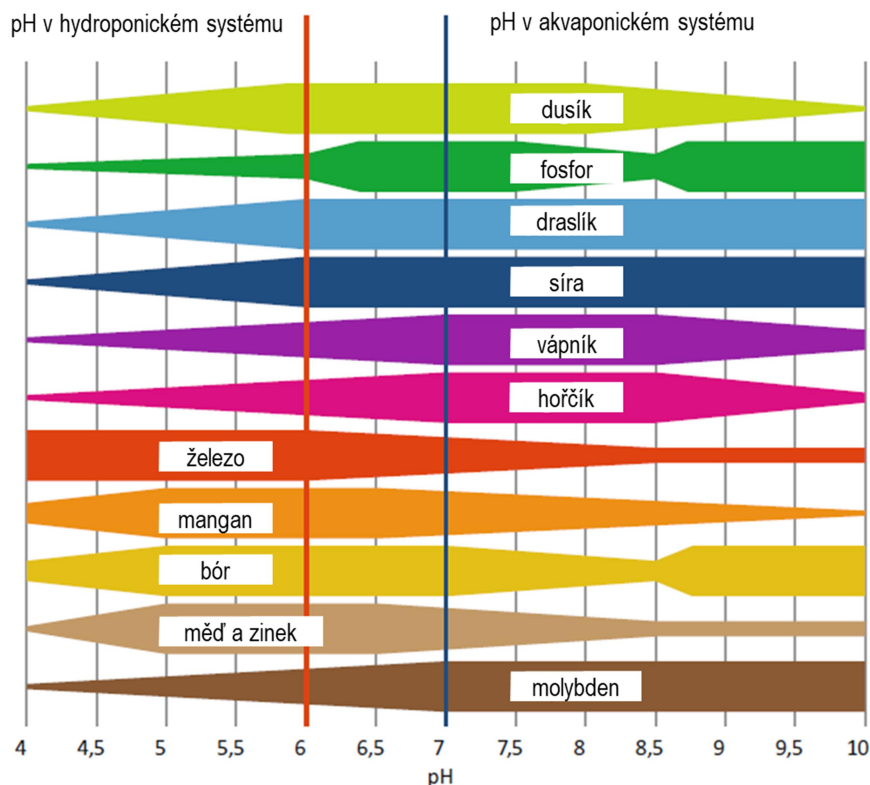
Problémem se naopak může stát fytotoxicita způsobená akumulací živin v důsledku překrmování, nedostatečné výměny vody či malé plochy pro pěstování rostlin. Jako hranice fytotoxicity je udávána hodnota 2000 ppm (Rakocy a kol., 2006).

Dostupnost živin je silně ovlivněna hodnotou pH. Většina rostlin potřebuje pro optimální využití živin pH 6,0-7,0 (Resh, 2013). Z obr. 17 je zřejmé, že při hodnotách vyšších klesá dostupnost např. železa, manganu, mědi či zinku. Naopak hodnoty pH nižší než 6,0 mohou způsobit deficit fosforu, vápníku, hořčíku či molybdenu. Rakocy a kol. (2006) a Meselmani (2022) konstatují, že akceptovatelný rozsah pH v hydroponických systémech je 5,5-6,5.

Somerville a kol. (2014) uvádí, že většina ryb využívaných v akvaponii toleruje pH v rozsahu 6,0-8,5. Současně však upozorňuje, že vyšší pH vede k vyšší toxicitě amoniaku. Optimální rozsah pH pro nitrifikaci je 7,0-9,0, přičemž nejvyšší účinnost je u horní hranice tohoto rozsahu (Rakocy a kol., 2006). V recirkulačních akvakulturních systémech se proto většinou udržuje pH okolo 7,5 (Lennard a Goddek, 2019).

V akvaponii je kompromisem mezi uvedenými rozdílnými požadavky rostlin, ryb a bakterií udržování pH okolo hodnoty 7,0 (Rakocy a kol., 2006), případně v rozmezí

6,0-7,0 (Somerville a kol., 2014). V dvousmyčkovém systému hledání tohoto kompromisu odpadá.



Obr. 17: Vliv pH na dostupnost živin (Lennard a Goddek, 2019)

Podle Rakocyho a kol. (2006) je v akvaponických systémech s jejich organickou zátěží extrémně důležité zajistit vysokou úroveň rozpuštěného kyslíku (dissolved oxygen, DO). Pokud je kyslíku málo, snižuje se kořenové dýchání. Důsledkem je omezená absorpce vody, a tím i příjem živin. Kyslík je však nezbytný pro všechny tři typy organismů v akvaponickém systému: rostliny, ryby i bakterie. Optimální obsah DO je 5-8 mg·L⁻¹ (Somerville a kol., 2014).

2.4 Voda a kaly v akvaponickém systému

Většina živin v akvaponickém systému pochází z krmiva pro ryby (Lennard, 2017). Ryby je transformují do tří forem:

- plynné – produkty žaber (CO₂, NH₃),
- kapalné – produkt ledvin (moč),
- pevné – produkt trávicí soustavy (pevné výkaly).

Tyto produkty spolu se zbytky krmiv mohou být využity jako zdroj živin pro rostliny. Současné komerční akvaponické farmy však většinou recyklují pouze odpadní

vody (Zhang a kol., 2021). Klíčovou roli při optimalizaci využití živin a zlepšování udržitelnosti akvaponických systémů tak tvoří mobilizace živin z kalu (Goddek a kol., 2016). Minimalizace množství odpadních látek vypouštěných do okolního prostředí a opětovné využití živin může mít značný ekologický a ekonomický přínos (Zhang a kol., 2020).

Charakteristickým rysem těchto odpadních látek je jejich nevyváženost z pohledu nutričních požadavků rostlin. Většinou jsou extrémně bohaté na dusík a chudé na ostatní živiny potřebné pro růst rostlin (Lennard, 2017).

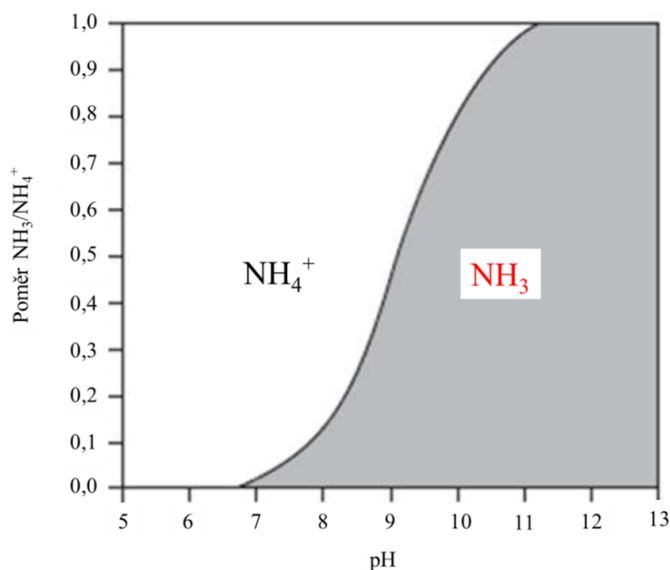
Zásadní je tedy nalézt optimální způsob výživy, který by vyhovoval rybám, rostlinám i bakteriím a který by zajistil ekonomicky efektivní provoz akvaponické farmy při zachování potravinové bezpečnosti a environmentální udržitelnosti.

2.4.1 Obsah živin v odpadní vodě a kalech z RAS

Dusíkaté látky

Hlavním zdrojem dusíkatých látek je amoniak, který je vedlejším produktem trávení bílkovin. U ryb tvoří až 96 % zplodin metabolismu dusíkatých látek. V závislosti na obsahu bílkovin, druhu a věku ryb může vzniknout asi 1 kg amoniaku z každých 45 kg přijaté potravy (Masser a kol., 2000).

V systému se amoniak může nacházet v toxické neiontové formě (NH_3) nebo v netoxické iontové formě (NH_4^+). Poměr obou forem je závislý na pH vody. Podíl toxické formy se rychle zvyšuje s růstem pH vody nad 7,0 (viz obr. 18). Při správném provozu akvaponického systému se pH pohybuje v rozmezí 6,5-7,4, při kterém je obsah NH_3 nízký a současně toto rozpětí vyhovuje nitrifikačním bakteriím (Lennard, 2017).

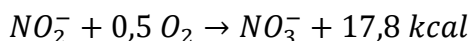
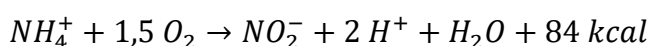


Obr. 18: Vliv pH na amonnou formu (upraveno dle Lennard, 2017)

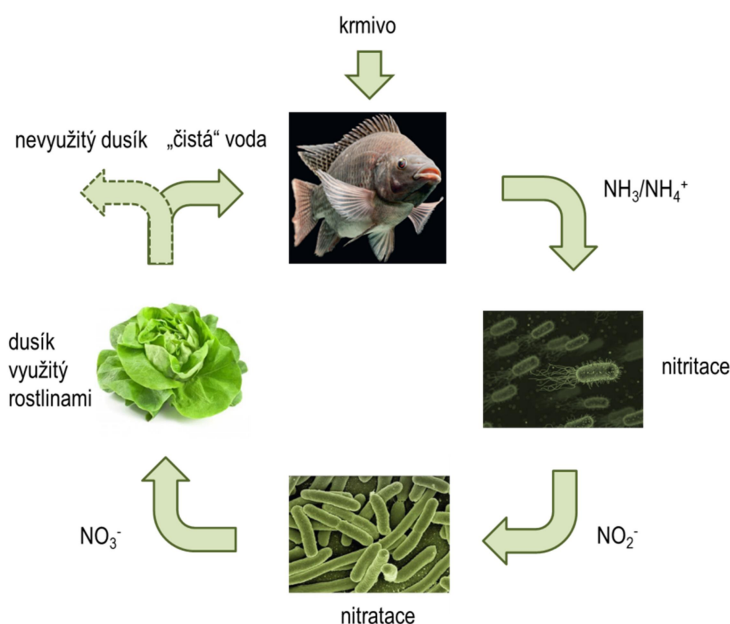
V akvaponických systémech závisí transformace dusíku na celé řadě faktorů, především však na obsahu kyslíku a organického uhlíku, které vytvářejí odpovídající podmínky pro konkrétní skupiny mikroorganismů (Schmautz a kol., 2021). Důležitý je také poměr C:N. Vysoké hodnoty vedou ke zvyšování počtu heterotrofních bakterií, které pak konkurují a dominují autotrofním bakteriím (Kasozi a kol., 2021).

V aerobním prostředí získávají heterotrofní bakterie energii z organického uhlíku uloženého v nerozpuštěných látkách (Palm a kol., 2019). Během tohoto procesu však spotřebovávají kyslík. Proto je odstraňování pevných látek důležitým parametrem ovlivňování kvality vody v RAS (Michaud a kol., 2009).

Autotrofní nitrifikační bakterie využívají v aerobním prostředí k získání energie oxidaci amoniaku. Nitrifikace probíhá ve dvou fázích. V první nejprve nitritační bakterie (např. *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* či *Nitrosovibrio*) přeměňují amoniak (NH_3) nebo amonný kationt (NH_4^+) na dusitany (NO_2^-). Ve druhé fázi nitratační bakterie (např. *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* a *Nitrospina*) transformují dusitany na dusičnany (NO_3^-) (Rurangwa and Verdegem, 2015; Wongkiew, 2017). Jednotlivé fáze lze popsat rovnicemi (Bernstein, 2011):

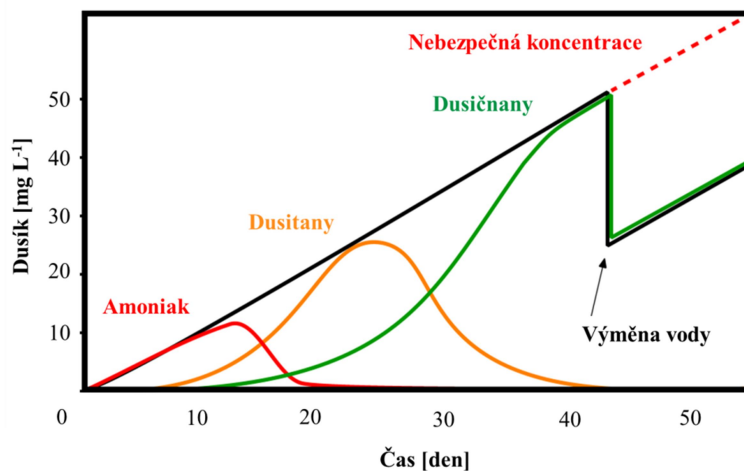


Přeměna toxického amoniaku na netoxické dusičnany probíhá v cyklu znázorněném na obr. 19.



Obr. 19: Cyklus dusíku v akvaponickém systému (obr. autor)

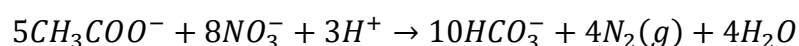
Dusíkaté látky se tudíž nacházejí v systému v několika formách. Průběh jejich koncentrace během zabíhání biofiltru je patrný z obr. 20.



Obr. 20: Forma dusíkatých látek (upraveno dle Halliday, 2007)

Nebezpečnou koncentraci dusíku lze v RAS snížit výměnou vody a vodu bohatou na dusičnany využít pro přípravu živného roztoku. Další možností snižování koncentrace dusíku může být anaerobní denitrifikace, která má však v akvaponii omezený význam, neboť během této transformace vzniká plynný dusík (N₂), který uniká do okolní atmosféry a nelze jej využít pro výživu rostlin.

Heterotrofní denitrifikaci, které se účastní např. bakterie *Pseudomonas sp.*, lze popsat rovnicí (Schreier a kol., 2010):



Odhaduje se, že nejvyšší ztráty dusíku v akvaponii (59-70%) jsou způsobeny právě denitrifikací (Yang a Kim, 2020). Dále dochází i ke ztrátám síry, protože vzniká plynný sirovodík (H₂S). Spotřebováváním vodíkových kationtů navíc dochází též k nežádoucímu růstu pH. Přítomnost anaerobních aktivit a mineralizace v akvaponických systémech tak vede k mnoha negativním důsledkům (Lennard, 2017). Oproti maximalizaci denitrifikace např. při čištění komunálních odpadních vod, je nutno považovat dusík v akvaponickém systému za cenný zdroj, který by měl být přeměněn na rostlinnou biomasu (Graber a Junge, 2009).

Anaerobní denitrifikaci by bylo možno využít pro výrobu energie (bioplynu) z kalů, ze kterých byly nejprve recyklovány živiny využitelné rostlinami v akvaponii. Tím by současně došlo ke stabilizaci a snížení hmotnosti kalu a v konečném důsledku i ke snížení nákladů na jeho případnou likvidaci (Delaide a kol., 2019). Bakteriálně nestrávený digestát lze použít v polních podmínkách jako hnojivo podporující tvorbu

humusu (Kotzen a kol., 2019). Odpadní voda z anaerobních vyhnívacích nádrží může sloužit jako zdroj živin pro růst některých mikrořas (*Chlorella sp.* apod.) ve smíšených systémech. Kromě snížení zatížení okolních ekosystémů odpadními vodami lze získat biomasu řas dále použitelnou jako krmivo, hnojivo, surovinu pro výrobu biopaliv apod. (Ayre a kol., 2017).

Fosfor (P)

Fosfor je po dusíku druhou nejdůležitější makroživinou v akvaponii (Joyce a kol., 2019). Ryby jej získávají z krmiva v dostatečném množství. Limitujícím faktorem je však fosfor pro rostliny, protože pro ně není v pevných odpadech často okamžitě biologicky dostupný. Rostliny potřebují anorganické iontové formy H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} . Tyto fosfáty váží při pH větším než 7,0 vápník, se kterým se sráží v nerozpustný fosforečnan vápenatý ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), který se ukládá v kalu (Becquer a kol., 2014).

Jak již bylo uvedeno výše, pevné látky je nutno co nejefektivněji odstraňovat z procesní vody před jejím dalším použitím. Jedním z důvodů je i ztráta živin, které se v těchto látkách nenacházejí ve formách dostupných pro rostliny. A právě u fosforu jsou tyto ztráty nejmarkantnější (Goddek a kol., 2019b).

Dostupné formy fosforu lze získat aerobní mineralizací kalů. Graber a Junge (2009) uvádějí, že v akvaponii je možno recyklovat až 50 % fosforu. Cerozi a Fitzsimmons (2017) prokázali, že v akvaponii bylo využito 71,7 % fosforu dodaného v krmivu pro ryby, přičemž ryby využily 42,3 % a rostliny 29,4 %. V odpadní vodě se však stále nacházelo přes 13 % fosforu ve formě nedostupné rybám i rostlinám. Podobně Yang a Kim (2020) pozorovali využití fosforu z krmiva až 62 %. Khiari a kol. (2020) upozorňují, že přítomnost fosforu v kalech signifikantně zpomaluje nástup nitrifikace.

Recyklace fosforu je též závažnou environmentální výzvou. Dochází totiž k tzv. „P paradoxu“, kdy se na jednu stranu vyčerpávají neobnovitelné zdroje fosfátových hnojiv a na druhou stranu se tato hnojiva významně podílejí na eutrofizaci vodních ekosystémů (Leinweber a kol., 2018).

Draslík (K) a vápník (Ca)

Draslík a vápník jsou makroživiny, které nejvíce limitují výživu rostlin v akvaponii. V krmivu pro ryby se nevyskytují v množství dostatečném pro růst rostlin. A to zejména v poměru k obsaženému dusíku a fosforu (Lennard, 2017). Do systému se obvykle dostávají prostřednictvím přísad pro úpravu pH vody (Mráz a kol., 2018b). Nejčastěji

používanou látkou v akvaponii je hydroxid draselný (KOH) a hydroxid vápenatý ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). To jsou nejvhodnější pufrы, které zajistí optimální růst rostlin a neovlivňují růst ryb a krmný koeficient (Lennard, 2017). Dávkují se obvykle několikrát týdně tak, aby se pH udrželo v blízkosti 7,0 (Rákocy a kol., 2006). Příliš velké množství Ca může způsobit již zmíněné vysrážení fosforu.

Graber a Junge (2009) pozorovali, že bez použití KOH, je obsah draslíku v akvaponické vodě 45 krát nižší, než v hydroponickém roztoku.

Větší množství K a Ca je vázáno v kalech. Draslíku je zde téměř 3 krát více a vápníku 10 krát více než v odpadní vodě (Lunda a kol., 2019).

Hořčík (Mg) a síra (S)

Ani hořčík a síra se v akvaponickém systému obvykle nevyskytují v množství potřebném pro rostliny. Nicméně, tyto živiny se zde většinou nacházejí ve formě nerozpuštěných látek, které lze po vhodné mineralizaci využít (Lennard, 2017). Lunda a kol. (2019) uvádějí, že v kalech se nachází 3-9 krát více síry než v odpadní vodě. Podle Rakocyho a kol. (2006) může být hořčík dodáván do systému také přípravky na úpravu pH (např. dolomitickým vápencem, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Ryby dokáží z krmiva využít cca 20,3 % Mg (Rafiee a Saad, 2005). Většina hořčíku skončí v kalu. Lunda a kol. (2019) naměřili v kalech 4 krát větší koncentraci Mg než v odpadní vodě. K podobným výsledkům dospěl také Zhang (2021), který uvádí, že v kalech pozoroval 89 % Mg. Delaide (2018) ve svém experimentu dokázal aerobní mineralizací z kalu uvolnit 57,49 % Mg.

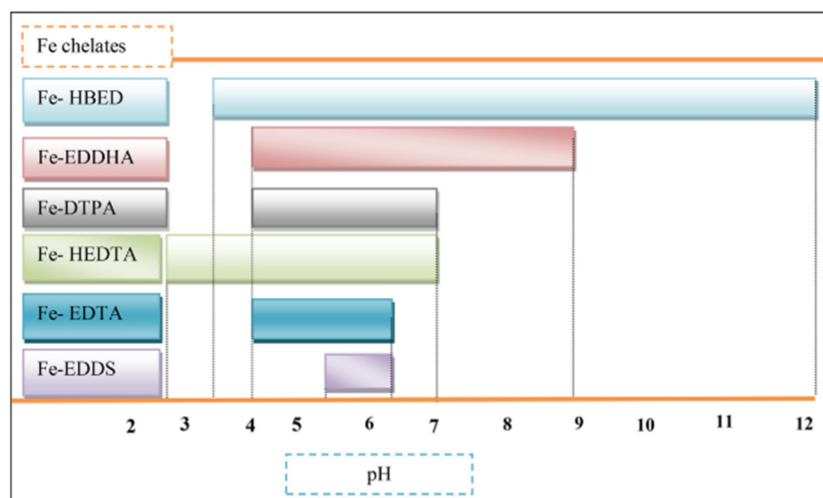
Mikroprvky

Železo (Fe), mangan (Mn) a zinek (Zn) pocházejí zejména z krmiv pro ryby, zatímco bór (B) a měď (Cu) z vodovodní vody (Delaide a kol., 2017). V akvaponii jsou obvykle přítomny, ale v nedostatečném množství.

Zejména nedostatky Fe jsou velmi časté většinou proto, že se zde železité ionty nacházejí ve formě nedostupné pro rostliny. Fe je tedy nutno do systému dodávat v rozpustné formě využitelné pro rostliny. Kasozi a kol. (2019) doporučují využívat cheláty, ale současně upozorňují na důležitost vhodného výběru zejména s ohledem na jejich stabilitu při různých hodnotách pH (viz obr. 21) a další vlastnosti.

Např. Fe-EDTA je mírně toxický, Fe-HEDTA a Fe-EDDS rychle degradují. Fe-HBED je nejsilnější a nejstabilnější forma v širokém rozsahu pH, ale o jejím využití

v akvaponii zatím existují jen omezené informace. Nejvhodnější je tak Fe-DTPA pro pH 4-7 a Fe-EDDHA pro pH 4-9.



Obr. 21: Rozpustnost chelátů Fe v závislosti na pH (Kasozi a kol., 2019)

Další možností je suplementace Fe kyselinou fulvovou, což je organická látka přirozeně se vyskytující v půdě a vodních systémech, která má chelatační účinky. Je kompatibilní se všemi formami vodních organismů. Cerozi (2020) dokázal v jednosmyčkovém akvaponickém systému solubilizovat 59 % Fe dávkou $690 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ kyseliny fulvové. Navíc Gao a kol. (2017) prokázali, že tato kyselina zlepšuje růst ryb, střevní trávicí aktivity, imunitu a diverzitu střevní mikroflóry. Optimální dávka v krmivu pro juvenilní sekavce thajské (*Paramisgurnus dabryanus*) je 1,64 %. Dále lze získat dostupné Fe např. využitím bakteriálních sideroforů produkovaných rody *Bacillus* nebo *Pseudomonas* (Bartelme a kol., 2017).

Lunda a kol. (2019) konstatují, že je obsah mikroživin v kalech extrémně variabilní a závisí na velikosti farmy a intenzitě kultury. Jejich koncentrace je obvykle 5-17 krát vyšší v kalech než v odpadní vodě. Výjimkou je sodík (Na), jehož je v kalech o více než 60 % méně než v odpadní vodě.

2.4.2 Úprava odpadní vody a kalů

Jedním z nejvýznamnějších rysů akvaponie je recyklace živin. V akvaponii je cenným zdrojem živin kal z mechanické filtrace a sedimentace a odpadní voda obsahující nerozpuštěné částice.

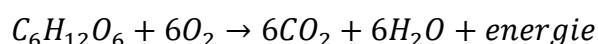
Mezi nerozpuštěné látky patří zejména výkaly, zbytky krmiv, uhynulé ryby či jiné organické i anorganické částice (Mráz a kol., 2018a). Podle velikosti je můžeme rozdělit na:

- sedimentující (> 100 μm),
- suspendované (< 100 μm),
- jemné pevné látky (< 30 μm).

Sedimentující látky lze z vody odstranit snadno pomocí jednoduchých sedimentačních zařízení (např. sedimentační nádrže či vortexy). Suspendované částice se odstraňují pomocí mechanické filtrace (např. bubnové či diskové filtry), nejjemnější částice pak např. pomocí pískových filtrů či flotace. Běžná je kombinace bubnového filtru v RAS a jemné pískové filtrace před vstupem do hydroponické části, aby nedocházelo k zanášení hydroponických jednotek a kapénkových systémů zavlažování.

Hlavním cílem recyklace živin je získání závlahové vody bez pevných látek, ale bohaté na solubilizované živiny, které lze využít pro výživu rostlin (Delaide a kol., 2019). Nerozpuštěné částice ve vodě a kal se skládají především z rozložitelných látek organického charakteru, které se zde nacházejí v komplexních sloučeninách (proteiny, lipidy, sacharidy apod.). Tyto látky lze mikrobiálně degradovat na ionty živin dostupných pro rostliny. Tento jev se nazývá mineralizace. Rozlišujeme dva základní typy mineralizace: aerobní a anaerobní.

Aerobní mineralizace je proces, při němž dochází k oxidaci organické hmoty dýcháním heterotrofních organismů (Delaide a kol., 2019). To lze popsat rovnicí:



Lennard (2017) uvádí, že pokud je nasycení kyslíkem alespoň 80 % a maximální množství nerozpuštěných látek 3000 (optimálně 2500) mg·L⁻¹, trvá mineralizace při teplotě 20 °C asi 30 dní.

Podle Mráze a kol. (2018b) mohou být zařízení pro aerobní mineralizaci poměrně jednoduchá a levná. V podstatě to může být jen vhodně velká nádrž doplněná o aeraci. Aerace zajišťuje nejen dostatek kyslíku, ale kaly také míchá a napomáhá k jejich počátečnímu mechanickému rozkladu (Lennard, 2017). Pro mineralizaci lze použít vsázkový nebo kontinuální systém, při kterém je denně z nádrže odebrán objem vody odpovídající objemu kalů, který byl do nádrže dodán.

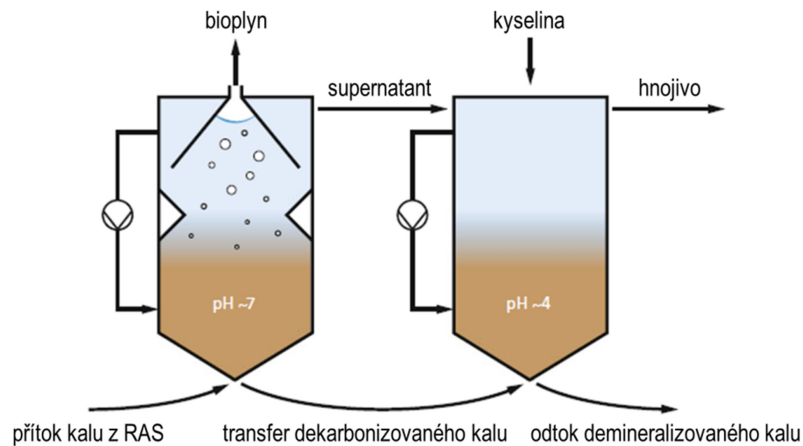
K aerobní mineralizaci dochází přirozeně i v RAS. Zde však není vítaná, protože odčerpává kyslík, a proto je nutno co největší množství nerozpuštěných látek z vody v RAS odstranit co nejdříve (Mráz a kol., 2018b).

Výhodou aerobní mineralizace je jednoduchý provoz bez nutnosti další reoxygenace. Vodu tak lze použít přímo pro přípravu živného roztoku (Delaide a kol.,

2019). Nevýhodou je vysoká spotřeba energie na aeraci (Zhang, 2021). Rychlost růstu mikroorganismů je v aerobních podmínkách mnohem rychlejší než v anaerobních, takže je produkováno velké množství biomasy, která se akumuluje v reaktoru, místo aby z ní zůstala degradovaná organická hmota jako v anaerobních podmínkách (Delaide, 2018).

Anaerobní mineralizace probíhá za nepřítomnosti kyslíku. Jak již bylo uvedeno, anaerobní procesy nejsou v akvaponii příliš žádoucí, neboť při nich dochází ke ztrátě části živin. Také Monsees a kol. (2017a) doporučují na základě svých experimentů nenáročné aerobní ošetření jako efektivní způsob mobilizace živin bez vzniku nežádoucích vedlejších produktů.

Oproti tomu Goddek a kol. (2018) uvádějí, že anaerobní mineralizace pracující při nízkém pH může přispět ke zlepšení recyklace živin ve vícesmyčkových systémech a ke snížení aditiv pro řízení pH. Jung a Lovitt (2011) při svém experimentu dokázali v anaerobním prostředí při pH 4 mobilizovat 90 % živin. Delaide a kol. (2019) konstatují, že vzhledem k tomu, že mikroorganismy pracují nejlépe při pH 6-8 a vyplavování živin je nejintenzivnější při nízkých hodnotách pH, bylo by nejúčinnější rozdělit tento proces do dvou kroků (viz obr. 22).



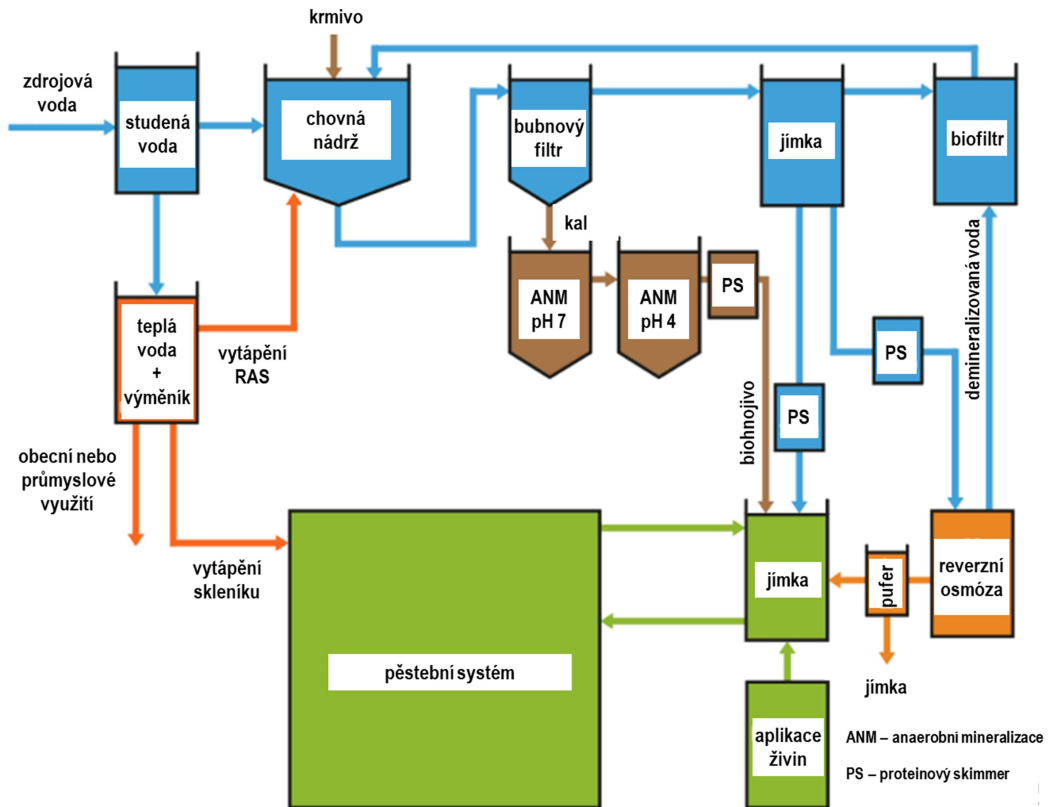
Obr. 22: Dvoustupňová anaerobní mineralizace (Delaide a kol., 2019)

Mezi nevýhody anaerobní mineralizace patří, kromě ztráty části živin, dlouhá reakční doba a nároky na podmínky (např. teplota, salinita, pH a poměr C:N). Výhodou je méně zbytkového kalu, menší spotřeba elektrické energie a možnost produkce bioplynu (Zhang, 2021).

Cílem obou způsobů mineralizace je tedy extrahovat živiny z pevných částic a vrátit je do systému ve formě dostupné pro rostliny (Eck a kol., 2019).

Další technikou pro lepší využití živin je zvyšování jejich koncentrace odstraněním části vody, v níž jsou rozpuštěny. Do vícesmyčkových akvaponických systémů jsou tak

zařazovány odsolovací jednotky pracující na různých principech: elektrickém, mechanickém (např. reverzní osmóza), tepelném (např. destilace), chemickém (např. iontoměnič) či magnetickém (Goddek a Keesman, 2020). Celý systém pak může vypadat např. jako na obr. 23.



Obr. 23: Vícesmyčkový akvaponický systém s anaerobní mineralizací a reverzní osmózou, (Goddek a Keesman, 2020)

2.4.3 Možnosti doplnění živin v akvaponickém živném roztoku

Příprava akvaponického živného roztoku spočívá ve smíchání předfiltrované akvakulturní vody a vhodných anorganických solí podle nutričních požadavků jednotlivých druhů rostlin a jejich vývojových fází. Pro výpočet přesného množství živin, které je nutno přidat, je ovšem nutno znát množství živin obsažených v akvakulturní vodě (Mráz a kol., 2018b). Některé živiny (zejména K a Ca) se do ní dostávají již prostřednictvím přípravků na úpravu pH.

Přehled vybraných anorganických solí s dobrou rozpustností běžně používaných v hydroponii je uveden v tab. 13. Obsah živiny je odvozen od podílu atomové hmotnosti prvku na celkové molekulové hmotnosti sloučeniny. Při výpočtu složení živného roztoku je nutno zohlednit také čistotu solí podle údajů deklarovaných výrobcem (Resh, 2013).

Tab. 13: Anorganické zdroje živin používané v hydroponii (upraveno dle Resh, 2013)

Živina	Sloučenina	Vzorec	Iont	Obsah živiny (%)	Rozpustnost (sůl:voda)	EC ^a (mS.cm ⁻¹)
N	dusičnan draselný	KNO ₃	NO ₃ ⁻	13,85	1:4	2,5
	dusičnan vápenatý	Ca(NO ₃) ₂	2NO ₃ ⁻	17,1	1:1	2,0
P	dihydrogenfosforečnan draselný	KH ₂ PO ₄	H ₂ PO ₄ ⁻	22,8	1:3	1,3
K	dihydrogenfosforečnan draselný	KH ₂ PO ₄	K ⁺	28,7	1:3	1,3
	síran draselný	K ₂ SO ₄	2K ⁺	44,9	1:15	2,4
Ca	dusičnan vápenatý	Ca(NO ₃) ₂	Ca ₂ ⁺	24,4	1:1	2,0
Mg	síran hořečnatý	MgSO ₄ .7H ₂ O	Mg ²⁺	9,86	1:2	1,2
S	síran draselný	K ₂ SO ₄	SO ₄ ²⁻	18,4	1:15	2,4
	síran hořečnatý	MgSO ₄ .7H ₂ O	SO ₄ ²⁻	13,0	1:2	1,2
Fe	chelát železa	FeDTPA	Fe ²⁺	10,0	vysoce rozpustný	-
B	kyselina boritá	H ₃ BO ₄	B ³⁺	17,5	1:20	1,8
Cu	síran měďnatý	CuSO ₄ .5H ₂ O	Cu ²⁺	25,4	1:5	-
Mn	síran manganatý	MnSO ₄ .4H ₂ O	Mn ²⁺	24,6	1:2	1,55
	chelát manganu	MnEDTA	Mn ²⁺	5,0	vysoce rozpustný	-
Zn	síran zinečnatý	ZnSO ₄ .7H ₂ O	Zn ²⁺	22,7	1:3	-
	chelát zinku	ZnEDTA	Zn ²⁺	9,0	vysoce rozpustný	-
Mo	molybdenan amonný	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	Mo ⁶⁺	57,7	1:2,3	-

^a roztok 0,2 %, platí pro teplotu 25 °C

Pro výpočet potřebného složení živného roztoku se běžně používá specializovaný software (Mráz a kol., 2018b). Jednou z možností je např. program Hydrobuddy, který je zdarma ke stažení (viz www.scienceinhydroponics.com). Je uživatelsky přívětivý a kromě výpočtu receptur umožňuje např. predikci EC a pH, dále obsahuje knihovnu hnojivých solí, databázi analýz listových tkání apod.

Aby se zabránilo nežádoucím reakcím mezi jednotlivými komponenty roztoků, je nutno vytvořit minimálně dva zásobní roztoky (A a B). Tyto reakce probíhají především mezi vápníkem a fosfáty či sírany, v důsledku čehož vznikají špatně rozpustné sraženiny (Mattson a Lieth, 2019; Morgan, 2021).

Zásobní roztoky jsou koncentrované živné roztoky (Resh, 2013). Stupeň koncentrace zásobního roztoku je závislý na rozpustnosti jednotlivých solí. Nejméně rozpustná sůl bude limitujícím faktorem pro celý zásobní roztok. S ohledem na uvedené skutečnosti navrhuje Resh (2013) zásobní roztoky uvedené v tab. 14.

Tab. 14: Rozdělení solí v zásobních roztocích A a B (Resh, 2013)

Zásobní roztok	Sloučenina	Rozpustnost (g·100 mL ⁻¹ studené vody)
A	dusičnan draselný ^a	13,3
	dusičnan vápenatý	121,2
	dusičnan amonný	118,3
	kyselina dusičná	bez omezení
	chelát železa	snadno rozpustný
B	dusičnan draselný	13,3
	síran draselný ^a	12,0
	dihydrogenfosforečnan draselný	33,0
	kyselina fosforečná	548
	síran hořečnatý	71

^a Nejméně rozpustné sloučeniny limitující koncentraci celého zásobního roztoku. Případné mikroživiny nebyly uvedeny v roztoku B, protože budou aplikovány ve velmi malých množstvích, která nepřekročí jejich rozpustnost při 200x koncentraci.

Morgan (2021) uvádí složení zásobních roztoků pro konkrétní rostliny (viz tab. 15).

Tab. 15: Zásobní roztoky pro salát a rajče (g·100 L⁻¹), (Morgan, 2021)

Zásobní roztok	Sloučenina	Salát	Rajče (vegetativní fáze)	Rajče (generativní fáze)
A	dusičnan vápenatý	8036	16844	14835
	dusičnan draselný	1196	2897	5828
	chelát železa (12 % Fe)	500	500	500
B	dusičnan draselný	1196	2897	5828
	fosforečnan draselný	1337	3016	4952
	síran hořečnatý	3511	6590	8962
	síran manganatý	98,4	105	105
	kyselina boritá	39	40	45
	síran zinečnatý	11	12,4	12,4
	síran měďnatý	3	3	3
	molybdenan amonný	1,01	1,01	1,3
EC (mS·cm ⁻¹) po zředění 1:00		1,4	3,0	3,8

Resh (2013), Lennard (2017) a Morgan (2021) se shodují, že celkové množství živin v živném roztoku lze vyjádřit jako celkové množství rozpuštěných živin (total dissolved solids, TDS) vyjádřené v ppm (příp. mg·L⁻¹), nebo jako schopnost roztoku vést elektrický proud (electrical conductivity, EC) vyjádřenou v mS·cm⁻¹.

Lennard (2017) však upozorňuje, že v akvaponii se část živin vyskytuje ve složitých organických molekulách bez elektrického náboje, takže EC neposkytuje informaci o celkovém množství živin v akvaponické vodě. Na základě dlouholetých měření odhaduje tento autor, že v zaběhnutém systému tvoří nabití ionty cca 60 %

z celkového množství živin a zbývajících 40 % jsou nenabité organické živiny. Resh (2013) dodává, že se liší také EC jednotlivých solí (viz tab. 14) a je dále ovlivněna i teplotou.

Jak již bylo řečeno, v hydroponii se doporučuje EC v rozmezí 1,5-3,5 mS·cm⁻¹ (Resh, 2013). Doporučené hodnoty EC pro konkrétní rostliny jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16: Doporučené hodnoty EC (mS·cm⁻¹) pro vybrané rostliny (upraveno dle Morgan, 2021)

Rostlina	Léto	Zima
salát (sadba)	0,5-0,8	0,8-1,0
bazalka	2,0-2,5	2,3-2,8
rajče (vegetativní fáze)	1,8-2,5	2,3-2,7
rajče (generativní fáze)	2,3-3,5	3,0-4,0
jahody (vegetativní fáze)	1,6-2,0	2,0-2,5
jahody (generativní fáze)	1,8-2,5	2,0-2,5

Další možností doplnění živin do hydroponické části je úprava složení krmiva pro ryby. Tedy vytvoření takového krmiva, které by splňovalo nároky na živiny ryb i rostlin při udržitelném provozu celého systému (např. s ohledem na biofiltr a kvalitu vody).

Jednou z možností je suplementace chybějících živin do krmiva. Robaina a kol. (2019) navrhuje zaměřit se na tři specifické typy přísad:

- Minerální doplňky přidávané přímo do krmiva.
- Sloučeniny iontů, kde je jeden iont cíleně využit ve výživě ryb a doprovodný iont by bylo možno využít pro výživu rostlin (např. soli organických kyselin).
- Doplňky, které zvyšují biologickou dostupnost živin pro rostliny (např. enzymy).

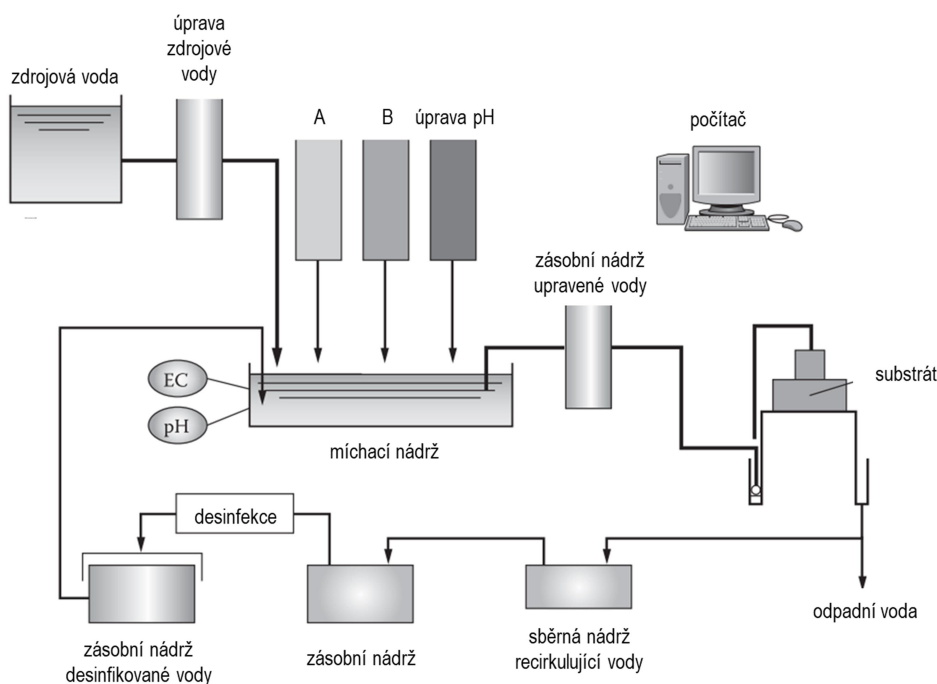
Dalším možným přístupem je manipulace s úrovní živin prostřednictvím jejich alternativních zdrojů. Např. Gebauer a kol. (2023) prokázali účinnost této metody na alternativních zdrojích proteinů (blíže viz kap. 2.5).

Podle Lennarda (2017) je úprava krmiva teoreticky dobrý nápad, který však naráží na řadu praktických problémů. Prvním z nich je obava, zda ryby zdravotně zvládnou zvýšené koncentrace látek, které nepotřebují. Další otázkou je, jak budou ryby tyto živiny metabolizovat, v jaké formě je vyloučí a zda budou pro rostliny dostupné. Dále není např. jasné, jak budeme ovlivňovat pH klesající v důsledku nitrifikace, pokud zvýšíme obsah Ca a K již v krmivu. A v konečném důsledku, zda to vše nezvýší náklady na krmivo do takové míry, že nebude akvaponie ekonomicky životaschopná.

Gebauer a kol. (2023) proto navrhuje kombinovat alternativní složky krmiv, suplementaci živin potřebných pro ryby, ovlivňování pH pomocí KOH nebo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a případně doplňovat chybějící živiny ve formě chelátu nebo listového hnojiva.

Lennard (2017), Robaina a kol. (2019) a Gebauer a kol. (2023) se shodují, že je v tomto ohledu potřeba dalšího důkladného výzkumu. Dokud nebudou výše uvedené otázky zodpovězeny, zdá se tedy být pro běžného uživatele (farmáře) v praxi zatím nejefektivnější maximalizovat využití živin z akvakulturní vody a kalů, které se tam již vyskytují a na základě jejich analýzy do hydroponické smyčky přesně dávkovat optimální dávky živin, které chybí.

Pro aplikaci živin lze použít počítačem řízené automatické dávkování roztoku na úpravu pH a zásobních roztoků na základě monitorování EC a pH. Pro úpravu pH navrhuje Resh (2013) používat např. kyselinu sírovou (H_2SO_4) nebo KOH. Somerville a kol. (2014) doporučují na snížení pH spíše kyselinu dusičnou (HNO_3) a kyselinu fosforečnou (H_3PO_4), které nejsou tak agresivní. Současně však upozorňují, že H_3PO_4 může zvýšit koncentraci fosforu na nežádoucí úroveň. Podle Vaňka a kol. (2012) se v moderních systémech stanovují selektivními elektrodami také koncentrace nejvýznamnějších iontů. Princip recirkulačního hydroponického systému včetně desinfekční části je zřejmý z obr. 24. Velké komerční systémy mohou mít navíc samostatné nádrže pro aplikaci anorganických solí, které dodávají jednotlivé makroživiny.



Obr. 24: Příklad možné sestavy hydroponické části (upraveno dle Resh, 2013)

2.4.4 Negativní a pozitivní látky a faktory v akvaponické vodě a možnosti jejich ovlivnění

Jedním z hlavních **negativních** faktorů omezujících využití recirkulační vody je akumulace solí, jejichž ionty nejsou využity rostlinami. To platí zejména pro chlorid sodný (NaCl) obsažený v krmivech pro ryby (Maucieri a kol., 2019). Obvykle se NaCl do krmiv dostává prostřednictvím rybí moučky a rybího oleje (Ebeling a Timmons, 2012).

Do systému se sodík dále může dostat zdrojovou vodou. Je tedy nutno znát její složení a pro její úpravu použít např. reverzní osmózu, příp. využít dešťovou vodu. Koncentrace Na^+ by neměla v hydroponické části překročit $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Rakocy a kol. 2006). Z tohoto důvodu také není vhodné používat pro regulaci pH hydrogenuhličitán sodný (NaHCO_3), který se jinak v RAS běžně používá (Lennard, 2017). Také aplikace NaCl, která se běžně používá proti stresu a jako prevence proti chorobám ryb (Goddek a Vermeulen, 2018), je nežádoucí.

Akumulaci Na v jednosmyčkovém systému potvrdili např. Delaide a kol. (2017). Během jejich experimentu se obsah Na zdvojnásobil z $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ na $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, protože jej rostliny (*O. basilicum* a *L. sativa*) nevyužily, a zvýšená koncentrace musela být řešena výměnou vody.

Velký vliv na řešení eliminace těchto solí má využití dvousmyčkového akvaponického systému a správné nadimenzování a vyvážení akvakulturní a hydroponické část. Případná odsolovací smyčka může zajistit zvýšenou koncentraci živin do hydroponické části a současně snížit nežádoucí účinky na zdraví ryb v RAS (Goddek a kol., 2019b).

Ke snížení obsahu NaCl může přispět používání speciálních krmiv pro akvaponii či pěstování rostlin, které jsou na zasolení tolerantnější (Robaina a kol., 2019). Z běžně pěstovaných rostlin je to např. lilek rajče (*Solanum lycopersicum*), paprika roční (*Capsicum annuum*), červená řepa (*Beta vulgaris*), zelí hlávkové (*Brassica oleracea*) a bazalka pravá (*Ocimum basilicum*). Z netradičních druhů, které získávají na oblibě, to mohou být halofitní rostliny slanorožec evropský (*Salicornia europaea*), katrán přímořský (*Crambe maritima*) či lebeda šruhovitá (*Atriplex portulacoides*) (Palm a kol., 2019).

Toleranci vůči zasolení prokázal i *L. sativa*. Goddek a Vermeulen (2018) srovnávali růst salátu v hydroponických a akvaponických podmínkách. Přestože ve vodě z RAS bylo $3,07 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}^+$ (oproti $0,49 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ v hydroponii), rostl zde salát rychleji

a hmotnost jeho sušiny byla o 33,2 % vyšší než hmotnost salátu v konvenčním hydroponickém systému. Možným vysvětlením tohoto jevu je prospěšná interakce mezi mikroorganismy nacházejícími se ve vodě z RAS a kořeny rostlin.

Dalším potenciálním rizikem je akumulace těžkých kovů v akvaponickém systému. Martins a kol. (2011) však prokázali, že při výměně vody 30 L na 1 kg krmiva, nedochází k akumulaci, která by ohrozila lidské zdraví. To potvrzují svými výsledky i Lunda kol. (2019), kteří zkoumali kaly a odpadní vodu ve třech RAS. Koncentrace všech testovaných těžkých kovů (As, Cd, Hg, Pb, Ni, Cr) byla významně pod povolenými limity. Podle Junga a Lovitta (2011) je možno k případnému snížení obsahu těžkých kovů a dalších rizikových látek úspěšně aplikovat vyluhování kalu kyselinou chlorovodíkovou nebo organickými kyselinami (např. mléčnou nebo octovou). Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo anaerobní fermentací s přidavkem glukózy ($15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) a bakterie *Lactobacillus plantarum*, která se běžně používá ve startovacích kulturách při výrobě siláže. Takto ošetřený kal vykazoval po sedmi dnech nízký obsah těžkých kovů (např. Cd $0,001 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cr $0,006 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb $0,013 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) a současně bylo solubilizováno např. 81,9 % P, 92,2 % Fe či 96,4 % Ca.

K eliminaci negativních faktorů v akvaponii lze využít i alternativních přístupů. Jedním z nich je kultivace řas. Biofilmy z mikrořas mohou pozitivně ovlivnit např. salinitu a toxicitu kovů (Wijihastuti a kol., 2017). Obsah těžkých kovů může být snížen i využitím technologie biofloc (Deswati a kol., 2022).

Základním **pozitivním** přínosem dobře ošetřené akvaponické vody a kalů je, že jsou cenným zdrojem dostupných živin.

Dále obsahují velké množství organických látek (např. vitaminy, organické kyseliny, hormony, enzymy, aminokyseliny a další metabolity), které jsou rostlinami absorbovány a asimilovány (Rakocy a kol., 2006). Tyto sloučeniny stimulují růst, zvyšují výnosy a obsah vitaminů a minerálů, zlepšují chuť a brání rozvoji patogenů. Různé frakce rozpuštěné organické hmoty (např. huminové kyseliny) tvoří organokovové komplexy s Fe, Mn a Zn, čímž zvyšují dostupnost těchto živin pro rostliny. Na druhou stranu vysoké množství organických látek posouvá bakteriální komunitu od nitrifikačních bakterií směrem k heterotrofním bakteriím (Lennard, 2017).

V akvaponickém systému se dále nachází široké spektrum mikroorganismů podporujících růst rostlin (plant growth promoting microflora, PGPM). Tyto mikroorganismy (bakterie, houby apod.) hrají důležitou roli v růstu a zdraví rostlin

(Lennard, 2017). S tím souhlasí Bartelme a kol. (2018), kteří upozorňují, že výzkum PGPM v akvaponii zaostává za tradičním zemědělstvím.

Důležitou roli v oblasti biopesticidů a stimulátorů růstu hrají např. bakterie rodu *Bacillus* (Shafi a kol., 2017). Prospěšnost bakterií *Bacillus* spp. v akvaponii prokázali Cerozi a Fitzimmons (2016). Jednosmyčkový systém (*O. niloticus*, *L. sativa*) inokulovaný touto bakterií vykazoval rychlejší pokles amoniaku, rychlejší nárůst dusitanů a dusičnanů a také vyšší solubilizaci P oproti kontrole. Rostliny tak rostly rychleji a obsahovaly více chlorofylu. Kasozi a kol. (2022) zkoumali v obdobném systému vliv *Bacillus* spp. na epifytické bakteriální komunity. Prokázali, že se oproti kontrole v ošetřené variantě vyskytuje méně patogenních bakterií *Shigella* a *Aeromonas*.

Sporná je otázka eliminace patogenů. Podle Reshe (2013) hrozí v recirkulačních systémech vždy riziko infekce. Účinná desinfekce by tedy měla být součástí hydroponické smyčky (viz obr. 24). Mráz a kol. (2018a) a Morgan (2021) uvádějí jako vhodnou metodu UV záření a ozonizaci. Podle Reshe (2013) lze efektivně využít i pasterizaci vody (95-97 °C, 30 s). Také v RAS se zejména UV záření a ozonizace běžně používají (Timmons a Vinci, 2022).

Podle Lennarda (2017) by akvaponie, na rozdíl od konvenční hydroponie a RAS, měla využívat dobře rozvinuté ekologické komunity PGPM, které by však byly při použití desinfekčních metod hubeny. Rakocy a kol. (2006) uvádí, že rostliny pěstované v akvaponii jsou odolnější vůči chorobám, než rostliny pěstované v hydroponii, a to právě díky prostředí se širokou diverzitou mikroorganismů, které mohou být antagonistické vůči rostlinným patogenům.

Současné vědecké i praktické uvažování v akvaponii tedy směřuje k tomu nepoužívat žádné formy sterilizace či dezinfekce, aby se tak mohl vyvíjet přirozený ekosystém, v němž díky vysoké rozmanitosti neexistuje jediný dominantní patogen, který by měl devastující účinky na ryby nebo rostliny (Lennard a Goddek, 2019).

2.5 Současný stav výzkumu akvaponických krmiv

Rané pokusy formulovat akvaponická krmiva se zaměřovaly na zvyšování odtoku živin (efflux) prostřednictvím přísad, jako je např. chlorid draselný (KCL) nebo diformát draselný (KDF). Odtok živin a jejich nutriční hodnotu však lze ovlivňovat i alternativními zdroji proteinů, čímž se současně řeší též udržitelnost a cena těchto krmiv. Gebauer a kol. (2023) testovali čtyři druhy krmiv pro *C. gariepinus* a piraña rostlinožravá (*Colossoma macropomum*), ve kterých byla zdrojem proteinů buď rybí

moučka, krevní moučka, moučka z *H. illuscens* nebo pérova moučka. Nejvyšší odtok N byl pozorován ve vodě u ryb krměných krevní a pérova moučkou, nejvyšší odtok P a Ca byl ve variantě s rybí moučkou a ve variantě s hmyzím proteinem byl pozorován nejvyšší výskyt Mg a K. Odtok Fe nebyl krmivem ovlivněn. Koncentrace dalších mikroživin byla specifická pro druh krmiva a ryby, kromě Zn a Mn, jejichž koncentrace byly podobné. Autoři tak prokázali, že pomocí složení krmiva lze manipulovat s odtokem živin z RAS.

K podobným závěrům dospěli i Shaw a kol. (2022a, 2022b), kteří zkoumali obsah rozpuštěných látek a nutriční profily kalů z chovu *C. gariepinus* a *O. niloticus*. Ryby byly krmeny čtyřmi druhy krmiv s odlišnými zdroji proteinů. Autoři potvrzují, že původ proteinů ovlivňuje koncentraci živin ve vodě i kalech. Nutriční profily kalů si byly u obou druhů ryb podobné, ale *C. gariepinus* produkoval na jednotku krmiva podstatně méně sušiny než *O. niloticus*.

V centru pozornosti jsou chemické procesy a precipitace živin (Tellbüscher, 2023). Zkoumá se také vliv krmného režimu na kvalitu vody a využití živin (Yang a Kim, 2019). Yildiz a kol. (2017) upozorňují, že vývoj specifických krmiv pro akvaponii je důležitý též s ohledem na kvalitu vody z pohledu welfare ryb.

Důležitým příspěvkem pro řešení nutriční efektivity v akvaponii je databáze TilaFeed (Roy a kol., 2022). Tato databáze integruje informace o obsahu živin v alternativních krmných surovinách a o jejich stravitelnosti a effluxu. Umožňuje optimalizovat složení akvaponických krmiv pro *O. niloticus* tak, aby současně poskytovala úroveň živin odpovídající nutričním požadavkům konkrétních rostlin.

Probíhá snaha jasně definovat metriky poskytující podklady pro ekonomické, environmentální a manažerské rozhodování (Colt a Semmens, 2022). Jednou z nich se může stát např. koeficient FCR^{plant} (feed conversion ratio), podle něhož by šlo předem odhadnout výnos rostlin na základě hmotnosti krmiva dodaného do systému.

Cerozi a kol. (2022) navrhli vsádkový reaktorový test pro predikci živin v akvaponii a definovali koeficient uvolňování živin. Tento přístup by mohl být alternativou k dlouhým a těžkopádným praktickým testům.

2.6 Komerční krmiva

Speciální krmiva pro akvaponii nenabízí žádný z velkých výrobců krmiv pro ryby: Aller Aqua Dánsko (aller-aqua, 2023), Alltech Coppens Nizozemí (alltechcoppens, 2023), BioMar Dánsko (biomar, 2023), Skretting Norsko (skretting, 2023).

Podle informací na internetu nabízí akvaponická krmiva řada firem zejména v USA a Austrálii. Bohužel často není jasné, zda se jedná o výrobce či prodejce a zda se jedná skutečně o speciální krmivo. Také prezentované informace jsou velmi nedostatečné.

Byly osloveny tři firmy z USA a tři firmy z Austrálie s žádostí o technický list a odpověď na otázku: „V čem se nabízené krmivo odlišuje od běžných krmiv?“ Přišla pouze jedna vágní odpověď s odkazem na firemní web. V tab. 17 jsou uvedena tři vybraná krmiva, která jsou prezentovaná jako akvaponická.

Tab. 17: Akvaponická krmiva

Krmivo	AquaOrganic	Frenzy Fish Feeds	Optimal Aquaponic
Výrobce / prodejce	www.theaquaponicsource.com	www.frenzyfishfeeds.com	www.optimalfishfood.com
Deklarované znaky	hrubý protein – 32 % hrubý tuk – 3 % hrubá vláknina (max) – 10 % lysin (min) – 1,7 % Ca (min) – 1,3 % P (min) – 0,8 %	protein – 55 % tuk – 18 % sacharidy – 8 % vlhkost – 8,5 % popel – 10,5 %	hrubý protein (min) – 38 % hrubý tuk (min) – 8 % hrubá vláknina (max) – 4 % popel (max) – 8 % Ca (min) – 2 % P (min) – 4 %
Složení	sójový šrot, řepkový šrot, kukuřice, lněný šrot, vojtěšková moučka, fosforečnan vápenatý, uhličitan vápenatý, síran železnatý a desítky dalších surovin (např. řasy, zelenina, bylinky, vitaminy, minerály)	rybí moučka, moučka z koryšů, drůbeží moučka, rybí olej, řepkový olej, sójový olej, olej z kamélií, drůbeží tuk, pšenice, pšeničný lepek, sójový šrot, řepkový šrot, slunečnicový šrot, lupina, vitaminy, minerály	živočišné proteiny, pšenice, sójový šrot, vedlejší rostlinné produkty, fosforečnan draselný, rybí olej, lysin, cholinchlorid, taurin, methionin, threonin, vitaminy, minerály
Komentář	Krmivo je deklarováno jako krmivo pro omnivorní ryby v bio kvalitě a bez rybí moučky. Má nepřiměřeně vysoký obsah vlákniny. Přestože neobsahuje žádné živočišné proteiny, není ve složení uvedena žádná suplementace AMK, což by mohlo způsobit jejich deficit.	Zdůrazněno, že se jedná o pravou rybí moučku a pravý rybí olej. Spíše to připomíná konvenční krmivo pro lososovité ryby, byť s některými alternativními surovinami.	Nedá se určit, co se skrývá pod pojmem „živočišné proteiny“. Obsahuje rybí olej. Podle obsahu P a Ca je preferovaná výživa rostlin před welfare ryb. Otázkou je, nakolik budou uvedené živiny dostupné pro rostliny.

Z předchozích informací vyplývá, že je nutno zkoumat a vyvíjet udržitelná akvaponická krmiva, která by co nejvíce respektovala nutriční požadavky ryb i rostlin, a současně nezatěžovala životní prostředí nevyužitými živinami. A má-li být akvaponie udržitelná, musí místo rybí moučky využívat alternativní zdroje proteinů.

3 Materiál a metodika

V rámci diplomové práce byl uskutečněn krmný a následně pěstební experiment v dvousmyčkovém akvaponickém systému v akvaponické hale FROV JU.

3.1 Cíle práce

Cílem práce bylo:

- vyhodnotit produkční účinnost krmiv s různými zdroji proteinů na růst ryb,
- vyhodnotit obsah živin ve vodě, kalech a živných roztocích a jejich vliv na růst rostlin,
- navrhnout možnosti úpravy složení krmiv.

3.2 Pokusný materiál

Jako pokusný materiál byl zvolen tlamoun nilský (*O.niloticus*, 690 ks, \varnothing 130,52 g) odchovaný v akvaponické hale a salát (*Lactuca sativa*, Exalto, Reprosam).

3.3 Krmný pokus

3.3.1 Design pokusu

Krmný pokus trval 13 týdnů. Ryby byly náhodně rozděleny do tří recirkulačních systémů (viz obr. 25). V každém z nich se nacházely tři chovné nádrže, všechny o objemu 630 L.



Obr. 25: Recirkulační akvakulturní systém (foto autor)

Počáteční hmotnost obsádky v jednotlivých nádržích činila $10,0 \pm 0,07$ kg. V každém RAS se krmilo jiným krmivem. Krmení probíhalo 3x denně. Nespotřebované krmivo bylo po 30 minutách odstraněno. První týden se postupně navyšovala krmná dávka z 0,5 % na 2 % biomasy obsádky. Denně se monitorovala teplota ($25,63 \pm 0,92$ °C), nasycení O₂ ($79,83 \pm 3,26$ %) a pH ($6,87 \pm 0,17$), (HI98494, Hanna Instruments). Úpravy probíhaly pH pomocí Ca(OH)₂. Mezi systémy nebyly pozorovány rozdíly v měřených veličinách. Denní výměna vody činila 5%.

3.3.2 Experimentální krmiva

Pro experiment byla navržena tři izoproteinová a izokalorická krmiva (A, B a C) tak, aby odpovídala nutričním požadavkům *O. niloticus* dle databáze IAFFD (pre-grower 10-30 g; 42 % proteinů; 9 % lipidů; vláknina max. 7 %; škrob min. 18 %; DE 3491 kcal·kg⁻¹; ARG 1,79 %; HIS 0,56 %; ILE 0,99 %; LEU 1,8 %; LYS 2,02 %; MET 0,79 %; PHE 1,01 %; THR 1,30 %; TRP 0,25; VAL 1,30 %; EPA 0,02 %; DHA 0,08 %). Krmiva se lišila ve dvou základních aspektech. Prvním z nich bylo využití alternativních zdrojů proteinů. Krmivo A bylo sestaveno podle tradiční konvenční receptury využívající moučku z mořských ryb. V krmivu B byla tato moučka nahrazena v souladu se stávajícími trendy moučkou ze sladkovodních ryb a dále využity různé zdroje především rostlinných proteinů bez ohledu na původ. Krmivo C bylo vytvořeno s ohledem na lokální a udržitelné zdroje surovin. Představovalo tedy variantu, kterou by se měly ubírat receptury do budoucna. Druhým aspektem byl různý obsah P a K, které se cíleně měly dostat do systému jako klíčové živiny pro rostliny. Pro tvorbu receptur byl využit software WinFeed. Krmiva byla vyrobena na dvoušnekovém extrudéru (BCTG 62/20D, Bühler) ve firmě NUTRIN s.r.o. Velikost plovoucích pelet byla cca 5 mm (obr. 26). Složení krmiv je zřejmé z tab. 18. Jejich analýza se nachází v tab. 19.



Obr. 26: Experimentální krmiva (foto autor)

Tab. 18: Složení experimentálních krmiv (%)

Surovina	A	B	C
Moučka z mořských ryb (72 % NL)	20,49	0	0
Moučka ze sladkovodních ryb (55 % NL)	0	20	10
Pšeničný šrot	32,08	8,71	1,4
Sójová mouka SOPRO TG (50 % NL)	27,41	0	0
Péřová moučka (83,5 % NL)	11,07	0	0
Pivovarské kvasnice	0	16,22	20,76
Kukuřičný škrob	0	15,05	13,84
<i>Arthrospira platensis</i>	0	14,83	9,57
Drůbeží moučka (60 % NL)	0	0	15,58
Hmyzí moučka (<i>H. illuscens</i> , 41 % NL)	0	0	11,3
Faba protein (65 % NL)	0	7,57	0
Řepkový olej	6,95	4,62	2,47
Slunečnicový protein (55 % NL)	0	0	5,23
Hrachový protein (80 % NL)	0	5	0
Řepkové výlisky	0	0	3,87
Kasein (92 % NL)	0	2	1,98
Pšeničný lepek (74,7 % NL)	0	2	0
KH ₂ PO ₄	0	2	2
Premix	2	2	2

Tab. 19: Analýza experimentálních krmiv

Parametr	Jednotka	A	B	C
Sušina	%	95,54	91,70	93,72
Dusíkaté látky (N×6,25)	%	38,78	41,25	43,75
Vláknina	%	4,15	1,33	1,59
Popel	%	5,85	8,48	10,42
Tuk	%	6,36	4,62	5,43
Tuk hydrolytický	%	8,74	9,23	9,72
Škrob	%	24,65	21,02	16,72
LR cukry	%	3,43	2,10	2,42
Dusík	%	6,20	6,60	7,00
Draslík	%	1,054	1,314	1,690
Vápník	%	0,891	1,830	2,048
Hořčík	%	0,154	0,136	0,193
Fosfor	%	0,694	1,397	1,863
Síra	%	0,432	0,375	0,413
Železo	mg·L ⁻¹	110	160	180
Měď	mg·L ⁻¹	6,53	3,52	5,93
Zinek	mg·L ⁻¹	70,3	71,3	85,2
Bór	mg·L ⁻¹	14,22	5,37	5,37
Molybden	mg·L ⁻¹	0,723	0,708	0,668

3.3.3 Hodnocení produkční účinnosti krmiv

Produkční účinnost byla hodnocena níže uvedenými ukazateli (upraveno dle Mareš a kol., 2015; Bai a kol., 2022). Ryby nebyly krmeny jeden den před vážením, v den vážení a následující den. Vážení probíhalo skupinově po anestezii hřebíčkovým olejem ($3 \text{ mL} \cdot 100 \text{ L}^{-1}$).

- **Hmotnostní přírůstek** (weight gain, WG)

$$WG(\%) = \frac{FW - IW}{IW} \times 100$$

Kde: FW je hmotnost na konci pokusu, IW je hmotnost na začátku pokusu.

- **Specifická rychlost růstu** (specific growth rate, SGR)

$$SGR(\% \cdot d^{-1}) = \frac{\ln FW - \ln IW}{\text{počet dní}} \times 100$$

- **Krmný koeficient** (feed conversion ratio, FCR)

$$FCR = \frac{S}{FW - IW}$$

Kde: S je spotřeba krmiva.

- **Přírůstek z jednotky krmiva** (feed coefficient efficiency, FCE)

$$FCE = \frac{FW - IW}{S}$$

- **Efektivita využití proteinů** (protein efficiency ratio, PER)

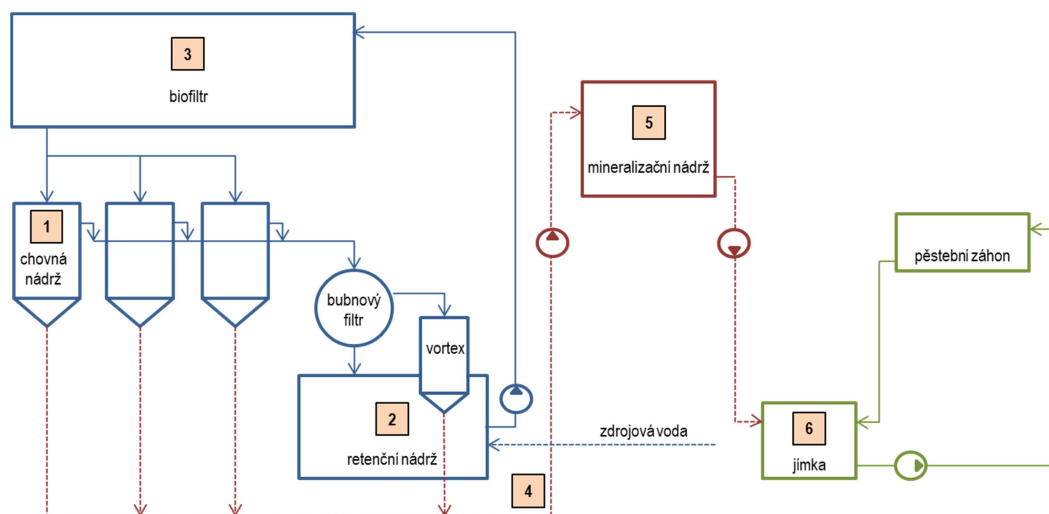
$$PER = \frac{100}{FCR \times \% \text{ NL v krmivu}}$$

3.4 Voda a kaly v RAS

Schéma celého systému, v němž probíhal experiment je uvedeno na obr. 27. Skládal se ze dvou nezávislých smyček: akvakulturní (modrá část) a hydroponické (zelená část). Do mineralizačních nádrží (červená část) byly jednorázově přečerpány kaly z nádrží a vortexu. Po mineralizaci (viz kap. 3.5) byly kaly použity pro přípravu živných roztoků. Z obr. 27 jsou patrná i jednotlivá vzorkovací místa.

Obsah živin ve zdrojové vodě použité v RAS a hydroponickém živném roztoku byl: $0,24 \pm 0,03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ N-NH}_4^+$; $2,38 \pm 0,10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ N-NO}_3^-$; $29,9 \pm 0,14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}$; $2,84 \pm 0,14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}$; $2,91 \pm 0,01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Mg}$; $10,87 \pm 0,05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S}$; $5,90 \pm 0,01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Si a $0,15 \pm 0,02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn. Obsah N-NO_2^- , Al, B, Cu, Fe, Mn, Na a P byl pod hranicí detekovatelnosti.



Obr. 27: Vzorkovací místa v experimentálním systému (1 – chovné nádrže, 2 – retenční nádrž, 3 – biofiltr, 4 – odkalovací potrubí, 5 – mineralizační nádrž, 6 – jímka pěstebního systému, obr. autor)

Hodnocení vody a kalů bylo provedeno níže uvedenými ukazateli a postupy:

➤ **Celková sušina** (total solids, TS)

Obsah TS slouží k posouzení stravitelnosti krmiv a odhadu množství vyprodukovaných kalů. Do předem zvážených hliníkových misek byly odebrány vzorky vody. Poté byly plné misky zváženy a umístěny do pece ($105 \text{ }^\circ\text{C}$). Po odpaření vody byly misky znovu zváženy. Nejprve se stanovil obsah TS (%) v kalu podle následující rovnice:

$$TS(\%) = \frac{\text{hmotnost usušené misky} - \text{hmotnost prázdné misky}}{\text{hmotnost plné misky} - \text{hmotnost prázdné misky}} \times 100$$

Dále byla vypočítána denní produkce TS (g):

$$TS(g) = TS(\%) \times \text{hmotnost kalu}$$

Následně byl TS (g) porovnán s hmotností krmiva spotřebovaného v jednotlivých nádržích předchozí den (TS/krmivo). Vzorky TS byly odebírány jednou za dva týdny ze vzorkovacího místa č. 4 (viz obr. 27). Hmotnost kalu byla zjištěna zvážením kalu získaného odkalením vortexu a všech tří nádrží v příslušném systému.

➤ **Celkové nerozpuštěné látky** (total suspended solids, TSS)

Nižší hodnoty TSS vypovídají o tom, že více živin je rozpuštěno nebo vázáno v kalech. TSS lze obtížně odstraňovat a mohou odcházet s odpadní vodou do vnějšího

prostředí. Vzorky vody o objemu 1000 mL byly přefiltrovány pomocí vakuové pumpy (ME 1, Vacuubrand) přes kruhový filtr ze skleněných mikrovláken (1,5 μm , 934-AH, Whatman). Filtr byl umístěn do hliníkové misky, zvážen a poté usušen při 105 °C (≥ 1 h). Celkový obsah nerozpuštěných látek ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) byl stanoven jako rozdíl mezi počáteční hmotností a hmotností po usušení. Vzorky TSS byly odebírány jednou za dva týdny ze vzorkovacích míst 1, 2 a 3 (viz obr. 27).

➤ **Obsah živin ve vodě**

Porovnání obsahu živin ve vodě RAS a mineralizačních nádrží s nutričními požadavky rostlin slouží jako výchozí informace k úpravě živných roztoků. Z živinového složení vypouštěných vod lze předvídat případné environmentální dopady.

Vzorky vody (15 mL) byly přefiltrovány (0,45 μm , Rotilabo CA, Carl Roth) a stabilizovány (100 μL 2 M HCL). N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ a rozpustný reaktivní P (soluble reactive P, SRP) byly analyzovány analyzátozem CFA (SAN++, Skalar). Obsah Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, S, B, Si, Cu a Zn byl stanoven emisním spektrometrem s induktivně vázaným plazmatem (iCAP 6000, Thermo Fisher Scientific).

3.5 Mineralizace

Kaly odebrané z jednotlivých RAS byly přečerpány do tří mineralizačních nádrží (A, B, C; 700 L), v nichž šest týdnů podléhaly aerobní mineralizaci. Denně se monitorovala teplota (25,30 \pm 0,89 °C), nasycení O₂ (97,51 \pm 3,61 %) a pH (HI98494, Hanna Instruments). Pět týdnů se pH v nádržích neupravovalo. Poté se postupem dle Panana a kol. (2021) začalo pH snižovat pomocí 20% H₂SO₄ (viz graf 2). Stanovil se:

➤ **Index objemu kalu (sludge volume index, SVI)**

Čím menší je hodnota SVI, tím více živin bylo mineralizováno a je rozpuštěno ve vodě. Měření proběhlo pomocí Imhoffova kužele o objemu 1000 mL. Objem kalu byl odečten po 30 minutách ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$). Měřilo se jednou týdně v každé nádrži (vzorkovací místo 5, viz obr. 27).

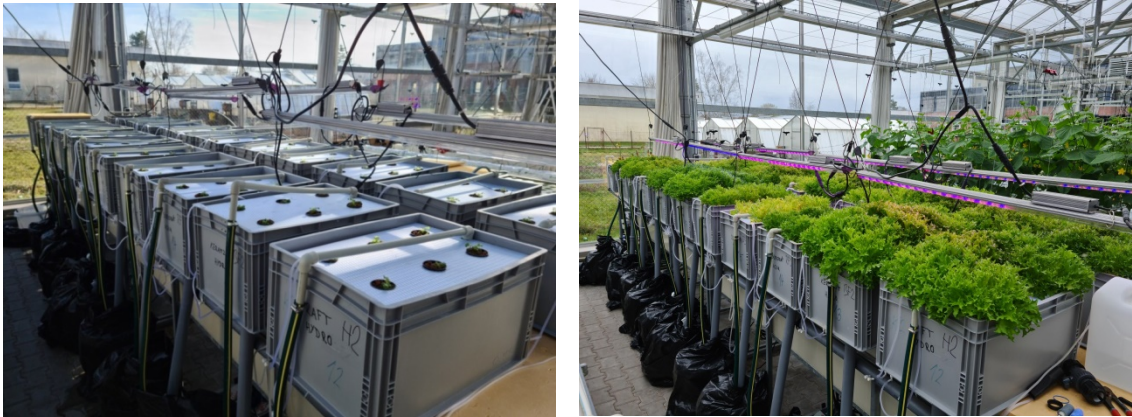
➤ **Celková sušina (total solids, TS)**

Menší hodnota TS během mineralizace svědčí o tom, že část živin opustila systém (např. uhlík prostřednictvím CO₂). TS (%) vody v mineralizačních nádržích se zjišťovalo stejným postupem jako v RAS (viz kap. 3.3). Vzorky byly odebírány jednou týdně z každé nádrže (vzorkovací místo 5, viz obr. 27).

3.6 Pěstební pokus

3.6.1 Design pokusu

Tento experiment trval 4 týdny a probíhal v raftových pěstebních systémech v sedmi variantách a třech opakováních. Celkem tedy bylo instalováno 21 systémů (viz obr. 28). Varianty tvořily: neupravená voda z mineralizačních nádrží (živný roztok A₀, B₀ a C₀), voda z mineralizačních nádrží doplněná o živiny (živný roztok A_F, B_F a C_F) a hydroponický živný roztok (H).



Obr. 28: Raftové systémy na počátku (vlevo) a na konci (vpravo) pěstebního pokusu (foto autor)

V každém systému bylo vysazeno 6 rostlin. Výsadba proběhla 15 dnů po vysetí. Průměrná hmotnost nadzemních částí rostlin na začátku experimentu byla 1,535 g a mezi variantami se nelišila. Denně se kontrolovala teplota ($21,19 \pm 0,73$ °C), nasycení O₂ ($98,89 \pm 0,55$ %) a pH ($5,58 \pm 0,54$), (HI98494, Hanna Instruments). Hodnoty pH se upravovaly prostřednictvím KOH a HNO₃. Na začátku a na konci pokusu se stanovil obsah TSS živného roztoku podle postupu uvedeného v kap. 3.3 (vzorkovací místo 6, viz obr. 27).

Bezprostředně před výsadbou rostlin byly odebrány vzorky vody z mineralizačních nádrží a na základě jejich analýzy byl upraven obsah jednotlivých živin v příslušných živných roztocích podle nutričních požadavků *L. sativa* (viz tab. 12). K výpočtům byl použit software HydroBuddy (viz obr. 29). Hodnoty živin v roztocích jsou uvedeny v tab. 20.

3.6.2 Hodnocení růstu rostlin

Hodnocení růstu bylo provedeno po čtyřech týdnech od výsadby. Aby se eliminoval vliv extrémních hodnot a náhodně uhynulých rostlin, byla vždy jedna nejslabší rostlina v jednotlivých opakováních vyřazena. Hodnotilo se:

- m_L – hmotnost nadzemní části rostlin (g)
- m_R – hmotnost kořenů (g)
- $R:S$ – poměr hmotnosti kořenů a hmotnosti nadzemní části (root:shoot ratio)
- r_L – délka kořenů (cm)

HydroBuddy v1.8 - Programmed and Designed by Dr. Daniel Fernandez Ph.D at <http://scienceinhydroponics.com>

Welcome Main Page Results About

Substance Name [click for url]	Formula	Mass (g) [Edit to fine-tune]	Preparation Cost
Y. Iron DTPA	FeDTPA	22.808	5.2
Y. Mn EDTA	MnEDTA	1.407	0.3
Y. Boric Acid	H3BO3	1.066	0.1
Y. Ammonium molybdate technical grade		0.037	0
Y. Mg EDTA	Mg	113.936	0
Y. Cu EDTA	CuEDTA	0.254	0.1
Yara Krista Map (AmmPhosph)	Mono Ammonium phosphate	42.274	0
Yara Krista K Plus (PotNitr)	Potassium nitrate	19.663	0
Yara Liva CALCINIT 15,5-0-0+19Ca	5Ca(NO3)2.NH4NO3.10H2O	27.368	0
Yara Kristalon Azur 20-5-10 + 10S	20-5-10 + 10S+micro	4.884	0.2

Element	Result (ppm)	Gross Error	Instrumental Error
N (NO3-)	165	-74.5%	+/- 0%
K	210	-22.9%	+/- 0%
P	50	-43.2%	+/- 0%
Mg	45	-17.2%	+/- 0%
Ca	190	-93.2%	+/- 0%
S	82,943	-5.2%	+/- 0%
Fe	4	0%	+/- 0.1%
Zn	0.1	-49%	+/- 3.8%
B	0.5	-6.2%	+/- 0.9%
Cu	0.1	-10%	+/- 3.5%
Mo	0.05	0%	+/- 27%
Na	26.4	0%	+/- 0%
Si	0	0%	+/- 0%
Cl	0	0%	+/- 0%
Mn	0.5	-7.6%	+/- 0.7%
N (NH4+)	15	-0.5%	+/- 0.1%

Total Cost is 5.9

Values calculated for the preparation of 400 liters

Predicted EC Value: EC=1.721 mS/cm

Buttons: Stock Solution Analysis, Nutrient Ratio Analysis, Detailed Per Substance Contribution Analysis

Export To Csv

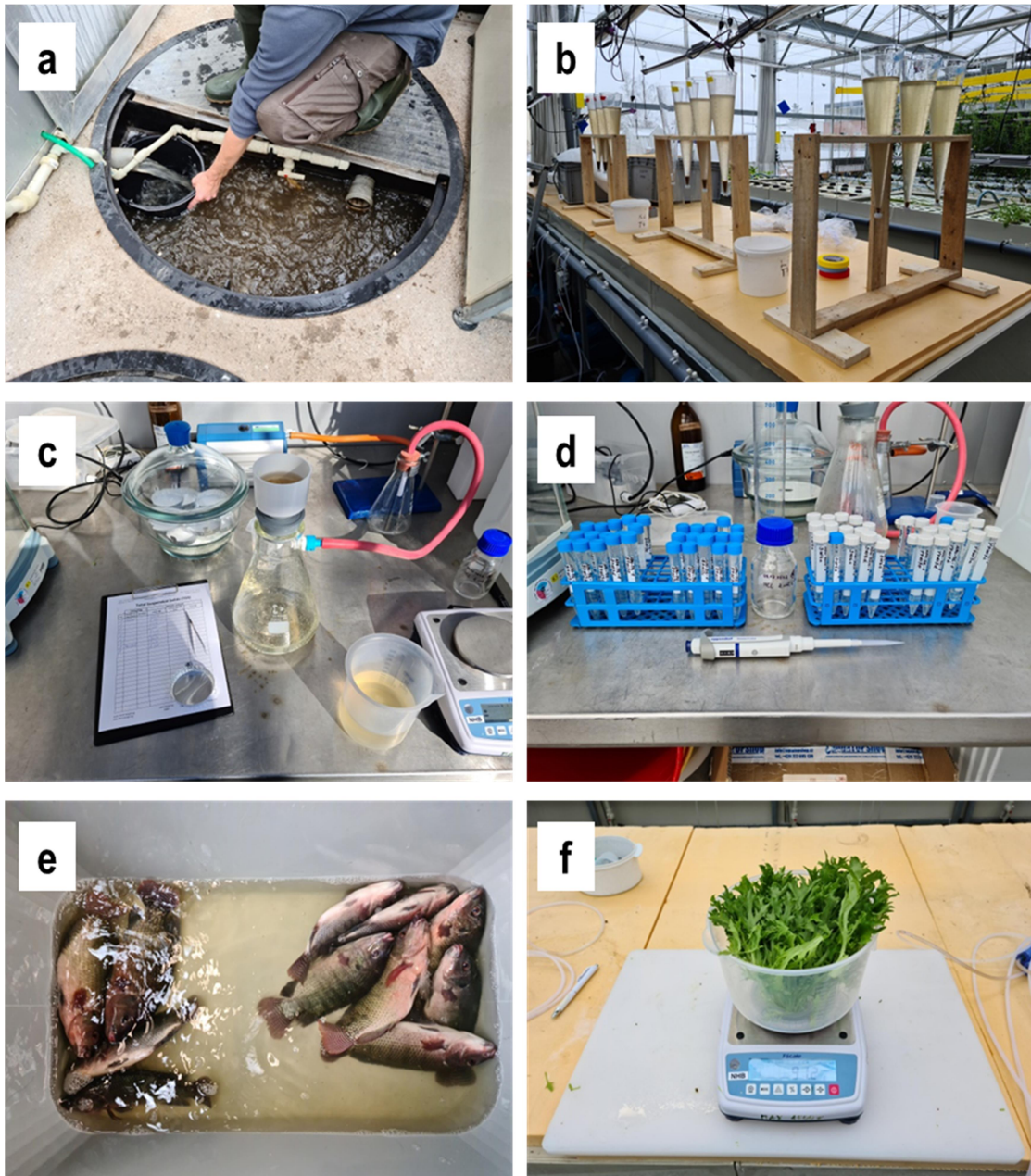
Obr. 29: Příklad výpočtu složení živého roztoku B_F (autor P. Franta)

Tab. 20: Obsah živin v živných roztocích ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Živina	A_0	A_F	B_0	B_F	C_0	C_F	H
Dusík amoniakální (N-NH ₄ ⁺)	<0,08	15	0,08	15	0,08	15	15
Dusík dusičnanový (N-NO ₃ ⁻)	78,8	165	123	165	107	165	165
Dusík dusitanový (N-NO ₂ ⁻)	0,018	-	0,030	-	0,009	-	-
Síra (S)	43,2	79,733	21,3	82,943	21,4	81,087	81,149
Hořčík (Mg)	7,59	45	7,76	45	8,77	45	45
Vápník (Ca)	151	190	177	190	165	190	190
Draslík (K)	35,6	210	48,0	210	47,9	210	210
Fosfor (P)	6,20	50	21,6	50	32,3	50	50
Sodík (Na)	19,6	19,6	26,4	26,4	19,7	19,7	8,06
Měď (Cu)	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,1
Zinek (Zn)	0,130	0,146	0,049	0,1	0,064	0,1	0,142
Železo (Fe)	<0,01	4	<0,01	4	<0,01	4	4
Mangan /Mn)	0,070	0,5	0,038	0,5	0,089	0,5	0,5
Molybden (Mo)	<0,010	0,05	<0,010	0,05	<0,010	0,05	0,05
Kobalt (Co)	<0,005	-	<0,005	-	<0,005	-	-
Bór (B)	0,051	0,5	0,031	0,5	0,025	0,5	0,5

3.7 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot bylo provedeno v prostředí programu Statistica 12 CZ (Tibco, USA). Nejprve byly hodnoty testovány na parametrickou distribuci (Shapiro-Wilkův test, Levenův test) a následně analyzovány pomocí ANOVA, Tukeyova HSD testu nebo Kruskal-Wallisova testu.

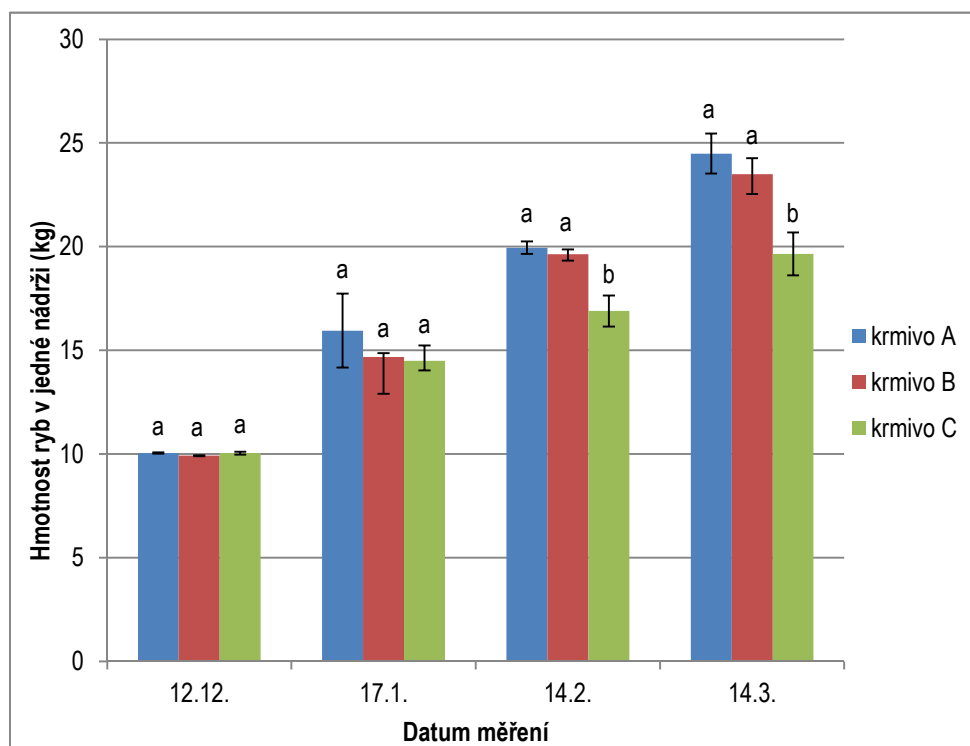


Obr. 30: Vybrané činnosti během experimentu (a – odběr vzorků z odběrného místa č. 4, b – měření SVI, c – měření TSS, d – stabilizace vzorků vody pro analýzu živin, e – vážení *O. niloticus*, f – vážení *L. sativa*, foto autor)

4 Výsledky

4.1 Produkční účinnost krmiv

Mortalita byla velmi nízká (0,87 %). Mezi systémy nebyly pozorovány statistické rozdíly. Graf 1 zobrazuje průměrnou hmotnost obsádky jedné nádrže v jednotlivých variantách v průběhu krmného pokusu. Z uvedeného grafu je zřejmé, že všechny tři varianty vykazovaly rostoucí trend. Nejvyšší průměrné hmotnosti v nádrži na konci pokusu dosáhly ryby krmené krmivem A (konvenční receptura), a to $24,49 \pm 0,96$ kg. Oproti počáteční hmotnosti činil nárůst 143,68 %. Ryby krmené krmivem B dosáhly hmotnosti $23,49 \pm 0,77$ kg. Nárůst v této variantě činil 136,56 %. Signifikantně nejnižší hmotnost ryb na konci pokusu byla pozorována u krmiva C, a to $19,65 \pm 1,03$ kg. Hmotnost zde vzrostla o 95,72 %. Oproti variantě A vykázala varianta B neprůkazně nižší hmotnost obsádky o 4,08 % a varianta C signifikantně nižší hmotnost obsádky o 19,76 %.



Graf 1: Hmotnost obsádky v jednotlivých variantách krmených rozdílnými krmivy. Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (\pm SD). Rozdílná písmena u sloupců označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$).

Produkční ukazatele na konci pokusu pro jednotlivá krmiva jsou uvedeny v tab. 21. Z výsledků a následné statistické analýzy je zřejmé, že krmiva A a B vykazují podobné hodnoty produkčních ukazatelů. Krmivo C je ve všech parametrech signifikantně nejhorší.

Tab. 21: Produkční ukazatele krmiv v jednotlivých variantách krmených rozdílnými krmivy (WG – hmotnostní přírůstek, SGR – specifická rychlost růstu, FCR – krmný koeficient, FCE – přírůstek z jednotky krmiva, PER – efektivita využití proteinů). Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (\pm SD). Rozdílná písmena v řádku označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$).

Ukazatel	Krmivo A	Krmivo B	Krmivo C
WG (%)	143,53 \pm 8,92a	136,66 \pm 7,76a	95,70 \pm 8,90b
SGR (%·d ⁻¹)	0,97 \pm 0,04a	0,91 \pm 0,02a	0,73 \pm 0,05b
FCR	1,77 \pm 0,13b	1,92 \pm 0,10b	2,57 \pm 0,20a
FCE	0,57 \pm 0,05a	0,52 \pm 0,03a	0,39 \pm 0,03b
PER	1,47 \pm 0,11a	1,48 \pm 0,25a	0,89 \pm 0,07b

4.2 Vody a kaly v RAS

4.2.1 Celková sušina (TS) a celkové nerozpuštěné látky (TSS)

Nejnižší hodnota poměru hmotnosti TS v kalu vůči hmotnosti krmiva spotřebovaného den před měřením (TS/krmivo) byla pozorována u krmiva C 19.12. (0,183 \pm 0,002) a nejvyšší u téhož krmiva 30.1. (0,308 \pm 0,002). Průměrné hodnoty byly ve všech variantách velmi podobné (viz tab. 22). Nejnižší průměrný poměr vykázalo krmivo A (0,223 \pm 0,014), což je neprůkazně o 11,86 % méně, než krmivo C (0,253 \pm 0,042). Vyjádříme-li průměrné hodnoty v procentech (\times 100), získáme rozsah 22,3-25,3 %, což odpovídá běžné stravitelnosti.

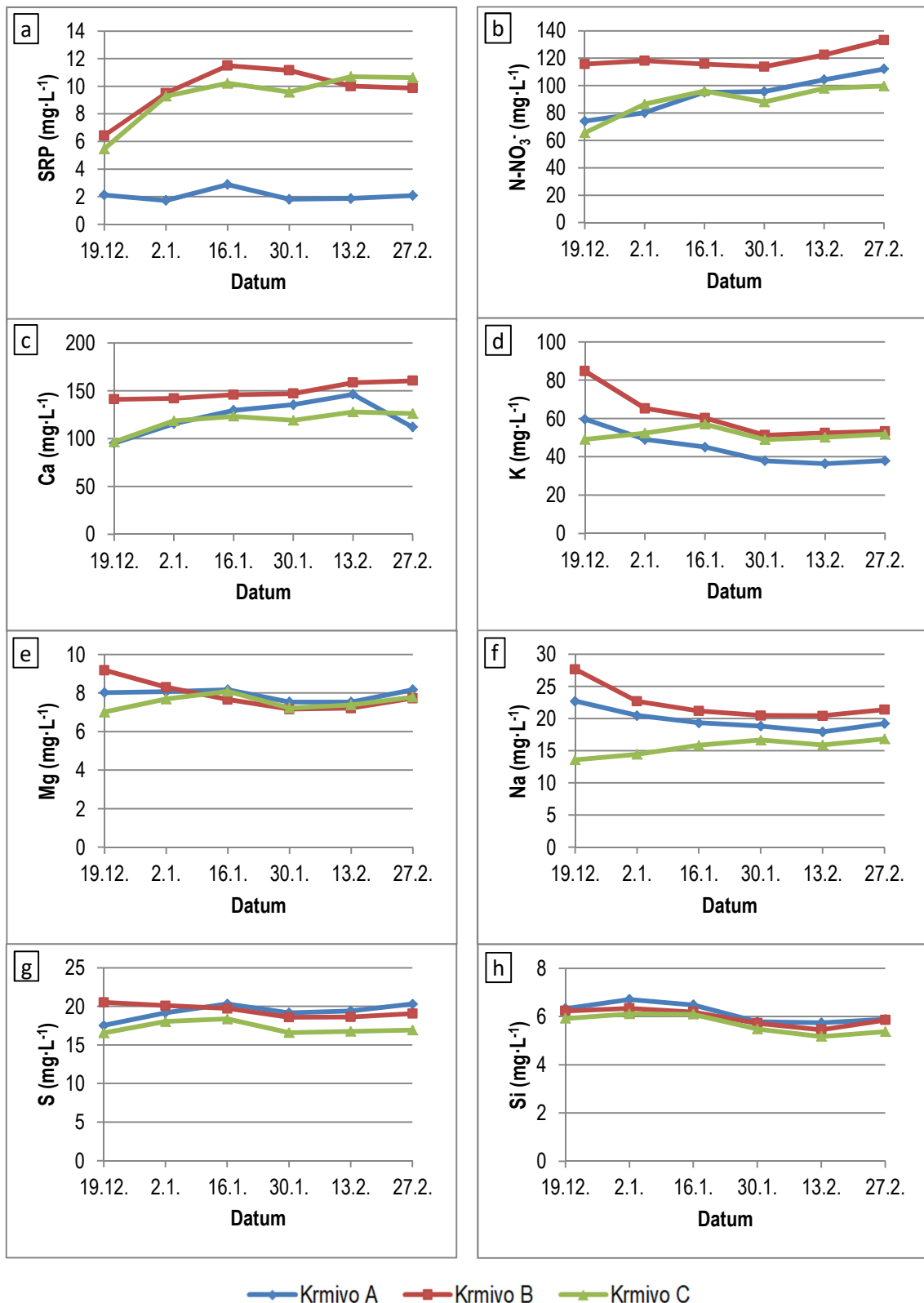
Signifikantně nejnižší průměrná hodnota TSS v systémové vodě RAS byla zjištěna u krmiva C (7,35 \pm 3,28 mg·L⁻¹). To je o 55,59 % méně než u krmiva B, kde byla naměřena hodnota 16,55 \pm 10,04 mg·L⁻¹). Lze očekávat, že ve variantě C bude vázáno více živin v kalu než ve vodě. Nejnižší hodnota TSS byla naměřena 2.1. u krmiva C (1,89 \pm 1,59) a nejvyšší 13.2. u krmiva B (31,98 \pm 16,41).

Tab. 22: TS a TSS v jednotlivých variantách krmených rozdílnými krmivy (TS – celková sušina, TSS – celkové nerozpuštěné látky). Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (\pm SD). Rozdílná písmena v řádku označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$). Malá písmena charakterizují TS/krmivo, velká TSS.

Datum	Krmivo A		Krmivo B		Krmivo C	
	TS/krmivo	TSS (mg·L ⁻¹)	TS/krmivo	TSS (mg·L ⁻¹)	TS/krmivo	TSS (mg·L ⁻¹)
19.12.	0,199 \pm 0,011b	5,11 \pm 0,74B	0,244 \pm 0,010a	6,67 \pm 1,15A	0,183 \pm 0,002b	5,11 \pm 0,87B
2.1.	0,225 \pm 0,002b	14,22 \pm 1,47A	0,280 \pm 0,004ab	8,11 \pm 0,87B	0,291 \pm 0,003a	1,89 \pm 1,59C
16.1.	0,212 \pm 0,004b	17,56 \pm 0,96A	0,236 \pm 0,012a	13,44 \pm 1,83AB	0,225 \pm 0,005ab	7,22 \pm 3,01B
30.1.	0,234 \pm 0,003b	13,67 \pm 3,20B	0,227 \pm 0,010b	27,27 \pm 6,43A	0,308 \pm 0,002a	8,89 \pm 4,2B
13.2.	0,238 \pm 0,011a	12,69 \pm 3,32B	0,240 \pm 0,014a	31,98 \pm 16,41A	0,250 \pm 0,003a	7,67 \pm 0,94C
27.2.	0,227 \pm 0,001ab	17,10 \pm 3,57A	0,191 \pm 0,022b	8,63 \pm 2,12B	0,248 \pm 0,002a	8,22 \pm 1,03B
13.3.	0,229 \pm 0,003b	12,06 \pm 0,77B	0,190 \pm 0,003c	19,76 \pm 1,70A	0,264 \pm 0,003a	12,48 \pm 1,39B
Průměr	0,223\pm0,014a	13,20\pm4,13AB	0,230\pm0,032a	16,55\pm10,04A	0,253\pm0,042a	7,35\pm3,28B

4.2.2 Obsah živin

Obsah vybraných živin ve vodě v RAS je znázorněn na obr. 31.



Obr. 31: Obsah vybraných živin v systémové vodě v jednotlivých variantách krmných rozdílnými krmivy (a – SRP, b – N-NO₃⁻, c – Ca, d – K, e – Mg, f – Na, g – S, h – Si)

Obsah Al, B, Cu, Fe, Mn a Zn byl pod hranicí detekovatelnosti. Průměrný obsah N-NH₄⁺ činil 0,51±0,18 mg·L⁻¹ a obsah N-NO₂⁻ byl <0,05 mg·L⁻¹. Mezi systémy nebyly pozorovány rozdíly.

U SRP lze pozorovat poměrně stabilní, ale nejnižší obsah v systému A (viz obr. 31a). Nejnižší hodnota (1,73 mg·L⁻¹) byla naměřena 2.1. V systémech B a C došlo během čtyř týdnů k nárůstu na hodnoty okolo 10 mg·L⁻¹, na kterých setrvaly až do konce pokusu.

U dusičnanového dusíku došlo ve všech variantách k postupnému nárůstu jeho obsahu (viz obr. 31b). Nejnižší hodnoty vykazoval systém C, kde vzrostl obsah z 65,49 mg·L⁻¹ na 99,67 mg·L⁻¹, tedy o 52,19 %. Nejvyšší hodnoty N-NO₃⁻ byly naměřeny v systému B, a to 115,68 mg·L⁻¹ na počátku pokusu a 133,15 mg·L⁻¹ na konci pokusu, což byl nárůst o 15,10 %. V systému A byl pozorován nárůst o 51,41 %.

Ve všech variantách byl také zaznamenán nárůst obsahu Ca (viz obr. 31c), a to o 17,62 % u varianty A (z 95,3 mg·L⁻¹ na 112,09 mg·L⁻¹), o 13,74 % u varianty B (z 141 mg·L⁻¹ na 160,37 mg·L⁻¹) a o 31,02 % u varianty C (z 96,3 mg·L⁻¹ na 126,17 mg·L⁻¹).

Obsah draslíku poklesl v systémech A (z 59,6 mg·L⁻¹ na 37,96 mg·L⁻¹, tedy o 36,31 %) a B (z 84,74 mg·L⁻¹ na 53,25 mg·L⁻¹, tedy o 37,16 %). Oproti tomu systém C vykazoval stabilní obsah okolo 50 mg·L⁻¹ (viz obr. 31d).

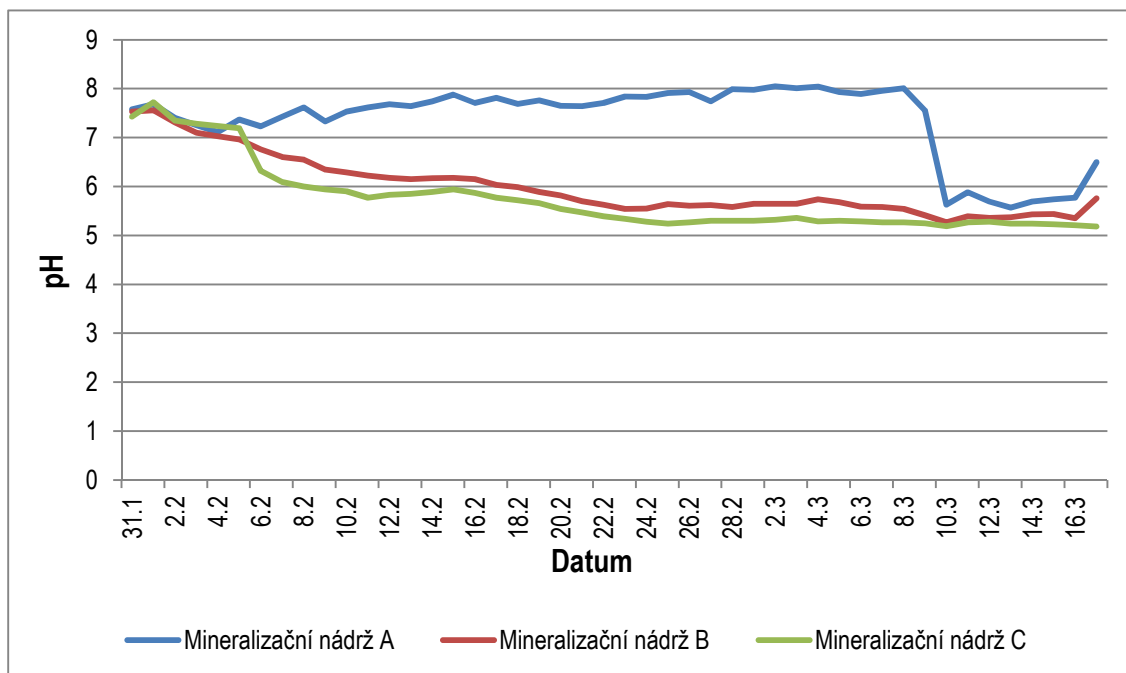
Obsah Na klesl v systému A z 22,7 mg·L⁻¹ na 19,22 mg·L⁻¹, tedy o 15,33 % (viz obr. 31f). V systému B klesl obsah Na z 27,66 mg·L⁻¹ na 21,37 mg·L⁻¹, což byl pokles o 22,74 %. Ačkoliv byl obsah Na v systému C nejnižší, byl zde oproti ostatním variantám zaznamenán opačný trend, a to nárůst o 23,93 %. Z počáteční hodnoty 13,58 mg·L⁻¹ se obsah zvýšil na 16,83 mg·L⁻¹.

Obsah Mg, Si a S měl ve všech variantách podobný průběh bez zjevného trendu. Obsah Mg se pohyboval okolo 8 mg·L⁻¹ a Si okolo 6 mg·L⁻¹. Obsah S kolísal mezi 16,57 mg·L⁻¹ (nejnižší hodnota vy systému C) a 20,53 mg·L⁻¹ (nejvyšší hodnota v systému B).

4.3 Mineralizace

Z grafu 2 je patrný průběh pH během mineralizace v jednotlivých nádržích. V nádrži A nejprve kleslo pH z počáteční hodnoty 7,58 na 7,11 a poté pozvolna stoupalo na hodnotu 8,05. V rozmezí 8.-12.3. bylo za účelem snížení pH aplikováno celkem 247 mL 20% H₂SO₄. Nejnižší hodnoty (5,57) bylo dosaženo 13.3.

Oproti tomu je zjevný sestupný trend hodnoty pH v nádržích B a C. Do nádrže B byla aplikována 20% H₂SO₄ pouze jednou (13 mL, 9.3.). Nejnižší hodnota pH (5,27) byla naměřena 10.3. Také do nádrže C byla 20% H₂SO₄ aplikována jen jednou (6 mL, 9.3.). Nejnižší hodnota pH (5,17) v této nádrži byla pozorována 17.3. Rozdíl v obsahu O₂ mezi variantami nebyl pozorován. V nádrži C byl průměrný obsah O₂ 97,12±4,99 % a nejnižší obsah 77,3 % byl naměřen 2.2. Analýzy kalů a vody v mineralizačních nádržích nebyly z důvodů prodlení externí laboratoře k dispozici.



Graf 2: Průběh pH během mineralizace kalů odebraných z jednotlivých variant krmných rozdílnými krmivy

V tab. 23 jsou zaznamenány hodnoty SVI a TS v mineralizačních nádržích během mineralizace. V uvedených hodnotách nelze nalézt žádné dlouhodobé trendy. SVI kleslo ve všech variantách po prvním měření na zřetelně nižší úroveň. Nejvyšší hodnota byla naměřena 6.2. v mineralizační nádrži A, a to 80,0±0,08. Nejnižší hodnota byla zaznamenána taktéž v nádrži A (0,2±0,1), a to hned následující měření 13.2.

Nejvyšší hodnoty TS byly šestkrát ze sedmi měření pozorovány v nádrži B. Signifikantní to však bylo pouze dvakrát. Nejvyšší hodnota TS za celý experiment byla naměřena 31.1. v nádrži B, a to 0,165±0,050 %. Nejnižší hodnota byla zaznamenána 20.2. v nádrži A, a to 0,090±0,002 %.

Tab. 23: SVI a TS během mineralizace kalů odebraných z jednotlivých variant krmných rozdílnými krmivy (SVI – index objemu kalu, TS – celková sušina). Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (\pm SD). Rozdílná písmena v řádku označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$). Malá písmena charakterizují SVI, velká TS.

Datum	Mineralizační nádrž A		Mineralizační nádrž B		Mineralizační nádrž C	
	SVI	TS (%)	SVI	TS (%)	SVI	TS (%)
31.1	-	0,121 \pm 0,009A	-	0,165 \pm 0,060A	-	0,119 \pm 0,007A
6.2.	80,0 \pm 0,8a	0,101 \pm 0,001C	21,0 \pm 0,0b	0,128 \pm 0,003A	20,3 \pm 0,5b	0,109 \pm 0,002B
13.2.	0,2 \pm 0,1b	0,093 \pm 0,005B	5,2 \pm 0,6a	0,102 \pm 0,006B	7,7 \pm 1,8a	0,122 \pm 0,001A
20.2.	2,5 \pm 0,4c	0,090 \pm 0,002C	7,2 \pm 0,2a	0,137 \pm 0,002A	4,5 \pm 0,4b	0,106 \pm 0,005B
27.2.	7,7 \pm 0,6a	0,107 \pm 0,001B	8,0 \pm 0,4a	0,133 \pm 0,007A	7,0 \pm 0,4a	0,126 \pm 0,004A
6.3.	10,7 \pm 0,9a	0,122 \pm 0,014B	7,2 \pm 0,0b	0,154 \pm 0,007A	7,3 \pm 0,8b	0,146 \pm 0,006AB
13.3.	7,3 \pm 0,5a	0,098 \pm 0,001B	5,5 \pm 0,0a	0,114 \pm 0,004A	7,7 \pm 0,5a	0,105 \pm 0,001B

4.4 Pěstební pokus

Na základě výpočtu v softwaru HydroBuddy byl upraven obsah živin v živných roztocích ve variantách A_F, B_F a C_F a dodáním živin do zdrojové vody vytvořen hydroponický roztok (H).

4.4.1 Hodnocení růstu

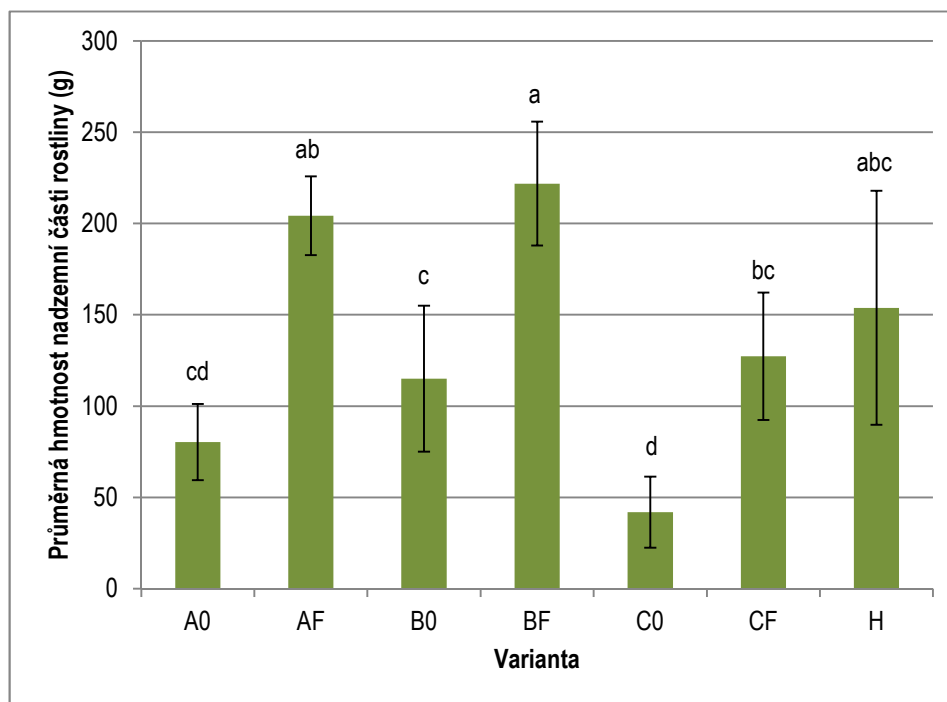
Tab. 24 uvádí sklizňové parametry v jednotlivých variantách na konci experimentu. Neprůkazně nejvyšší průměrná hmotnost nadzemní části rostlin byla zjištěna ve variantě B_F, a to 221,8 \pm 33,9 g, což je o 44,21 % více než průměrná hmotnost rostlin pěstovaných v hydroponickém živném roztoku (H). Také mezi neupravenými živnými roztoky vykazovala varianta B₀ neprůkazně nejvyšší průměrnou hmotnost (115,0 \pm 40,0 g), která byla o 174,46 % vyšší než hmotnost ve variantě C₀ a současně neprůkazně nižší o 25,23 % než v hydroponii. Rozdíly jsou zobrazeny též v grafu 3.

Tab. 24: Sklizňové hodnoty v jednotlivých variantách živných roztoků (m_L – hmotnost nadzemní části rostlin, m_R – hmotnost kořenů, R:S – poměr hmotnosti kořenů a nadzemní části, r_L – délka kořenů). Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (\pm SD). Rozdílná písmena v řádku označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$).

Veličina	A ₀	A _F	B ₀	B _F	C ₀	C _F	H
m_L (g)	80,3 \pm 20,8cd	204,2 \pm 21,6ab	115,0 \pm 40,0c	221,8 \pm 33,9a	41,9 \pm 19,4d	127,3 \pm 34,9bc	153,8 \pm 64,1abc
m_R (g)	9,65 \pm 2,46b	9,53 \pm 1,68b	9,80 \pm 3,42b	13,75 \pm 3,19a	5,09 \pm 2,72c	9,86 \pm 2,68b	9,09 \pm 2,14b
R:S	0,12 \pm 0,03a	0,05 \pm 0,01c	0,09 \pm 0,02ab	0,06 \pm 0,02bc	0,16 \pm 0,12ab	0,08 \pm 0,03ab	0,07 \pm 0,03bc
L (cm)	45,1 \pm 6,3bc	51,3 \pm 11,5abc	55,7 \pm 15,50ab	65,9 \pm 17,8a	39,6 \pm 7,9c	56,0 \pm 23,8abc	47,5 \pm 15,6bc

Signifikantně nejvyšší průměrná hmotnost kořenů byla pozorována ve variantě B_F (13,75 \pm 3,19 g) a signifikantně nejnižší ve variantě C₀ (5,09 \pm 2,72 g). Také neprůkazně nejdelší kořeny byly naměřeny ve variantě B_F (65,9 \pm 17,8 cm) a neprůkazně nejkratší ve

variantě C₀ (39,6±7,9 cm). Ve variantě B_F tak kořeny vážily o 170,14 % více a byly o 66,41 % delší než ve variantě C₀. Poměr R:S byl neprůkazně nejvyšší ve variantě C₀ (0,16±0,03) a nejnižší ve variantě A_F (0,05±0,01).



Graf. 3: Průměrná hmotnost nadzemní části rostlin v jednotlivých variantách živných roztoků. Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (±SD). Rozdílná písmena u sloupců označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$).

4.4.2 Celkové nerozpuštěné látky (TSS) v živných roztocích

Tab. 25 udává hodnoty TSS v jednotlivých variantách živných roztoků na začátku a na konci pěstebního pokusu. Signifikantně nejvyšší hodnota na začátku experimentu byla pozorována u kalu B. Hodnota $100,00 \pm 5,40$ je o 70,44 % vyšší než hodnota naměřená v kalu C ($58,67 \pm 0,13$), který vykázal nejnižší hodnotu TSS.

Na konci pokusu klesly hodnoty TSS ve všech variantách kalů kromě varianty A_F, kde zůstaly na podobné úrovni ($62,93 \pm 7,59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ a $64,00 \pm 8,72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Neprůkazně nejnižší hodnota TSS na konci pokusu byla zaznamenána ve variantě C_F ($37,33 \pm 6,11$), což bylo přesto o 422,83 % více než v hydroponickém roztoku.

Tab. 25: TSS (celkové nerozpuštěné látky) v živných roztocích na počátku a na konci pěstebního pokusu ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Výsledky jsou uvedeny jako aritmetický průměr (±SD). Rozdílná písmena v řádku označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$).

Datum	A ₀	A _F	B ₀	B _F	C ₀	C _F	H
16.3.	$62,93 \pm 7,59b$	$62,93 \pm 7,59b$	$100,00 \pm 5,40a$	$100,00 \pm 5,40a$	$58,67 \pm 13,01b$	$58,67 \pm 13,01b$	-
13.4.	$44,67 \pm 17,01bcd$	$64,00 \pm 8,72bc$	$87,56 \pm 2,14a$	$78,26 \pm 4,11ab$	$46,00 \pm 6,93bcd$	$37,33 \pm 6,11d$	$7,14 \pm 1,97e$

5 Diskuze

5.1 Produkční účinnost krmiv

Mnoho výzkumů potvrzuje, že *O. niloticus* je tolerantní k využívání alternativních zdrojů proteinů (viz kap. 2.2.5). To je v souladu i s některými poznatky této práce.

Krmivo B neprůkazně vykázalo krmný koeficient (FCR) o 7,8 % nižší než konvenční krmivo A (A $1,77 \pm 0,13$; B $1,92 \pm 0,10$) a specifickou rychlost růstu (SGR) neprůkazně nižší o 6,2 % (A $0,97 \pm 0,04 \% \cdot d^{-1}$; B $0,91 \pm 0,02 \% \cdot d^{-1}$). Efektivita využití proteinů (PER) byl téměř shodný (A $1,47 \pm 0,11$; B $1,48 \pm 0,25$). Krmivo C, složené z lokálních a udržitelných surovin, však bylo signifikantně horší ve všech ukazatelích (FCR $2,57 \pm 0,20$; SGR $0,73 \pm 0,05 \% \cdot d^{-1}$; PER $0,89 \pm 0,07$).

Existuje řada studií, ve kterých byly produkční ukazatele krmiv pro *O. niloticus* hodnoceny. Lepší hodnoty oproti výsledkům této práce zaznamenali například da Silva a kol. (2017) během experimentu, v němž zjišťovali vliv substituce sójového šrotu šrotem z podzemnice olejné v čistě rostlinném krmivu. Koeficient FCR se pohyboval od $1,1 \pm 0,03$ do $1,3 \pm 0,04$ a PER v rozmezí od $2,3 \pm 0,1$ do $2,7 \pm 0,1$. Tato krmiva byla vyrobena laboratorně v mlýnku na maso a sušena při $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přestože krmiva testovaná v této práci byla vyrobena extruzí, a lze u nich předpokládat lepší stravitelnost, koeficient FCR byl ve všech variantách vyšší. Experiment probíhal při podobné teplotě vody jako náš ($26,6 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), takže vliv tohoto faktoru můžeme vyloučit.

Palupi a kol. (2020) nahrazovali rybí moučku a sójový šrot v krmivu pro *O. niloticus* drůbeží moučkou. I zde byly pozorovány lepší produkční ukazatele než v našem experimentu (SGR od $1,71 \pm 0,06 \% \cdot d^{-1}$ do $1,78 \pm 0,01 \% \cdot d^{-1}$; FCR $1,15$ - $1,21$; PER od $2,62 \pm 0,20$ do $2,77 \pm 0,07$).

Ještě lepších výsledků dosáhli Shaw a kol. (2022a), kteří testovali tři alternativy FM. Ve variantě s drůbeží moučkou se koeficienty SGR ($2,05 \pm 0,11 \% \cdot d^{-1}$) a FCR ($0,92 \pm 0,01$) signifikantně nelišily od krmiva obsahujícího FM. Koeficient PER byl oproti krmivu s FM prokazatelně nižší ($2,47 \pm 0,03$ oproti $2,88 \pm 0,12$), přesto byl podstatně vyšší, než byly hodnoty zjištěné v rámci této práce.

Snížený růst a využití proteinů může být způsobeno nevyvážeností aminokyselinového profilu (Azaza a kol., 2008). PER je ovlivněn také poměrem využití proteinů a sacharidů na energii. Jejich retence se zvyšuje, pokud jsou k dispozici další zdroje energie. Také se zvyšuje s nižším obsahem proteinů (Kim a kol., 2004; Azaza a kol., 2009). Dále je růst ovlivněn celkovým obsahem proteinů v krmivu a jejich

stravitelností (Mai a kol., 2022b). Nižší hodnoty některých ukazatelů u krmiv A, B a C mohly být ovlivněny také tím, že krmiva byla designována pro vývojovou fázi 10-30 g (nutriční požadavek 42 % proteinů; IAFFD, 2023). Ve skutečnosti však měly ryby na počátku pokusu \bar{x} 130,52 g (požadavek 37 % proteinů) a na konci \bar{x} 259,76 g (požadavek 35 % proteinů). Z toho lze vyvodit, že možná nevyužily plně všechny živiny obsažené v krmivu tak, jako by tomu bylo ve fázi 10-30 g.

Vyšší hodnoty FCR oproti této práci uvádějí například Ahmad a kol. (2020), a to $2,21 \pm 0,12$ až $2,81 \pm 0,74$. Podobně Sallam a kol. (2021) naměřili FCR v rozsahu 2,41-2,62. V prvním případě byla rybí moučka substituována sójovým šrotem, ve druhém řepkovým. V obou však byl SGR vyšší než u krmiv testovaných v této práci.

Také Devic a kol. (2018) pozorovali ve variantách, v nichž nahrazovali rybí moučku a sójový šrot současně moučkou z *H. illuscens* a drůbeží moučkou, hodnoty FCR a PER horší a SGR lepší než v našem experimentu. FCR se pohybovalo v rozmezí od $2,0 \pm 0,2$ do $2,2 \pm 0,1$; PER od $1,2 \pm 0,0$ do $1,3 \pm 0,1$ a SGR od $3,1 \pm 0,1 \text{ \%} \cdot \text{d}^{-1}$ do $3,7 \pm 0,4 \text{ \%} \cdot \text{d}^{-1}$. Vyšší hodnoty SGR mohou souviset s nižší počáteční hmotností ryb, protože mladší vývojová stadia rostou rychleji. V larvální fázi to může být i růst exponenciální (Bai a kol. 2022). Rozdíly ve výsledcích mohou být způsobeny také délkou pokusu a krmným režimem.

5.2 Možné úpravy krmiv

U experimentálního krmiva A, vyvstává otázka, zda by konvenční krmivo dosahovalo lepších produkčních parametrů, kdyby využívalo i konvenční zdroj lipidů, tedy rybí olej. El Asely a kol. (2020) testovali čtyři druhy olejů: rybí, kukuřičný, lněný a slunečnicový. Krmivo s rybím olejem vykázalo neprůkazně nejvyšší FCR a nejmenší průměrnou hmotnost ryb. FCR se pohybovalo od $2,419 \pm 0,07$ do $2,784 \pm 0,09$. Nutno podotknout, že pokus probíhal při teplotě vody $21,5 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

U krmiva B využívajícího ve velké míře rostlinné suroviny bychom mohli očekávat horší produkční ukazatele s ohledem na antinutriční faktory, vyšší obsah vlákniny či nedostatek vhodných proteolytických enzymů a tedy horší stravitelnost (Azaza a kol., 2009; Lin a kol., 2010; Hardy a Kaushik, 2022). V této variantě experimentálního krmiva však byl využit např. hrachový proteinový koncentrát, lupinový proteinový koncentrát a kukuřičný škrob. Tím byly minimalizovány případné antinutriční faktory, zlepšila se stravitelnost a obsah vlákniny byl nejnižší ze všech tří variant (1,33 %). K dobrým výsledkům pravděpodobně přispěla i skutečnost, že *O. niloticus* je

v dospělosti téměř býložravá a díky velmi nízkému pH v žaludku (až 1,4), dokáže velmi dobře hydrolyzovat i řasy (Moriarty a Moriarty, 1973; FAO, 2023b). To potvrzují i El-Sheekh a kol. (2014) a El-Ward a kol. (2016), kteří nahrazovali FM řasou *Arthrospira platensis* (syn. *Spirulina platensis*). El-Ward a kol. (2016) naměřili ve variantě s 10,89 % této mikrořasy podobné hodnoty FCR ($1,78 \pm 0,11$) jaké byly zjištěny u krmiva A a B. Nicméně, vzhledem k tomu, že je *A. platensis* nejdražší surovinou v receptuře, bylo by vhodné toto krmivo dále optimalizovat z hlediska nákladů.

Krmivo C se odlišovalo od krmiv A a B především tím, že obsahovalo vyšší spektrum proteinů (rybí, hmyzí, kvasinkový, drůbeží, rostlinný, mléčný). Ve většině výše uvedených experimentů však byly testovány poměrně jednoduché receptury, v nichž byla hlavním zdrojem proteinů rybí moučka a její alternativa (nejčastěji jedna), příp. sójový šrot. Horší produkční parametrů mohlo krmivo C vykazat z několika důvodů.

Především to mohla být nižší stravitelnost. Tomu však nenasvědčuje nízký obsah vlákniny (1,59 %), který byl podobný obsahu vlákniny v krmivu B (1,33 %). Také průměrný poměr hmotnosti TS vůči hmotnosti krmiva spotřebovaného den před měřením (25,3 %) odpovídá běžné stravitelnosti a nelišil se od ostatních krmiv. Dalším důvodem mohl být nevhodný aminokyselinový profil, a tedy, že v souladu s Liebigovým zákonem, nebyla nějaká AMK v krmivu zastoupena v dostatečném množství, takže nemohly být plně využity ani ostatní AMK. V takovémto případě, by však pravděpodobně bylo pozorováno zvýšené vylučování dusíkatých látek do vody či kalu. Ve vodě to však nebylo potvrzeno. Například obsah $N-NO_3^-$ byl po celou dobu trvání experimentu výrazně nižší než u krmiva B. Analýzy kalu v době psaní této práce ještě nebyly k dispozici. Také predikce aminokyselinového profilu učiněná v programu WinFeed tuto možnost činí nepravděpodobnou.

Pravděpodobnější se v tuto chvíli jeví nějaká technická či technologická příčina. Krmivo C obsahovalo ze všech krmiv nejméně škrobu (16,72 %), což bylo o 20,46 % méně než v krmivu B a o 32,17 % méně než v krmivu A. V důsledku toho byly pelety krmiva C po extruzi nejméně naexpandované a po čase klesaly ke dnu rychleji než v ostatních případech. V neosvětlené černé nádrži mohla svou roli sehrát i velmi tmavá barva krmiva. To vede k domněnce, že ryby nestíhaly včas všechny klesající pelety nalézt, a ty skončily v kónické odkalovací části dna pod aeračním zařízením, kde byly již pro ryby nedostupné. Což podporuje i skutečnost, že v kalech byly nalézány zbytky nespotebovaného krmiva C častěji než ve zbylých dvou variantách. Podobně tmavou

barvu sice mělo i krmivo B, ale to mohlo být rybami lépe identifikováno, protože déle plavalo na hladině a proti dennímu světlu tak bylo zřetelnější. Pokud by tomu tak bylo, je to řešitelné jednak zvýšením obsahu škrobu v krmivu a úpravou technologických parametrů při výrobě tak, aby mělo krmivo nižší objemovou hmotnost ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) a lépe plavalo, jednak úpravou techniky krmení. Krmit například častěji v menších dávkách s využitím automatických krmítek a případně i s přisvícením na odpovídající dobu.

Dalším důležitým faktorem mohla být chutnost. Ačkoliv z předchozích informací vyplývá, že ryby jednotlivé ingredience ochotně přijímají, mohlo dojít k nějaké nežádoucí chuťové interakci, která produkční charakteristiky krmiva C ovlivnila.

Při zpracování lokálních a udržitelných zdrojů, různých odpadů a vedlejších výrobků z potravinářské výroby apod., lze předpokládat, že tyto suroviny nebudou mít standardizované vlastnosti. Takže nutriční, chuťové i technologické vlastnosti budou kolísat a bude nutno věnovat více pozornosti návrhu a testování jednotlivých receptur.

5.3 Voda a kaly v RAS

Měření TS na jednotku spotřebovaného krmiva a TSS nepřineslo mnoho poznatků, podle kterých by bylo možno vyvozovat vliv různých zdrojů proteinů na tyto veličiny. Ve všech systémech byl pozorován velmi podobný obsah TS.

Hodnoty TSS v systému, kde byly ryby krmeny konvenčním krmivem A ($13,20\pm 4,13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), se signifikantně nelišily od hodnot v systému B ($16,55\pm 10,04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Oproti tomu v systému C byl naměřen obsah TSS prokazatelně nižší ($7,35\pm 3,28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) a téměř shodný s obsahem TSS v hydroponickém živném roztoku ($7,14\pm 1,97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). V podobném RAS zjistili Lunda a kol. (2019) během svého experimentu koncentraci $12,19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Téměř shodný průměrný obsah ($13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) registrovali i Rakocy a kol. (2004).

Lam a kol. (2015) analyzovali obsah TSS v jednosmyčkovém akvaponickém systému, ve kterém byla chována ryba *Oxyeleotris marmorata* a pěstována povijnice vodní (*Ipomea aquatica*). Sledovali vliv poměru objemu chovné nádrže vůči objemu hydroponické nádrže na TSS, a to v rozsahu od 0,5:1 do 5:1. Dospěli k závěru, že s rostoucím poměrem TSS klesá (z $43\pm 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ na $27\pm 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Vyšší hodnoty TSS než při našem experimentu naměřili také Lunda a kol. (2019) v komerčních farmách ($39,04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ resp. $64,29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Podle Ebelinga a Timmonse (2012) je vhodný rozsah TSS pro ryby 10-100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Námi naměřené hodnoty jsou tedy z pohledu welfare ryb v pořádku.

Vysoký obsah TSS způsobuje akutní, ale nikoliv chronický stres. *O. niloticus* je odolná ryba a prokazatelně přežila i vyšší koncentrace (200 a 2000 mg·L⁻¹). Účinky TSS však závisí na konkrétní koncentraci, vlastnostech obsažených látek a délce expozice (Dominguez a kol., 2004).

Reyes Lastiri a kol. (2018) úspěšně otestovali ve dvousmyčkovém akvaponickém systému (*O. niloticus*, *S. lycopersicum*) matematický model řízení živin, díky němuž nedochází k nadměrným koncentracím TSS v nádržích pro ryby a současně ani k akumulaci solí v akvaponické části. Tento model by bylo možno využít při dalších pokusech.

Z živin obsažených ve vodě zaujmou patrné rozdíly v obsahu SRP. V systému A byla při posledním měření zjištěna hodnota 2,09 mg·L⁻¹ oproti systému B (9,87 mg·L⁻¹) a C (10,63 mg·L⁻¹). To lze vysvětlit tím, že krmiva B a C obsahovala 2 % KH₂PO₄. Zdrojem SRP v krmivu A byla především rybí moučka. Shaw a kol. (2022a) ve variantě krmiva pro *C. gariepinus* obsahující FM naměřili na konci pokusu obsah 3,5 mg·L⁻¹. Krmivo však obsahovalo 51 % FM oproti variantě A, jež obsahovala jen 20 % FM. Signifikantně nejvyšší hodnotu (7,9 mg·L⁻¹) však vykazala varianta, v níž byla FM nahrazena drůbeží moučkou (obsah v krmivu 56,4 %). Gebauer a kol. (2023) pozorovali ve variantě obsahující 56,4 % FM obsah SRP téměř 11 mg·L⁻¹. Krmivo určené také pro *C. gariepinus* však obsahovalo též 1,2 % CaHPO₄·2H₂O. Shaw a kol. (2022a) i Gebauer a kol. (2023) shodně konstatovali, že došlo k rostoucímu trendu a tudíž k akumulaci SRP v systému. Což je v rozporu s touto prací, neboť zde byl pozorován spíše stabilní obsah SRP.

Oproti tomu se projevila akumulace N-NO₃⁻, a to ve všech třech variantách. Nejvyšší hodnota byla dosažena v systému B na konci experimentu (133,17 mg·L⁻¹). Shaw a kol. (2022a) pozorovali rostoucí trend, ale výrazně nižší obsah celkového dusíku (43,3-61,8 mg·L⁻¹). Podobné hodnoty potvrdili i Gebauer a kol. (2023). Při srovnání krmiv pro *C. gariepinus* a *O. niloticus* bylo konstatováno, že produkce SRP a celkového dusíku byla v některých variantách vyšší a v některých nižší (Shaw a kol., 2022a).

Koncentrace draslíku se po počátečním poklesu stabilizovala v systému A a B. Systém C vykazoval stabilní obsah K od počátku měření. Nejméně obsahovalo krmivo A (37,96 mg·L⁻¹), protože do něj nebyla přidána sloučenina KH₂PO₄. Přesto je to výrazně více než uvádějí Shaw a kol. (2022a) ve svých variantách (13,0-23,8 mg·L⁻¹). Nejvyšší hodnota se nacházela ve variantě obsahující hmyzí moučku. K podobnému

výsledku dospěli i Gebauer a kol. (2023). Rozdíly v produkci draslíku mezi krmivými určenými pro *C. gariepinus* a *O. niloticus* nebyly pozorovány (Shaw a kol., 2022a).

Přestože zdrojová voda obsahovala $29,9 \pm 0,14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca a jako pufr byl využíván $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nedocházelo v systémech k výrazné akumulaci této živiny. Což je v souladu s poznatky Shawa a kol. (2022a) i Gebauera a kol. (2023).

Také obsah sodíku byl ve všech variantách stabilní a v systémech se neakumuloval. Zajímavé je, že nejvyšší byl ve variantě B, která neobsahovala moučku z mořských ryb. Možným zdrojem mohla být *A. platensis*.

Hořčík ani síra taktéž nevykázaly žádné trendy a rozdíly mezi variantami byly oproti jiným živinám minimální. To je v rozporu s výsledky Shawa a kol. (2022a), kteří identifikovali akumulaci u obou těchto živin, a to na vyšších úrovních. Také Gebauer a kol. (2023) v některých variantách dospěli k podobným závěrům.

V systému C byl obsah živin ve vodě většinou nižší než v systémech A a B. Ryby zde rostly nejpomaleji, a tudíž živiny netransformovaly na biomasu, tak jako v systémech A a B. A vzhledem k tomu, že koncentrace TS byly podobné ve všech systémech, lze usuzovat, že se v systému C živiny akumulovaly spíše v kalu a bude jich zde více než v kalech systémů A a B.

Podle Lundy a kol. (2019) je v kalech mnohem více živin než v systémové vodě. Dusík je v něm obsažen více než dvakrát, draslík více než třikrát, hořčík téměř čtyřikrát, vápník téměř desetkrát a fosfor dokonce více než 37krát. Jediná živina, která vykazuje opačný trend je sodík. V kalech je ho o 63,6 % méně než ve vodě.

5.4 Mineralizace

SVI a TS nevykázaly žádné trendy ani trvalé signifikantní rozdíly mezi nádržemi. Nelze z toho tedy vyvozovat žádné závěry. Nejvyšší zaznamenaný obsah TS v průběhu pokusu ($1,65 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) se shodoval s nejvyšší hodnotou, kterou naměřili Panana a kol. (2021).

Vhodnější by zřejmě bylo měřit TSS a porovnávat pokles hodnot v jednotlivých mineralizačních nádržích v souvislosti s tím, jak mikroorganismy rozkládají komplexní sloučeniny na živiny dostupné pro rostliny. Pokles obsahu TSS prokázali např. Delaide a kol. (2018). Po 42 dnech aerobní mineralizace došlo k redukci obsahu TSS o 60,8 %. Z kalu získaného z chovu *O. niloticus* tak dokázali mobilizovat všechny makro i mikroživiny. Jejich obsah ve vodě se zvýšil o 10-60 %. Nárůst obsahu některých živin v důsledku mineralizace hlásí Monsees a kol. (2017a) či Panana a kol. (2021). Snížení

koncentrace TSS a mobilizaci živin konstatovali též Lobanov a kol. (2021). Lze tedy předpokládat, že k podobnému efektu došlo i v rámci našeho experimentu.

Zajímavý je průběh pH v nádrži A, který se výrazně odlišuje od zbylých nádrží. Než byla aplikována 20% H₂SO₄, došlo zde během mineralizace k nárůstu pH z hodnoty 7,58 na 8,05. Oproti tomu v nádržích B a C pH klesalo na hodnoty okolo 5,5. K této přirozené acidifikaci přispívá nitrifikace a respirační produkce CO₂ (Wurts a Durburow, 1992; Paredes a kol., 2007). To potvrzují Monsees a kol. (2017a), kteří pozorovali během aerobní mineralizace také pokles pH. Naopak růst pH byl zaznamenán u anaerobní mineralizace. Podobný trend u aerobní mineralizace uvádějí i Panana a kol. (2021), v rámci jejichž experimentu pH nejprve kleslo z 8 na 6, a po té se stabilizovalo v rozmezí 6,5-6,8.

Z rozdílného průběhu pH v nádrži A lze usuzovat, že se zde vyvinula odlišná mikrobiální komunita, jež mohla produkovat a transformovat též jiné spektrum živin a organických látek. Zajímavé by bylo znát strukturu a velikost těchto komunit, jakož i obsah organických látek, protože PGPM a organické látky mohou sehrát klíčovou biostimulační roli během pěstebního pokusu.

5.5 Pěstební pokus

Neprůkazně nejvyšší hmotnost nadzemní části rostlin *L. sativa* byla dosažena ve variantě B_F, tedy v živném roztoku získaném z aerobně mineralizovaného kalu odebraného ze systému B a obohaceného o chybějící živiny. Průměrná hmotnost 221,8±33,9 g byla o 44,21 % vyšší než hmotnost v hydroponickém roztoku a o 8,62 % vyšší než v roztoku vytvořeném z kalu konvenčního krmiva A.

Effendi a kol. (2016) zkoumali růst *L. sativa* v jednosmyčkovém systému, kde byla současně chována tilápie *O. niloticus*. Ryby byly krmeny konvenčním krmivem s obsahem 40 % proteinů. Po pěti týdnech rostliny zvýšily svoji průměrnou hmotnost z 18,00±0,17 g na 61,87±5,59 g. To je více než nejnižší průměrná hmotnost neošetřené varianty v našem experimentu (C₀; 41,9±19,4 g), ale současně výrazně méně než nejvyšší hmotnost neošetřené varianty (B₀; 115,0±40,0 g).

Rana a kol. (2018) posuzovali rozdíly mezi produkcí *L. sativa* v jednosmyčkovém akvaponickém systému (*O. niloticus*, krmivo neuvedeno) a v půdě. Po 89 dnech dospěli k poznatku, že v půdě byl výnos o 14,25 % vyšší než v akvaponii. Průměrná délka kořenů v akvaponii byla 13,63 cm což je výrazně méně než nejmenší délka kořenů pozorovaná v naší práci (39,6±7,9 cm; varianta C₀) po čtyřech týdnech. Průměrná

hmotnost kořenů (14,37 g) byla podobná nejvyšší dosažené průměrné hmotnosti, což bylo $13,75 \pm 3,19$ (B_F).

Ve dvousmyčkovém systému použili Monsees a kol. (2019) pro výživu *O. niloticus* komerční krmivo s obsahem 37 % proteinů. Jako živný roztok aplikovali přímo vodu z RAS. Rostliny *L. sativa* byly vysazeny dva týdny po vysetí. Po dalších sedmi týdnech byla zaznamenána průměrná hmotnost $323,3 \pm 44,5$ g a vůči kontrole (50 % vodovodní voda, 50 % dešťová voda, minerální hnojivo) nebyl shledán signifikantní rozdíl. Dosažená hmotnost je výrazně vyšší než nejvyšší hmotnost dosažená během našeho experimentu (B_F; $221,8 \pm 33,9$ g), ale ten probíhal jen čtyři týdny.

Nozzi a kol. (2018) analyzovali ve dvousmyčkovém systému růst *O. niloticus* a *L. sativa*. Rostlinné krmivo obsahovalo 37,5 % proteinů. Rostliny byly vysazeny 24 dnů po vysetí a dále kultivovány čtyři týdny. Rostly v několika variantách různě upravených živných roztoků, přičemž průměrná hmotnost nadzemní části rostlin (222 g) v neupravené vodě z RAS byla téměř shodná s naší variantou B_F, avšak naše rostliny byly předpěstovány o devět dnů kratší dobu. Poměr R:S byl nižší ve variantě B_F ($0,06 \pm 0,02$ oproti 0,15).

Rozdíly mezi aerobní a anaerobní mineralizací uvádějí Goddek a kol. (2016). Podle jejich výzkumů *L. sativa* rostoucí v živném roztoku získaném anaerobní mineralizací vykazovala signifikantně vyšší výnosy než ve variantě ošetřené aerobní mineralizací. Kal pocházel z chovu *O. niloticus* a rostlinné krmivo obsahovalo 37,5 % proteinů. Za 36 dnů zvýšily rostliny svoji hmotnost z počátečních $10,3 \pm 0,2$ g na 137,4 g, což bylo o 31,10 % více než v roztoku získaného aerobní mineralizací. Dosažená hodnota je srovnatelná s naší variantou C_F ($127,3 \pm 34,9$ g), ta byla sice obohacena o živiny, ale vegetační doba byla o jeden týden kratší. Uvedení autoři předpokládají, že vyšší výnos byl pozitivně ovlivněn vyšším obsahem NH₄⁺ a přítomností organických látek a PGPM.

Biostimulační účinky organických látek a PGPM jsou známy a ověřeny v půdním zemědělství (du Jardin, 2015; Van Oosten a kol., 2017; Bulgari a kol., 2019). Přínos PGPM a efektivita inokulace mikrobiálními kulturami je potvrzena též v hydroponii (Lee a Lee, 2015; Sheridan a kol., 2017; Dhawi, 2023). Z toho lze vyvodit, že budou účinkovat i v akvaponii, což podporují i výsledky našeho experimentu. Zejména skutečnost, že varianta A_F a B_F vykázaly (byť neprůkazně) výnos o 32,77 % respektive o 44,21 % vyšší než v hydroponickém roztoku, ačkoliv obsahovaly stejné množství živin.

6 Závěr

Většinu cílů stanovených na počátku práce se podařilo splnit. Protože v tuto chvíli nejsou k dispozici kompletní analýzy kalů z RAS a vod z mineralizačních nádrží, nelze zcela přesně posoudit osud živin v akvaponickém systému.

Podařilo se prokázat, že v akvaponických krmivech lze nahradit moučku z mořských ryb alternativními zdroji proteinů a těmito krmivy zajistit efektivní výživu ryb i rostlin v dvousmyčkovém akvaponickém systému.

Krmivo B, v němž byla moučka z mořských ryb nahrazena moučkou ze sladkovodních ryb a doplněna rostlinnými proteiny, vykazovalo podobné hodnoty všech produkčních ukazatelů jako konvenční krmivo A. Hmotnost obsádky v systému A vzrostla za třináct týdnů o 143,68 % a v systému B o 136,56 %. Hmotnost obsádky v systému B byla na konci pokusu oproti systému A neprůkazně nižší o 4,08 %. Krmný koeficient (FCR) krmiva B ($1,92 \pm 0,10$) byl neprůkazně vyšší o 8,47 % vůči FCR krmiva A ($1,77 \pm 0,13$).

Průměrná hmotnost nadzemní části rostlin rostoucích v živném roztoku vytvořeném z mineralizovaného kalu, získaného ze systému B a doplněného o chybějící živiny, dosáhla po čtyřech týdnech hodnoty $221,8 \pm 33,9$ g. To bylo neprůkazně více o 44,21 % než průměrná hmotnost rostlin pěstovaných ve speciálním hydroponickém živném roztoku a o 8,62 % neprůkazně více než hmotnost rostlin pěstovaných v obohaceném roztoku získaného ze systému A.

Protože krmivo B má podobné produkční vlastnosti jako krmivo A, bylo by vhodné před případnými úpravami složení tohoto krmiva provést především důkladnou ekonomickou analýzu. Zejména tedy porovnat náklady na krmné suroviny a hnojiva vůči předpokládaným výnosům ryb i rostlin. A na základě této analýzy pak definovat, co by mělo být cílem těchto úprav.

U krmiva C je nutno snížit objemovou hmotnost, aby déle plavalo. To lze jednak zvýšením obsahu škrobu a jednak adjustací technologických parametrů při výrobě. Dále je zapotřebí provést testy chutnosti a posoudit případný vliv této důležité vlastnosti krmiva na produkční ukazatele. Podle výsledků těchto testů zvážit úpravy receptury. I v tomto případě by však měla předcházet ekonomická analýza.

Máme-li zohlednit environmentální dopady, bylo by vhodné posoudit skutečnou lokálnost a udržitelnost zdrojů. Např. zda řasy byly získány z moří (a jakým způsobem) či z fotobioreaktorů (v které zemi a s jakou energetickou náročností), zda proteinový

koncentrát z plodiny rostoucí i v ČR nevyrábí jen několik producentů na světě, ale bohužel v jiných světadílech apod.

Význam této práce spočívá v tom, že by mohla malým dílkem přispět k poznání, jak udržitelným způsobem nasytit rostoucí lidskou populaci v podmínkách klimatické změny. Další výzkum by se měl zaměřit mimo jiné na studium mikrobiálních komunit a výskyt organických sloučenin ve vodách a kalech, protože především jejich biostimulační účinky jsou to, co odlišuje akvaponický živný roztok od hydroponického.

7 Literatura

- Ahmad, N., Siddiqui, P.J.A., Khan, K.M., Ali, A., Tahir, M., Akbar, N.U., Amin, M., Attaullah, M., Boneri, I.D., 2020. Effects of partial substitution of fishmeal by soybean meal in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) diet. *J. Anim. Plant Sci.* 30, 364–370.
- Ali, A., Al-Asgah, N.A., Al-Ogaily, S.M., Ali, S., 2003. Effect of Feeding Different Levels of Alfalfa Meal on the Growth Performance and Body Composition of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fingerlings. *Asian Fish. Sci.* 16, 59–67.
- Aller Aqua, 2023. Feed products and concepts [online]. Aller Aqua Group [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.aller-aqua.com/feed-products-and-concepts>.
- Alltech Coppens, 2023. Products [online]. Alltech Coppens [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.alltechcoppens.com/en/products>.
- Alves, A.P. do C., Paulino, R.R., Pereira, R.T., da Costa, D.V., e Rosa, P.V., 2021. Nile tilapia fed insect meal: Growth and innate immune response in different times under lipopolysaccharide challenge. *Aquac. Res.* 52, 529–540.
- Arnon, D.I., Stout, P.R., 1939. The essentiality of certain elements in minute quantities with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14, 371–375.
- Arriaga-Hernández, D., Hernández, C., Martínez-Montaña, E., Ibarra-Castro, L., Lizárraga-Velázquez, E., Leyva-López, N., Chávez-Sánchez, M.C., 2021. Fish meal replacement by soybean products in aquaculture feeds for white snook, *Centropomus viridis*: Effect on growth, diet digestibility, and digestive capacity. *Aquaculture* 530, 735823.
- Ayadi, F.Y., Rosentrater, K.A., Muthukumarappan, K., 2012. Alternative Protein Sources for Aquaculture Feeds [online]. ResearchGate [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/250309078_Alternative_Protein_Sources_for_Aquaculture_Feeds
- Aydin, B., Gümüş, E., Balci, B.A., 2015. Effect of dietary fish meal replacement by poultry by-product meal on muscle fatty acid composition and liver histology of fry of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Actinopterygii: Perciformes: Cichlidae). *Acta Ichthyol. Piscat.* 45, 343–351.
- Ayre, J.M., Moheimani, N.R., Borowitzka, M.A., 2017. Growth of microalgae on undiluted anaerobic digestate of piggery effluent with high ammonium concentrations. *Algal Res.* 24, 218–226.
- Azaza, M.S., Mensi, F., Kammoun, W., Abdelouaheb, A., Brini, B., Kraïem, M., 2009. Nutritional evaluation of waste date fruit as partial substitute for soybean meal in practical diets of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquac. Nutr.* 15, 262–272.
- Azaza, M.S., Mensi, F., Ksouri, J., Dhraïef, M.N., Brini, B., Abdelmouleh, A., Kraïem, M.M., 2008. Growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fed with diets containing graded levels of green algae ulva meal (*Ulva rigida*) reared in geothermal waters of southern Tunisia. *J. Appl. Ichthyol.* 24, 202–207.
- Azim, M.E., Little, D.C., 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 283, 29–35.
- Bai, C.B., Hardy, R.W., Hamidoglu, A., 2022. Diet analysis and evaluation. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 709–744.

- Barroso, F.G., de Haro, C., Sánchez-Muros, M.J., Venegas, E., Martínez-Sánchez, A., Pérez-Bañón, C., 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. *Aquaculture* 422–423, 193–201.
- Bartelme, R.P., Oyserman, B.O., Blom, J.E., Sepulveda-Villet, O.J., Newton, R.J., 2018. Stripping away the soil: Plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. *Front. Microbiol.* 9, 1–7.
- Becquer, A., Trap, J., Irshad, U., Ali, M.A., Claude, P., 2014. From soil to plant, the journey of P through trophic relationships and ectomycorrhizal association. *Front. Plant Sci.* 5, 1–7.
- Bell-Young, L., 2021. What Are Amino Acids [online]. Reagent [cit 30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.reagent.co.uk/blog/what-are-amino-acids>.
- Bernstein, S., 2011. *Aquaponic Gardening: A Step-By-Step Guide to Raising Vegetables and Fish Together*. New Society Publishers, Gabriola Island. 257 s.
- Bhatla, S.C., 2018. Water and Solute Transport. In: Bhatla, S.C., Lal, M.A. (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer Nature, Singapore, pp. 83–118.
- BioMar, 2023. Products & Species [online]. BioMar [cit 30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.biomar.com//en/global/products-and-species>.
- Booth, M.A., Allan, G.L., Smullen, R.P., 2013. Digestibility of common feed ingredients by juvenile mulloway *Argyrosomus japonicus*. *Aquaculture* 414–415, 140–148.
- Bulgari, R., Franzoni, G., Ferrante, A., 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy* 9, 1–30.
- Bureau, D.P., Harris, A.M., Bevan, D.J., Simmons, L.A., Azevedo, P.A., Cho, C.Y., 2000. Feather meals and meat and bone meals from different origins as protein sources in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets. *Aquaculture* 181, 281–291.
- Bureau, D.P., Harris, A.M., Cho, C.Y., 1999. Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 180, 345–358.
- Cerozi, B. da S., 2020. Fulvic acid increases iron bioavailability in aquaponic systems: Theoretical designs and practical considerations to prevent iron deficiency in plants. *Aquac. Eng.* 90, 102091.
- Cerozi, B. da S., de Oliveira Neto, J.W., Leonel, R.A.R.C.D., do Carmo Alves, A.P., 2022. Nutrient release coefficient: a proposed batch reactor assay to determine the elemental composition of aquaponic nutrient solutions. *Aquac. Int.* 30, 735–746.
- Cerozi, B. da S., Fitzsimmons, K., 2016. Use of *Bacillus* spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 211, 277–282.
- Cerozi, B.S., Fitzsimmons, K., 2017. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agric. Syst.* 153, 94–100.
- Colt, J., Semmens, K., 2022. Computation of feed conversion ratio (FCR_{plant}) and plant-fish mass ratio (PFRM) for aquaponic systems. *Aquac. Eng.* 98, 102260.
- Coskun, D., White, P.J., 2023. Ion-uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. In: Rengel, Z., Cakmak, I., White, P.J. (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*. Academic Press, London, pp. 11–72.

- da Silva, R.L., Damasceno, F.M., Rocha, M.K.H.R., Sartori, M.M.P., Barros, M.M., Pezzato, L.E., 2017. Replacement of soybean meal by peanut meal in diets for juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Lat. Am. J. Aquat. Res. 45, 1044–1053.
- Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., Jijakli, M.H., 2017. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. Aquac. Eng. 78, 130–139.
- Delaide, B., Goddek, S., Keesman, K.J., Jijakli, M.H.M., 2018. A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in Aquaponics | Une méthodologie pour quantifier les performances de digestion aérobie et anaérobie des boues, pour le recyclage des nutriments en Aqua. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 22, 106–112.
- Delaide, B., Monsees, H., Gross, A., Goddek, S., 2019. Aerobic and Anaerobic Treatments for Aquaponic Sludge Reduction and Mineralisation. In: Goddek, Simon, Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future. Springer Nature, Cham, pp. 247–266.
- Demirci, B., Terzi, F., Kesbic, O.S., Acar, U., Yilmaz, S., Kesbic, F.I., 2021. Does dietary incorporation level of pea protein isolate influence the digestive system morphology in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)? J. Vet. Med. Ser. C Anat. Histol. Embryol. 50, 956–964.
- Deswati, D., Khairiyah, K., Safni, S., Yusuf, Y., Refinel, R., Pardi, H., 2022. Environmental detoxification of heavy metals in flood & drain aquaponic system based on biofloc technology. Int. J. Environ. Chem. 102, 7155–7164.
- Devic, E., Leschen, W., Murray, F., Little, D.C., 2018. Growth performance, feed utilization and body composition of advanced nursing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larvae meal. Aquac. Nutr. 24, 416–423.
- Dhawi, F., 2023. The Role of Plant Growth-Promoting Microorganisms (PGPMs) and Their Feasibility in Hydroponics and Vertical Farming. Metabolites 13, 1-12
- Dominguez, M., Takemura, A., Tsuchiya, M., Nakamura, S., 2004. Impact of different environmental factors on the circulating immunoglobulin levels in the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Aquaculture 241, 491–500.
- du Jardin, P., 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Sci. Hortic. (Amsterdam). 196, 3–14.
- Dvořák, P., Pyszko, M., Velíšek, J., Dvořáková Líšková, Z., Andreji, J., 2020. Anatomie a fyziologie ryb. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vod, Vodňany. 231 s.
- Ebeling, J.M., Timmons, M.B., 2012. Recirculating Aquaculture Systems. In: Tidwell, J.H. (Ed.), Aquaculture Production Systems. Wiley & Sons, Chichester, pp. 245–277.
- Eck, M., Körner, O., Jijakli, M.H.M., 2019. Nutrient Cycling in Aquaponic Systems. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future. Springer Nature, Cham, pp. 231–246.
- Effendi, H., Wahyuningsih, S., Wardiatno, Y., 2016. The use of nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation wastewater for the production of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) in water recirculation system. Appl. Water Sci. 7, 3055–3063.

- Einarsson, M.I., Jacobsen, C., Bæk, A.M., Jokumsen, A., Pedersen, S.A., Samuelson, T.A., Pálsson, J., Eliassen, O., Flesland, O., 2019. Nordic Centre of Excellence Network in Fishmeal and Fish oil [online]. ResearchGate [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333729916_Nordic_Centre_of_Excellence_Network_in_Fishmeal_and_Fish_oil.
- El-Saidy, D.M.S.D., Gaber, M.M., 2004. Use of cottonseed meal supplemented with iron for detoxification of gossypol as a total replacement of fish meal in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) diets. *Aquac. Res.* 35, 859–865.
- El-Sheekh, M., El-Shourbagy, I., Shalaby, S., Hosny, S., 2014. Effect of feeding *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) on growth and carcass composition of hybrid red tilapia (*Oreochromis niloticus* x *Oreochromis mossambicus*). *Turkish J. Fish. Aquat. Sci.* 14, 471–478.
- El-Ward, A.A., Eid, A.E., Mohamed, K.A., Hasan, M.A., 2016. Growth Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fingerlings Fed Diet Supplemented with Different of *Spirulina Platensis* Levels. *Egypt. J. Anim. Prod.* 53, 181–190.
- El Asely, A.M., Reda, R.M., Salah, A.S., Mahmoud, M.A., Dawood, M.A.O., 2020. Overall performances of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) associated with using vegetable oil sources under suboptimal temperature. *Aquac. Nutr.* 26, 1154–1163.
- Eliasson, T., 2015. Dairy waste – Feed for fish ? *Swedish Univ. Agric. Sciences* 531, 1–27.
- Epstein, E., Bloom, A., 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. Sinauer Associates, Sunderland. 380 s.
- Espinosa-Moya, A., Alvarez-Gonzalez, A., Albertos-Alpuche, P., Guzman-Mendoza, R., Martínez-Yáñez, R., 2018. Growth and development of herbaceous plants in aquaponic systems. *Acta Univ.* 28, 1–8.
- EU, 2017. Nařízení Komise (EU) 2017/893 [online]. Eur-Lex [cit 30.4.2023]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0893&qid=1683452864593>.
- FAO, 2021. *Fishery and Aquaculture Statistics 2019*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. 206 s.
- FAO, 2023a. *Fisheries and Aquaculture* [online]. Food and Agriculture Organization of the United Nations [cit. 30.4. 2023]. Dostupné z: <https://www.fao.org/fishery/en/aquaculture>.
- FAO, 2023b. Nile tilapia - Natural food and feeding habits [online]. Food and Agriculture Organization of the United Nations [cit. 30.4. 2023]. Dostupné z: <https://www.fao.org/fishery/affris/species-profiles/nile-tilapia/natural-food-and-feeding-habits/en>.
- Ferrer Llagostera, P., Kallas, Z., Reig, L., Amores de Gea, D., 2019. The use of insect meal as a sustainable feeding alternative in aquaculture: Current situation, Spanish consumers' perceptions and willingness to pay. *J. Clean. Prod.* 229, 10–21.
- Frenzy Fish Feeds, 2023. *Aquaponics fish feed* [online]. Frenzy Fish Feed [cit. 30.4. 2023]. Dostupné z: https://www.frenzyfishfeeds.com/?product_cat=aquaponics-fish-food.
- Gaber, M.A., 2005. The Effect of Different Levels of Krill Meal Supplementation of Soybean-based Diets on Feed Intake, Digestibility, and Chemical Composition of Juvenile Nile Tilapia *Oreochromis niloticus*, L. *J. World Aquac. Soc.* 36, 346–353.

- Gao, Y., He, J., He, Z., Li, Z., Zhao, B., Mu, Y., Lee, J.Y., Chu, Z., 2017. Effects of fulvic acid on growth performance and intestinal health of juvenile loach *Paramisgurnus dabryanus* (Sauvage). *Fish Shellfish Immunol.* 62, 47–56.
- Gebauer, R., Brüggemann, A., Folorunso, E.A., Goldhammer, T., Gebauer, T., Schöning, V., Bittmann, S., Knopf, K., Mráz, J., Kloas, W., 2023. Species- and diet-specific aquaculture wastewater nutrient profile: Implications for aquaponics and development of sustainable aquaponics diet. *Aquaculture* 568, 739307.
- Glencross, B., 2016. Understanding the nutritional and biological constraints of ingredients to optimize their application in aquaculture feeds. In: Nates, S.F. (Ed.), *Aquafeed Formulation*. Academic Press, Oxford, pp. 33–74.
- Glencross, B., Blyth, D., Tabrett, S., Bourne, N., Irvin, S., Anderson, M., Fox-Smith, T., Smullen, R., 2012. An assessment of cereal grains and other starch sources in diets for barramundi (*Lates calcarifer*) - implications for nutritional and functional qualities of extruded feeds. *Aquac. Nutr.* 18, 388–399.
- Glencross, B., Hawkins, W., Evans, D., Rutherford, N., McCafferty, P., Dods, K., Karopoulos, M., Veitch, C., Sipsas, S., Buirchell, B., 2008. Variability in the composition of lupin (*Lupinus angustifolius*) meals influences their digestible nutrient and energy value when fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 277, 220–230.
- Glencross, B., Sweetingham, M., Hawkins, W., 2010. A digestibility assessment of pearl lupin (*Lupinus mutabilis*) meals and protein concentrates when fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 303, 59–64.
- Glencross, B.D., Baily, J., Berntssen, M.H.G., Hardy, R., MacKenzie, S., Tocher, D.R., 2020a. Risk assessment of the use of alternative animal and plant raw material resources in aquaculture feeds. *Rev. Aquac.* 12, 703–758.
- Glencross, B.D., Huyben, D., Schrama, J.W., 2020b. The Application of Single-Cell Ingredients in Aquaculture Feeds - A Review. *Fishes* 5, 1–39.
- Goddard, S., Al-Abri, F.S., 2018. Integrated aquaculture in arid environments. *J. Agric. Mar. Sci. [JAMS]* 23, 52–57.
- Goddek, S., Delaide, B.P.L., Joyce, A., Wuertz, S., Jijakli, M.H., Gross, A., Eding, E.H., Bläser, I., Reuter, M., Keizer, L.C.P., Morgenstern, R., Körner, O., Verreth, J., Keesman, K.J., 2018. Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. *Aquac. Eng.* 83, 10–19.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Wuertz, S., 2019a. Aquaponics and Global Food Challenges. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 3–18.
- Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., Keesman, K.J., 2019b. Decoupled Aquaponics Systems. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 201–230.
- Goddek, S., Keesman, K.J., 2020. Improving nutrient and water use efficiencies in multi-loop aquaponics systems. *Aquac. Int.* 28, 2481–2490.
- Goddek, S., Schmutz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K.J., Wuertz, S., Junge, R., 2016. The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. *Agronomy* 6, 1–12.

- Goddek, S., Vermeulen, T., 2018. Comparison of *Lactuca sativa* growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. *Aquac. Int.* 26, 1377–1386.
- Graber, A., Junge, R., 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246, 147–156.
- Halliday, S., 2007. Cycling graph [online]. The Aquarium Wiki [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: https://theaquariumwiki.com/wiki/File:Cycling_graph.png
- Hardy, R., 2009. Aquaculture feeds and ingredients: an overview. In: Burnell, G., Allan, G. (Eds.), *New Technologies in Aquaculture: Improving Production Efficiency, Quality and Environmental Management*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 370–386.
- Hardy, R.W., Kaushik, S.J., 2022. Preface. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. XI–XIII.
- Hassaan, M.S., Mahmoud, S.A., Jarmolowicz, S., El-Haroun, E.R., Mohammady, E.Y., Davies, S.J., 2018. Effects of dietary baker's yeast extract on the growth, blood indices and histology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fingerlings. *Aquac. Nutr.* 24, 1709–1717.
- Hemre, G.-I., Deng, D.-F., 2015. Carbohydrates. In: *Dietary Nutrients, Additives and Fish Health*. Wiley & Sons, New Jersey, pp. 94–110.
- Hodar, A.R., Vasava, R., Joshi, N.H., Mahavadiya, D.R., 2020. Fish meal and fish oil replacement for alternative sources: a review. *J. Exp. Zool. India* 23, 13–21.
- Hossain, S., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., Sony, N.M., Islam, J., Maekawa, M., Fujieda, T., 2018. Substitution of dietary fishmeal by soybean meal with inosine administration influences growth, digestibility, immunity, stress resistance and gut morphology of juvenile amberjack *Seriola dumerili*. *Aquaculture* 488, 174–188.
- IAFFD, 2023. Nutrition specification database [online]. IAFFD [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: <https://app.iaffd.com/asns>.
- IPCC, 2023. Sixth Assessment Report [online]. The Intergovernmental Panel on Climate Change [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers>.
- Joyce, A., Timmnos, M.B., Goddek, S., Pentz, T., 2019. Bacterial Relationships in Aquaponics: New Research Directions. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 145–162.
- Jung, I.S., Lovitt, R.W., 2011. Leaching techniques to remove metals and potentially hazardous nutrients from trout farm sludge. *Water Res.* 45, 5977–5986.
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., Jijakli, M.H., 2017. Strategic points in aquaponics. *Water (Switzerland)* 9, 1–9.
- Kasozi, N., Abraham, B., Kaiser, H., Wilhelmi, B., 2021. The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. *Ann. Microbiol.* 71, 1–13.
- Kasozi, N., Kaiser, H., Wilhelmi, B., 2022. Determination of Phylloplane Associated Bacteria of Lettuce from a Small-Scale Aquaponic System via 16S rRNA Gene Amplicon Sequence Analysis. *Horticulturae* 8.

- Kasozi, N., Tandlich, R., Fick, M., Kaiser, H., Wilhelmi, B., 2019. Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review. *Aquac. Reports* 15, 100221.
- Kaushik, J., Panserat, S., Schrama, J.W., 2022. Carbohydrates. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 555–592.
- Kaushik, S.J., Cravedi, J.P., Lalles, J.P., Sumpter, J., Fauconneau, B., Laroche, M., 1995. Partial or total replacement of fish meal by soybean protein on growth, protein utilization, potential estrogenic or antigenic effects, cholesterolemia and flesh quality in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 133, 257–274.
- Khalifa, N.S.A., Belal, I.E.H., El-Tarabily, K.A., Tariq, S., Kassab, A.A., 2016. Evaluation of replacing fish meal with corn protein concentrate in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings commercial diet. *Aquac. Nutr.* 24, 143–152.
- Khiari, Z., Kaluthota, S., Savidov, N., 2020. Phosphorus delays the onset of nitrification during aerobic digestion of aquaculture/aquaponic solid waste. *Biochem. Eng. J.* 155, 107493.
- Kim, K.W., Wang, X., Choi, S.M., Park, G.J., Bai, S.C., 2004. Evaluation of optimum dietary protein-to-energy ratio in juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus* (Temminck et Schlegel). *Aquac. Res.* 35, 250–255.
- Kirkby, E.A., 2023. Nutritional physiology. In: Rengel, Z., Cakmak, I., White, P.J. (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*. Academic Press, London, pp. 1–10.
- Kodíček, M., Valentová, O., Hynek, R., 2018. *Biochemie: chemický pohled na biologický svět*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha. 408 s.
- Kolkovski, S., Lazo, J., Leclercq, D., Izquierdo, M., 2009. Fish Larvae Nutrition and Diet: New Development. In: Burnell, G., Allan, G. (Eds.), *New Technologies in Aquaculture: Improving Production Efficiency, Quality and Environmental Management*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 315–369.
- Kotzen, B., Emerenciano, M.G.C., Moheimani, N., Burnel, G.M., 2019. Aquaponics: Alternative Types and Approaches. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnel, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 301–332.
- Kumar, V., Sinha, A.K., Makkar, H.P.S., De Boeck, G., Becker, K., 2011. Phytate and phytase in fish nutrition. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.)* 96, 335–364.
- Lall, S.P., 2022. The minerals. In: Hardy, R.W., Kohli, S.K. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 469–554.
- Lall, S.P., Dumas, A., 2015. Nutritional requirements of cultured fish: formulating nutritionally adequate feeds. In: Davis, D.A. (Ed.), *Feed and Feeding Practises in Aquaculture*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 53–110.
- Lam, S.S., Ma, N.L., Jusoh, A., Ambak, M.A., 2015. Biological nutrient removal by recirculating aquaponic system: Optimization of the dimension ratio between the hydroponic & rearing tank components. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 102, 107–115.
- Lee, S., Lee, J., 2015. Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 195, 206–215.

- Leinweber, P., Bathmann, U., Buczko, U., Douhaire, C., Eichler-Löbermann, B., Frossard, E., Ekardt, F., Jarvie, H., Krämer, I., Kabbe, C., Lennartz, B., Mellander, P.E., Nausch, G., Ohtake, H., Tränckner, J., 2018. Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P. *Ambio* 47, 3–19.
- Lennard, W., 2017. Commercial Aquaponic Systems: Integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production. Wilson Lennard, Blackrock. 420 s.
- Lennard, W., Goddek, S., 2019. Aquaponics: The basics. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 113–144.
- Li, M.H., Robinson, E.H., 2015. Complete feeds - intensive systems. In: Davis, D.A. (Ed.), *Feed and Feeding Practises in Aquaculture*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 111–126.
- Li, W., Liu, J., Tan, H., Yang, C., Ren, L., Liu, Q., Wang, S., Hu, F., Xiao, J., Zhao, R., Tao, M., Zhang, C., Qin, Q., Liu, S., 2018. Genetic effects on the gut microbiota assemblages of hybrid fish from parents with different feeding habits. *Front. Microbiol.* 9, 1–13.
- Lin, S., Mai, K., Tan, B., Liu, W., 2010. Effects of four vegetable protein supplementation on growth, digestive enzyme activities, and liver functions of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*. *J. World Aquac. Soc.* 41, 583–593.
- Lobanov, V.P., Combot, D., Pelissier, P., Labbé, L., Joyce, A., 2021. Improving Plant Health Through Nutrient Remineralization in Aquaponic Systems. *Front. Plant Sci.* 12, 1–20.
- Lunda, R., Roy, K., Másilko, J., Mráz, J., 2019. Understanding nutrient throughput of operational RAS farm effluents to support semi-commercial aquaponics: Easy upgrade possible beyond controversies. *J. Environ. Manage.* 245, 255–263.
- Magalhães, S.C.Q., Cabrita, A.R.J., Valentão, P., Andrade, P.B., Rema, P., Maia, M.R.G., Valente, L.M.P., Fonseca, A.J.M., 2018. Apparent digestibility coefficients of European grain legumes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Nutr.* 24, 332–340.
- Mai, K., Waagbø, R., Zhou, X.Q., Ai, Q.H., Feng, L., 2022a. Vitamins. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 57–180.
- Mai, K., Xue, M., He, G., Xie, S.Q., Kaushik, S.J., 2022b. Proteins and amino acids. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 181–302.
- Mareš, J., Novotný, L., Palíková, M., 2015. *Akvakultura – základy výživy a krmení ryb*. Mendelova univerzita v Brně, Brno. 108 s.
- Martínez-Yáñez, A. del R., Albertos-Alpuche, P.J., Guzman-Mendoza, R., Robaina-Robaina, L.E., Alvarez-Gonzalez, A., Diaz-Plascencia, D., 2018. Production and chemical composition of hydrophytes cultivated in aquaponics. *Ecosistemas y Recur. Agropecu.* 5, 247–257.
- Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verreth, J.A.J., 2011. The effect of recirculating aquaculture systems on the concentrations of heavy metals in culture water and tissues of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Food Chem.* 126, 1001–1005.
- Masser, M.P., Rakocy, J.E., Losordo, T.M., 2000. Recirculating aquaculture tank production systems. *SRAC Publ.* 452, 1–12.

- Mattson, N., Lieth, J.H., 2019. Liquid Culture Hydroponic System Operation. In: Raviv, M., Lieth, J.H., Bar-Tal, A. (Eds.), *Soiless Culture: Theory and Practice*. Academic Press, London, pp. 567–586.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., van Os, E., Anseeuw, D., Van Hamervaet, R., Junge, R., 2019. Hydroponic Technologies. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 77–112.
- Melenchón, F., de Mercado, E., Pula, H.J., Cardenete, G., Barroso, F.G., Fabrikov, D., Lourenço, H.M., Pessoa, M.F., Lagos, L., Weththasinghe, P., Cortés, M., Tomás-almenar, C., 2022. Fishmeal Dietary Replacement up to 50%: A Comparative Study of Two Insect Meals for Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animals* 12, 1–22.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 849 s.
- Meselmani, M.A.A., 2023. Nutrient Solution for Hydroponics. In: Turan, M., Argin, S., Güneş, A., Yildirim, E. (Eds.), *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. IntechOpen, London, pp. 1–21.
- Michaud, L., Lo Giudice, A., Troussellier, M., Smedile, F., Bruni, V., Blancheton, J.P., 2009. Phylogenetic characterization of the heterotrophic bacterial communities inhabiting a marine recirculating aquaculture system. *J. Appl. Microbiol.* 107, 1935–1946.
- Molina-Poveda, C., 2016. Nutrient requirements. In: Nates, S.F. (Ed.), *Aquafeed Formulation*. Academic Press, London, pp. 75–216.
- Monsees, H., Keitel, J., Paul, M., Kloas, W., Wuertz, S., 2017a. Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: Evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquac. Environ. Interact.* 9, 9–18.
- Monsees, H., Kloas, W., Wuertz, S., 2017b. Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLoS One* 12, 1–18.
- Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D., Würtz, S., 2019. Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLoS One* 14, 1–24.
- Moraes, G., de Almeida, L.C., 2020. Nutrition and functional aspects of digestion in fish. In: Baldissotto, B., Urbinati, E.C., Cyrino, J.E.P. (Eds.), *Biology and Physiology of Freshwater Neotropical Fish*. Academic Press, London, pp. 251–272.
- Morgan, L., 2021. *Hydroponics and Protected Cultivation: A Practical Guide*. CABI, Wallingford. 305 s.
- Moriarty, C.M., Moriarty, D.J.W., 1973. Quantitative estimation of the daily ingestion of phytoplankton by *Tilapia nilotica* and *Haplochromis nigripinnis* in Lake George, Uganda. *J. Zool.* 171, 15–23.
- Mousavi, S., Zahedinezhad, S., Loh, J.Y., 2020. A review on insect meals in aquaculture: The immunomodulatory and physiological effects. *Int. Aquat. Res.* 12, 100–115.
- Mráz, J., Lunda, R., Stejskal, V., 2018a. Konstrukce recirkulačních systémů. *Edice metodik, VÚRH JU Vodňany*, č. 171. 78 s.

- Mráz, J., Tůmová, V., Gebauer, R., Kalous, L., 2018b. Management akvaponických systémů. Edice metodik, VÚRH JU Vodňany, č. 172. 107 s.
- Naiel, M.A.E., Alagawany, M., Patra, A.K., El-Kholy, A.I., Amer, M.S., Abd El-Hack, M.E., 2021. Beneficial impacts and health benefits of macroalgae phenolic molecules on fish production. *Aquaculture* 534, 736186.
- Naz, F., 2023. Plant nutrition, transport, mechanism and sensing in plants. In: Aftab, T., Hakeem, K.R. (Eds.), *Sustainable Plant Nutrition: Molecular Interventions and Advancements for Crop Improvement*. Academic Press, London, pp. 209–228.
- Ngo, D.T., Pirozzi, I., Glencross, B., 2015. Digestibility of canola meals in barramundi (Asian seabass; *Lates calcarifer*). *Aquaculture* 435, 442–449.
- Ngo, D.T., Wade, N.M., Pirozzi, I., Glencross, B.D., 2016. Effects of canola meal on growth, feed utilisation, plasma biochemistry, histology of digestive organs and hepatic gene expression of barramundi (Asian seabass; *Lates calcarifer*). *Aquaculture* 464, 95–105.
- Nogales-Mérida, S., Gobbi, P., Józefiak, D., Mazurkiewicz, J., Dudek, K., Rawski, M., Kierończyk, B., Józefiak, A., 2019. Insect meals in fish nutrition. *Rev. Aquac.* 11, 1080–1103.
- Nozzi, V., Graber, A., Schmautz, Z., Mathis, A., Junge, R., 2018. Nutrient management in aquaponics: Comparison of three approaches for cultivating lettuce, mint and mushroom herb. *Agronomy* 8, 1–15.
- NRC, 2011. *Nutrient Requirements of Fish and Shrimp*. The National Academic Press, Washington. 376 s.
- Opiyo, M.A., Muendo, P., Mbogo, K., Ngugi, C.C., Charo-Karisa, H., Orina, P., Leschen, W., Glencross, B.D., Tocher, D.R., 2022. Inclusion of duckweed (*Lemna minor*) in the diet improves flesh omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acid profiles but not the growth of farmed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Anim. Feed Sci. Technol.* 292, 115442.
- Optimal Fishfood, 2023. Optimal Aquaponic [online]. Optimal Fishfood [cit 30.4.2023]. Dostupné z: <https://optimalfishfood.com/product/optimal-aquaponic-feed>.
- Otubusin, S.O., 1987. Effects of different levels of blood meal in pelleted feeds on tilapia, *Oreochromis niloticus*, production in floating bamboo net-cages. *Aquaculture* 65, 263–266.
- Özkan Yılmaz, F., Engin, K., Özlüer Hunt, A., 2015. The effects of balanced diets with soy bean extract or meat and bone meal on muscle and liver tissue protein and glycogen levels of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) infected with *Vibrio anguillarum*. *J. Appl. Biol. Sci.* 9, 37–42.
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., Kotzen, B., 2018. Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquac. Int.* 26, 813–842.
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Strauch, S.M., Kotzen, B., 2019. Coupled Aquaponics Systems. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 163–200.
- Palupi, E.T., Setiawati, M., Lumlertdacha, S., Suprayudi, M.A., 2020. Growth performance, digestibility, and blood biochemical parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in floating cages and fed poultry by-product meal. *J. Appl. Aquac.* 32, 16–33.

- Panana, E., Delaide, B., Teerlinck, S., Bleyaert, P., 2021. Aerobic treatment and acidification of pikeperch (*Sander lucioperca* L.) sludge for nutrient recovery. *Aquac. Int.* 29, 539–552.
- Paredes, D., Kuschik, P., Mbvette, T.S.A., Stange, F., Müller, R.A., Köser, H., 2007. New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment - A review. *Eng. Life Sci.* 7, 13–25.
- Patrick, J.W., Tyerman, S.D., van Bel, A.J.E., 2015. Long-Distance Transport. In: Buchanan, B.B., Gruissem, W., Jones, R.L. (Eds.), *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. Wiley & Sons, Chichester, pp. 658–710.
- Pervin, M.A., Jahan, H., Akter, R., Omri, A., Hossain, Z., 2020. Appraisal of different levels of soybean meal in diets on growth, digestive enzyme activity, antioxidation, and gut histology of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish Physiol. Biochem.* 46, 1397–1407.
- Rafiee, G., Saad, C.R., 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 244, 109–118.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P., Losordo, T.M., 2006. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics — Integrating Fish and Plant Culture*. SRAC Publ. 454, 1–16.
- Rakocy, J.E., Shultz, R.C., Bailey, D.S., Thoman, E.S., 2004. Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Hortic.* 648, 63–69.
- Rana, K.S., Jahan, M., Ferdous, Z., Salam, M., 2018. Production performance of lettuce (*Lactuca sativa*): aquaponics versus traditional soil. *Asian J. Med. Biol. Res.* 4, 149–156.
- Ranganathan, J., Vennard, D., Waite, R., Dumas, P., 2016. *Shifting Diets for the Future of Sustainable Food*. World Resource Institute, Washington. 90 s.
- Refstie, S., Åsgård, T., 2009. Advances in aquaculture feeds and feeding: salmonids. In: Burnell, G., Allan, G. (Eds.), *New Technologies in Aquaculture: Improving Production Efficiency, Quality and Environmental Management*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 498–541.
- Resh, H.M., 2013. *Hydroponic Food Production. A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener*. CRC Press, Boca Raton. 513 s.
- Resh, H.M., 2023. *Hydroponic Lettuce Production I* [online]. Howard Resh [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: <http://howardresh.com/dr-howard-resh-hydroponic-services/hydroponic-lettuce-production-i>.
- Reyes Lastiri, D., Geelen, C., Cappon, H.J., Rijnaarts, H.H.M., Baganz, D., Kloas, W., Karimanzira, D., Keesman, K.J., 2018. Model-based management strategy for resource efficient design and operation of an aquaponic system. *Aquac. Eng.* 83, 27–39.
- Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Sánchez, J., Goosen, N., 2019. Fish Diets in Aquaponics. In: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature, Cham, pp. 333–352.
- Roy, K., Kajgrova, L., Mraz, J., 2022. TILAFed: A bio-based inventory for circular nutrients management and achieving bioeconomy in future aquaponics. *N. Biotechnol.* 70, 9–18.
- Roy, K., Mráz, J., 2020. Digestibility of protein feeds in Tilapia. *Edice metodik, VÚRH JU Vodňany*, č. 186. 38 s.

- Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J., Tandon, H.L.S., 2006. Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management. FAO, Roma. 348 s.
- Rurangwa, E., Verdegem, M.C.J., 2015. Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. *Rev. Aquac.* 7, 117–130.
- Saha, S., Monroe, A., Day, M.R., 2016. Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Ann. Agric. Sci.* 61, 181–186.
- Sallam, E.A., Matter, A.F., Mohammed, L.S., Azam, A.E., Shehab, A., Mohamed Soliman, M., 2021. Replacing fish meal with rapeseed meal: potential impact on the growth performance, profitability measures, serum biomarkers, antioxidant status, intestinal morphometric analysis, and water quality of *Oreochromis niloticus* and *Sarotherodon galilaeus* finge. *Vet. Res. Commun.* 45, 223–241.
- Science in hydroponics, 2023. HydroBuddy [online]. Science in Hydroponics [cit. 30.4. 2023]. Dostupné z: <https://scienceinhydroponics.com>.
- Schmautz, Z., Espinal, C.A., Bohny, A.M., Rezzonico, F., Junge, R., Frossard, E., Smits, T.H.M., 2021. Environmental parameters and microbial community profiles as indication towards microbial activities and diversity in aquaponic system compartments. *BMC Microbiol.* 21, 1–12.
- Schreier, H.J., Mirzoyan, N., Saito, K., 2010. Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. *Curr. Opin. Biotechnol.* 21, 318–325.
- Schulze, E.-D., Beck, E., Buchmann, N., Clemens, S., Müller-Hohenstein, K., Scherer-Lorenzen, M., 2019. *Plant Ecology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 926 s.
- Seth, H., Axelsson, M., Farrell, A.P., 2011. The Circulation and Metabolism of the Gastrointestinal Tract. In: Grossell, M., Farrell, A.P., Brauner, C.J. (Eds.), *The Multifunctional Gut of Fish*. Academic Press, London, pp. 351–394.
- Shafi, J., Tian, H., Ji, M., 2017. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* 31, 446–459.
- Shaw, C., Knopf, K., Kloas, W., 2022a. Toward Feeds for Circular Multitrophic Food Production Systems: Holistically Evaluating Growth Performance and Nutrient Excretion of African Catfish Fed Fish Meal-Free Diets in Comparison to Nile Tilapia. *Sustainability* 14, 14252.
- Shaw, C., Knopf, K., Kloas, W., 2022b. Fish Feeds in Aquaponics and Beyond: A Novel Concept to Evaluate Protein Sources in Diets for Circular Multitrophic Food Production Systems. *Sustain.* 14, 4064.
- Sheridan, C., Depuydt, P., De Ro, M., Petit, C., Van Gysegem, E., Delaere, P., Dixon, M., Stasiak, M., Aciksöz, S.B., Frossard, E., Paradiso, R., De Pascale, S., Ventrino, V., De Meyer, T., Sas, B., Geelen, D., 2017. Microbial Community Dynamics and Response to Plant Growth-Promoting Microorganisms in the Rhizosphere of Four Common Food Crops Cultivated in Hydroponics. *Microb. Ecol.* 73, 378–393.
- Skretting, 2023. Feed and services for aquaculture [online]. Skretting [30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.skretting.com/en/feed-for-aquaculture>.
- Small, B.C., 2022. Nutritional physiology. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 593–642.
- Snustad, D.P., Simmons, M.J., 2017. *Genetika*. Masarykova univerzita, Brno. 844 s.

- Somerville, C., Cohan, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A., 2014. Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming, FAO. Roma. 589 s.
- Specht, K., Zoll, F., Schümann, H., Bela, J., Kachel, J., Robischon, M., 2019. How will we eat and produce in the cities of the future? From edible insects to vertical farming-A study on the perception and acceptability of new approaches. *Sustain.* 11, 1–22.
- Storebakken, T., Baeverfjord, G., Skrede, A., Olli, J.J., Berge, G.M., 2004. Bacterial protein grown on natural gas in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar*, in freshwater. *Aquaculture* 241, 413–425.
- Suloma, A., Mabroke, R.S., El-Haroun, E.R., 2013. Meat and bone meal as a potential source of phosphorus in plant-protein-based diets for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Int.* 21, 375–385.
- Tabrett, S., Blyth, D., Bourne, N., Glencross, B., 2012. Digestibility of *Lupinus albus* lupin meals in barramundi (*Lates calcarifer*). *Aquaculture* 364–365, 1–5.
- Tacon, A.G.J., Hasan, M.R., Metian, M., 2011. Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans: Trends and prospects, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. FAO, Roma. 87 s.
- Talwar, C., Nagar, S., Lal, R., Negi, R.K., 2018. Fish Gut Microbiome: Current Approaches and Future Perspectives. *Indian J. Microbiol.* 58, 397–414.
- Tellbüscher, A.A., 2023. Sources, behavior and fate of nutrients and their implications for the formulation of aquafeeds and nutrient management tailored for aquaponic systems. Dosud nepublikováno.
- The Aquaponic Source, 2023. AquaOrganic Fish Feed [online]. The Aquaponic Source [cit. 30.4.2023]. Dostupné z: <https://www.theaquaponicsource.com/shop/fish-care/fish-food/aquaorganic-fish-feed>.
- Timmons, M.B., Vinci, B.J., 2022. Recirculating Aquaculture. Ithaca Publishing Company, Ithaca. 809 s.
- Turchini, G.M., Francis, D.S., Du, Z., Olsen, R.E., Ringø, E., Tocher, D.R., 2022. The lipids. In: Hardy, R.W., Kaushik, S.J. (Eds.), *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp. 303–468.
- Turchini, G.M., Trushenski, J.T., Glencross, B.D., 2019. Thoughts for the Future of Aquaculture Nutrition: Realigning Perspectives to Reflect Contemporary Issues Related to Judicious Use of Marine Resources in Aquafeeds. *N. Am. J. Aquac.* 81, 13–39.
- Van Oosten, M.J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S., Maggio, A., 2017. The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 4, 1–12.
- Vaněk, V., Balík, J., Černý, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, J., 2012. Výživa zahradních rostlin. Academia, Praha. 568 s.
- Velasquez, S.F., Chan, M.A., Abisado, R.G., Traifalgar, R.F.M., Tayamen, M.M., Maliwat, G.C.F., Ragaza, J.A., 2016. Dietary *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) replacement enhances performance of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *J. Appl. Phycol.* 28, 1023–1030.

- Velichkova, K., Sirakov, I., Veleva, P., 2020. Use of *Lemna minuta* Kunth. For composition of sustainable diets and influence on hydrochemical, technological and blood biochemical parameters in common carp (*Cyprinus carpio* L.) cultivated in aquaponics. Bulg. J. Agric. Sci. 26, 674–675.
- Vidakovic, A., Huyben, D., Sundh, H., Nyman, A., Vielma, J., Passoth, V., Kiessling, A., Lundh, T., 2020. Growth performance, nutrient digestibility and intestinal morphology of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed graded levels of the yeasts *Saccharomyces cerevisiae* and *Wickerhamomyces anomalus*. Aquac. Nutr. 26, 275–286.
- White, P.J., Ding, G., 2023. Long-distance transport in the xylem and phloem. In: Rengel, Z., Cakmak, I., White, P.J. (Eds.), Marschner's Mineral Nutrition of Plants. Academic Press, London, pp. 73–104.
- Wijihastuti, R.S., Moheimani, N.R., Bahri, P.A., Cosgrove, J.J., Watanabe, M.M., 2017. Growth and photosynthetic activity of *Botryococcus braunii* biofilms. J. Appl. Phycol. 29, 1123–1134.
- Wilson, J.M., Castro, L.F.C., 2011. Morphological Diversity of the Gastrointestinal Tract in Fishes. In: Grosell, M., Farrell, A.P., Brauner, C.J. (Eds.), The Multifunctional Gut of Fish. Academic Press, London, pp. 2–56.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W., Khanal, S.K., 2017. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. Aquac. Eng. 76, 9–19.
- Wurts, W.A., Durborow, R.M., 1992. Interactions of pH, Carbon Dioxide, Alkalinity and Hardness in Fish Ponds 0, 1–4.
- Yang, T., Kim, H.J., 2019. Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. Sci. Hortic. (Amsterdam). 256, 108619.
- Yang, T., Kim, H.J., 2020. Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. J. Clean. Prod. 274, 122619.
- Yep, B., Zheng, Y., 2019. Aquaponic trends and challenges – A review. J. Clean. Prod. 228, 1586–1599.
- Yildiz, H.Y., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., Parisi, G., 2017. Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-A review. Water (Switzerland) 9, 1–17.
- Yones, A.M., 2010. Effect of lupin kernel meal as plant protein source in diets of red hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* x *O. mossambicus*), on growth performance and nutrients utilization. African J. Biol. Sci. 6, 1–16.
- Yoshitomi, B., Aoki, M., Oshima, S. ichirou, 2007. Effect of total replacement of dietary fish meal by low fluoride krill (*Euphausia superba*) meal on growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in fresh water. Aquaculture 266, 219–225.
- Yoshitomi, B., Aoki, M., Oshima, S. ichirou, Hata, K., 2006. Evaluation of krill (*Euphausia superba*) meal as a partial replacement for fish meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets. Aquaculture 261, 440–446.
- Ytrestøyl, T., Aas, T.S., Åsgård, T., 2015. Utilisation of feed resources in production of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Norway. Aquaculture 448, 365–374.

- Zarantoniello, M., Randazzo, B., Nozzi, V., Truzzi, C., Giorgini, E., Cardinaletti, G., Freddi, L., Ratti, S., Girolametti, F., Osimani, A., Notarstefano, V., Milanović, V., Riolo, P., Isidoro, N., Tulli, F., Gioacchini, G., Olivotto, I., 2021. Physiological responses of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) juveniles fed on full-fat insect-based diet in an aquaponic system. *Sci. Rep.* 11, 1–14.
- Zhang, H., Gao, Y., Liu, J., Lin, Z., Lee, C.T., Hashim, H., Wu, W.M., Li, C., 2021. Recovery of nutrients from fish sludge as liquid fertilizer to enhance sustainability of aquaponics: A review. *Chem. Eng. Trans.* 83, 55–60.
- Zhang, H., Gao, Y., Shi, H., Lee, C.T., Hashim, H., Zhang, Z., Wu, W.M., Li, C., 2020. Recovery of nutrients from fish sludge in an aquaponic system using biological aerated filters with ceramsite plus lignocellulosic material media. *J. Clean. Prod.* 258, 120886.

8 Seznam zkratek

ADC	– koeficient zdánlivé stravitelnosti
ARG	– arginin
ATP	– adenosintrifosfát
AMK	– aminokyseliny
BNLV	– bezdusíkaté látky výtažkové
DE	– stravitelná energie
DHA	– kyselina dokosahexaenová
DO	– rozpuštěný kyslík
EC	– elektrická vodivost
EFA	– esenciální mastné kyseliny
EPA	– kyselina eikopentaenová
FCR	– krmný koeficient
FCE	– přírůstek z jednotky krmiva
FM	– rybí moučka
FO	– rybí olej
GBF	– průtok krve trávicí soustavou
GIT	– gastrointestinální trakt
HIS	– histidin
IAFFD	– otevřená databáze krmiv a surovin
ILE	– izoleucin
LC-PUFA	– polynenasycené mastné kyseliny s dlouhým řetězcem
LEU	– leucin
LYS	– lysin
MET	– methionin
MUFA	– mononenasycené mastné kyseliny
NL	– dusíkaté látky
NSP	– neškrobové polysacharidy
PER	– efektivita využití proteinů
PGPM	– mikroorganismy podporující růst rostlin
PHE	– fenylalanin
PUFA	– polynenasycené mastné kyseliny
RAS	– recirkulační akvakulturní systém

SD	– statistická odchylka
SFA	– nasycené mastné kyseliny
SGR	– specifická rychlost růstu
SRP	– rozpustný reaktivní fosfor
SVI	– index objemu kalu
TAG	– triacylglycerol
TCA	– kyselina trikarboxylová
TDS	– obsah rozpuštěných látek
THR	– threonin
TRP	– tryptofan
TS	– celková sušina
TSS	– celkové nerozpuštěné látky
VAL	– valin
WG	– hmotnostní přírůstek

9 Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit produkční účinnost krmiv, která byla navržena s úmyslem vyvinout speciální akvaponické krmivo. Dále vyhodnotit obsah živin ve vodě, kalech a živných roztocích a jejich vliv na růst rostlin a konečně navrhnout případné úpravy složení krmiv.

Akvaponické krmivo by mělo respektovat nutriční požadavky ryb a rostlin, nezatěžovat životní prostředí nevyužitými živinami a, s ohledem na udržitelnost, místo moučky z mořských ryb využívat alternativní zdroje proteinů. Proto byla navržena tři experimentální izoproteinová a izokalorická krmiva. Krmivo A obsahovalo konvenční suroviny včetně moučky z mořských ryb. Krmivo B využívalo moučku ze sladkovodních ryb a dále výhradně rostlinné proteiny bez ohledu na původ. Krmivo C bylo složeno z udržitelných a lokálních zdrojů proteinů.

Experiment proběhl v akvaponické hale FROV JU. Jako pokusný materiál byl zvolen tlamoun nilský (*Oreochromis niloticus*) a salát (*Lactuca sativa*).

Krmivo B vykázalo podobné hodnoty všech produkčních ukazatelů jako konvenční krmivo A. Hmotnost obsádky v systému A vzrostla za třináct týdnů o 143,68 % a v systému B o 136,56 %. Hmotnost obsádky v systému B byla na konci pokusu oproti systému A neprůkazně nižší o 4,08 %. Krmný koeficient (FCR) krmiva B ($1,92 \pm 0,10$) byl neprůkazně vyšší o 8,47 % vůči FCR krmiva A ($1,77 \pm 0,13$).

Průměrná hmotnost nadzemní části rostlin rostoucích v živném roztoku vytvořeném z mineralizovaného kalu získaného ze systému B, doplněném o chybějící živiny, dosáhla po čtyřech týdnech hodnoty $221,8 \pm 33,9$ g. To bylo neprůkazně více o 44,21 % než průměrná hmotnost rostlin pěstovaných ve speciálním hydroponickém živném roztoku a o 8,62 % neprůkazně více než hmotnost rostlin pěstovaných v obohaceném roztoku získaného ze systému A.

Experimentálně tak bylo prokázáno, že v akvaponických krmivech lze nahradit moučku z mořských ryb alternativními zdroji proteinů a těmito krmivy zajistit efektivní výživu ryb i rostlin v dvousmyčkovém akvaponickém systému.

Klíčová slova: akvaponie, kaly, krmiva, *Lactuca sativa*, *Oreochromis niloticus*, proteiny, rybí moučka

10 Abstract

The objective of this thesis was to evaluate the production efficiency of feeds which were designed with the intention of developing a special aquaponic feed. Further, to evaluate the content of nutrients in water, sludge and nutrient solutions and their influence on plant growth and finally suggest possible modifications to the feed composition.

Aquaponic feed should respect nutritional requirements of fishes and plants, not put burden on the environment by not used nutrients and with regards to sustainability, use alternative sources of protein instead of marine fish meal. Because of that, three experimental isoprotein and isocaloric feeds were proposed. Feed A contained conventional ingredients including marine fish meal. Feed B used freshwater fish meal and exclusively plant proteins not regarding its origin. Feed C was made of sustainable and local sources of protein.

The experiment was conducted in the aquaponic hall of Faculty of Fisheries and Protection of Waters, University of South Bohemia. As experimental material was used Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and lettuce (*Lactuca sativa*).

Feed B shown similar values of all production indicators as conventional feed A. Weight of fishes in system A after thirteen weeks increased by 143,68 % and in system B by 136,56 %. Weight of fishes in system B was at the end of experiment inconclusively lower by 4,08 %. Feed conversion ratio (FCR) of feed B ($1,92 \pm 0,10$) was inconclusively higher by 8,47 % against FCR of feed A ($1,77 \pm 0,13$).

Average weight of aerial parts of plants growing in nutrient solution created from mineralized sludge gathered from system B, supplemented with missing nutrients reached value $221,8 \pm 33,9$ g after four weeks. That was inconclusively more by 44,21 % than average weight of plants grown in special hydroponic solution and by 8,62 % more than weight of plants grown in enriched solution gathered from system A.

Experimentally it was proven that in aquaponic feeds it is possible to substitute marine fish meal by alternative source of protein and using these feeds ensure an effective nutrition for fish and plants in a two-loop aquaponic system.

Keywords: aquaponics, sludge, feeds, *Lactuca sativa*, *Oreochromis niloticus*, proteins, fish meal