

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

Výskyt rizikových prvků v akvaponickém systému

Diplomová práce

Bc. Lenka Bezstarosti

Ochrana a využívání přírodních zdrojů

Ing. Zdeněk Košnář, Ph.D.

© 2025 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Ověření výskytu rizikových prvků v akvaponickém systému" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. 4. 2025

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Zdeňku Košnářovi, Ph.D. za vedení práce, konzultace a rady v rámci celého procesu a společnosti ALS Czech Republic s. r. o. za možnost využití měřicí techniky. Dále také Mgr. Ondřeji Zvánovci za neutuchající podporu.

Tato práce vznikla za podpory projektu NAZV - QK21010207 (Diverzifikace a posílení konkurenceschopnosti akvakultury podporou akvaponie jako inovativní zemědělské technologie produkce potravin).

Výskyt rizikových prvků v akvaponickém systému

Souhrn

Akvaponické systémy jsou spojením hydroponie s akvakulturou. Jejich cílem je produkce většího množství potravy pro rostoucí světovou populaci s co nejmenšími nároky na prostor, finance a zdroje. Před jejich komerčním rozšířením je ovšem nutné zhodnotit kvalitu a nezávadnost produkovaných potravin. Jedním z faktorů, které je potřeba prozkoumat, je možný obsah rizikových prvků a s tím i případné zdroje kontaminantů.

Jelikož je akvakultura uzavřeným systémem a ve větší míře jsou dodávány pouze krmiva pro chovanou rybí populaci a voda, jsou tyto cesty považovány za nejpravděpodobnější vstup případné kontaminace.

V této práci byly sledovány obsahy vybraných rizikových prvků (Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb) v rybích krmivech, chovaných rybách (*Clarias* Linnaeus, 1758 a *Oreochromis* Günther, 1889), vypěstovaném salátu (*Lactuca sativa* L.), v kalové vodě a rybím kalu metodou ICP-MS. Všechny vzorky pocházely z jednoho akvaponického systému. Nejvyšší koncentrace byly naměřeny v rybím kalu, následovala krmiva, saláty a nejnižší obsahy byly zjištěny v rybím mase.

Dříve publikované studie se zaměřují především na recirkulační akvakulturní systémy (RAS), které lze považovat za předstupeň akvakultury. Výsledek této práce se s těmi, co mu předcházely shoduje v rozložení rizikových prvků v systému, tedy že koncentrace kovů a polokovů klesá v řadě rybí kal > krmiva > saláty > ryby. Přesné koncentrace se v různých systémech v jednotlivých maticích liší. Bylo by proto vhodné se zaměřit na měnící se parametry a jaký mají vliv na koncentraci rizikových prvků v akvaponickém systému.

Klíčová slova: hydroponie, akvakultura, akvaponie, rizikové prvky

Occurrence of risk elements in an aquaponic system

Summary

Aquaponic systems are a combination of hydroponics and aquaculture. Their aim is to produce more food for a growing world population with the least possible demands on space, finance and resources. However, before they can be commercialised, the quality and safety of produced food must be done. One of the factors that needs to be looked into is possible content of risk elements and sources of contamination.

As aquaculture is a closed system and only feed for the farmed fish population and water are supplied to a large extent, these are considered the most likely routes of entry for possible contaminants.

In this work, the levels of selected risk elements (Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb) in fish feed, farmed fish (*Clarias* Linnaeus, 1758 and *Oreochromis* Günther, 1889), cultured lettuce (*Lactuca sativa* L.), and in the culture water and fish sludge were monitored by ICP-MS. All samples were from the same aquaponic system. The highest concentrations were measured in fish sludge, followed by feed, salad and the lowest concentrations were found in fish meat.

Previously published studies have mainly focused on recirculating aquaculture systems (RAS), which can be considered as a step towards aquaponics. The result of this work agrees with those that preceded it in the distribution of risk elements throughout the system, that is the concentration of metals and semi-metals (metalloids) decreases in the series fish sludge>feed>salad>fish. The exact concentrations vary from matrix to matrix in different systems. Therefore, it would be useful to focus on different parameters in the system and the effects they have on concentration of risk elements in aquaponic system.

Keywords: hydroponics, aquaculture, aquaponics, risk elements

Obsah

1	Úvod	8
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Akvaponický systém	10
3.1.1	Hydroponie	10
3.1.2	Akvakultura	11
3.1.3	Akvaponie	12
3.1.4	Typy akvaponických systémů	14
3.1.5	Organismy využívané v akvaponických systémech	16
3.1.6	Budoucnost akvaponických systémů	17
3.2	Rizikové prvky	19
3.2.1	Zdroje rizikových prvků v akvaponickém systému	21
3.2.1.1	Krmiva využívaná v akvaponii	22
3.2.1.2	Rybí kal	23
3.2.2	Důsledky expozice rizikových prvků u ryb	25
3.2.3	Důsledky expozice rizikových prvků u rostlin	27
3.2.4	Legislativní limity těžkých kovů	28
3.2.5	Možnosti stanovení kovů ve vodě, rybách, krmivech a rostlinách ..	29
4	Metodika	31
4.1	Příprava vzorků salátu a rybího krmiva	31
4.2	Příprava vzorků ryb	32
4.3	Odběr a příprava vzorků rybího kalu a kalové vody	33
4.4	Analytická metoda ICP-MS	34
5	Výsledky	35
5.1	Krmiva	35
5.2	Ryby	37
5.3	Hlávkový salát (<i>Lactuca sativa</i> L.)	39
5.4	Rybí kal a kalová voda	41
5.5	Shrnutí	42
6	Diskuse	44
7	Závěr	47
8	Literatura	48

1 Úvod

Akvaponický systém kombinuje hydroponii s akvaponií, tedy pěstování rostlin bez substrátu a cílený chov ryb v jednom recirkulačním systému. Akvaponie má velký potenciál využití do budoucna, jako zdroj dvou různých druhů potravy z jednoho místa s minimálními vstupními investicemi, pro rostoucí populaci se zmenšujícím se místem vhodným pro klasické způsoby hospodaření. Pro velké komerční využití a uvedení na trh je mimo jiné potřeba rozšířit povědomí o tomto způsobu hospodaření mezi spotřebitele, zajistit legislativní rámec procesu a prověřit bezpečnost získaných potravin.

Jedním ze sledovaných faktorů bezpečnosti potravin je obsah rizikových prvků. Ty se mohou nejčastěji do akvaponického systému dostávat se zdrojem vody nebo s rybí potravou. Limitní obsahy v některých potravinách jsou pro vybrané z nich stanoveny legislativně, ať už světovou zdravotnickou organizací (například As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn) nebo na úrovni Nařízení Evropské unie (Cd, Hg, Pb). V rámci této diplomové práce byly analyzovány obsahy rizikových prvků (Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd a Pb) ve vzorcích kalové vody, rybího kalu, potravy pro ryby dodávané do systému, chovných ryb (*Clarias* Linnaeus, 1758 a *Oreochromis* Günther, 1889) a vypěstovaného hlávkového salátu (*Lactuca sativa* L.). K analýze vzorků byly použity instrumentální metody ICP-OES (optická emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem) a ICP-MS (hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem).

Ve sledovaném akvaponickém systému byly zjištěny nejvyšší koncentrace rizikových prvků v rybích kalech, hlavně pro železo (3,1 g/kg suš.), mangan (2,6 g/kg suš.) a zinek (2,2 g/kg suš.). Následovala krmiva s nejvyšším obsahem železa (0,33 g/kg suš.) a sklizené salátové listy, kde také dominoval zinek a železo (0,13 a 0,10 g/kg suš.). Ve vzorcích kalové vody byl naměřen nejvyšší obsah pro mangan, a to 3,42 mg/l.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Hypotéza práce: Do akvaponického systému se mohou rizikové prvky, především As, Cd, Co, Cr, Cu, Pb a Zn, dostávat zejména s potravou pro ryby. Tyto rizikové prvky se po vstupu do systému mohou akumulovat v rybích tkáních, v rostlinách a v rybím kalu.

Cíle práce:

1) Cílem práce bylo zpracovat literární rešerši zabývající se výskytem, původem a chováním rizikových prvků v akvaponických systémech.

2) Cílem bylo vyhodnocení rizik vyplývajících z výskytu rizikových prvků na biotu včetně člověka.

3) Cílem experimentální práce bylo zjistit obsah rizikových prvků v jednotlivých složkách akvaponického systému a naměřené výsledky byly porovnány s jinými již publikovanými výsledky.

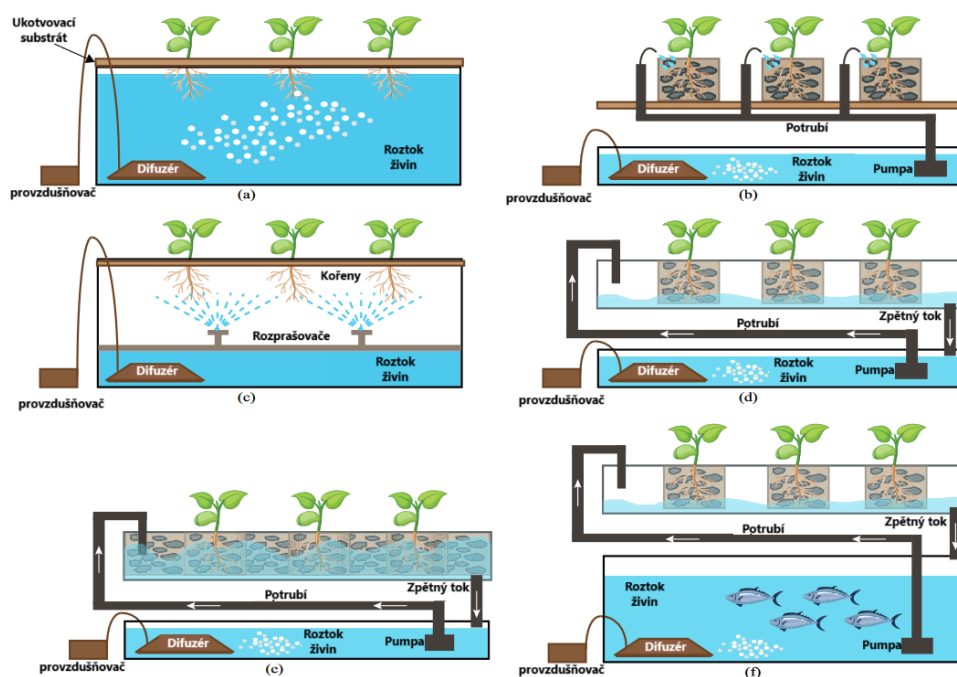
3 Literární rešerše

3.1 Akvaponický systém

3.1.1 Hydroponie

Hydroponie je způsob pěstování rostlin, kdy jsou jejich kořeny zavedeny přímo do roztoku živin. Plodiny tak nejsou vystaveny působení škodlivých mikroorganismů nebo toxických prvků a sloučenin, které se mohou nacházet v půdě. Vzhledem k jednoduššímu odběru vzorku substrátu je snazší kontrola vystavení rizikovým prvkům (těžkých kovů a polokovů). Jsou tak odstraněny problémy způsobené erozí půdy, nebo její nevhodnou pórovitostí (zhutněním). Zároveň se tímto způsobem hospodaření snižují prostorové nároky (Kaszi et al. 2021).

Rostliny v takovém systému mohou růst buď v přírodním nebo uměle připraveném substrátu, který slouží k jejich ukotvení, zajišťuje sterilní prostředí a umožňuje dostatečné okyselení potřebné pro ideální růst. Substrátem může být písek, perlit, kamenná vlna, kokosové textilní vlákno a další. Existují různé způsoby sestavení systému, ale základem je vždy nádoba pro zmiňovaný roztok živin a provzdušňovač. Volba varianty závisí zejména na potřebách pěstovaných rostlin a finančních možnostech. Příklady zapojení hydroponického systému jsou zobrazeny na schématech viz *Obrázek 1* (Velazquez-Gonzalez et al. 2022).



Obrázek 1: Schéma variant uspořádání hydroponických systémů. (přeloženo z angličtiny)
zdroj: Velazquez-Gonzalez et al. (2022)

Podskupinou hydroponie, která se nejvíce liší od samotné hydroponie je aeroponie (varianta (c) viz *Obrázek 1*). Aeroponický způsob pěstování spočívá v rozstřikování vody bohaté na živiny na kořeny. Kořeny jsou umístěny v tmavém prostoru, ale nejsou ponořeny v žádném médiu a živiny rozpuštěné ve vodě jsou na ně rozprašovány tryskami ve specifických

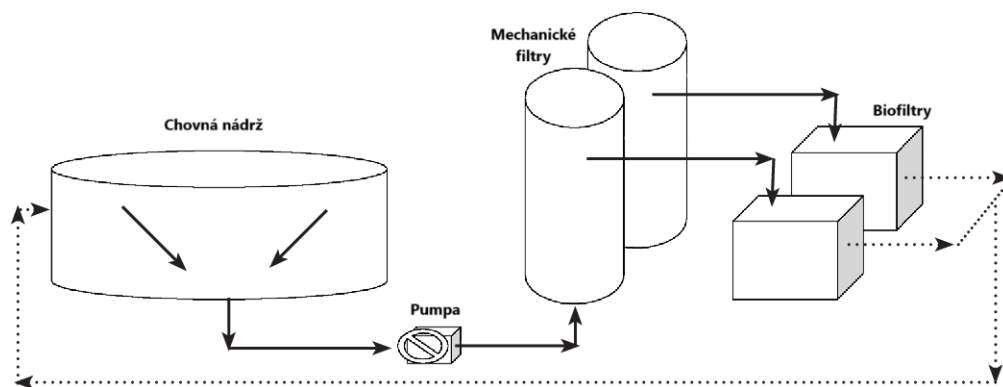
intervalech. Výhodou oproti hydroponii je u aeroponie možnost vertikálního pěstování, tedy možnost efektivnějšího využití prostoru. Dalšími výhodami jsou menší spotřeba vody, jednodušší přesun rostlin, snížené riziko přenosu rostlinných chorob proudící vodou a také jde o metodu s nejučinnějším příjmem živin rostlinami. Naopak nevýhodou je nutnost větší kontroly aeroponie. Zatímco u hydroponie mají rostliny k živinám a vodě neustálý přístup, u aeroponie je nutné kontrolovat přesnou a včasnou „zálivku“. Současně je potřeba také častější kontrola pH (Shrouf 2017).

3.1.2 Akvakultura

Akvakultura je pojem týkající se produkce živočišných (ryby, korýši a jiné) i rostlinných (mořské řasy a jiné) potravin ve vodním prostředí. Jedná se především o cílené chovatelství ryb pro výlov na rozdíl od lovení ryb z řad jejich přirozené populace v rámci klasického rybolovu. Největšími producenty potravy z tohoto zdroje jsou země Asie (Čína, Indie, Filipíny a další), ale setkáme se s tímto trendem i v Evropě, Americe nebo Africe.

Oproti výhodám, které s pěstováním potravin v akvakulturních systémech přichází, jako je zajištění většího množství potravy pro stále rostoucí populaci, přináší tento způsob pěstování také nevýhody. Často jsou takové systémy zaměřeny na monokultury, které snadno způsobí přehlcení a vyčerpání kapacity ekosystému, což má za následek snižování růstu rostlin, rozvoj nemocí a degradaci v lokalitě využívané pro umělý chov (Frankic & Hershner 2003). Dalším problémem spojeným s tímto způsobem hospodářství je nedostatek vhodných míst, a to zvláště kvůli obavám z negativních dopadů na životní prostředí. Mezi takové negativní dopady mohou patřit: znehodnocení přirozeného stanoviště některých živočichů nebo rostlin, znečištění stanoviště nevhodnými krmivy a v neposlední řadě také možný únik nepůvodních druhů z akvakulturního systému a následné interakce s původní populací (Lazard et al. 2010). Nedostatek vhodných lokalit také souvisí s využitím jinak vhodné lokality již k jiným účelům (Frankic & Hershner 2003).

Setkáme se také s recirkulačním akvakulturním systémem (RAS), který je označován jako intenzivní akvakultura. Schéma RAS viz *Obrázek 2* převzato z Al-Hafedh & Alam (2007). Jedná se o uzavřený okruh, ve kterém jsou nádrže pro chov ryb a filtrační systémy. Díky takovému systému jsou menší nároky na kvalitu zdroje vody, ale zato vyšší na energii a provoz. Mezistupněm mezi klasickou akvakulturou a recirkulační akvakulturou je jiný typ intenzivní akvakultury, a to otevřené průtočné akvakulturní systémy. Kdy je do systému dodávána stále nová povrchová voda, která projde přes chovnou nádrž a následně je filtrována a vypouštěna zpět do prostředí. Jde o energeticky a procesně méně náročnou variantu, která ovšem neulevuje nárokům na zdroj kvalitní povrchové vody (Fiala 2011).



Obrázek 2: Schéma recirkulačního akvakulturního systému (RAS). (přeloženo z angličtiny)
zdroj: Al-Hafedh & Alam (2007)

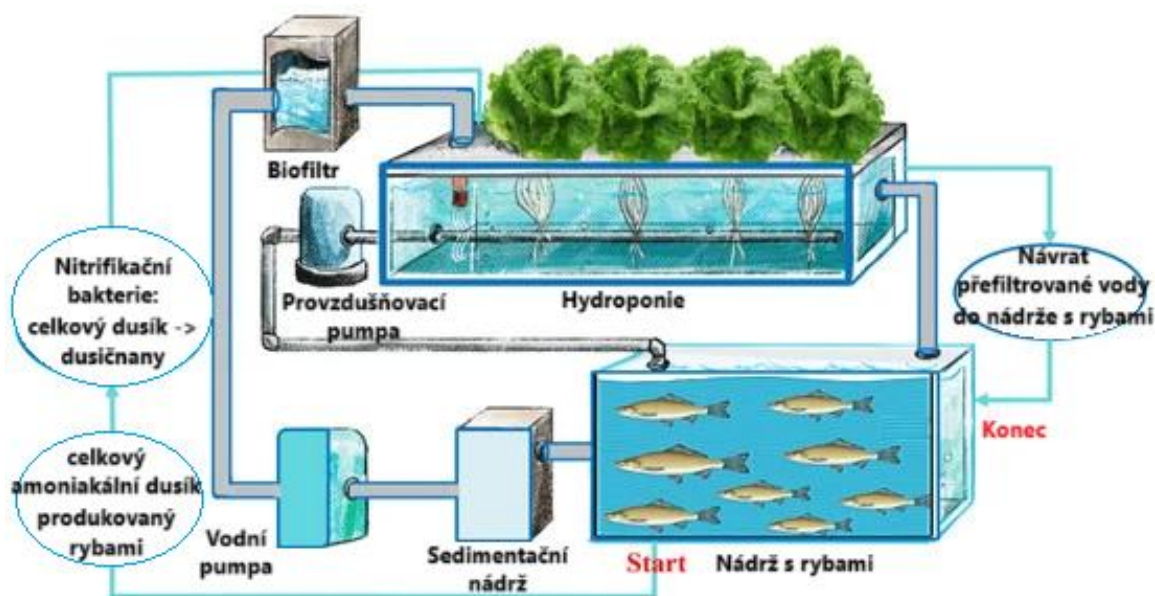
3.1.3 Akvaponie

Za začátky akvaponie se dají považovat systémy zemědělství známé od Aztéků nebo z oblastí na jihu Číny. Aztékové využívali mělčiny na krajích jezer k vytváření ostrůvků pro pěstování rostlin. Na ostrůvky s rostlinami přidávali sediment, získávaný ze dna jezera, který byl bohatý na živiny. V Číně začali v rýžových polích kromě pěstování rýže chovat také ryby, které ovšem zatím nebyly do polí nasazovány záměrně a vyskytovali se zde pouze náhodně. Specifické pojmenování akvaponie se ale začalo využívat až na počátku 70. let 20. století v USA, kdy byly uskutečněny první pokusy o efektivní využití společného chovu ryb a pěstování zeleniny (Espinal et al. 2019; Lennard et al. 2019).

Akvaponie (akvaponický systém) je ve zjednodušeném pohledu spojením hydroponie s akvakulturou za využití různých způsobů propojení. Její fungování je založeno na symbióze mezi těmito systémy, které jsou dále doplněny o mikroorganismy, jež zde hrají nemalou roli. Sloučením těchto způsobů hospodaření dochází k odstranění jejich nedokonalostí, jako je dodávání chemických látek pro růst rostlin člověkem, nebo vypouštění použité vody z chovu ryb do recipientů a tím znečišťování prostředí (Duarte et al. 2015; Lennard et al. 2019; Palm et al. 2018). Přesnou definici akvaponie zatím nenajdeme, protože je tento pojem využíván pro různé způsoby hospodaření, jak pouze ve vodním prostředí, tak i ve spojení s pěstováním rostlin v půdě, kam je přiváděna voda s živinami z chovu ryb. V tomto případě sice není využita hydroponie, nicméně je dodržen princip, který je postaven na využití vody a živin z chovu ryb k pěstování rostlin. Pro akvaponický systém tedy vyplývá jako nejdůležitější vlastnost cirkulace vody a živin, nikoli přesné uspořádání systému nebo využití specifické technologie pro produkci potravin (rostlin/ryb) (Lennard et al. 2019; Palm et al. 2024). Tato práce se bude dále zabývat spojením s hydroponií, tedy systémy, které jsou svázány pouze s vodním prostředím.

Základním principem akvaponie je tedy chov ryb a pěstování rostlin v rámci systému, kde cirkuluje voda, která je doplňovaná pouze o takové množství, které se v průběhu odpařilo nebo bylo využito. Voda je přiváděna do systému a bez výrazného lidského zásahu prochází všemi jeho částmi, a to až do chvíle, kdy se vrátí k místu vstupu a koloběh se opakuje. V sektoru, kde jsou chovány ryby, je jim dodáváno krmivo, jež je tedy vnějším zdrojem živin. Exkrementy ryb postupují nezměněny v rámci cirkulace vody nejčastěji přes mechanický a biologický filtr. Mechanickým filtrováním jsou odstraněny takové části rybích exkrementů, které rostliny

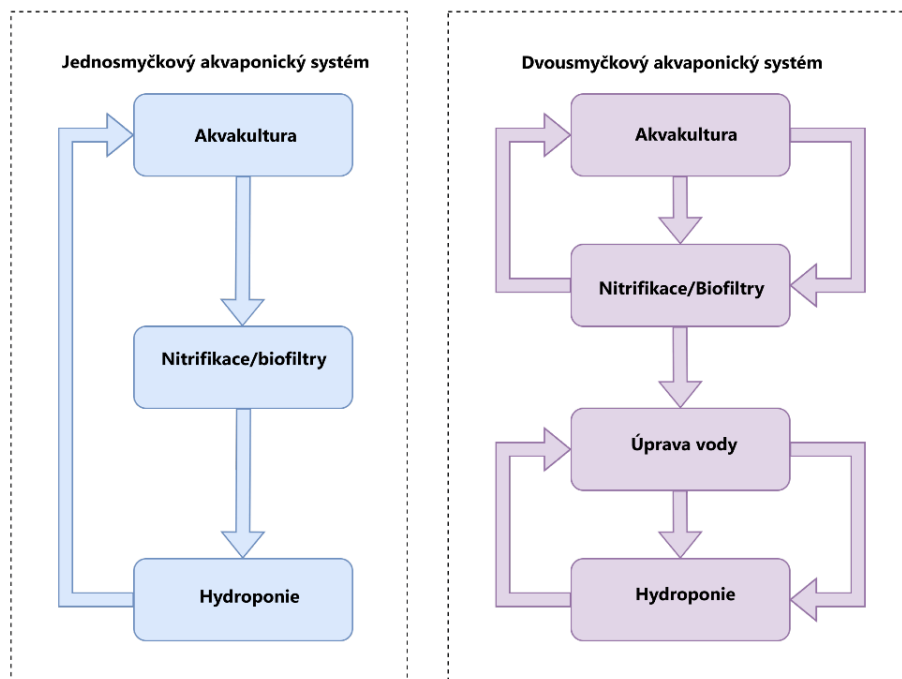
Původně byly akvaponické systémy zaměřené převážně na chov ryb a rostliny byly pouze druhotnou surovinou (Aslanidou et al. 2023). Dnes je cílem akvaponických systémů ohleduplnější zacházení s vodou a zamezení ztrát hodnotných látek využitím živin z chovu ryb pro pěstování rostlin v rámci jednoho systému. Dále také využití jednoho místa pro produkci dvou různých druhů potravin, a tedy zajištění většího množství potravy s potřebou menšího prostoru. To vše by mělo vést k udržitelnějšímu a ekonomicky výhodnějšímu zemědělství (Lennard et al. 2019).



13

3.1.4 Typy akvaponických systémů

Pod označení akvaponie jsou momentálně řazeny dva hlavní způsoby uspořádání, kdy se jeden sestává z oddělených okruhů pro proudění vody (dvousmyčkový/vícesmyčkový systém, de-coupled two-loop systém/decoupled multi-loop systém) a v druhém voda cirkuluje v rámci jednoho uzavřeného oběhu (jednosmyčkový systém, coupled one-loop systém) (Goddek et al. 2019).



Obrázek 4: Schéma jednosmyčkového a dvousmyčkového akvaponického systému. (přeloženo z angličtiny).

zdroj: Channa et al. (2024)

Za tradiční nebo základní pro akvaponii autoři často považují jednosmyčkové uspořádání, protože lépe odráží tento systém jako spojení akvakultury s hydroponií, narozdíl od dvousmyčkového, kdy jsou systémy odděleny (Monsees et al. 2017; Baganz et al. 2022; Palm et al. 2024). Zjednodušená schémata jednosmyčkového a vícesmyčkového systému jsou zobrazena v *Obrázek 4* a převzata ze studie Channa et al. (2024).

V jednosmyčkovém systému se nachází v rámci jednoho uzavřeného vodního okruhu ryby, rostliny a bakterie. Cirkulující voda přenáší živiny produkované rybami přes bakterie k rostlinám. Bakterie přeměňují výměšky ryb na formu živin, které mohou rostliny vstřebat. Přeměňují například amoniak na formu dusíku vstřebatelnou a netoxickou pro rostliny, tedy na dusičnany (oxidace). Je potřeba dbát na správné poměry, aby nedocházelo k přemnožení bakteriálních kolonií, ale zároveň docházelo v dostatečném množství k přeměně amoniaku na dusičnany (Palm et al. 2019). Při určení a dodržení správných množství dodávaných živin a poměrů ryb k rostlinám a bakteriím, by nemělo docházet k tvorbě většího množství sedimentu, aby musely být použity mechanické filtry. Po průchodu celým systémem se z hydroponie voda přesouvá do jímky odkud je hnána zpět do systému (Rakocy et al. 2006). Voda je v tomto systému doplňována jen o objem, který se ztratil v rámci hydroponie evapotranspirací (Goddek et al. 2019).

Základní sestavení jednosmyčkové soustavy se tedy skládá z nádrže pro rybí populaci, sedimentační nádrže, bio filtrů nebo jiných struktur, které zajistí přítomnost bakterií, jednotky pro hydroponii a jímky (Palm et al. 2019). Je možné také kombinovat hydroponii a bio filtry využitím například pisku, který může sloužit jak jako médium pro růst rostlin, tak jako nosič pro bakterie (Rakocy et al. 2006).

Jednosmyčkový systém je možné využít od těch nejmenších rozměrů (domácí produkce) až po velkoformátové uspořádání pro komerční účely, kde ovšem naráží na své limity spojené s nutností udržení vhodného prostředí v rámci celého systému pro všechny přítomné organismy (Palm et al. 2018; Palm et al. 2019).

Jednosmyčkové systémy mají svá pozitiva i negativa. Mezi pozitivní stránky patří menší prostorová náročnost, která umožňuje využití systému i v domácím prostředí, je jednoduše možné upravit systém místním podmínkám a přímé spojení akvakultury s hydroponií v jednom systému umožňuje přímou filtraci vody. Jako negativa tohoto uspořádání lze zmínit: ztráty některých látek sedimentací (hlavně fosforu), protože sediment není dále využíván, nebo postupné zhoršování kvality vody v čase, které může vést ke zhoršení zdravotního stavu ryb, kvůli čemuž je vhodné volit druhy s vyšší odolností k většímu množství živin ve vodě (například keříkovec červenolemý *Clarias gariepinus* Burchell, 1822; tlamoun nilský *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758). U vlastností vody (pH, obsah živin, teplota, konduktivita) musí dojít ke kompromisu mezi vhodnými podmínkami pro všechny segmenty a zároveň je složité udržení stálé kvality vody v systému, tedy určení správného poměru všech komponentů (krmiva pro ryby, ryb, bakterií). Co zatím není prokázáno, ale zvažuje se pro další výzkum a je nutné sledovat, je přenos nemocí z ryb do rostlin a tím na konečné konzumenty (Monsees et al. 2017; Goddek et al. 2019; Palm et al. 2019; Aslanidou et al. 2023).

Dvousmyčkové a vícesmyčkové systémy začaly vznikat s potřebou zvyšovat produkci a ekonomickou efektivitu akvaponických systémů s cílem většího komerčního využití (Goddek et al. 2019). Hlavním rozdílem je místní oddělení hydroponie od rybí produkce, což umožňuje zajištění optimálních podmínek, jak pro chov ryb, tak pro pěstování rostlin a nejsou tedy potřeba kompromisy, které se týkají obsahu živin ve vodě, pH nebo teploty vody. Tedy faktory omezující jednosmyčkový systém. Důležitá je v tomto případě rozsah hydroponického systému, ten musí svou velikostí (množstvím pěstovaných rostlin) korespondovat s produkcí živin, které přichází od ryb. Živiny z rybí produkce lze využít jak přímo z vody, tak mineralizací kalu.

Teoreticky se dvousmyčkový systém skládá z akvakultury s rybami, odkud voda putuje přes biofiltry, případně také mechanické filtry do hydroponického systému, odkud je poté odváděna pryč. Do nádrže s rybami je doplňována voda nová. Vícesmyčkové systémy jsou navíc doplněny o jednotky, které mineralizují kaly ryb, aby bylo možné získat maximální množství živin v dostupné formě pro rostliny a technologie na destilaci nebo odsolování pro odstranění potřeby dodávat další živiny (Goddek et al. 2019).

Ve studii Monsees et al. (2017) porovnávali jednosmyčkový a dvousmyčkový akvaponický systém s využitím rajčete jedlého (*Lycopersicon esculentum* Linnaeus, 1753) a tlamouna nilského (*Oreochromis niloticus*). Výsledkem byla srovnatelná produkce ryb, zato větší úroda rajčat ve dvousmyčkovém systému oproti jednosmyčkovému, a to o 36 %. Rozdíl v produkci rajčat přisuzují dříve zmíněným kompromisům v udržování pH vody a zředění živin v jednosmyčkovém systému, kvůli většímu množství vody, které je tam přiváděno, oproti

dvousmyčkovému systému, pro rybí populaci. Přidání většího množství živin by nedostatek pro rostliny vyřešil, nicméně by došlo ke zhoršení podmínek pro ryby a ztratila by se ekonomická podstata systému. V jednosmyčkovém systému také zjistili nedostatek N, P, K pro optimální růst rajčat. Ten mohl být podle autorů způsoben nižší hustotou populace ryb, kterou by bylo možné zvýšit využitím jiné technologie, než jaká byla použita pro studii (přidání oxygenace). Nicméně, ve dvousmyčkovém systému je možné přidat živiny do systému bez ohrožení kvality prostředí pro ryby, nebo lépe s ohledem na ekonomickou stránku využít P a K z kalu vzniklého po rybí produkci (Monsees et al. 2017).

Aslanidou et al. (2023) ve své studii porovnávali jednosmyčkovou akvaponii, vícesmyčkovou akvaponii a hydroponii z hlediska přenosu živin, přičemž využívaly ve všech případech červenou tilapii (*Oreochromis* sp. Günther, 1889) a jako rostliny: bazalku pravou (*Ocimum basilicum* Linnaeus, 1753), okurku setou (*Cucumis sativus* Linnaeus, 1753), petržel zahradní (*Petroselinum crispum* Fuss, 1866) a rajče jedlé (*Lycopersicon esculentum*). Zjistili, že při jejich pokusu byla schopná v jednosmyčkovém systému získat téměř dostatečné množství živin jen bazalka a petržel, ale okurka a rajče nedosahovaly obsahu pro jejich optimální růst. Ve vícesmyčkovém systému se všem plodinám podařilo vstřebat množství živin, které se blížilo jejich optimu. Dopad na životní prostředí ovšem zaznamenaly nejnižší u jednosmyčkového systému, následoval vícesmyčkový systém a největší dopad na životní prostředí přisuzují samotné hydroponii. Účinnost využití živin byla tedy nejlepší při využití vícesmyčkového systému, ale dopad na životní prostředí má stále nejlepší jednosmyčkový systém, je proto potřeba pracovat na těchto nedostatecích u vícesmyčkových systémů, které mají budoucnost v komerčním využití (Aslanidou et al. 2023).

Pozitiva dvousmyčkového, a hlavně vícesmyčkového systému jsou tedy v možnostech regulace optimálního prostředí ve všech částech systému, využití rybího kalu pro získání většího množství živin a dále také v možnosti lépe zachovávat zdravotní nezávadnost produkce (dezinfekce, léčba ryb a rostlin). Nevýhody systému jsou větší prostorová náročnost, nutnost sledování více faktorů a tím větší nároky na lidskou práci (Monsees et al. 2017). Obecně je tedy pro menší systémy (domácí, laboratorní) nebo pro systémy, kde jsou pěstovány méně náročné rostlin (bylinky, salát) využití jednosmyčkového systému a pro komerční využití s nutností vysoké produkce využití dvousmyčkového nebo vícesmyčkového systému (Monsees et al. 2017). Z ekonomického pohledu se využití vícesmyčkových systémů vzhledem k nutnosti počáteční investice (více technologií a složitější provedení) vyplatí zatím právě jen u velkoplošných komerčních projektů s velkou poptávkou na trhu (Goddek et al. 2019).

Další dělení těchto systému může spočívat v rozdělení podle velikosti umístění a velikosti produkce a tím souvisejícím využitím systému pro akvaponii. Je možné se tedy setkat s otevřenou akvaponií (probíhá například přímo na rybníku), domácími, demonstračními a komerčními akvaponickými systémy (Palm et al. 2018).

3.1.5 Organismy využívané v akvaponických systémech

Pro správné fungování systému je důležité určit správný poměr ryb ku rostlinám, aby bylo produkováno dostatečné množství živin pro rostliny a zároveň aby se systém nezanášel nadbytečným množstvím odpadních produktů ryb, které rostliny nejsou schopny využít. Zároveň je potřeba správně určit krmnou dávku pro ryby a množství potřebných

mikroorganismů pro přeměnu látek vyloučených rybami na takovou formu, aby byla přijatelná pro rostliny. Všechny aspekty záleží na druzích, které jsou pro daný systém využity (Lennard et al. 2019). Aby mohla být zajištěna co nejvyšší efektivita systému, je nutné správně kombinovat rybí druhy, rostliny a technologie, při jejichž využití se docílí co největšího znovuvyužití živin a vody, a při kterém bude minimálně zatíženo životní prostředí (Hu et al. 2015).

Z rostlin jsou nejčastěji využívány listová zelenina a bylinky, a to pro jejich krátkou dobu růstu a nenáročnost na živiny (Aslanidou et al. 2023). Z listové zeleniny se využívá například ledový salát (*Lactuca sativa* var. *capitata* „Iceberg“ Linnaeus, 1753) nebo brukev čínská (*Brassica campestris* subsp. *chinensis* Linnaeus, 1753), jako bylinky mohou být použity petržel zahradní (*Petroselinum crispum*) nebo bazalka pravá (*Ocimum basilicum*). Často se setkáme také s plodovou zeleninou, a to zejména s rajčetem jedlým (*Lycopersicon esculentum*) (Naegel 1977; Kloas et al. 2015; Hu et al. 2015; Monsees et al. 2017; Aslanidou et al. 2023; 2024).

Nejdůležitější vlastnost pro ryby využívané v akvaponii je tolerance k vyšším koncentracím živin a rozpuštěných pevných látek ve vodě. V jednosmyčkovém akvaponickém systému dále souvisí vhodný rybí druh s pěstovanou rostlinou, protože ekonomická úspěšnost je většinou založena právě na pěstované plodině, je potřeba vybírat rybí druh vysoce tolerantní k různým vodním podmínkám (obsah živin, pH, teplota). Díky možnosti ovlivnit podmínky v různých částech vícesmyčkového systému je volba chovaného rybiho druhu snazší a je zde možnost větší volby, která může být ovlivněna například poptávkou na daném trhu. Nejčastěji jsou jako rybí zástupci využívány tilapie a sumci. Ne všude jsou tyto druhy dobře dostupné, nebo se nemusí hodit pro danou lokalitu, proto Pinho et al. (2021) navrhl několik druhů, které by bylo možné využívat v Jižní Americe. Jedním z nich je například piraňa rostlinožravá (*Colossoma macropomum* Cuvier 1818) (Pinho et al. 2021).

Dalším článkem systému jsou mikroorganismy, které jsou přítomné primárně za účelem přeměny amoniaku na dusitany a dusičnany. Využívají se tedy převážně nitrifikační bakterie rodu *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* nebo *Nitrococcus* (Winogradsky, 1892). Mikroorganismy jsou v systému dále zodpovědné za rozklad organické hmoty, denitrifikaci nebo mineralizaci fosforu. Pro udržení vysoké kvality vody je proto potřeba správná směs mikroorganismů využitých v systému (Kasozi et al. 2021).

3.1.6 Budoucnost akvaponických systémů

Pro pěstování rostlin v systémech bez půdy vyplývají různá pozitiva. Plodiny mají předpoklad být zdravější a méně náročné na pěstování, a to například díky možnosti přesně specifikovat a kontrolovat podmínky pro jejich růst. Kontrolou podmínek růstu jsme schopni ovlivnit koncentraci látek obsažených v plodinách a můžeme tak dosáhnout například lepší výtěžnosti. Nezanedbatelnou výhodou je výrazné snížení možnosti napadení rostlin patogenními mikroorganismy. Nevýhodou mohou být vyšší vstupní náklady, nároky na specifické znalosti obsluhy systému a vyšší spotřeba energie (Kasozi et al. 2021).

S postupujícím výzkumem by mělo být možné začít více využívat i slanou vodu, a to díky snaze identifikovat vhodné kombinace druhů pro tento typ prostředí (Verma et al. 2023).

Jak je zřejmé, tak budoucnost akvaponických systémů spočívá v možnosti produkce více druhů potravy na jednom místě. Dále díky kontrole prostředí je možné pěstovat rostliny a chovat ryby v místech, kde by to přirozeně nebylo možné, případně velmi náročné. Při zvolení správných technologií a druhů je akvaponie cestou k zabezpečení dostatečného množství potravy pro rostoucí populaci.

Vývoji akvaponie v komerčním sektoru do budoucna zatím brání nedostatky specifické legislativy. Nyní je totiž zaměřena na systémy odděleně a pro produkci v akvaponii je tedy nutné dodržovat zákony a nařízení týkající se jak zemědělství, tak akvakultury, chovu ryb a všech dalších spojených odvětví. Zároveň není k dispozici dostatečné množství kvalifikovaného personálu, který je pro tento systém hospodářství podstatný, což je způsobeno nedlouhou dobou výzkumu. Pro komerční využití akvaponie je také důležité, jak přijímají akvaponii a produkty z ní zákazníci. Ze studie z roku 2017 o vnímání produktů z akvaponie v Evropě (téměř 70 % respondentů byla z Belgie, Řecka, Islandu, Slovinska a Nizozemí) vyplynulo, že více než 50 % oslovených o akvaponii nikdy neslyšelo, nicméně větší část znala hydroponii. Na akvaponii měli přesto pozitivní pohled, a to hlavně kvůli lokální produkci a vidině produktů vypěstovaných bez použití pesticidů nebo antibiotik. Hlavním aspektem pro většinu zákazníků podle studie stále zůstává cena. Oslovení s převážně pozitivním celkovým pohledem na akvaponii přesto zároveň vyslovovali nevoli, pokud šlo o způsob předávání živin rostlinám, tedy výměšky od ryb a nebyli si jisti kvalitou života ryb v systému. Z výsledků tedy vyplývá, že kromě výzkumu s cílem zajistit co nejlepší efektivitu akvaponických systémů, tedy zajištěním co nejnižších vstupních nákladů s co nejvyšší výslednou produkcí, je také nutnost seznámit a edukovat veřejnost s akvaponií a především s tím, jaká pozitiva přináší a jak vyvažují zdánlivá negativa zejména možný výskyt polutantů v akvaponickém systému (Miličić et al. 2017). Z tohoto důvodu se bude následující část literární rešerše zabývat možným výskytem polutantů (těžkých kovů a polokovů) v akvaponickém systému a jejich chováním.

3.2 Rizikové prvky

Rizikové prvky jsou označením pro těžké kovy (případně polokovy), které působí při zvýšených koncentracích na organismy toxicky a řadíme mezi ně arsen (As), beryllium (Be), kadmium (Cd), kobalt (Co), chrom (Cr), měď (Cu), železo (Fe), rtuť (Hg), mangan (Mn), molybden (Mo), nikl (Ni), olovo (Pb), vanad (V), zinek (Zn) (Sáňka & Materna 2004; Rotter et al. 2013; Emenike et al. 2022). Jsou to stabilní prvky, které se v přírodě nerozkládají, často dochází k jejich bioakumulaci a akumulaci v sedimentech (Shahjahan et al. 2022). Koncentrace akumulovaných kovů v kalech záleží na teplotě vody, pH, tvrdosti vody, době působení zdroje kontaminace, typu krmiva, dávce krmiva, nebo na druhu organismu (Kumar et al. 2024). Znovuvyužití stejné vody v recirkulačních systémech může, podle různých studií, které shrnul Van Bussel et al. (2014), vést k zvyšování koncentrací kovů ve vodě, a tím i v chovaných vodních organismech. Prokázáno je zvyšování koncentrací v recirkulačních akvakulturních systémech pro As, barium (Ba), bor (B), Cu, Fe, Mn, Ni a další (van Bussel et al. 2014).

Jak u ryb, tak u rostlin hrají některé z těchto prvků důležitou roli v metabolických procesech, protože jsou součástí enzymů zajišťujících jejich růst a vývoj, řadí se proto zároveň mezi prvky esenciální. U ryb jsou to Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn (Sheikhzadeh & Hamidian 2021; Emenike et al. 2022) a u rostlin Cu, Co, Mo, Ni a Zn (Vatansever et al. 2017). U těchto prvků velmi záleží na jejich koncentraci v prostředí a následně na množství přijímaném organismem (Zaynab et al. 2022). Jakmile překročí koncentrace těchto prvků v organismu určitou hranici, mohou způsobovat různé problémy právě v metabolických drahách organismu a mohou tak být příčinou fyziologických změn. Neesenciální prvky, jako As, Cd, Hg a Pb, působí nežádoucími účinky již při velmi nízkých koncentracích. Obecně platí, že čím delší dobu a vyšší koncentraci kovu je organismus vystaven, tím vyšší je jeho obsah v organismu (Shahjahan et al. 2022).

Koncentrace vybraných rizikových prvků v rybách anebo ve vodě již analyzovaly autoři ve studiích zaměřených na (recirkulační) akvakulturní systémy. Některé tyto studie s výsledky z nich jsou uvedeny v *Tabulce 1 a Tabulce 2*.

Jednou z mála studií, kde byly zjišťovány koncentrace těžkých kovů přímo v akvaponickém systému byla publikována Deswati et al. (2019). Studie byla zaměřena na koncentrace Fe, Cu a Zn v brukvi čínské (*Brassica rapa* Linnaeus, 1753) a tlamounu nilském. V rámci analýz byl v brukvi během 30 dní zjištěn nárůst koncentrací všech sledovaných kovů (Zn: 74,43 – 210,81 mg/kg, Cu: 13,83 – 27,82 mg/kg, Fe: 387,67 – 1 286,82 mg/kg). Koncentrace v mase tlamouna nilského se pro Zn pohybovaly mezi 157,09 – 70,24 mg/kg, pro Cu mezi 9,37 – 22,94 a mg/kg, Fe 316,29 – 826,91 mg/kg. Koncentrace kovů ve vodě souvisí s tím, jakým procesem voda v systému prochází (chovná nádrž, biofiltry, hydroponie a mechanický filtr), jejich hodnoty se pohybovaly mezi 0,21 – 0,309 mg/l pro Zn a 0,005 – 0,009 mg/l pro Cu. Jelikož je Fe důležitým nutrientem pro růst rostlin, byla jeho koncentrace na začátku měření 1,474 mg/l, po deseti dnech, kdy byl systém v provozu vzrostla na 5,73 mg/l, ale po průchodu přes biofiltry a hydroponickou část, klesla až na 0,44 mg/l (Deswati et al. 2019). Ledový salát (*Lactuca sativa* Linnaeus, 1753) pěstovaný v podmínkách akvaponie analyzoval Delaide et al. (2016), který naměřil v jeho listech koncentrace shrnuté v *Tabulce 3* (Delaide et al. 2016).

Tabulka 1: Koncentrace těžkých kovů (polokovů) ve vodních organismech chovaných v akvakulturních systémech. NA – nebylo analyzováno

Koncentrace [mg/kg] v syrovém stavu					Koncentrace [mg/kg suš.]
Material	rybí maso pstruh duhový (<i>Salmo mykiss</i> Walbaum, 1792)	maso krevety (<i>Caridea</i> spp. Dana 1852)	rybí maso kapr (<i>Cyprinus</i> spp. Linnaeus 1758)	rybí maso tilápie (<i>Tilapia</i> spp., Smyth)	rybí maso tilápie (<i>Tilapia</i> spp., Smyth) rybí maso 7 druhů ryb
Místo studie	Polsko	Bangladěš	Tibet		Jihozápadní Tchaj-wan mokřady Východní Kalkaty
Zdroj	(Barszcz & Sidoruk 2024)	(Sultana et al. 2022)	(Jiang et al. 2014)	(Ju et al. 2017)	(Kumar et al. 2011)
Analyt					
As	NA	0,040	0,014	0,286	0,060 0,450
Ba	NA	NA	0,070	0,014	NA NA
Cd	0,008 - 0,018	0,090	0,004	0,004	0,050 0,310
Co	NA	NA	0,004	0,005	NA NA
Cr	NA	0,690	0,002	0,002	NA NA
Cu	NA	9,430	0,163	0,149	1,610 7,540
Fe	NA	NA	NA	NA	NA 58,660
Hg	0,003 - 0,034	0,020	NA	NA	0,190 0,410
Mn	NA	4,830	0,238	0,128	NA 4,240
Ni	NA	NA	NA	NA	1,010 4,030
Pb	0,027 - 0,076	17,750	0,044	0,021	NA NA
V	NA	NA	0,007	0,006	NA NA
Zn	NA	18,890	NA	NA	21,500 47,800

Tabulka 2: Koncentrace těžkých kovů (polokovů) ve vodách akvakultur. NA – nebylo analyzováno

Koncentrace [µg/L]		
Místo studie	Polsko	Jihozápadní Tchaj-wan
Chovná ryba	Pstruh duhový (<i>Oncorhynchus mykiss</i> Walbaum, 1792)	Tilápie (<i>Tilapia</i> spp. Smith, 1840)
Zdroj	(Barszcz & Sidoruk 2024)	(Ju et al. 2017)
Analyt		
As	NA	0,22
Cd	1,00 - 3,00	0,20
Cr	NA	0,20
Cu	NA	1,97
Hg	7,00 - 13,00	0,07
Ni	NA	1,61
Pb	2,00 - 8,00	0,39
Zn	NA	5,39

Tabulka 3: Koncentrace těžkých kovů (polokovů) v listech ledového salátu (Delaide et al. 2016).

Analyt	Koncentrace [mg/kg suš.]	Analyt	Koncentrace [mg/kg suš.]
P	5 470	Fe	739
K	24 600	B	8,1
Ca	6 360	Cu	12,6
Mg	2 280	Zn	37
Na	3 700	Mn	1 343
		Mo	26,5

3.2.1 Zdroje rizikových prvků v akvaponickém systému

Místy vstupu těžkých kovů do akvaponie mohou být především krmivo pro ryby a zdroj vody. Nasvědčují tomu zejména studie zaměřené na analýzu těžkých kovů v akvakultuře (Lacerda et al. 2011; Martins et al. 2011; Wu & Yang 2011; León-Cañedo et al. 2017; Sonone et al. 2020; Emenike et al. 2022; Mohsen et al. 2022), kterých je výrazně více než těch,

ve kterých by byla zmíněna přímo akvaponie (Wu et al. 2019; León-Cañedo et al. 2023). Různé kovy mohou pocházet z rozmanitých zdrojů. Například měď může přicházet s prostředky využívanými pro kontrolu výskytu fytoplanktonu v rybích nádržích, jako je síran měďnatý nebo při použití nátěrů s obsahem mědi, které se používají proti vzniku nežádoucího biologického znečištění (Emenike et al. 2022). Dalším zdrojem mohou být různé plasty použité v systému, při jejichž výrobě se některé těžké kovy používají (například Pb, Ni, Cu, Co) (Mohsen et al. 2022).

3.2.1.1 Krmiva využívaná v akvaponii

Jedním z hlavních vstupů rizikových prvků do akvaponického systému mohou být právě krmiva určená pro chovanou rybí populaci. V akvaponii jsou využívána stejná krmiva jako v akvakulturních a recirkulačních akvakulturních systémech, která jsou označovaná za komerční krmiva. Příkladem jsou krmiva od společnosti Skretting (Skretting 2025), AquaNourish (The Aquaponic Source 2020), Aller Aqua (Aller Aqua 2025) nebo Alltech Coppens (Alltech Coppense 2025). Výrobci krmiv přímo na svých stránkách často neuvádí přesné obsahy prvků v jejich krmivech, nicméně krmnou dávku uvádí, ta se vždy odvíjí od hmotnosti krmené ryby (Aller Aqua 2025; Alltech Coppense 2025). Složení některých krmiv je uvedeno v *Tabulce 4*.

Tabulka 4: Příklady krmiv pro chov ryb v RAS a jejich složení podle výrobce.
Zdroj: Alltech Coppense 2025, Aller Aqua 2025

Výrobce	Název krmiva	Velikost krmiva	Obsah [%]				Celkový fosfor
			Bílkoviny	Tuky	Vláknina	Popeloviny	
Alltech COPPENCE	ADVANCE	0,2 - 0,8 mm	56	15	0,3	11,3	1,77
		1,0 - 1,5 mm	54	15	0,4	9,65	1,66
	ULTRA	3 mm	43 - 45	24 - 27	4 - 8	1 - 2	0,89
		4,5 mm	42 - 44	26 - 29	4 - 8	1 - 2	0,86
	ESSENCE	0,2 - 0,8 mm	50	10	2,1	7,7	0,9
	REPRO	6 mm/9 mm	48	15	1,3	10,5	1,61
Aller Aqua	PERFORMA	2 mm	45	20	2	7,1	1
	BONA FLOAT	3 - 4,5 mm	42	12	3	6,8	1
		6 - 8 mm	42	12	3,1	6,6	1
	INFA EX	0,1 - 0,4 mm	64	12	1	12,1	1,4
	FUTURA EX	0,5 - 1,6 mm	60	15	0,7	12,6	1,4
		1,3 - 2 mm	58	17	0,7	12,2	1,4
	PARVO EX	0,5 - 2 mm	44	9	2,3	9,3	1,1
	PRIMMO	3 - 8 mm	37	12	3,9	6	1

O specifických krmivech pro akvaponii toho zatím není moc známo, ale jsou testovány různé alternativy, jejichž cílem je zamezit vzniku zbytků a zajistit co nejlepší výživu rostlin (obsah dostatečného množství nutrientů také pro rostliny). Byla studována například krmiva založená na larvách *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758), moučce z drůbeží krve, moučce z vedlejších drůbežích produktů, dále také mikroorganismy jako náhrada rybí moučky nebo využití geneticky upravených organismů (Bandara 2018; Shaw et al. 2022). Rybí krmiva by měla obsahovat bílkoviny, tuky, vitamíny, mikronutrienty (Cu, Fe, Mn, Zn), makronutrienty (vápník - Ca, draslík - K, fosfor - P, síra - S), lysin a další látky (Kong et al. 2020; Shaw et al. 2022). Aby nebylo nutné do systému přidávat další látky, je důležité, aby kromě správné energetické hodnoty obsahovalo krmivo v recirkulačních systémech, které mají spočívat v co nejnížší spotřebě a využití chemie, také látky podporující imunitní systém ryb (Yavuzcan Yildiz et al. 2017).

Například ve studii, kde využívali *Oreochromis* sp. (Günther, 1889) bylo používáno krmivo komerční směs plovoucích pelet (společnost Car-gill), které obsahovaly 24 % proteinu, 6 % tuků, 6 % vlákniny, 11 % vlhkosti a minerální složku tvořilo 0,1 % Fe, 0,003 % Mn, 0,0024 % Cu, 1,74 % Ca, 0,428 hořčíku (Mg), 3,4 % dusíku (N), 1,48 % P a 0,53 % K. Ryby byly krmeny vždy v 9 hodin ráno v půl druhé odpoledne (Rafiee & Saad 2005). V jiné studii krmili juvenilní tlamouny nilské (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758) krmivem, které obsahovalo 8,58 g/kg Ca, 0,91 g/kg Mg, 65,91 g/kg N, 7,24 g/kg P, 6,88 g/kg K, 0,026 g/kg Cu a 0,162 g/kg Zn a dospělce krmivem s obsahem 7,68 g/kg Ca, 0,84 g/kg Mg, 61,47 g/kg N, 5,48 g/kg P, 4,68 g/kg K, 0,016 g/kg Cu a 0,156 g/kg Zn. Ryby byly krmeny denně 950 g krmiva (Lenz et al. 2021). Podobné obsahy nutrientů v krmivech jsou publikovány i v dalších studiích. Například Shaw et al. (2022) analyzoval také krmiva určená tlamounu nilskému a zjistil v nich následující koncentrace vybraných prvků: Cu 14 – 21 mg/kg, Zn 55 – 151 mg/kg, Fe 13 – 85 mg/kg, Cr 1,95 – 3,62 mg/kg, Ni 0,46 – 1,15 mg/kg, Cd 0,07 – 0,61 mg/kg a Pb 0,07 – 0,66 mg/kg. Dále Madariaga & Marín (2017), který testoval krmivo lososa obecného (*Salmo salar* Linné, 1758), zjistil průměrné koncentrace: Cu 21 mg/kg suš., Zn 241 mg/kg suš., Se 3,6 mg/kg suš. a Cd 0,63 mg/kg suš.

Podle Shaw et al. (2022) souvisí koncentrace rozpuštěných kovů ve vodě z velké části právě se složením využitého krmiva a nejvíce se v jeho studii tento trend projevil u N, P, K, Mg a Cu.

3.2.1.2 Rybí kal

Akvaponie má za svůj cíl využívat co nejvíce živin určitou recyklací, co zatím ovšem plně využít neumí, je právě „rybí kal“. Kal v akvaponii vzniká ze zbytků potravy (potrava ryb je hlavním zdrojem živin v akvaponii), výměšků ryb a přebytků mikrobiální biomasy (Rafiee & Saad 2005). Kal je ze systému získáván filtrací přes mechanické filtry a odvedením ze systému jako odpad. Může být dále využit jako hnojivo na půdy, do kompostů nebo může být dále zpracován anaerobní digestí (Zhang et al. 2021). Aby bylo možné kal dále využívat jako kvalitní zdroj živin, je potřeba jeho efektivní sběr a stabilizace. Digestce kalu může probíhat jak v anaerobních, tak v aerobních reaktorech. Zhang et al. (2021) navrhuje jako řešení spojení procesu separace a přeměny živin v jednom systému, konkrétně modifikovaném

provzdušňovaném biologickém filtru, který by měl zvládnout pojmout velké množství kalu a zároveň by v něm probíhala aerobní mineralizace. Takový systém by byl zapojený do akvaponického systému formou bypassu v místě sedimentační nádrže (Zhang et al. 2021).

Ve studii Rafiee & Saad (2005) sledovali přenos živin z potravy pro *Oreochromis* sp. do vyprodukovaného kalu a došli k závěru, že záleží na životním cyklu ryby. Přenos živin z dodávané potravy do kalu se v této studii pohyboval například pro Fe 0,30 – 0,40 %, Mn 4,00 – 16,00 %, Zn 0,035 – 0,08 %, Cu 0,56 – 0,64 %. Dále bylo patrné, že kaly v sobě dokáží na rozdíl od vody hromadit mikroživiny (Cu, Fe, Mn a Zn). Ve vodě se totiž koncentrace těchto prvků pohybovaly pod 0,1 µg/L (Rafiee a Saad 2005). Ukládání většího množství těžkých kovů do rybích kalů by mohlo způsobovat komplikace při záměru využití takových kalů v zemědělství. V akvaponickém kalu analyzovaném Lenz et al. (2021), který vznikl z krmiva tlamouna nilského a z jeho výkalů, naměřili pro Cu a Zn (v této práci sledované kovy) koncentraci 5,65 mg/kg a 49,52 mg/kg (Lenz et al. 2021). Výsledky analýz kalu z recirkulačního akvakulturního systému před rozkladem a po anaerobní digesti porovnávali Madariaga1 & Marín (2017). Výsledky analýzy surového kalu jsou znázorněny v *Tabulce 5*. Po anaerobní digesti vzrostla koncentrace Cd o 70 %, Pb o 134 % a Zn o 63,5 %, koncentrace As, Cu a Se vzrostla také, ale méně než o 20 % a obsah Hg zůstal pod limitem detekce (<1 mg/kg). Autoři studie proto poukazují na nutnost sledování koncentrací kovů v kalu po jeho zpracování (Madariaga & Marín 2017). Obsahem těžkých kovů v kalu z akvakultury se ve své studii zabýval také Sultana et al. (2022), jejíž výsledky jsou uvedeny také v *Tabulce 5* (Sultana et al. 2022). Hodnoty v *Tabulce 5* slouží pouze jako ukázka možných koncentrací vybraných rizikových prvků v kalech. Nelze je bohužel mezi sebou porovnávat, protože autoři využili jiné jednotky a nepublikovali hodnoty sušiny analyzovaných vzorků.

Tabulka 5: Koncentrace vybraných těžkých kovů (polokovů) v kalech z akvakulturních systémů. NA – analyt nebyl analyzován; [mg/kg] – koncentrace mg/kg původního vzorku; [mg/kg suš.] – koncentrace mg/kg vysušeného vzorku

Analyt	kal akvakultura	kal RAS
	[mg/kg] (Sultana et al. 2022)	[mg/kg suš.] (Madariaga & Marín 2017)
As	0,44	2,70
Cd	0,09	3,60
Cr	30,38	NA
Cu	31,14	29,00
Hg	0,08	<1
Mn	1043,00	NA
Pb	20,23	6,40
Se	NA	4,60
Zn	74,72	1084,00

3.2.2 Důsledky expozice rizikových prvků u ryb

Těžké kovy mohou do ryb vstupovat hlavně třemi cestami. Nejdůležitější je příjem přes žábry, dále pak trávicím traktem a povrchem těla. U ryb také dochází k bioakumulaci těžkých kovů. Velmi snadno přijímají a ukládají do svých tkání arsen a rtuť a jsou tedy významným zdrojem příjmu těchto prvků pro člověka. Dále například v játrech a žábách ve vysoké míře akumulují kadmium a olovo (Afshan et al. 2014). Příjem a akumulace kovů v rybách závisí na mnoha faktorech, jak na koncentraci prvku v prostředí a fyzikálně-chemických vlastnostech vody, tak na velikosti, věku, potravě a specifickém metabolismu ryb (Shahjahan et al. 2022).

Kromě ukládání do tkání způsobují těžké kovy u ryb i fyziologické změny a tím zdravotní problémy. Negativně působí na reprodukční systém ryb, růst a vývoj, nervovou a kardiovaskulární soustavu nebo poškozují žábry (Sonone et al. 2020). Jedním z indikátorů, že byla stresová reakce u ryb způsobena právě těžkými kovy mohou být její krevní parametry (Emenike et al. 2022). Zvýšená koncentrace jednotlivých těžkých kovů způsobuje u ryb rozdílné projevy a lze tak odhadnout, o jaký kontaminant se jedná (Kumar et al. 2024). Příklady působení vyšších koncentrací některých rizikových prvků na ryby a po konzumaci intoxikovaných ryb na člověka, jsou uvedeny v *Tabulce 6*.

Koncentrace kovů způsobujících problémy souvisí s druhem a věkem ryby. Například letální koncentrace (LC₅₀) rtuti se může pohybovat od 0,2 do 4,0 mg/l u kaprovitých (*Cyprinidae* spp. Rafinesque, 1810) a od 0,3 do 1,0 mg/l u lososovitých ryb (*Salmonidae* Cuvier, 1816) (Agbugui 2022). Oproti tomu LC₅₀ pro Al je pro *Cirrhina mrigala* (Hamilton, 1822) 149,14 mg/l. Pro Pb se LC₅₀ u ryb pohybuje mezi 10 – 100 mg/l, pro Cr⁺³ 2 – 7,5 mg/l, pro Cr⁺⁶ 35 – 75 mg/l, pro As 3 – 30 mg/l, pro Zn 8,0 – 21,5 mg/l dále například pro Cu 0,1 – 1,5 mg/l (van Bussel et al. 2014; Al Taei et al. 2020). Van Bussel (2014) ve výsledcích své studie popisuje vliv Zn v RAS se slanou vodou. Konkrétně zmiňuje účinek Zn již při koncentraci 0,3 mg/l ve slané vodě, kterým je abnormální tvar těla a vyšší úmrtnost u pražmana japonského (*Pagrus major* Temminck & Schlegel, 1843) (van Bussel et al. 2014). Aldoghachi (2016) sledoval toxicitu a bioakumulaci těžkých kovů (Cd, Cu a Zn) u *Oreochromis* spp. a došel k závěru, že je tento druh nejcitlivější na koncentrace Cu (LC₅₀ 0,5 – 3,0 mg/l), následuje Cd (LC₅₀ 1,0 – 5,0 mg/l) a nejméně citlivé jsou na koncentraci Zn (LC₅₀ 3,0 – 5,0 mg/l) ve vodě (Aldoghachi et al. 2016).

Tabulka 6: Příklady důsledků působení vybraných rizikových prvků na ryby a člověka.

Kov	U ryb způsobuje	U člověka způsobuje	Zdroj
As	poškození jater; zánět žlučníku; anémii	vznik rakoviny; kožní problémy; poškození nervového systému	(Castro-González & Méndez-Armenta 2008; Kumari et al. 2017)
Cd	poškození ledvin a reprodukčního systému	poškození ledvin, reprodukčního a nervového systému; trávicí problémy; poškození DNA	(Castro-González & Méndez-Armenta 2008; Afshan et al. 2014)
Cr	anémii; zvýšení počtu bílých krvinek; poškození ledvin	oslabení imunitního systému; problémy s dýcháním; poškození ledvin a jater	(Afshan et al. 2014)
Hg	oxidační stres; poškození imunitního systému; kardiomyopatie; problémy s rozmnožovací a nervovou soustavou;	inhibici syntézy proteinů; poškození nervového systému a jeho vývoje u dětí	(Castro-González & Méndez-Armenta 2008; Morcillo et al. 2017)
Pb	problémy s krví a nervovou soustavou; ztrátu rovnováhy	poškození jater, ledvin a nervové soustavy; anémii; nemoci srdce; změny chování (agresivita)	(Castro-González & Méndez-Armenta 2008; Afshan et al. 2014; Emenike et al. 2022)
Zn	strukturální změny; změny v dýchací soustavě, které vedou k hypoxii; změny chování	kožní problémy; trávicí problémy; anémii; narušení metabolismu proteinů	(Afshan et al. 2014)

3.2.3 Důsledky expozice rizikových prvků u rostlin

Toxické koncentrace těžkých kovů mohou u rostlin způsobovat například inhibici enzymů v cytoplazmě nebo oxidační stres, následkem kterého dochází k poškození buněčných struktur. Výsledkem zvýšených koncentrací rizikových prvků jsou nejčastěji pro rostlinu nedostatečný růst a následný úhyn. Příklady důsledků působení některých těžkých kovů na rostliny jsou uvedeny v *Tabulce 7*.

Tabulka 7: Příklady důsledků působení vybraných rizikových prvků na rostliny.

Kov	U rostlin způsobuje	Zdroj
Cu	chlorózu listů; zastavení růstu; deformaci kořenů; snížení tvorby semen	(Asati et al. 2016)
Zn	zastavení růstu (zastavení buněčného cyklu); chlorózu mladých listů (s delší dobou expozice i starších listů); fialovo-červené zbarvení listů	(Asati et al. 2016)
Cd	inhibice růstu; chlorózu; hnědnutí kořenové špičky; rolování listů; omezuje příjem dusičnanů; snížení množství karotenoidů a chlorofylu	(Asati et al. 2016; Kiran et al. 2022)
Hg	zabránění proudění vody rostlinou (vazba na proteiny); porušení mitochondriální aktivity; sníženou hmotnost a velikost plodů a květů; snížení příjmu Fe a Mn a tím snížení množství chlorofylu	(Asati et al. 2016; Kiran et al. 2022)
Cr	poškození buněčných membrán; degradaci chlorofylu, vedoucí ke snížení růstu; omezené klíčení semen; změnu barvy pigmentů; změnu biochemické aktivity rostliny (zvýšení nebo změna produkce některých metabolitů); změny vzhledu rostliny (deformace);	(Asati et al. 2016; Shanker et al. 2005)
Pb	omezení klíčení semen; inhibici růstu; změny v morfologii; inhibici enzymatické aktivity pro fixaci CO ₂	(Asati et al. 2016; Kiran et al. 2022)
Co	omezení růstu; sníženou produkci chlorofylu, některých enzymů; sníženou aktivitu katalázy	(Asati et al. 2016)
Ni	snížený příjem vody; chlorózu (inhibice tvorby chlorofylu a porušování struktury chloroplastů); odumírání částí rostlin; nerovnováhu v koncentraci živin; brždění růstu kořenů (ovlivňuje hlavně kořeny); změny ve tvarech květů	(Asati et al. 2016; Kiran et al. 2022)
As	snížování růstu, klíčení, počtu listů, fotosyntetické aktivity; deformaci listů; odumírání listů	(Kiran et al. 2022)

3.2.4 Legislativní limity těžkých kovů

Maximální limity pro koncentrace některých těžkých kovů (Pb, Cd, Hg, As, Sn) v potravinách jsou dány Nařízením Komise (EU) 2023/915 ze dne 25. dubna 2023 o maximálních limitech některých kontaminujících látek v potravinách. Povolené limity pro potraviny produkované akvaponickými systémy jsou ve zjednodušené podobě uvedeny v *Tabulce 8*.

Tabulka 8: Maximální limity koncentrací kovů v potravinách – zjednodušeno (Nařízení Komise (EU) 2023/915).

Analyt	Potravina	Limit [mg/kg] v syrovém stavu
Pb	rybí maso	0,30
	zelenina	0,05 - 0,30
Cd	rybí maso	0,05 - 0,10
	zelenina	0,05 - 0,20
Hg	rybí maso	0,50 - 0,10

Světová zdravotnická organizace (WHO) stanovila v rámci bezpečnosti potravin povolené limitní koncentrace některých těžkých kovů v rybách. Tyto limity jsou uvedeny v *Tabulce 9* (Kumar et al. 2024). Z hodnot je patrné, že Nařízení EU je pro koncentrace Cd, Hg i Pb přísnější.

Tabulka 9: Limitní koncentrace těžkých kovů v rybím mase podle WHO.

Analyt	Limit [mg/kg] v syrovém stavu	Analyt	Limit [mg/kg] v syrovém stavu
As	30,00	Hg	0,50
Cd	3,33	Ni	0,60
Cr	50,00	Pb	0,50
Cu	30,00	Zn	30,00
Fe	100,00		

Limity těžkých kovů v krmivech se řídí Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2002/32/ES ze dne 7. května 2002 o nežádoucích látkách v krmivech a konkrétní limitní koncentrace jsou uvedeny v Příloze I této směrnice. Jsou zde z rizikových prvků uvedeny: As, Pb, Hg a Cd a jejich limitní koncentrace ve specifických druzích krmiv. Dalším legislativním dokumentem vztahujícím se ke krmivům je Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES)

č. 767/2009 ze dne 13. července 2009, který stanovuje podmínky pro krmiva uváděná na trh, čímž určuje složení používané potravy (například obsah popela, doplňkových látek a další).

Vzhledem k využívání vody pro chov ryb, by se dalo předpokládat, že její limity budou stanoveny nařízením spolu s krmivy, jelikož ryby vodu „konzumují“. Definice krmiva ovšem podle EU nezahrnuje vodu. Podle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 183/2005 ze dne 12. ledna 2005, kterým se stanoví požadavky na hygienu krmiv, kde je přímo zmíněna akvakultura, má mít tato voda takovou jakost, aby byla vhodná pro chovaná zvířata. V případě pochybností o čistotě vody, je nutné vyhodnotit nebezpečí a přijmout opatření vedoucí k jeho minimalizaci. Limity jsou EU momentálně stanoveny pouze pro pitnou vodu.

Koncentraci těžkých kovů v rybách a v prostředí ve kterém žijí je důležité sledovat, zejména kvůli využití v dietě lidí, ale samozřejmě také pro zabezpečení kvality jejich života. Ryby jsou doporučenou součástí našeho jídelníčku, protože obsahují omega-3 mastné kyseliny, vitamíny, minerály a mnoho proteinů (Weichselbaum et al. 2013).

Limitní koncentrace těžkých kovů v čistírenských kalech, které mají být využity v zemědělství pro ukládání do půdy, jsou pro Českou republiku stanoveny vyhláškou č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady (*Tabulka 10*).

Tabulka 10: Limitní koncentrace těžkých kovů v čistírenských kalech určených pro zemědělství – uložení do půdy.

Analyt	Limit [mg/kg suš.]	Analyt	Limit [mg/kg suš.]
As	30	Hg	4
Cd	5	Ni	100
Cr	200	Pb	200
Cu	500	Zn	2500

3.2.5 Možnosti stanovení kovů ve vodě, rybách, krmivech a rostlinách

Metody stanovení kovů v různých matricích spočívají v homogenizaci vzorku, jeho mineralizaci a následné analytické koncovce, tedy kvantifikaci sledovaného analytu. Vzorky ryb bývají před přípravou k analýze zmrazeny a v tomto stavu homogenizovány. Vzorky rostlin vysušené a následně také rozdrcené homogenizovány. Pro přípravu vzorku, tedy mineralizaci, která je potřeba především pro vzorky ryb, jejich krmiv a rostlin. Nejčastěji jsou využívány kyselina dusičná, chlorovodíková a jejich směs ve formě lučavky královské (poměr kyseliny chlorovodíkové a dusičné 3:1), případně chloristá, sírová nebo fluorovodíková a dále také peroxid vodíku. Mineralizace může probíhat například v mineralizační – kjeldahlově baňce, nebo mikrovlnným rozkladem za zvýšeného tlaku. U vzorků vody je postup přípravy jednodušší. Není potřeba vzorek vody mineralizovat, ale stačí upravit pH vzorku, například kyselinou dusičnou, podle nastavení kvantifikační metody a případně přefiltrovat (koncentrace rozpuštěných kovů) (Gupta et al. 2009; Low et al. 2011; Wu & Yang 2011; Deswati et al. 2019; Mohsen et al. 2022; Barszcz & Sidoruk 2024)

Ve studiích, které sledovaly koncentrace těžkých kovů ve vzorcích z akvakultury nebo přímo akvaponie, jsou nejčastěji využívanými analytickými metodami hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS), emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES) a plamenová/ atomová absorpční spektrometrie (F/AAS). Některé ze studií využívajících tyto metody jsou uvedeny v *Tabulce 11*.

Tabulka 11: Koncové analytické metody využívané pro kvantifikační analýzu těžkých kovů (polokovů).

Matrice	Analyty	Koncová metoda	Zdroj
ryby, voda, sediment	As, Cd, Pb	ICP-OES	(Feldlite et al. 2008)
ryby, voda, sediment	Hg	FAAS	(Feldlite et al. 2008)
ryby, voda	Cd, Cr, Cu, Pb, Zn	FAAS	(Gupta et al. 2009)
ryby	As, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Pb, Se, V, Zn	ICP-MS	(Low et al. 2011)
krevety, krmiva	Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn	ICP-MS	(Wu a Yang 2011)
ryby, voda	As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn	FAAS	(Kumar et al. 2011)
ryby, voda	As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Pb, V	ICP-MS	(Jiang et al. 2014)
ryby	As, Cd, Cu, Hg, Ni, Zn	FAAS	(Ju et al. 2017)
rostliny	Cu, Fe, Zn	FAAS	(Deswati et al. 2019)
voda	Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Mn, Ni, Pb, Rb, Se, Tl, U, V, Zn	ICP-MS	(Mohsen et al. 2022)
rostliny	Cd, Cu, Pb, Zn	AAS	(Sumalan et al. 2023)
ryby, voda, krmiva	Cd, Pb, Hg	ICP-OES	(Barszcz & Sidoruk 2024)

4 Metodika

V rámci diplomové práce byly zpracovány vzorky kalové vody, rybího kalu, hlávkového salátu (*Lactuca sativa*, L.), krmiv pro ryby a ryb z akvaponického systému, kde chovají ryby rodu křečíkovci (*Clarias* Linnaeus, 1758) a tilápie (*Oreochromis* Günther, 1889). Pro analýzu obsahu rizikových prvků (Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd a Pb) ve zmíněných maticích byla využita metoda hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS). Vzorky byly k analýze připraveny na České zemědělské univerzitě v Praze (ČZU), jejich následná analýza metodou ICP-MS proběhla v laboratořích ALS Czech Republic (ALS). Vzorky byly poskytnuty z akvaponického recirkulačního jednosmyčkového systému provozovaného firmou (v této práci bude zachována podmínka anonymity) na území České republiky v rámci projektu NAZV - QK21010207 (Diverzifikace a posílení konkurenceschopnosti akvakultury podporou akvaponie jako inovativní zemědělské technologie produkce potravin). Obchodní názvy používaných krmiv z důvodu zachování anonymity nebudou také zveřejňovány.

4.1 Příprava vzorků salátu a rybího krmiva

K rozkladu byly k dispozici čtyři vzorky již vysušeného a homogenizovaného salátu zkoumaného provozu, které se lišily datem odběru: T1 – odběr 6. 5. 2021, T2 – 14. 5. 2021, T3 – 20. 5. 2021 a T4 – 28. 5. 2021 a pět vzorků krmiv s označením 01 – 05, které se v daném akvaponickém systému používaly. Z důvodu zachování anonymity nejsou názvy krmiv zmíněny a složení nebude zmíněno. Pro jednotlivé vzorky lze uvést obecné popisy:

Krmivo 01 – Coppens advance 56 % protein (0,3-0,3 mm)

Krmivo 02 – Coppens tilapie + baby 56 % protein (0,8 - 1,3 mm)

Krmivo 03 – Tilapia T-12 35 % (2,5 mm)

Krmivo 04 – Skretting MK-3 sumeček 46 % protein (3 mm) MK3

Krmivo 05 – Skretting MK-3 sumeček 46 % protein (3 mm) E3

Popis základních chemicko-fyzikálních vlastností vzorků je uveden níže v *Tabulce 12* (saláty) a *Tabulce 13* (krmiva). Jednotlivé parametry byly stanoveny jako průměr čtyř vzorků ze stejného dne sběru (kvadruplikátu) pro saláty a duplikátů pro krmiva.

Tabulka 12: Vlastnosti vzorků sklizených salátů.

	Saláty			
	T1	T2	T3	T4
sušina [%]	7,0	6,8	7,6	7,6
C [%]	37,7	37,4	39,7	40,0
O [%]	48,2	48,4	46,5	45,9
H [%]	6,2	6,0	6,5	6,5
N [%]	4,0	3,9	3,5	3,9
S [%]	0,2	0,2	0,3	0,3
popeloviny [%]	3,8	4,0	3,6	3,3

Tabulka 13: Vlastnosti vzorků rybích krmiv.

	Krmiva				
	01	02	03	04	05
sušina [%]	99,7	99,5	98,5	98,4	97,3
pH	5,4	5,2	5,6	5,7	5,7
EC [μS/cm]	1769,5	695,5	1251,5	2695,5	2510,0
C [%]	47,1	46,4	46,0	45,8	46,1
O [%]	23,9	23,1	27,4	27,3	26,8
H [%]	7,2	7,7	7,6	7,7	7,8
N [%]	9,5	9,8	8,4	8,3	8,2
S [%]	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7
popeloviny [%]	11,5	12,1	9,9	10,2	10,4

Vzorky salátů a krmiv byly připraveny stejným způsobem. Vzorky byly naváženy (přibližně 0,4 g) spolu s CRM 1573a tomatové listy od společnosti NIST (0,2037 g). Vzorky byly přeneseny do patron, bylo k nim přidáno 8 ml HNO_3 a 2 ml H_2O_2 , zároveň byl připraven slepý pokus a vše prošlo mikrovlnným rozkladem. Rozklad probíhal za tlaku 0,4 bar prvních pět minut při 160 °C a následujících 32 minut při 210 °C.

Vzorky byly následně převedeny do čistých patron a odkyseleny. Nakonec byly převedeny do zkumavek a doplněny na konečných 20 ml demineralizovanou vodou. Před analýzou byly z důvodu zabarvení vzorky ředěny desetkrát.

4.2 Příprava vzorků ryb

K analýze byly k dispozici vzorky svaloviny, gonád a jater ryb chovaných v akvaponickém systému (vše v triplicátu), křečíkovců a tilápií a také vzorek ryb v juvenilním stádiu vývoje. Všechny vzorky byly odebrány a připraveny v triplicátu. Před rozkladem byly všechny vzorky lyofilizovány a následně homogenizovány. Pro vzorky svaloviny byla stanovena průměrná sušina: tilápie 21,0 % a křečíkovci 20,7 %.

Navážka pro rozklad se u vzorků pohybovala kolem 0,4 g (nižší navážka byla u vzorků gonád tilápie, z důvodu malého množství vzorku). Ke každému vzorku bylo přidáno 8 ml HNO_3 a 2 ml H_2O_2 a takto připravené vzorky prošly mikrovlnným rozkladem. Rozklad probíhal za tlaku 0,4 bar 70 minut za měnící se teploty: 10 minut při teplotě 120 °C, následně 10 minut při 160 °C, dále 20 minut při 180 °C, 10 minut při 160 °C a nakonec 20 minut při 180 °C.

Po rozkladu byly mineralizáty doplněny na konečný objem 45 ml demineralizovanou vodou. Před instrumentální analýzou byly vzorky naředěny kvůli vzhledu vzorku desetkrát.

4.3 Odběr a příprava vzorků rybího kalu a kalové vody

Vzorky byly odebrány v systému před (A) a po filtraci (B) v rámci průtoku vody od chovné nádrže s rybami k rostlinám. Jelikož vzorky kalové vody obsahují obecně malé množství sušiny, byly vzorky surové kalové vody při odběru zakoncentrovány, aby jejich sušina byla vyšší než 5 %. Koncentrované surové kalové vody byly v laboratoři následně rozděleny filtrací na kapalnou frakci (kalová voda) a pevnou frakci (rybí kal = kal z akvaponie). Popis vlastností vzorků je uveden v *Tabulce 14* a jde o průměr z duplicitních vzorků. Vzorky byly okyseleny kyselinou dusičnou (HNO_3) na konečné $\text{pH} \approx 2$. Takto upravené vzorky byly připraveny k analýze.

Tabulka 14: Vlastnosti vzorků kalové vody a rybího kalu. NA – nebylo stanoveno

	Kalová voda		Rybí kal	
	A	B	A	B
sušina [%]	0,2	NA	11,8	7,3
pH	5,8	6,4	6,0	5,9
EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	1336,5	850	502,5	338,0
C [%]	NA	NA	39,3	38,0
O [%]	NA	NA	27,9	38,8
H [%]	NA	NA	6,3	5,3
N [%]	NA	NA	4,8	3,8
S [%]	NA	NA	0,4	0,6
popeloviny [%]	7,0	NA	21,3	13,4

Pro přípravu a měření byly k dispozici vysušené vzorky kalů z roku 2021 získané ze surové vody před a po filtraci v systému a certifikovaný referenční materiál (CRM) AN-OK01 odpadní kal od společnosti Analytika.

Kaly byly naváženy do skleněných kádinek. Navážky vzorků kalů se pohybovaly kolem 0,4 g a CRM 0,2 g. Navážené vzorky byly zality 10 ml lučavky královské (75 ml HCl a 25 ml HNO_3) a spolu s nimi byl připraven také slepý pokus, tedy kádinka pouze s lučavkou královskou. Kádinky byly zakryty hodinovými sklíčky a přesunuty na výhřevnou plotýnku nastavenou na 120 °C, kde byly ponechány 20 minut zakryté hodinovým sklíčkem a dále bez zakrytí do odpaření. Vzhled vzorku po odpaření tekutiny neodpovídal předpokládané struktuře (obsahoval nerozpuštěný sediment) a proto bylo nutné přidat další 2ml HNO_3 a pokračovat v rozkladu. Po odpaření dodané kyseliny dusičné byly vzorky převedeny z kádinek do zkumavek, kde byl objem mineralizátu doplněn demineralizovanou vodou na konečných 20 ml. Před samotnou analýzou byly vzorky ředěny 10krát.

4.4 Analytická metoda ICP-MS

Metoda ICP-MS umožňuje kvantitativní analýzu celkových obsahů prvků. Vzorek je v kapalném skupenství (pevné vzorky musí být před analýzou rozloženy) veden přes peristaltickou pumpu do zmlžovače, který z něj za současného vstřikování argonu (Ar) tvoří aerosol. Aerosol je vstřikován do mlžné komory, kde jsou odděleny větší kapky. Jemný aerosol vzorku je v proudu argonu veden do plazmového hořáku, který je tvořen třemi křemenovými trubicemi (vnitřní vede aerosol vzorku, prostřední je veden hlavní proud Ar a je zde tvořena plazma, vnější udržuje tvar plazmy a funguje jako chlazení) a je uložen v indukční cívce. Plazmový výboj je tvořen v proudu Ar za atmosférického tlaku po iniciaci jiskrou. Aerosol je průchodem plazmovým výbojem vysušován, molekuly jsou disociovány, excitovány a jsou ionizovány volné atomy. Vzniklé částice prochází sadou dvou kónů (sample a skimmer) do vakuové komory, následně také soustavou magnetických čoček, čímž jsou odděleny pouze pozitivně nabitě částice, které pokračují do kvadrupólového hmotnostního separátoru (v základním uspořádání, které bylo využito při měření). Kvadrupól je tvořen čtyřmi tyčemi, přes které v jednom okamžiku k detektoru projdou pouze ionty se specifickým poměrem hmotnosti ku náboji (m/z). Jako detektor je využíván elektronásobič, schopný pracovat v pulsním a analogovém módu, díky čemuž je možné využít široký dynamický lineární rozsah metody (Van Acker et al. 2023).

Pro měření vzorků byl využit ICP-MS Agilent 7700 ISIS2 a autosampler Teledyne CETAC Technologies ASX-560.

5 Výsledky

Výsledky jsou v této kapitole rozděleny do podkapitol podle sledované matrice.

5.1 Krmiva

Koncentrace rizikových prvků v krmivech pro chovanou rybí populaci s označením 01 – 05 jsou uvedeny v *Tabulce 15*. Prvkové složení jednotlivých krmiv se výrazně lišilo jen u některých z nich. Například téměř šestkrát větší obsah chromu byl zjištěn v krmivu 01 (3,6 mg/kg suš.) oproti krmivu 04 (0,6 mg/kg suš.), tedy krmivu s nejnižší naměřenou koncentrací chromu. Obsahy kadmia byly konzistentní u krmiv 03 – 05 (0,14 mg/kg suš.), vyšší obsah byl v krmivu 02 (0,2 mg/kg suš.) a nejvíce kadmia pak obsahovalo krmivo 01 (0,39 mg/kg suš.). Opačný trend oproti kadmiu byl sledován u olova. Konkrétně krmivo 01 obsahovalo nejnižší (0,13 mg/kg suš.) koncentraci olova a nejvyšší krmiva 02 a 03 (0,31 mg/kg suš.). Nejvyšší obsah hliníku byl naměřen v krmivu 02 (104,9 mg/kg suš.) a nejnižší v krmivu 03 (47,6 mg/kg suš.), mezi kterými byl více než dvojnásobný rozdíl. Naopak konzistentní jsou v jednotlivých krmivech obsahy niklu (0,7 – 0,95 mg/kg suš.) a mědi (11,2 – 13,6 mg/kg suš.).

Ze sledovaných prvků jsou pro ryby esenciální Cr, Cu, Fe, Ni, Zn (Sheikhzadeh & Hamidian 2021; Emenike et al. 2022). Železo a zinek jsou v krmivech naměřeny v nejvyšších koncentracích, a to v nižších stovkách mg/kg suš. Konkrétně železo se pohybuje mezi 200 až 300 mg/kg suš. a zinek kolem 160 mg/kg suš. Dále již zmíněná měď těsně nad 10 mg/kg suš. a ještě nižší obsahy jsou v krmivech chromu a niklu.

Tabulka 15: Koncentrace rizikových prvků v krmivech (průměr ± SD).

Analyt	Koncentrace [mg/kg suš.]										
	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb
Vzorek											
Krmivo 01	80,98 ± 5,47	3,60 ± 0,27	49,66 ± 2,50	298,51 ± 15,81	0,93 ± 0,00	11,72 ± 0,56	159,48 ± 7,91	6,14 ± 0,33	0,35 ± 0,02	0,39 ± 0,00	0,13 ± 0,02
Krmivo 02	104,87 ± 0,05	0,72 ± 0,05	57,30 ± 0,71	333,52 ± 3,97	0,88 ± 0,06	12,29 ± 0,14	169,71 ± 2,03	7,13 ± 0,01	0,35 ± 0,05	0,21 ± 0,01	0,31 ± 0,19
Krmivo 03	47,57 ± 1,28	1,22 ± 0,01	40,71 ± 0,39	202,93 ± 2,32	0,88 ± 0,03	12,53 ± 0,15	159,57 ± 2,59	5,19 ± 0,05	0,79 ± 0,03	0,14 ± 0,00	0,31 ± 0,00
Krmivo 04	50,88 ± 1,12	0,63 ± 0,03	39,73 ± 2,04	248,64 ± 18,24	0,88 ± 0,06	12,77 ± 0,34	167,65 ± 4,99	5,24 ± 0,15	0,80 ± 0,02	0,14 ± 0,00	0,16 ± 0,00
Krmivo 05	52,31 ± 1,07	0,84 ± 0,21	45,33 ± 1,27	198,84 ± 15,30	0,78 ± 0,09	13,28 ± 0,29	167,45 ± 3,54	5,49 ± 0,18	0,85 ± 0,00	0,14 ± 0,00	0,22 ± 0,00

5.2 Ryby

V rámci diplomové práce byly měřeny vzorky juvenilních ryb z akvaponického systému a také svalovina, játra a gonády dospělých jedinců. Výsledky měření jsou uvedeny v *Tabulce 16*. Spolu se vzorky bylo rozloženo a měřeno CRM jater ryb, kdy se nejvíce odlišuje od certifikované hodnoty koncentrace hliníku, jehož shoda je pouze 34 %.

Ve většině vzorků byly pod limitem detekce metody zjištěny obsahy molybdenu a kadmia. Obsahy rizikových prvků se mezi druhy u vzorků juvenilů, svaloviny a gonád významně nelišily. Nejvyšší koncentrace železa, zinku a mědi byly naměřeny v gonádách, a to přibližně 175 mg/kg suš. Fe, 108,9 a 83 mg/kg suš. Zn a 6,27 a 11,16 mg/kg suš. Cu.

Mezi tilápiemi a křečíkovci byl rozdíl v obsahu sledovaných prvků u vzorků jater. Výrazně vyšší byl obsah železa v játrech tilápií oproti křečíkovcům, a to 316,48 mg/kg suš. ku 108,67 mg/kg suš., tedy téměř trojnásobek. Dokonce desetkrát tolik mědi, co obsahovala játra křečíkovců (44,05 mg/kg suš.) obsahovala játra tilápií (410,39 mg/kg suš.). Obecně tedy byly pozorovány vyšší koncentrace prvků ve vzorcích jater tilápií. Výjimkou z tohoto pozorování byl zinek a kadmium, jejich vyšší koncentrace byly naměřeny u křečíkovců.

Tabulka 16: Koncentrace rizikových prvků v rybách z akvaponického systému (průměr ± SD).

Analyt	Koncentrace [mg/kg suš.]										
	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb
Vzorek											
Tilápie											
Juvenil	11,40 ± 3,84	0,99 ± 0,96	5,89 ± 1,95	27,01 ± 11,68	0,43 ± 0,56	2,04 ± 0,92	35,88 ± 0,56	1,13 ± 0,48	<0,5	<0,5	1,12 ± 0,16
Svalovina	11,30 ± 4,51	2,86 ± 1,60	4,01 ± 1,32	40,63 ± 7,46	1,44 ± 0,83	2,15 ± 0,36	22,22 ± 2,66	7,86 ± 0,97	<0,5	<0,5	0,75 ± 0,64
Gonády	22,33 ± 3,34	6,15 ± 4,08	15,78 ± 3,66	176,15 ± 19,93	2,83 ± 2,36	11,16 ± 2,60	83,06 ± 9,53	5,40 ± 1,78	<0,5	<0,5	<0,05
Játro	11,41 ± 3,73	5,26 ± 5,34	5,93 ± 1,82	316,48 ± 16,42	2,69 ± 2,73	410,39 ± 3,79	50,69 ± 1,39	0,87 ± 0,07	1,99 ± 0,18	<0,5	1,55 ± 0,50
Křechovka											
Juvenil	9,47 ± 2,12	0,85 ± 0,21	6,73 ± 0,76	68,71 ± 16,10	0,24 ± 0,08	2,85 ± 0,54	41,89 ± 1,68	0,63 ± 0,06	<0,5	<0,5	0,60 ± 0,55
Svalovina	5,08 ± 1,28	1,14 ± 0,51	2,50 ± 2,06	38,93 ± 3,00	0,59 ± 0,19	2,06 ± 0,20	28,09 ± 4,36	3,09 ± 0,40	<0,5	<0,5	0,17 ± 0,22
Gonády	1,29 ± 0,37	<0,5	7,13 ± 0,88	175,16 ± 5,14	0,10 ± 0,06	6,27 ± 0,41	108,87 ± 4,66	<0,5	<0,5	<0,5	<0,05
Játro	4,92 ± 0,78	0,66 ± 1,02	4,71 ± 2,76	108,67 ± 38,59	0,29 ± 0,66	44,05 ± 3,15	70,33 ± 6,89	<0,5	0,67 ± 0,41	1,43 ± 0,33	0,97 ± 0,07
CRM certifikát	37,7 ± 4,2	2,35 ± 0,58	8,91 ± 0,70	1070 ± 80	1,71 ± 0,56	35,0 ± 2,4	105,3 ± 5,4	34,6 ± 2,4	1,41 ± 0,22	14,5 ± 0,6	0,162 ± 0,032
CRM naměřené	12,80 ± 1,58	1,53 ± 0,04	8,41 ± 0,05	990,80 ± 8,72	1,22 ± 0,05	32,01 ± 0,41	97,36 ± 0,57	30,06 ± 0,23	1,16 ± 0,00	13,12 ± 0,51	0,13 ± 0,00
shoda CRM [%]	34	65	94	93	71	91	92	87	82	90	80

5.3 Hlávkový salát (*Lactuca sativa* L.)

Obsahy rizikových prvků naměřených v hlávkovém salátu z akvaponického systému jsou uvedeny v *Tabulce 17*. Vzorky byly měřeny zároveň s CRM tomatových listů, jehož výsledky si téměř odpovídají, největší rozdíl v naměřené koncentraci oproti certifikované hodnotě byl u niklu, kde byla shoda přibližně 77 %.

Obsahy prvků se objevovaly v podobných poměrech jako v krmivech ryb. Nejnížší zastoupení v salátech měli z rizikových prvků molybden, kadmium, nikl a arsen, které se pohybovaly v koncentracích pod limitem detekce metody nebo ho lehce převyšovaly (<0,5 mg/kg suš.), následovalo olovo (0,45 – 1,48 mg/kg suš.) a chrom (<0,5 – 1,03 mg/kg suš.). Koncentrace hliníku se pohybovaly od necelých 19 mg/kg suš. po průměrně 36 mg/kg suš. Ve vzorcích si odpovídali obsahy železa a zinku, které dosahovaly nejvyšších koncentrací z analyzovaných rizikových prvků, a to až 130 mg/kg suš. K nim se nejvíce přiblížila koncentrace manganu, která se ve vzorcích pohybovala od 61 do 95 mg/kg suš.

Tabulka 17: Koncentrace rizikových prvků v hlávkovém salátu z akvaponického systému (průměr ± SD). NA – nebylo analyzováno

Koncentrace [mg/kg suš.]											
Analyt	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb
Vzorek											
T1	28,37 ± 6,89	1,03 ± 0,00	61,41 ± 1,81	77,40 ± 14,38	<0,50	3,00 ± 0,13	91,41 ± 2,45	<0,50	<0,50	<0,50	0,45 ± 0,00
T2	35,71 ± 5,88	0,71 ± 0,17	94,93 ± 4,61	104,08 ± 41,71	<0,50	2,98 ± 0,08	129,11 ± 4,29	0,53 ± 0,00	<0,50	<0,50	1,48 ± 0,00
T3	28,89 ± 2,85	0,61 ± 0,00	57,06 ± 2,53	73,11 ± 18,55	1,00 ± 0,00	2,38 ± 0,13	72,76 ± 0,98	0,62 ± 0,00	<0,50	<0,50	0,38 ± 0,17
T4	18,78 ± 7,28	<0,50	58,44 ± 3,78	81,91 ± 33,83	<0,50	1,78 ± 0,13	59,47 ± 2,93	<0,50	<0,50	<0,50	0,65 ± 0,00
CRM certifikát	598,4 ± 7,1	1,988 ± 0,034	246,3 ± 7,1	367,5 ± 4,3	1,582 ± 0,041	4,70 ± 0,14	30,94 ± 0,55	0,1126 ± 0,0024	NA	1,517 ± 0,027	NA
CRM naměřené	539,66 ± 3,59	2,10 ± 0,00	250,45 ± 0,77	380,07 ± 4,49	1,21 ± 0,06	5,24 ± 0,03	34,40 ± 0,71	<0,50	<0,50	1,47 ± 0,04	0,49 ± 0,01
shoda CRM [%]	90	106	102	103	77	112	111	-	NA	97	NA

5.4 Rybí kal a kalová voda

Jak je zmíněno výše, vzorek kalové vody A byl odebrán ze systému před průchodem filtračním zařízením a vzorek B po průchodu filtrem přímo z filtrační jednotky. Přechištění vody filtrací je zřejmé z naměřených koncentrací, které jsou uvedeny v *Tabulce 18*. Většina analytů se po filtraci dostala do koncentrací pod limitem detekce metody. Obsah téměř všech rizikových prvků v systému klesl, například koncentrace manganu klesla přibližně na 20 % původní hodnoty. Jedinou výjimkou je kadmium, u kterého došlo k výraznému navýšení, a to 20násobně.

Tabulka 18: Koncentrace rizikových prvků v kalové vodě z akvaponického systému (průměr $\pm$ SD).

Vzorek Analyt	Koncentrace [$\mu\text{g/l}$]	
	Kalová voda A	Kalová voda B
Al	11,35 $\pm$ 0,14	<5,00
Cr	0,30 $\pm$ 0,00	<0,2
Mn	3 418,28 $\pm$ 27,02	786,61 $\pm$ 7,39
Fe	207,20 $\pm$ 4,00	<5,00
Ni	38,20 $\pm$ 0,01	<5,00
Cu	71,17 $\pm$ 4,51	<5,00
Zn	581,87 $\pm$ 15,72	100,61 $\pm$ 12,40
As	26,39 $\pm$ 0,24	<5,00
Mo	2,93 $\pm$ 0,12	<2,00
Cd	0,10 $\pm$ 0,01	2,01 $\pm$ 0,54
Pb	0,55 $\pm$ 0,00	<0,05

Výsledky koncentrací rizikových prvků v rybích kalech jsou uvedeny v *Tabulce 19*.

Obsah rizikových prvků v kalu odebraném z filtrační jednotky oproti kalu získaném přímo z chovné nádrže byl vyšší téměř u všech sledovaných analytů. Nejvyšší nárůst byl naměřen pro koncentrace železa, a to z 1,6 g/kg suš. na 3,1 g/kg suš. a hliníku z 0,56 g/kg suš. na 1,9 g/kg suš. U ostatních prvků byl rozdíl menší a koncentrace niklu, molybdenu a kadmia naopak lehce klesla.

Tabulka 19: Koncentrace rizikových prvků v rybím kalu z akvaponického systému (průměr ± SD). NA – nebylo analyzováno

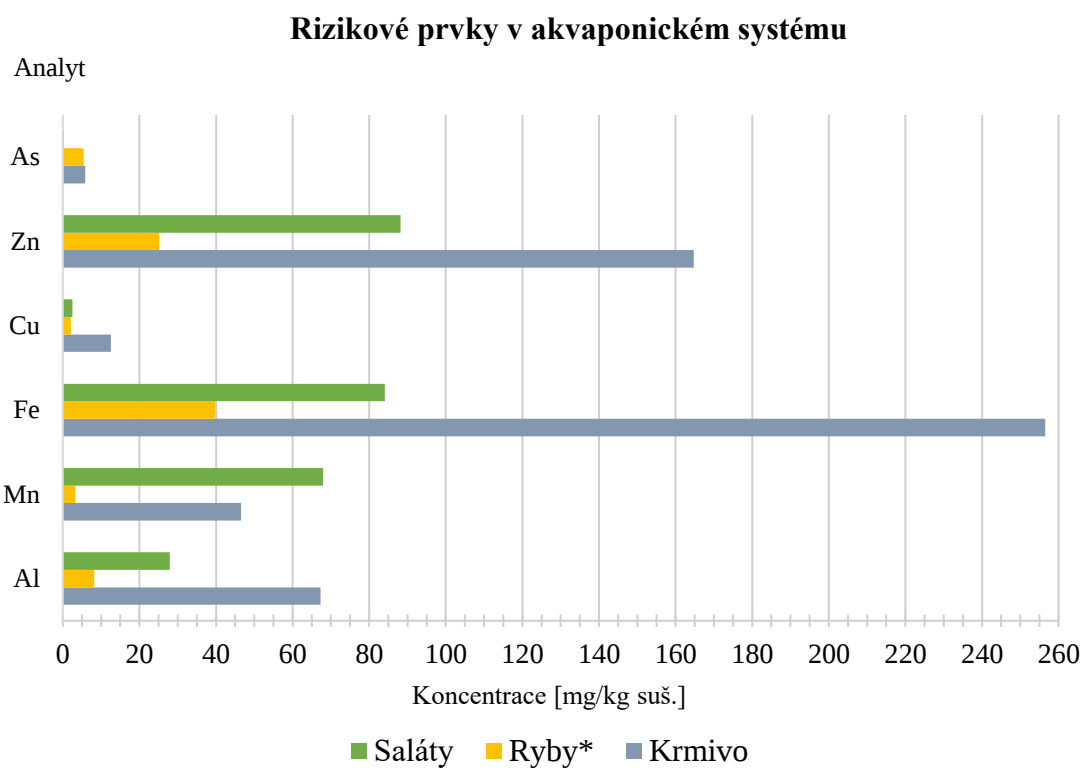
Vzorek Analyt	Koncentrace [mg/kg suš.]				shoda CRM [%]
	Rybí kal A	Rybí kal B	CRM certifikát	CRM naměřené	
Al	560,00 ± 8,11	1 894,35 ± 40,26	NA	13164,35	-
Cr	3,14 ± 0,29	8,67 ± 0,24	66,80	45,64	68
Mn	2 007,86 ± 42,61	2 613,93 ± 3,05	NA	983,12	-
Fe	1 597,16 ± 123,44	3 123,26 ± 196,90	NA	13286,76	NA
Ni	7,21 ± 0,19	6,56 ± 0,36	56,50	54,72	97
Cu	96,19 ± 4,02	121,35 ± 0,55	205,00	192,65	94
Zn	1 949,61 ± 30,20	2 182,39 ± 0,36	675,00	682,73	101
As	1,62 ± 0,18	2,52 ± 0,08	10,30	8,73	85
Mo	2,03 ± 0,07	1,94 ± 0,02	6,25	4,88	78
Cd	2,03 ± 0,10	1,79 ± 0,01	6,76	6,71	99
Pb	2,12 ± 0,05	4,51 ± 0,06	60,40	10,21	17

5.5 Shrnutí

Nejvyšší koncentrace rizikových prvků byly naměřeny v rybím kalu. Nicméně i v této matrici byly, stejně jako u ostatních sledovaných, naměřeny nejnižší koncentrace pro chrom, nikl, molybden, kadmium a olovo, jejichž obsahy se (s výjimkou kalu) výrazně nelišily.

Po kalech následovala v obsahu rizikových prvků krmiva. Jediné, co se tomuto tvrzení vymyká je olovo a mangan, jejichž koncentrace je lehce vyšší v salátech. Průměrné koncentrace vybraných rizikových prvků (Al, Mn, Fe, Cu, Zn a As), které se vyskytovaly průměrně v koncentracích vyšších než 1 mg/kg suš., v krmivech, svalovině dospělých ryb a salátech jsou uvedeny v *Graf 1*. Koncentrace v kalech jsou téměř u všech těchto rizikových prvků několikanásobně vyšší, a proto byly z tohoto znázornění vyloučeny.

Z *Grafu 1* lze pozorovat klesající obsah rizikových prvků v řadě rybí kal >> krmiva > saláty > rybí svalovina.



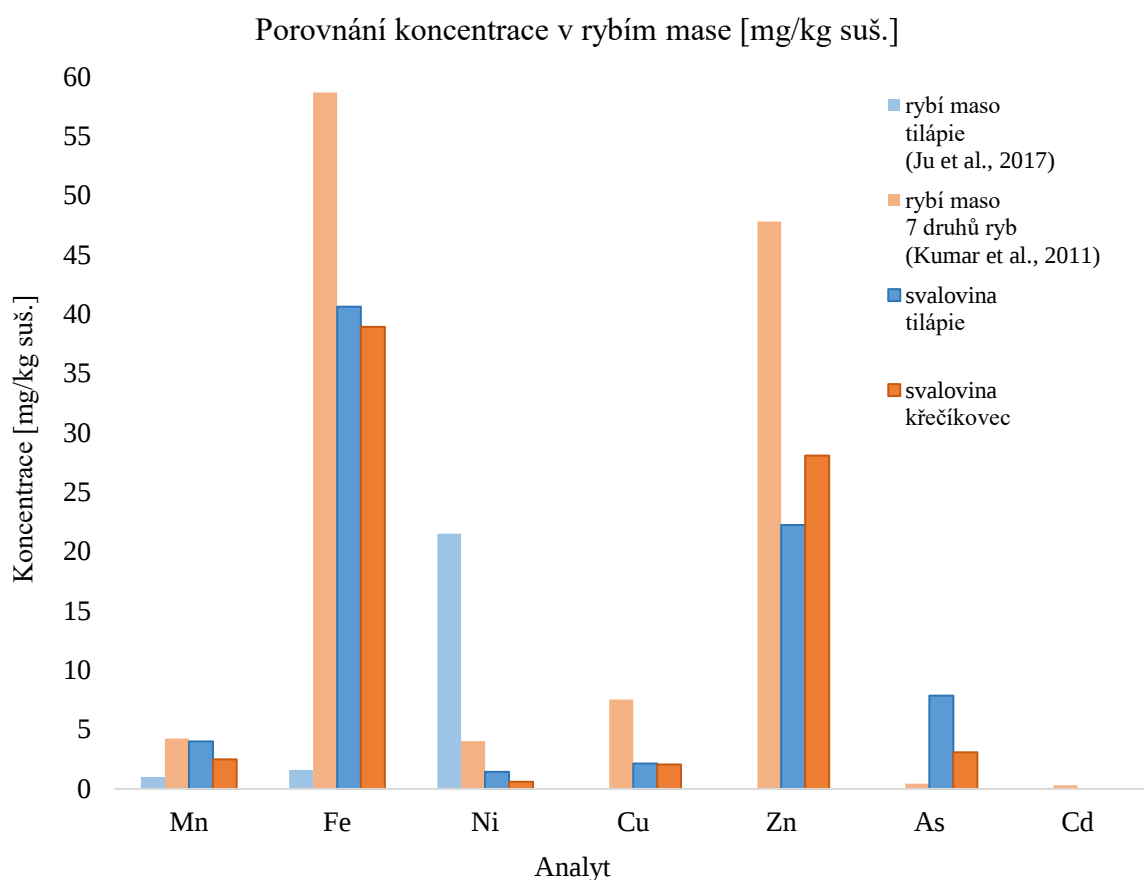
Graf 1: Koncentrace rizikových prvků ve vybraných matricích z akvaponického systému.
 *Ryby: svalovina dospělých jedinců křečíkovců a tilápií

6 Diskuse

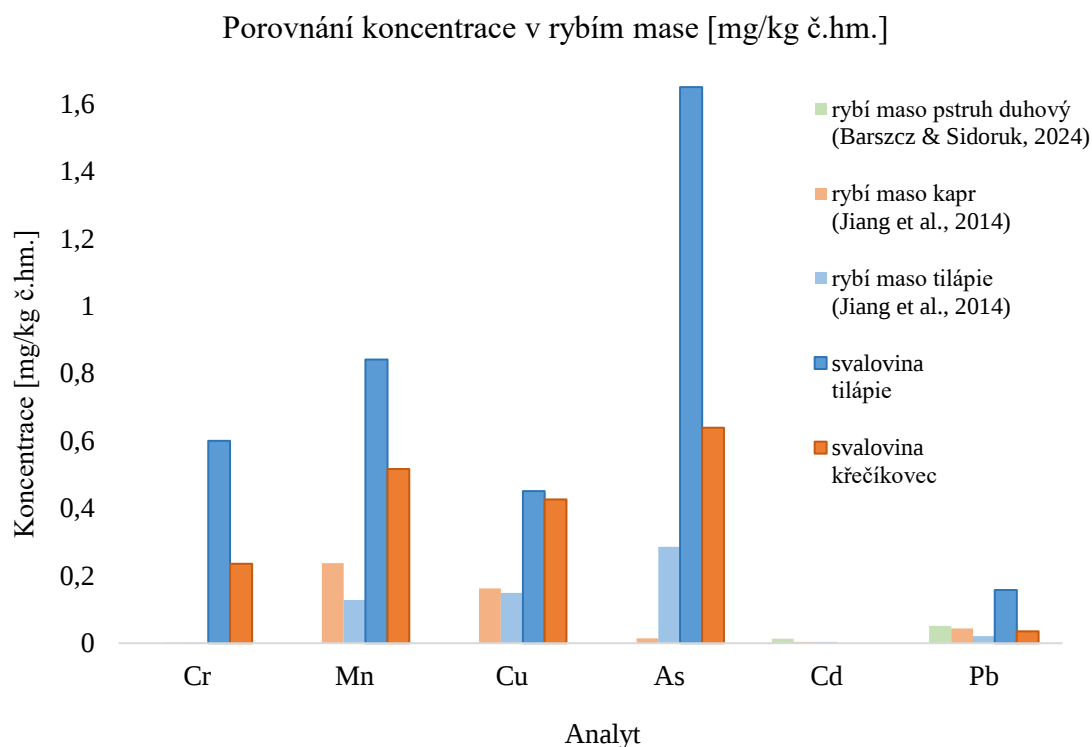
Koncentrace rizikových prvků v krmivech, která jsou považována za jeden z nejpravděpodobnějších zdrojů kontaminace akvaponického systému, se pohybovaly pod průměrem naměřeným v krmivech lososa obecného chovaného v akvakulturním systému v Chile (Madariaga & Marín 2017). Odpovídali naopak koncentracím analytů v krmivech tlamouna nilského, neboli tilápie nilské, ze studií publikovaných Lenz et al. (2021) a Shaw et al. (2022). Tento výsledek odpovídá tomu, že jednou z chovaných ryb je právě tilápie a krmiva jsou si tedy složením podobná. Ze shrnutí výsledků výše vyplývá, že obsahují druhé nejvyšší koncentrace rizikových prvků ze sledovaných matric ve zkoumaném akvaponickém systému. Tento výsledek potvrzuje dříve zveřejněné názory o vstupu rizikových prvků do systému právě s krmivy. Nicméně jde z části zároveň o esenciální prvky, které ryby a následně i rostliny potřebují ke správnému vývoji.

Jedná se o krmiva prodávaná na našem území, musí tedy splňovat podmínky nastavené Evropskou unií a nelze jejich složení výrazně měnit.

Koncentrace rizikových prvků naměřených v rybí svalovině a její porovnání s předchozími studiemi je znázorněna v *Graf 2* (metody s publikovanými výsledky v jednotkách mg/kg suš.) a *Graf 3* (jednotky mg/kg č.hm.), pro potřeby porovnání koncentrací v čerstvé hmotě ryb, byly výsledky z *Tabulky 16* přepočítány na mg/kg č.hm. podle sušiny uvedené výše (tilápie 21,0 % a křečíkovec 20,7 %).



Graf 2: Porovnání naměřené koncentrace v rybím maso (mg/kg suš.).



Graf 3: Porovnání naměřené koncentrace v rybím mase (mg/kg).

Ve studiích, kde byla sledována koncentrace v rybím mase pstruha duhového, kapra a tilápie a výsledky publikovány v mg/kg č.hm., naměřili mnohem nižší koncentrace, než byly zjištěny ve vzorcích z akvaponického systému sledovaném v této práci. Dříve publikovaným hodnotám se přiblížili spíše výsledky obsahů křečíkovce než tilápie. Kumar et al. (2017) zjistili nejvyšší koncentrace v rybím mase pro Zn a Fe, což souhlasí s výsledky této práce. Stejně tak jsou s Kumar et al. (2017) podobné koncentrace Ni, ovšem ty se vychylují v mase tilápií Ju et al. (2017).

Vzorky splňovaly legislativní limit pro obsah Pb v rybím mase prodávaném na území EU. Přestože Cd bylo pod limitem detekce, lze s ohledem na výsledky ostatních studií předpokládat, že by také splňovalo nastavené limity. Jak bylo zmíněno výše, bylo by vhodné zajistit nižší limity detekce Cd. Limity stanovené WHO jsou oproti Nařízení EU vyšší, a tedy také v rámci této legislativy bychom mohli označit ryby chované ve sledovaném akvaponickém systému za vhodné ke konzumaci.

Koncentrace rizikových prvků v listech salátu se liší oproti studiím publikovaným Delaide et al. (2016) i Deswati et al. (2019), kde ovšem místo salátu testovali brukev čínskou. Obsahy Mn, Fe, Cu a Mo byly výrazně nižší ve vzorcích z akvaponického systému studovaném v této diplomové práci než v dříve publikovaných. Například koncentrace Fe byla pro listy salátu nižší desetkrát a v porovnání s brukví čínskou dokonce stokrát. Koncentrace Mn byla v této práci u salátu dvacetkrát nižší. Naopak koncentrace B a Zn při porovnání obsahu v salátech byla vyšší, zato oproti brukvi výrazně nižší. Rozdíly mohou být způsobeny typem krmiva přidávaným do systému, účinností filtrace nebo dobou sběru vzorků. V rámci dalšího studia akvaponických systému by bylo vhodné se zaměřit právě na produkováné plodiny a obsahy rizikových prvků v nich. Je zřejmé, že obsahy kontaminantů se liší nejen mezi druhy

pěstovaných rostlin, ale i v rámci stejného druhu a je tedy nutné do budoucna vyhodnotit, které parametry akvaponického systému mají na složení největší vliv a zda je možné je ovlivnit.

Legislativa pro obsahy rizikových prvků v zelenině zmiňuje maximální koncentraci olova a kadmia, konkrétně v jedlé části zeleniny, a to v syrovém stavu a po jejím očištění. Listová zelenina, kam se řadí hlávkový salát, má nastaven limit Evropskou unií pro Pb 0,3 mg/kg č. hm. a Cd 0,1 mg/kg č. hm. Ve vzorcích salátů se pohybovaly koncentrace olova od 0,029 mg/kg č. hm. (T3) po 0,1 mg/kg č. hm. (T2) a kadmium pod limitem detekce metody. Saláty vypěstované v tomto akvaponickém systému by tedy měly splňovat podmínky limitních koncentrací rizikových prvků na úrovni Evropské unie, nicméně by bylo potřeba zajistit nižší limit detekce kadmia v této matici. Vzorky byly před analýzou ředěny desetkrát, čímž došlo ke zvýšení limitů detekce. Při případném dalším výzkumu a měření by proto bylo vhodné tuto matici analyzovat s nižším ředěním.

Koncentrace kovů a polokovů v kalech z akvakultury a RAS, které byly naměřeny a publikovány v dřívějších studiích (*Tabulka 5*) se z větší části liší od koncentrací naměřených v rybím kalu z akvaponie v této práci. Ve srovnání s výsledky Madariaga & Marín (2017) a Sultana et al. (2022), které zkoumali obsahy kovů v rybích kalech, se shodují obsahy naměřené v této práci pro As a Cd. Oba autoři naměřili v kalech dvakrát nižší koncentrace Zn, naopak obsah Mn a Cr byl ve studii Sultana et al. (2022) vyšší. Složení kalu by mohlo být ovlivněno druhem chované ryby a využívaným typem krmiva, zejména jeho stravitelností.

Kaly vzniklé v akvaponickém systému sice obsahují nejvyšší koncentrace rizikových prvků ze sledovaných matic, nicméně pouze zinek s nejvyšší naměřenou koncentrací 2 182 mg/kg suš. se blíží k legislativním limitním koncentracím 2 500 mg/kg suš. pro možnost uložení na půdu. Lze proto předpokládat, že by bylo možné i tento produkt akvaponického systému dále využít, a to na hnojení při klasickém způsobu zemědělství. Také z dříve publikovaných studií vyplývá, že koncentrace těžkých kovů v rybích kalech se pohybují pod limitními hodnotami a neměli by tedy v případě využití pro zemědělství kontaminovat půdy těžkými kovy (Rafiee a Saad 2005; Madariaga & Marín 2017; Lenz et al., 2021; Sultana et al., 2022).

7 Závěr

Podle všech výsledků zpracovaných v této diplomové práci je závěrem, že prostup rizikových prvků systémem odpovídá dříve publikovaným studiím zaměřených jak na akvaponické, tak i RAS systémy. Přestože obsahy si přesně neodpovídají, jelikož v některých případech byly naměřeny vyšší koncentrace v dříve publikovaných studiích a někdy naopak. Zdrojem vyšších obsahů rizikových prvků mohou být využívaná krmiva. Ta jsou zdrojem vysokých koncentrací těchto prvků v rybích kalech, kam jsou ukládány zejména díky zbytkům potravy a výkalům ryb. Z výsledků je dále patrné, že vyšší koncentrace v krmivech neznamenaají výraznější koncentrace v rybách. Lehce zvýšené obsahy rizikových prvků mohou být naměřeny ve vodě před filtračním zařízením, ale pokud je filtrace nastavena správně, tak po průchodu filtry klesá koncentrace těchto prvků v systému, jelikož zůstávají ve filtračním sedimentu. Klesá tak obsah rizikových prvků ve vodě při přesunu od chovné nádrže k hydroponické jednotce. V salátech vyprodukovaných studovaným akvaponickým systémem nebyly zjištěny koncentrace znemožňující jejich konzumaci a bylo by proto možné tento systém využít pro jejich pěstování. Taktéž rybí maso, získané ze sledované akvaponie, splňovalo požadavky na maximální obsahy sledovaných prvků legislativou a bylo by tedy možné z toho systému ryby získávat pro potravu.

V dalších studiích by bylo vhodné se zaměřit na složení vznikajících kalů a jejich možnosti využití na zemědělské půdě. Dále také na proměnné faktory, které mohou ovlivňovat příjem rizikových prvků plodinami pěstovanými v rámci akvaponického systému a případně přijímány chovanou rybí populací.

8 Literatura

Afshan S, Ali S, Ameen US, Farid M, Bharwana SA, Hannan F, Ahmad R. 2014. Effect of Different Heavy Metal Pollution on Fish. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences* **2**: 74-79.

Agbugui M. 2022. Heavy Metals in Fish: Bioaccumulation and Health. *British Journal of Earth Sciences Research* **10**: 47–66. DOI: 10.37745/bjesr.2013.

Asati A, Pichhode M, Nikhil K. 2016. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview. 2016. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management* **5**: 56-66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204

Shahbaa K., AL-Tae SK, Al-Mallah KH, Ismail H. 2020. Review On Some Heavy Metals Toxicity On Freshwater Fishes. *Journal of Applied Veterinary Sciences* **5**: 78–86. DOI: 10.21608/javs.2020.100157.

Aldoghachi J, Rahman M, Yusoff I, Sofian-Azirun M. 2016. Acute toxicity and bioaccumulation of heavy metals in red tilapia. *The Journal of Animal & Plant Sciences* **26**: 507–513.

AL-Hafedh YS, Alam A. 2007. Design and Performance of an Indigenous Water Recirculating Aquaculture System for Intensive Production of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), in Saudi Arabia. *International Journal of Recirculating Aquaculture* **8**: 1-20. DOI: 10.21061/ijra.v8i1.1415..

ALLER AQUA. 2025. Aller Aqua High value aquafeed. Aller Aqua. Available from <https://aller-aqua-com.netlify.app> (accessed January 2025).

ALLTECH COPPENSE. 2025. Alltech Coppens. Alltech Coppens. Available from <https://www.alltechcoppens.com/en/> (accessed February 2025).

Aslanidou M, Elvanidi A, Mourantian A, Levizou E, Mente E, Katsoulas N. 2024. Evaluation of productivity and efficiency of a large-scale coupled or decoupled aquaponic system. *Scientia Horticulturae* **337** (e113552). DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113552.

Aslanidou M, Elvanidi A, Mourantian A, Levizou E, Mente E, Katsoulas N. 2023. Nutrients Use Efficiency in Coupled and Decoupled Aquaponic Systems. *Horticulturae* **9** (e1077). DOI: 10.3390/horticulturae9101077.

Baganz GFM, Junge R, Portella MC, Goddek S, Keesman KJ, Baganz D, Staaks G, Shaw Ch, Lohrberg F, Kloas W. 2022. The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture* **14**: 252–264. DOI: 10.1111/raq.12596.

Bandara T. 2018. Alternative feed ingredients in aquaculture: Opportunities and challenges. *Journal of Entomology and Zoology Studies* **6**: 3087–3094.

Barszcz AA, Sidoruk M. 2024. Impacts of water management in aquaculture on heavy metal accumulation in rainbow trout muscles and associated health risks from consumption. *Food Control* **164** (e110617). DOI: 10.1016/j.foodcont.2024.110617.

Castro-González MI, Méndez-Armenta M. 2008. Heavy metals: Implications associated to fish consumption. *Environmental Toxicology and Pharmacology* **26**: 263–271. DOI: 10.1016/j.etap.2008.06.001.

Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Jijakli M. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics. *Water* **8** (e467) DOI:10.3390/w8100467.

Deswati HS, Muchta AK, Abe EF, Yusuf Y, Pardi H. 2019. COPPER, IRON AND ZINC CONTENTS IN WATER, PAKCOY (*Brassica rapa* L.) AND TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) IN THE PRESENCE OF AQUAPONICS. *Rasayan Journal of Chemistry* **12**: 40–49. DOI: 10.31788/RJC.2019.1215062.

Duarte AJ, Malheiro B, Ribeiro CC, Silva MF, Ferreira P, Guedes P. 2015. Developing an aquaponics system to learn sustainability and social compromise skills. *Journal of Technology and Science Education* **5**: 235–253. DOI: 10.3926/jotse.205.

Emenike ECh, Iwuzor KO, Anidiobi SU. 2022. Heavy Metal Pollution in Aquaculture: Sources, Impacts and Mitigation Techniques. *Biological Trace Element Research* **200**: 4476–4492. DOI: 10.1007/s12011-021-03037-x.

Espinal CA, Matulić D. 2019. Recirculating Aquaculture Technologies. Pages 35-76 in Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM editors. *Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Open, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-15943-6.

Evropská komise. 2023. Nařízení Komise (EU) 2023/915 ze dne 25. dubna 2023 o maximálních limitech některých kontaminujících látek v potravinách a o zrušení nařízení (ES) č. 1881/2006, ve znění pozdějších předpisů. Brusel. 2023/915.

Evropský parlament, Rada Evropské unie. 2005. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 183/2005 ze dne 12. ledna 2005, kterým se stanoví požadavky na hygienu krmiv, ve znění pozdějších předpisů. Brusel. 183/2005.

Evropský parlament, Rada Evropské unie. 2009. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 767/2009 ze dne 13. července 2009 o uvádění na trh a používání krmiv, o změně nařízení (ES) č. 1831/2003 a o zrušení směrnice Rady 79/373/EHS, směrnice Komise 80/511/EHS, směrnic Rady 82/471/EHS, 83/228/EHS, 93/74/EHS, 93/113/ES a 96/25/ES a rozhodnutí Komise 2004/217/ES, ve znění pozdějších předpisů. Brusel. 767/2009.

Evropský parlament, Rada Evropské unie. 2002. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/32/ES ze dne 7. května 2002 o nežádoucích látkách v krmivech. Brusel. 32002L0032.

Feldlitz M, Juanicó M, Karplus I, Milstein A. 2008. Towards a safe standard for heavy metals in reclaimed water used for fish aquaculture. *Aquaculture* **284**: 115–126. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2008.07.036.

Fiala J. 2011. Akvakultura – součást ekozemědělství. *Zemědělec* **47**: 27–27.

Frankic A, Hershner C. 2003. Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture. *Aquaculture International* **11**: 517–530. DOI:10.1023/B:AQUI.0000013264.38692.91.

Goddek S, Joyce A, Wuertz S, Körner O, Bläser I, Reuter M, Keesman KJ. 2019. Decoupled Aquaponics Systems. Pages 201-229 in Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM editors. *Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Open, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-15943-6.

Gupta A, Rai DK, Pandey RS, Sharma B. 2009. Analysis of some heavy metals in the riverine water, sediments and fish from river Ganges at Allahabad. *Environmental Monitoring and Assessment* **157**: 449–458. DOI: 10.1007/s10661-008-0547-4.

Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC a Khanal SK. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology* **188**: 92–98. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.013.

Channa AA, Munir K, Hansen M, Tariq MF. 2024. Optimisation of Small-Scale Aquaponics Systems Using Artificial Intelligence and the IoT: Current Status, Challenges, and Opportunities. *Encyclopedia* **4**: 313–336. DOI: 10.3390/encyclopedia4010023.

Jiang D, Hu Z, Liu F, Zhang R, Duo B, Fu J, Cui Y a Li M. 2014. Heavy metals levels in fish from aquaculture farms and risk assessment in Lhasa, Tibetan Autonomous Region of China. *Ecotoxicology* **23**: 577–583. DOI: 10.1007/s10646-014-1229-3.

Ju YR, Chen ChW, Chen ChF, Chuang XY a Dong ChD, 2017. Assessment of heavy metals in aquaculture fishes collected from southwest coast of Taiwan and human consumption risk. *International Biodeterioration & Biodegradation* **124**: 314–325. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.04.003.

Kasozzi N, Abraham B, Kaiser H, Wilhelmi B. 2021. The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. *Annals of Microbiology* **71**: 1-13. DOI: 10.1186/s13213-020-01613-5.

Kiran, Bharti R, Sharma R. 2022. Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today: Proceedings* **51**: 880–885. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.278.

Kloas W, Gross R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A, Rennert B. 2015. A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions* **7**: 179–192. DOI: 10.3354/aei00146.

Kong W, Huang S, Yang Z, Shi F, Feng Y, Khatoon Z. 2020. Fish Feed Quality Is a Key Factor in Impacting Aquaculture Water Environment: Evidence from Incubator Experiments. *Scientific Reports* **10** (e187). DOI: 10.1038/s41598-019-57063-w.

Kumar B, Mukherjee DP, Kumar S, MisHRA M, Prakash D, Singh SK, Sharma CS. 2011. Bioaccumulation of heavy metals in muscle tissue of fishes from selected aquaculture ponds in east Kolkata wetlands. *Annals of Biological Research* **2**: 125-134.

Kumar M, Singh S, Jain A, Yadav S, Dubey A, Trivedi SP. 2024. A review on heavy metal-induced toxicity in fishes: Bioaccumulation, antioxidant defense system, histopathological manifestations, and transcriptional profiling of genes. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **83** (e127377). DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127377.

Kumari B, Kumar V, Sinha AK, Ahsan J, Ghosh AK, Wang H, Deboeck G. 2017. Toxicology of arsenic in fish and aquatic systems. *Environmental Chemistry Letters* **15**: 43–64. DOI: 10.1007/s10311-016-0588-9.

Lacerda LD, Soares TM, Costa GB, Godoy MDP. 2011. Mercury Emission Factors from Intensive Shrimp Aquaculture and Their Relative Importance to the Jaguaribe River Estuary, NE Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **87**: 657–661. DOI: 10.1007/s00128-011-0399-4.

Lazard J, Baruthio A, Mathé S, Rey-Valette H, Chia E, Clément O, Aubin J, Morissens P, Mikolasek O, Legendre M, Levang P, Blancheton J-P a René F. 2010. Aquaculture system diversity and sustainable development: fish farms and their representation. *Aquatic Living Resources* **23**: 187–198. DOI: 10.1051/alr/2010018.

Lennard W, Goddek S. 2019. Aquaponics: The Basics. Pages 113-143 in Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM editors. Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future. Springer Open, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-15943-6

Lenz GL, Loss A, Lourenzi CR, de Alcantara Lopes DL, De Matos Siebeneichler L, Brunetto G. 2021. Lettuce growth in aquaponic system and in soil fertilized with fish sludge. *Aquaculture Research* **52**: 5008–5021. DOI: 10.1111/are.15372.

León-Cañedo JA, Alarcón-Silvas SG, Fierro-Sañudo JF, Mariscal-Lagarda MM, Díaz-Valdés T, Páez-Osuna F. 2017. Assessment of environmental loads of Cu and Zn from intensive inland shrimp aquaculture. *Environmental Monitoring and Assessment* **189** (e5783z) DOI: 10.1007/s10661-017-5783-z.

León-Cañedo JA, Alarcón-Silvas SG, Fierro-Sañudo JF, Rodríguez-Montes de Oca GA, Fregoso-López MG, Páez-Osuna F. 2023. Mercury in basil (*Ocimum basilicum*) grown simultaneously with shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by aquaponics. *Journal of Food Composition and Analysis* **115** (e104929). DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104929.

Low KH, Zain S, Abas R. 2011. Evaluation of Metal Concentrations in Red Tilapia (*Oreochromis spp*) from Three Sampling Sites in Jelebu, Malaysia Using Principal Component Analysis. *Food Analytical Methods* **4**: 276–285. DOI: 10.1007/s12161-010-9166-0.

Madariaga ST, Marín SL. 2017. Sanitary and environmental conditions of aquaculture sludge. *Aquaculture Research* **48**: 1744–1750. DOI: 10.1111/are.13011.

Martins CIM, Eding EH, Verreth JAJ. 2011. The effect of recirculating aquaculture systems on the concentrations of heavy metals in culture water and tissues of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Food Chemistry* **126**: 1001–1005. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.11.108.

Miličić V, Thorarindottir R, Santos M, Hančič M. 2017. Commercial Aquaponics Approaching the European Market: To Consumers' Perceptions of Aquaponics Products in Europe. *Water* **9**: 1-22. DOI: 10.3390/w9020080

Ministerstvo životního prostředí. 2021. Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. Česká republika. 273/2021.

Mohsen M, Lin Ch, Tu Ch, Zhang Ch, Xu S, Yang H. 2022. Association of heavy metals with plastics used in aquaculture. *Marine Pollution Bulletin* **174** (e113312) DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.113312.

Monsees H, Kloas H, Wuertz S. 2017. Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLOS ONE* **12** (e0183056) DOI: 10.1371/journal.pone.0183056.

Morcillo P, Esteban MA, Cuesta A. 2017. Mercury and its toxic effects on fish. *AIMS Environmental Science* **4**: 386–402. DOI: 10.3934/environsci.2017.3.386.

Naegel LCA. 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture* **10**: 17–24.

Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Jijakli MH, Kotzen B. 2018. Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International* **26**: 813–842. DOI: 10.1007/s10499-018-0249-z.

Palm HW, Knaus U, Kotzen B. 2024. Aquaponics nomenclature matters: It is about principles and technologies and not as much about coupling. *Reviews in Aquaculture* **16**: 473–490. DOI: 10.1111/raq.12847.

Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Strauch SM, Kotzen B. 2019. Coupled Aquaponics Systems. Pages 163-199 in Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM editors. *Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Open, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-15943-6

Pinho SM, David LH, Garcia F, Keesman KJ, Portella MC, Goddek S. 2021. South American fish species suitable for aquaponics: a review. *Aquaculture International* **29**: 1427–1449. DOI: 10.1007/s10499-021-00674-w.

Rafiee G, Saad ChR. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis sp.*) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* **244**: 109–118. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2004.10.029.

Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM. 2006. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. SRAC Publication **454**. Available from https://www.researchgate.net/publication/284496499_Recirculating_aquaculture_tank_production_systems_Aquaponics-Integrating_fish_and_plant_culture.

Rotter P, Šrámek V, Vácha R, Borůvka L, Fadrhonsová V, Sánka M, Drábek O, Vortelová L. 2013. Rizikové prvky v lesních půdách: review. *Zprávy lesnického výzkumu*. **58**: 17–27.

Sánka M, Materna J. 2004. Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR. *Planeta* **12**: 1-84.

Shahjahan Md, Taslima K, Rahman MS, Al-Emran Md, Alam SI, Faggio C. 2022. Effects of heavy metals on fish physiology – A review. *Chemosphere* **300** (e134519) DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134519.

Shanker A, Cervantes C, Lozatevera H, Avudainayagam S. 2005. Chromium toxicity in plants. *Environment International* **31**: 739–753. DOI: 10.1016/j.envint.2005.02.003.

Shaw Ch, Knopf K, Kloas W. 2022. Fish Feeds in Aquaponics and Beyond: A Novel Concept to Evaluate Protein Sources in Diets for Circular Multitrophic Food Production Systems. *Sustainability* **14** (e4064) DOI: 10.3390/su14074064.

Sheikhzadeh H, Hamidian AH. 2021. Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: a review. *Environmental Geochemistry and Health* **43**: 3749–3869. DOI: 10.1007/s10653-021-00883-5.

Shrouf A. 2017. Hydroponics, Aeroponic and Aquaponic as Compared with Conventional Farming. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences* **27**: 247–255.

Skretting a natureco company. 2025. Krmiva a služby pro akvakulturu. Skretting. Available from <https://www.skretting.com/cs-cz/feed-and-services-for-aquaculture/> (accessed January 2025).

Sonone S, Sankhla M, Jadhav S, Kumar R. 2020. Water Contamination by Heavy Metals and their Toxic Effect on Aquaculture and Human Health through Food Chain. *Letters in Applied NanoBioScience* **10**: 2148–2166. DOI: 10.33263/LIANBS102.21482166

Sultana S, Hossain MB, R. Choudhury TR, Yu J, Rana S, Noman MA, Hosen MM, Paray BA, Arai T. 2022. Ecological and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Cultured Shrimp and Aquaculture Sludge. *Toxics* **10** (e175) DOI: 10.3390/toxics10040175.

Sumalan RL, Nescu V, Berbecea A, Sumalan RM, Crisan M, Negrea P, Ciulca S. 2023. The Impact of Heavy Metal Accumulation on Some Physiological Parameters in *Silphium perfoliatum* L. Plants Grown in Hydroponic Systems. *Plants* **12** (e1718) DOI: 10.3390/plants12081718.

Taha MF, Elmasry G, Gouda M, Zhou L, Liang N, Abdalla A, Rousseau D, Qiu Z. 2022. Recent Advances of Smart Systems and Internet of Things (IoT) for Aquaponics Automation: A Comprehensive Overview. *Chemosensors* **10** (e303) DOI: 10.3390/chemosensors10080303.

THE AQUAPONIC SOURCE. 2020. Fish Food Archives. The Aquaponic Source. Available from <https://www.theaquaponicsource.com/product-category/fish-care/fish-food/> (accessed January 2025).

Van Acker T, Theiner S, Bolea-Fernandez E, Vanhaecke F, Koellensperger G. 2023. Inductively coupled plasma mass spectrometry. *Nature Reviews Methods Primers* **3** (e52) DOI: 10.1038/s43586-023-00235-w.

Van Bussel ChGJ, Schroeder JP, Mahlmann L, Schulz C. 2014. Aquatic accumulation of dietary metals (Fe, Zn, Cu, Co, Mn) in recirculating aquaculture systems (RAS) changes body composition but not performance and health of juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquacultural Engineering* **61**: 35–42. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2014.05.003.

Vatansever R, Ozyigit II, Filiz E. 2017. Essential and Beneficial Trace Elements in Plants, and Their Transport in Roots: a Review. *Applied Biochemistry and Biotechnology* **181**: 464–482. DOI: 10.1007/s12010-016-2224-3.

Velazquez-Gonzalez RS, Garcia-Garcia AL, Ventura-Zapata E, Barceinas-Sanchez JDO, Sosa-Savedra JC. 2022. A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium – and Small-Scale Operations. *Agriculture* **12** (e646) DOI: 10.3390/agriculture12050646.

Verma AK, Chandrakant MH, John VC, Peter RM, John IE. 2023. Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change* **194** (e122709) DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122709.

Weichselbaum E, Coe S, Buttriss J, Stanner S. 2013. Fish in the diet: A review. *Nutrition Bulletin* **38**: 128–177. DOI: 10.1111/nbu.12021.

Wu F, Ghamkhar R, Ashton W, Hicks AL. 2019. Sustainable Seafood and Vegetable Production: Aquaponics as a Potential Opportunity in Urban Areas. *Integrated Environmental Assessment and Management* **15**: 832–843. DOI: 10.1002/ieam.4187.

Wu X-Y, Yang Y-F. 2011. Heavy metal (Pb, Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn and Zn) concentrations in harvest-size white shrimp *Litopenaeus vannamei* tissues from aquaculture and wild source. *Journal of Food Composition and Analysis* **24**: 62–65. DOI: 10.1016/j.jfca.2010.03.030.

Yavuzcan Yildiz H, 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* **9** (e13) DOI: 10.3390/w9010013.

Zaynab M, Al-Yahyai R, Ameen A, Sharif Y, Ali L, Fatima M, Khan KA, Li S. 2022. Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University – Science* **34** (e101653) DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101653.

Zhang H, Gao Y, Liu J, Lin Z, Tin Lee Ch, Hashim H, Wu W-M, Li Ch. 2021. Recovery of Nutrients from Fish Sludge as Liquid Fertilizer to Enhance Sustainability of Aquaponics: A Review. *Chemical engineering Transactions* 83: 55–60. DOI: 10.3303/CET2183010.

