

Biologické invaze a paraziti – příběh raků a račího moru

Biologické invaze jsou předmětem stále intenzivnějšího výzkumu, ačkoli jim vědci věnují svou pozornost již několik desítek let. Mezi hlavní témata přitom patří zejména negativní vlivy invazních druhů na původní druhy a společenstva. Ty mohou být přímé (predace, kompetice), ale také nepřímé, jako je přenos parazitů umocňujících negativní efekt nepůvodního druhu v novém prostředí. Původní druhy neadaptované na exotické parazity a nemoci mohou být parazitací oslabovány nebo přímo hynout. Např. veverky obecné (*Sciurus vulgaris*) na Britských ostrovech ubývají nejen kvůli přímé konkurenci šířící se severoamerické veverky popelavé (*S. carolinensis*), ale i kvůli virové infekci, kterou invazní druh přenáší. Některé druhy obojživelníků jsou zase vysoce citlivé k napadení parazitickou houbou *Batrachochytrium dendrobatidis* patřící mezi chytridiomycety (Živa 2010, 5: 241–244). Parazit může být přenášen např. odolnějšími severoamerickými skokany volskými (*Lithobates catesbeianus*), kteří se dostávají na mnoho míst světa mimo původní areál kvůli produkci žabích stehýnek. Cílem tohoto příspěvku je přiblížit čtenářům další takový příklad. Týká se severoamerických raků a jimi přenášeného parazita *Aphanomyces astaci* způsobujícího tzv. račí mor u raků původních v Evropě, Asii a Austrálii. Jde o smrtící onemocnění, které dokáže likvidovat celé populace citlivých druhů a již stihlo ovlivnit evropskou račí faunu bez nadsázky katastrofálně.

Původce račího moru

Rod *Aphanomyces* patří do skupiny *Oomycetes* (nebo také *Peronosporomycetes*), což jsou organismy připomínající právě houby (*Fungi*), fylogeneticky však spadají mezi *Heterokonta* a jsou tak mnohem bližší např. hnědým řasám nebo rozsivkám. Oomycety stejně jako houby tvoří vláknité mycelium a čerpají živiny z okolního substrátu (obr. 6). Od hub je ale odlišuje mimo jiné jejich způsob rozmnožování pomocí krátkověkých nepohlavních zoospor nebo odolných pohlavních oospor. Rod *Aphanomyces* zahrnuje kromě *A. astaci*

i další významné parazitické druhy, např. u kulturních plodin nebo ryb. U parazitů živočichů ale často dochází k redukci pohlavních stadií, takže ani u *A. astaci* oospor nenajdeme. Jedinými infekčními stadii tohoto druhu jsou tedy podle dosavadních poznatků zoospory.

A. astaci je příkladem parazita, který je natolik vázaný na své hostitele (raky), že na většině jiných hostitelů či substrátů v přírodě zřejmě nedokáže přežít (nebo to alespoň není známo). Výjimkou by snad mohli být jiní sladkovodní desetinozí koryši, ale o jejich citlivosti k infekci se

dosud ví překvapivě málo. Parazita lze sice kultivovat na živném médiu v laboratorních podmínkách, ale je velmi náchylný k přerůstání bakteriemi a jinými vodními mikroorganismy, což komplikuje izolaci *A. astaci* z tkání raků. I zmíněné zoospory žijí nejvýše několik týdnů a navíc jsou vysoce citlivé k vyschnutí. Nízká konkurenceschopnost parazita vůči jiným mikroorganismům v prostředí mimo tělo raka, krátká doba života zoospor a jejich tendence klíčit primárně na račích budou důvody, proč parazit z lokalit postižených račím morem obvykle poměrně rychle vymizí spolu s napadenými raky. *A. astaci* se tak může udržovat většinou jen v populacích severoamerických druhů raků, kteří jsou schopni infekci dlouhodobě přežívat. U druhů vysoce citlivých k račímu moru ale může dojít až k úplnému vyhubení populací, v takovém případě však *A. astaci* přijde o své jediné hostitele a zahubí i sebe.

Uvedené poznatky nashromážděné vědeckými výzkumy jsou dnes základem prevence přenosu nákazy a managementu lokalit postižených račím morem. Pro omezení přenosu račího moru tedy stačí pečlivě vysušení veškerého vybavení (např. rybářského), které bylo v kontaktu s vodou obsahující zoospory. A pokud na nějakém místě prokazatelně došlo k úplnému vyhynutí raků, můžeme sem původní raky znovu vysadit, neboť s posledními hostiteli zmizel i původce nemoci.

Dlouhá historie račího moru v Evropě

Za první propuknutí račího moru v Evropě jsou považovány masové úhyny raků v povodí Pádu v Itálii v r. 1859. Můžeme ale jen spekulovat, jak se sem tehdy původce moru dostal, protože první doložená introdukce severoamerických raků, potenciálních přenašečů nákazy, proběhla v Evropě až v r. 1890. Nicméně, nezůstalo jen u Itálie, během několika následujících desetiletí se úhyny rozšířily po téměř celém kontinentu a způsobily kolaps tehdy rozšířeného trhu s raky. Vědci začali záhy pátrat po příčině zkázy a začátkem 20. stol. navrhl mladý německý badatel F. Schikora, že původcem by mohl být právě oomycet rodu *Aphanomyces*, kterého nazval *A. astaci*. Tehdy uznávaný profesor B. Hofer z mnichovské univerzity však tvrdil, že jde o bakteriální onemocnění a za původce považoval *Bacillus pestis astaci*. Spor trval dalších několik desetiletí a teprve švédský vědecký pracovník O. Nybelin ve své práci z r. 1934 definitivně potvrdil Schikorovu hypotézu. Podařilo se mu totiž získat čisté kultury vláknitého parazita s charakteristikami rodu *Aphanomyces*, jehož spory v následných pokusech zabíjely raky.

1 Rak říční (*Astacus astacus*) – náš stále ještě poměrně běžný původní druh. Ohrožují ho však mnohé faktory, kromě šíření severoamerických raků a račího moru také znečištění vod, regulace vodních toků nebo intenzivní rybářské aktivity. Rak říční patří mezi větší druhy a má mohutná klepeta s červenavými klouby. Ta jsou obvykle ze spodní strany zbarvená dočervena, stejně jako u invazního raka signálního. Foto P. Kozák





Poznání původce úhynu raků, jeho životního cyklu a možných preventivních opatření však nestačilo k zastavení šíření nemoci. K lokálním úhynům docházelo sporadicky dál, i když už račí mor v průřídých populacích evropských raků nikdy nepřerostl v takovou vlnu onemocnění jako dříve. Kvůli nedostatku raků na trhu však v Evropě začali být vysazováni raci ze Severní Ameriky, kteří jsou vůči račímu moru mnohem odolnější. Naneštěstí se tou dobou ještě nevědělo, že právě severoamerické druhy jsou původními hostiteli a přenašeči *A. astaci* a že jejich populace mohou být trvalými zdroji nákazy. Tuto skutečnost odhalili vědci až v době, kdy se dovezené druhy v evropských vodách aklimatizovaly a rozšířily natolik, že jejich populace již nebylo možné zlikvidovat. V druhé polovině 20. stol. jsme se tak stali svědky postupného rozšiřování areálů nepůvodních severoamerických raků v Evropě a plíživého vytlačování raků původních na tomto území.

O kterých racích je tu vlastně řeč?

V současnosti rozlišujeme v Evropě pět původních druhů raků. Některé z nich jsou však spíše druhovými komplexy. V České republice jsou z nich původní jen dva, a to rak říční (*Astacus astacus*, obr. 1), dříve nejčastěji konzumní druh, a rak kamenáč (*Austropotamobius torrentium*, obr. 3 a na 3. str. obálky) – menší, trzně nezajímavý a u nás velmi vzácný druh (blíže viz Živa 2004, 2: 79–81). Kromě nich se zde už přes 100 let vyskytuje rak bahenní (*Astacus leptodactylus*, obr. 2) pocházející z východní Evropy. Na tomto kontinentě ještě žijí západoevropský rak bělonohý (*Austropotamobius pallipes*) a východoevropský druh *Astacus pachypus*.

Do volných vod Evropy se přičiněním člověka dostalo již asi 10 dalších, převážně severoamerických druhů raků. Asi nepřekvapí, že největší areály mají ty druhy, které se v Evropě vyskytují nejdéle. Rak pruhovaný (*Orconectes limosus*, viz obr. 5), vysazený už v r. 1890 na území dnešního Polska, je dnes běžný především v Polsku, Německu, Francii a také u nás. Nicméně každým rokem se šíří dál na východ. Zajímavostí je, že celá současná evropská populace je nejspíše výsledkem vysazení pouhých 90 jedinců, což ukazuje na velký invazní potenciál druhu navzdory

redukci genetické diverzity. Druhý severoamerický rak vyskytující se na našem území – rak signální (*Pacifastacus leniusculus*, obr. 4), byl v Evropě vysazován pro komerční účely ve velkém měřítku především v 70. letech 20. stol. V současnosti je hodně rozšířen zejména ve Švédsku, Finsku, Velké Británii, Španělsku, Francii a Rakousku. Od 70. let se ve velkém vysazoval také teplomilnější rak červený (*Procambarus clarkii*), dnes běžný v jižní Evropě. U nás se zatím naštěstí nevyskytuje.

Další nepůvodní druhy raků se objevily ve volné přírodě Evropy až během posledních 20 let, kdy se rozvinul akvarijní chov raků a obchod s nimi. Volné populace exotických druhů tak dnes vznikají spíše následkem vypuštění nebo úniku akvarijních „mazlíčků“ (na rozdíl od dřívějšího vysazování pro lov a konzumaci). Mezi tyto raky patří hlavně někteří další zástupci rodu *Orconectes* a *Procambarus*. Lze přitom očekávat, že i tyto druhy budou v budoucnu pronikat dále do evropských vod, stejně jako jejich výše zmiňovaní „krajané“.

Račí mor na našem území

Také české země byly na přelomu 19. a 20. stol. zasaženy vlnou úhynů raků na račí mor. Z minulého stol. však existuje jen velmi málo zpráv o úhynech, které mohly být způsobeny tímto onemocněním. Zvláště v druhé polovině tohoto období se na račí mor pozapomnělo a za zásadní faktor ohrožující naše raky bylo považováno znečištění vody, což mělo své opodstatnění kvůli rozvoji průmyslu i lidských sídel a nedostatečnému čištění odpadních vod.

Zřejmě už od 60. let k nám ale začal pronikat z německého úseku Labe rak pruhovaný. Dnes už máme tento druh v Labi až po Jaroměř, ve Vltavě přerušované po Lipně a vyskytuje se i v dalších tocích v povodí těchto řek. Raci pruhovaní se objevili také v mnoha izolovaných stojatých vodách, kam je přemístili lidé, kteří často ani netušili, že tím napomáhají invazi nežádoucího druhu. Rak signální u nás byl vysazen v 80. letech do několika rybníků na Moravě, odkud se dostal i do některých menších toků a začíná se postupně šířit, byť ještě není tak běžný jako rak pruhovaný.

Šířením severoamerických raků muselo dříve či později začít docházet ke kontaktům s druhy původními, a pravděpodobně i k úhynům, které však nejspíš zůstávaly

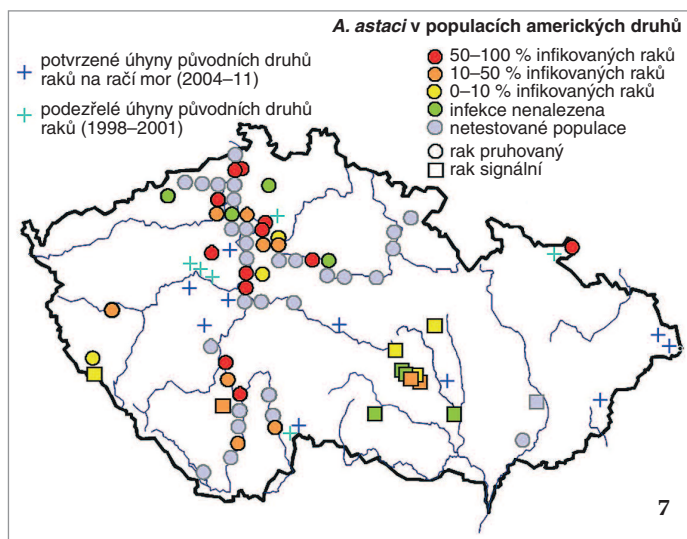
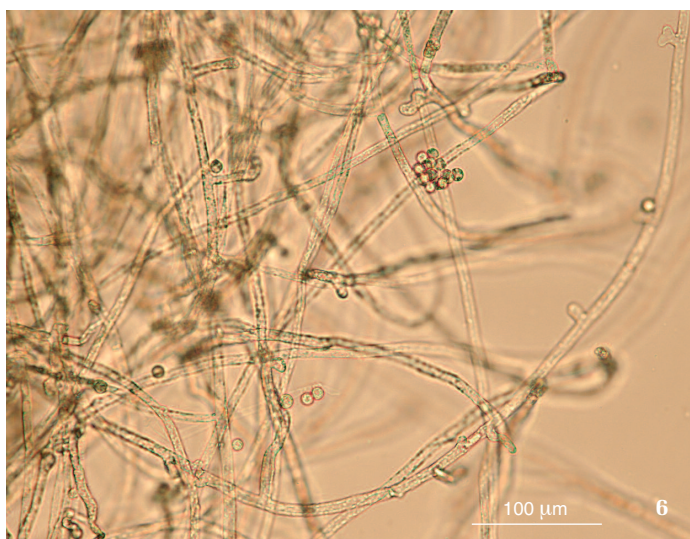
2 Východoevropský rak bahenní (*Astacus leptodactylus*) byl u nás vysazován na konci 19. stol. Měl nahradit raky říční zdecimované račím morem. Ukázalo se však, že rak bahenní na tuto nemoc také hyne. Druh dorůstá podobné velikosti jako rak říční, liší se však zbarvením spodní strany těla, která je světlá. Klepeta nejsou tak mohutná, mají spíše nůžkovitý tvar. Foto P. Kozák

3 Rak kamenáč (*Austropotamobius torrentium*) se na našem území vyskytuje už pouze na několika desítkách lokalit. Jde o menší druh, tvarem klepet se podobá raku říčnímu, ale spodní strana těla i klepet má bělavou barvu. Za každým okem se u něho na rozdíl od raka říčního a raka bahenního nachází pouze jeden hrbolek (postorbitální lišta).

4 Se severoamerickým rakem signálním (*Pacifastacus leniusculus*) se u nás zatím můžeme setkat na omezeném počtu lokalit, ale protože již pronikl do tekoucích vod, jeho dalšímu šíření se v současnosti téměř nedá zabránit. Tento potenciální přenašeč račího moru by mohl být zaměněn s rakem říčním, protože klepeta jsou také ze spodní strany červená. Rak signální má ale bílé až modrobílé klouby klepet a nápadně hladký povrch těla.

5 Rak pruhovaný (*Orconectes limosus*) pochází ze Severní Ameriky a je častým přenašečem původce račího moru. Pro tento druh je typický malý vzrůst, malá klepeta s oranžovými špičkami, otrněná hlavohruď, světlá spodní strana těla a rezavě hnědé proužky nebo skvrny na zadečku. Foto A. Petrušek

6 Hyfy původce račího moru *Aphanomyces astaci* rostoucí v laboratorní kultuře. Na konci sporangií téměř nerozeznatelných od ostatních vláken se za příhodných podmínek objevují shluky cyst, z nichž se později do vody uvolňují nepohlavní zoospory. Tento typ sporulace je typický pro celý rod *Aphanomyces*. Na hyfách ani na sporangiích nenajdeme žádné morfoloické znaky, na jejichž základě by bylo možné druh odlišit od druhů příbuzných. *A. astaci* je definován především na základě parazitace na racích. To značně komplikuje diagnostiku původce račího moru, která byla před vyvinutím molekulárních detekčních metod založena na složité kultivaci



a nezbytném následném ověření infekčnosti získaných izolátů pro citlivé druhy raků.

Snímky E. Kozubíkové-Balcarové, pokud není uvedeno jinak

7 Mapa ukazuje známé rozšíření původce račího moru *A. astaci* v České republice. Zahrnuje informace o úhynech našich původních raků a nakaženosti populací severoamerických raků. Uvádí také dosud známá data o celkovém rozšíření severoamerických druhů. Orig. E. Kozubíková-Balcarová

stranou lidské pozornosti. Až na konci 90. let byly zaznamenány dva případy, u nichž existovalo silné podezření na račí mor. Tehdy došlo k masivnímu hynutí raků říčních a raků bahenních v říčce Pšovce na Kokořínsku a v Loděnici jihozápadně od Prahy. Správné určení diagnózy komplikoval fakt, že u nás nebyla k dispozici metoda, kterou by bylo možné přítomnost parazita spolehlivě stanovit. To se změnilo až v posledních 10 letech s rozvojem molekulárních detekčních metod pro *A. astaci*. Jejich zavedení a používání totiž není tak náročné a výsledky jsou navíc spolehlivější než u dříve používaných kultivačních technik.

Diagnostika náhodně zjištěných úhynů našich původních raků pomocí molekulárních postupů v pozdějším období nepřinesla příliš povzbudivé závěry. Jen v letech 2004–11 byl račí mor potvrzen jako

příčina 10 masových úhynů původních raků (obr. 8). Dalšími zjištěnými úhynů či vymizení populací mohlo také souviset s touto nemocí, k dispozici však nebyly vzorky pro analýzu, která by omezení potvrdila. Račí mor byl tedy v posledních dekádách pravděpodobně přehlížen a podceňován, zároveň však nejspíš docházelo k reálnému nárůstu počtu případů v souvislosti s již zmiňovaným šířením invazních raků. Snahy o popularizaci tématu mezi širokou veřejností a spolupráce s Agenturou ochrany přírody a krajiny ČR ale vede ke zvyšování povědomí o této problematice a račí mor se dnes už na rozdíl od doby před 10 lety běžněji považuje za možnou příčinu úhynů raků.

V posledních letech u nás proběhlo také rozsáhlé sledování nakaženosti populací invazních raků původcem moru. Ukázalo se, že většina je opravdu infikována, ale míra nákazy se liší. V některých populacích raka pruhovaného byl parazit detekován ve většině zkoumaných jedinců, naopak raci signální se zdají být postiženi obecně méně. I v takovém případě však teoreticky může k přenosu infekce dojít, jen propuknutí nemoci může trvat déle a původní i američtí raci mohou dokonce nějakou dobu společně žít na stejné lokalitě. Míra nákazy parazitem se v čase navíc i mění, jak ukazují výsledky našeho výzkumu populace raků pruhovaných v Pšovce, kde se procento infikovaných jedinců při opakovaných testech mezi lety 2004–10

snižovalo. Příčina tohoto jevu však není úplně jasná a opětovný nárůst míry parazitace v budoucnu nelze vyloučit.

Šíření račího moru

Přes zdánlivě dobré znalosti o rozšíření a promořenosti českých populací amerických raků parazitem *A. astaci* (obr. 7) zůstává u většiny úhynů neznámý konkrétní zdroj a způsob přenosu infekce. Zatím není zcela jasné, zda převažuje šíření přímým kontaktem zdravých a infikovaných raků, nebo jestli hraje významnou roli také přenos zoospor např. s nasadami ryb či třeba na mokřem rybářském vybavení.

Určení zdroje nákazy ztěžuje fakt, že některé populace amerických raků mohou unikat naší pozornosti. Dobře to ilustruje příklad Bojovského potoka jižně od Prahy, kde vyhynuli raci říční následkem infekce v r. 2005. Teprve v r. 2011 byla potvrzena silná populace raků pruhovaných ve vodní nádrži Vrané, do které potok ústí, a to při snížení hladiny kvůli opravám. Několik jedinců raků pruhovaných bylo pak dokonce nalezeno přímo u ústí potoka. Alternativně mohou být američtí raci přeneseni na nové místo (ať už lidmi nebo třeba predátory), způsobit infekci a později uhynout, aniž by založili novou populaci. Scénářů přenosu *A. astaci* je tedy více, obvykle však není možné zjistit přesný průběh. Proto je tak těžké úhyny původních druhů předvídat, což zásadně komplikuje ochranu těchto živočichů.



S identifikací zdrojů nákazy nám opět mohou pomoci molekulární metody. Kromě diagnostických postupů jako takových jsou nově k dispozici metody umožňující rozlišování kmenů parazita na základě testování DNA ze vzorků tkání infikovaného raka (analýza mikrosatelitů; viz též Živa 2012, 4: 158–161). Dříve bylo nutné získat z nemocných raků čisté kultury *A. astaci*, což nebylo snadné. Díky analýze mikrosatelitů mohou být rozpoznány jednotlivé kmeny *A. astaci*, které se liší geneticky a často i fyziologicky. Podle dosavadních poznatků parazitují na konkrétních druzích severoamerických raků. Porovnáním kmenů z hynoucích raků s dosud známými kmeny z amerických raků se proto můžeme dovědět, z kterého amerického druhu byla infekce nejspíše přenesena. Tímto způsobem jsme zjistili, že u nás jsou příčinou úhynů původních raků jak raci pruhovaní, tak raci signální. Zajímavostí je také přítomnost dalšího kmene izolovaného pouze z hynoucích evropských raků např. ve Finsku nebo Turecku, jež zatím nebyl přiřazen k žádnému americkému druhu. Tento kmen v Evropě pravděpodobně přetrval od první vlny úhynů raků na konci 19. stol. Jeho dlouhodobé setrvání v Evropě by mohlo být vysvětleno např. jako důsledek postupného „přeskakování“ mezi zbylými populacemi evropských raků, které jsou často schopny obnovy z lokalit nezasažených infekcí.

Vyhledky evropských raků

Do budoucna je možných několik scénářů osudu evropských raků. Původní druhy se mohou stát velmi vzácnými nebo dokonce vyhynout. To se již stalo např. v Portugalsku, kde se dříve vyskytoval příbuzný našeho raka kamenáče – rak bělonohý. Dnes jsou z této země známi jen invazní raci. V některých dalších státech již američtí raci jasně převažují nad těmi původními, např. ve Velké Británii nebo v Polsku.

V současných antropogenně ovlivněných říčních sítích většiny evropských států však zůstává stále mnoho míst, kam se invazní raci mohou sami jen těžko rozšířit kvůli různým překážkám na tocích. Také izolované stojaté vody jsou pro ně vlastními silami v podstatě nedostupné. Proto je vysazování původních druhů na taková místa jedním z účinných přístupů k jejich ochraně. Zároveň je však nutné

minimalizovat riziko přenosu invazních raků na tyto lokality, což může podpořit především soustavné vzdělávání veřejnosti, která se na jejich šíření, často z nevědomosti, podílí. Je tedy možné, že se v Evropě bude vyskytovat mnohem více druhů raků než dnes, ti původní však přežijí pouze na izolovaných stanovištích.

Optimističtější (i když méně pravděpodobné) úvahy vedou k představám, že invazní boom severoamerických raků by mohla přerušit nějaká nečekaná přirozená událost nebo vhodný management. Např. se zdá, že katastrofální povodeň v r. 2002 nepotrápily jen lidi, ale i raky pruhované v povodí Labe a Vltavy. Několik let po těchto povodních nebylo vůbec jednoduché získat tyto raky pro výzkum, přestože ještě krátce předtím se dali na mnoha místech snadno odchytit. Invazi nepůvodních raků může omezit i neúmyslné zavlečení nového parazita, kterému se tito raci nebudou umět bránit, nebo změna podmínek vedoucí ke zvýšení patogenity jinak nepřilíš nebezpečných parazitů. Pro příklad můžeme sáhnout trochu dále od raků. Nedávno byly pozorovány masivní úhyny invazních karasů stříbrných (*Carassius gibelio*) v Polabí a zjistilo se, že ryby podléhají virovému onemocnění. Takový rozvoj nemoci mohla způsobit náhlá a výrazná změna teploty v kombinaci s velmi nízkou genetickou variabilitou populací těchto ryb. Také metodám, jak likvidovat invazní raky, je věnován neustálý výzkum. Spolehlivé postupy, které by se daly uplatnit i v tekoucích vodách bez devastujícího vlivu na další organismy, zatím ale k dispozici nemáme.

Zajímavá je rovněž otázka možné zvyšující se odolnosti evropských raků k *A. astaci* nebo snižující se virulence parazita, pro něhož není vysoká agresivita z evolučního pohledu výhodná. Výjimky z pravidla, že raci mor hubí evropské druhy s velmi vysokou účinností, totiž existují. Např. ve velkých jezerech ve Finsku a Turecku nebo v Dunaji v Rumunsku se vyskytují zdravě vypadající raci říční nebo raci bahenní, u kterých je možné detekovat původce račího moru, aniž by docházelo k hromadným úhynům. Raci zde zjevně přežívají nákazu parazitem déle, než bychom čekali podle pozorování z jiných oblastí. Výskyt odolnějších jedinců a celých populací se nedá vyloučit ani u nás,

8 Raci kamenáci v Úpořském potoce na Křivoklátsku uhynuli na račí mor v r. 2005. Foto A. Petrušek

9 Tento asi dvoumetrový přeпад rybníka na Úpořském potoce na Křivoklátsku zabránil migraci nakažených jedinců raka kamenáče dál proti proudu, a tím dalšímu šíření račího moru v toku. Nad rybníkem zůstala zachována zdravá populace raků, která po odeznění epizody onemocnění slouží jako zdroj pro opětovnou kolonizaci dolního úseku. Migrační bariéry na toku tak mohou hrát významnou roli v přežívání druhů citlivých k *A. astaci*. Foto A. Petrušek

protože jsme se dosud původcem račího moru u původních druhů raka zabývali výhradně při jejich úhynech. Situace, kdy nějaký jedinec nákazu přežili, se však dá v praxi často těžko odlišit od případů, kdy raci zasažený úsek toku znovu kolonizují. K takovému opětovnému osídlení může dojít z míst, kde se zachovala zdravá část populace, např. nad příčnou překážkou na toku (obr. 9). V každém případě je nutno na otázky odolnosti evropských raků vůči račímu moru soustředit další výzkum.

Vliv původce račího moru v Evropě je nezáměrným experimentem, který probíhá už zhruba 150 let. Postupně do něho vstupují další a další druhy invazních raků, které mohou vytlačit ty původní kvůli šíření agresivního parazita. Tento z vědeckého hlediska velmi zajímavý systém (invazní raci–parazit–původní raci) je už relativně dobře prozkoumaný (*A. astaci* je jedním z nejprobadanějších parazitů bezobratlých vůbec) a může sloužit jako modelový příklad podobných interakcí. Stále ale zbývá mnoho otázek, které se zatím nepodařilo zodpovědět. Smutnou realitou především zůstává, že dosud neumíme infekci u raků léčit a nemáme účinné praktické postupy, jak původní raky v Evropě před račím morem chránit.

Práce autorky byla podpořena projektem č. CZ.1.07/2.3.00/30.0022 Podpora vytváření, rozvoje a mobility kvalitních výzkumně-vývojových týmů na Univerzitě Karlově.