Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra myslivosti a lesnické zoologie

Průzkumné chování ryb v přítomnosti magnetických objektů

Bakalářská práce

Autor práce: Markéta Kunkelová

Vedoucí práce: Ing. Petra Nováková, Ph.D.

© 2019 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Markéta Kunkelová

Provoz a řízení myslivosti

Název práce

Průzkumné chování ryb v přítomnosti magnetických objektů

Název anglicky

Exploration behaviour of fish in presence of magnetic objects

---

Cíle práce

Formou rešerše shrnout výsledky publikovaných studií o magnetorecepci živočichů se zaměřením na magnetorecepci ryb. V experimentální části zjistit, zda jsou sledované druhy ryb (sekavci) magnetosensitivní a zda existují rozdíly v chování těchto ryb v prostředí s magnetickými a demagnetizovanými předměty.

Metodika

Bude vypracována podrobná literární rešerše o magnetorecepci živočichů se zaměřením na ryby. Praktická část práce bude věnovaná experimentu v laboratoři na FLD ČZU v Praze. V elektromagnetické cívce budou sledováni samci a samice sekavců (rod *Cobitis*). Každý jedinec bude sledován a nahráván samostatně po dobu jedné hodiny a každý jedinec projde experimenty s magnetem a bez magnetu. Získaná data budou statisticky vyhodnocena.

Harmonogram zpracování:

Studentka bude průběžně konzultovat postup sběru a zpracování dat s vedoucím práce. Data budou nasbírána a předána vedoucímu práce do 28.2. 2019.

První část rešerše (cca 10 stran) bude zaslána ke kontrole vedoucímu práce do 30.9. 2018. Celá rešeršní část práce bude dokončena do 31.1. 2019. Kompletní rukopis práce bude předložen nejpozději 31.3. 2019.

Doporučený rozsah práce

cca 30-40 stran textu

Klíčová slova

Cobitis sp., magnetorecepce, neodymový magnet

Doporučené zdroje informací

Czech-Damal, N.U., Dehnhardt, G., Manger, P. et al. 2012 Passive electroreception in aquatic mammals. Journal of Comparative Physiology A 199(6), 555-563.

Hart, V., Kušta, T., Němec, P. et al. 2012 Magnetic alignment in carps: Evidence from the Czech Christmas fish market. PLOS ONE 7(12), doi:10.1371/journal.pone.0051100.

Kremers, D., Marulanda, J.L., Hausberger, M. et al. 2014 Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: detection of experimental magnetic fields. Naturwissenschaften 101(11), 907-911.

Malewski, S., Malkemper, E.P., Sedláček, F. et al. 2018 Attracted by a magnet: Exploration behaviour of rodents in the presence of magnetic objects. Behavioural Processes 151, 11-15.

Němec, P., Vácha, M. 2007 Mechanizmy magnetorecepce. Vesmír 86, 284-289.

Vácha, M., Němec, P. 2007 Kompas a mapa – orientace v geomagnetickém poli. Vesmír 86, 224-228.

Walker, M.M., Quinn, T.P., Kirschvink, J.L. et al. 1988 Production of single-domain magnetite throughout life by sockeye salmon, Oncorhynchus nerka. Journal of Experimental Biology 140, 51-63.

Wiltschko, W., Wiltschko, R. 2005 Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. Journal of Comparative Physiology A 191(8), 675-693.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Petra Nováková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra myslivosti a lesnické zoologie

Elektronicky schváleno dne 9. 12. 2018

doc. Ing. Vlastimil Hart, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 2. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 14. 04. 2019

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma "Průzkumné chování ryb v přítomnosti magnetických objektů" vypracovala samostatně pod vedením Ing. Petry Novákové, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne..... Podpis autora

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí mé práce, Ing. Petře Novákové, Ph.D., za odborné vedení a ohromnou vstřícnost a trpělivost při udělování rad pro vypracování této bakalářské práce. Za neméně cenné rady a neotřesitelný entuziasmus při řešení metodiky a technických potíží si mé obrovské díky zaslouží také doc. Ing. Vlastimil Hart, Ph.D., Michael Scott Painter, Ph.D. a Mgr. Nataliia Iakovenko, Ph.D. V neposlední řadě posílám poděkování kolegům z dřevařského pavilonu, kteří mi zhotovili speciální desky k testovacím stolům, a svým kolegům spolužákům, kteří mi pomohli se sběrem dat.

Abstrakt

Magnetorecepce, definovaná jako schopnost živočichů vnímat magnetické pole Země, je považována za klíčovou při prostorové orientaci a navigaci mnohých živočišných druhů. V rámci této bakalářské práce byla ověřována spontánní reakce sekavců na magnetickou anomálii v podobě silného dipólového magnetu, tzn., zda preferovali, nebo se snažili vyhnout pobytu v její blízkosti. Experiment proběhl v březnu 2019 v laboratořích FLD ČZU v Praze. Každý jedinec byl sledován a nahráván po dobu jedné hodiny a každý prošel testem s magnetem, umístěným u kratší hrany obdélníkové nádoby, a testem bez magnetu. Fotografie, pořízené každých třicet vteřin, poskytly záznamy pozic jedinců během každého testu. Pro statistickou analýzu byl použit program RStudio. Data byla vyhodnocena v závislosti na pozicích všech jedinců vůči pozici magnetu a na základě toho nebyl zjištěn žádný signifikantní rozdíl mezi chováním ryb za přítomnosti a bez přítomnosti magnetického stimulu. Nicméně se zdá, že na individuální úrovni je možné jak preferenci k pobytu u magnetu, tak vyhýbání se mu vypozorovat.

Klíčová slova: *Cobitis* sp., magnetorecepce, neodymový magnet

Abstract

Magnetoreception, defined as the ability to perceive Earth's geomagnetic field, has been shown to play a key role in orientation, navigation and spatial behavior of various animal species. Here, I tested the spontaneos behavior of *Cobitis* sp. exposed to a strong dipole magnet by recording preference and avoidance spatial relative to the source of the magnetic anomaly. The experiment took place in March 2019 in the laboratories at the Faculty of Wood Sciences at Czech University of Life Sciences, Prague. Individual fish were measured for one hour and tested with and without magnet located at one end of a rectangular aquarium. Photographs taken every thirty seconds provided a record of the individual's position during each trial. RStudio was used for all statystical analyses. Pooling data from all individuals relative to the position of the magnet revealed no significant preference or avoidance behavior relative to the magnetic stimulus. However, it appears that there may be magnetic preference and avoidance behaviors exhibited at the individual level.

Keywords: *Cobitis* sp., magnetoreception, neodymium magnet

Obsah

1 Úvod a cíl práce 8

2 Literární rešerše 9

2.1 Geomagnetické pole Země 9

2.2 Magnetorecepce 10

2.2.1 Magnetorecepce založená na elektromagnetické indukci 10

2.2.2 Chemická magnetorecepce založená na vzniku radikálových párů 11

2.3 Orientace v magnetickém poli Země 13

2.3.1 Magnetický kompas 13

2.3.2 Magnetická mapa 14

2.3.3 Magnetický imprinting 15

2.3.4 Spontánní magnetický alignment 16

2.3.5 Testy dvou-výběrové preference 19

2.3.6 Magnetorecepce u ryb 21

3 Metodika 24

3.1 Studovaný druh 24

3.2 Testovaní jedinci a prostory držení 24

3.3 Test dvou-výběrové preference 24

4 Výsledky 27

4.1 Testy bez magnetu 27

4.1.1 Samice 27

4.1.2 Samci 28

4.1.3 Obě pohlaví 29

4.2 Testy s magnetem 30

4.2.1 Samice 30

4.2.2 Samci 31

4.2.3 Obě pohlaví 32

4.3 Shrnutí výsledků 33

5 Diskuze 34

6 Závěr 36

7 Seznam literatury a použitých zdrojů 37

8 Seznam příloh 46

Seznam tabulek, obrázků a grafů

Tabulka 1: Experimentální data zanesená do tabulky (samci, test s magnetem) 26

Obrázek 1: Způsob zaznamenání pozice jedince 26

Obrázek 2: Pozice samic v nádobě bez magnetu 27

Obrázek 3: Pozice samců v nádobě bez magnetu 28

Obrázek 4: Pozice ryb v nádobě bez magnetu 29

Obrázek 5: Pozice samic v nádobě s magnetem 30

Obrázek 6: Pozice samců v nádobě s magnetem 31

Obrázek 7: Pozice ryb v nádobě s magnetem 32

1 Úvod a cíl práce

Magnetorecepce dlouho zůstávala v povědomí mnohých jako kontroverzní vědecké téma – je to přece jen záležitost, které člověk sám není vědomě schopen, tudíž mu chybí zkušenosti „z první ruky“, jež by pomohly s příslušným nasměrováním teorie a výzkumu (Kirschvink et al., 2001). I přes to se ale vědci z celého světa snaží přinést odpověď na otázku, jakým způsobem se živočichové dokážou orientovat a navigovat v prostředí, které je obklopuje. Ať už jde o náročné sezónní migrace ptáků a neméně namáhavá a dlouhá putování lososů a želv skrz širá moře, aby se dostali do své domoviny a mohli se rozmnožit (Vácha et Němec, 2007; Lohmann et al., 2008), nebo o spontánní nasměrování osy těla včel při průzkumu nového prostředí (Collett et Baron, 1994) a kachen při přistávání na vodní ploše (Hart et al., 2012), jedno je jisté: mimo vizuální či například čichová vodítka hraje při těchto činnostech dle rok od roku rostoucího počtu výzkumů svou roli i geomagnetické pole Země (Vácha et Němec, 2007).

Naše planeta nabízí hned několik způsobů využití svého magnetického pole a od nich se odvíjí jednotlivé modely magnetorecepce. Z hlediska migrace je důležitý magnetický kompas, umožňující živočichům udržet konzistentní směr cesty, např. na sever nebo na jih, a magnetická mapa, díky níž je jedinec schopen rozeznat svou pozici (Lohmann et al., 2007). V rámci magnetického alignmentu pak živočichové dokážou spontánně zarovnat osu svého těla vzhledem ke směru geomagnetických siločar planety (Begall et al., 2013).

Výzkum magnetorecepce je ve většině případů náročný nejen na čas, ale také na metodiku (Malewski et al., 2018). Zejména v posledních letech začaly být představovány nové způsoby, které celý proces výzkumu magnetosenzitivního smyslu živočichů ulehčují – jedná se o testy dvou-výběrové preference, ve kterých je testována spontánní reakce živočicha na vystavení přímému vlivu magnetu. Jedinec má tak v podstatě dvě volby: buď se uměle produkovanému magnetickému poli, které je mnohonásobně silnější, než to zemské, vyhne, nebo naopak zůstane v jeho vlivu (Ernst et Lohmann, 2018).

Cílem této bakalářské práce bylo pomocí testu dvou-výběrové preference zjistit, jaká bude behaviorální reakce sekavců (*Cobitis* sp.) na uměle vytvořenou magnetickou anomálii v podobě silného dipólového magnetu umístěného k testovacímu akváriu a tím potvrdit či vyvrátit, že je tento druh ryb magnetosenzitivní.

2 Literární rešerše

2.1 Geomagnetické pole Země

Celá řada organismů, ať už se jedná o měkkýše, členovce či obratlovce, je schopna detekovat geomagnetické (magnetické) pole naší planety. Abychom však tento fenomén byli schopni plně pochopit, je nutné si nejdříve uvědomit, co to vlastně magnetické pole je a jakým způsobem ho živočichové mohou využívat (Wiltschko et Wiltschko, 2005).

Planeta Země funguje jako obrovský magnet, to znamená, že kolem sebe vnitřními procesy neustále vytváří magnetické pole (Able, 1994; Wiltschko et Wiltschko, 2005). Toto pole vzniká především na základě elektrického proudu, tvořícím se tím, jak se při zemské rotaci tře vnější polotekuté zemské jádro z jedné strany o vnitřní pevné jádro Země a ze strany druhé o zemský plášť (Ronan, 1996). Siločáry magnetického pole Země vystupují z jižního magnetického pólu, obíhají okolo planety a znovu do ní vstupují v místě severního magnetického pólu – z toho vyplývá, že siločáry směřují vzhůru na jižní polokouli, v oblasti magnetického rovníku jsou souběžné se zemským povrchem a konečně na severní polokouli směřují dolů. Úhel, který svírají siločáry s linií zemského povrchu, se nazývá magnetická inklinace. Vyznačuje se pravidelným gradientem od – 90° na jižní polokouli do + 90° na polokouli severní, v oblasti magnetického rovníku se pak rovná 0°. Intenzita geomagnetického pole je stejně tak nejvyšší u magnetických pólů a nejnižší právě u magnetického rovníku. Vytváří tudíž gradient směrem od pólů k rovníku na obou hemisférách (Wiltschko et Wiltschko, 2005).

Magnetické póly planety, tzn. místa, kde se sbíhají siločáry, nekorespondují s jejími geografickými póly – pozice magnetických pólů se neustále mění, přičemž v devadesátých letech minulého století tento rozdíl dosahoval asi 2 000 kilometrů. Tento rozdíl v umístění se nazývá magnetická deklinace (Able, 1994).

Geomagnetické pole naší planety je vcelku slabé. U pólů se jeho intenzita pohybuje zhruba kolem 60 000 nT, v oblasti rovníku pak nepřevyšuje 30 000 nT (Able, 1994). Intenzita magnetického pole není stálá, může být lokálně narušena geologickým podložím (ve formě magnetických anomálií), ať už směrem do (častějších) pozitivních či negativních hodnot.

Anomálie se pohybují v obrovském rozpětí: rozlohou od malých ploch po plochy o stovkách kilometrů a intenzitou od několika málo nT po násobky přirozené intenzity zemského pole. Za další, denní výkyvy v intenzitě magnetického pole se dějí na základě zemské rotace (okolo 50 nT) a magnetických bouří, které jsou způsobeny solárním větrem (zde se jedná o výkyvy cca 150 – 300 nT). V celkovém měřítku magnetické anomálie zaujímají ovšem asi jen 1 % z celkové intenzity magnetického pole Země (Able, 1994). Geomagnetické pole Země tedy poskytuje spolehlivý a všudypřítomný zdroj informací, které živočich může využít (Wiltschko et Wiltschko, 2005).

2.2 Magnetorecepce

Zdá se, že magnetorecepce, tzn. schopnost vnímat magnetické pole planety, hraje důležitou roli v orientaci a navigaci u řady suchozemských a vodních živočichů (Kremers et al., 2014). Schopnost magnetorecepce byla poprvé popsána u červenky obecné (*Erithacus rubecula*) v roce 1966 (Wiltschko et Merkel, 1966). Jednoduše řečeno v sobě magnetorecepce zahrnuje informace o tom, jakým způsobem je živočich vůbec schopen magnetické pole „přečíst“ a kde se tento proces v organismu odehrává (Wiltschko et Wiltschko, 2005). Kde se ovšem magnetoreceptor na/v těle nachází, není známo. Tyto receptory mohou být nepatrně malé a roztroušené v tkáních, ale je tu i druhá možnost – že receptor pro magnetické pole jako takový vlastně ani existovat nemusí, resp. že je zprostředkován chemickými reakcemi iniciovanými magnetickým polem (Vácha et Němec, 2007). Zatím jsou popsány pouze tři mechanizmy, které jsou považovány za fyzikálně možné: 1) magnetorecepce založená na schopnosti vysoce citlivých elektroreceptorů schopných detekovat indukované elektrické pole, 2) magnetorecepce založená na spolupráci magnetických částic v těle organismu a jejich potenciálních mechanoreceptorů a 3) chemická magnetorecepce na základě radikálových párů (Mouritsen, 2018).

2.2.1 Magnetorecepce založená na elektromagnetické indukci

Elektromagnetická indukce je jev, kdy se vodič pohybuje napříč magnetickým polem a protíná při tom jeho indukční siločáry. To vede k seskupení nábojů tak, že dojde k vytvoření

kladného a záporného konce vodiče a mezi těmito dvěma konci následně vznikne elektromotorické napětí. Dojde-li k propojení konců vodivým médiem, vznikne obvod, kterým začne protékat elektrický proud (Vácha et Němec, 2007).

Právě potřeba vysoce vodivého média je to, co omezuje magnetorecepci založenou na indukci na vodní prostředí (Wiltschko et Wiltschko, 2005; Czech-Damal et al., 2012). Tento mechanizmus byl popsán u paryb, které jsou podle něj schopny vnímat změny elektromotorického napětí v závislosti na tom, jakým směrem se pohybují v magnetickém poli Země a jaká je jejich rychlost. Vodič je v tomto případě zprostředkován Lorenziniho ampulemi, soustředěnými především v oblasti rypce, jako vysoce vodivé médium zde funguje mořská voda a elektroreceptory uvnitř ampulí pracují jako nesmírně citlivé voltmetry s prahem citlivosti 1nV/cm, což odpovídá 1,5V/3000 km (Vácha et Němec, 2007). Pokud žraloci nebo například rejnoci plavou určitým směrem, protínají siločáry magnetického pole pod různými úhly, tudíž vyvolávají různě velké indukované napětí ve svých elektroreceptorech (Murray, 1962). Konkrétněji, pokud paryba plave severním nebo jižním směrem, tzn. paralelně se siločárami magnetického pole planety, je indukované napětí nulové. Opačně, plave-li paryba kolmo k siločárám, tedy na západ či na východ, napětí dosahuje maximálních hodnot. Pokud je tedy tato informace o směru, kterým zvíře plave, v centrální nervové soustavě porovnána s informacemi z vestibulárního systému, jenž vyhodnocuje pozici hlavy bez ohledu na směr pohybu organismu, může pak živočich určit směr, kterým se pohybuje, aniž by si byl vědom své rychlosti a intenzity lokálního magnetického pole. Tento model byl sice navržen pro paryby, nicméně elektroreceptory disponují i mihule, mnohé skupiny ryb a obojživelníků, a dokonce i ptakořitní savci, teoreticky je tedy možné, že magnetorecepce v podobě kompasového smyslu je u nich postavena právě na tomto principu (Vácha et Němec, 2007).

2.2.2 Chemická magnetorecepce založená na vzniku radikálových párů

Tento model, podpořen experimentálními daty ze zkoumání ptáků a obojživelníků, představuje jakýsi „chemický kompas“, založený na vzájemných reakcích magneticky senzitivních radikálových párů (Wiltschko et Wiltschko, 2005). Radikálové páry vznikají v tělech organismů obvykle ve fotopigmentech, jimiž může být chlorofyl nebo například flavin, po absorpci fotonu. Vzniklou energií následně dojde k vyzdvižení elektronu z nejvyššího

obsazeného orbitalu na vyšší volný orbital, který je nejblíže. Z tohoto orbitalu si molekuly mohou elektrony mezi sebou předávat a tvořit tzv. radikálové páry (Vácha et Němec, 2007). Radikálové páry mohou být singletové, pokud volné elektrony rotují v opačném směru, nebo tripletové, jestliže rotují souhlasně – a dynamika přechodů mezi jednotlivými stavy není usměrňována ničím jiným, než magnetickým polem. Jako vhodný receptor pro tuto formu magnetorecepce se jeví molekuly fotopigmentu kryptochromu (Ritz et al., 2000; Vácha et Němec, 2007), což je flavoprotein, nacházející se v sítnici dosud zkoumaných obratlovců. Role kryptochromů v rámci magnetorecepce se odvíjí od následujícího: jejich životnost je delší než 5 μs, takže je může ovlivňovat geomagnetické pole, za další, kryptochromy pracují ve stejném absorpčním spektru, v jakém se tažní pěvci orientují podle magnetického kompasu, a v neposlední řadě buňky obsahující tento fotopigment právě během magnetické orientace pěvců vykazují aktivitu (Vácha et Němec, 2007).

Aby radikální pár fungoval jako zprostředkovatel informací poskytnutých magnetickým kompasem, zvířata musí využít skutečnosti, že singletové a tripletové radikálové páry se chemicky liší, a následně musí tyto odlišnosti porovnat v kontextu orientace (Ritz et al., 2000). Stane se tak za pomoci toho, jak jsou fotopigmenty natočeny vůči geomagnetickému poli (Vácha et Němec, 2007). Pokud tedy budeme uvažovat, že se v oku zvířat nacházejí sféricky uspořádané receptory, jejichž fotopigmenty jsou schopny vytvářet magneticky senzitivní radikálové páry, pak by vlivem zemského magnetického pole mohlo přeměnou světla docházet ke vzniku membránového potenciálu (Vácha et Němec, 2007). Ten by se projevil tvorbou charakteristických obrazců či vzorů na sítnici. Tyto obrazce, jejichž kontrast vůči okolí by závisel na magnetické intenzitě, by byly symetricky zarovnány podél osy siločar a umožnily by zvířatům detekovat směr geomagnetického pole. Absorpce fotonu by v tomto případě činila magnetorecepci procesem závislým na přítomnosti světla (Ritz et al., 2000; Vácha et Němec, 2007).

Zdá se tedy logické, aby tento model magnetorecepce využívali ti živočichové, kteří se orientují zrakem a za denního světla. Například křečci jsou ale aktivní jak v noci (Gatterman et al., 2001), tak za soumraku (Weinert et al., 2009). Malewski et al. (2018) podrobili křečíka džungarského (*Phodopus sungorus*) experimentu, ve kterém zjistili, že toto zvíře je schopné spojit si určitý magnetický směr s pozicí, v níž si staví hnízdo, a v naprosté tmě poté postavit nové hnízdo, jehož pozice (v závislosti na magnetickou cívkou posouvaném magnetickém

poli) s tou původní souhlasí. Z těchto výsledků je zřejmé, že křečík džungarský disponuje na světle nezávislým modelem magnetorecepce.

2.3 Orientace v magnetickém poli Země

Všechny tři předchozí popisované mechanismy magnetorecepce se zdají být schopné poskytovat organismům informace potřebné k orientaci. Je ale nutné si uvědomit, že tyto informace nejsou vždy stejného typu (Johnsen et al., 2005) – ve výzkumu magnetorecepce se hovoří o dvou typech informací využitelných při orientaci: zaprvé, vektor geomagnetického pole poskytuje informaci o směru, kterou lze využít jako kompas, zadruhé, celková intenzita geomagnetického pole a/nebo inklinace mohou být zdrojem informací, které by se daly aplikovat v rámci vytvoření magnetické mapy (Wiltschko et Wiltschko, 2005).

2.3.1 Magnetický kompas

To, že živočich používá k orientaci tzv. magnetický kompas, znamená, že je schopen určit směr za pomoci geomagnetického pole stanovením úhlu mezi směrem vlastního pohybu a severojižní magnetickou osou (Wiltschko et Wiltschko, 2005; Vácha et Němec, 2007). V behaviorálních experimentech je tato skutečnost potvrzena, pokud živočich reaguje na změnu pozice magnetického severu tím, že sám shodně změní směr svého pohybu (Wiltschko et Wiltschko, 2005). První důkaz orientace podle magnetického kompasu přinesl experiment s červenkou obecnou (*Erithacus rubecula*). Tento malý, v noci migrující pěvec byl testován v kruhové kleci, ve které byla pomocí magnetické cívky různě posouvána pozice magnetického severu – a pohybová aktivita testovaných jedinců těmto posunům odpovídala. (Wiltschko et al., 2011).

Testy v laboratořích s magnetickými cívkami, které umožňují nejen otáčet magnetické pole, ale také ho zesilovat, ba dokonce překlápět jeho vektorovou složku, jsou pro tento výzkum nezbytné. Bylo to právě překlopení vertikální složky magnetického pole, které přineslo následující poznatek: existují dva funkčně odlišné druhy kompasového smyslu živočichů, resp. magnetického kompasu (Vácha et Němec, 2007). Tím prvním je kompas polaritní, pomocí kterého je živočich schopen přímo rozeznat polohu severu od polohy jihu, tzn. polaritu magnetického vektoru (Wiltschko et Wiltschko, 2005; Johnsen et al., 2005). Tímto

typem kompasu disponují například lososi (*Oncorhynchus* sp.), kteří po umístění do kruhové arény s posunutou polaritou stále preferovali směr pohybu odpovídající tomu, jímž se přírodě orientují při migraci, a změna inklinace na ně neměla žádný vliv (Quinn et Brannon, 1982). Polaritním kompasem disponují i hlodavci (Marhold et al., 1997), kteří jsou v rámci savců jednou z nejprozkoumanějších skupin z hlediska výzkumu magnetorecepce (Begall et al., 2014).

V určité opozici k polaritnímu kompasu stojí kompas inklinační. Ten „ukazuje“ sever nepřímo, živočich je na základě velikosti inklinačního úhlu schopen pouze poznat směr, ve kterém se magnetický sever nachází (Johnsen et al., 2005; Vácha et Němec, 2007). Jinými slovy, polarita zde zvířatům nepomůže – to, co dokážou vyhodnotit, je, zda je inklinace kladná nebo záporná a dle toho najít sever nebo jih. Wiltschko et al. (2011) ve svém experimentu, kdy červenky a další druhy migrujících ptáků vystavili radiovým vlnám různých délek a intenzity „přetínajícím“ siločáry magnetického pole v určitých úhlech, dokázali, že tyto druhy doopravdy inklinační kompas používají. Kompasový smysl postavený na inklinaci byl potvrzen u všech (více než deseti) testovaných druhů ptáků. Při tomto pokusu bylo také prokázáno, že některé druhy potřebují k co nejefektivnějšímu využití inklinačního kompasu tu správnou vlnovou délku světla. Tak například holubi jsou nejlépe schopni využít inklinačního kompasu při vlnových délkách 550 nm, tzn. v jasném denním světle. Naproti tomu červenky, jakožto noční migranti, byly značně dezorientované, jakmile vlnová délka překročila 590 nm. Optimem pro ně pak bylo zhruba 370 nm.

2.3.2 Magnetická mapa

Značná část výzkumu magnetorecepce je věnována výše popsanému kompasovému smyslu. Protože je geomagnetické pole zdrojem předem předvídatelných informací, poskytuje také pravděpodobně informace o přibližné poloze „na mapě světa“ (Lohmann et al., 2007). Pojem „mapa“ ale není z hlediska magnetorecepce snadno definovatelný a různí autoři si ho vykládají jinak (Lohmann et Lohmann, 2006). Gould (1998) zastává stanovisko, že mapou by se měla rozumět jakákoliv informace specifikující směr, jímž se má v daném okamžiku zvíře vydat, aby dosáhlo cílové destinace. Mouritsen (2001) upřednostňuje podobný názor, a sice že mapa by měla být uvažována v tom nejširším slova smyslu a že její podstata může být velmi jednoduchá, zakládající se na zděděných znalostech koordinát nebo na fixních orientačních

bodech, které se nacházejí po migrační cestě. Naproti tomu Able (2001) navrhl, že pojem „mapa“ by se měl omezovat pouze na situace, kdy se živočich orientuje vzhledem k cíli cesty výhradně na základě informací poskytovanými tímto vzdáleným cílem.

Zkusme jednotlivé názory aplikovat na jedince karety obecné (*Caretta caretta*), živočišný druh, jenž podniká jedny z nejdelších a nejpozoruhodnějších mořských migrací (Lohmann et al., 2007). Mladé želvy migrují mezi Amerikou a Evropou a v určitých bodech kruhového proudu Atlantického oceánu náhle změní směr své pouti. Během experimentů, při nichž byly mladé želvy vystaveny stejné inklinaci a intenzitě magnetického pole jako mají příslušné body v Atlantiku, bylo zjištěno naprosto stejné chování. Protože se jedná o mladé jedince, kteří takové cesty podnikají poprvé v životě, chování musí být vrozené, tudíž odporuje poslední z teorií o tom, co vlastně znamená mapa (Lohmann et al., 2007; Vácha et Němec, 2007). Starší želvy jsou při migracích často věrné specifickým lokalitám nabízejícím potravu, do kterých se dokážou vrátit i poté, co byly experimentálně přemístěny, tudíž prokazují jednoznačnou schopnost cíleně se dostat na předem určené místo (Avens et Lohmann, 2004).

Model magnetické mapy a jejího využití živočichy blízce souvisí s inklinací, s tím rozdílem, že mimo znalosti inklinačního úhlu vyžaduje také přesné určení úhlu sklonu vůči svislé ose, tzn. vůči gravitaci. K tomu, aby tento model fungoval, musí tělo živočicha obsahovat receptor schopný detekce sklonu svislé osy těla vůči horizontální rovině. Například čolci umí reagovat na změny sklonu roviny (podložky) menší jednoho stupně (Vácha et Němec, 2007).

2.3.3 Magnetický imprinting

Lohmann a jeho kolegové v roce 2008 představili nesmírně zajímavou hypotézu navrhující odpověď na otázku, jak se vodní živočichové jako jsou želvy nebo lososi dokážou vracet do svých rodišť, aby se zde následně rozmnožili – magnetický imprinting. Je to složitá záležitost s největší pravděpodobností v sobě zahrnující jak inklinační kompas, tzn. práci s intenzitou magnetického pole, tak i využívání mapového smyslu.

Kromě již popisované karety obecné podnikají ohromně dlouhé a vyčerpávající výpravy do svých rodišť také lososi. Řeky, ve kterých se lososi třou, se vlévají do moří podél pobřeží kontinentů nebo ostrovů (např. Japonska). Podobně i mořské karety kladou vajíčka na pláže Mexika, Kostariky, jihovýchodu USA, atd. Vzhledem k tomu, že různě lokalizovaná pobřeží

disponují odlišným stupněm inklinace, je velice možné, že jak lososi, tak karety si imprintují toto specifické geomagnetické pole, konkrétně inklinační úhel, a tuto informaci využijí později v životě, aby je nasměrovala zpět do jejich rodišť. Druhá, složitější varianta, uvažuje imprinting jak inklinačního úhlu, tak intenzity geomagnetického pole (Lohmann et al., 2008).

Jak již bylo řečeno v úvodní kapitole o magnetorecepci, magnetické pole Země, resp. severní magnetický pól, nesetrvává ve stálé pozici (Able, 1994). Nicméně tato skutečnost nezabraňuje ani lososům, ani karetám, aby se navraceli přímo nebo alespoň do blízkosti svých rodných končin (Lohmann et al., 2008). Případné zbloudění, ke kterému dochází na pravidelné bázi, hraje důležitou roli v zachování populace (Ioannidou et O'Hanley, 2019).

2.3.4 Spontánní magnetický alignment

Zatímco význam magnetorecepce jakožto pomocníka při prostorové orientaci na velké vzdálenosti je všeobecně dobře přijímán, role spontánního magnetického alignmentu (SMA, do češtiny by se dalo přeložit jako spontánní poziční chování) zůstává spíše nejasný. To, kam směřuje osa těl živočichů při rozličných aktivitách, ať už se jedná o odpočinek, příjem potravy, lov, defekaci nebo jiné chování, s největší pravděpodobností není náhodné. Lze předpokládat, že taková určitá pozice skýtá za jistých podmínek zvířeti řadu výhod a že tato pozice může být zvolena v závislosti na mnoha faktorech – jedinec osu svého těla může natočit například podle zdroje tepla, světla, směru vanutí větru, ale i ve směru toku vodního proudu (Begall et al., 2013).

Zarovnání, kterému se budeme věnovat podrobněji, je odpovědí na vlastnosti geomagnetického pole. SMA představuje tu nejjednodušší reakci na geomagnetické pole Země – je to chování, při němž živočich spontánně nasměruje osu svého těla ve směru geomagnetických siločar planety. Funkcí SMA není dostat se do nějakého vzdáleného bodu, cíle cesty, jako je tomu při využívání magnetického kompasu. Jedná se o fixní reakci – přemístění zvířete do jiné lokality jeho preference v nasměrování osy těla nezmění (Begall et al., 2013). Obratlovci vykazující SMA své tělo typicky směřují podél severojižní magnetické osy, tzn. bimodálně (hlava směřuje na sever či jih), kdežto bezobratlí vykazují kvadrimodální preference, tj. zarovnávají se buď bimodálně, nebo kvadrimodálně (hlava směřuje na sever, jih, východ či západ), (Painter et al., 2013; Bega let al., 2013). Kvadrimodální chování při

odpočinku bylo experimentálně prokázáno například u švábů amerických (*Periplaneta americana*), a to jak v přirozeném, tak posunutém magnetickém poli (Vácha et al., 2010). Kvadrimodální SMA prokázali i Painter et al. (2013) při pokusu s octomilkou obecnou (*Drosophila melanogaster*).

K jakému účelu živočichové SMA používají, je předmětem výzkumu. Smysluplnou variantou by mohlo být využití SMA při orientaci v terénu, kdy by známá okolní krajina byla jednodušeji rozeznatelná a nové prostředí snadněji zapamatovatelné, pokud by živočich systematicky používal pravidlo konstantního zarovnání (Painter, 2017). Mnohý hmyz se v terénu orientuje tím, že vzor okolního prostředí zobrazený na sítnici spojí s již v mozku uloženým obrazem či vzorem, který si vštípil při předchozím průzkumu (Collett, 1992). Včely medonosné (*Apis mellifera*) se při průzkumném chování v neznámém prostředí orientují zarovnané v konzistentním magnetickém směru. Na základě experimentálních dat se dá předpokládat, že geomagnetické pole Země včelám a přinejmenším i ostatním blanokřídlým doopravdy s prostorovou orientací pomáhá (Collett et Baron, 1994).

Z předchozích kapitol víme, že smysl magnetického kompasu je nesmírně důležitý u migrujících druhů ryb. Co se ryb a SMA týče, Hart a jeho kolegové v roce 2012 podnikli zajímavé měření alignmentu kaprů jakožto nemigrující ryby na českých vánočních trzích. Kapr obecný (*Cyprinus Carpio*) je na trzích prodáván v kruhových kádích, což je ideální prostředí pro měření SMA. Z pokusu byly vyřazeny kádě, v nichž byl produkován proud vody, protože ovlivnění ryb tímto faktorem se ukázalo jako signifikantní. V kádích, ve kterých voda neproudila, bylo u kaprů prokázáno zarovnávání těl podél severojižní osy. Význam takového chování pro ryby může spočívat ve sjednocení pohybu hejna a obecném usnadnění orientace.

Kromě již jednou zmíněných čolků byli ohledně magnetorecepce testováni i další obojživelníci, mimo jiné pulci skokana volského (*Lithobates catesbeianus*). Freak et Phillips (2005) testovali jejich orientaci v závislosti na změnách ve světelném spektru: pod plným spektrem (vlnové délky nad 500 nm) pulci vykazovali bimodální magnetickou orientaci dle osy y (0-180°), zatímco při kratších vlnových délkách do 500 nm bylo zarovnání jejich těl na tuto osu kolmé. Na různé světelné spektrum různě reagovali také čolci. Tyto reakce by mohly být shrnuty následovně: krátké a dlouhé vlnové délky světla jakožto „protikladné“ zdroje

světelného záření vyúsťují ve vzájemně komplementární, bimodální odpověď jedince v orientaci osy těla. Konzistentní s touto hypotézou je fakt, že střední vlnové délky (okolo 475 nm), které by měly účinky krátkých a dlouhých délek vyrušit a tím pádem eliminovat směrovou odpověď, způsobila dezorientaci jedinců (Phillips et Borland, 1992).

Otázka ptačí magnetorecepce se stejně jako u ryb nezabývá pouze migračním chováním. Využít SMA mohou ptáci i při chování, jako je například přistávání. Aby pták mohl úspěšně přistát, musí správně vyhodnotit nejen svou rychlost, vzdálenost od „přistávací plochy" a úhel přistání, ale navíc ještě nesmí zkřížit dráhu jinému jedinci, obzvláště pokud hovoříme o přistávání v hejnu. Pro vodní ptactvo, jako jsou kachny nebo husy, situaci ještě ztěžuje fakt, že přistávání na vodě s sebou přináší nutnost delší brzdné dráhy. Vodní ptactvo často předtím, než přistane, nad vodní plochou několikrát zakrouží, nejspíš aby zhodnotilo situaci, a k samotnému přistání tak obvykle nedochází ve směru, v jakém k vodní ploše ptáci přiletěli. Pokud nevane vítr, což je jeden z hlavních faktorů určujících směr přistání, a pokud panují dobré světelné podmínky, nabízí se úvaha, že vodítkem k bezpečnému přistávání vodního ptactva může být zemské geomagnetické pole. A opravdu, zaznamenáním směrů přistávajícího vodního ptactva bylo zjištěno, že signifikantní většina ptáků volila pro přistání směr podél severojižní osy magnetického pole Země, bez ohledu na to, odkud přiletěla (Hart et al., 2013).

Že se ptáci při orientování řídí více vzájemně se doplňujícími faktory včetně geomagnetického pole, dokazuje i pozorování alignmentu čtyř druhů plameňáků (*Phoenicopteriformes*) v zoologických zahradách i ve volné přírodě: Nováková et al. (2017) přišli se zjištěním, že během stacionárních činností plameňáci směřují osu svých těl podél severojižní magnetické osy. Toto poziční chování bylo výraznější pod zataženou oblohou než pod oblohou vyjasněnou, je tudíž na místě předpokládat, že SMA plameňáků (za bezvětrných podmínek) je výsledkem dvou součinně pracujících modelů: magnetického alignmentu usměrňovaným sluncem jakožto zdrojem světla, nebo opačně.

SMA vykazují i zkoumané druhy savců, například hlodavci při stavbě hnízda. Marhold et al. (1997) provedli experiment v kruhové aréně se zambijským rypošem lysým (*Cryptomys* spp.) a objevili navazující: při testech v přirozeném magnetickém poli si rypoši svá hnízda stavěli v jihovýchodním sektoru arény. Poté, co bylo pole uměle otočeno o 120° nebo 180°, rypoši

preferovali tomuto otočení souhlasnou část arény. A protože změna inklinace neměla na pozici hnízda vliv, rypoši s největší pravděpodobností využívali polarity k určení pozice hnízda v aréně. Z faktu, že toto chování ale není podmíněno směřováním do nějakého konkrétního bodu na mapě, jako je tomu u migrujících zvířat, vyvstává následující otázka: je stavba hnízda rypoši postavena na kompasovém smyslu, nebo SMA? Další výzkumy rypošů v této záležitosti nepřináší jasnou odpověď, ale dvě možné hypotézy: směrové preference rypošů se zakládají buď na naučeném chování, nebo jsou specifické pro druh/populaci (Begall et al., 2013).

Mezi dalšími savci, testovanými v rámci SMA, je liška obecná (*Vulpes vulpes*). Lišky při lovu malých zvířat, zejména hlodavců, vykazují specifické chování – tzv. myškování, při kterém liška vyskočí do výšky a překvapí kořist ze shora. Číhající lišky mají tendence směřovat tyto skoky zhruba směrem na severovýchod, a pokud loví ve vysoké trávě nebo na sněhu, úspěch je úzce spjat s nasměrováním skoku v severním směru. Pokud lišky nasměrují svá těla podle jiné osy, lov bývá velmi často neúspěšný (Červený et al., 2011).

Červený et al. se v roce 2017 věnovali výzkumu pozičního chování u prasete divokého (*Sus scrofa*) a prasete savanového (*Phacochoerus africanus*). Prasata divoká v tlupách vykazovala signifikatní orientaci v severojižním směru a stejně tak byly orientované jejich zálehy. Výsledky u prasat savanových byly identické. V neposlední řadě se experimenty SMA týkají i přežvýkavců – domácí dobytek, ale i divoká spárkatá zvěř jako srnec obecný (*Capreolus capreolus*) a jelen evropský (*Cervus elaphus*), zarovnávají svá těla při odpočinku nebo pastvě zhruba v severojižní magnetické ose (Begall et al., 2008).

2.3.5 Testy dvou-výběrové preference

Metodika experimentu, na němž je postavena tato bakalářská práce, je inspirována testy dvou-výběrové preference, při kterých je ověřováno spontánní chování živočicha v přítomnosti magnetu a jeho nemagnetické náhražky coby kontrolního objektu (Malewski et al., 2018). Dobrým ilustračním příkladem těchto experimentů je ten, jejž provedli Ernst et Lohmann (2018). Jedincům langusty karibské (*Panulirus argus*) byla nabídnuta možnost usídlit buď v tom uměle vytvořeném hnízdě, na němž byl umístěn silný magnet, nebo v tom, na kterém byla umístěna jeho nemagnetická náhrada. Signifikantní většina langust si vybrala

hnízdo s nemagnetickým objektem, vykazujíce tedy tendence vyhýbat se prostředí ovlivněném magnetickou anomálií.

Fenomén dvou-výběrové preference blíže specifikovali Malewski et al. (2018), když ji popsali jako tzv. magnetic object assay (MOA, test s magnetickým objektem). Následně ji otestovali na pokusu s hlodavci, který si později přiblížíme.

Metodika testování magnetorecepce zvířat bývá často nesmírně zdlouhavá i vzhledem k faktu, že „pouhým" výstupem je ověření, zda zvíře magnetické pole vnímá či nevnímá, a že přesný mechanismus v pozadí tohoto smyslu zatím zjistitelný není. MOA představuje oproti klasickým postupům mnohem rychlejší způsob, jak zjistit, zda je živočich magnetosenzitivní. Inspirací k vytvoření MOA byly experimenty s delfíny skákavými (*Tursiops truncatus*), (Malewski et al., 2018). V nich Kremers et al. (2014) v akváriu vystavili volně se pohybující hejno delfínů magnetu a demagnetizované, jinak ale naprosto identické náhražce coby kontrolnímu objektu. Výsledkem tohoto pokusu bylo, že delfíni připlouvali k magnetu s kratší latencí, tj. po kratší době než ke kontrolnímu objektu.

V experimentu se dvěma druhy rypoše (*Fukomys anselli, Heterocephalus glaber*) a laboratorními myšmi C57BL/6J Malewski et al. (2018) zvolili následující postup: zvířeti je v testovací aréně v první fázi představen (silný) magnet, následně dojde ke kontrolnímu testu s demagnetizovaným magnetem (slabý magnet). Experiment měl dvě verze – první, tzv. „otevřená MOA", sestávala z čtvercové arény, do jejíhož středu byl umístěn silný/slabý magnet. Předmětem analýzy byla latence, počet fyzických kontaktů s objektem a doba setrvání v experimentální zóně silného/slabého magnetu (do 1,5 cm od objektu). Druhou verzí byla tzv. „dvou-výběrová MOA", při níž byly dva transparentní čtvercové boxy spojeny tunelem. Silný/slabý magnet byl umístěn náhodně do jednoho z boxů, testované zvíře setrvalo dvě minuty v tunelu, než se na obou jeho stranách zároveň otevřela posuvná dvířka. Předmětem analýzy byla stále latence, první volba a celkový čas strávený v jednotlivých boxech. Výsledky vypadaly následovně: latence ani počet kontaktů se pro obě verze nelišily, nicméně všechny druhy testovaných zvířat strávily signifikantně delší dobu v přítomnosti silného magnetu, vykazující tím k němu preferenci. MOA tudíž představuje jednoduchou, nenákladnou a rychlou metodu, kterou by se dalo ověřit, zda jsou živočichové schopni vnímat magnetický stimul.

2.3.6 Magnetorecepce u ryb

Jedním z nejčastěji používaných laboratorních živočichů pro výzkum např. toxikologie je dánio pruhované (*Danio rerio*), přirozeně se vyskytující ve východní Indii (Takebe et al., 2012). To, že by dánio mohlo být magnetosenzitivní, bylo už navrženo (Shcherbakov et al., 2005). Předchozí pokusy byly prováděny s párem magnetických cívek umístěných blízko experimentální zóny, nelze tudíž vyloučit, že toto prostředí bylo ovlivněné elektrickými signály produkovanými samotnými cívkami. Cívky navíc vytvářely magnetické pole mnohem silnější, než je to zemské. Proto byl proveden experiment, ve kterém byly dvě skupiny dánia pruhovaného testovány v magnetickém poli intenzitou odpovídajícímu geomagnetickému poli Země. Jedinci z první skupiny, potomci více rodičovských párů, prokázali signifikantní preferenci pro magnetický severovýchod a jihozápad, kdežto jedinci z druhé skupiny, kteří sdíleli matku, preferovali magnetický jihovýchod a severozápad. Zdá se nepravděpodobné, že by byly výsledky ovlivněny např. pohlavím nebo věkem jedinců. Rozdílné preference pro magnetický směr dánia tak může vysvětlovat jeho etologie. Během období dešťů dániové migrují za potravou z domovských řek do zaplavených území a zpět, když voda v zavodněných lokalitách opadá. Schopnost rozeznávat světové strany jim může pomoci při orientaci mezi těmito dvěma habitaty. Druhou variantou je únik před predátory – hejno ryb se při úhybném manévru rozdělí do několika menších skupin v různých směrech, čímž dojde ke zmatení predátora, a následně se opět spojí v jedno velké hejno (Takebe et al., 2012). Už jen stručně k dalšímu experimentu s dániem pruhovaným: Osipova et al. (2016) popisují vliv geomagnetického pole Země a jeho modifikace nejen na orientaci jedinců tohoto druhu, ale i na jejich pohybovou aktivitu. Ryby byly umístěny do čtyřramenného bludiště ve tvaru „plus“. Většina ryb se nejdelší čas zdržovala na západovýchodní ose, po otočení horizontální složky magnetického pole začaly ryby preferovat linii sever – východ a jejich pohybová aktivita se výrazně zvýšila, což mohlo být způsobeno stresem vyplývajícím ze změněných magnetických podmínek prostředí.

Otázky v oblasti rybí magnetorecepce zůstávají otevřené nejen v rámci různých druhů, ale i různých životních stádií (O'Connor et Muheim, 2017). Rozsáhlé zastoupení mořských organismů prožívá část života v larválním stádiu a dospělost tráví usazeným způsobem na jedné lokalitě – to se týká zejména druhů korálových útesů. Larvy těchto druhů ryb jsou

pelagické, pohybují se v otevřeném oceánu, což s sebou přináší řadu náročných výzev v podobě neustále se pohybující vodní masy a výrazného nedostatku orientačních bodů. Aby larvy dokončily svůj vývoj, je pro ně bezpodmínečně nutné dostat se do demersálních poloh moře (Leis et al., 2011). O'Connor et Muheim (2017) při behaviorálním experimentu ověřovali efekt manipulace s magnetickým polem na larvy sapína černoprsého (*Chromis atripectoralis*) odchycených z útesů obklopující australský Lizard Island (součást Velkého bariérového útesu). Bez jakýchkoliv vizuálních vodítek larvy reagovaly na devadesátistupňový posun horizontální složky magnetického pole, tudíž potvrdily domněnku, že při orientaci využívají magnetický kompas.

Informacemi poskytnutými geomagnetickým polem se při orientaci v trojrozměrném prostoru řídí též mladí jedinci lososa čavyča (*Oncorhynchus tshawytscha*), vyplouvající z oblázkových úkrytů na dně vodních toků (Putman et al., 2018). Dospělé samice lososovitých ryb kladou oplodněné jikry do „kapes" ve štěrku na dně řek. Za několik měsíců dojde k líhnutí a mohou uběhnout opět až měsíce, než se mladé ryby dostanou do otevřených vod (Mason, 1976). Vertikální pohyb, tzn. pryč z úkrytu, vlastně v oblastech severní zeměpisné šířky znamená pohyb napříč siločárami geomagnetického pole Země, kdežto pohyb podél těchto siločar znamená, že ryba plave směrem ke dnu. Aby ověřili tuto hypotézu, Putman et al. (2018) testovali mladé jedince lososa čavyča 1) v přirozeném magnetickém poli, 2) zesíleném magnetickém poli a 3) v poli s otočenou vertikální složkou. Ve všech případech ryby plavaly směrem vzhůru, nicméně v poli s otočenou vertikální složkou ryby nedosáhly stejné výšky jako v předchozích dvou případech, což by mohlo naznačovat vliv geomagnetických sil. Je ale také možné, že jedinci pro rozpoznání směru vzhůru využívali i gravitační síly a olfaktorických informací. Ryby navíc vlastně neměly jinou možnost, než plavat směrem nahoru, poněvadž byly primárně umisťovány na dno experimentální nádoby. Další výzkum pro tento typ chování by byl na místě.

Rybářské sítě nabízejí rybám možnost výběru chování – buď vplavou dovnitř, nebo se jim vyhnou. Experimenty se sítěmi, do jejichž vstupu byly přimontovány magnety, ukázaly, že jak dospělé, tak mladé ryby volily spíše první možnost, a že tedy byly přitahovány uměle produkovaným magnetickým polem, jehož intenzita převyšovala intenzitu zemského geomagnetického pole (Formicki et al., 2002). Studie Formickiho et al. (2004) se o pár let později opět zaměřila na testování hypotézy, podle které magnety umístěné v rybářských

sítích při pobřežních habitatech mohou zvýšit procento ulovených ryb. Všechny sítě disponovaly kruhovým vstupem s magnety po obvodu plus dalším „magnetickým kruhem“ hlouběji v síti. Jedna ze tří sítí v sobě měla přimontované gumové náhražky magnetu pro kontrolní test. Během experimentu bylo do sítí umístěných do polského jezera Krzemień chyceno celkem 4617 ryb různých druhů, mezi nimiž byl okoun (*Perca*), štika (*Esox*), plotice (*Rutilus*), perlín (*Scardinius*), ouklej (*Alburnus*), cejn (*Abramis*), úhoř (*Eel*) a ježdík (*Gymnocephalus*). Do kontrolních sítí se chytilo 25,3 % celkového množství ryb, pouze úhoři preferovali nemagnetické sítě (necelých 39 % oproti 30 % v magnetických sítích). Je možné, že v okamžiku, kdy ryba vplave do zóny s magnetickým polem ovlivněným magnety při vstupu, podlehne zvědavosti a pokračuje hlouběji do sítě. Toto průzkumné chování může být ještě podmíněno druhým kruhem, v němž mají přimontované magnety obrácenou polarizaci (severní pól magnetu směřuje na opačnou stranu, než u vstupního kruhu). Tato studie by v sobě mohla dost dobře nést význam pro rybářský průmysl, protože magnety jako součásti sítí by mohly zvýšit (či naopak snížit v závislosti na loveném druhu ryb) množství úlovku (Formicky et al., 2004).

3 Metodika

3.1 Studovaný druh

Druhem testovaným v rámci bakalářské práce byl asexuální (gynogenetický) triploidní hybrid sekavce podunajského (*Cobitis elongatoides*) se sekavcem černomořským (*Cobitis tanaitica*).

Sekavec podunajský se na území České republiky vyskytuje buď v druhově čistých populacích, nebo v tzv. hybridních diploidně polyploidních (HDP) komplexech. Rozlišit od sebe tyto dva jedince je možné pouze za pomoci genetické analýzy. HDP komplex, na němž se podílí sekavec černomořský, se u nás vyskytuje v povodí Moravy a Dyje. Tento druh je uveden jako ohrožený v Červeném seznamu ohrožených druhů České republiky (Anonymus, 2007)

3.2 Testovaní jedinci a prostory držení

V březnu 2019 bylo v laboratořích FLD ČZU v Praze testováno celkem 19 jedinců sekavců, z toho 10 samic a 9 samců. Všichni jedinci byli v rámci výzkumu magnetorecepce zapůjčeni Ostravskou univerzitou. Akvária, ve kterých byly ryby chovány mezi experimenty, se nacházela v prostorách akvarijních chovů FŽP ČZU v Praze a podmínky držení byly prokonzultovány s odborníkem na chov ryb. Z praktických důvodů byli samci a samice drženi odděleně.

3.3 Test dvou-výběrové preference

Sekavci byli testováni v průhledných plastových nádobách obdélníkového tvaru o rozměrech 49x32 cm. Každá nádoba obsahovala při testu 15 l z předchozího dne odstáté vody. Každé rybě bylo po umístění do testovací nádoby ponecháno 15 minut na aklimatizaci, poté byla ryba sledována po dobu jedné hodiny tím způsobem, že každých třicet vteřin byla pořízena fotografie a zaznamenána pozice sekavce v testovací nádobě – zda se nacházel v levé či pravé polovině nádoby (pokud se např. sekavec nacházel v pravé polovině, byla tato strana označena jako „1“, levá strana byla označena jako „0“; Obrázek 1). Pozice magnetu byla

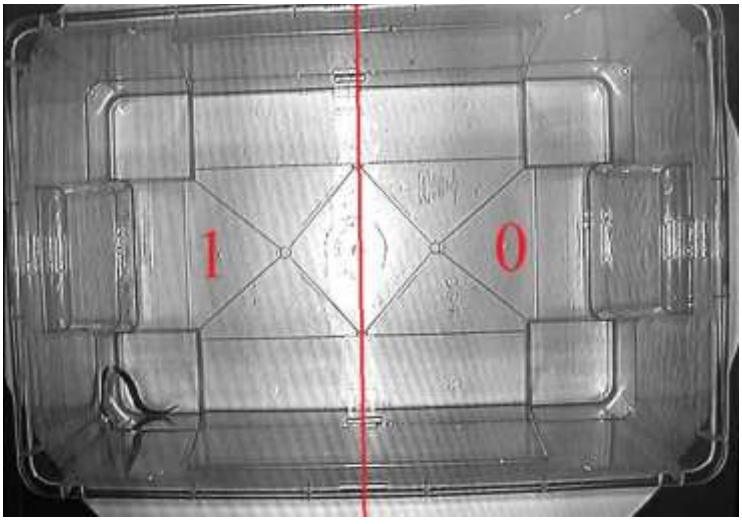
zaznamenána a z praktických důvodů zohledněna až při zanášení dat do excelové tabulky (Tabulka 1). Pro každou rybu bylo zaznamenáno celkem 120 pozic.

Každý sekavec prošel testem s magnetem a testem kontrolním, tzn. bez magnetu – oba typy testů probíhaly ve tmě. Při testech s magnetem byl neodymový magnet o rozměrech 1,5x10x1 cm umístěn pod speciálně upravenou desku stolu, aby ho ryba při umisťování do testovací nádoby nemohla případně zpozorovat. Magnet byl při každém druhém testu přesouván na opačnou stranu testovací nádoby, čímž se předešlo případnému vlivu komory. Po každém testu byla testovací nádoba a všechny použité pomůcky umyty.

Statistická analýza byla provedena v programu RStudio. Pozice sekavců byly vyhodnoceny na základě zaznamenaných „1“ na levé a pravé straně testovací nádoby porovnáním testů s magnetem a testů bez magnetu.

Male ID	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
1 = fish on side with magnet 0 = fish on side without magnet	0	0	1	1	1	1	0	0	NA
	0	0	0	0	1	0	0	0	NA
	1	1	0	0	1	1	0	1	NA
	1	1	0	0	1	0	0	1	NA
	0	1	1	1	1	0	0	0	NA
	0	0	1	1	1	0	0	0	NA
	0	0	0	0	1	0	1	1	NA
	1	1	0	1	1	1	0	1	NA
	1	0	0	1	1	0	1	1	NA
	1	1	0	1	1	1	1	0	NA
	0	1	0	1	1	1	1	1	NA
	0	1	0	1	1	0	1	0	NA
	1	0	1	1	1	1	1	1	NA
	1	1	0	1	1	1	1	0	NA
	0	0	1	1	1	1	0	1	NA

Tabulka 1 Experimentální data zanesená do tabulky (samci, test s magnetem). 1 = pozice jedince na straně nádoby s magnetem, 0 = pozice jedince na straně nádoby bez magnetu, NA = neplatná data



Obrázek 1 Způsob zaznamenání pozice jedince

4 Výsledky

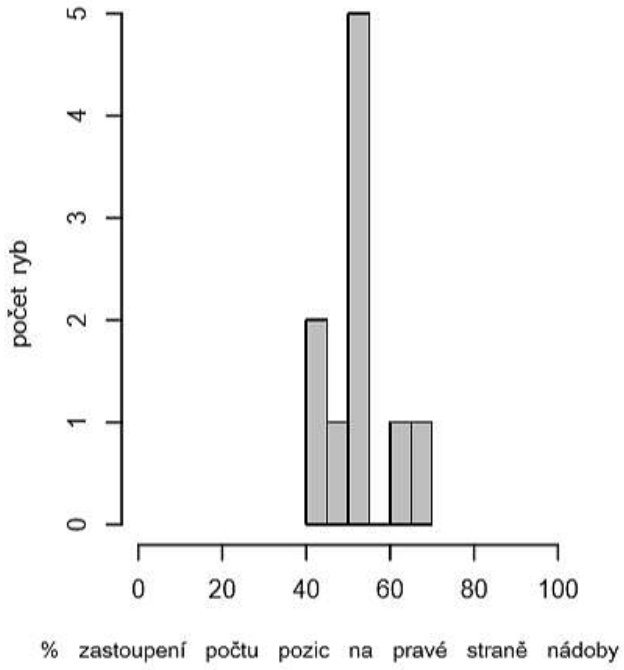
4.1 Testy bez magnetu

Testy bez magnetu byly vyhodnoceny vzhledem k počtu výskytů ryb na pravé straně nádoby. Protože tato data nemohla být porovnána s daty získanými z testů s magnetem (v těch byly vyhodnocovány pozice ryb vůči pozici magnetu), „magnetická“ data byla vyhodnocena na základě pozice ryby vpravo nezávisle na tom, kde se nacházel magnet (prostřední grafy Příloh 1-3).

4.1.1 Samice

Z celkového počtu 120 měření na jednoho jedince strávilo v pravé polovině testovací nádoby:

- 2 samice 40 – 45 % času (48 – 54 zaznamenaných pozic)
- 1 samice 45 – 50 % času (54 – 60 zaznamenaných pozic)
- 5 samic 50 – 55 % času (60 – 66 zaznamenaných pozic)
- 1 samice 60 – 65 % času (72 – 78 zaznamenaných pozic)
- 1 samice 65 – 70 % času (78 – 84 zaznamenaných pozic)



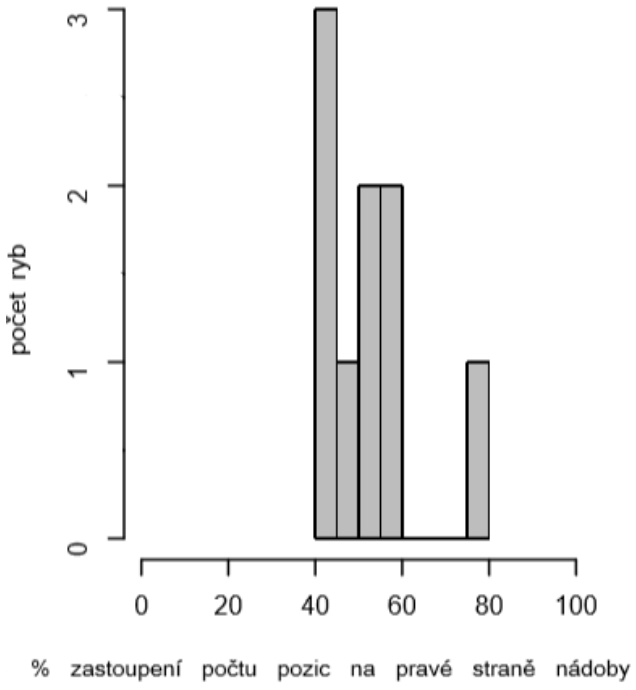
Obrázek 2 Pozice samic v nádobě bez magnetu

4.1.2 Samci

Z celkového počtu 120 měření na jednoho jedince strávilo v pravé polovině testovací nádoby:

- 3 samci 40 – 45 % času (48 – 54 zaznamenaných pozic)
- 1 samec 45 – 50 % času (54 – 60 zaznamenaných pozic)
- 2 samci 50 – 55 % času (60 – 66 zaznamenaných pozic)
- 2 samci 55 – 60 % času (66 – 72 zaznamenaných pozic)
- 1 samec 75 – 80 % času (90 – 96 zaznamenaných pozic)

Jeden ze samců zůstal po celou dobu testu uprostřed testovací nádoby, tato data nebyla do vyhodnocení započítána.

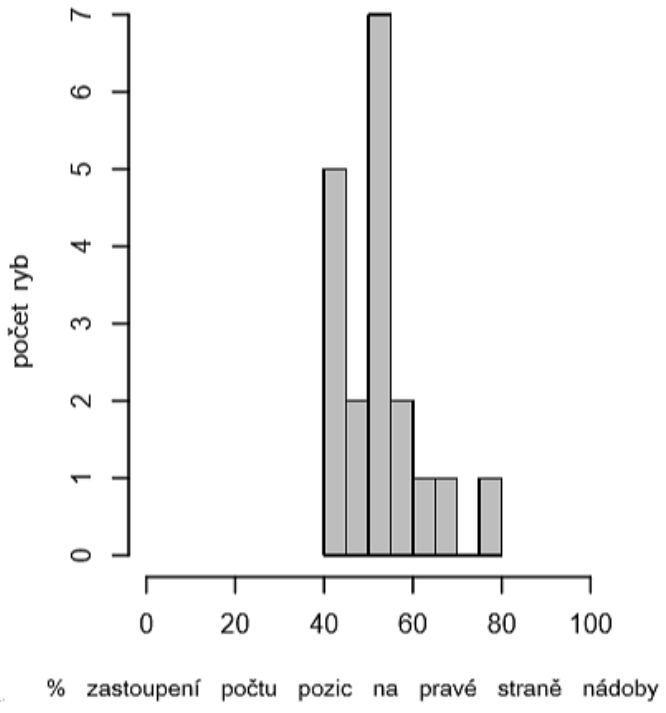


Obrázek 3 Pozice samců v nádobě bez magnetu

4.1.3 Obě pohlaví

Z celkového počtu 120 měření na jednoho jedince strávilo pravé polovině testovací nádoby:

- 5 jedinců 40 – 45 % času (48 – 54 zaznamenaných pozic)
- 2 jedinci 45 – 50 % času (54 – 60 zaznamenaných pozic)
- 7 jedinců 50 – 55 % času (60 – 66 zaznamenaných pozic)
- 2 jedinci 55 – 60 % času (66 – 72 zaznamenaných pozic)
- 1 jedinec 60 – 65 % času (66 – 78 zaznamenaných pozic)
- 1 jedinec 65 – 70 % času (78 – 84 zaznamenaných pozic)
- 1 jedinec 75 – 80 % času (90 – 96 zaznamenaných pozic)



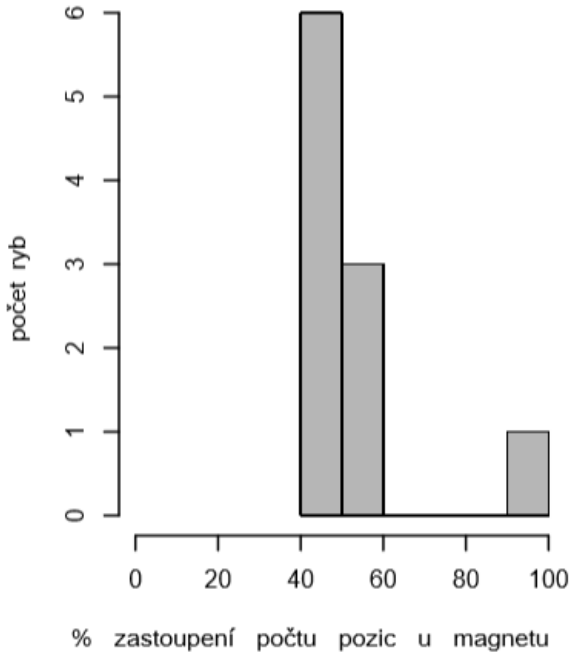
Obrázek 4 Pozice ryb v nádobě bez magnetu

4.2 Testy s magnetem

4.2.1 Samice

Z celkového počtu 120 měření na jednoho jedince strávilo v přítomnosti magnetu:

- 6 samic 40 – 50 % času (48 – 60 zaznamenaných pozic)
- 3 samice 50 – 60 % času (60 – 72 zaznamenaných pozic)
- 1 samice 90 – 100 % času (109 – 120 zaznamenaných pozic)

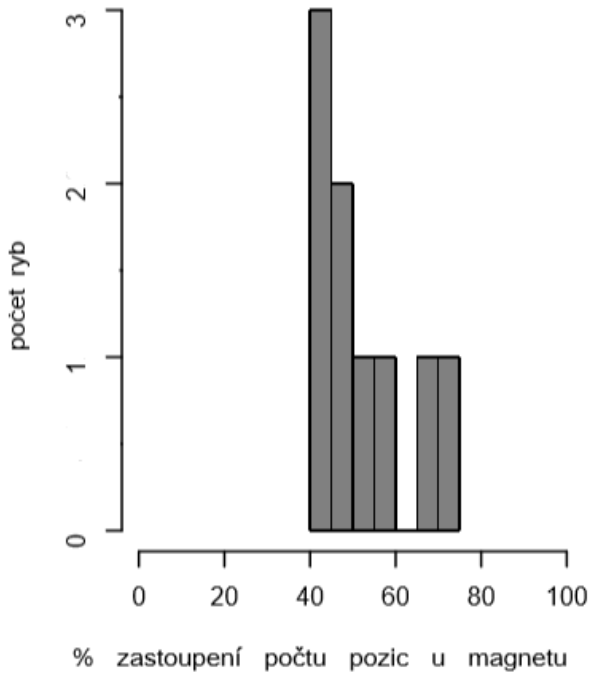


Obrázek 5 Pozice samic v nádobě s magnetem

4.2.2 Samci

Z celkového počtu 120 měření na jednoho jedince strávilo v přítomnosti magnetu:

- 3 samci 40 – 45 % času (48 – 54 zaznamenaných pozic)
- 2 samci 45 – 50 % času (54 – 60 zaznamenaných pozic)
- 1 samec 50 – 55 % času (60 – 66 zaznamenaných pozic)
- 1 samec 55 – 60 % času (66 – 72 zaznamenaných pozic)
- 1 samec 65 – 70 % času (78 – 84 zaznamenaných pozic)
- 1 samec 70 – 75 % času (84 – 90 zaznamenaných pozic)

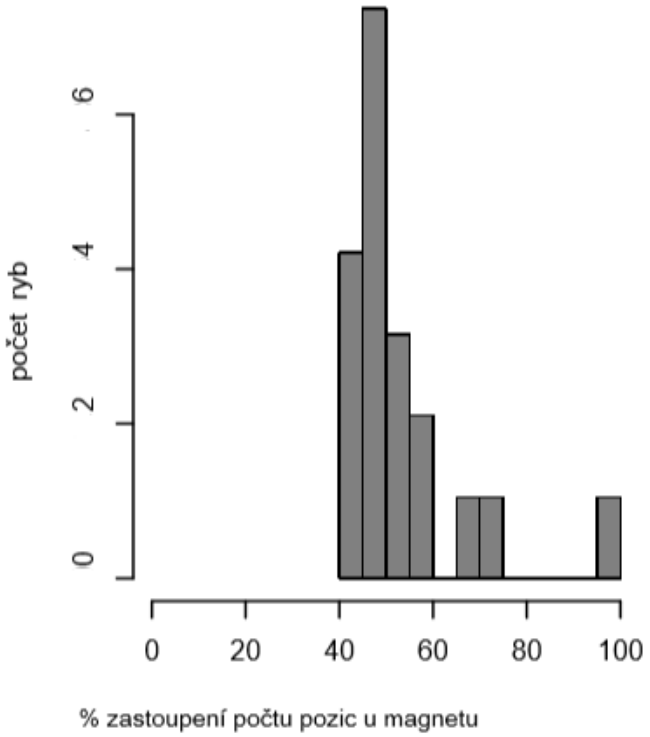


Obrázek 6 Pozice samců v nádobě s magnetem

4.2.3 Obě pohlaví

Z celkového počtu 120 měření na jednoho jedince strávilo v přítomnosti magnetu bez ohledu na pohlaví:

- 4 jedinci 40 – 45 % času (48 – 54 zaznamenaných pozic)
- 7 jedinců 45 – 50 % času (54 – 60 zaznamenaných pozic)
- 3 jedinci 50 – 55 % času (60 – 66 zaznamenaných pozic)
- 2 jedinci 55 – 60 % času (66 – 72 zaznamenaných pozic)
- 1 jedinec 65 – 70 % času (78 – 84 % zaznamenaných pozic)
- 1 jedinec 70 – 75 % času (84 – 90 % zaznamenaných pozic)
- 1 jedinec 95 – 100 % času (114 – 120 zaznamenaných pozic)



Obrázek 7 Pozice ryb v nádobě s magnetem

4.3 Shrnutí výsledků

Z testů bez magnetu (obrázek č. 4) je patrné, že ryby volily pozici v testovací nádobě spíše náhodně, křivka grafu se blíží náhodnému rozdělení. Porovnání výsledků zaznamenaných pozic vůči magnetu (obrázek č. 7) ovšem neprokázalo žádné signifikantní rozdíly v reakci sekavců na přítomnost magnetu, tzn., zda preferovali pobyt v jeho přítomnosti, nebo se mu snažili vyhnout. Na individuální úrovni lze nicméně vypozorovat tendence k preferenci prostředí ovlivněnému magnetem, nebo naopak snahu se mu vyhnout.

5 Diskuze

Výsledky s jistotou neprokázaly, zda se sekavci snaží vyhnout vlivu magnetu, nebo ho naopak preferují. Co ale výsledky ukazují, je, že sekavci při testech s magnetem nevykazovali náhodné rozmístění. Naopak, vidět byla lehká tendence se magnetu vyhýbat – většina ryb, tj. 11 z 19, strávila v přítomnosti magnetu pouhých 40 % času, jen jedna ryba (samice) se pohybovala v zóně jeho vlivu po celou dobu testu, zbylých sedm ryb strávilo v jeho přítomnosti mezi 50 – 70 % z celkového času.

Předchozí testy dvou-výběrové preference přinesly rozdílné výsledky v tom smyslu, zda zvíře vliv magnetu preferovalo, či se mu vyhýbalo. Pokus Ernsta et Lohmanna (2018), ve kterém si měly langusty vybrat hnízdo nacházející se ve vlivu/mimo vliv magnetu, ukázal, že langusty se magnetické anomálii vyhýbají. Experiment s rypoši naopak prokázal, že tato zvířata strávila signifikantně delší dobu v přítomnosti magnetu (Malewski et al., 2018), delfíni připlouvali k magnetickému objektu rychleji než k nemagnetickému (Kremers et al., 2014) a konečně pokus s rybářskými sítěmi se zabudovanými magnety při vstupu ukázal, že ryby byly těmito sítěmi přitahovány a vplouvaly do nich ve větším množství, než do sítí nemagnetických (Formicki et al., 2004). Ač se chování jednotlivých živočišných druhů více či méně lišilo, jedno je jasné – všechny případy prokázaly vliv magnetu na spontánní reakci organismu, tudíž potvrdily přinejmenším jeho schopnost magnetické pole detekovat.

Nabízí se tedy otázka, proč se tak nestalo i při experimentu se sekavci. Hypotéza, že sekavci nejsou magnetosenzitivní, je na místě, ale jeví se jako nepravděpodobná. Živočichové mohou „číst“ geomagnetické pole Země na základě celkové intenzity a/nebo inklinačního úhlu (Wiltschko et Wiltschko, 2005). To samé se dá říci o poli produkovaném magnetem, s tím rozdílem, že takové magnetické pole disponuje velmi silným gradientem intenzity a inklinace na velice krátkou vzdálenost. Detekovatelnými složkami magnetického pole by tudíž mohly být jak samotná inklinace a intenzita, tak jejich gradienty (Ernst et Lohmann, 2018). V nádobě, ve které byli sekavci testováni, bylo na jedné straně produkováno pole mnohonásobně silnější, než je to přirozené, a na straně druhé bylo magnetické pole naopak mnohem slabší, než zemské (což bylo způsobeno speciálním odstíněním laboratoře od okolních vlivů). Je tedy možné, že tento extrémní a nepřirozený gradient na ryby působil matoucím způsobem a časté střídání levé a pravé strany, u kterého docházelo u většiny

jedinců, bylo projevem snahy „vyhodnotit“ prostředí. Opět by se ovšem nemělo zapomínat na fakt, že některé ryby, ač v menším počtu, přítomnost magnetu preferovaly. Silné magnetické pole indukované tyčovým magnetem by mohlo pro živočichy představovat nové, neznámé prostředí a tím pádem nový stimul, který chtějí prozkoumat. Druhou možností by mohlo být využití magnetické anomálie jakožto orientačního bodu v prostředí (Malewski et al., 2018).

Testy dvou-výběrové preference či magnetic object assay si nekladou za úkol objevit, jaký mechanismus stojí za magnetorecepcí, nýbrž mají představovat rychlou a poměrně jednoduchou metodu, v zásadě první krok, jak zjistit, zda a jakým způsobem živočich reaguje na přítomnost magnetického objektu (Malewski et al., 2018). Vzhledem k neuspořádané reakci sekavců na prostředí ovlivněné magnetem by ovšem nebylo na škodu experiment zopakovat znovu, tentokrát například za použití magnetické cívky, která by umožnila pracovat s magnetickým polem v širším spektru.

6 Závěr

Množství dostupných informací o magnetorecepci se kromě jiného liší také v závislosti na studovaném druhu živočicha. Jedním z nejstudovanějších druhů jsou jistě ptáci a v posledních letech se vysoké pozornosti vědců těší též savci. Magnetorecepce byla už ovšem prokázána i u mnohých druhů ryb – dokonce bylo zjištěno, že určité sladkovodní druhy reagují na lokálně změněné magnetické pole a jsou touto anomálií přitahovány. Na základě těchto poznatků se dalo očekávat, že i sekavci magnetosenzitivitu prokážou. Test dvou-výběrové preference na individuální úrovni odhalil jisté tendence sekavců se uměle vytvořené magnetické anomálii vyhýbat, ale i její výskyt preferovat. Zhodnocení dat jako celku ale v tomto ohledu žádné signifikantní rozdíly v reakci sekavců na magnet nepřineslo – design experimentu využívající uměle vytvořenou magnetickou anomálii s největší pravděpodobností tomuto druhu ryb nevyhovoval, ale i tak přinesl zajímavé náměty k přemýšlení. Zcela jistě je na místě pokus zopakovat, ale tentokrát s upravenou metodikou. Další výzkum této problematiky pomůže určit úlohu magnetorecepce nejen u sekavců, ale dost možná i dalších druhů ryb.

I přes to, že geomagnetické pole a jeho účinky na orientaci živočichů jsou posledních zhruba padesát let předmětem intenzivního výzkumu a důkazů magnetorecepce napříč celou říší živočichů neustále přibývá, o mechanizmech magnetorecepce stále nevíme vše. Zejména mechanizmy odehrávající se na biofyzikální úrovni organismu zůstávají i nadále z velké části tajemstvím.

Jedním z hlavních argumentů proti magnetorecepci bývá fakt, že živočichové mají v přírodě dostatek jiných „záchytných bodů“ pro orientaci. Ano, pokud existuje možnost využití například vizuálních či olfaktorických vjemů, živočich takové vodítko využije primárně. Co ale dělá geomagnetické pole výjimečným je jeho naprostá spolehlivost – je všudypřítomné dnem i nocí a jeho proměnlivost lze předem odvodit, je tedy skvělým pomocníkem tam, kde ostatní orientační body selžou.

7 Seznam literatury a použitých zdrojů

ABLE, K. Magnetic Orientation and Magnetoreception in Birds. Progress In Neurobiology. 1994. vol.42, no. 4, s. 449-473 ISSN 0310082.

ABLE, K. The concepts and terminology of bird navigation. Journal of Avian Biology [online]. 32(2), 174-183, 2001 [cit. 2019-04-12]. ISSN 09088857.

ANONYMUS. biomonitoring.cz/druhy [online]. 2007. Dostupné z WWW: http://www.biomonitoring.cz/druhy.php?druhID=29

AVENS, L.; LOHMANN K. J. Navigation and seasonal migratory orientation in juvenile sea turtles. Journal of Experimental Biology [online]. 207(11), 1771-1778, 2004 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1242/jeb.00946. ISSN 00220949.

BEGAL, S.; ČERVENÝ, J.; NEFF, J.; VOJTĚCH, O.; BURDA, H. Magnetic Alignment in Grazing and Resting Cattle and Deer. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America. 2008. roč. 105. č. 36. s. 13451-13455..

BEGALL, S.; MALKEMPER, E. P.; ČERVENÝ, J.; NĚMEC, P.; BURDA, H. Magnetic Alignment in Mammals and Other Animals. Mammal Biology. 2012. roč. 78. č. 1. s. 10-20.

BEGALL, S.; BURDA, H.; MALKEMPER, E. P. Chapter Two: Magnetoreception in Mammals. Advances in the Study of Behavior [online]. 2014. 46, 45-88 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/B978-0-12-800286-5.00002-X. ISSN 00653454.

BOTTESCH, M.; GERLACH, G.; HALBACH, M.; BALLY, A.; KINGSFORD, M. J.; MOURITSEN, H. Correspondence: A magnetic compass that might help coral reef fish larvae

return to their natal reef. Current Biology [online]. 26(24), R1266, 2016 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.cub.2016.10.051. ISSN 09609822.

COLLETT, T. S. Landmark Learning and Guidance in Insects. Philosophical Transactions: Biological Sciences [online]. 337(1281), 295-303, 1992 [cit. 2019-04-13]. ISSN 09628436.

COLLETT, T. S.; BARON, J. Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. Nature [online]. 368(6467), 137-140, 1998 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1038/368137a0. ISSN 00280836.

CZECH-DAMAL, N. U.; DEHNHARDT G.; MANGER P.; HANKE W. Passive electroreception in aquatic mammals. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology [online]. 1 - 9 2012 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.1007/s00359-012-0780-8. ISSN 03407594.

ČERVENÝ, J.; BEGELL, S.; KOUBEK, P.; NOVÁKOVÁ. P.; BURDA, H. Directional Preference May Enhance Hunting Accuracy in Foraging Foxes. Biology Lettess. 2011. roč. 7. č. 3. s. 355-357.

ČERVENÝ, J.; BURDA, H.; JEŽEK, M. Magnetic alignment in warthogs Phacochoerus africanus and wild boars Sus scrofa. Mammal Review [online]. 47(1), 1-6. 2017 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1111/mam.12077. ISSN 03051838.

ERNST, D.; LOHMANN, K. J. Size-dependent avoidance of a strong magnetic anomaly in Caribbean spiny lobsters. Journal of Experimental Biology [online]. 221(5), 1-6, 2018 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1242/jeb.172205. ISSN 00220949.

FLEISSNER, G. et al. Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons. The Journal of Comparative Neurology. 2003, roč. 458, č. 4, s. 350-360. DOI: 10.1002/cne.10579.

FORMICKI, K.; TAŃSKI A.; SADOWSKI M.; WINNICKI A. Effects of magnetic fields on fyke net performance. Journal of Applied Ichthyology [online]. 20(5), 402-406, 2014 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1111/j.1439-0426.2004.00568.x. ISSN 01758659.

FREAKE, M.; PHILLIPS, J. B. Light-Dependent Shift in Bullfrog Tadpole Magnetic Compass Orientation: Evidence for a Common Magnetoreception Mechanism in Anuran and Urodele Amphibians. Ethology. 2005. č. 111. s. 241254.

GATTERMANN, R.; FRITZSCHE, P.; NEUMANN, K.; AL-HUSSEIN, I.; KAYSER, A.; ABIAD, M.; YAKTI, R. Notes on the current distribution and the ecology of wild golden hamsters (Mesocricetus auratus). Journal of Zoology [online]. 254(3), 359-365, 2001 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1017/S0952836901000851. ISSN 09528369.

GOULD, J. L. Review: Sensory bases of navigation. Current Biology [online]. 8(20), R731, 1998 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/S0960-9822(98)70461-0. ISSN 09609822.

HANZLIK, M.; HEUNEMANN, CH.; HOLTKAMP-RÖTZLER, E.; WINKLHOFER, M.; PETERSEN, N.; FLEISSNER, G. Superparamagnetic Magnetite in the Upper Beak Tissue of Homing Pigeons. BioMetals [online], 13(4), 325-331, 2000 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1023/A:1009214526685. ISSN 09660844.

HART, V.; KUŠTA, T.; NĚMEC, P.; BLÁHOVÁ, V.; JEŽEK, M.; NOVÁKOVÁ, P.; BEGALL, S.; ČERVENÝ, J.; HANZAL, V.; MALKEMPER, E. P.; ŠTÍPEK, K.; VOLE, Ch.;

BURDA, H. Magnetic Alignment in Carps: Evidence from the Czech Christmas Fish Market. Plose One. 2012. roč. 7. č. 12. s. 1-7.

HART, V.; MALKEMPER, E. P.; KUŠTA, T.; BEGALL, S.; NOVÁKOVÁ, P.; HANZAL, V.; PLESKAČ, L.; JEŽEK, M.; POLICHT, R.; HUSINEC, V.; ČERVENÝ, J.; BURDA, H. Directional Compass Preference for Landing in Water Birds. Frontiers in Zoology. 2013a. roč. 10. č. 1. s. 1-10.

IOANNIDOU, CH.; O'HANLEY, J. R. The importance of spatiotemporal fish population dynamics in barrier mitigation planning. Biological Conservation [online]. 231, 67-76, 2019 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.01.001. ISSN 00063207.

JOHNSEN, S.; LOHMANN, K. The Physics and Neurobiology of Magnetoreception. Nature Reviews Neuroscience. 2005. roč. 6. s. 703-712.

KIRSCHVINK, J. L.; WALKER, M. M.; DIEBEL, C. R. Review: Magnetite-based magnetoreception. Current Opinion in Neurobiology [online]. 11(4), 462-467, 2001 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1016/S0959-4388(00)00235-X. ISSN 09594388.

KREMERS, D, HAUSBERGER, M., MARULANDA, J. L., LEMASSON, A., 2014. Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: detection of experimental magnetic fields. Naturwissenschaften 101, 907–911.

LAMBINET, V.; HAYDEN, M. E.; REIGL, K.; GOMIS, S.; GRIES, G. Linking magnetite in the abdomen of honey bees to a magnetoreceptive function. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences [online]. 2017, 284(1851), 1-9 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1098/rspb.2016.2873. ISSN 09628452.

LEIS, J. M.; SIEBECK, U.; DIXON, D. L. How Nemo Finds Home: The Neuroecology of Dispersal and of Population Connectivity in Larvae of Marine Fishes. Integrative and Comparative Biology [online]. 51(5), 826, 2011 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1093/icb/icr004. ISSN 15407063.

LOHMANN, K. J. Sea turtles, lobsters, and oceanic magnetic maps. Marine [online]. 39(1), 49-64, 2006 [cit. 2018-12-14]. DOI: 10.1080/10236240600563230. ISSN 10236244.

LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F.; PUTMAN, N. F. Magnetic maps in animals: nature's GPS. Journal of Experimental Biology [online]. 210(21), 3697-3705, 2007 [cit. 2018-12-11]. DOI: 10.1242/jeb.001313. ISSN 00220949.

LOHMANN, K. J.; PUTMAN, N. F.; LOHMANN, C. M. F. Geomagnetic imprinting: A Unifying hypothesis of long-distance natal homing in salmon and sea turtles. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America [online]. 105(49), 19096-19101, 2008 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1073/pnas.0801859105. ISSN 00278424.

LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F.; ENDRES, C. S. The sensory ecology of ocean navigation. Journal of Experimental Biology [online]. 211(11), 1719-1728, 2008 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1242/jeb.015792. ISSN 00220949.

MALEWSKI, S.; MALKEMPER, E. P.; SEDLÁČEK, F.; ŠUMBERA, R.; CASPAR, K. R.; BURDA H.; BEGALL, S. Attracted by a magnet: Exploration behaviour of rodents in the presence of magnetic objects. Behavioural Processes [online]. 151, 11-15, 2018 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/j.beproc.2018.02.023. ISSN 03766357.

MARHOLD, S.; WILTSCHKO, W.; BURDA, H. A magnetic Polarity Compass for Direction Finding in a Subterranean Mammal. Naturwissenschaften. 1997. roč. 84. č. 9. s. 421-423.

MASON, J. C. Some features of coho salmon, Oncorhynchus kisutch, fry emerging from simulated redds and cocurrent changes in photobehavior. Fish. Bull. 1976. 74, 167-175

MOORE, A.; RILEY W. D. Magnetic particles associated with the lateral line of the European eel Anguilla anguilla. Journal of Fish Biology [online]. 74(7), 1629-1634, 2009 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1111/j.1095-8649.2009.02197.x. ISSN 00221112.

MOURITSEN, H. Navigation in birds and other animals. Image and Vision Computing [online]., 19(11), 713-731, 2001 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/S0262-8856(00)00110-4. ISSN 02628856.

MOURITSEN, H. Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. Nature[online]. 558(7708), 50-59, 2018 [cit. 2018-12-12]. DOI: 10.1038/s41586-018-0176-1. ISSN 00280836.

MURRAY, R. W. The response of the ampullae of Lorenzini of elasmobranchs to electrical stimulation. J Exp Biol, 1962. 39:119– 128

NOVÁKOVÁ, P.; KOŘANOVÁ, D.; BEGALL, S.; Direction indicator and magnetic compass-aided tracking of the sun by flamingos?. Folia Zoologica [online]. 66(2), 79-86, 2017 [cit. 2019-04-13]. ISSN 01397893.

O'CONNOR, J.; MUHEIM, R. Pre-settlement coral-reef fish larvae respond to magnetic field changes during the day. Journal of Experimental Biology [online]. 220(16), 2874-2877, 2017 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1242/jeb.159491. ISSN 00220949.

OSIPOVA, E.; PAVLOVA, V. V.; NEPOMNYASHCHIKH, V. A.; KRYLOV, V. V. Influence of magnetic field on zebrafish activity and orientation in a plus maze. Behavioural Processes [online]. 122, 80-86, 2016 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.beproc.2015.11.009. ISSN 03766357.

PAINTER, M. S.; DOMMER, D. H.; ALTIZER, W. W, MUHEIM, R.; PHILLIPS, J. B. Spontaneous magnetic orientation in larval Drosophila shares properties with learned magnetic compass responses in adult flies and mice. Journal of Experimental Biology [online]. 216(7), 1307-1316, 2013 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1242/jeb.077404. ISSN 00220949.

PAINTER, M. S.; Characterizing the Role of Magnetic Cues Underlying Spatial Behavior [online]. 2017 [cit. 2019-04-13].

PHILLIPS, J. B.; BORLAND, S. CH. Short communication: Magnetic compass orientation is eliminated under near-infrared light in the eastern red-spotted newt Notophthalmus viridescens. Animal Behaviour[online]. 44(4), 796-797, 1992[cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1016/S0003-3472(05)80311-2. ISSN 00033472.

PUTMAN, N. F.; SCANLAN, M. M.; POLLOCK, A. M.; O'NEIL, J. P.; COUTURE, R. B.; STONER, J. S.; QUINN, T. B.; LOHMANN, K. J.; NOAKES, D. L. G. Geomagnetic field influences upward movement of young Chinook salmon emerging from nests. Biology Letters [online]. 14(2), 20170752-20170752, 2018 [cit. 2019-04-14]. ISSN 17449561.

QUINN, T.; BRANNON, E. The use of celestial and magnetic cues by orienting sockeye salmon smolts. Journal of Comparative Physiology [online]. 147(4), 547-552, 1982 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1007/BF00612020. ISSN 03029824.

FRANKEL, R. B.; BLAKEMORE, R. P.; WOLFE, R. S. Magnetite in Freshwater Magnetotactic Bacteria. Science [online]. 203(4387), 1355-1356, 1979 [cit. 2019-04-10]. ISSN 00368075.

RITZ, T.; ADEM S.; SCHULTEN K. A Model for Photoreceptor-Based Magnetoreception in Birds. Biophysical Journal [online]. 78(2), 707-718, 2000 [cit. 2019-04-10]. DOI: 10.1016/S0006-3495(00)76629-X. ISSN 00063495.

RONAN, C. A. Vesmír: hranice poznání. 1. vyd. Praha: Knižní klub, k. s., 1996. 192 s. ISBN 80-7176-361-6

SHCHERBAKOV, D.; WINKLHOFER, M.; PETERSEN N.; STEIDLE, J.; HILBIG, R.; BLUM, M. Magnetosensation in zebrafish. Current Biology [online]. 15(5), R161, 2005 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.cub.2005.02.039. ISSN 09609822.

TAKEBE, A.; FUTURANI, T.; KOINUMA, M.; KUBO, Y.; OKANO, K.; OKANO, T. Zebrafish Respond to the Geomagnetic Field by Bimodal and GroupDependent Orientation. Scientific Reports. 2012. roč. 2. s. 727.

VÁCHA, M.; NĚMEC, P. Mechanizmy magnetorecepce: Jak živočichové vnímají geomagnetické pole. Vesmír. 2007, vol. 86, no. 4, s. 224-228. ISSN: 1214-4029.

VÁCHA, M.; NĚMEC, P. Kompas a mapa: Orientace v geomagnetickém poli. Vesmír, 2007, roč. 86, č. 4, s. 224-228. ISSN 1214-4029.

VÁCHA, M.; KVÍČALOVÁ, M.; PŮŽOVÁ, T. American cockroaches prefer four cardinal geomagnetic positions at rest. Behaviour [online]. 147(4), 425, 2010 [cit. 2019-04-13]. ISSN 00057959.

WALKER, M. M.; QUINN, T. P.; KIRSCHVINK, J. I.; GROOT, C. Production of single-domain magnetite throughout life by sockeye salmon, Oncorhynchus nerka. Journal of Experimental Biology [online]. 140, 51 – 63, 1988 [cit. 2019-04-10]. ISSN 00220949.

WILTSCHKO, W.; Merkel, F. W. Orientierung zugunruhiger Rotkehlchen im statischen Magnetfeld. Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft, 1966. 59, 362-367.

WILTSCHKO, W.; WILTSCHKO, R. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural [online]. 191(8), 675-693, 2005 [cit. 2018-12-11]. DOI: 10.1007/s00359-005-0627-7. ISSN 03407594.

WILTSCHKO, W.; WILTSCHKO, R.; RITZ, T. The mechanism of the avian magnetic compass. Procedia Chemistry [online]. 3(1), 276-284, 2011 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/j.proche.2011.08.035. ISSN 18766196.

WINKLHOFER, M. Magnetoreception [online]. 2015 [cit. 2018-12-14]. DOI: 10.1098/rsif.2014.1231.

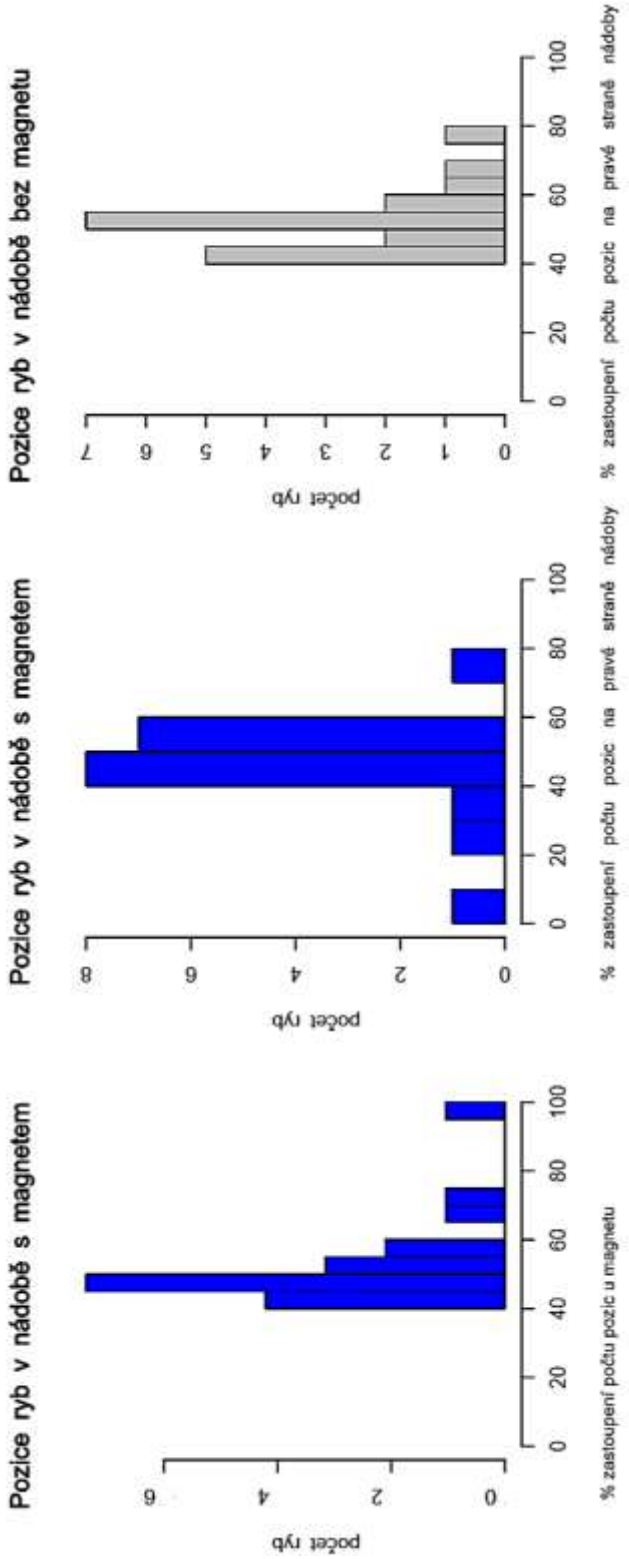
8 Seznam příloh

Příloha 1: Celkové srovnání pozic ryb v nádobě s magnetem a bez magnetu.....47

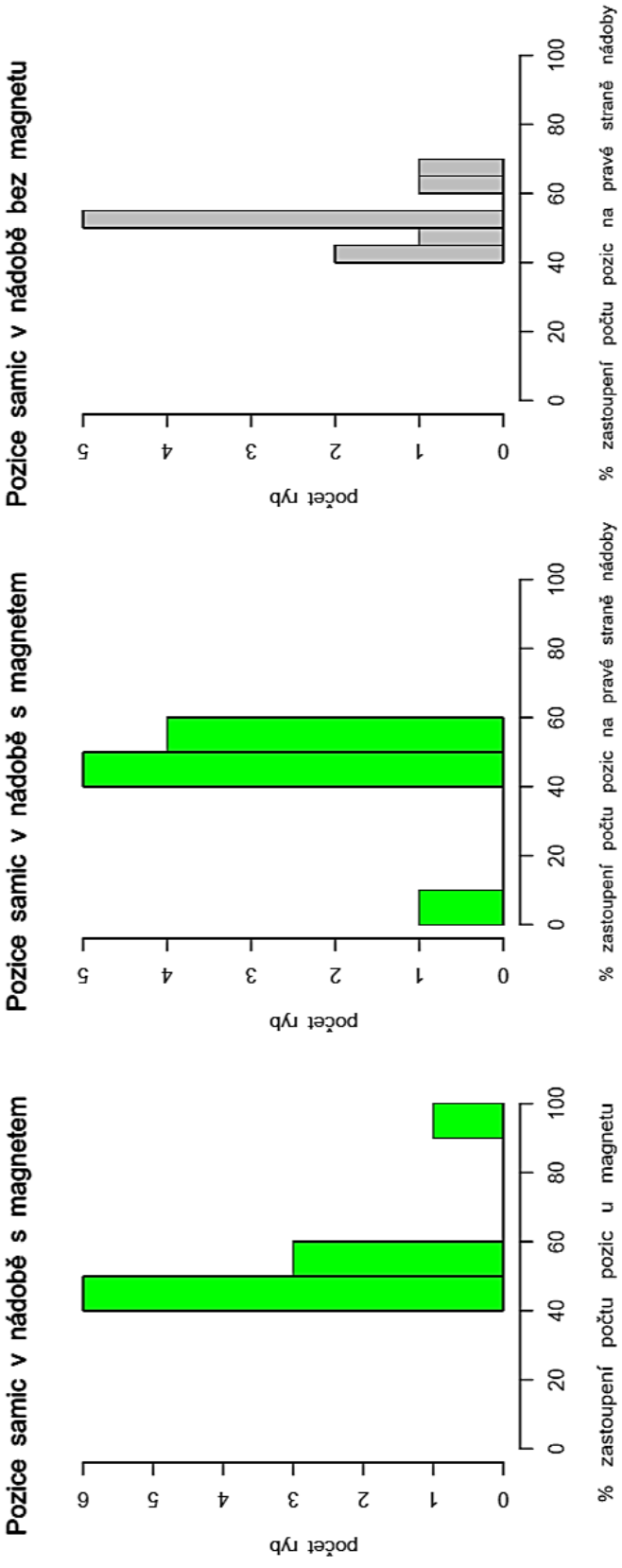
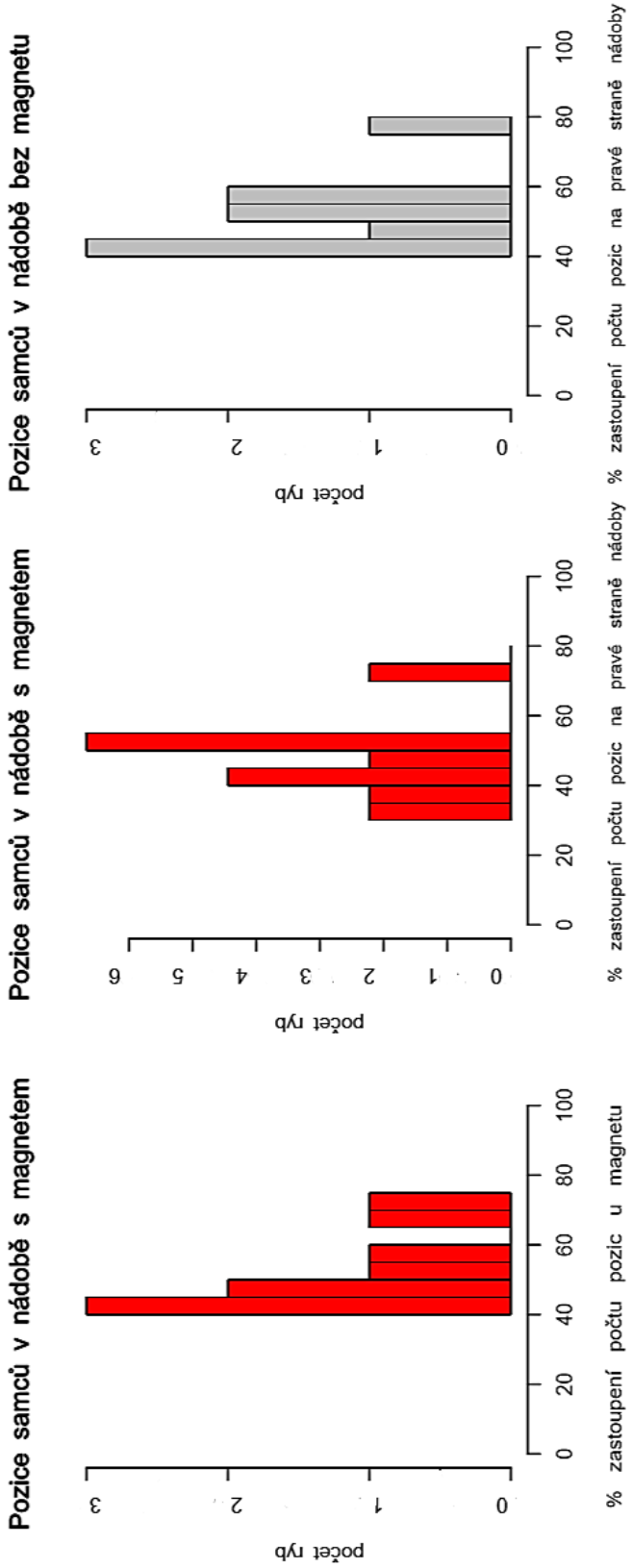
Příloha 2: Celkové srovnání pozic samic v nádobě s magnetem a bez magnetu.....48

Příloha 3: Celkové srovnání pozic samců v nádobě s magnetem a bez magnetu.....49

Příloha 1 Celkové srovnání pozic ryb v nádobě s magnetem a bez magnetu



Příloha 2 Celkové srovnání pozic samic v nádobě s magnetem a bez magnetu



Příloha 3 Celkové srovnání pozic samců v nádobě s magnetem a bez magnetu