

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PEDAGOGICKÁ FAKULTA
Katedra biologie

Bakalářská práce
Ing. Petra Nováková, Ph.D.

Směrová orientace a magnetický kompas plameňáků

Olomouc 2021

vedoucí práce: Mgr. Markéta Nyklová, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Markéty Nyklové, Ph.D., a použila jen uvedené prameny a literární zdroje.

V Olomouci dne 27.5.2021

Petra Nováková

PROHLÁŠENÍ

Souhlas se zpracováním a uvedením dat v rámci bakalářské práce

Já, níže podepsaný prof. RNDr. Hynek Burda, CSc., narozený 27.11.1952 v Chlumci nad Cidlinou, trvale bytem Čejkovy E1/46, 342 01 Sušice, souhlasím s tím, aby Ing. Petra Nováková, Ph.D. použila veškerá data plameňáků při zpracování bakalářské práce.

V Čejkovech dne 13.1.2021



prof. RNDr. Hynek Burda, CSc.

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí práce Mgr. Markétě Nyklové, Ph.D. za vstřícnost a odborné vedení práce.

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Magnetické pole Země

Obr. 2: Magnetická orientace živočichů

Obr. 3: Myškusující lišky

Obr. 4: Stacionární aktivity

Obr. 5: Lokomoční aktivity

Obr. 6: Magnetický alignment plameňáků vůči magnetickému severu během stacionárních aktivit (Evropa)

Obr. 7: Magnetický alignment plameňáků vůči magnetickému severu během lokomočních aktivit (Evropa)

Obr. 8: Magnetický alignment plameňáků vůči magnetickému severu během stacionárních a lokomočních aktivit (jezero Bogoria – Keňa)

Obr. 9: Magnetický alignment plameňáků v zoologických zahradách

Obr. 10: Magnetický alignment plameňáků ve volnosti

Tab. 1: Seznam lokalit a velikosti vzorků plameňáků

Tab. 2: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků vůči magnetickému severu při stacionárních aktivitách (Evropa)

Tab. 3: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků vůči magnetickému severu při lokomočních aktivitách (Evropa)

Tab. 4: Výsledky cirkulární statistiky axiální a angulární orientace plameňáků vůči magnetickému severu při stacionárních a lokomočních aktivitách (jezero Bogoria – Keňa)

Tab. 5: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků v zoologických zahradách

Tab. 6: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků ve volnosti

Seznam příloh

Příloha 1: Stacionární aktivity – odpočinek

Příloha 2: Stacionární aktivity – komfortní chování

Příloha 3: Lokomoční aktivity – sběr potravy

Příloha 4: Lokomoční aktivity – chůze a sběr potravy

Příloha 5: Postup při vyhodnocování fotografií

Příloha 6: Postup při vyhodnocování fotografií

Příloha 7: Postup při vyhodnocování fotografií

Příloha 8: Postup při vyhodnocování fotografií

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1 ÚVOD..... | 7 |
| 2 CÍLE PRÁCE..... | 8 |
| 3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 9 |
| 3.1 Geomagnetické pole Země a jeho fyzikální vlastnosti | 9 |
| 3.2 Magnetorecepce | 10 |
| 3.2.1 Magnetorecepce založená na elektromagnetické indukci | 11 |
| 3.2.2 Teorie založená na přítomnosti feromagnetických částic | 11 |
| 3.2.3 Fotochemická magnetorecepce | 12 |
| 3.3 Magnetická orientace | 12 |
| 3.3.1 Magnetický kompas..... | 13 |
| 3.3.2 Magnetická mapa..... | 14 |
| 3.3.3 Magnetický alignment | 14 |
| 3.4 Magnetorecepce živočichů..... | 14 |
| 3.4.1 Magnetorecepce hmyzu..... | 14 |
| 3.4.2 Magnetorecepce ryb | 15 |
| 3.4.3 Magnetorecepce obojživelníků..... | 16 |
| 3.4.4 Magnetorecepce plazů | 17 |
| 3.4.5 Magnetorecepce ptáků..... | 18 |
| 3.4.6 Magnetorecepce savců..... | 19 |
| 4 MATERIÁL A METODIKA..... | 21 |
| 4.1 Sběr dat..... | 21 |
| 4.2 Vyhodnocování a statistická analýza dat | 21 |
| 5 VÝSLEDKY | 24 |
| 6 DISKUSE..... | 33 |
| 7 ZÁVĚR | 35 |
| 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 36 |
| 9 PŘÍLOHY | 44 |

1 ÚVOD

Díky magnetickému poli se lidstvo může nejen orientovat podle kompasu, ale především umožňuje existenci života na planetě. Brání pronikání částic sluneční erupce na Zemi a bez magnetického pole by sluneční vítr zcela zlikvidoval zemskou atmosféru (Janáčková, 1995).

Dle Váchy a Němce (2007) již v současné době existuje mnoho důkazů, že živočichové při tazích, migracích či na cestách za potravou vědí, kde jsou. Orientují se nejen čichem, sluchem, chutí a zrakem, ale také pomocí schopnosti vnímat zemské magnetické pole. Senzitivita vnímat magnetické pole pravděpodobně vzrůstá, pokud se na ostatní smysly nedá spolehnout (např. v noci, pod zemí nebo je-li zataženo). Je známo, že ptáci jsou navíc schopni určit směr i na základě polohy hvězd, Slunce a polarizovaného světla oblohy.

Podle magnetického pole Země se na svých dlouhých cestách orientují i tažní ptáci. Vědci však dosud nezjistili, jaké ústrojí jim k tomu slouží. Předpokládají, že jde o sítnici oka nebo o mikroskopické částičky železa uvnitř ucha. Magnetické pole dále slouží jako vodítko při synchronizaci různých aktivit, především u větších, koloniálně žijících druhů, aby nedocházelo ke střetům např. při dosedání na hladinu či při vzletu (Wiltschko a kol., 2011). Hart a kol. (2013a) uvádějí, že větší druhy vodního ptactva potřebují delší „brzdnou“ dráhu při přistávání na hladinu a společný směrový ukazatel je pro ně nezbytný – jako nejpravděpodobnější se jeví orientace podle geomagnetických siločar.

V bakalářské práci je testována hypotéza, že i plameňáci mají společný ukazatel směru. Jsou pro takové testování jedineční, protože jsou největšími ptáky žijícími ve velkých koloniích čítajícími až 20 000 jedinců (Bucher a kol., 2000). Zároveň v těchto koloniích žijí trvale, nejen v období toku. Přirozeně se vyskytují v tropických a subtropických oblastech mezi 34 ° jižní šířky a 46 ° severní šířky (Cramp a Simmons, 1977). Zároveň se jedná o populární druhy chované v lidské péči ve většině zoologických zahrad téměř po celém světě. Dle Johnsona (1989) je většina plameňáků stěhovavá, některé populace podnikají cesty dlouhé 3 000-4 000 km, zatímco jiné populace jsou stále s vysokou mírou filopatrie. Jsou velmi dobrými letci a vzhledem k jejich velikosti potřebují pro vzlet i dosednutí na vodu dlouhé vzdálenosti. Protože vytvářejí velké a husté kolonie, je společný indikátor směru při jejich synchronizaci nezbytný.

2 CÍLE PRÁCE

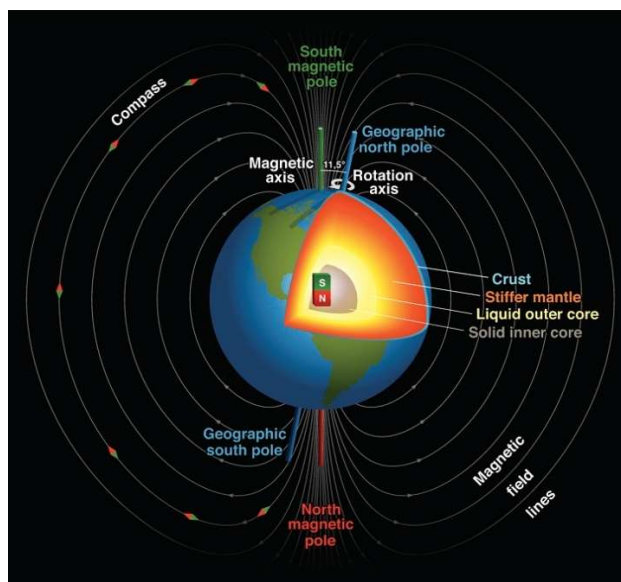
- sledování čtyř druhů plameňáků (plameňáka malého - *Phoeniconaias minor*, plameňáka chilského - *Phoenicopterus chilensis*, plameňáka růžového - *Phoenicopterus roseus* a plameňáka amerického - *Phoenicopterus ruber*) při různých aktivitách (stání, odpočinku, komfortním chování, vyhledávání potravy a chůzi) v České republice i zahraničí;
- prokázání nebo vyvrácení, zda existují statisticky významné rozdíly při stacionárních nebo lokomočních aktivitách;
- zjištění, zda existují signifikantní rozdíly za různého počasí (zda je lepším orientačním vodítkem magnetický sever při zatažené obloze nebo poloha Slunce za jasného počasí);
- zjištění, zda existují statisticky významné rozdíly v nasměrování osy těla mezi jedinci chovanými v lidské péči nebo žijícími ve volnosti.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

3.1 Geomagnetické pole Země a jeho fyzikální vlastnosti

Země je velkým magnetem, jehož přirozené magnetické pole se projevuje na jejím povrchu a v prostoru kolem něj. Sahá do výšky 100 000 km od planety (Janáčková, 1995). Bucha (1975) zmiňuje, že se zemský plášť díky rotaci Země kolem své osy otáčí rychleji než vnitřní zemské jádro. Jádro se skládá z vnitřní pevné části a vnější tekuté, která je tvořena roztavenými kovy především niklu a železa. Beazley (1995) uvádí, že je geomagnetické pole vytvářeno pohybem tekutého vnějšího jádra. Má bipolární charakter a připomíná tyčový magnet, jehož osa magnetického pole je shodná s osou rotace Země.

Magnetická osa Země je proměnlivá v čase a mění svůj úhel vůči ose geografické. Proto spolu magnetický a geografický sever a jih nekorespondují, vychýlení se pohybuje okolo 11° , viz Obr. 1 (Beazley, 1995; Janáčková, 1995). V minulosti docházelo ke změnám magnetické deklinace (deklinace označuje odchylku siločar vůči poledníku), inklinace (úhel, který svírají siločáry magnetického pole Země s vodorovnou rovinou) a celkové intenzity či inverzi polarity geomagnetického pole Země (Bucha, 1975; Janáčková, 1995). K poslední inverzi došlo asi před 700 000 lety, přičemž proces inverze trvá tisíce až desetitisíce let (Janáčková, 1995).



Obr. 1: Magnetické pole Země

(<https://scienceworldbang.blogspot.com/2018/11/earths-magnetic-field.html>,
citováno 23.1.2021)

Geomagnetické pole Země není stálé a je narušováno různými anomáliemi. Mohou být způsobeny např. rozdílnou magnetizací matečných hornin (Johnsen a Lohmann, 2005; Wiltschko a Wiltschko, 2005) nebo elektricky nabitými částicemi Slunce (Beazley, 1995).

Wiltschko a Wiltschko (2005) vysvětlují, že prostorové uspořádání fyzikálních vlastností geomagnetického pole je možné rozdělit na složku horizontální a vertikální. Horizontální složka (deklinace) má polaritní charakter a lze ji analogicky přirovnat ke střelce kompasu, která zaujímá severojižní magnetickou osu a vysvětluje orientaci živočichů při dlouhých migračních cestách. Vertikálními složkami geomagnetického pole jsou inklinace a intenzita. Magnetickou inklinací rozumíme úhel svírající vektor siločar geomagnetického pole a vodorovný zemský povrch. Hodnoty inklinace se mění v závislosti na severojižní ose. Inklinace má na jižním magnetickém pólu hodnotu -90° , na rovníku 0° a na severním pólu $+90^\circ$. Inklinace živočichům podává informaci o jejich poloze vztahované buď k jednomu z pólů nebo k rovníku.

3.2 Magnetorecepce

Magnetorecepci lze vysvětlit jako schopnost živočichů vnímat magnetické pole Země a magnetickou informaci využívat pro prostorovou orientaci (Wiltschko a Wiltschko, 2005). Četné studie (např. Wiltschko a Wiltschko, 1972, 1996, 2005, 2006; Begall a kol., 2013; Fleischmann a kol., 2020) naznačují, že tuto schopnost mají mnohé živé organismy od bakterií přes ryby, plazy, obojživelníky, ptáky a savce. Signály zemského magnetického pole zpracovává nervový systém a jedinec tak získává informace, které může využít pro svou orientaci (Moritz a kol., 2007). Pokud bychom chtěli o magnetorecepci hovořit jako o jednom ze smyslů, musel by být znám magnetoreceptor, který je propojen s centrálním nervovým systémem a přijímá a předává informace získané z magnetického pole Země. Takový orgán však nebyl doposud s jistotou lokalizován. Magnetoreceptory mohou být rozmístěny kdekoli na těle (Vácha a Němec, 2007). Mohou být velmi malé a nacházet se ve tkáních nebo může docházet k přenosu signálu prostřednictvím chemických reakcí (Johnsen a Lohmann, 2005). Bylo sestaveno několik hypotéz vysvětlujících podstatu magnetorecepce uvedených dále v textu.

3.2.1 Magnetorecepce založená na elektromagnetické indukci

Elektromagnetická indukce vzniká pohybem vodiče magnetickým polem souběžně s indukčními čarami. Indukční čáry jsou propojeny vodivým prostředím (v tomto případě vodou) a vzniká tak elektrický obvod. Proto tento jev můžeme očekávat zejména u vodních živočichů (Johnsen a Lohmann, 2005; Eder a kol., 2012). Byl popsán u paryb, které jsou schopny vnímat změny elektromotorického napětí vyvolaného jejich pohybem díky Lorenziniho ampulím. Lorenziniho ampule jsou kanálky vyplněné bílkovinným obsahem a fungují jako pohybující se vodič. Okolní mořská voda slouží jako vnější vodivé médium. Indukované napětí je detekováno elektroreceptory na dně kanálků a slouží tak jako voltmetr. Citlivé elektroreceptory detekují pokles napětí indukovaného proudu a díky tomu živé organismy určují směr (Johnsen a Lohmann, 2005; Vácha a Němec, 2007). Elektroreceptory mají i mihule, mnohé skupiny ryb (např. z čeledi Cyprinidae, Salmonidae, Anguillidae) někteří vodní obojživelníci (Salamandridae, Bufonidae, Ranidae) a ptakořitní savci z čeledi Ornithorhynchidae (Vácha a Němec, 2007).

3.2.2 Teorie založená na přítomnosti feromagnetických částic

Hypotéza vychází z předpokladu, že ve tkáních existují feromagnetické částice (nejčastěji magnetit, vzácněji greigit nebo pyrrhotin), které se natáčejí podle indukčních čar (Johnsen a Lohmann, 2008).

Různé skupiny bakterií a jednobuněčných řas jsou známé schopností magnetotaxe - pohybu podél magnetických indukčních čar (Yan a kol., 2012). Feromagnetické krystaly jsou u bakterií umístěny v intracelulárních organelách, tzv. magnetosomech. Magnetosomy tvoří dvojité i vícečetné řetízky nacházející se v blízkosti buněčné stěny. Díky této lokalizaci jsou schopny přenášet magnetický moment, překonat viskózní odpor kapaliny a sladit se podél indukčních čar (Winklhofer, 2010).

Magnetit se hojně vyskytuje i ve tkáních živočichů (vč. lidského mozku), může však být jen vedlejším produktem metabolismu železa (Johnsen a Lohmann, 2008). V čichové sliznici pstruha duhového (*Oncorhynchus mykiss*) byly nalezeny buňky obsahující magnetit (Winklhofer, 2009). V podkoží ozobí holubů domácích (*Columba livia* f. *domestica*) byly nalezeny nanokrystaly magnetitu (Fleissner a kol., 2003). Výsledky u výše zmíněných druhů vedly k hypotéze, že buňky obsahující magnetit

vnímají intenzitu magnetického pole a převádějí magneticky vyvolanou mechanickou sílu v elektrický signál. Díky elektrickému signálu živočichové detekují směr (Johnsen a Lohmann, 2008).

Přenos informace (neurotransfer) z feromagnetických struktur pravděpodobně probíhá pomocí mechanoreceptorů. Mechanoreceptory snímají točivý moment nebo ovlivňují iontové kanálky svou rotací, čímž je otvírají či zavírají (Johnsen a Lohmann, 2005; Němec a Vácha, 2007). Experimenty s holuby, kterým byl přerušen trojklanný nerv, vedly ke ztrátě naučených anomálií geomagnetického pole a jejich dezorientaci (Johnsen a Lohmann, 2005).

3.2.3 Fotochemická magnetorecepce

Behaviorálními testy byla u tohoto modelu zjištěna závislost mezi magnetorepceí a fotorepceí. Schopnost magnetorecepce je tedy přímo závislá na světle (Vácha, 1994). V sítnici nebo v epifýze existují specializované receptory, jejichž fotopigmenty generují magneticky senzitivní radikálové páry (Ritz a kol., 2000; Johnsen a Lohmann, 2005). Efekt je závislý na poloze molekul fotopigmentů vůči geomagnetickému poli (Ritz a kol., 2000). Jedinými v současnosti známými fotopigmenty obratlovců jsou kryptochromy. Jsou přítomny v sítnici všech dosud studovaných obratlovců (Mouritzen a Ritz, 2005). Kryptochromy jsou citlivé na světlo v modrozeleném spektru (Ritz a kol., 2000). Podílejí se také na regulaci cirkadiálních rytmů (Johnsen a Lohmann, 2005; Němec a Vácha, 2007).

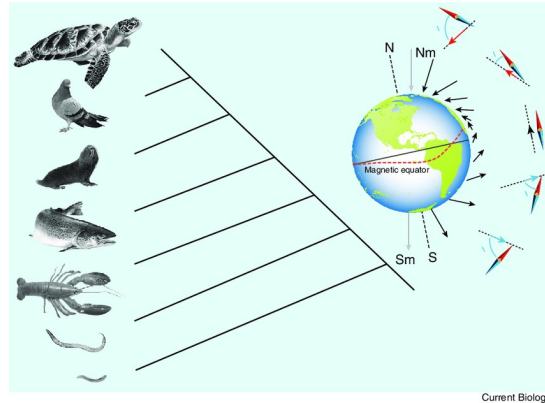
Wiltschko a kol. (2007) experimentálně prokázali existenci dvou mechanismů při magnetorepce ptáků. Zjistili, že když u kura domácího (*Gallus gallus f. domestica*) lokálně umrtvili horní část zobáku, kde se nacházejí feromagnetické struktury, neztratili ani tímto zásahem orientační smysl.

Geomagnetické pole detekované zrakem živočichové pravděpodobně vnímají jako optické vjemy tvořící směrově orientované skvrny či kruhy (Ritz a kol., 2000; Němec a Vácha, 2007).

3.3 Magnetická orientace

Magnetická orientace je schopnost živočichů využívat informace o magnetickém poli Země k aktivnímu ovládnutí jejich pohybu (Wiltschko a Wiltschko, 1996). Byla

objevena u měkkýšů, korýšů, hmyzu, ryb, plazů, ptáků i savců (Wiltschko a Wiltschko, 2005), viz Obr. 2. Zvířata vnímají a využívají geomagnetické pole Země několika níže uvedenými způsoby.



Obr. 2: Magnetická orientace živočichů

(https://www.researchgate.net/figure/Magnetic-orientation-in-animals_fig1_317690841, citováno 23.1.2021)

3.3.1 Magnetický kompas

Živočichové jsou schopni stanovit si azimut mezi směrem své trasy a severojižní magnetickou osou (Vácha a Němec, 2007). Nejprozkoumanější je tato problematika u tažných druhů ptactva, kteří v období migrace mají snahu vylétnout správným směrem (i v klecích se shromažďují na příslušné straně). K experimentům byly použity především červenky obecné (*Erithacus rubecula*) a holubi domácí. V laboratorních podmínkách jim bylo měněno magnetické pole a ptáci měnili i své chování (Wiltschko a kol., 2011).

Překlopením vertikální složky magnetického pole byly objeveny dva typy kompasu: inklinanční a polaritní (Vácha a Němec, 2007). Inklinanční kompas na rozdíl od polaritního umožňuje svým uživatelům nejenom určit směr, ale především polohu (zeměpisnou šířku). Je možné ho využít pro tvorbu navigačních map. Pro střeoevropské tažné ptáky je velmi důležité zvolit správnou tahovou cestu, která však nemusí být nejkratší (Wiltschko a Wiltschko, 2005; Wiltschko a kol., 2011). Podobně se chovají např. karety, které se v moři vyhýbají nebezpečným proudům nebo oblastem rozlehlých tíšin.

Dokáže-li živočich rozeznat směr na sever a jih, čili polaritu magnetického vektoru, jedná se o polaritní kompas. Mechanismus je založený na magnetitových

částicích a neovlivňují ho změny v intenzitě magnetického pole (Wiltschko a Wiltschko, 1996). Využití polaritního kompasu je doloženo např. u rypošů, lososů a langust (Marhold a kol., 1997).

3.3.2 Magnetická mapa

Používáním magnetické mapy dokážou zvířata využít informace z magnetického pole k posouzení jejich přibližné zeměpisné polohy nebo pozici vzhledem k určenému cíli (Lohmann, 2010). Pomyslnou souřadnicovou síť magnetické mapy vytváří síť izoklin, tedy čar, které spojují místa se stejnou magnetickou inklinací, a izodynam, které spojují místa se stejnou intenzitou magnetického pole (Witschko a Wiltschko, 1996; Vácha a Němec, 2007).

3.3.3 Magnetický alignment

Magnetický alignment je spontánní poziční chování, kdy se živočich otáčí v prostoru podle siločar magnetického pole (Begall a kol., 2008). Begall a kol. (2013) uvádějí, že důvodem může být úspora energie či získání nějaké výhody v daných podmínkách. Děje se tak např. při lovu, sběru potravy, odpočinku, komfortním chování nebo rozmnožování.

3.4 Magnetorecepce živočichů

3.4.1 Magnetorecepce hmyzu

Nejvíce studií je věnováno octomilkám, včelám, mravencům či švábům. Studie octomilky obecné (*Drosophila melanogaster*) prokázaly, že s pomocí kryptochromu běžně vnímají magnetické pole Země a k orientaci využívají magnetický kompas (Foley a kol., 2011).

U mravenců byl prokázán nález oxidů železa v tykadlech. Vnímání změn magnetického pole bylo potvrzeno např. u pouštních mravenců *Cataglyphis nodus* (Fleischmann a kol., 2020).

Stejná schopnost byla zjištěna u potemníka moučného (*Tenebrio molitor*; Vácha a kol., 2008) nebo u potemníka hnědého (*Trilobium castaneum*; Tomanová, 2009). Potemníci měnili chování v závislosti na vlnové délce světla.

U švábů obecných (*Blatta orientalis*) a rusů domácích (*Blattella germanica*) vědci zjistili, že se švábi otáčejí a jsou neklidní v případě jakékoliv změny magnetického pole. Experimentálně byla dokázána quadrimodální orientace (orientace na všechny čtyři hlavní kompasové směry) skupiny švábů amerických (*Periplaneta americana*) během odpočinku. Těla švábů byla rozmístěna podle os sever-jih a východ-západ (Vácha a kol., 2010).

Velká pozornost při studii magnetorecepce byla věnována včele medonosné (*Apis mellifera*). Byl potvrzen vliv magnetického pole například při stavbě úlů nebo letu na cíl (DeJong, 1982). Orientaci včel také ovlivňují změny v intenzitě a polaritě magnetického pole. Magnetorecepce včel byla dokazována pomocí miniaturního magnetu, který byl umístěn na zadečku včel. Testy prošly úspěšně pouze jedinci, kteří na sobě neměli magnet (Gould a kol., 1980).

V tělech včel byly objeveny magnetitové částice spojené s nervovou soustavou (Hsu a Li, 1994). Magnetitové částice byly objeveny také v tělech termitů, přičemž nejvíc jich bylo nalezeno v břiše a hrudi, následně byly analyzovány a byla prokázána jejich biologická funkčnost (Maher, 1998). Přítomnost organizovaných uskupení magnetitových částic naznačuje funkci magnetického senzoru (Alves a kol., 2004).

Guerra a kol. (2014) zjistili, že magnetický inklinální kompas využívají monarchové stěhovaví (*Danaus plexippus*) při podzimním tahu směrem k rovníku. Využití inklinálního magnetického kompasu je závislé na vlnových délkách světla, protože v tykadlech monarchů se zřejmě nacházejí magnetosenzory citlivé na světlo.

3.4.2 Magnetorecepce ryb

Ryby hrály významnou roli ve studiích struktury a funkce magnetického smyslu. Byl prokázán vliv magnetického pole např. na lososa nerku (*Oncorhynchus nerka*; Quinn a kol., 1981). Magnetitové částice byly objeveny v nosní chrupavce lososa čavyči (*Oncorhynchus tshawytscha*; Kirschvink a kol., 1985; Walker a kol., 2006).

Spontánní preference základních světových stran při odpočinku byla prokázána například u úhoře říčního (*Anguilla anguilla*), karase zlatého (*Carassius auratus*) nebo pstruha duhového (*Oncorhynchus mykiss*; Eder a kol., 2012).

Hart a kol. (2012) zkoumali magnetickou orientaci kaprů (*Cyprinus carpio*) na vánočních trzích. Kapři spontánně vysoce signifikantně preferovali sladění os těl podél severojižní osy.

Formicki a kol. (2019) se zabývali magnetorecepcí u různých ontogenetických stadií ryb. Zjistili například, že expozice mlíčí pstruha obecného (*Salmo trutta*) statickému magnetickému poli prodloužila motilitu spermií na 288 hodin, zatímco v kontrolních podmínkách (bez ovlivnění magnetickým polem) byla motilita pouhých 72 hodin.

Talikina a kol. (2013) zjišťovali vliv krátkodobého působení simulovaných silných magnetických bouří na spermie plotic obecných (*Rutilus rutilus*). Tyto spermie pak použili k oplození vajíček a zjistili, že plůdky byly větší a těžší než plůdky z kontrolních měření (kontrolním měřením se má na mysli měření v podmínkách přirozeného magnetického pole bez cíleného ovlivnění).

3.4.3 Magnetorecepce obojživelníků

Obojživelníci jsou v oblasti magnetorecepce méně prozkoumanou skupinou. Většina prací je zaměřena pouze na čolka zelenavého (*Notophthalmus viridescens*; Freaa a Phillips, 2005).

Na základě výzkumu Freaa a Phillipse (2005) bylo zjištěno, že čolci zelení v klidném geomagnetickém poli preferují axiální orientaci východ-západ. Bylo-li v průběhu experimentů magnetické pole otočeno o 180°, reagovali čolci také otočením o 180°. Stejný autorský kolektiv se zabýval závislostí vlnových délek světla a magnetorecepce u skokana volského (*Rana catesbeiana*).

Reakce na změny v magnetickém poli a následné použití magnetického kompasu bylo prokázáno u mločika zářivého (*Eurycea lucifuga*; Phillips, 1977) a čolka horského (*Triturus alpestris*; Schlegel a Renner, 2007).

Diego-Rasilla a Phillips (2007) publikovali výsledky experimentů s pulci skokana Perézova (*Pelophylax perezi*). Skokani byli nejprve umístěni ve dvou nádržích (jedna byla v ose sever – jih, kde byl břeh orientován na jih a druhá nádrž byla v ose východ – západ s břehem orientovaným na východ). Poté byli pulci testováni v magnetické cívce v kruhové nádrži a bylo zjištěno, že jedinci, kteří byli předtím trénováni v nádrži lokalizované v severojižní ose, stále vykazovali tutéž preferenci.

Dalšími zkoumanými druhy jsou ropucha obecná (*Bufo bufo*), ropucha krátkonohá (*Bufo calamita*) a ropucha bradavičnatá (*Bufo spinulosus*). Těmto druhům byl na hlavu namontován magnet a byla prokázána neschopnost homingu žab (nalézt cestu zpět) do domovské tůně. Silný magnet narušil přírodní magnetické pole a žáby ztratily schopnost orientace (Landler a Gollmann, 2011).

3.4.4 Magnetorecepce plazů

Většina prvotních studií plazů je zaměřena na mořské želvy a jejich migrace. Velká pozornost byla věnována karetě obecné (*Caretta caretta*). Byla dokázána její schopnost vnímat magnetické pole (Light a kol., 1993), schopnost určit zeměpisnou šířku (Lohmann a Lohmann, 1994), rozlišovat intenzitu magnetického pole podél migrační trasy (Lohmann a Lohmann, 1996) a udržet směr pomocí magnetického pole Země (Lohmann a Lohmann, 1998). U karet byla prokázána schopnost využívat mentální magnetické mapy (Lohmann a Lohmann, 2012). Pokusy s karetami obrovskými (*Chelonia mydas*), pravidelně migrujícími mezi brazilským pobřežím a ostrovem Ascension ukazují, že jsou želvy schopné dosáhnout cíle bez ohledu na to, zda mají na krunýřích upevněné silné magnety či nikoliv (Papi a kol., 2000).

U aligátora severoamerického (*Alligator mississippiensis*) bylo prokázáno používání magnetické mapy k návratu do místa odchyty. S rostoucím věkem rostla i jeho úspěšnost, což naznačuje vliv získávání nových zkušeností (Rodda, 1984).

Magnetickou mapu využívají k orientaci pravděpodobně i korálovci *Micrurus apiatus*. Při pokusech v jedné z mexických zoologických zahrad se spolehlivě vraceli do úkrytu, v němž se nalézali naposledy, přestože v okolí bylo několik dalších úkrytů (Hall a kol., 2016).

Diego – Rasilla a kol. (2017) sledovali volně žijící ještěrky zední (*Podarcis muralis*) a ještěrky Lilfordovy (*Podarcis lilfordi*) během vyhřívání na slunci. Orientace ještěrek významně korelovala s hodnotami geomagnetického pole v době pozorování bez ohledu na polohu Slunce. Oba druhy ještěrek vykazovaly signifikantně bimodální orientaci podél severo – severovýchodní a jiho – jihozápadní magnetické osy.

Dalšími studovanými druhy byly například kožatka velká (*Dermochelys coriacea*), u které byla prokázána na světle závislá magnetorecepce (Lohmann a Lohmann, 1993), gekon *Cyrtodactylus philippinus* (Marek a kol., 2010) nebo agama vousatá (*Pogona vitticeps*) (Nishimura a kol., 2010).

3.4.5 Magnetorecepce ptáků

Použití magnetického kompasu bylo poprvé prokázáno u červenky obecné (*Erithacus rubecula*). Experimenty v trychtýřovité nádobě s nimi od 80. let 20. století prováděli manželé Wiltschkovi, kteří testovali migrační orientaci červenek. V laboratorních podmínkách měnili hodnoty magnetického pole nebo na strop promítali hvězdnou oblohu a sledovali směr vzletu (Wiltschko a Wiltschko, 1972; Vácha a Němec, 2007).

Wiltschko a kol. (2007) u červenek prokázali schopnost orientace kompasovým smyslem v bílém světle. Pokud v experimentu použili monochromatické osvětlení, ptáci se orientovali pouze v modrozelené části spektra. Byli dezorientováni ve žlutém a červeném světle s tím, že na červené světlo si byli schopni postupně přivyknout a orientovat se v něm.

V podkoží horní části zobáku holubů domácích byly nalezeny nanokrystaly magnetitu. Kromě krystalického magnetitu se v nervových zakončeních objevují také komplexy amorfního železa, které mohou teoreticky fungovat jako lokální zesilovač magnetického pole (Wiltschko a Wiltschko, 2006).

Wiltschko a Wiltschko (1972) se zabývali hypotézou, že je do magnetorecepce ptáků zapojena i sítnice. Při zakrytí pravého oka nebo po přetnutí zrakového nervu nejsou např. tažní pěvci schopni orientace, zatímco pokud bylo stejným jedincům zakryto levé oko, problémy s orientací neměli.

Slavík tmavý (*Luscinia luscinia*) v důsledku vlivu magnetického pole hromadí tukové zásoby před migrací. Testovaní jedinci přijímali více potravy, pokud jim bylo uměle simulováno magnetické pole, na které byli zvyklí na tahu před přeletem Sahary (Fransson a kol., 2001).

Magnetickou orientaci bělořita šedého (*Oenanthe oenanthe*) ve Švédsku a západním Grónsku zkoumali Sandberg a kol. (1991). Experimenty prováděli při simulované zcela jasné nebo zatažené obloze. Dle výsledků se bělořiti orientovali podle magnetického pole Země při zatažené obloze, kdy nemohli využít jiných ukazatelů.

Natáčení a zarovnávání osy těla ptáků s hlavními osami geomagnetického pole sever – jih prokázali Hart a kol. (2013a) u kachen divokých (*Anas platyrhynchos*). Při přistávání na vodní hladinu naprostá většina ptáků dosedala severojižním směrem. Byl analyzován vliv ročního období, pozice Slunce, lokality i lehkého vánku a nebyl zjištěn žádný jiný systematicky ovlivňující faktor.

Pleskač a kol. (2017) sledovali krkavcovité ptáky při sběru potravy, kteří také zarovnávali svá těla podél severojižní osy. Orientací bažantích kuřat (*Phasianus colchicus*) u kruhových napáječek se zabývali Čapek a kol. (2017).

Experimenty s přemístěním tažných pěvců prokázaly, že zkušební jedinci, přemístění tisíce kilometrů od jejich migračního koridoru, jsou schopni dosáhnout cíle. Jsou schopni navrátit se do známého cíle po přemístění na neznámé místo. Nemohou se spoléhat na známé prostředí nebo informace shromážděné během cesty tam (Kishkinev a kol., 2021).

3.4.6 Magnetorecepce savců

Magnetický kompas byl prokázán u podzemních rypošů, konkrétně u druhu *Fucomys anelli*. Experimenty v kruhové aréně bylo zjištěno, že si stavějí hnízda severovýchodním směrem. Pomocí Helmholtzovy cívky byl posouván magnetický sever o 120° nebo 180° a rypoši měnili pozici stavěného hnízda (Burda a kol., 1990). Schopnost orientovat se magnetickým kompasem byla prokázána též u slepců (Spalacidae), křečků (Cricetidae), myšic a myší (Muridae; Malkemper a kol., 2015). Vliv magnetického pole na stavbu hnízd byl dále zjištěn u rypoše obřího (*Fucomys mechowii*), rypoše stříbřitého (*Heliophobius argenteocinereus*; Oliveirusová a kol., 2012; Malewski a kol., 2018), laboratorních myší (*Mus musculus var. alba*; Muheim a kol., 2006), křečička džungarského (*Phodopus sungorus*; Deutschlander a kol., 2003) a křečička bělonohého (*Peromyscus leucopus*; August a kol., 1989).

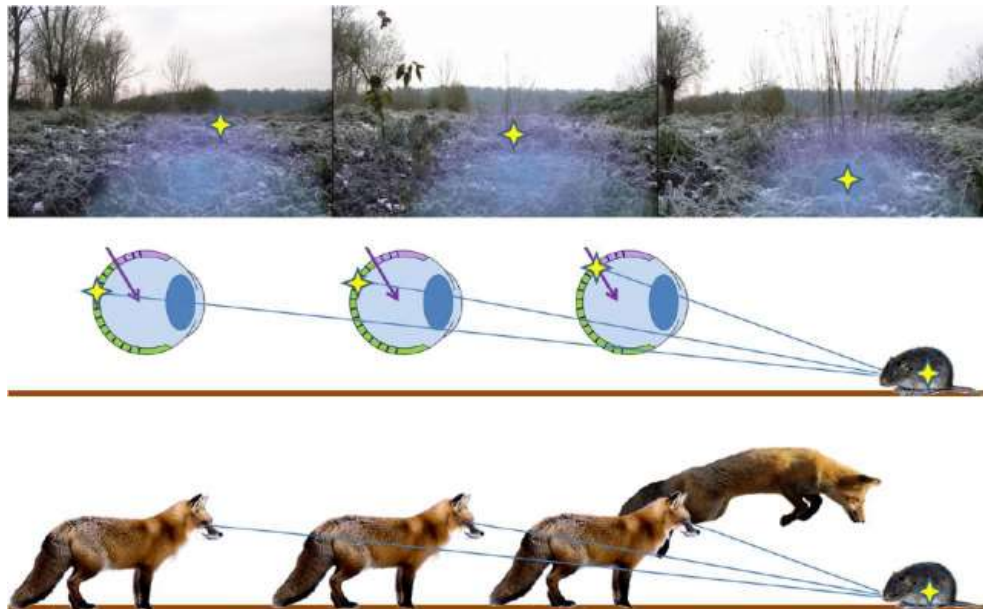
Z větších savců bylo poziční chování prokázáno při odpočinku a pasení sudokopytníků (Artiodactyla). Konkrétně u srnce obecného (*Capreolus capreolus*), jelena evropského (*Cervus elaphus*) a tura domácího (*Bos primigenius*; Begall a kol., 2008). Při analýze rozmístění stád skotu v prostoru pomocí satelitních snímků z Google Earth bylo zjištěno, že severojižní orientaci ovlivňuje vzdálenost jednotlivců v rámci stáda a sklon terénu větší než 5 % (Burda a kol., 2009).

Vyhodnocení osových směrů spárkaté zvěře (jelena evropského a srnce obecného) bylo založené na měření zálehů zvířat ležících ve sněhu a na směru os těl zvířat pozorovaných při pastvě a odpočinku. Spárkatá zvěř se významně orientovala v ose sever – jih (Begall a kol., 2008; Burda a kol., 2009).

Upřednostňování severojižní osy při odpočinku bylo prokázáno také u prasete divokého (*Sus scrofa*) a prasete savanového (*Phacochoerus africanus*), kdy byla měřena orientace těla v zálezích (Červený a kol., 2017).

První studie magnetorecepce šelem se zabývá chováním lišky obecné (*Vulpes vulpes*) při lovu tzv. myškováním (Červený a kol., 2011). Při myškování využívají lišky především sluch a zrak v závislosti na vysoké vegetaci nebo sněhové pokrývce. Experiment však ukázal, že lišky při skoku preferují severojižní orientaci těla a útoky v tomto směru jsou úspěšnější. Viz Obr. 3.

Studie Harta a kol. (2013b) přinesla první poznatky o vlivu magnetického pole na psy (*Canis lupus f. familiaris*). U každého psa byla pravidelně měřena osa těla při defekaci a urinaci. Statistická analýza dat nejprve neukázala žádnou významnou preferenci pro konkrétní kompasový směr. Proto byla data roztríděna podle podmínek magnetického pole (podle velikosti změn intenzity a polarity) panujících v době měření. Ukázalo se, že psi preferují nasměrování těla v severojižní ose pouze v obdobích, kdy je magnetické pole klidné. Naopak za magnetických bouří byl směr těla zcela náhodný.



Obr. 3: Myškovající lišky (<https://katedry.czu.cz/en/kmlz/magneticka-orientace>, citováno 2.2.2021)

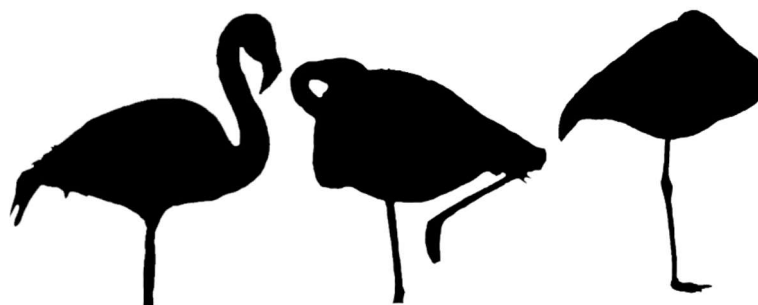
4 MATERIÁL A METODIKA

4.1 Sběr dat

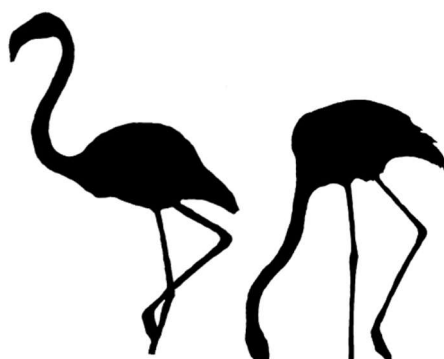
Celkem bylo změřeno 34322 jednotlivých ptáků ze 413 fotografií pořízených ve vysokém rozlišení (včetně opakovaných měření stejných jedinců v různé denní doby a částečně i na jiných místech). Sledovány byly čtyři druhy plameňáků – plameňák malý (*Phoeniconaias minor*), plameňák americký (*Phoenicopterus ruber*), plameňák chilský (*Phoenicopterus chilensis*) a plameňák růžový (*Phoenicopterus roseus*). Snímky byly pořizovány od července 2005 do ledna 2015 během různých měsíců a v různé denní doby na 18 lokalitách v osmi zemích světa (viz Tab. 1) v zoologických zahradách i ve volnosti. Ke každé fotografii byla známa lokalita, datum a čas pořízení snímku, počasí (slunečno/polojasno nebo oblačno/zataženo/deštivo) a směr měřený ručním kompasem nebo integrovaným kompasem ve fotoaparátu. Zastoupena byla většina denních časů.

4.2 Vyhodnocování a statistická analýza dat

Směrová orientace plameňáků byla měřena v počítači z fotografií pouze u těch jedinců, které bylo možné zřetelně rozeznat a změřit. Horní část fotografie byla považována za sever (0°). Ke každému změřenému jedinci byla zaznamenávána aktivita: stacionární (komfortní chování, odpočinek, stání; Obr. 4, Přílohy 1 a 2) nebo lokomoční (chůze, brodění, sběr potravy; Obr. 5, Přílohy 3 a 4).



Obr. 4: Stacionární aktivity



Obr. 5: Lokomoční aktivity

Nejprve byla tělem každého plameňáka na snímku v programu PowerPoint vedena šipka (šipka vždy směřovala k hlavě). Každá kategorie aktivit byla analyzována zvlášť. Následně byla fotografie odstraněna a nahrazena kompasovou růžicí, radiálně rozdělenou do 36 segmentů po 10° . Kompasová růžice byla oválně transformována, aby kompenzovala perspektivní zkreslení fotografií. Poté byly šipky posunuty do středu růžice a byl určen azimut k nejbližší desetistupňové hodnotě. Nakonec byly všechny hodnoty převedeny na skutečné stupně podle toho, na jaký azimut byl snímek vyfocen (viz Přílohy 5-8).

Kruhová statistická analýza dat byla provedena v programu Oriana 4.02 (Kovach Computing). Vzhledem k tomu, že ptáci v hejnu nejsou samostatnými jednotkami ani z hlediska směrové orientace, byl výsledný směr jedinců na snímku vypočítán jako průměr ze všech směrů dané fotografie pro každé hejno na daném místě a v daném čase. Každý snímek, tzn. každé hejno, představuje jedinečnou situaci, která se od následujícího snímku liší alespoň jedním (většinou ale více) z těchto parametrů: lokalita a stanoviště, datum, čas a počasí. Snímky byly navíc pořizovány z různých kompasových směrů. Na většině snímků plameňáci odpočívali, stáli nebo pečovali o peří, jednalo se tedy o stacionární aktivity. Pouze ve 14 % v Keni a ve 26 % v Evropě šlo o lokomoční aktivity. Z průměrných hodnot každé fotografie byl vypočítán samostatný hlavní průměrný vektor pro Keňu, různé evropské lokality, pro stacionární a lokomoční aktivity, slunečné a zatažené počasí a různé denní doby (dopoledne a odpoledne).

K testování významných odchylek od náhodného rozdělení byl použit Rayleighův test. Jednotlivé směry byly vztaženy k magnetickému severu (0°) a slunečnímu azimutu (0°). Sluneční azimut pro každou lokalitu a daný čas byl vypočítán podle kalkulátoru sluneční polohy NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/azel.html>).

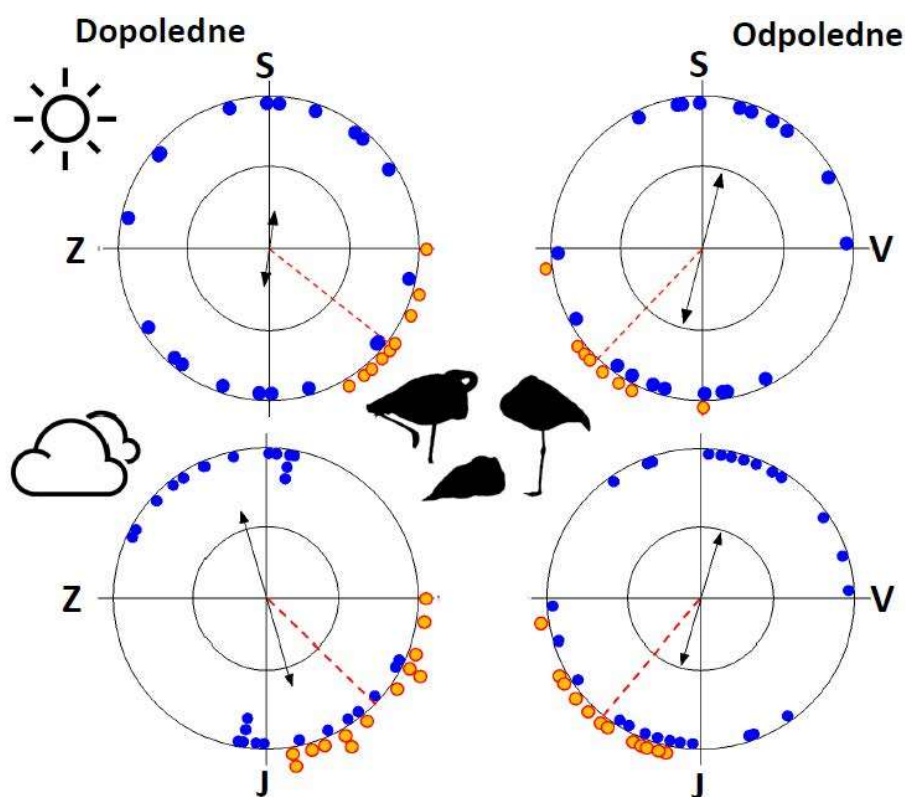
Kruhové diagramy byly zhotoveny v programu Oriana 4.02. Zvlášť byly vypočítány průměrné vektory magnetického alignmentu pro dopolední a odpolední azimut Slunce.

Tab. 1: Seznam lokalit a velikosti vzorků plameňáků

| Země | Lokalita | Zeměpisná šířka | Zeměpisná délka | Stacionární aktivity - počet snímků (jedinců) | | Lokomoční aktivity - počet snímků (jedinců) | | Celkový počet snímků (jedinců) |
|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--|----------------|--|---------------|---|
| | | | | Slunečno | Zataženo | Slunečno | Zataženo | |
| Keňa | Bogoria | 0°14'44.227" N | 36°6'3.314"E | 0 | 134 (24004) | 0 | 127 (3808) | 134 (27812) |
| Česká republika | Zoo Dvůr Králové | 50.434493° N | 15.799439° E | 3 (37) | 0 | 3 (14) | 0 | 3 (51) |
| Česká republika | Zoo Jihlava | 49.396546° N | 15.599223° E | 3 (79) | 7 (116) | 3 (18) | 5 (35) | 10 (248) |
| Česká republika | Zoo Liberec | 50.777894° N | 15.080334° E | 3 (30) | 4 (75) | 3 (13) | 4 (9) | 7 (127) |
| Česká republika | Zoo Ohrada | 49.042406° N | 14.421774° E | 9 (144) | 24 (488) | 6 (20) | 20 (145) | 33 (797) |
| Česká republika | Zoo Plzeň | 49.763846° N | 13.365027° E | 12 (37) | 8 (94) | 2 (11) | 5 (20) | 20 (162) |
| Česká republika | Zoo Praha I. | 50.115717° N | 14.409078° E | 12 (365) | 27 (867) | 8 (50) | 22 (242) | 39 (1524) |
| Česká republika | Zoo Praha II. | 50.116075° N | 14.407179° E | 10 (298) | 13 (313) | 11 (106) | 11 (119) | 23 (836) |
| Francie | Camargue | 43.530121° N | 5.048250° E | 30 (601) | 0 | 26 (254) | 0 | 30 (855) |
| Německo | Zoo Dortmund | 51.473592° N | 7.469867° E | 0 | 12 (56) | 0 | 10 (17) | 12 (73) |
| Německo | Zoo Duisburg | 51.435494° N | 6.809691° E | 12 (97) | 11 (70) | 12 (19) | 10 (21) | 23 (207) |
| Německo | Gruga-Park Essen | 51.428727° N | 6.988961° E | 0 | 9 (29) | 0 | 9 (46) | 9 (75) |
| Anglie | Zoo Paignton | 50.425296° N | 3.580848° W | 6 (24) | 19 (372) | 2 (7) | 18 (68) | 25 (471) |
| Maďarsko | Zoo Budapešť | 47.519946° N | 19.080702° E | 0 | 4 (99) | 0 | 4 (80) | 4 (179) |
| Španělsko | Isla Canela | 37.178761° N | 7.385807° W | 1 (4) | 11 (62) | 1 (17) | 8 (109) | 12 (192) |
| Španělsko | Marismas del Odiel | 37.240908° N | 6.997423° W | 21 (372) | 0 | 21 (153) | 0 | 21 (525) |
| Španělsko | Coto Doñana | 37.001034° N | 6.389730° W | 0 | 3 (24) | 0 | 0 | 3 (24) |
| Švýcarsko | Zoo Basilej | 47.547773° N | 7.578777° E | 0 | 5 (107) | 0 | 5 (57) | 5 (164) |
| Σ Evropa | 17 lokalit | | | 122 (2088) | 157 (2772) | 98 (682) | 131 (968) | 279 (6510) |
| Σ 8 zemí | 18 lokalit | | | 122 (2088) | 291 (26776) | 98 (682) | 258 (4776) | 413 (34322) |

5 VÝSLEDKY

Magnetický alignment evropských plameňáků vůči magnetickému severu během stacionárních aktivit byl sledován při slunečném a zataženém počasí a v dopoledních i odpoledních hodinách (viz Obr. 6). Každá dvojice protilehlých modrých teček ve vnějším kruhu představuje průměrný axiální vektor pro jednu konkrétní lokalitu na základě průměrných vektorů hejn fotografovaných na dané lokalitě v různých časech. Oboustranná šipka představuje hlavní průměrný axiální vektor (μ) vypočítaný ze všech axiálních průměrů. Délka průměrného vektoru (r) představuje stupeň shlukování mezi průměrnými vektory. Vnitřní kruh označuje hladinu významnosti 0,05 podle Rayleighova testu. Průměrné sluneční azimuty (a tedy také denní doby) jsou v každém vzorku reprezentovány žlutými tečkami mimo vnější kruh. Přerušovaná čára je průměrem slunečních azimutů a zároveň také očekávaným průměrným vektorem zarovnání, pokud ptáci mířili ke Slunci. Statistika viz Tab. 2.



Obr. 6: Magnetický alignment plameňáků vůči magnetickému severu během stacionárních aktivit (Evropa)

Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace evropských plameňáků vůči magnetickému severu při stacionárních aktivitách vycházejí z dat získaných při slunečném a zataženém počasí a v dopoledních i odpoledních hodinách. Magnetický alignment se vztahuje k příslušnému magnetickému severu ($= 0^\circ$); sluneční alignment se týká aktuální polohy Slunce ($= 0^\circ$) vypočítané pro danou lokalitu, datum a čas pozorování. Z výsledků je patrné, že průměrné vektory magnetického alignmentu se odchylojí asi o 15° od osy sever-jih, vektory pro sluneční alignment se odchylojí přibližně o 30° od příslušného azimutu Slunce. Pro ilustraci viz Obr. 6.

Tab. 2: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků vůči magnetickému severu při stacionárních aktivitách (Evropa; Nováková a kol., 2017)

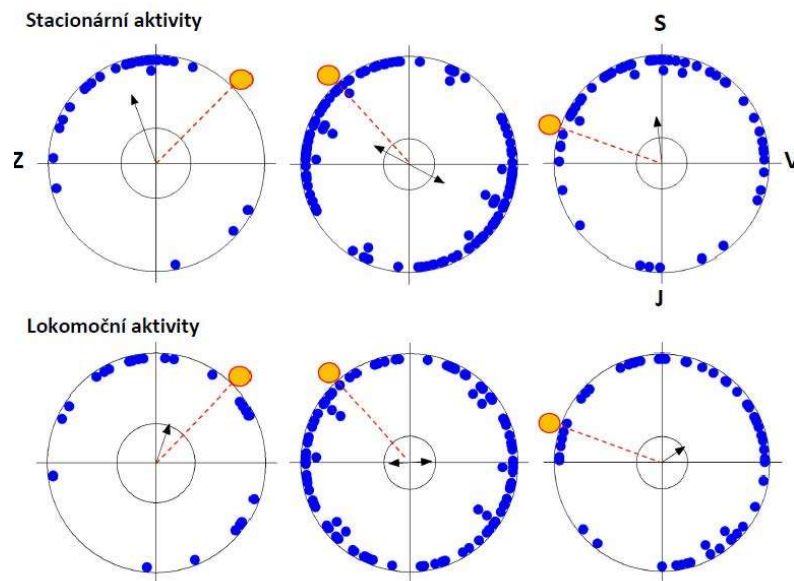
| Počasí | Zataženo | | | | Slunečno | | | |
|--|------------------------|----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Dopoledne (70 °-170 °) | | Odpoledne (180°-270 °) | | Dopoledne (70 °-170 °) | | Odpoledne (180°-270 °) | |
| Čas (sluneční azimut) | | | | | | | | |
| Počet pozorování/prům.lokalit/ptáků/hejn | 13/74/1546 | | 13/83/1226 | | 10/71/1209 | | 10/51/879 | |
| Alignment | Magnet. | Slun. | Magnet. | Slun. | Magnet. | Slun. | Magnet. | Slun. |
| Průměrný vektor (μ) | 164°/344° | 29°/209° | 16°/196° | 155°/335° | 8°/188° | 41°/221° | 14°/191° | 154°/334° |
| Délka průměrného vektoru (r) | 0,602 | 0,453 | 0,455 | 0,553 | 0,250 | 0,336 | 0,507 | 0,336 |
| Kruhová směrodatná odchylka | 29° | 36° | 36° | 31° | 48° | 42° | 33° | 42° |
| 95% interval spolehlivosti (+/- μ) | 147°-181° | 4°-54° | 351°-41° | 136°-174° | 269°-107° | 354°-87° | 349°-39° | 108°-201° |
| 99% interval spolehlivosti (+/- μ) | 141°-186° | 356°-61° | 344°-49° | 30°-18° | 238°-138° | 340°-102° | 341°-47° | 93°-215° |
| Rayleighův test (Z) | 4,710 | 2,669 | 2,687 | 3,970 | 0,625 | 1,129 | 2,574 | 1,130 |
| Rayleighův test (p) | 0,007 | 0,067 | 0,065 | 0,016 | 0,547 | 0,332 | 0,073 | 0,331 |

Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace evropských plameňáků vůči magnetickému severu při lokomočních aktivitách vycházejí z dat získaných při slunečném a zataženém počasí a v dopoledních i odpoledních hodinách. Magnetický alignment se vztahuje k příslušnému magnetickému severu ($= 0^\circ$); sluneční alignment se týká aktuální polohy Slunce ($= 0^\circ$) vypočítané pro danou lokalitu, datum a čas pozorování. Z výsledků je patrné, že průměrné vektory magnetického alignmentu se odchylojí asi o 40° od osy sever-jih nebo od příslušného azimutu Slunce. Pro ilustraci viz Obr. 7.

Tab. 3: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků vůči magnetickému severu při lokomočních aktivitách (Evropa; Nováková a kol., 2017)

| Počasí | Zataženo | | | | Slunečno | | | |
|--|--|-----------|---|----------|--|-----------|---|-----------|
| | Dopoledne (70° - 170°) | | Odpoledne (180° - 270°) | | Dopoledne (70° - 170°) | | Odpoledne (180° - 270°) | |
| Čas (sluneční azimut) | | | | | | | | |
| Počet pozorování/prům.lokalit/ptáků/hejn | 11/62/456 | | 13/69/512 | | 8/59/430 | | 10/39/252 | |
| Alignment | Magnet. | Slun. | Magnet. | Slun. | Magnet. | Slun. | Magnet. | Slun. |
| Průměrný vektor (μ) | 131°/311° | 105°/285° | 47°/227° | 9°/189° | 29°/209° | 106°/286° | 30°/210° | 170°/350° |
| Délka průměrného vektoru (r) | 0,223 | 0,179 | 0,385 | 0,401 | 0,246 | 0,526 | 0,367 | 0,250 |
| Kruhová směrodatná odchylka | 50° | 53° | 40° | 39° | 48° | 32° | 41° | 48° |
| 95% interval spolehlivosti ($\pm \mu$) | 344°-277° | | 16°-78° | 339°-38° | 63°-356° | 79°-133° | 350°-70° | 71°-269° |
| 99% interval spolehlivosti ($\pm \mu$) | 141°-186° | | 6°-88° | 330°-48° | 320°-99° | 71°-142° | 337°-82° | 39°-300° |
| Rayleighův test (Z) | 0,547 | 0,354 | 1,928 | 2,09 | 0,484 | 2,217 | 1,347 | 0,624 |
| Rayleighův test (p) | 0,59 | 0,711 | 0,146 | 0,123 | 0,631 | 0,107 | 0,266 | 0,547 |

Magnetický alignment plameňáků v Keni vůči magnetickému severu během stacionárních a lokomočních aktivit byl sledován pouze při zataženém počasí (viz Obr. 8). Měření probíhalo ráno (sluneční azimut 45° je reprezentován žlutou tečkou mimo vnější kruh v levém sloupci), v brzkém odpoledni (sluneční azimut 320° , prostřední sloupec) a pozdním odpoledni (sluneční azimut 290° , pravý sloupec). Modré tečky ve vnějším kruhu představují průměrný úhlový (v případě slunečních azimutů 45° a 290°) nebo axiální (dvojice protilehlých teček v případě slunečního azimutu 320°) vektor pro jedno konkrétní hejno fotografované v různých dnech v různé denní doby. Oboustranná šipka označuje průměr angulárního (nebo axiálního) vektoru (μ) vypočítaného ze všech angulárních nebo axiálních průměrů. Délka středního vektoru (r) představuje stupeň shlukování mezi středními vektory. Vnitřní kruh označuje hladinu významnosti 0,05 podle Rayleighova testu. Přerušovaná čára představuje očekávaný průměrný vektor zarovnání, pokud by ptáci mířili ke Slunci. Statistika viz Tab. 4.



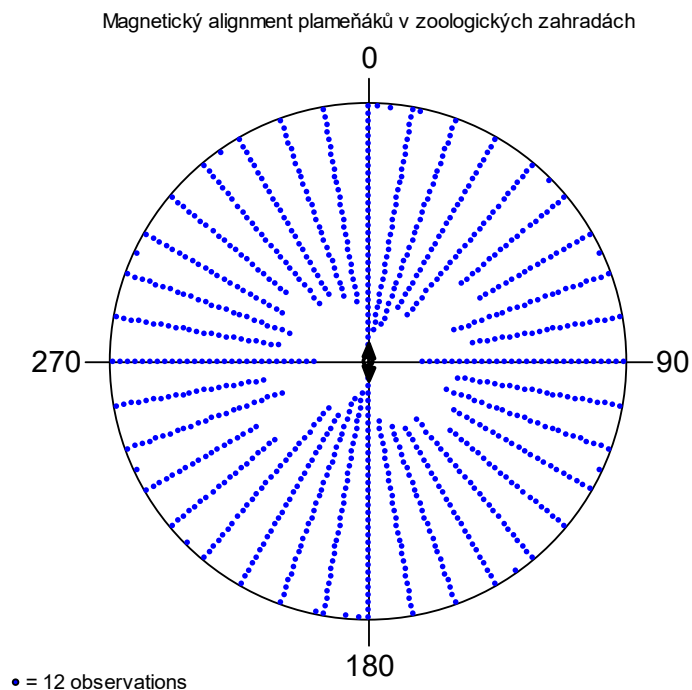
Obr. 8: Magnetický alignment plameňáků vůči magnetickému severu během stacionárních a lokomočních aktivit (jezero Bogoria – Keňa)

Výsledky cirkulární statistiky angulární a axiální orientace plameňáků v Keni vůči magnetickému severu při stacionárních a lokomočních aktivitách vycházejí z dat získaných pouze při zataženém počasí. Data byla pořízena v ranních (sluneční azimut 45°) i odpoledních (sluneční azimut 320° a 290°) hodinách. Pro ilustraci viz Obr. 8.

Tab. 4: Výsledky cirkulární statistiky axiální a angulární orientace plameňáků vůči magnetickému severu při stacionárních a lokomočních aktivitách (jezero Bogoria – Keňa; Nováková a kol., 2017)

| Aktivita | Stacionární | | | Lokomoční | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|----------|-----------|
| | 45° | 320° | 290° | 45° | 320° | 290° |
| Data | Angulární | Axiální | Angulární | Angulární | Axiální | Angulární |
| Počet pozorování/prům. hejn/ptáků | 28/1524 | 53/12939 | 53/9541 | 23/101 | 51/2074 | 53/1633 |
| Průměrný vektor (μ) | 340° | 118°/298° | 353° | 19° | 87°/267° | 56° |
| Délka průměrného vektoru (r) | 0,677 | 0,369 | 0,434 | 0,376 | 0,197 | 0,258 |
| Kruhová směrodatná odchylka | 51° | 40° | 74° | 80° | 52° | 94° |
| 95% interval spolehlivosti (+/- μ) | 321°-359° | 104°-133° | 329°-17° | 336°-61° | 59°-115° | 14°-97° |
| 99% interval spolehlivosti (+/- μ) | 315°-5° | 100°-137° | 322°-24° | 323°-74° | 50°-124° | 1°-110° |
| Rayleighův test (Z) | 12,814 | 7,205 | 9,999 | 3,257 | 1,977 | 3,517 |
| Rayleighův test (p) | $6,09 \times 10^{-7}$ | $7,43 \times 10^{-4}$ | $4,55 \times 10^{-5}$ | 0,037 | 0,139 | 0,030 |

Statistickým vyhodnocením 5308 dat ze zoologických zahrad byl zjištěn střední vektor $1,445^\circ$. Tento vektor je na axiálním histogramu znázorněn šipkou. Délka šipky odpovídá délce středního vektoru. Viz Obr. 9. a Tab. 5.

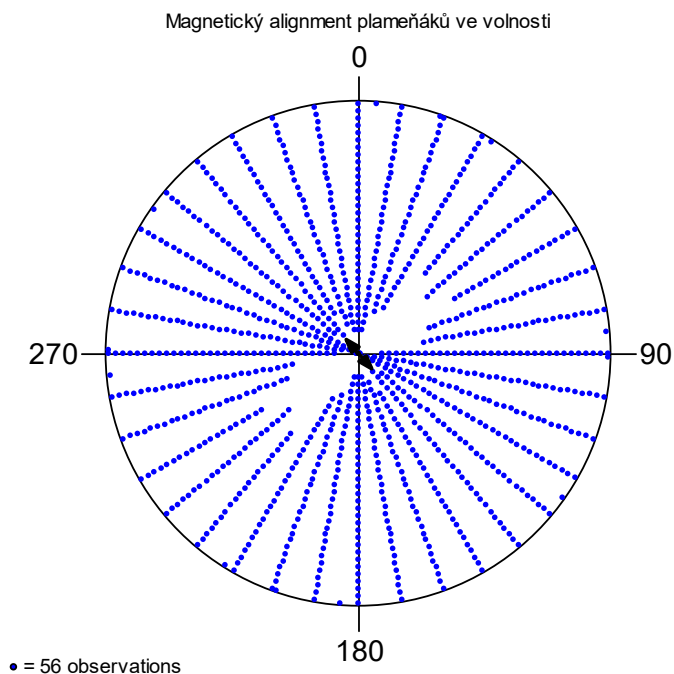


Obr. 9: Magnetický alignment plameňáků v zoologických zahradách

Tab. 5: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků v zoologických zahradách

| Data | Axiální |
|----------------------------------|----------------|
| Počet pozorování | 5 308 |
| Průměrný vektor (μ) | $1,445^\circ$ |
| Délka průměrného vektoru (r) | 0,074 |
| Kruhová směrodatná odchylka | $65,303^\circ$ |
| Rayleighův test (Z) | 29,354 |
| Rayleighův test (p) | $< 1E-12$ |

Statistickým vyhodnocením 5301 dat ze zoologických zahrad byl zjištěn střední vektor $138,983^\circ$. Tento vektor je na axiálním histogramu znázorněn šipkou. Délka šipky odpovídá délce středního vektoru. Viz Obr. 10 a Tab. 6.



Obr. 10: Magnetický alignment plameňáků ve volnosti

Tab. 6: Výsledky cirkulární statistiky axiální orientace plameňáků ve volnosti

| Data | Axiální |
|----------------------------------|-----------------|
| Počet pozorování | 29 014 |
| Průměrný vektor (μ) | $138,983^\circ$ |
| Délka průměrného vektoru (r) | 0,081 |
| Kruhová směrodatná odchylka | $64,238^\circ$ |
| Rayleighův test (Z) | 190,094 |
| Rayleighův test (p) | $< 1E-12$ |

Výsledky cirkulární statistiky ukázaly signifikantní alignment plameňáků směřujících na jih nebo podél osy sever-jih v Evropě a na sever v Keni během stacionárního chování (Tab. 2, 4, Obr. 6 a 8). Statisticky méně významná je orientace během lokomoce (chůze a sběr potravy; Tab. 3, 4, Obr. 7 a 8). Alignment byl výraznější při zatažené obloze, zejména v ranních hodinách. V průběhu dne se méně odchýlil od osy sever-jih, než od skutečného azimutu Slunce. Nebyla zjištěna žádná korelace mezi směrem pořízení fotografie a průměrným směrem plameňáků měřeným na konkrétní fotografii ($r = -0,003$ pro angulární data a $r = -0,0966$ pro axiální data). Za zataženého počasí plameňáci jakoby sledovali směr Slunce a mířili k němu. Odchylka magnetického alignmentu od osy sever-jih během stacionárních aktivit byla výrazně menší (v průměru o 20°) než aktivit ze slunečního azimutu (v průměru o 40°). Průměrné hodnoty plameňáků na severním a západním břehu keňského jezera Bogoria se významně nelišily, ptáci směřovali na sever.

6 DISKUSE

Otázkou, na kterou je třeba odpovědět, je, zda mohly být výsledky ovlivněny metodou sběru dat a jejich měření. Chyby v odhadu úhlové hodnoty směru těla ptáků, kteří nesměřovali zcela rovnoběžně nebo kolmo ke směru fotografování, nelze vyloučit z důvodu zkreslení při pohledu na snímek. Tento druh chyb by však měl za následek spíše kvadrimodální rozdělení hodnot do rovnoběžných a kolmých směrů.

Ačkoli někteří jedinci (zejména v zoologických zahradách) byly měření opakovaně, záznamy byly pořizovány v různé denní doby, za různých povětrnostních podmínek a během různých činností. Opakované záznamy tedy nepředstavují pseudoreplikaci.

To, že plameňáci směřují svá těla určitým směrem, může být obecně vysvětleno třemi faktory: směrem větru, polohou Slunce a magnetickým polem. Všechny tyto faktory mohou potenciálně sloužit jako ukazatelé směru. Vliv větru v této studii lze vyloučit, protože pozorování byla prováděna za bezvětří. Lokomoční aktivity jsou zpravidla zaměřeny na konkrétní cíl (přesun na jiné místo, sběr potravy) a vliv Slunce či magnetického pole zde může být „maskován“ příslušnou motivací. Sluneční (nebo magnetický) alignment má pro plameňáky spíš orientační než termoregulační funkci – ptáci Slunce sledují, „dívají se do něho“ a nestaví se vůči němu kolmo, aby získali maximum tepelného záření.

Lze tedy předpokládat, že magnetický alignment zkalibrovaný s alignmentem slunečním může při zatažené obloze fungovat jako vodítko směru. Hejno je tak např. připraveno okamžitě vzlétnout daným směrem, je-li nečekaně vyrušeno. Může se jednat o základ tzv. nesmyslné orientace (silné tendence létat jedním směrem), která nesouvisí s žádnou naváděcí schopností (Matthews, 1961). Thake (1981) tento jev vysvětluje v kontextu únikového chování a tvrdí, že ptáci, kteří se v hejnu orientují stejným směrem, jsou v případě ohrožení ve výhodě. Magnetický či sluneční azimut také může být podkladem pro vytváření tzv. mentálních map (srov. s Collett a Baron, 1994). Je snadnější otočit tělo než otočit prostorovou mapu v mysli. Takové chování bylo pozorováno i ve studii Harta a kol. (2013b), v níž bylo pozorováno cílené nasměrování psů při značení teritorií a zapamatování si označených míst.

Je důležité uvést, že hypotéza „nesmyslné orientace“ nekonkuruje složitým modelům vysvětlujícím koordinované a synchronizované změny v pohybu a směru

v rojích hmyzu a hejnech ryb či ptáků (Couzin a kol., 2005; Buhl a kol., 2006; Katz a kol., 2011).

Společný ukazatel směru je důležitý především v situacích, kdy mají ptáci omezenou manévrovatelnost (při přistání, vzletu, především u těžších ptáků) či omezenou vizuální kontrolu (při současném vzletu z husté vegetace nebo pokud jsou jedinci rozmístěni na větší ploše). Lze také předpokládat, že mezi podněty sloužícími jako směrové ukazatele, existuje určitá hierarchie. Např. pro vzlet a přistání ptáků by měl být nejdůležitějším ukazatelem vítr. Za bezvětrí může být jednoznačným ukazatelem směru Slunce.

Za slunečných dnů je pravděpodobně nepřetržité vizuální sledování skutečné polohy Slunce snazší a rychlejší než monitorování magnetického směru. Je pravděpodobné, že z tohoto důvodu plameňáci směřují svá těla podle magnetického pole, aby byli připraveni náhle vzlétnout. Stále však není jasné, proč je alignment výraznější v ranních hodinách víc než v odpoledních.

Porovnáním výsledků ze zoologických zahrad a z volnosti bylo zjištěno, že se severojižně orientují plameňáci v zoologických zahradách. Může to být způsobeno skutečností, že jedinci držení v lidské péči se nemusí obávat predátorů jako ve volné přírodě a na přítomnost návštěvníků jsou zvyklí.

Zajímavé by bylo studium orientace těl plameňáků v noci nebo pod narušeným magnetickým polem, buď v důsledku geomagnetických bouří (viz Hart a kol., 2013b) nebo v důsledku elektromagnetického znečištění (srov. Engels a kol., 2014) a analýza směrů vzletů a přistání (viz Hart a kol., 2013a).

7 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla testována hypotéza, že i plameňáci mají společný indikátor směru. Předmětem zkoumání byly čtyři druhy plameňáků (plameňák americký, p. chilský, p. malý a p. růžový). Šetření probíhalo ve volnosti i v zoologických zahradách na 18 lokalitách v osmi zemích světa v různé denní doby a za různého počasí.

Cílem práce bylo sledování plameňáků při aktivitách stacionárních (stání, odpočinku a komfortním chování) i lokomočních (chůzi a sběru potravy). Následně potvrdit nebo vyvrátit existenci statisticky významných rozdílů při stacionárních nebo lokomočních aktivitách. Dále zjistit, jakou roli hraje v nasměrování osy těla počasí - zda je lepším prediktorem magnetický sever při zatažené obloze nebo poloha Slunce za jasného počasí. A na závěr zjistit, zda existují signifikantní rozdíly v nasměrování osy těla mezi jedinci chovanými v lidské péči nebo žijícími ve volnosti.

Plameňáci na všech evropských lokalitách vykazovali významnou preferenci zarovnávat svá těla na jih během všech stacionárních aktivit, zatímco afričtí plameňáci z Keni měli tendenci mířit na sever. Naopak zarovnání těl při lokomočních aktivitách bylo zcela nahodilé. Za zataženého počasí (především v ranních hodinách) byl magnetický jih nebo sever lepším ukazatelem směru než poloha Slunce. Toto zjištění lze interpretovat jako důkaz existence magnetického alignmentu plameňáků s tím, jeho význam je spíš informativní. Zároveň se zdá, že za bezvětří mohou poloha Slunce a magnetické pole poskytovat společný referenční směr, a že vizuální podněty jsou pro orientaci ptáků dominantnější než magnetické podněty a magnetorecepce. Magnetorecepce může být „zapnuta“ až při absenci vizuálních podnětů.

Dle statistické analýzy dat se severojižně orientují plameňáci v zoologických zahradách. Není zcela jasné, proč tomu tak je. Může to být způsobeno skutečností, že přestože jsou drženi v lidské péči, jsou zvyklí na návštěvníky i ošetřovatele a nemusí se obávat predátorů jako ve volnosti.

V budoucnu by bylo jistě zajímavé studium magnetického alignmentu plameňáků v noci, za silných magnetických bouří, pod dráty vysokého napětí nebo v oblastech s vysokou hladinou elektrosmogu. Zcela nezodpovězena také zůstává otázka, proč je magnetický alignment výraznější v ranních hodinách na rozdíl od odpoledních.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ALVES, O. C.; WAJNBERG, E.; OLIVEIRA, J. F.; ESQUIVEL, D. M., 2004: Magnetic Material Arrangement in Oriented Termites: a Magnetic Resonance Study. *Journal of Magnetic Resonance*, 168(2): 246-251.
- AUGUST, P.V.; AYVAZIAN, S.G.; ANDERSON, J.G.T., 1989: Magnetic Orientation in a Small Mammal, *Peromyscus leucopus*. *Journal of Mammalogy*, 70(1): 1-9.
- BEGALL, S.; ČERVENÝ, J.; NEFF, J.; VOJTĚCH, O.; BURDA, H., 2008: Magnetic Alignment in Grazing and Resting Cattle and Deer. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 105(36): 13451-13455.
- BEGALL, S.; MALKEMPER, E. P.; ČERVENÝ, J.; NĚMEC, P.; BURDA, H., 2013: Magnetic Alignment in Mammals and Other Animals. *Mammal Biology*, 78(1): 10-20.
- BUCHA, V., 1975: Geomagnetické pole a jeho přínos k objasnění vývoje Země. *Academia*, Praha, 368 s.
- BUCHER, E.H.; ECHEVARRIA, A.L.; JURI, M.D.; CHANI J.M., 2000: Long-term survey of Chilean flamingo breeding colonies on Mar Chiquita Lake, Cordoba, Argentina. *Waterbirds*, 23: 114-118.
- BEAZLEY, M., 1995: Anatomie Země. *Albatros*, Praha, 122 s.
- BUHL, J.; SUMPTER, D.J.T.; COUZIN, I.D.; HALE, J.J.; DESPLAND, E.; MILLER, E.R.; SIMPSON, S.J., 2006: From order to disorder in marching locusts. *Science*, 312: 1402-1406.
- BURDA, H.; MAROLD, S.; WESTENBERGER, T.; WILTSCHKO, R.; WILTSCHKO, W., 1990: Magnetic kompas Orientation in the Subterranean Rodent *Cryptomys hottentotus* (Bathyergidae). *Experientia*, 46(5): 528-530.
- BURDA, H.; BEGALL, S.; ČERVENÝ, J.; NEFF, J.; NĚMEC, P., 2009: Extremely LowFrequency Elektromagnetic Fields Distrupt Magnetic Alignment of Ruminants. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 106 (14): 5708-5713.
- COLLETT, T.S.; BARON, J., 1994: Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. *Nature*, 368: 137-140.

- COUZIN, I.D.; KRAUSE, J.; FRANKS, N.R.; LEVIN, S.A., 2005: Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature*, 433: 513-516.
- CRAMP, S.; SIMMONS, K.E.L., 1977: The birds of the Western Palearctic, vol 1. *Oxford University Press, Oxford*.
- ČAPEK, F.; PRŮCHA, J.; SOCHA, V.; HART, V.; BURDA, H., 2017: Directional orientation of pheasant chicks at the drinking dish and its potential for research on avian magnetoreception. *Folia Zoologica*, 66(3): 175-182.
- ČERVENÝ, J.; BEGALL, S.; KOUBEK, P.; NOVÁKOVÁ, P.; BURDA, H., 2011: Directional Preference May Enhance Hunting Accuracy in Foraging Foxes. *Biology Letters*, 7(3): 355-357.
- ČERVENÝ, J.; BURDA, H.; JEŽEK, M.; KUŠTA, T.; HUSINEC, V.; NOVÁKOVÁ, P.; HART, V.; HARTOVÁ, V.; BEGALL, S.; MALKEMPER, E.P., 2017: Magnetic alignment in warthogs *Phacochoerus africanus* and wild boars *Sus scrofa*. *Mammal Review*, 47(1): 1-5.
- DE JONG, D., 1982: Orientation of Comb Building by Honeybees. *Journal of Comparative Physiology*, 147(4): 495-501.
- DEUTSCHLANDER, M. E.; FREAK, M. J.; BORLAND, S. CH.; PHILLIPS, J. B.; MADDEN, R. C.; ANDERSON, L. E.; WILSON, B. W., 2003: Learned Magnetic Compass Orientation by the Siberian Hamster, *Phodopus sordurus*. *Animal Behaviour*, 65(4): 779-786.
- DIEGO-RASILLA, F.J.; PHILLIPS, J.B., 2007: Magnetic Compass Orientation in Larval Iberian Green Frogs, *Pelophylax perezi*. *Ethology*, 133(5): 474-479.
- DIEGO-RASILLA, F.J.; PÉREZ-MELLADO, V.; PÉREZ-CEMBRANOS, A., 2017: Spontaneous magnetic alignment behaviour in free-living lizards. *The Science of Nature*, 104(13). <https://doi.org/10.1007/s00114-017-1439-7>.
- EDER, S. H. K.; CADIOU, H.; MUHAMAD, A.; MCNAUGHTON, P. A.; KIRSCHVINK, J. L.; WINKLHOFER, M., 2012: Magnetic Characterization of Isolated Candidate Vertebrate Magnetoreceptor Cells. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 109(30): 12022-12027.

- ENGELS, S.; SCHNEIDER, N.L.; LEFELDT, N., 2014: Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature*, 509: 353-356.
- FLEISCHMANN, P.N.; GROB, R.; RÖSSLER, W., 2020: Magnetoreception in Hymenoptera: importance for navigation. *Animal Cognition*, 23: 1051-1061. <https://doi.org/10.1007>.
- FLEISSNER, G.; HOLTKAMP-RÖTZLER E.; HANZLIK, M.; WINKLHOFER, M.; PETERSEN, N.; WILTSCHKO, W., 2003: Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons. *The Journal of Comparative Neurology*, 458(4): 350-360.
- FOLEY, L.; GEGEAR, R.; REPERT, S. Human cryptochrome exhibits light-dependent magnetosensitivity. *Nature Communications*, 2, 356 (2011). <https://doi.org/10.1038/ncomms1364>.
- FORMICKI, K.; KORZELECKA-ORKISZ, A.; TAŃSKI, A., 2019: Magnetoreception in Fish. *Journal of Fish Biology*, 95(1): 73-91.
- FRAKE, M.; PHILLIPS, J. B., 2005: Light-Dependent Shift in Bullfrog Tadpole Magnetic Compass Orientation: Evidence for a Common Magnetoreception Mechanism in Anuran and Urodele Amphibians. *Ethology*, 111: 241-254.
- FRANSSON, T.; JAKOBSSON, S.; JOHANSSON, P.; KULLBERG, C.; LIND, J.; VALLIN, A., 2001: Magnetic Cues Trigger Extensive Refuelling. *Nature*, 414 (6859): 35-36.
- GOULD, J. L.; KIRSCHVINK, J. L.; DEFFEYES, K. S.; BRINES, M. L., 1980: Orientation of Demagnetized Bees. *Journal of Experimental Biology*, 86: 1-8.
- GUERRA, P.A.; GEGEAR, R.J.; REPERT, S.M., 2014: A magnetic compass aids monarch butterfly migration. *Nature Communications* 5: 4164. <https://doi.org/10.1038/ncomms5164>.
- HALL, A.S.; VÁZKUEZ-QUINTO, A.M.K.; RAMÍREZ-VELÁZQUEZ, A.; SMITH, E.N., 2016: Evidence for Philopatry and Homing in a New World Elapid Snake. bioRxiv 092833; doi: <https://doi.org/10.1101/092833>.

- 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., 2012: Magnetic Alignment in Carps: Evidence from the Czech Christmas Fish Market. *Plose One*, 7(12): 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., 2013a: Directional Compass Preference for Landing in Water Birds. *Frontiers in Zoology*, 10(1): 1-10.
- HART, V.; NOVÁKOVÁ, P.; MALKEMPER, E.; BEGALL, S.; HANZAL, V.; JEŽEK, M.; KUŠTA, T.; NĚMCOVÁ, V.; ADÁMKOVÁ, J.; BENEDIKTOVÁ, K.; ČERVENÝ, J.; BURDA, H., 2013b: Dogs are sensitive to small variations of the Earth's magnetic field. *Frontiers in Zoology*, 10(1): 1-2.
- HSU, Ch-Y; LI Ch-W., 1994: Magnetoreception in Honeybees. *Nature*, 265(5168): 95-97.
- JANÁČKOVÁ, A., 1995: Země je veliký magnet. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 40(4): 192-197.
- JOHNSEN, S.; LOHMANN, K. J., 2005: The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience*, 6: 703-712 63.
- JOHNSEN, S.; LOHMANN, K., 2008: Magnetoreception in Animals. *Physics Today*, 29(3): 29-35.
- JOHNSON, A.R., 1989: Movements of greater flamingos (*Phoenicopterus ruber roseus*) in the Western Palearctic. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 44: 75-94.
- KATZ, Y.; TUNSTROM, K.; IOANNOU, C.C.; HUEPE, C.; COUZIN, D., 2011: Inferring the structure and dynamics of interactions in schooling fish. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 108: 18720-18725.
- KIRSCHVINK, J. L.; WALKER, M. M.; CHANG, S-B.; DIZON, A. E.; PETERSON, K. A., 1985: Chains of Single-Domain Magnetite Particles in Chinook Salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*. *Journal of Comparative Physiology A*. 1985. roč. 157. s. 375-381.

- KISHKINEV, D.; PACKMOR, F.; ZECHMEISTER, T.; WINKLER, H.CH.; CHERNETSOV, N.; MOURITSEN, H.; HOLLAND, R.A., 2021: Navigation by extrapolation of geomagnetic cues in a migratory songbird. *Current Biology*, in press.
- LANDLER, L.; GOLLMANN, G., 2011: Magnetic orientation of the Common Toad: establishing an arena approach for adult anurans. *Frontiers in Zoology*, 8(6). <https://doi.org/10.1186/1742-9994-8-6>.
- LIGHT, P.; SALMON, M.; LOHMANN, K. J., 1993: Geomagnetic Orientation of Loggerhead Sea Turtles: Evidence for an Inclination Compass. *Journal of Experimental Biology*, 182: 1-10.
- LOHMAN, K.J., 2010: Magnetic field perception. *Nature*, 464: 1140-1142.
- LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F., 1993: A Light-Independent Magnetic Compass in the Leatherback Sea Turtle. *The Biological Bulletin*, 185(1): 149-151.
- LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F., 1994: Detection of Magnetic Inclination Angle by Sea Turtles: A Possible Mechanism for Determining Latitude. *Journal of Experimental Biology*, 194: 23-32.
- LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F., 1996: Detection of Magnetic Field Intensity by Sea Turtles. *Nature*, 380: 59-61.
- LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F., 1998: Migratory Guidance Mechanisms in Marine Turtles. *Journal of Avian Biology*, 28: 585-596.
- LOHMANN, K. J.; LOHMANN, C. M. F., 2012: The Magnetic Map of Hatchling Loggerhead Sea Turtles. *Current Opinion in Neurobiology*, 22(2): 336-342.
- MAHER, B. A., 1998: Magnetite Biomineralization in Termites. *Proceedings: Biological Sciences*, 265(1397): 733-737.
- MALEWSKI, S.; MALKEMPER, E.P.; SEDLÁČEK, F.; ŠUMBERA, R.; CASPAR, K.R.; BURDA, H.; BEGALL, S., 2018: Attracted by a magnet: Exploration behaviour of rodents in the presence of magnetic objects. *Behavioural Processes*. 151:11-15. doi: 10.1016/j.beproc.2018.02.023.

- MALKEMPER, E.P.; EDER, S.H.K.; BEGALL, S.; PHILLIPS, J.B.; WINKLHOFER, M.; HART, V.; BURDA, H., 2015: Magnetoreception in the wood mouse (*Apodemus sylvaticus*): influence of weak frequency-modulated radio frequency fields. *Scientific Reports*, 5:9917. DOI: 10.1038/srep09917.
- MAREK, C.; BISSANTZ, N.; CURIO, E.; SIEGERT, A.; TACUD, B.; ZIGGEL, D., 2010: Spatial Orientation of the Philippine Bent-Toed Gecko (*Cyrtodactylus philippinicus*) in Relation to its Home Range. *Salamandra*, 46(2): 93-97.
- MARHOLD, S.; WILTSCHKO, W.; BURDA, H., 1997: A magnetic Polarity Compass for Direction Finding in a Subterranean Mammal. *Naturwissenschaften*, 84(9): 421-423.
- MATTHEWS, G.V.T., 1961: "Nonsense" orientation in mallard *Anas platyrhynchos* and its relation to experiments on bird navigation. *Ibis*, 103: 211-230.
- MORITZ, R. E.; BURDA, H.; BEGALL, S.; NĚMEC, P., 2007: Magnetic compass: A useful tool underground. In: BEGALL, S.; BURDA, H.; SCHLEICH, C. E. (eds.). *Subterranean rodents: News from underground*. Berlin: Springer, 161-174.
- MOURITSEN, H.; RITZ, T., 2005: Magnetoreception and its use in bird navigation. *Curr. Opin. Neurobiol*, 15: 406-414.
- MUHEIM, R.; EDGAR, N. M.; SLOAN, K. A.; PHILLIPS, J. B., 2006: Magnetic compass orientation in C57BL/6 mice. *Learning & Behavior*, 34(4): 366-373.
- NISHIMURA, T.; OKANO, H.; TADA, H.; NISHIMURA, E.; SUGIMOTO, K.; MOHRI, K.; FUKUSHIMA, M., 2010: Lizards Respond to an Extremely Low-Frequency Electromagnetic Field. *Journal of Experimental Biology*, 213: 1985-1990.
- NOVÁKOVÁ, P.; KOŘANOVÁ, D.; BEGALL, S.; MALKEMPER E.P.; PLESKAČ, L.; ČAPEK, F.; ČERVENÝ, J.; HART, V.; HARTOVÁ, V.; HUSINEC, V.; BURDA, H., 2017: Direction indicator and magnetic compass-aided tracking of the sun by flamingos (*Phoenicopteridae*)? *Folia Zoologica*, 66: 79-86.
- OLIVERIUSOVÁ, L.; NĚMEC, P.; KRÁLOVÁ, Z.; SEDLÁČEK, F., 2012: Magnetic Compass Orientation in Two Strictly Subterranean Rodents: Learned or SpeciesSpecific Innate Directional Preference? *Journal of Experimental Biology*, 215(20): 3649-3654.

- PAPI, F.; LUSCHI, P.; AKESSON, S.; CAPOGROSSI, S.; HAYS, G.C., 2000: Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles. *Journal of Experimental Biology*, 203: 3435-3443;
- PLESKAČ, L.; HART, V.; NOVÁKOVÁ, P.; PAINTER, M.S., 2017: Spatial orientation of foraging corvids consistent with spontaneous magnetic alignment responses observed in a variety of free-roaming vertebrates. *Folia Zoologica*, 66(2): 87-94.
- PHILLIPS, J. B., 1977: Use of the earth's magnetic field by orienting cave salamanders (*Eurycea lucifuga*). *Journal of Comparative Physiology*, 121(2): 273-288.
- QUINN, T. P.; MERRILL, R. T.; BRANNON, E. L., 1981: Magnetic Field Detection in Sockeye Salmon. *Journal of Experimental Zoology*, 217(1): 137-142.
- RITZ, T.; ADEM, S.; SCHULTEN, K., 2000: A Model for Photoreceptor-Based Magnetoreception in Birds. *Biophysical Journal*, 78: 707-718.
- RODDA, G. H., 1984: The Orientation and Navigation of Juvenile Alligators: Evidence of Magnetic Sensitivity. *Journal of Comparative Physiology A.*, 154(5): 649-658.
- SANDBERG, R.; OTTOSSON, U.; PETTERSSON, J., 1991: Magnetic Orientation of Migratory Wheateaters (*Oenanthe oenanthe*) in Sweden and Greenland. *Journal of Experimental Biology*, 155: 51-64.
- SCHLEGEL, P. A.; RENNER, H., 2007: Innate Preference for Magnetic Compass Direction in the Alpine Newt, *Triturus alpestris* (Salamandridae, Urodela)? *Journal of Ethology*, 25(2): 185-193.
- TALIKINA, M.; KRYLOV, V.; IZYUMOV, Y.; CHEBOTAREVA, V., 2013: The effect of a typical magnetic storm on mitosis in the embryo cells and the length and weight of roach (*Rutilus rutilus* L.) prolarvae. *Inland Water Biology*, 6. 10.1134/S1995082912030145.
- THAKE, M.A., 1981: Nonsense orientation: an adaptation for flocking during predation? *Ibis*, 123: 247-248.
- TOMANOVÁ, K., 2009: Test magnetorecepce potemníka hnědého *Tribolium castaneum*. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 62 s.
- VÁCHA M., 1994: Kompas zvířat a co o něm víme. *Vesmír*, 73: 249-251.

- VÁCHA, M.; NĚMEC, P., 2007: Kompas a mapa: Orientace v geomagnetickém poli. *Vesmír*, 86(4): 224-228.
- VÁCHA, M.; KVÍČALOVÁ, M.; PŮŽOVÁ, T., 2010: American cockroaches prefer four cardinal geomagnetic positions at rest. *Behaviour*, 147(4): 425-440.
- VÁCHA, M.; PŮŽOVÁ, T.; DRŠTKOVÁ, D., 2008: Effect of light wavelength spectrum on magnetic compass orientation in *Tenebrio molitor* A Neuroethology, sensory, neural, and behavioral physiology. *Behaviour*, 194(10): 853-859.
- WALKER, M.M.; DIEBEL, C.E.; KIRSCHVINK, J.L., 2006: Magnetoreception. *Fish Physiology*, 25: 337-376.
- WILTSCHKO, R.; STAPPUT, K.; BISCHOF, H.J.; WILTSCHKO, W., 2007: Light dependent magnetoreception in birds: increasing intensity of monochromatic light changes the nature of the response. *Frontiers in Zoology*, 4:5. doi:10.1186/1742-9994-4-5.
- WILTSCHKO, W.; WILTSCHKO, R., 1972: Magnetic compass of European robins. *Science*, 176(4030): 62-64.
- WILTSCHKO, W.; WILTSCHKO, R., 1996: Magnetic orientation in birds. *Journal of Experimental Biology*, 199: 29-38.
- WILTSCHKO, W.; WILTSCHKO, R., 2005: Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology A*, 191: 675-693.
- WILTSCHKO, R.; WILTSCHKO, W., 2006: Magnetoreception. *BioEssays*, 28(2): 157-168.
- WILTSCHKO, W.; WILTSCHKO, R.; RITZ, T., 2011: The mechanism of the avian magnetic compass. *Procedia Chemistry*, 3(1): 276-284.
- WINKLHOFER, M., 2009: The physics of geomagnetic-field transduction in animals. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(12): 5259-5265.
- WINKLHOFER, M., 2010: Magnetoreception. *J. R. Soc. Interface*, 7: 131-134.
- YAN, L.; ZHANG, S.; CHEN, P.; LIU, H.; YIN, H.; LI, H., 2012: Magnetotactic bacteria, magnetosomes and their application. *Microbiological Research*, 167(9): 77-102.

9 PŘÍLOHY

Příloha 1: Stacionární aktivity – odpočinek



Příloha 2: Stacionární aktivity – komfortní chování



Příloha 3: Lokomoční aktivity – sběr potravy



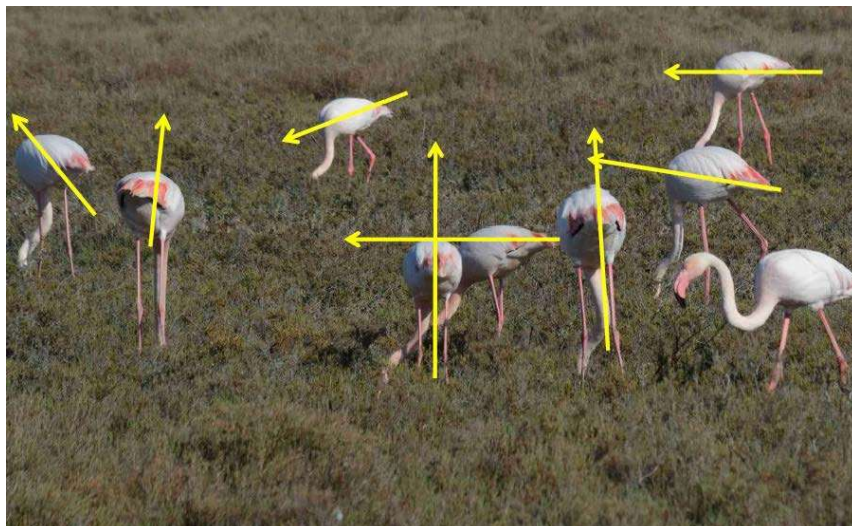
Příloha 4: Lokomoční aktivity – chůze a sběr potravy



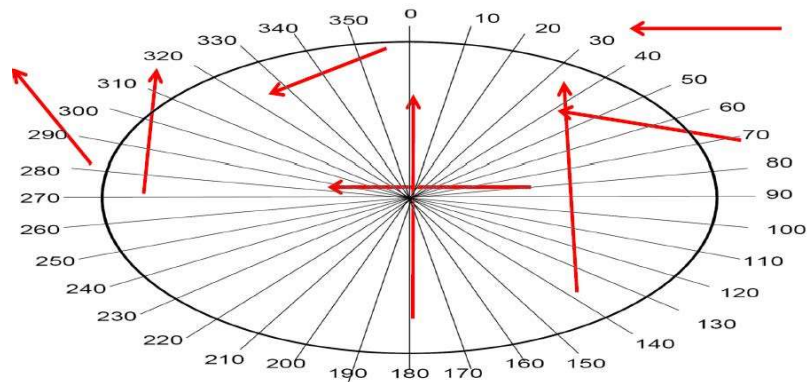
Příloha 5: Postup při vyhodnocování fotografií – ke každé fotografii jsou známy informace o lokalitě (v tomto případě Camargue, Francie), datumu (09.04.2015), času (16:15), počasí (slunečno), aktivitě (sběr potravy) a směru, v němž byla fotografie pořízena (190°).



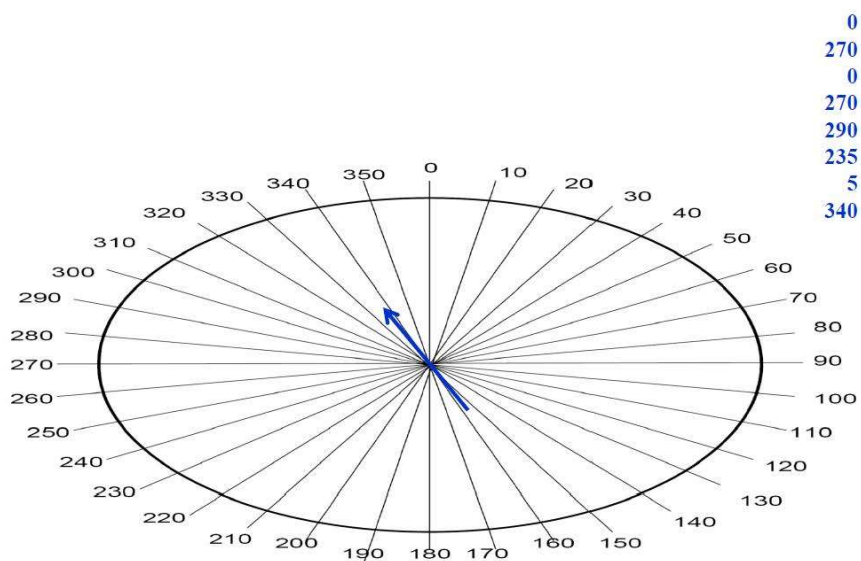
Příloha 6: Postup při vyhodnocování fotografií – fotografie byly oříznuty a roztaženy na obrazovku pro lepší přehlednost a každou osou těla plameňáka byla vedena šipka (směrem k hlavě).



Příloha 7: Postup při vyhodnocování fotografií – fotografie byla odstraněna a nahrazena kompasovou růžicí. Kompasová růžice byla oválně transformována, aby kompenzovala perspektivní zkreslení fotografií. Poté byly šipky posunuty do středu růžice a byl určen azimut k nejbližší desetistupňové hodnotě.



Příloha 8: Postup při vyhodnocování fotografií – všechny hodnoty byly převedeny na skutečné stupně podle toho, na jaký azimut byl snímek vyfocen. Výsledný vektor na snímku byl vypočítán jako průměr ze všech směrů dané fotografie.



ANOTACE

| | |
|------------------------------------|---|
| Jméno a příjmení: | Ing. Petra Nováková, Ph.D. |
| Katedra: | Katedra biologie |
| Vedoucí práce: | Mgr. Markéta Nyklová, Ph.D. |
| Rok obhajoby: | 2021 |
| Název práce: | Směrová orientace a magnetický kompas plameňáků |
| Název v angličtině: | Directional orientation and magnetic compass of flamingos |
| Anotace práce: | <p>Zvířata směřují osy svých těl podle různých podnětů (např. podle polohy Slunce, směru větru nebo siločar magnetického pole) při různých aktivitách. Existence magnetického alignmentu (zarovnání osy těla podle siločar magnetického pole) naznačuje, že živočichové jsou schopni tyto podněty vnímat. Magnetický alignment byl měřen u čtyř druhů plameňáků v osmi zemích (v zoologických zahradách i ve volnosti), a to v různé denní doby, v různých ročních obdobích a za různého počasí. Plameňáci v Evropě vykazovali významnou preferenci zarovnávat svá těla na jih během všech stacionárních aktivit, zatímco plameňáci z Keni měli tendenci mířit na sever. Zarovnání těl při lokomočních aktivitách bylo náhodné. Za zataženého počasí, a především v ranních hodinách, byl magnetický jih nebo sever lepším prediktorem směru než poloha Slunce.</p> |
| Klíčová slova: | magnetismus, magnetický alignment, sluneční kompas, Phoenicopteridae |
| Anotace v angličtině: | <p>Animals use to align their body axis with respect to different cues (e.g. sun position, wind direction, magnetic field lines) in diverse behavioural contexts. Existence of alignment indicates ability to sense such cues or signals. The direction of the body axis (alignment) in flamingos of four species in zoological gardens and in the wild in altogether eight countries during different seasons of the year and at different times of the day and in different weather were measured. Flamingos in Europe showed a significant preference to align towards South during all recorded stationary activities, while those from Kenya tended to head towards North. The distribution of body alignments during locomotor activities was random. Under overcast weather, and especially in the morning hours, magnetic South or North were better predictors of heading than sun position.</p> |
| Klíčová slova v angličtině: | magnetism, magnetic alignment, sun compass, Phoenicopteridae |
| Přílohy vázané v práci: | grafy, schémata, portréty |
| Rozsah práce: | 43 stran |
| Jazyk práce: | český |