

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Prírodovedecká fakulta

Katedra ekológie a životného prostredia



Magnetická orientácia zvierat

Natália Regecová

Bakalárska práca

Vedúci práce: Mgr. Miloš Krist, Ph.D.

Olomouc 2015

Regecová N.: 2015. Magnetická orientácia zvierat. Bakalárska práca, Katedra ekológie a životného prostredia, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 31 s, v slovenčine

ABSTRAKT

Táto práca sa venuje magnetorepcii u zvierat, teda schopnosti zvierat vnímať a istým spôsobom reagovať na magnetické pole Zeme. Práca sa konkrétne venuje štruktúre magnetického poľa Zeme, mechanizmom magnetorepcie a využívaniu magnetického poľa. Keďže magnetické pole je všadeprítomné, tak zvieratá z neho dokážu čerpať informácie o smere alebo o svojej pozícii a to rôznymi spôsobmi. Samotné využívanie magnetického poľa sa tiež líši u rôznych druhov zvierat, u niektorých je to dôležitý faktor k prežitiu, iné zas na magnetické polia reagujú spontánne. O spontánnom správaní bude aj nasledujúca diplomová práca, ktorá sa bude venovať preferovaniu určitých zemepisných smerov pri inkubácii vtákov.

Kľúčové slová: magnetorepcia, magnetické pole Zeme, magnetický kompas, zvieratá, orientácia

Regecová N.: Magnetic orientation in animals. Bachelor thesis, Department of ecology and environmental sciences, Faculty of science, Palacký University of Olomouc, 31 p., in Slovak

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with magnetoreception at animals: the animals' capability of perceiving the magnetic field of the Earth and react to it. The work pays attention to a structure, mechanism and the usage of the magnetic field. Considering that there is a magnetic field everywhere, animals can draw information about direction or their own location by various ways. The use of magnetic pole is different for varied species of animals. Some species use it to survive, the other ones react to magnetic pole spontaneously. The following diploma thesis will be about spontaneous behaviour of animals and it will be focused on preference to geographic direction during incubation of birds.

Key words: magnetoreception, Earth's magnetic field, magnetic compass, animals, orientation

Prehlásenie

Čestne vyhlasujem, že bakalársku prácu s názvom: Magnetická orientácia zvierat som vypracovala samostatne, na základe konzultácií a štúdia odbornej literatúry. Neporušila som autorský zákon a zoznam použitej literatúry som uviedla na príslušnom mieste.

Olomouc, 22.07.2015

.....
podpis

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Štruktúra magnetického poľa Zeme.....	7
3. Mechanizmy magnetorecepcie	8
3.2 Magnetitová hypotéza	9
3.3 Teória radikálových párov	9
4. Spôsoby využívania magnetického poľa	10
4.1 Kompasové systémy.....	11
4.1.1 Inklinačný kompas.....	11
4.1.2 Polaritný kompas	11
4.1.3 Ostatné kompasové systémy.....	11
4.2 Magnetické ukazovatele.....	13
4.3 Magnetická mapa a pravá navigácia	13
5. Využívanie magnetického poľa	14
5.1 Magnetorecepcia ako dôležitý faktor k prežitiu.....	14
5.1.1 Migrácie.....	15
5.1.1.1 Migrácia u vtákov	15
5.1.1.2 Migrácia u morských korytnačiek	17
5.1.1.3 Migrácia u rýb a iných vodných živočíchov.....	18
5.1.2 Homing – návrat domov	19
5.1.3 Orientácia na krátke vzdialenosti	21
5.2 Spontánne reakcie na magnetické polia	22
5.3 Naučené využívanie magnetického poľa	24
6. Záver	26
7. Literatúra.....	27

1. Úvod

Magnetorecepcia u zvierat, čiže schopnosť vnímať a určitým spôsobom reagovať na magnetické polia, sa dá považovať za šiesty zmysel, ktorý niektoré druhy zvierat používajú. Keďže magnetické pole sa nachádza v každom bode na Zemi, tak tento zmysel sa vyvinul ako aj u suchozemských, tak aj u morských živočíchov a majú ho stavovce a aj bezstavovce. Vnímať magnetické polia zvieratá vedia na základe jeho polarít, inklinácie a intenzity a využívajú ho rôznym spôsobom. Najpoužívanejšie sú kompasové systémy, do ktorých patrí inklináčny a polaritný kompas a magnetická mapa. Využívanie magnetického poľa je dôležité hlavne pri migráciách, ktoré patria medzi najviac preskúmanú oblasť. Magnetické polia k migrácii využívajú hlavne sťahovavé vtáky a morské korytnačky, ale aj iní vodní živočíchovia. Dôležitú úlohu zohrávajú magnetické polia aj pri homingu, čo je schopnosť organizmu vrátiť sa domov, túto schopnosť majú napríklad holuby. Schopnosťou magnetorecepcie oplývajú aj zvieratá, ktoré prevažnú časť strávia pod zemou, napríklad niektoré druhy hlodavcov či obojživelníkov, a magnetorecepciu používajú k orientácii v podzemí, čiže prevažne na kratšie vzdialenosti.

U niektorých druhov zvierat bola zistená spontánna reakcia na magnetické polia. Medzi takéto zvieratá patrí srnčia zver či dobytok, druhy hlodavcov či bezstavovce. Zmysel takéhoto správania nám väčšinou nie je známy, ale to neznamená, že v budúcnosti nám nemôže byť pomocou ďalších výskumov objasnený.

2. Štruktúra magnetického poľa Zeme

Zem sa dá predstaviť ako obrovský magnet, ktorého póly sa nachádzajú poblíž rotačným pólom Zeme. Magnetické siločiarly opúšťajú povrch Zeme na južnom magnetickom póle, obiehajú okolo Zeme a opäť do nej vstupujú na severnom magnetickom póle. V dôsledku toho siločiarly smerujú smerom hore na južnej pologuli, v oblasti magnetického rovníku idú paralelne so zemským povrchom a na severnej pologuli smerujú smerom dole (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

Magnetické pole Zeme je prstencovité a naklonené k osi rotácie približne o 11° . Pravdepodobne je vyvolávané pomocou tekutého železa, ktoré sa nachádza vo vonkajšom jadre a v princípe funguje ako dynamo bicykla. Železo nachádzajúce sa v tekutej forme je poháňané teplom, ktoré vzniká z rádioaktívneho odpadu a potom vynášané pomocou konvekčných prúdov vystupuje cez vonkajšie jadro. Keďže je elektricky nabité, tak generuje nepretržite sa meniace elektromagnetické pole (Palmer et al., 2004).

Magnetické pole sa dá charakterizovať polaritou, inklináciou a intenzitou. Tiež sa dá vyjadriť vektorom, ktorého priemet do vodorovnej roviny predstavuje horizontálna zložka a priemet do osy je charakterizovaný zložkou vertikálnou. Horizontálna zložka udáva smer magnetického poludníku v určitom bode (Brázdil, 1988) a jej zmeny menia tiež polaritu, zatiaľ čo zmeny vertikálnej zložky ovplyvňujú inklináciu (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

Inklinácia alebo tiež sklon je uhol medzi magnetickým vektorom a horizontom. Inklinácia sa mení so zemepisnou šírkou, má pravidelný sklon od -90° na južnom magnetickom póle až po $+90^\circ$ na severnom magnetickom póle a 0° na magnetickom rovníku. Intenzita magnetického poľa je najvyššia v póloch a najnižšia blízko magnetického rovníku. (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

3. Mechanizmy magnetorecepcie

3.1 Čo je magnetorecepcia

Rozličné druhy zvierat majú schopnosť využívať magnetické pole Zeme k svojej orientácii a táto ich schopnosť vnímať magnetické polia sa nazýva magnetorecepcia. Predpokladá sa, že hrá dôležitú úlohu pri orientácii či navigácii u suchozemských a aj vodných živočíchov (Kremers et al., 2014). Medzi najviac preskúmanú taxonomickú skupinu patria vtáci, použitie magnetického kompasu u migrujúcich vtákov bolo prvý

krát dokázané v roku 1996 u červienky obyčajnej (*Erithacus rubecula*) a neskôr aj u ďalších sedemnástich druhov. Prvé hypotézy o využívaní magnetického poľa migrujúcimi vtákmi sa objavili už pred rokom 1859 (Ritz et al., 2000).

Napriek rôznym výskumom ešte stále nevieme veľa o biofyzikálnych mechanizmoch magnetorecepcie (Ritz et al., 2000). Najdiskutovanejšie a najpravdepodobnejšie sú dve hypotézy, ktoré predpokladajú primárne procesy založené na rozličných fyzických mechanizmoch. Prvá sa nazýva magnetitová hypotéza a druhá hypotéza radikálových párov (Wiltschko et al., 2006).

3.2 Magnetitová hypotéza

Magnetitová hypotéza je založená na tom, že magnetorecepcia je odvodená z častíc magnetitu (Fe_3O_4), čo je špecifická forma oxidu železa a tieto častice sa dokážu natočiť smerom k magnetickým poľam a sú prítomné v bunkách niektorých zvierat (Freire & Birch, 2010). Vlastnosti magnetitu sú závislé na jeho tvare a veľkosti častíc. Existuje jednodomérový magnetit, ktorý sa spontánne natáča podľa magnetického poľa Zeme, a superparamagnetický magnetit, ktorého častice sú oproti jednodomérovému magnetitu oveľa menšie, tvoria zhluky a na rozdiel od jednodomérového magnetitu, ktorý je stabilný, častice superparamagnetického magnetitu môžu svojím pohybom sledovať smer okolitého magnetického poľa. Superparamagnetické častice tiež dokážu generovať poľa, ktoré sú dostatočne silné na to, aby dokázali priťahovať či odpudzovať iné častice a táto ich vzájomná interakcia poskytuje základ pre iné možné mechanizmy transdukcie (Lohmann & Johnsen, 2000).

Prvý krát bol biochemicky vyzrážaný magnetit objavený v zuboch raduly u pobrežných mäkkýšov. Druhou skupinou organizmov, u ktorej bol magnetit nájdený, boli magnetické baktérie a zároveň boli prvou skupinou, ktorá používala magnetické častice pre pasívnu orientáciu (Davila et al., 2003). U pstruhov a niektorých druhov vtákov boli nájdené zhluky malých kryštálov (v priemere 1-3 μm) magnetitu v oblastiach, ktoré sú inervované očnou vetvou trojklanného nervu, čo s pomocou fyziologických štúdií naznačuje, že tieto nervy prenášajú informácie získané z magnetického poľa do mozgu (Wegner et al., 2006).

3.3 Teória radikálových párov

Model radikálových párov je založený na tom, že magnetický podnet je sprostredkovaný magneticky citlivými chemickými procesmi zahrňujúcimi špecializované fotopigmenty (Wiltschko et al., 2006). Ako prvý krok sú makromolekuly

fotopigmentu povýšené do singletového excitovaného stavu a to pomocou absorpcie fotónu. Potom sa môžu disociovať do radikálových párov a pomocou jemných interakcií sa môžu navzájom prevádzať do tripletových párov, ktoré sú svojim iným chemickým zložením odlišné od párov singletových. Tripletový výnos závisí na usporiadaní makromolekúl s magnetickým poľom Zeme a môže byť použitý k získaniu informácií o smere poľa. K sprostredkovaniu informácií k magnetickému kompasu v rozličných priestorových smeroch musia byť tripletové výnosy porovnané, čo vyžaduje upravené zoskupenia makromolekúl orientovaných v rôznych priestorových smeroch. K tomu sú prispôbosené svojím usporiadaním receptory v očiach stavovcov, kde na svetle závislý mechanizmus vygeneruje vzory, ktoré sa premietnu na sietnicu. Tieto vzory môžu byť osovo a centrálné symetrické vzhľadom k magnetickému severu a juhu, čo umožňuje stavovcom získať informácie o smere z okolitého magnetického poľa, čo je v súlade s inklináčnym kompasom založeným na osovom kurze siločiar (Wiltschko & Wiltschko, 2002). Pravdepodobnými receptorovými molekulami sú kryptochrómy, ktoré sa radia medzi fotoaktívne pigmenty absorbujúce svetlo v modrej až zelenej časti spektra. Patria medzi flavoproteíny a sú zapojené do regulácie cirkadiánných rytmov u rastlín a zvierat. Kryptochrómy majú mnohé biochemické vlastnosti, ktoré sú dôležité pre magnetorecepciu, vrátane schopnosti formovať radikálové páry (Möller et al., 2004). Donedávna boli známe len u rastlín, ale nedávno boli objavené aj u zvierat a to v sietnici stavovcov, prvýkrát u cicavcov, ale tiež sa našli u sliepok a aj u migrujúcich spevcov. Napríklad u penice slávikovitej (*Sylvia borin*) sa kryptochrómy nachádzajú v gangliových bunkách (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

Testovanie vtákov, u ktorých bol nájdený druh kryptochrómu, ukázalo, že vtáky sa dokážu orientovať pod svetelnými dĺžkami, ktoré majú hodnoty: 373 nm UV svetlo, 424 nm modré, 502 nm tyrkysové a 565 nm zelené svetlo. Pod svetlom s vyššími hodnotami sú vtáky dezorientované. V takom istom rozpätí svetlo absorbujú aj kryptochrómy (Wiltschko et al., 2014).

4. Spôsobu využívania magnetického poľa

Intenzita a polarita zemského magnetického poľa je považovaná za všadeprítomný a spoľahlivý zdroj navigačných informácií pre zvieratá. Magnetický vektor poskytuje informácie o smere a intenzita alebo inklinácia môže poskytovať informácie, ktoré zvieratá používajú k indikácii pozície (Wiltschko & Wiltschko, 2005). Spracovať

informácie získané z magnetického poľa Zeme dokážu zvieratá pomocou rôznych spôsobov a to hlavne pomocou magnetickej mapy a magnetického kompasu, ktorý môže byť založený buď na polarite alebo na inklinácii.

4.1 Kompasové systémy

4.1.1 Inklináčny kompas

Inklináčny kompas nerozlišuje polaritu siločiar (nerozlišuje medzi severom a juhom), namiesto toho rozlišujú iba smer k pólom, pomocou uhlu, ktoré siločiar zvierajú s gravitačnou silou. Je založený na osovom kurze siločiar a ich inklinácii v priestore a ignoruje polaritu (Lohmann et al., 1996, Wiltschko & Wiltschko, 1996). Tieto zistenia boli demonštrované prevrátením vertikálneho komponentu magnetického poľa: vtáky, ktoré predtým tiahli severne začali preferovať magnetický juh (Wiltschko & Wiltschko, 2005). Inklináčny kompas je u vtákov lokalizovaný v pravom oku a smerové informácie sú sprostredkované pomocou procesu radikálových párov, čo ho robí závislým na svetle (Wiltschko et al., 2008). Inklináčny kompas k orientácii používajú vtáci, morské korytnačky a mloci ho používajú k orientácii smerom k brehu (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

4.1.2 Polaritný kompas

Používanie polaritného kompasu umožňuje zvieratám, na rozdiel od kompasu inklináčného, rozlíšiť sever a juh s využitím polarity horizontálneho poľa a to v hocijakom mieste na Zemi s magnetickou intenzitou dovoľujúcou poskytovať informácie o zemepisnej šírke pre precízne rozlíšenie pozície (Wang et al., 2007). Prevrátením vertikálneho komponentu sa teda nezmení smer polaritného kompasu vnímaného ako sever. Medzi zvieratá, ktoré používajú polaritný kompas patria múčne červy, langusty, losos nerka, africké rypoše (Lohmann et al. 1995), netopiere (Wang et al., 2007) a aj iné druhy cicavcov a obojživelníkov, ako mloky, ktoré ho využívajú pre návraty domov (Wiltschko & Wiltschko, 2005). Je predpoklad, že inklináčné a polaritné kompas sa vyvinuli nezávisle u vtákov a cicavcov po prechode z vody na súš a ovzdušia (Wang et al., 2007).

4.1.3 Ostatné kompasové systémy

Kompasy, ktoré používajú zvieratá k svojej navigácii, môžu byť založené aj na iných, ako magnetických mechanizmoch. Napríklad včely používajú okrem magnetického kompasu aj ďalšie dva kompasové mechanizmy a to nebeský či slnečný kompas, ktorý

je založený na zdánlivom pohybe Slnka a so Slnkom spojených svetelných štruktúrach a potom tzv. záložný nebeský kompas, ktorý je založený na zapamätaní slnečných pohybov v priebehu času a závislosti na krajine. U včiel je primárnym kompasom pravdepodobne nebeský kompas, magnetický kompas je kompasom záložným a používajú ho len za istých okolností a včelie zapamätanie slnečného kurzu v závislosti na krajine je záložný systém, ktorý používajú počas oblačného počasia. K používaniu týchto kompasov sú nutné tzv. nebeské podnety, ktoré sú založené na hviezdach, Slnku, Mesiaci a na svetelných štruktúrach s nimi spojenými (Dovey et al., 2013).

Veľa zvierat má tento mnohonásobný kompasový systém, ale vzájomné interakcie medzi týmito kompasmi ešte nie sú úplne známe. Pravdepodobne spolu reagujú prinajmenšom tromi spôsobmi. Po prvé, môžu spolu reagovať iným spôsobom v každej vývojovej fáze, napríklad magnetický kompas môže slúžiť hlavne u mladých holubov ako referenčný údaj, až kým sa vďaka skúsenostiam nenaučia rozoznávať nebeské podnety. Vďaka nebeským podnetom tiež niektoré migrujúce vtáky dokážu kalibrovať svoj magnetický kompas. Druhý spôsob, ako spolu môžu kompasy reagovať je, že spolu reagujú v určitej kombinácii a to buď súčasne alebo v priebehu času, čím sa výsledná orientácia zvierat stáva viac flexibilnejšou. A tretí spôsob je, že môžu navzájom reagovať ako zálohy, vďaka čomu sa zvieratá dokážu orientovať aj pod širokými variáciami rôznych klimatických podmienok (Dovey et al., 2013).

U vtákov sa potvrdilo, že svoj magnetický kompas dokážu recalibrovať a to pomocou polarizovaných svetelných podnetov pri východe a západe Slnka. Teória bola potvrdená pomocou experimentov s druhom strnada škvrnitého (*Passerculus sandwichensis*), kedy vtáky, ktoré boli vystavené $\pm 90^\circ$ posunu umelých polarizovaných svetiel pri východe alebo západe recalibrovali svoj magnetický kompas, ale len v tom prípade, ak mali plný prístup k nebeským podnetom, vrátane polarizovaných svetelných podnetov nachádzajúcich sa blízko horizontu. K recalibrácii dochádza hlavne pri jarnej a jesennej migrácii, v jeseni na začiatku migrácie a na jar na konci migrácie (Muheim et al., 2009). Schopnosť kalibrácie magnetického kompasu pretrváva počas života vtákov a umožňuje im kompenzovať rôznorodosť magnetickej inklinácie, ktorá sa môže vyskytnúť počas ich migrácie (Able & Able, 1996).

Používanie týchto mechanizmov zvieratami sa navzájom nevyklučuje. Napríklad vtáci používajú k svojej orientácii ako magnetickú mapu, tak inklinálny kompas (Wiltschko et al., 2006).

4.2 Magnetické ukazovatele

Zvieratá môžu využívať magnetické pole aj k získaniu informácií o zmene ich tiahnutia. Konkrétne magnetické podmienky v určitej oblasti môžu slúžiť ako spúšťače alebo tzv. magnetické ukazovatele, ktoré u zvierat vyvolávajú určité odpovede. Používanie takýchto magnetických ukazovateľov je typické hlavne pre vtáky a vodné korytnačky. Sú to oblasti, v ktorých sa zvieratá musia vydať špecifickou cestou, napríklad vtáci musia zmeniť kurz, ak sa chcú vyhnúť ekologickým bariéram. Tieto odpovede sú prirodzené a odvodené z určitých kritických magnetických podmienok, s ktorými sa zvieratá môžu počas svojej migrácie stretnúť (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

Funkcia magnetických ukazovateľov neslúži len k zmene orientácie, ale tiež zahŕňa fyziologické odpovede či zmeny. U slávik veľkého (*Luscinia luscinia*), ktorý bol chytený a držaný vo Švédsku sa ukázalo priberanie na váhe počas jesennej migrácie, pretože simulácia špecifických magnetických podmienok severného Egypta vyvolala prudký nárast na váhe, keďže počas reálnej migrácie extra tuk umožňuje vtákovi prekonať rozsiahle ekologické bariéry ako je napríklad púšť Sahara (Wiltschko & Wiltschko, 2005). Ekologickým bariéram sa počas svojej trasy musí vyhýbať aj muchárik čiernohlavý (*Ficedula hypoleuca*). Populácie žijúce v strednej Európe letia južným smerom do Ibérie, kde menia svoj kurz na juhovýchodný a tým obletia Alpy, Stredozemné more a aj stred Sahary. Výsledky naznačujú komplex interakcií, ktoré prebiehajú medzi nejakým vnútorným časovým systémom a medzi magnetickými parametrami a ku ktorým dochádza postupne počas ich trasy. Vtáky sa teda pravdepodobne vedú orientovať počas každého bodu ich migrácie (Lohmann et al., 2007).

4.3 Magnetická mapa a pravá navigácia

Magnetická mapa umožňuje zvieratám pomocou magnetickej topografie rozpoznať ich pozíciu relatívne k špecifickému cieľu (Cain et al., 2005). Mechanizmus magnetickej mapy je založený na rôznych variáciách v magnetickom poli s receptormi citlivými ku každej zmene v intenzite a/alebo uhlu magnetického poľa Zeme (Beason, 2005). Keďže smerom k pólom sa intenzita magnetického poľa zvyšuje a smerom k rovníku znižuje, zvieratá sú schopné pomocou uhla inklinácie rozpoznať zemepisnú šírku a podľa toho vedú, ktorým smerom majú ísť, ak sa chcú vrátiť domov (Wiltschko & Wiltschko, 2006). Využívanie magnetickej mapy bolo donedávna zistené iba u stavovcov (Philips & Borland, 1994), ale najnovšie výskumy potvrdzujú používanie magnetickej mapy aj

u bezstavovcov (Cain et al., 2005). U stavovcov ide väčšinou o migrantov na dlhé vzdialenosti, ako sú napríklad morské korytnačky (Lohmann & Lohmann, 2006) a vtáky (Wiltschko et al., 2006). U vtákov aj korytnáčiek je predpoklad, že schopnosť orientovať sa pomocou magnetických orientačných máp nie je vrodená, ale je založená na skúsenostiach (Wiltschko et al., 2006, Lohmann & Lohmann, 2006). Navádzanie pomocou magnetickej mapy bolo zistené aj u obojživelníkov (Fischer et al., 2001), napríklad u mloka zelenavého (*Notophthalmus viridescens*, Phillips & Borland, 1994). V súvislosti s navigáciou zvierat a magnetickou mapou sa tiež používa pojem pravá navigácia, čo je schopnosť organizmu vrátiť sa domov po tom, čo bol premiestnený na neznáme miesto. Táto schopnosť vyžaduje používanie aj magnetického kompasu k rozpoznaní smeru a aj magnetickej mapy k rozpoznaní pozície (Fischer et al., 2001). Donedávna sa myslelo, že všetky zvieratá schopné pravej navigácie patria medzi stavovce. Prví bezstavovci, u ktorých bola pravá navigácia potvrdená, sú langusty karibské (*Panulirus argus*), ktoré sa dokázali vrátiť z neznámeho miesta vzdialeného 12 – 37 km a to aj vtedy, keď boli počas cesty zbavené všetkých orientačných podnetov, okrem tých magnetických (Cain et al., 2005).

5. Využívanie magnetického poľa

Zvieratá môžu na magnetické pole reagovať rôznymi spôsobmi. Pre niektoré druhy je životne dôležité, keďže ho používajú napríklad k navigácii, migrácii, či návratu domov. Iné druhy zvierat reagujú na magnetické pole spontánne, napríklad pri pasení, inkubácii či stavaní hniezd. A niektoré druhy sa pomocou istých podnetov dokážu naučiť používať magnetické pole, napríklad k nájdeniu rôznych sociálnych stimulov či k orientácii na krátke vzdialenosti.

5.1 Magnetorecepcia ako dôležitý faktor k prežitiu

Medzi najviac preskúmané druhy, ktoré používajú magnetické pole k navigácii patria vtáky a morské korytnačky. Migrujúce vtáky používajú magnetický kompas pre nájdenie daného migračného smeru a nemigrujúce vtáky, akými sú napríklad holuby, používajú magnetický kompas k nájdeniu smeru k ich holubníkom a morské korytnačky ho používajú k tomu, aby sa dostali z pobrežia, na ktorom sa vyliahnu, do miest, kde môžu vyrásť (Keary et al., 2009). Magnetorecepcia je tiež dôležitá u zvierat, ktoré žijú pod zemou alebo na stanovištiach s nedostatkom svetla. Niektoré druhy hlodavcov

a mlokov žijúce pod zemou alebo v jaskyniach využívajú magnetické pole k orientácii na krátke vzdialenosti.

5.1.1 Migrácie

Počas svojho života migruje veľa druhov zvierat. Hlavnými migrantmi sú vtáky, ktoré väčšinou migrujú medzi svojimi zimoviskami a miestami na hniezdenie. Morské korytnačky migrujú preč z miest, kde sa vyliahli. Takéto vzdialenosti sú niekedy aj niekoľko tisíc kilometrov veľké. Na kratšiu vzdialenosť pri nepriaznivých podmienkach migruje aj danio pruhované. Každoročnú migráciu podstupuje aj langusty. Tieto druhy zvierat pri svojej migrácii sa pravdepodobne riadia pomocou magnetického poľa.

5.1.1.1 Migrácia u vtákov

Migrujúce vtáky počas migrácie uletia aj niekoľko tisíc kilometrov. Takouto dlhou migráciou sú známi napríklad arktický bahniaci, ktorí migrujú medzi svojimi hniezdiacimi miestami, ktoré sú ďaleko na severe a medzi ich zimoviskami, ktoré sa zase nachádzajú na južnej pologuli. Takéto druhy k svojej navigácii používajú pravdepodobne magnetické podnety a kvôli presnému zisteniu ich orientačných mechanizmov sú často podrobené experimentom. Experimenty prebehli aj s druhom, ktorý sa volá pobrežník ostrochvostý (*Calidris acuminata*), aby sa zistilo, aké podnety presne používa pri svojej dlhej jesennej migrácii z Aljašky, skrz Pacifický oceán, do Austrálie. Experiment prebiehal ako s mladými, tak aj so staršími jedincami, ktorí boli odchytení počas jesennej migrácie na Aljaške, pretože je známe, že dospelí používajú inú trasu ako mladí jedinci. Kým dospelí migrujú v širokej fronte zo svojich hniezdiacich miest cez východný Sibír a pokračujú po súši a potom pozdĺž pobrežia do juhovýchodnej Ázie, skadiaľ pokračujú ponad vodu skrz Mikronéziu a Filipíny k ich zimovištiam v Austrálii s príchodom približne v polovici septembra, tak mladí jedinci ostávajú na Aljaške od polovice augusta do polovice novembra a stamadiaľ pravdepodobne nepretržite letia južným smerom cez stred Oceánie do Austrálie. Odchytení jedinci boli testovaní ako pod jasným nebom, tak aj počas nepriaznivých podmienok a tiež v simulovanom magnetickom poli a medzi danými podmienkami boli zistené rozdiely. Vtáky, ktoré boli testované pod jasným nebom preferovali juhovýchodný smer, zatiaľ čo vtáky testované v nepriaznivejšom počasí sa orientovali smerom juhozápadným, čo bolo vysvetlené tým, že títo vtáci dokážu vnímať malé rozličnosti v tlaku vzduchu, vďaka čomu si môžu

predpovedať priaznivé podmienky pre migráciu, čo môže byť jeden z dôvodov, prečo mladí jedinci letia inou trasou ako dospelí, ale aby sa tento predpoklad potvrdil, bude potrebných viac experimentov. Vystavovanie jedincov simulovanému magnetickému poľu potvrdilo, že vtáky sa orientujú pomocou magnetického kompasu, ktorý bol predtým zistený len u jedného druhu bahniakov, konkrétne u pobrežníka belavého (*Calidris alba*, Grönroos et al., 2010).

Experiment s pobrežníkom belavým (*Calidris alba*) prebiehal počas jarnej migrácie na južnom Islande a to podobne ako u pobrežníka ostrochvostého, čiže vtáky boli testované pod jasným nebom, pod nepriaznivými podmienkami a v magnetickom poli. Vtedy sa prvý krát zistilo, že aj slukovité druhy disponujú magnetickým kompasom a bol predpoklad, že je pre nich primárnym zdrojom smerových informácií, ale experimenty pod zatiahnutou oblohou indikujú, že pobrežník k orientácii potrebuje aj nebeské podnety (Gudmundsson & Sandberg, 2000). Rozličné smery migrácie u mladých jedincov oproti dospelým boli zistené aj u druhu drozdec čiernohlavý (*Dumetella carolinensis*), ktorý migruje cez New Jersey a u ktorého bolo pomocou experimentov zistené, že určitú úlohu pri migrácii dospelých jedincov hrajú pravdepodobne čuchové podnety, ktoré musia byť založené na istých predchádzajúcich skúsenostiach (Holland et al., 2009).

Medzi ďalšie často testované druhy patrí aj červienka obyčajná (*Erithacus rubecula*), ktorá hniezdi po celej Európe a patrí medzi druhy, ktoré migrujú počas noci do zimovísk, ktoré sa nachádzajú v krajinách Stredomoria. Odchytené vtáky boli dané do klietok a vystavované rôznym druhom žiarenia. Testovanie prebiehalo počas jesennej a aj počas jarnej migrácie. Testovanie počas jesennej migrácie, počas ktorej boli vtáky testované iba v magnetickom poli ukázalo, že vtáky vystavené zelenému 565 nm svetlu preferovali svoj tradičný príslušný južný smer, pod žltým svetlom to bol slabý severný smer a pod červeným svetlom to bol severný až severovýchodný či južný až juhozápadný smer. Počas jarnej migrácie testovanie prebiehalo podrobnejšie. Vtáky v magnetickom poli tiahli mierne východne od severu a ich správanie nebolo odlišné od orientácie v severnom migračnom smere, ktoré bolo pozorované pod kontrolným zeleným svetlom (Wiltschko et al., 2011). Pri otočení vertikálneho komponentu vtáky testované pod žltým svetlom ukazovali tiahnutie k severu, takisto aj pod červeným svetlom. Ale keď horizontálna zložka magnetického poľa bolo otočená, tak vtáci svoje tiahnutie zmenili korešpondujúcim smerom, čo sa líši od pozorovaní získaných pri testovaní vtákov pod kontrolným zeleným svetlom a pod žltým svetlom. Všetky tieto

testy naznačujú, že červienky používajú magnetické pole k orientácii, ale ich odpovede na svetelné režimy boli polárneho charakteru, čo naznačuje, že nie sú kontrolované pomocou inklináčného kompasu, ale pravdepodobne pomocou receptorov založených na magnetite, ktorý preberá kontrolu nad orientáciou, keď je mechanizmus založený na radikálových pároch nejakým spôsobom narušený alebo ovplyvnený, pretože receptory založené na magnetite závisia len na magnetickom poli a nemôžu byť ovplyvnené okolnými svetelnými podmienkami. Z toho vyplývajú isté vzťahy medzi receptorom založeným na magnetite, ktorý sa nachádza u vtákov v hornej časti zobáku, a medzi časťou vizuálneho systému v ktorej vizuálny podnet sa mení na podnet magnetický, čo vedie k rozličným prejavom smeru pod rozličnými svetelnými podmienkami. Keďže receptory založené na magnetite preberajú kontrolu nad smerom len vtedy, keď sú receptory založené na radikálových pároch narušené, tak ich primárna úloha zatiaľ nie je známa a nezdá sa, že by sa vyvíjali v magnetický kompas, ale pravdepodobne iba poskytujú informácie o magnetickej intenzite (Wiltschko et al., 2011).

To, že vtáky pri migrácii používajú aj iné podnety ako magnetické, dokázal aj experiment s albatrosmi tenkozobými (*Phoebastria irrorata*), ktoré dokázali svoju migračnú dráhu vedúcu z Galapágov na približne 1000 km vzdialené pobrežie Peru, preletieť aj s magnetmi pripojenými k ich hlave, ktoré narušovali okolité magnetické pole. Je pravdepodobné, že v tomto prípade sa albatrosy riadili hlavne slnečným kompasom (Mouritsen et al., 2003).

5.1.1.2 Migrácia u morských korytnačiek

Medzi ďalšie zvieratá, ktoré využívajú svoj magnetický kompas k životu potrebnej navigácii, patria morské korytnačky. Mláďatá karety obyčajnej (*Caretta caretta*), ktoré sa vyliahnú na východnom pobreží Floridy v USA, podnikajú dlhú transoceánickú migráciu okolo severného atlantického víru, čo je cirkulárny prúdový systém, ktorý prúdi okolo Sargasového mora. Mláďatá dokážu vnímať a reagovať na magnetické polia, ktoré existujú v rámci tohto vírového prúdenia a vďaka tomu dokážu plávať v smere, ktorý je zhodný s ich migračnou cestou. Informácie z magnetického poľa získavajú vďaka schopnosti rozpoznať inklináčny uhol siločiar a totálnu intenzitu poľa, čo sú dva elementy, ktoré im poskytujú dostatočné informácie o pozícii vzhľadom k víru. Pomocou experimentov sa zistilo, že karety dokážu rozpoznať magnetické polia existujúce v troch rozličných lokáciách, ktoré zasahujú do víru, čo svedčí o tom, že

mláďatá majú vrodenný zmysel adekvátne reagovať len na tie polia, ktoré sa vyskytujú v rámci ich migračnej trasy a tie, ktoré existujú mimo vnímať nedokážu. Pravdepodobne tieto magnetické polia, ktoré sa vyskytujú v rámci ich migračnej cesty, vnímajú len ako orientačné body, ktoré fungujú na princípe vyššie spomínaných magnetických ukazovateľov. Vďaka magnetickým poliam sa mláďatá dokážu dostať bezpečne k svojim kŕmnyim miestam.

Mláďatám, ktoré migrujú cez vír v jeho severnej hranici, pomáhajú pravdepodobne dostať sa skrz nepredvídateľné oceánske oblasti, v ktorých sa nachádzajú nepredvídateľné a nepriaznivé prúdové podmienky, meandre Golfského prúdu a tiež je tam vysoká pravdepodobnosť vzniku vírov, ktoré zvyšujú pravdepodobnosť, že mláďatá budú odklonené od svojej trasy. Mláďatá migrujúce zo severnej časti Portugalska zase využívajú magnetické polia k tomu, aby sa s ich pomocou vyhli pre nich smrteľne studenej vode a ostali v teplom víre (Fuxjager et al., 2004). Mechanizmus získavania magnetických informácií u kariet stále nie je známy, ale rozdiel medzi mladými vtákmi a mladými korytnačkami je v tom, že orientačné správanie vyliahnutých korytnačiek je ovplyvnené aj magnetickou informáciou o smere a aj magnetickou informáciou o pozícii (Irwin & Lohmann, 2004). Podobne ako karety, tak aj mláďatá kožatky veľkej (*Dermochelys coriacea*) opúšťajú východné pobrežie Floridy a svoj kurz ustália východným smerom, ktorý ich vedie od pevniny smerom ku Golfskému prúdu.

Pri kožatkách bolo pomocou experimentov zistené, že sa dokážu orientovať aj v úplnej tme, čo svedčí o tom, že ich kompas nie je závislý na svetle. Tie mláďatá, ktoré boli testované v magnetickom poli počas tmy boli orientované východným smerom, zatiaľ čo korytnačky testované v tme, ale v obrátenom magnetickom poli sa orientovali smerom opačným, čo naznačuje, že okolité magnetické pole ovplyvňuje orientáciu vyliahnutých kožatiek plávajúcich v tme (Lohmann & Lohmann, 1993).

5.1.1.3 Migrácia u rýb a iných vodných živočíchov

Magnetické polia dokážu vnímať aj ryby, napríklad danio pruhované (*Danio rerio*), ktoré je zároveň modelovým organizmom pre genetickú manipuláciu. Pri experimentoch, kedy bolo danio vypustené do okrúhlej arény s umelým magnetickým poľom, bolo zistené, že jeho preferovaný smer nie je závislý na pohlaví, veku alebo okolitých environmentálnych faktoroch, čo naznačuje, že smerové preferencie u tohto

druhu sú dané geneticky, podobne ako u kariet obyčajných. Danio počas obdobia dažďov migruje sem a tam medzi potokmi a zaplavenými oblasťami. Na začiatku monzúnových dažďov sa dospelé dania presúvajú do zaplavených oblastí, ako sú napríklad ryžové polia, v ktorých sa vyskytuje menej predátorov a sú tam vhodnejšie podmienky pre trenie rýb. Tiež sa tam nachádza väčšie množstvo planktónu, ktoré je vhodnou potravou pre malé larvy a ryby. Keď voda zo zaplavených oblastí ustúpi, danio sa opäť vracia do potokov. Počas tejto migrácie, keďže čuchové podnety ako orientačný faktor boli vylúčené, sa pravdepodobne spolieha na okolité magnetické pole (Takebe et al., 2012).

Každoročnú migráciu podstupujú aj langusty žijúce v západnom Atlantiku, napríklad langusta karibská (*Panulirus argus*). K zisteniu, či langusty používajú magnetické pole k orientácii, sa postupovalo s pomocou potápačov, ktoré sledovali langusty uviazané vnútri systému, v ktorom bolo pomocou cievok generované magnetické pole. Systém bol ponorený pri pobreží Floridy a pomocou cievok sa dala obrátiť vertikálna alebo horizontálna zložka generovaného magnetického poľa. Vo výsledku, langusty sa významne odchýlili od svojich pôvodných smerov keď horizontálna zložka poľa bola otočená, ale langusty v obyčajnom poli alebo v poli, v ktorom bola otočená vertikálna zložka, zachovali svoj pôvodný smer, z čoho vyplýva, že langusty majú zmysel vnímať magnetické pole a je ich kompas je, na rozdiel od vtákov či korytnáčiek, založený na polarite. Langusty kompas využívajú ku každoročnej migrácii, pri ktorej sa tisíce jedincov plazia z plytkých pobrežných oblastí smerom k moru. Orientovať sa dokážu aj v oblastiach, v ktorých sú vizuálne podnety zakryté zakalenou vodou alebo sa nachádzajú v temnote (Lohmann et al., 1995).

5.1.2 Homing – návrat domov

Medzi vtáky, u ktorých bolo zistené používanie slnečného kompasu spolu s magnetickým, patria aj domáce holuby (*Colomba livia*), ktoré pomocou neho hľadajú cestu späť do svojich holubníkov (Mouritsen et al., 2003). Na druhej strane, niektoré experimenty zlyhali pri snahe potvrdiť u holubov viacnásobný navigačný systém (Gagliardo et al., 2008, Holland et al., 2013). Pri odlišných experimentoch, ktoré prebiehali s holubmi, boli holubom nasadené matné kontaktné šošovky, ktoré im zabraňovali vidieť a holuby boli aj napriek tomu schopné vrátiť sa k svojim holubníkom z približnej vzdialenosti 0,5 – 2,0 km, len neboli schopné do neho vstúpiť, pravdepodobne preto, že ho nemohli vidieť. Pri ďalšom experimente boli holuby

v anestézii premiestnené na iné vzdialené miesto a tiež boli schopné sa vrátiť. To potvrdzuje, že domáce holuby dokážu rozpoznať svoju pozíciu na neznámom mieste a nepotrebujú k tomu vidieť znaky v krajine a ani predchádzajúcu cestu. Takisto dokážu rozpoznať, že sa nachádzajú blízko svojich holubníkov bez toho aby videli okolité znaky, ktoré sa s nimi spájajú. Holuby si pravdepodobne porovnávajú hodnoty environmentálnych premenných na ich danom mieste s hodnotami tých istých premenných v ich holubníku. Jediný zdroj takýchto premenných hodnôt, ktorý sa nachádza v každom bode zemského povrchu je magnetické pole Zeme (Walker et al., 2002). Tiež je možné, že holuby sa pri navigácii k svojim holubníkom riadia pomocou máp, ktoré sú založené na pachových podnetoch prenášaných vetrom, čo je ale pri niektorých vzdialenostiach neefektívne. (Gagliardo et al., 2006).

Pokusy s magnetickým poľom prebiehali aj s tučniakom patagónskym (*Aptenodytes patagonicus*), u ktorého chceli zistiť, či mláďatá používajú magnetické pole k navigácii okolo kolónie či nájdeniu svojich matiek. Zistilo sa ale, že tučniaci k tomu magnetické pole nepoužívajú, pre nich sú dôležité hlavne sluchové podnety (Nesterová et al., 2013).

Vyššie spomínané langusty karibské sa tiež pomocou magnetického kompasu dokážu vrátiť do svojich trhlín, ktoré sa nachádzajú v korálovom útese a ktoré obývajú. Dospelí jedinci sa počas dňa väčšinou nachádzajú vnútri týchto trhlín a v noci sa od nich vzdialujú do vzdialenosti niekoľko stoviek metrov, aby si našli potravu (Lohmann et al., 1995).

Zaujímavým druhom je obojživelník mlok zelenavý (*Notophthalmus viridescens*), ktorý používa rôzne druhy magnetických mechanizmov rôznym spôsobom. Mlok používa svoj na svetle závislý magnetický kompas k navigácii smerom k pobrežiu. Tento druh kompasu je pravdepodobne sprostredkovaný pomocou mechanizmov založených na fotoreceptoroch. Mlok ale k nájdeniu cesty smerom domov používa iný mechanizmus, ktorý je ovplyvnený svetelnou vlnovou dĺžkou, ale iným spôsobom ako kompas, ktorý je používaný na navigovanie smerom k pobrežiu. Tento kompas je pravdepodobne ovplyvňovaný magnetickými časticami, konkrétne zrejme pomocou magnetitu, ktorý má pri navádzaní špecifickú úlohu. Prečo mlok používa dva rozdielne systémy, je stále otáznе (Phillips & Borland, 1994, Fischer et al., 2001). Na podobnom princípe ako mloci, používajú svoj magnetický kompas ku krátkej navigácii aj aligátori severoamerickí (*Alligator mississippiensis*, Fischer et al., 2001).

5.1.3 Orientácia na krátke vzdialenosti

Magnetické pole k orientácii na krátke vzdialenosti využívajú hlavne živočíchy, ktoré žijú pod zemou, či na stanovištiach, kde nemajú dostatok svetla. Druh hlodavca, u ktorého bola potvrdená schopnosť vnímania magnetického poľa, je slepec egyptský (*Spalax ehrenbergi*), ktorý patrí do čeľade rypošovitých. Tento druh patrí medzi solitárne, osamelé hlodavce, ktoré ryjú a obývajú systém vetviacich sa tunelov, ktoré nemajú žiadne nadzemné východy a neopúšťajú ich, až kým nie sú donútené. Aby v týchto priestoroch prežili, musia byť schopní sa v nich účinne orientovať, k čomu pravdepodobne využívajú magnetické pole, čo bolo potvrdené aj pomocou rôznych štúdií. Keďže slepci majú nedovyvinuté oči, ktoré rozoznávajú len svetlo a tmu, je nepravdepodobné, že by k orientácii používali vizuálne podnety a aj napriek tomu je ich orientácia v systéme tunelov excelentná a podľa predchádzajúcich štúdií sa vedľa výborne orientovať aj v zajatí (Kimchi & Terkel, 2001). Ďalšie druhy hlodavcov využívajúce magnetický kompas sú rypoš obrí (*Fukomys mechowii*) a rypoš striebritý (*Heliophobius argenteocinereus*), ktorí používajú svoj na svetle nezávislý kompas k orientácii na krátke vzdialenosti a spontánne preferujú západný smer, ktorý zmenili v súlade s posunutím magnetického poľa. Tieto dva druhy nepatria medzi blízkych príbuzných a tiež majú úplne odlišné sociálne správanie (Oliveriusová et al., 2012).

Magnetické pole využívajú aj rôzne druhy obojživelníkov, napríklad mloky žijúce v rôznych jaskynných systémoch. Po tom, čo prebehlo niekoľko pokusov je jasné, že všetky druhy jaskyniarov (*Proteus*) a skoro všetky druhy, ktoré boli testované a žijú v miestach s pravidelným, alebo permanentným nedostatkom svetla majú tendenciu preferovať jeden, zvyčajne nepredvídateľný, individuálny magnetický smer. Zvieratá sú pravdepodobne schopné zladit' sa podľa magnetických siločiar a udržiavať chcený uhol ako kompasový systém. Táto ich schopnosť je zásadným predpokladom pre magnetickú orientáciu (Schlegel, 2008).

Magnetické pole k orientácii na krátke vzdialenosti využívajú aj bezstavovce. Modelovým organizmom, na ktorom prebiehali elektrofyzikálne štúdiá, je tritonka ružová (*Tritonia diomedea*), ktorá patrí medzi mäkkýše. Pokusy v laboratóriu potvrdili, že tritonka sa orientuje pomocou magnetického poľa a v svojom prirodzenom prostredí používa magnetické pole k orientácii medzi plytčinami a hlbšími arénami. Nervový systém tritonky je v podstate jednoduchý, skladá sa približne zo 7 000 neurónov, ktoré sú zlúčené do šiestich ganglií. Vnútrobné elektrofyzikálne objavili, že vnútri sa nachádzajú tri bilaterálne symetrické páry identifikovateľných neurónov, ktoré reagujú

na zmenenú elektrickú aktivitu magnetických polí. Dva z týchto párov, ktoré sa volajú Pd5 a Pd6 neuróny, sú excitované zmenou smeru okolitého magnetického poľa. Tretí pár, Pd7, je tým istým stimulom inhibovaný (Cain et al., 2005)

5.2 Spontánne reakcie na magnetické polia

Niektoré druhy zvierat môžu reagovať na magnetické pole buď nevedome, čiže spontánne alebo spôsobom, ktorý priamo neovplyvňuje ich prežitie, prípadne sa zatiaľ jedná len o hypotézu. Takéto spontánne vnímanie bolo objavené u rôznych druhov cicavcov, ako napríklad rôzne druhy rypšov a nedávno tiež u cicavcov väčšieho vzrastu, ako je srnčia zver a dobytok. Tiež sa takto správajú aj niektoré druhy bezstavovcov.

Druh, ktorý používa magnetické pole k stavaniu a orientácii svojich hniezd, je napríklad hlodavec škrečok džungarský (*Rhodopus sungorus*), čo sa zistilo pomocou rôznych experimentov a štúdií. Škrečok patrí do čeľade myšovitéch, je aktívny prevažne nad zemou, kde hľadá jedlo a rôzne semená. Konkrétny experiment s týmto druhom prebiehal tak, že dvanásť hniezdiacich párov bolo vpustených do symetrickej arény, kde mali materiál vhodný k stavaniu hniezd, ktorý bol umiestnený v strede arény. Tento druh uprednostňuje stavanie svojich hniezd v južnom alebo juhovýchodnom smere. Výsledky ukázali, že škrečkovia udržiavajú zhodné umiestnenie svojich hniezd v okolitom magnetickom poli, ale nie, keď magnetické pole bolo zmenené, čo naznačuje, že škrečkovia sú vnímaví k zarovnaniu magnetického poľa. Pri druhom experimente boli škrečkovia premiestnení a držaní po jednom v klietkach, ktoré boli na jednom konci osvetlené a na druhom konci tmavé, skupina A mala svetlý koniec na 45° a skupine B na 135°. Na tmavom konci sa nachádzala aj tmavá skrýš, v ktorej si počas prvých 24 h všetci škrečkovia postavili hniezdo a výsledky naznačujú, že tendencia škrečkov stavať si hniezda pozdĺž určitej osi relatívne k magnetickému poľu je naučenou odpoveďou. Výsledky v konečnom dôsledku podporujú prítomnosť magnetického zmyslu u týchto škrečkov, aj keď pre presnejšie odpovede bude nutné previesť viac experimentov (Deutschlander et al., 2003). Podobne ako škrečok, využíva magnetické pole k výberu miest pre hniezdenie a aj pre skrýše s jedlom už spomínaný slepec egyptský. Jeho hniezda a skrýše sú umiestňované v južnom sektore ich tunelového systému, resp. bludiska. Keď počas experimentu bola polarita zemského

poľa otočená o 180°, slepci svoje hniezda a skrýše premiestnili do severného sektoru, čo je jasný dôkaz využívania magnetického poľa (Kimchi & Terkel, 2001).

Z väčších cicavcov bola magnetorecepcia potvrdená u srnčej zveri a u pasúceho sa dobytku a to z pozorovaní, ktoré prebehli pomocou nepriameho skúmania google snímok z celého sveta. Z pozorovaní vyplynulo, že domáci dobytok a pasúca sa či oddychujúca jelenia zver, konkrétne srnec obyčajný (*Capreolus capreolus*) a jeleň lesný (*Cervus elaphus*), pokladá svoje telo zhruba v geomagnetickom smere juh-sever. Tiež priame pozorovania jelenej zveri potvrdili, že zvieratá orientujú svoje hlavy severným smerom počas odpočívania či pasenia. Vietor, slnečné žiarenie a zemský sklon môžu byť ako spoločný všadeprítomný faktor vylúčené, takže najpravdepodobnejšie vysvetlenie je, že zvieratá sú ovplyvňované magnetickými podnetmi, ktoré spôsobujú ich magnetické zarovnanie k vektoru magnetického poľa. Toto magnetické zarovnanie týchto zvierat je spontánne správanie, ktoré vyjadruje istú schopnosť vnímania magnetického poľa, ktorá sa prejavuje pri odpočívajúcich zvieratách, kedy ich telesná orientácia nie je kontrolovaná vedome. Takéto správanie teda nezahŕňa vedomé využívanie magnetického poľa a tiež tieto zvieratá pravdepodobne nevyužívajú magnetický kompas k navigácii a migrácii na dlhšie vzdialenosti (Burda et al., 2009, Begall et al., 2008).

Ďalší cicavec, ktorý istým spôsobom dokáže využívať magnetické pole je červená líška. Tieto líšky lovia malé zvieratá a vykazujú pri tom špecifické správanie, ktoré je známe ako „mousing“ – líšky vyskočia vysoko, čiže svoju korisť prekvapia zhora. K nájdeniu koristi, ktorá sa nachádza vo vysokej vegetácii či pod snehom používajú pravdepodobne ako primárny zmysel sluch, pretože aj pri príprave na skok vykazujú vysoký zmysel sluchového sústredenia. Líšky, ktoré sa ku koristi prikrádajú, majú sklon viesť svoje skoky v približnom severovýchodnom smere a útoky v tomto smere odohrávajúce sa vo vysokej vegetácii či snehu, sú väčšinou úspešné, na rozdiel od útokov, pri ktorých líšky vedú svoje skoky v smere inom. Smer útokov ale tiež závisí na dennom čase, ročnej sezóne, oblačnosti, či smere vetru, ale tiež je možné, že táto smerová preferencia reprezentuje príklad magnetického zarovnania a tým zvyšuje precíznosť útokov. Tiež je možné, že líšky, ktoré používajú „mousing“ môžu používať magnetické pole ako istý druh diaľkomeru alebo zaciľovacieho systému, ktorý slúži k premeraniu vzdialenosti k ich koristi, vďaka čomu majú útoky väčšiu šancu stať sa úspešnými. Tento magnetický zaciľovací systém môže byť sprostredkovaný buď

pomocou častíc magnetitu, ale tiež je možné, že je to na svetle závislý kompas založený na špecializovaných fotoreceptoroch v oku (Červený et al., 2011).

Spontánne reagovať na magnetické polia dokážu aj bezstavovci. Výskumy naznačujú, že múčny červ (*Tenebrio*) je schopný zistiť horizontálnu polaritu magnetického poľa. V minulosti sa predpokladalo, že tento červ je schopný pohybovať sa aj v úplnej tme, čo ale bolo v nedávnych pokusoch vylúčené, takže múčny červ má pravdepodobne magnetický kompas závislý na svetle (Vácha & Soukopová). Podobne ako múčny červ pri pokusoch so svetlom reagovala aj vlnna muška (*Drosophila melanogaster*), čo u oboch druhov naznačuje, že magnetický kompas je ovplyvnený svetelnou dĺžkou a teda je na svetle závislý (Painter et al., 2013). Na zemský magnetizmus reagujú aj termity a to tým, že svoje termitiská orientujú rovnobežne alebo kolmo k siločiarám. Osi zase reagujú na magnetizmus, ktorý je vychýlený od normálnych hodnôt stavaním nesymetrických plastových komôrok a tiež magnetické pole ovplyvňuje stavbu plastov aj u včiel. Tiež, ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, včely používajú magnetický kompas aj na orientáciu a to predtým, ako sa naučia rozoznávať znaky v krajine a okolitú krajinu okolo svojich úľov (Dovey et al., 2013).

5.3 Naučené využívanie magnetického poľa

Tiež pomocou experimentov a štúdií bolo zistené, že používanie magnetického poľa môže byť u istých druhov naučené. Takéto správanie bolo objavené u domácich sliepok (*Gallus gallus*), ktorých magnetický kompas funguje na tom istom princípe ako kompas u červienok obyčajných, čiže je závislý na svetle a môže byť narušený pomocou rádiovkej frekvencie, čo nasvedčuje tomu, že je založený na procese radikálových párov a lokalizovaný v pravom oku, z ktorého sa informácie dostávajú do ľavej časti mozgovej hemisféry. Kompas pracuje v úzkom funkčnom rozpätí, ktoré je naladené na intenzitu lokálneho magnetického poľa.

Tieto sliepky môžu byť vytrénované k nájdeniu rôznych sociálnych stimulov v špecifickom magnetickom smere a receptor, ktorý im to umožňuje sa pravdepodobne nachádza v sietnici. Tento magnetický kompas začína byť funkčným až približne na ôsmy deň po vyliahnutí, kedy už testované kurčata dokážu naučiť sa rozpoznávať stimuly pomocou magnetického poľa. Prvých päť dní tento kompas funkčný nie je (Denzau et al. 2013, Wiltschko et al., 2007).

U niektorých druhov vtákov sa ale fotochemické receptory nachádzajú v ľavom oku. Medzi taký druh pravdepodobne patrí aj kačica domáca (*Anas platyrhynchos domestica*). Experimenty, ktoré s ňou prebiehali, viedli k tomu, aby pomocou tréningu bola schopná nájsť skrytý stimul za niektorou z troch obrazoviek v kruhovej aréne. Výsledky naznačujú, že kačica k tomu používala informácie získané z magnetického poľa. Kačiciam sa podarilo nájsť správny smer dokonca aj vtedy, keď mali zobák umŕtvený pomocou lidokainu alebo keď mali zakryté pravé oko, čo znamená, že táto manipulácia neovplyvňuje ich schopnosť vnímať magnetické pole a táto ich schopnosť je pravdepodobne založená na chemickej magnetorecepcii, ktorá nie je obmedzovaná pravým okom, ale je pravdepodobne vnímaná pomocou ľavého oka. Aj iné druhy, ako holuby a penice slávikové používajú k magnetickej orientácii iba ľavé oko (Freire & Birch, 2010). Podobne ako sliepka domáca, dokáže byť vytrénovaná aj zebrička austrálska (*Taeniopygia guttata*) k orientácii na krátke vzdialenosti s použitím magnetického poľa (Keary et al., 2009).

Takéto správanie bolo pozorované aj už u vyššie spomínaných druhov. Už spomínaný slepec egyptský sa dokáže naučiť správnu cestu k cieľu, ktorý je vzdialený niekoľko metrov a používa k tomu aj zemské magnetické pole a pravdepodobne aj iné na svetle nezávislé receptory či kognitívne mapy (Kimchi & Terkel, 2001). Aj múčny červ, ktorý bol trénovaný pomocou určitého svetelného zdroja, bol schopný naučiť sa orientovať relatívne k magnetickému poľu (Vácha & Soukopová, 2004).

6. Záver

Oblasť magnetorecepcie u zvierat patrí momentálne medzi najviac skúmané oblasti zmyslovej fyziológie. Napriek rozličným výskumom ešte stále nie sú známe presné mechanizmy magnetorecepcie a zmysel nepoznáme ani pri spontánnom využívaní magnetického poľa niektorými druhmi zvierat, ale to neznamena, že žiadny zmysel nemá a v budúcnosti sa môže pomocou výskumov objasniť. K takémuto spontánnemu správaniu môže patriť aj preferovanie určitých zemepisných smerov pri inkubácii vtákov, čomu sa budeme venovať v nasledujúcej diplomovej práci.

7. Literatúra

- Able K.P., Able M.A. (1996)** The flexible migratory orientation system of the Savannah sparrow (*Passerculus sandwichensis*). *The Journal of Experimental Biology* 199: 3 – 8
- Beason R. (2005)** Mechanisms of Magnetic Orientation in Birds. *Integrate and Comparative Biology* 45: 565 – 573
- Begall S., Červený J., Neef J., Vojtěch O., Burda H. (2008)** Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *PNAS* 105: 13451 – 13455
- Burda H., Begall S., Červený J., Neef J., Němec P. (2009)** Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *PNAS* 106: 5708 – 5713
- Brázdil R. (1988)** Úvod do studia planety Země. Praha: Stát. pedagog. nakl. 365 s.
- Cain S.D., Boles L.C., Wang J.H., Lohmann K.J. (2005)** Magnetic Orientation and Navigation in Marine Turtles, Lobsters and Molluscs: Concepts and Conundrums. *Integrate and Comparative Biology* 45: 539 – 546
- Červený J., Begall S., Koubek P., Nováková P., Burda H. (2011)** Directional preference may enhance hunting accuracy in foraging foxes. *Biological Letters* 7: 355 – 357
- Davila A.F., Fleissner G., Winklhofer M., Petersen N. (2003)** A new model for a magnetoreceptor in homing pigeons based on interacting clusters of superparamagnetic magnetite. *Physics and Chemistry of the Earth* 28: 647 – 652
- Denzau S., Nießner Ch., Rogers L.J., Wiltshko W. (2013)** Ontogenetic development of magnetic compass orientation in domestic chickens (*Gallus gallus*). *The Journal of Experimental Biology* 216: 3143 – 3147
- Deutschlander M.E., Freake 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 sungorus*. *Animal Behaviour*: 779 – 786
- Dovey K.M., Kemfort J.R., Towne W.F. (2013)** The depth of the honeybee's backup sun-compass systems. *The Journal of Experimental Biology* 216: 2129 – 2139

- Fischer J.H., Freake M.J., Borland S.C., Phillips J.B. (2001)** Evidence for the use of magnetic map information by an amphibian. *Animal Behaviour* 62: 1 – 10
- Freire R., Birch T.E. (2010)** Conditioning to magnetic direction in the Pekin duck (*Anas platyrhynchos domestica*). *The Journal of Experimental Biology* 213: 3423 – 3426
- Fuxjager M.J., Eastwood B.S., Lohmann K.J. (2010)** Orientation of hatchling loggerhead sea turtles to regional magnetic fields along a transoceanic migratory pathway. *The Journal of Experimental Biology* 214: 2504 – 2508
- Gagliardo A., Ioale P., Lipp H.P., Dell’Omo G. (2007)** Finding home: the final step of the pigeons’ homing process studied with a GPS data logger. *The Journal of Experimental Biology* 210: 1132 - 1138
- Gagliardo A., Ioale P., Savini M., Wild M. (2008)** Navigational abilities of homing pigeons deprived of olfactory or trigeminally mediated magnetic information when young. *The Journal of Experimental Biology* 211: 2046 – 2051
- Grönroos J., Muheim R., Åkesson S. (2010)** Orientation and autumn migration routes of juvenile sharp-tailed sandpipers at a staging site in Alaska. *The Journal of Experimental Biology* 213: 1829 – 1835
- Gudmundsson G.A., Sandberg R. (2000)** Sanderlings (*Calidris alba*) have a magnetic compass: orientation experiments during spring migration in Iceland. *The Journal of Experimental Biology* 203: 3137 – 3144
- Holland R.A., Filannino C., Gagliardo A. (2013)** A magnetic pulse does not affect homing pigeon navigation: a GPS tracking experiment. *The Journal of Experimental Biology* 216: 2192 – 2200
- Holland R.A., Thorup K., Gagliardo A., Bisson I.A., Knecht E., Mizrahi D., Wikelski M. (2009)** Testing the role of sensory systems in the migratory heading of a songbird. *The Journal of Experimental Biology* 212: 4065 – 4071
- Irwin W.P., Lohmann K.J. (2005)** Disruption of magnetic orientation in hatchling loggerhead sea turtles by pulsed magnetic fields. *Journal of Computational Physics* 191: 475 – 480

- Keary N., Ruploh T., Voss J., Thalau P., Wiltshko R., Wiltshko W., Bischof H. (2009)** Oscillating magnetic field disrupts magnetic orientation in Zebra finches, *Taeniopygia guttata*. *Frontiers in Zoology* 6:25
- Kimchi T., Terkel J. (2001)** Magnetic compass orientation in the blind mole rat *Spalax ehrenbergi*. *The Journal of Experimental Biology* 204: 751 – 758
- Lohmann K.J., Fittinghoff Lohmann C.M. (1993)** A Light-Independent Magnetic Compass in the Leatherback Sea Turtle. *The Biological Bulletin*. 185: 149 – 151
- Lohmann K.J., Johnsen S. (2000)** The neurobiology of magnetoreception in vertebrate animals. *Trends Neurosci*, 23: 153–159
- Lohmann K.J., Lohmann C. M.F. (2006)** Sea turtles, lobsters and oceanic magnetic maps. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* 39: 49 – 64
- Lohmann K.J., Lohmann C. M.F., Putman N. F. (2007)** Magnetic maps in animals: nature's GPS. *The Journal of Experimental Biology* 210: 3697 - 3705
- Lohmann K.J., Pentcheff N.D., Nevitt G.A., Stetten G.D., Zimmer-Faust R.K., Jarrard H.E., Boles L.C. (1995)** Magnetic orientation of spiny lobsters in ocean: Experiments with undersea coil system. *The Journal of Experimental Biology*. 204: 2041 – 2048
- Möller A., Sagasser S., Wiltshko W., Schierwater B. (2004)** Retinal cryptochrome in a migratory passerine bird: a possible transducer for the avian magnetic compass. *Naturwissenschaften* 91: 585 – 588
- Mouritsen H., Huyvaert K.P., Frost B.J., Anderson D.J. (2003)** Waved albatrosses can navigate with strong magnets attached to their head. *The Journal of Experimental Biology* 206: 4155 – 4166
- Muheim R., Phillips J.B., Deutschlander M.E. (2009)** White-throated sparrows calibrate their magnetic compass by polarized light cues during both autumn and spring migration. *The Journal of Experimental Biology* 212: 3466 – 3472
- Nesterova A.P., Chiffard J., Couchoux Ch., Bonadonna F. (2013)** The invisible cues that guide king penguin chicks home: use of magnetic and acoustic cues during orientation and short-range navigation. *The Journal of Experimental Biology* 216: 1491 – 1500

- Oliveriusová L., Němec P., Králová Z., Sedláček F. (2012)** Magnetic compass orientation in two strictly subterranean rodents: learned or species-specific innate directional preference? *The Journal of Experimental Biology* 215: 3649 – 3654
- Palmer D., Dinwiddie R., Walters M., Twist C., Allaby M., Farndon J., Waltham T., Dennisová-Bryanová K. (2004)** Zem. Bratislava: Ikar. 520 s. ISBN: 80-551-0796-3
- Painter M.S., Dommer D.H., Altizer W.W., Muheim R., Phillips J.B. (2013)** Spontaneous magnetic orientation in larval *Drosophila* shares properties with learned magnetic compass responses in adult flies and mice. *The Journal of Experimental Biology* 216: 1307 – 1316
- Philips J.B., Borland Ch. (1994)** Use of a specialized magnetoreception system for homing by the eastern red-spotted newt *Notophthalmus viridescens*. *The Journal of Experimental Biology* 188. 275 – 291
- Ritz T., Adem S., Schulten K. (2000)** A Model for Photoreceptor-Based Magnetoreception in Birds. *Biophysical Journal* 78: 707 – 718
- Schlegel P. (2008)** Magnetic and other non-visual orientation mechanisms in some cave and surface urodeles. *Journals of Ethology* 26: 347 – 359
- Takebe A., Furutani T., Wada T., Koinuma M., Kubo Y., Okano K., Okano T. (2012)** Zebrafish respond to the geomagnetic field by bimodal and group-dependent orientation. *Scientific reports* 2:727
- Vácha M., Soukopová H. (2004)** Magnetic orientation in the mealworm beetle *Tenebrio* and the effect of light. *The Journal of Experimental Biology* 207: 1241 – 1248
- Walker M.M., Dennis T.E., Kirschvink J.L. (2002)** The magnetic sense and its use in long-distance navigation by animals. *Current Opinion in Neurobiology* 12: 735 – 744
- Wang Y., Pan Y., Parsons S., Walker M., Zhang S. (2007)** Bats respond to polarity of a magnetic field. *Proceeding of the Royal Society* 274: 2901 – 2905
- Wegner R.E., Begall S., Burda H. (2006)** Magnetic compass in the cornea: local anaesthesia impairs orientation in a mammal. *The Journal of Experimental Biology* 209: 4747 – 4750

Wiltschko R., Denzau S., Gehring D., Thalau P., Wiltschko W. (2011) Magnetic orientation of migratory robins, *Erithacus rubecula*, under long-wavelength light. The Journal of Experimental Biology 214: 3096 – 3101

Wiltschko R., Gehring D., Denzau S., Nießner Ch., Wiltschko W. (2014) Magnetoreception in birds II: Behavioural experiments concerning the cryptochrome cycle. The Journal of Experimental Biology 217: 4225 – 4228

Wiltschko R., Munro U., Ford H., Stapput K., Wiltschko W. (2008) Light-dependent magnetoreception: orientation behaviour of migratory birds under dim red light. The Journal of Experimental Biology 211: 3344 – 3350

Wiltschko W., Freire R., Munro U., Ritz T., Rogers L., Thalau P., Wiltschko R. (2007) The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. The Journal of Experimental Biology 210: 2300 – 2310

Wiltschko W., Munro U., Ford H., Wiltschko W. (2006) Bird navigation: what type of information does the magnetite-based receptor provide?. Proceeding of the Royal Society 273: 2815 – 2820

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

Wiltschko W., Wiltschko R. (2002) Magnetic compass orientation in birds and its physiological basis. Naturwissenschaften 89: 445 – 452

Wiltschko W., Wiltschko R. (1996) Magnetic orientation in birds. The Journal of Experimental Biology 199: 29 – 38