

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**PROJEVY MAGNETORECEPCE OBRATLOVCŮ**



**Monika Nováková**

2010

Vedoucí práce:

prof. RNDr. Hynek Burda, CSc., Mgr. Radim Šumbera PhD

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

Ráda bych na tomto místě poděkovala svým školitelům Hynku Burdovi a Radimu Šumberovi za vedení práce a cenné připomínky, také Lídě Oliveriusové za rady při zpracování statistiky a ochotu pomoci a Martině Moravcové za trpělivost. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat rodině za podporu během celého studia.

.....  
Monika Nováková

V Českých Budějovicích, 3. 5. 2010

**Nováková Monika, 2010:**

**Projevy magnetorecepce obratlovců** [The manifestation of magnetoreception in vertebrates, Bachelor Thesis, in Czech] 47 pp., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

Annotation:

Animals perceive the Earth's magnetic field and use it not only for orientation and navigation. Magnetic field influences also another behavioural and physiological processes. The aim of my work was to survey the literature knowledge of these processes in vertebrates and collect empirical data on manifestation of magnetic alignment in different species of mammals in zoos.

## **OBSAH**

<b>1. ÚVOD</b>	5
<b>1.1. Magnetické pole Země</b>	5
<b>1.2. Vnímání magnetického pole</b>	10
1.2.1. Magnetorecepce založená na elektromagnetické indukci	11
1.2.2. Magnetorecepce založená na ferromagnetických částicích	12
1.2.3. Fotochemická magnetorecepce	13
<b>1.3. Magnetická orientace a další využití vnímání magnetického pole</b>	14
<b>1.4. Jiné než orientační projevy vnímání magnetického pole</b>	16
1.4.1. Magnetický alignment	16
1.4.2. Stranding	18
1.4.3. Orientace v čase	18
1.4.4. Produkce melatoninu a další	19
<b>1.5. Cíle práce</b>	21
<b>2. MATERIÁL A METODIKA</b>	21
<b>3. VÝSLEDKY</b>	23
<b>4. DISKUZE</b>	35
<b>5. ZÁVĚR</b>	39
<b>6. POUŽITÁ LITERATURA</b>	40

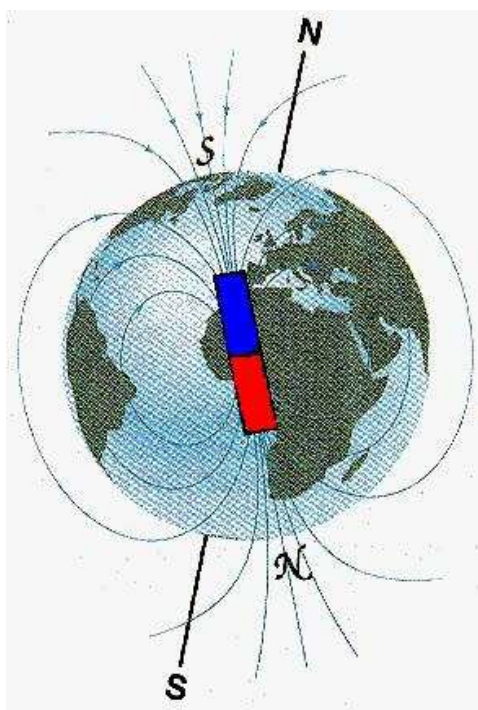
## **1. ÚVOD**

Naše Země se chová jako obrovský magnet (např. Pauk a Habětín 1979). Magnetické pole reprezentuje velmi spolehlivý a všudypřítomný zdroj informací pro živé organismy. Zvířata, která jsou citlivá k určitému parametru magnetického pole, díky němu získávají údaje o směru, své pozici a čase (Wiltschko a Wiltschko 1995). Z obratlovců byla schopnost magnetorecepce prokázána u ryb, obojživelníků, želv, ptáků a savců (Wiltschko a Wiltschko 1996, Lohmann a Johnsen 2000). Nejčastěji je spojována s orientací a navigací na dlouhé vzdálenosti (Walker et al. 2002), ale zahrnuje také spontánní neorientační projevy, např. magnetický alignment (Begall et al. 2008). Magnetické pole zřejmě ovlivňuje i další behaviorální a fyziologické procesy u zvířat (rev. Fernie a Reynolds 2005), jako je např. produkce melatoninu (např. Kumlin et al. 2005; Fernie et al. 1999; Burchard et al. 1998), aktivita zvířat (Fernie et al. 2000b), nebo spotřeba potravy (Burchard et al. 2003).

### **1.1. Magnetické pole Země**

Geomagnetické pole se podobá poli velkého tyčového magnetu umístěného uvnitř Země, jehož magnetická osa je pod malým úhlem odkloněna od osy geografické a nevede středem Země (např. Beazley 1981; Činčura 1983), (obr. 1). V současné době se úhel odklonu rovná přibližně  $11,5^\circ$  (např. Jakeš 1984).

Původ magnetického pole je vysvětlován hlavně dynamovým efektem ve vnějším tekutém zemském jádře. Jádro Země se vzhledem k plášti pohybuje. Z tohoto diferenciálního pohybu dvou těles vzniká elektrický proud a v jeho důsledku i magnetické pole Země (srovn. Jakeš 1984; Wiltschko a Wiltschko 1995).



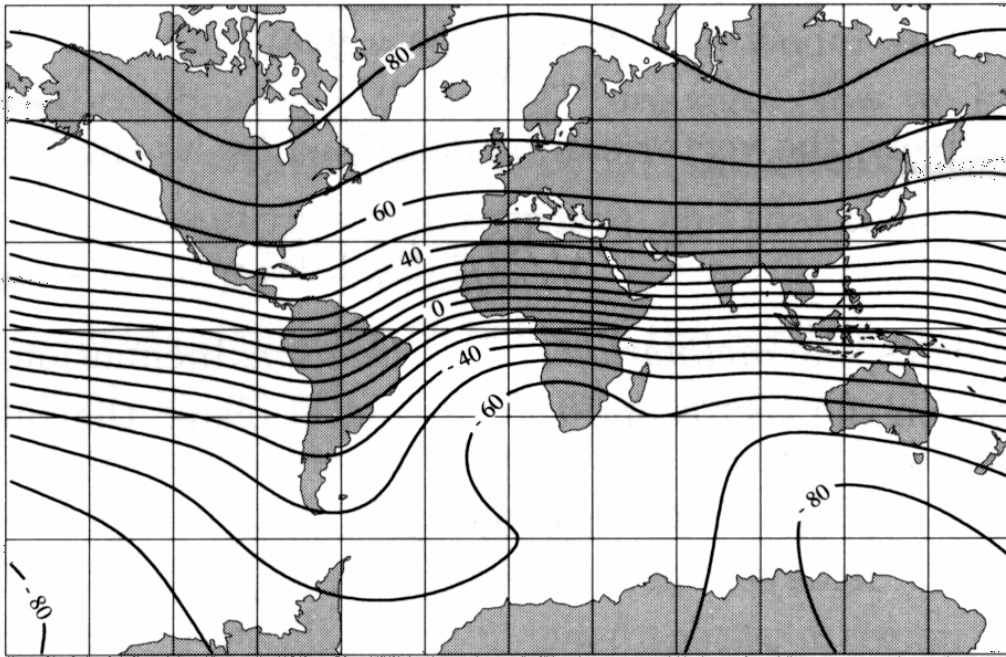
Obr. 1: Magnetické pole Země, směr jeho siločar a poloha zemských geografických a magnetických pólů. Zdroj: <http://www.oskole.sk/userfiles/image/novy/obrazky%20OSKOLE/horvathova/4.jpg>

Geomagnetické pole je pole dipólové. Póly stříelky kompasu jsou magnetickými póly přitahovány a otáčejí se tak, že jeden konec ukazuje k severnímu magnetickému pólu a druhý k jižnímu (např. Beazley 1981; Wiltschko a Wiltschko 1995). Polarita magnetického pole je v současnosti taková, že v blízkosti severního zemského pólu leží jižní magnetický pól a jižního zemského pólu severní magnetický pól. Magnetické póly neleží přesně naproti sobě (např. Činčura 1983) a nejsou stálé (např. Pauk a Habětín 1979). Siločáry magnetického pole vedou kolem Země od severního magnetického pólu k jižnímu. Oblast, kde siločáry vedou paralelně s povrchem Země, se nazývá magnetický rovník. Ten leží v Africe severně od geografického rovníku a jižně od něj v Jižní Americe. Stejně jako poloha pólů se mění také poloha magnetického rovníku (např. Wiltschko a Wiltschko 1995).

Proč je ale poloha magnetických pólů proměnlivá, se neví. Dokonce několikrát v historii došlo k přepólování Země. Tento obrat, který je spojen se snížením intenzity dipólového pole, naposledy nastal před 730 tis. roky (např. Wiltschko a Wiltschko 1995). Změna polarity geomagnetického pole je postupná: jeho magnetická intenzita klesá nejprve k nule a pak pomalu stoupá opačným směrem (např. Beazley 1981). Tyto změny magnetického pole jsou zaznamenávány v horninách a mohou způsobit magnetické anomálie. Nejvýraznější magnetickou anomálií je Kurská anomálie, kde lokální intenzita magnetického pole dosahuje až 190 000 nT. V moři je magnetické pole více homogenní než na pevnině (viz např. Wiltschko a Wiltschko 1995).

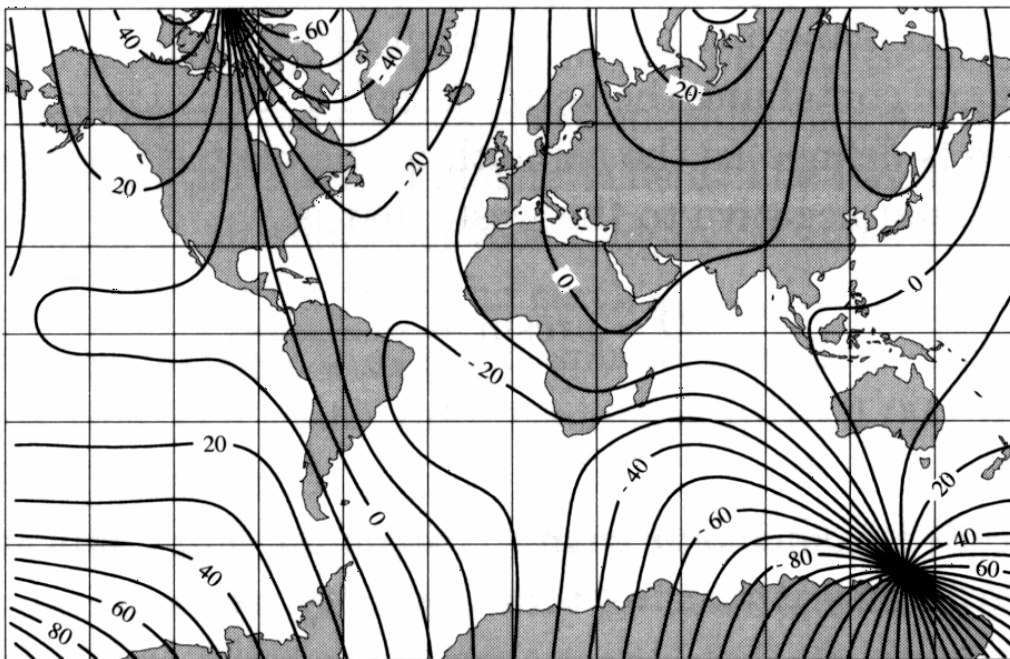
Geomagnetické pole se skládá z permanentního a proměnného pole. Základní **permanentní pole** (99% intenzity) je podmíněno pohyby elektricky vodivých hmot ve svrchních vrstvách zemského jádra. Podléhá jen malým dlouhodobým změnám. **Proměnné pole** je podmíněno elektrickými proudy v ionizovaných částech zemské atmosféry a v magnetosféře (např. Činčura 1983) a je deformováno elektricky nabitými částicemi ze Slunce. Tyto částice proudí v horních vrstvách atmosféry a při zemi způsobují malá kolísání magnetického pole. Některá kolísání jsou pravidelná – například denní (např. Beazley 1981), lunární, solární, roční (např. Činčura 1983); některá občasná – například magnetické bouře (např. Beazley 1981). Pravidelné denní změny jsou způsobeny slunečním elektromagnetickým zářením působícím na stranu Země otočenou ke Slunci a vytvářejícím proudy v horních vrstvách atmosféry a ionosféry. Závisí také na zeměpisné šířce, ročním období nebo v menším rozsahu na lunární fázi (srovn. Wiltschko a Wiltschko 1995). Magnetické bouře jsou náhlé, někdy velmi silné poruchy v geomagnetickém poli. Trvají několik hodin, ale také několik dní (srovn. Činčura 1983). Jsou spojeny s aktivitou slunečních skvrn, solárními erupcemi, atd. a ovlivňují pravidelné jevy (srovn. Wiltschko a Wiltschko 1995). Při bouřkách se ohřívají horní vrstvy atmosféry, probíhá v nich intenzivnější ionizace, zvyšuje se rychlost nabitých částic, jasnost polární záře, vznikají poruchy na krátkých vlnách atd. (srovn. Činčura 1983).

Geomagnetické pole je v každém bodě prostoru charakterizováno jeho celkovou intenzitou a jejím směrem, který je udáván deklinací a inklinací. **Intenzita** (mohutnost magnetického pole) magnetického pole je nejsilnější na pólech, což jsou místa na zemském povrchu, kde se sbíhají silové čáry magnetického pole Země. Tam může dosahovat až 60 000 nT. Hodnoty intenzity se snižují k 30 000 nT na magnetickém rovníku. Nejnižší intenzity dosahuje pole na východním pobřeží Jižní Ameriky (viz Wiltschko a Wiltschko 1995). Sklon neboli **inklinace** magnetického pole při povrchu Země (např. Beazley 1981), je úhel mezi směrem vektoru intenzity magnetického pole a horizontální rovinou. Na magnetickém rovníku má hodnotu 0°, na pólech 90°. Čáry na mapě spojující místa se stejnou inklinací se nazývají izokliny (Obr. 2). Jejich poloha se v souvislosti se změnami polohy magnetických pólů Země mění (srovn. Činčura 1983). **Deklinace** je úhel mezi směrem stříčky magnetického kompasu a geografickým severem (např. Beazley 1981), tedy úhel odklonu magnetické jehly od roviny místního poledníku. Při odklonu na východ je kladná, při západní odchylce záporná. Tento úhel se také mění s polohou magnetických pólů. Čáry spojující místa se stejnou deklinací se nazývají izogony (Obr. 3). Sbíhají se v magnetických pólech Země. Nulovou hodnotu deklinace kompas ukazuje přesně na severním zemském pólu (např. Činčura 1983).



Obr. 2: Izokliny, čáry spojující místa se stejnou inklinací.

Zdroj: [http://geophysics.ou.edu/solid\\_earth/notes/mag\\_earth/magnetic\\_field\\_b.gif](http://geophysics.ou.edu/solid_earth/notes/mag_earth/magnetic_field_b.gif)

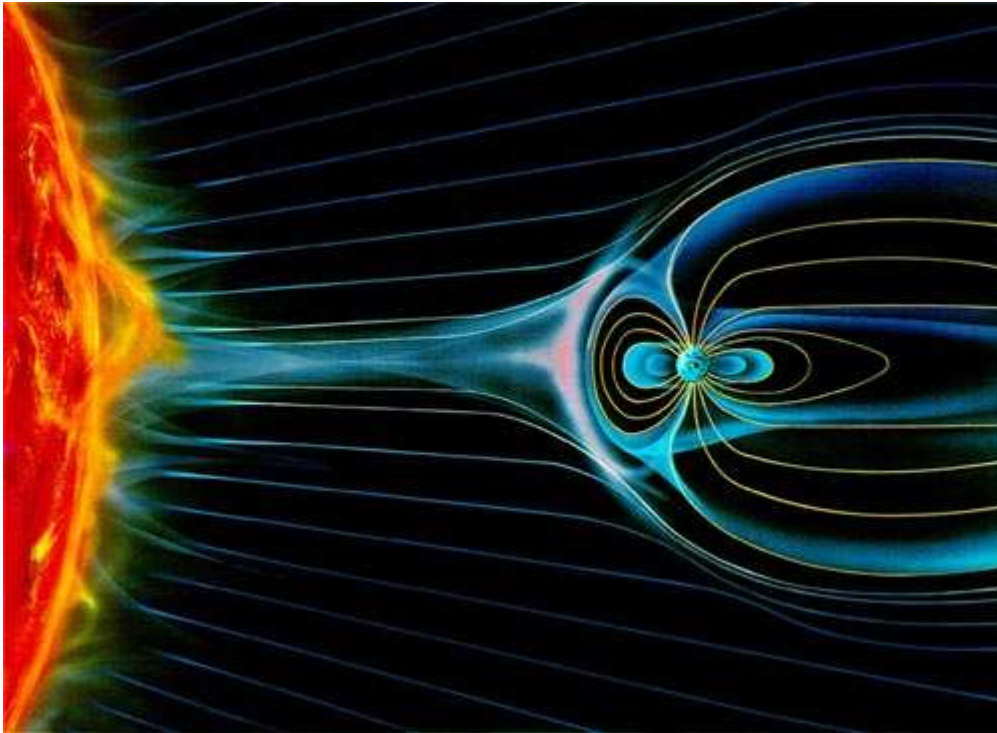


Obr. 3: Izogony, čáry spojující místa se stejnou deklinací.

Zdroj: [http://geophysics.ou.edu/solid\\_earth/notes/mag\\_earth/magnetic\\_field\\_c.gif](http://geophysics.ou.edu/solid_earth/notes/mag_earth/magnetic_field_c.gif)



Magnetické pole se projevuje v oblasti kolem Země zvané magnetosféra (Obr. 4), (např. Beazley 1981). Směrem ke Slunci je magnetosféra stlačena (srovn. Vanýsek 1980). Elektricky nabitě částice proudící ze Slunce ji deformují do tvaru kapky (srovn. Beazley 1981). Nevelké změny v hustotě a rychlosti částic vyvolávají změny v deformaci zemské magnetosféry a tím vyvolávají rychlé změny geomagnetického pole známé pod pojmem magnetická bouře (srovn. Vanýsek 1980). Hranice magnetického pole se nazývá magnetopauza (viz Beazley 1981).



Obr. 4: Tvar magnetosféry – oblasti kolem Země, kde se projevuje magnetické pole.

Zdroj: <http://2012rising.com/images/81.jpg>

## 1.2. Vnímání magnetického pole

O vynikajících orientačních a navigačních schopnostech živočichů se ví již dlouho, ať už se jedná například o migraci ptáků či mořských želv. V přírodě zvířata žijí v komplexním prostředí. To jim poskytuje množství podnětů, které pak mohou využívat (Wiltschko a Wiltschko 1995). Živočichové se orientují podle různých vodítek, např. podle polohy Slunce, hvězd, či jiných orientačních bodů. K tomu jim pomáhají smysly, především zrak, čich, sluch, případně i chuť. Ale podle čeho se řídí za podmínek, kdy je užívání těchto smyslových vodítek nemožné nebo omezené? V tomto případě mohou mnozí živočichové využívat také magnetické pole Země, i když zřejmě jen jako součást z celého komplexu dalších smyslových vjemů (srovn. Vácha a Němec 2007) a velmi málo je známo o neurálních a biofyzikálních mechanismech, které jsou základem tohoto smyslového vnímání (srov. Johnsen a Lohmann 2005, Němec et al. 2005).

Podle všeho, zvířata se v magnetickém poli orientují na podobném principu jako lidé pomocí kompasu, kdy si mohou stanovit azimut, tedy úhel mezi směrem své trasy a severo-jihní magnetickou osou (Vácha a Němec 2007). A i další vlastnosti magnetického pole mohou živočichům pomoci při jejich orientaci.

Magnetorecepce je schopnost vnímat magnetické podněty, jako intenzitu a inklinaci místního magnetického pole, a přenášet je do nervového systému, který získává, využívá a vyhodnocuje příslušnou informaci (srovn. Moritz et al. 2007). Všechny známé smyslové systémy mají speciální receptorové buňky přizpůsobené k odpovědi na vnější podněty a jsou spojeny s neurony přinášejícími tuto informaci do mozku. V případě magnetorecepce nebyly ale specializované periferní receptory dosud jednoznačně identifikovány (srovn. např. Němec et al. 2005; Kirschvink et al. 2010).

Přínejmenším u obratlovců se předpokládá, že magnetické receptory jsou uloženy v hlavě: v zobáku ptáků (viz Kirschvink et al. 2010), nosní dutině (Wiltschko et al. 2007), rohovce oka (Wegner et al. 2006), pineálním orgánu (Phillips et al. 2010) atd. Hledání periferních receptorů může být komplikováno skutečností, že zvířata pravděpodobně využívají odlišné typy magnetické informace (získané z polarity, inklinace, magnetických vlastností mořského dna), které mohou vyžadovat receptory různého druhu. Magnetické pole prochází tkání, takže je možné, že neexistuje žádný specifický magnetorecepční orgán a že magnetoreceptory jsou rozmístěny v celém těle. Existuje více typů využívání magnetického kompasu a poznatky od jednoho druhu zvířat nemohou být generalizovány (srovn. Wiltschko a Wiltschko 1995; Kirschvink et al. 2010).

Existují dva typy kompasové reakce živočichů – **polaritní** a **inklinační** (srovn. Vácha a Němec 2007). Inklinální kompas, který mají např. ptáci nebo mořské želvy (viz Lohmann a Johnsen 2000), nemůže určit polaritu pole přímo, ale odvozuje ji sekundárně

ze sklonu celkového vektoru k Zemi. Zvířata sice poznají směr severo-jihní osy, ale kde je sever a jih odvozují až z inklinace (srovn. Vácha a Němec 2007). Oproti tomu mají např. lososi nebo rypoši kompas, který určuje sever pomocí polaritu pole (srovn. Lohmann a Johnsen 2000). Nepotřebují tedy inklinaci. Díky kombinaci informací o místních měnících se gradientech v inklinaci a intenzitě magnetického pole může zvíře určovat magnetické souřadnice každého bodu své cesty (srovn. Moritz et al. 2007). U řady druhů však zůstává způsob rozlišení polaritu neznámý (srovn. Vácha a Němec 2007).

Zvířata využívají buď magnetickou poziční (mapovou) informaci, nebo magnetickou směrovou (kompasovou) informaci. Ta, která mají schopnost pohybovat se s ohledem na geomagnetické pole, mají magnetický kompasový smysl. Ale samotný magnetický kompas nestačí k migraci na dlouhé vzdálenosti na určité místo. Mapový smysl poskytuje schopnost určit pozici v souvislosti s cílem cesty, k tomu jim pomáhají vlastnosti magnetického pole, jako je intenzita či inklinace (Lohmann a Johnsen 2000).

Tyto typy kompasové orientace jsou pravděpodobně založeny na různých magnetorecepčních mechanismech, ale žádný z těchto mechanismů nebyl s jistotou určen. Tři základní mechanismy, které se s největší pravděpodobností podílejí na schopnosti zvířat vnímat magnetické pole, využívají percepci založenou na elektromagnetické indukci, chemickou magnetorecepci, nebo mechanickou magnetorecepci založenou na částech biogenního magnetitu (Wiltschko a Wiltschko 1995).

### **1.2.1. Magnetorecepce založená na elektromagnetické indukci**

Indukční hypotéza předpokládá, že magnetická informace je vnímána díky elektroreceptorům. Zvířata nevyužívají samotné magnetické pole, ale odpovídající pole elektrické, které je indukováno jejich pohybem (srovn. Wiltschko a Wiltschko 1995).

Tento mechanismus je rozšířen hlavně mezi primitivními vodními obratlovci, jako jsou mihule, žraloci, rejnoci a další fylogeneticky staré skupiny. Tyto druhy mají receptory k rozpoznávání elektrického pole. Receptory jim v jejich přirozeném prostředí pomáhají například nalézt kořist, vyhnout se překážkám (Kalmijn 1982), nebo k magnetické orientaci (Murray 1962).

Magnetické pole je vnímáno díky pohybu zvířete. Pohybem je indukována elektromotorická síla a vytváří se dorzoventrální napěťový gradient. Tento gradient je úměrný rychlosti plavání a mění se podle směru hlavy zvířete. Tak se sám organismus stává vodičem a celkový rozdíl potenciálu je zanedbatelný. V elektrosenzitivních orgánech, jako jsou Lorenziniho ampuly u chrupavčitých jsou napěťové gradienty generovány podél ampulárního kanálu, ale uvnitř ampuly se vytváří odpor, a tak může napěťový gradient stimulovat smyslové epitely na slepých zakončeních ampul (Kalmijn 1974, 1978a, b; ve Wiltschko a Wiltschko 1995).

Při konstantní rychlosti plavání je indukované elektrické pole nulové pokud zvíře směřuje na sever či na jih, a dosahuje maxima s odlišným znaménkem, když se pohybuje východně či západně a tak může přinášet informaci o směru pohybu (Kalmijn 1978a; ve Wiltschko a Wiltschko 1995).

Elektroreceptory byly kromě paryb nalezeny také u mihulí, některých vodních obojživleníků a ptakořitných savců (srovn. Němec a Vácha 2007). Tento typ magnetorecepce je omezen pouze na zvířata žijící v moři, protože vyžaduje slanou vodu jako okolní vodivé medium (Wiltschko a Wiltschko 2006). Hypotéza magnetorecepce založené na elektromagnetické indukci bývá v poslední době zpochybňována (viz Kirschvink et al. 2001; Kirschvink et al. 2010).

### **1.2.2. Magnetorecepce založená na ferromagnetických částicích**

Částice, které se chovají jako miniaturní magnety orientující se podle magnetického pole, byly nalezeny u široké řady zvířat. Magnetický materiál nalezený ve zvířecí tkáni byl nejčastěji identifikován jako  $Fe_3O_4$  (viz např. Kirschvink et al. 2001). Nejprve byly krystaly biogenního magnetitu objeveny u bakterie (*Aquaspirillum magnetotacticum*), (Blakemore 1975), následně u včel, ptáků, lososů, mořských želv a dalších (Kirschvink et al. 1985 v Johnsen a Lohmann 2005).

Krystaly magnetitu se uspořádají podle magnetického pole a mohou přenášet informaci získanou z pole do nervového systému díky tlaku nebo torzní síle na sekundární receptory jako jsou volná nervová zakončení, vláskové buňky nebo mechanoreceptory, nebo mohou být pohybem magnetických částic ovlivněny iontové kanály (Lohmann a Johnsen 2000). Magnetické chování částic závisí na jejich velikosti a také na jejich tvaru. Částice mohou být využity k získání informace o směru magnetického pole a rozpoznání malých změn v intenzitě (srovn. Wiltschko et al. 2007).

Krystaly se vyskytují ve formě jednodomérových nebo superparamagnetických částic. Jednodomérové částice (velikost asi 50 nm) se přiklánějí ve směru indukčních čar, pasivně se natáčejí do směru magnetického pole. Superparamagnetické částice jsou menší (2 – 5 nm), nemají stálý magnetický moment, nemohou se natáčet, ale v jejich shlucích je indukován magnetický moment, jehož orientace je vždy shodná s orientací vnějšího pole (srovn. Němec a Vácha 2005). Tento mechanismus dává zvířatům mimořádně dobrý kompasový smysl (Kirschvink 1997).

Zatím nebyla objevena žádná konkrétní smyslová struktura, kde by byly částičky magnetitu umístěny. Pokud je ale magnetit opravdu zapojen do magnetorecepce, předpokládá se specializace smyslových buněk, nebo alespoň nějaké spojení s nervovým systémem (Wiltschko a Wiltschko 1995).

Biogenní magnetit se uplatňuje např. u pstruha duhového, jehož buňky v čichové lamelle obsahují jeho krystalky a jsou inervovány větví trojklanného nervu (Walker et al. 1997). Podobně u vlhovce rýžového, u něhož byl magnetit nalezen v horní části zobáku a vzruch je přenášen též větví trojklanného nervu (Lohmann a Johnsen 2000), popř. u holubů, kde jsou nanokrystalky magnetitu uvnitř nervových zakončení uspořádány do shluků podél plasmatické membrány a inervovány magnetoreceptory trojklanného nervu. Po jeho přetnutí ztratí holub schopnost rozlišit magnetické anomálie (srovn. Němec a Vácha 2007).

Tento způsob magnetorecepce není závislý na světle a může také rozlišit polaritu magnetického pole. Uplatňuje se také u ryb, mořských želv a podzemních hlodavců a netopýrů (srovn. Němec a Vácha 2007; Moritz et al. 2007; Kirschvink et al. 2010).

### 1.2.3. Fotochemická magnetorecepce

V případě této magnetorecepce se uvažuje o makromolekulách fotopigmentů, které v excitovaném stavu, fungují jako přenašeče. Mohou pak reagovat na intenzitu a směr okolního magnetického pole a být tak použity k získání magnetické informace. Po absorpci fotonu jsou molekuly povýšeny do excitovaného stavu. Molekuly v excitovaném (singletovém) stavu mají vysokou energii a snaží se ji snížit přechodem do stavu tripletového. V tomto stavu mají magnetický moment (Wiltschko a Wiltschko 1995). Molekuly se mohou natáčet v závislosti na okolním magnetickém poli a organismy získávají magnetickou informaci sledováním návratu molekuly do stavu základního. Tento typ magnetorecepce je vnímán okem (v sítnici) jako vedlejší produkt normálního procesu vidění. Tento model byl navržen pro vnímání magnetického pole u ptáků (viz Kirschvink 2010).

Další možností je, že molekuly v excitovaném tripletovém stavu disociují na radikály. Tento proces je závislý na intenzitě a směru okolního magnetického pole a radikály mohou způsobit specifické reakce na membránách (Ritz et al. 2000). Ke tvorbě radikálů ve fotopigmentech stačí slabé magnetické pole. Jediné známé fotopigmenty, které u obratlovců tvoří radikálové páry, jsou kryptochromy (srovn. Vácha a Němec 2007, Phillips et al. 2010). Tento model umožňuje získat pouze axiální informaci a ne informaci o polaritě magnetického pole a je závislý na světle, které poskytuje energii (Ritz et al. 2000). Různé druhy zvířat reagují na světlo různé vlnové délky (srovn. Phillips et al. 2010).

Vizuální vjemy jsou vnímány díky pohybově senzitivním buňkám nebo směrově selektivním buňkám, které přenášejí vjem do *tectum opticum* (Britto et al. 1981 ve Wiltschko a Wiltschko 1995). Odpověď závisí na přítomnosti světla a na spojení sítnice a optického nervu. Alespoň část oblohy musí být viditelná k využití těchto podnětů (Beason 2005).

Světlo je nutné k magnetorepceci u ptáků a čolků (Phillips a Borland 1992a). U ptáků je do procesu zapojena sítnice a hlavní roli nejspíše hraje pravé oko (Wiltschko et al. 2002). Uplatňuje

se také pineální orgán a u obojživelníků frontální orgán. Přesné spojení mezi světelným podnětem a magnetickou odpovědí neznáme (Lohmann a Johnsen 2000).

### **1.3. Magnetická orientace a další využití vnímání magnetického pole**

Kompasová orientace je zdaleka nejrozšířenější využití magnetického smyslu mezi zvířaty. Zvířata využívají informaci z magnetického pole ke směřování a kontrole jejich chování. Protože neexistuje spolehlivý způsob, jak testovat směrovou tendenci, spousta druhů schopných magnetického vnímání (Tab. 1) uniká naší pozornosti (Wiltschko a Wiltschko 1995). Nejvíce studovanou skupinou na odpověď k magnetickému poli jsou ptáci, kteří při migraci a homingu využívají inkliniční kompas (Wiltschko a Wiltschko 1996), stejně jako mořské želvy (Arens a Lohmann 2003), ale jen málo je známo o dalších obratlovcích (Wiltschko a Wiltschko 2005).

Chování závislé na magnetické odpovědi zahrnuje spoustu spontánních orientačních projevů, jako natáčení se, u ptáků nebo lososů, směrem sezónní migrace (heading), (Wiltschko a Wiltschko 2005), stavba hnízda u rypošů (Marhold et al. 1997; Burda et al. 1990; Lovegrove et al. 1992, Marhold et al. 2000) a zřejmě mnohé další. Schopnost magnetické orientace byla navržena také u lidí, koní a kytovců, ale nebyla u nich potvrzena (Wiltschko a Wiltschko 1995). Co se týče savců, nejvíce behaviorálních testů magnetické orientace bylo provedeno na hlodavcích (Deutschlander et al. 2003; Muheim 2006) a zdá se, že všichni savci mají stejný, na světle nezávislý, kompasový mechanismus (Thalau et al. 2006). Ale magnetický smysl nemusí být využit jen k prostorové orientaci a navigaci (Begall et al. 2008).

Tab. 1: Obratlovci se zjištěnou či předpokládanou schopností magnetorecepce

<b>Třída</b>	<b>Typ kompasu</b>	<b>Řád</b>
Chondrichthyes	?	Carcharhiniformes
		Myliobatiformes
Osteichthyes	polaritní	Osteoglossiformes
		Anguilliformes
		Cypriniformes
		Siluriformes
		Salmoniformes
		Gasterosteiformes
		Perciformes
Amphibia	inklinační	Anura
		Urodela
Reptilia	inklinační	Testudines
		Crocodylia
Aves	inklinační	Procellariiformes
		Charadriiformes
		Columbiformes
		Passeriformes
Mammalia	polaritní	Rodentia
		Perissodactyla
		Primates
		Cetacea
		Chiroptera
		Artiodactyla

Zdroj: Wiltschko a Wiltschko 1995, Wiltschko a Wiltschko 2006, Holland et al. 2006, Begall et al. 2008

## **1.4. Jiné než orientační projevy vnímání magnetického pole**

Kromě orientačních vodítek poskytuje magnetické pole i podněty ovlivňující behaviorální či fyziologické pochody u zvířat.

### **1.4.1. Magnetický alignment**

Jedním z dalších způsobů, jak využít magnetické pole, je magnetotaxe a magnetický alignment. Magnetotaxe je definována jako pohyb podél siločar magnetického pole. Alignment je postavení v pozici, která je odpovědí na podnět - v případě magnetického pole paralelně, antiparalelně či kolmo k siločarám. Oba typy chování představují jednoduchou odpověď na magnetické pole, především jeho inklinaci a intenzitu. Rozhodující rozdíl mezi alignmentem a kompasovou orientací je, že pro orientaci jsou všechny směry stejně důležité (Wiltschko a Wiltschko 1995).

Magnetotaktické chování je biologicky využitelné, jen pokud směr magnetického pole spolehlivě poskytuje informace, které mohou zvířata využít. Magnetotaktická bakterie využívá tohoto vztahu k návratu do anaerobního nebo na kyslík chudého prostředí (Wiltschko a Wiltschko 1995). Magnetická odpověď je u ní způsobena částicemi magnetitu uspořádanými do řetízků (Blakemore 1975).

U obratlovců byly dlouho ryby (karas a úhoř) jedinou skupinou obratlovců, u kterých byla zjištěna směrová preference (viz Begall et al. 2008), např. karas zlatý (*Carassius auratus*) orientuje osu svého těla převážně podél S-J nebo V-Z osy (Becker 1974). Úhoři říční (*Anguilla anguilla*), vykazují preferenci k S-J ose, ale tato směrová preference k magnetickému poli je závislá na sezónních změnách v chování úhořů (van Ginneken 2005). Další případ diskutovaný jako alignment byl pozorován u pstruha duhového (*Oncorhynchus mykiss*). Ryby preferovaly pozici směrem k magnetickému severu (Chew a Brown 1989 ve Wiltschko a Wiltschko 1995).

Dalšími obratlovci, jejichž odpověď na působení magnetického pole by se mohla interpretovat jako alignment, jsou čolci *Notophtalmus viridescens* (Schlegel 2007) a *Triturus alpestris* (Schlegel a Renner 2007). Čolci zřejmě užívají multisensorický orientační systém podobný tomu, jaký byl nalezen u ptáků (srovn. Diego-Rasilla et al. 2005). Behaviorální experimenty odhalily, že tyto migrující druhy využívají magnetických podnětů spolu s dalšími smyslovými systémy k orientaci a navigaci (Phillips et al. 2002).

Oba druhy se spontánně orientují podle siločar přírodního i vychýleného magnetického pole a jsou schopny udržovat tento směr i ve tmě. Behaviorální experimenty prokázaly, že všichni testovaní jedinci prokazatelně preferují magnetický směr blízký východo-západní ose, bez ohledu na okolní podmínky - bez světelných a zvukových podnětů (Schlegel 2007).



Domněnka, že magnetický alignment existuje, je potvrzena faktem, že zvířata reagují na změnu polarity pole. Schopnost natáčet se podle magnetického pole je interpretována jako magnetická kompasová reakce. Orientace založená na magnetickém poli Země může být užitečná při sezónních změnách směru migrace (Diego-Rasilla et al. 2005; Schlegel 2007). Pro zvířata obývajících jeskyně nebo žijících ve tmě, kde nejsou přítomny další podněty, může být schopnost vnímat a natáčet se podle magnetického pole rozhodující při prostorové orientaci (Schlegel a Renner 2007). Vrozená odpověď (Schlegel a Renner 2007) čolků na magnetické pole naznačuje, že magnetický kompas je dobře vyvinutý komponent orientačně-navigačního systému této skupiny (Diego-Rasilla et al. 2005).

Role magnetického pole v orientaci a navigaci byla potvrzena u mnohých zvířecích taxonů, včetně netopýrů (srovn. Holland et al. 2008). Netopýři využívají k orientaci, navigaci a lovu echolokaci, ale při migraci a homingu je nedostatečná. Jako létavá zvířata čelí mnohým problémům podobně jako ptáci (Holland 2007). U ptáků je však schopnost navigace vysvětlována mapovou a kompasovou teorií (Wiltschko a Wiltschko 2003), kdežto o navigačním mechanismu netopýrů se neví prakticky nic (Holland 2007). Kromě echolokace, čichových a zrakových podnětů využívají netopýři k orientaci i magnetické pole (Holland et al. 2006). Z pokusů s netopýřem *Nyctalus plancyi* (Wang et al. 2007) vyplynulo, že preferují při odpočinku zavěšení na severní straně a vnímají změnu polarity magnetického pole, což nasvědčuje, že využívají k orientaci polaritní kompas. Toto zjištění, že létaví savci využívají magnetický polaritní kompas, naznačuje, že schopnost detekovat osu magnetického pole Země je dostačující pro navigaci na dlouhé vzdálenosti a zvyšuje pravděpodobnost, že inklinální a polaritní kompas se vyvíjely nezávisle u ptáků a savců (srov. Wang et al. 2007).

Z porovnávání satelitních snímků, zálehů ve sněhu a přímého pozorování bylo zjištěno, že odpočívající a pasoucí se skot, srnci a jeleni směřují svou osu těla podél siločar zemského magnetického pole, tedy zhruba severo-jihním směrem. Díky využití snímků z Google Earth mohla být získána data týkající se alignmentu z různých lokalit na světě, v různých časech a za různých klimatických podmínek. U skotu a vysoké zvěře byla prokázána signifikantní odchylka od náhodné distribuce. Zvířata preferují přibližně severo-jihní směr tělní osy, přičemž magnetický sever je daleko významnější, než sever geografický. Mechanismus, který podporuje toto chování, zůstává neznámý (Begall et al. 2008).

Extrémně nízkofrekvenční magnetické pole vytvářené dráty vysokého napětí tento jev ruší. Na pastvách, kde bylo magnetické pole narušeno, tedy pod dráty vysokého napětí a blízko stožárů elektrického vedení, byla orientace osy těla zvířat náhodná. Distribuce orientace těla se prokazatelně liší mezi skotem pasoucím se pod dráty elektrického vedení vedoucími různým směrem. Vliv drátů se snižuje s rostoucí vzdáleností zvířat od nich. Pokud bylo elektrické vedení

vzdáleno více než 150 m od skotu a 50 m od vysoké zvěře, bylo rozmístění zvířat nenáhodné (Burda et al. 2009).

Mechanismus alignmentu není přesně objasněn, ale mohl by být založen na intenzitě pole. Alignment způsobují i další faktory, jako sluneční záření, směr větru, terénní podmínky, stádový instinkt a směr růstu rostlin. Ale o jeho funkčním využití se dá polemizovat: může pomoci synchronizovat směr pohybu celého stáda, čehož mohou zvířata využívat při efektivním pasení, koordinovaném útěku nebo antipredačním chování (Burda et al. 2009).

### 1.4.2. Stranding

Kytovci migrují mezi vyššími a nižšími zeměpisnými šířkami kvůli potravě, rození mláďat a podobně (viz Wiltschko a Wiltschko 1995). Spousta podnětů je ale zvířatům žijícím ve vodě nedostupná a i magnetický smysl se musel přizpůsobit těmto podmínkám (Walker et al. 1992). Oceánská kůra má jiný magnetický charakter než pevninská, je složena z dlouhých pásů magnetické výše a níže jdoucí podél středoocéánských hřbetů, vedoucích většinou severo-jižním směrem. Ovšem mezi nimi se vyskytují místa s amplitudou od několika set po tisíce nanotesla (nT) v závislosti na stáří, hloubce a šíři mořského dna (srovn. Kirschvink et al. 1986). Velryby následují magnetické izočáry (Klinowska 1985), nebo sledují magnetická minima (Kirschvink et al. 1986) a snaží se vyhnout strmým anomáliím. V moři je magnetické pole méně nepravidelné než na pevnině. Chyba v navigaci, způsobená např. nepravidelnostmi v denních variacích, může způsobit chybu navádějící velryby k pobřeží. Mechanismus, díky kterému kytovci získávají informace o magnetickém reliéfu pobřeží, není znám. Mořští živočichové využívají pohybu podél magnetických vrstevnic kvůli minimalizaci změn v celkové intenzitě, ale jen samotné sledování vyvýšenin a pohoří se jeví jako nedostatečné (srovn. Wiltschko a Wiltschko 1995). Stranding kytovců je tedy nejspíše způsoben závažnou chybou v orientačním systému závislejícím na magnetických parametrech. Ke strandingu dochází hlavně v místech s místním magnetickým minimem, které je přerušeno pobřežím nebo ostrovy, nebo 1 - 2 dny po magnetické bouři (Klinowska 1985). Už tak malé změny v intenzitě jako 50 nT stačí k ovlivnění navigace a najetí napobřeží (Kirschvink et al. 1986). Podobně u delfínů, *Delphinus delphis* (Hui 1994) nejsou podněty pro orientaci a navigaci zcela známy, ale mají jistou souvislost s magnetickými minimy a maximy (Kirschvink et al. 1986) a tato schopnost vnímat magnetické pole jim umožňuje dlouhé migrace.

### 1.4.3. Orientace v čase

Magnetické pole může částečně poskytovat časové údaje zejména zvířatům žijícím ve tmě (např. v noci, v podzemí, v jeskyních) a může mít tak vliv na orientaci v čase. Pravidelné denní

změny magnetického pole (viz kap. 1.1.) poskytují informaci o části dne, i když mohou být nepřesné kvůli nepravidelným fluktuacím a magnetickým bouřím. Experimenty provedené na ptácích a savcích odhalily ovlivnění denních rytmů manipulacemi s magnetickým polem. Při udržování experimentálního magnetického rytmu, si vrabci (*Passer domesticus*) stále uchovávali denní periodu i v naprosté tmě (Bliss a Heppner 1976 ve Wiltschko a Wiltschko 1995). Působení vyšší intenzity magnetického pole může zvýšit aktivitu některých zvířat během dne, jak poukázaly pokusy na křečcích zlatých (*Mesocricetus auratus*), (Brown a Scow 1978 ve Wiltschko a Wiltschko 1995) a pískomilech mongolských (*Meriones unguiculatus*), (Stutz 1971 ve Wiltschko a Wiltschko 1995).

#### **1.4.4. Produkce melatoninu a další**

Manipulace s magnetickým polem by podle některých výzkumů mohly mít vliv také na produkci melatoninu. Melatonin je hlavní sekreční produkt pineální žlázy. Jeho syntéza je řízena biologickými hodinami v suprachiasmatickém jádře a obvykle spojena s cirkadiánním vzorcem a maximální produkcí během noci. Působení světla v noci redukuje produkci melatoninu. Dráty elektrického vedení produkují elektrické a magnetické pole, kterému se souhrnně říká pole elektromagnetické. Celková síla pole ale závisí na aktuální intenzitě proudu ve vodiči a vzdálenosti od zdroje proudu. A právě působení tohoto pole může ovlivňovat mnohé fyziologické pochody u živočichů (rev. Fernie a Reynolds 2005).

Extrémně nízkofrekvenční magnetické pole by mohlo působit jako inhibitor noční produkce melatoninu u krys, křečků a myší, ale z pokusů provedených na myších nebyla prokázána snížená produkce melatoninu u zvířat vystavených magnetickému poli (srovn. Kumlin et al. 2005). Stejně tak se nepotvrdil vliv působení magnetického pole na pineální žlázy potkanů, ve kterých je melatonin sekretován (Tripp et al. 2003).

Působení magnetického pole na produkci melatoninu bylo zkoumáno také u ptáků, u nichž je pineální orgán důležitou součástí navigačních procesů. Melatonin je zapojen do regulace tělesné teploty, metabolismu, pohybové aktivity, trávicích procesů, migrací, páření a vývoje a růstu (srovn. Fernie et al. 1999). Z pokusů (Fernie et al. 1999) na poštolkách pestrých (*Falco sparverius*) vyplývá, že magnetické pole může ovlivnit množství melatoninu v krevní plazmě poštolky, ale vzájemně se liší podle délky trvání vystavení magnetickému poli a podle pohlaví (samci produkují větší množství).

Kromě produkce melatoninu má elektromagnetické pole u poštolek vliv také na jejich vyšší aktivitu (Fernie et al. 2000b), která ale nesouvisela s množstvím melatoninu (Fernie et al. 1999); velikostí vajec, která obsahovala více žloutku a dalších komponent, ale měla tenčí skořápku, růst embrya (Fernie et al. 2000a) a mláďat, ale nižší úspěšnost při odchovu (Fernie a Bird 2000).

U samců se elektromagnetické pole podílí na zvýšení velikosti těla a úspěšnosti přežití, nezávisle na příjmu potravy (Ferne a Bird 1999).

Výzkumy prováděné na kuřecích embryích prokázaly negativní vliv elektromagnetického pole. U embryí byla potvrzena větší úmrtnost, u kuřat snížení jejich váhy (Youbicier-Simo et al. 1997) a zvýšený výskyt morfologických abnormalit u vyvíjejících se zárodků (Farrell et al. 1997).

Přírodní magnetické pole může být u migrujících ptáků dobrým indikátorem k nutnému nabití zásob k tomu, aby mohli překonat velké geografické bariéry, jako jsou např. moře nebo poušť. Magnetické pole jim poskytuje přesnou a rozhodující informaci o jejich geografické pozici, i když nemůžeme s jistotou říci, jestli ukládání tukových zásob je přímou reakcí na magnetické pole určité oblasti, nebo záleží na zeměpisné šířce (Fransson et al. 2001).

Co se týče možných efektů elektromagnetického pole na další zvířata, ukázalo se, že u krav (stejně jako u ovcí, Lee et al. 1993) na produkci melatoninu vliv nemá, i když výsledky z různých studií jsou značně rozporuplné (Burchard et al. 1998). Stejně jako u produkce mléka, jejíž snížení nebylo potvrzeno u Burchard et al. (1996), ale bylo zaznamenáno později, kdy krávy po působení elektromagnetického pole produkovaly méně mléka, avšak měly větší spotřebu krmiva (Burchard et al. 2003). Jiné rozdíly mezi krávy v blízkosti elektrického vedení, např. ve váze, plodnosti, délce kojení, jiném chování, nebo mortalitě nebyly zaznamenány (Angell et al. 1990).

Výsledky jednotlivých studií produkce melatoninu se ale vzájemně velmi liší silou efektu i samotnými výsledky (John et al. 1998). Kromě produkce melatoninu má magnetické pole také vliv na další pochody probíhající v tělech organismů. Pokusy Roman a Tombarkiewicz (2009) ukazují, že nízkofrekvenční magnetické pole může ovlivňovat i funkci imunitního systému. Výzkum byl prováděn na potkanech kmene Wistar a z jejich slezin a brzlíků a peritoneálních buněk bylo zjišťováno ovlivnění funkce imunitního systému. Po vystavení slabému elektrickému poli došlo ke zvětšení brzlíků u samic a zvýšení počtu peritoneálních makrofágů u samců, ale jejich funkce, produkci radikálů  $O_2^-$  a NO (stejně tak u myší, Whissel a Persinger 2007), byla oslabena. Extrémně nízkofrekvenční magnetické pole pocházející hlavně z lidské činnosti má vliv také na cirkadiánní oscilaci glukózy a triglyceridů v krvi potkana kmene Sprague-Dawley v závislosti na čase a intenzitě magnetického pole (Contalbrigo et al. 2009).

Data ukazují, že přírodní nepoškozené geomagnetické pole je důležité pro normální vývoj a funkci organismů. Zemské pole je ale čím dál více ovlivňováno lidskou činností, např. radiovým vysíláním a telekomunikací. Tyto pochody mohou mít spojitost s produkcí melatoninu a dalšími pochody a jejich ovlivňováním magnetickým polem (Roman a Tombarkiewicz 2009).

U savců bylo nejvíce behaviorálních experimentů založeno na výzkumu homingu nebo naučeného směru. Spontánní a vrozené odpovědi na magnetické pole a jeho manipulace nebyly zatím studovány (Begall et al. 2008).

## **1.5. Cíle práce**

- zhotovit literární rešerši na téma projevy magnetorecepce obratlovců a soustředit se na behaviorální a fyziologické projevy u zvířat (ne lidí), nesouvisející přímo s navigací či kompasovou orientací v prostoru.
- zjistit, zda se u různých druhů savců vyskytuje magnetický alignment.

## **2. MATERIÁL A METODIKA**

Data byla shromažďována ve čtyřech zoologických zahradách v České Republice (Zoologická a botanická zahrada města Plzně, Zoologická zahrada Ostrava, Zoologická zahrada hl. města Prahy, Zoo Dvůr Králové). V každé zahradě jsem strávila čtyři dny pozorováním vybraných druhů zvířat. Druhy jsem vybírala podle přehlednosti výběhu a podle počtu jedinců ve skupině. Pozorování jsem prováděla tak, že jsem každou zahradu každý den třikrát prošla, a to ráno od 8 do 10 hodin, od 12 do 14 hodin a od 16 do 18 hodin. V zoologické zahradě v Praze jsem (z organizačně administrativních důvodů) začínala v 9, 12.30 a 16 hodin. U každého druhu jsem setrvala 15 – 20 minut pozorováním. Podle kompasu jsem zaznamenávala orientaci těla (podélnou tělní osu) jednotlivých zvířat. Pro určení orientace pozorovaného zvířete jsem proložila osu jeho těla tužkou a srovnala se směrem štelky kompasu. Polohu jsem zaznamenávala, jen pokud zvířata odpočívala a to vestoje nebo vleže, nebo při pasení. Při změně polohy zvířete jsem novou hodnotu nezaznamenávala. Pokud se zvířata zdržovala kolem žlabu nebo krmelce a krmila se, data nebyla shromažďována, mimo případů, když v jeho blízkosti odpočívala. Zvířata pobývala i v části výběhu, kam např. kvůli hustému porostu nebylo vidět, popřípadě v kotci či ve stáji, kam jsem neměla přístup. Také se velmi často pohybovala a nesetrvávala v odpočinkové poloze, nebo se zřetelně slunila. Tato data nejsou zahrnuta do statistiky. Pokud byla zvířata vyrušena (jiným zvířetem, návštěvníky, průjezdem zoovláčku apod.) a navrátila se do původní pozice, tyto informace jsem také zahrnula. Pro velkou aktivitu jedinců mohou data u některých zvířat za určitou část dne chybět. Jednotlivá zvířata jsem od sebe nerozlišovala a získané výsledky neprůměrovala. Výsledky jsem zpracovávala u každého druhu za celé čtyři dny dohromady, bez ohledu na to, od kterých jedinců v jaké časové době data pocházejí. Zaznamenávala jsem také následující faktory: směr větru (ale ne jeho rychlost) a pozici Slunce odhadem podle kompasu, teplotu jsem měřila běžným venkovním teploměrem; dále jsem zaznamenávala přibližný počet návštěvníků, který se v danou chvíli kolem výběhu pohyboval a charakteristiku výběhu (povahu terénu, směr sklonu svahu,

rozmístění zeleně, kotce a krmelce atd.). Získaná data o pozici zvířat jsem pak vyhodnotila metodou kruhové statistiky, použila jsem Rayleighův test k testování signifikantní odchylky od náhodné distribuce a k určení hlavního vektoru skupiny zvířat (Oriana 3, Kovach Computing).

V tabulce 2 jsou uvedeny vybrané druhy zvířat a jejich počet v jednotlivých zoologických zahradách a časové rozmezí, ve kterém jsem data sbírala.

Tab. 2: Počet pozorovaných zvířat v jednotlivých zoologických zahradách

<b>Zoologická zahrada</b>	<b>Zoo Plzeň</b>	<b>Zoo Ostrava</b>	<b>Zoo Praha</b>	<b>Zoo Dv. Králové</b>	<b>Celkem zvířat</b>
<b>Pozorovaný druh</b>	13.-16.8.09	2.-5.9.09	7.-10.9.09	12.-15.9.09	
<b>Žirafa Rothschildova</b> ( <i>Giraffa camelopardalis rothschildi</i> )	-	5	14	10	29
<b>Zebra Grévyho</b> ( <i>Equus grevyi</i> )	-	4	-	21	25
<b>Velbloud dvouhrbý</b> ( <i>Camelus ferus f. bactrianus</i> )	-	9	9	-	18
<b>Adax nubijský</b> ( <i>Addax nasomaculatus</i> )	-	-	5	11	16
<b>Voduška červená</b> ( <i>Kobus leche</i> )	9	-	6	-	15
<b>Kapybara</b> ( <i>Hydrochoerus hydrochaeris</i> )	5	-	7	-	12
<b>Vlk evropský</b> ( <i>Canis lupus</i> )	5	-	6	-	11
<b>Irbis horský</b> ( <i>Uncia uncia</i> )	4	2	-	-	6
<b>Jelen sika</b> ( <i>Cervus nippon</i> )	-	10	-	-	10
<b>Klokan rudý</b> ( <i>Macropus rufus</i> )	9	-	-	-	9
<b>Klokan rudokrký</b> ( <i>Macropus rufogriseus</i> )	-	9	-	-	9
<b>Lama krotká</b> ( <i>Lama guanicoe f. glama</i> )	-	7	-	-	7
<b>Medvěd hnědý</b> ( <i>Ursus arctos</i> )	4	-	-	-	4

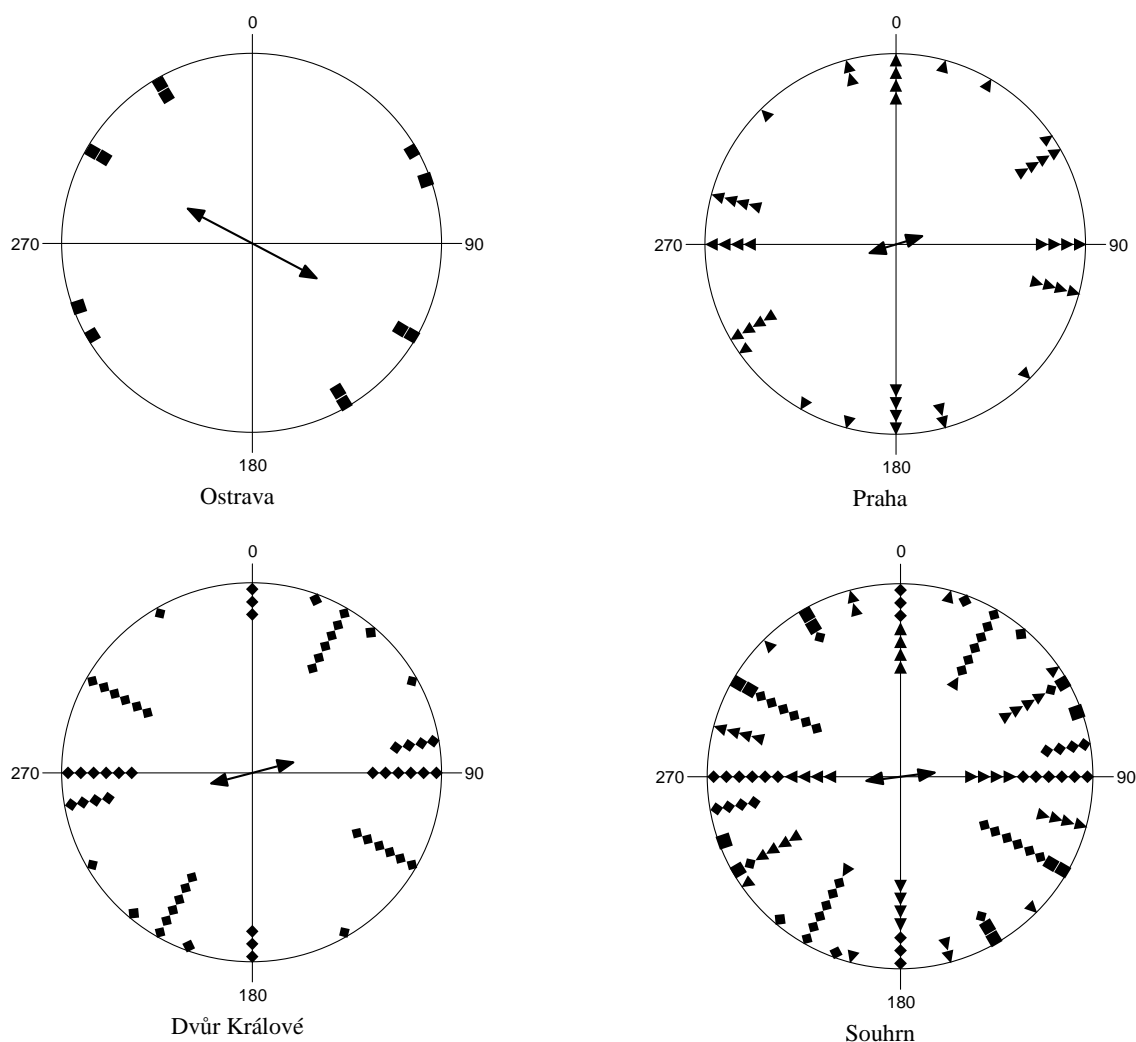
### 3. VÝSLEDKY

Po zvážení sledovaných faktorů jsem zjistila, že se po ránu některá zvířata zřetelně slunila (např. adaxové v Praze a kapybary v Plzni) a tato data jsem nezahrnula do analýzy. Natáčení zvířat podle směru větru jsem nezaznamenala, po dobu pozorování nemusela být rychlost větru dostatečná k ovlivnění směru pozice zvířat. Pokud přšelo (viz níže), zvířata se schovala, nebo déšť ignorovala. Při nižší teplotě byla zvířata většinou méně aktivní a upřednostňovala pobyt v kotci, kde jsem je buď neměla možnost sledovat, nebo se věnovala krmení. Podmínky počasí byly při většině pozorování podobné. Odpolední teploty se pohybovaly mezi 20-25°C, bylo převážně jasno nebo polojasno, vál maximálně mírný vítr a přšelo pouze v období sledování v zoo Ostrava. Zvířata k odpočinku vyhledávala především rovné plochy ve výběhu, které však byly omezeny jeho charakterem, podle situace počasí pobývala na volném prostranství, ve stínu, nebo pod přístřeškem.

### 3.1. Výsledky pozorování u jednotlivých skupin zvířat

#### Žirafa Rothschildova (*Giraffa camelopardalis rothschildi*)

Ani v jedné zoologické zahradě nebyla prokázána odchylka od náhodné distribuce (Obr. 5), Ostrava ( $p = 0,423$ ;  $r = 0,388$ ;  $n = 6$ ;  $119^\circ$ ); Praha ( $p = 0,627$ ;  $r = 0,147$ ;  $n = 22$ ;  $73^\circ$ ); Dvůr Králové ( $p = 0,230$ ;  $r = 0,226$ ;  $n = 29$ ;  $76^\circ$ ). Po souhrnném vyhodnocení dat se také neprokázala odchylka od náhodné distribuce ( $p = 0,162$ ;  $r = 0,179$ ;  $n = 57$ , směr hlavního vektoru:  $82^\circ$ ).

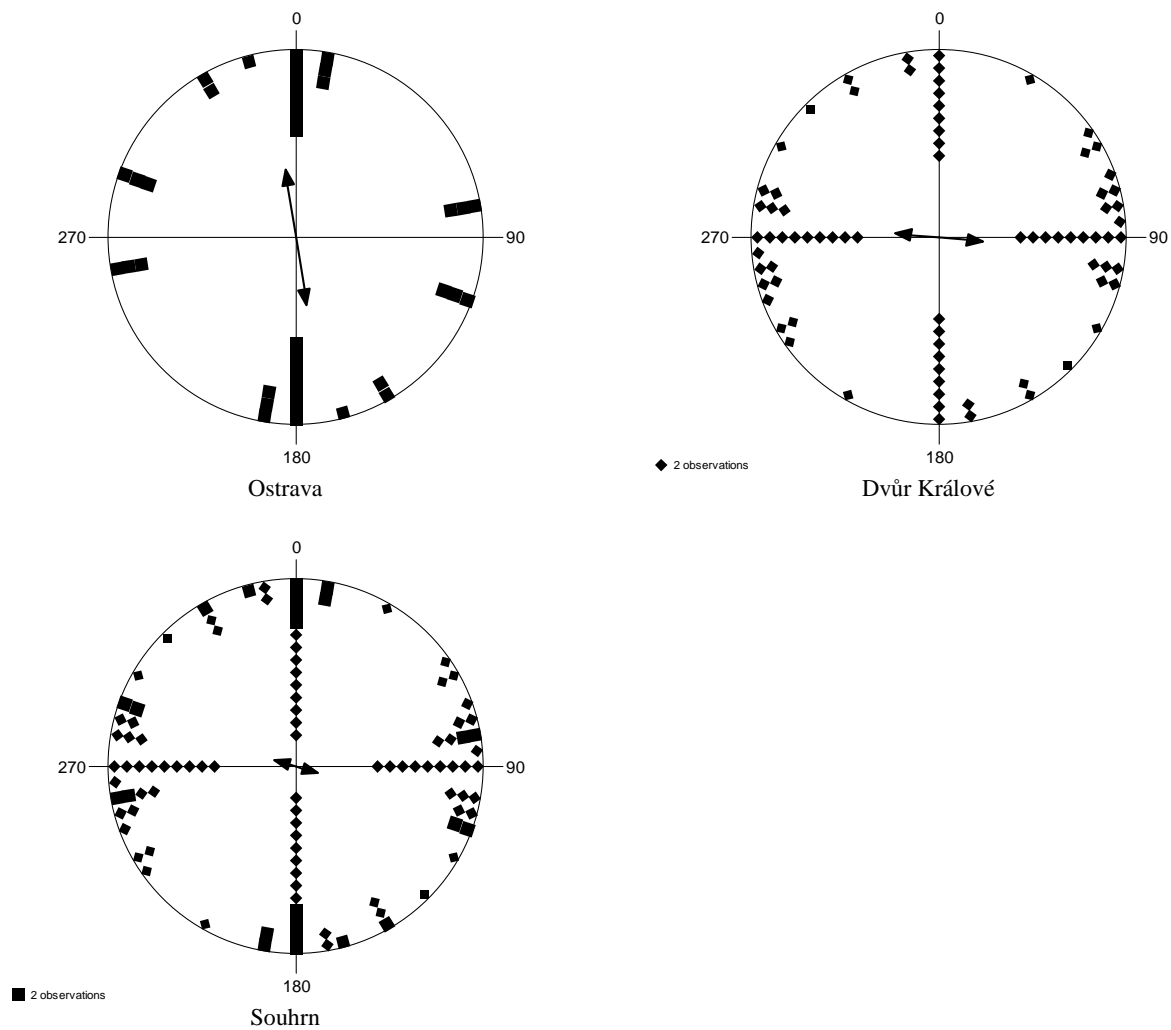


Obr. 5: Směr orientace postavení žirafy Rothschildovy ve třech zoologických zahradách a souhrnná data.



Zebra Grévyho (*Equus grevyi*)

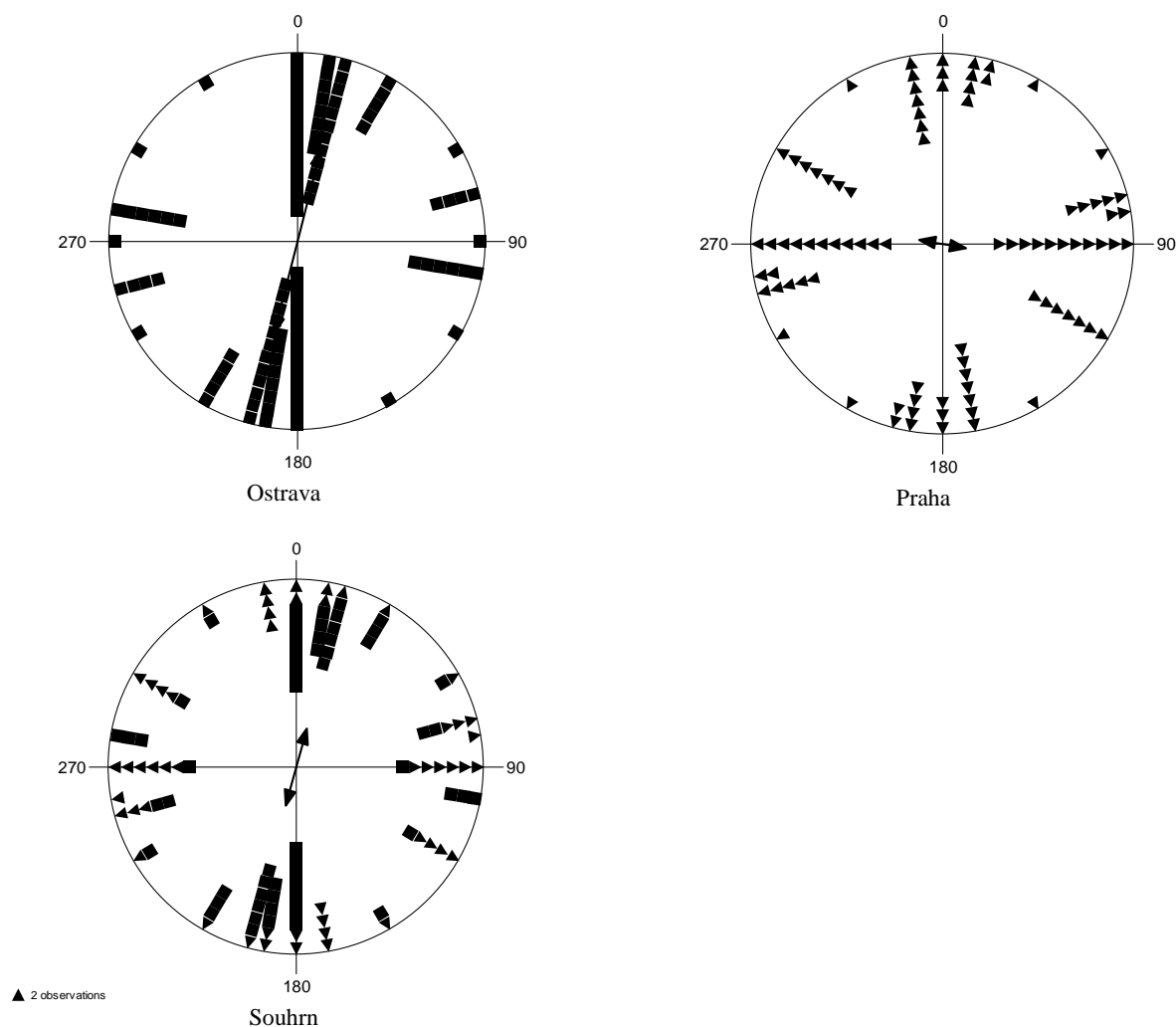
Zebry (Obr. 6) vykazovaly preferenci k určitému směru jen ve Dvoře Králové, kde  $p = 0,023$ ;  $r = 0,234$ ;  $n = 69$ , hlavní vektor  $96^\circ$ , postavení zeber ponejvíce podél hlavních os; v Ostravě  $p = 0,080$ ;  $r = 0,363$ ;  $n = 19$ ;  $171^\circ$ . Po vyhodnocení obou zahrad dohromady se neprojevila směrová preference zvířat ( $p = 0,272$ ;  $r = 0,122$ ;  $n = 88$ , směr hlavního vektoru:  $105^\circ$ ).



Obr. 6: Orientace tělní osy u zeber Grévyho v zoologické zahradě v Ostravě, Dvoře Králové a souhrnný graf.

Velbloud dvouhrbý (*Camelus ferus f. bactrianus*)

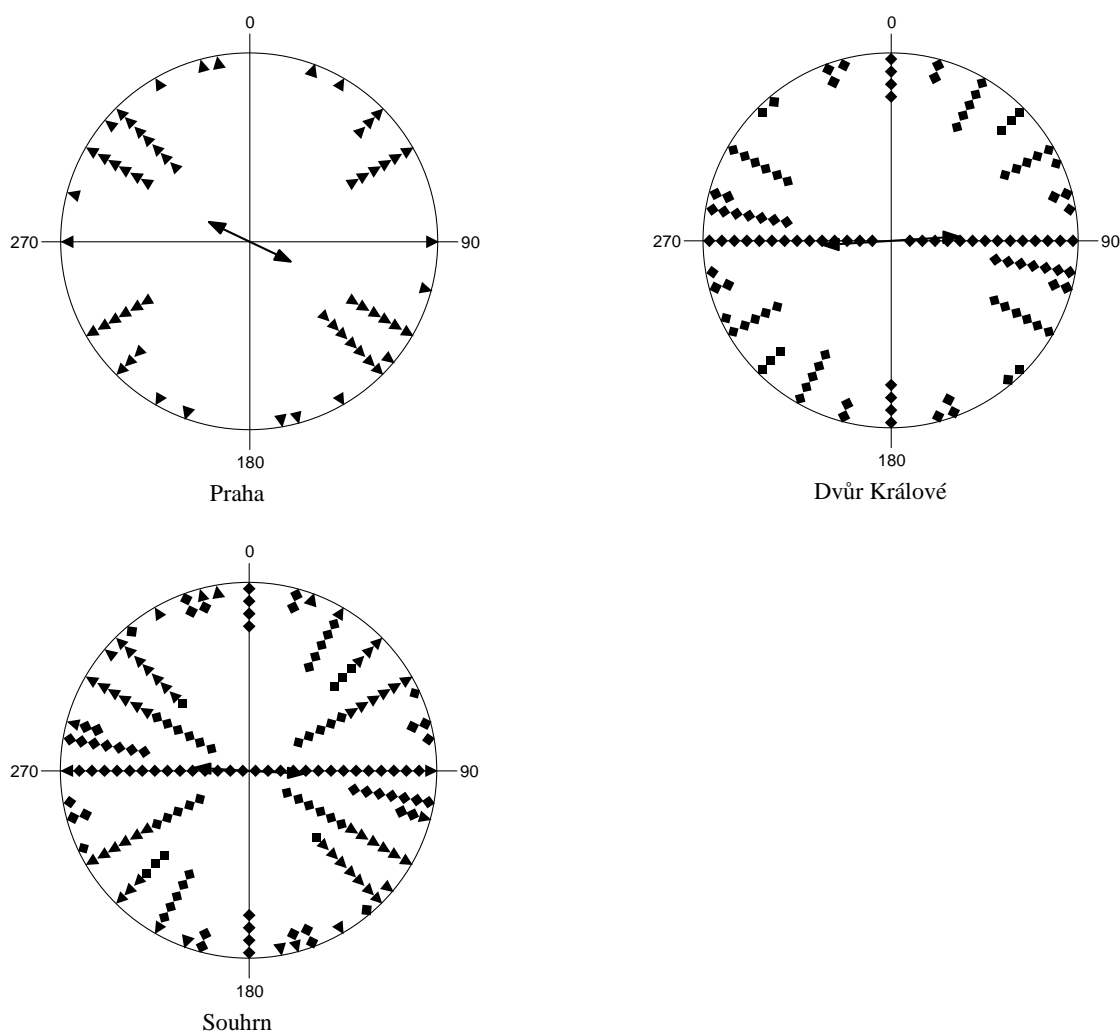
Zvířata v ostravské zoologické zahradě se přesvědčivě stavěla podél osy zhruba severo-j jižního směru,  $p < 0,00001$ ;  $r = 0,497$ ;  $n = 52$ , směr hlavního vektoru:  $14^\circ$ . V Praze byla jejich pozice náhodná:  $p = 0,502$ ;  $r = 0,126$ ;  $n = 44$ , hlavní vektor  $101^\circ$ . Analýza dat z obou zahrad prokázala odchylku od náhodné distribuce zvířat přibližně podél severo-j jižní osy ( $15^\circ$ ),  $p = 0,013$ ;  $r = 0,212$ ;  $n = 96$ . Grafy viz Obr. 7.



Obr. 7: Grafy směrové preference velblouda dvouhrbého v zoologických zahradách v Ostravě, Praze a souhrnný graf.

Adax núbijský (*Addax nasomaculatus*)

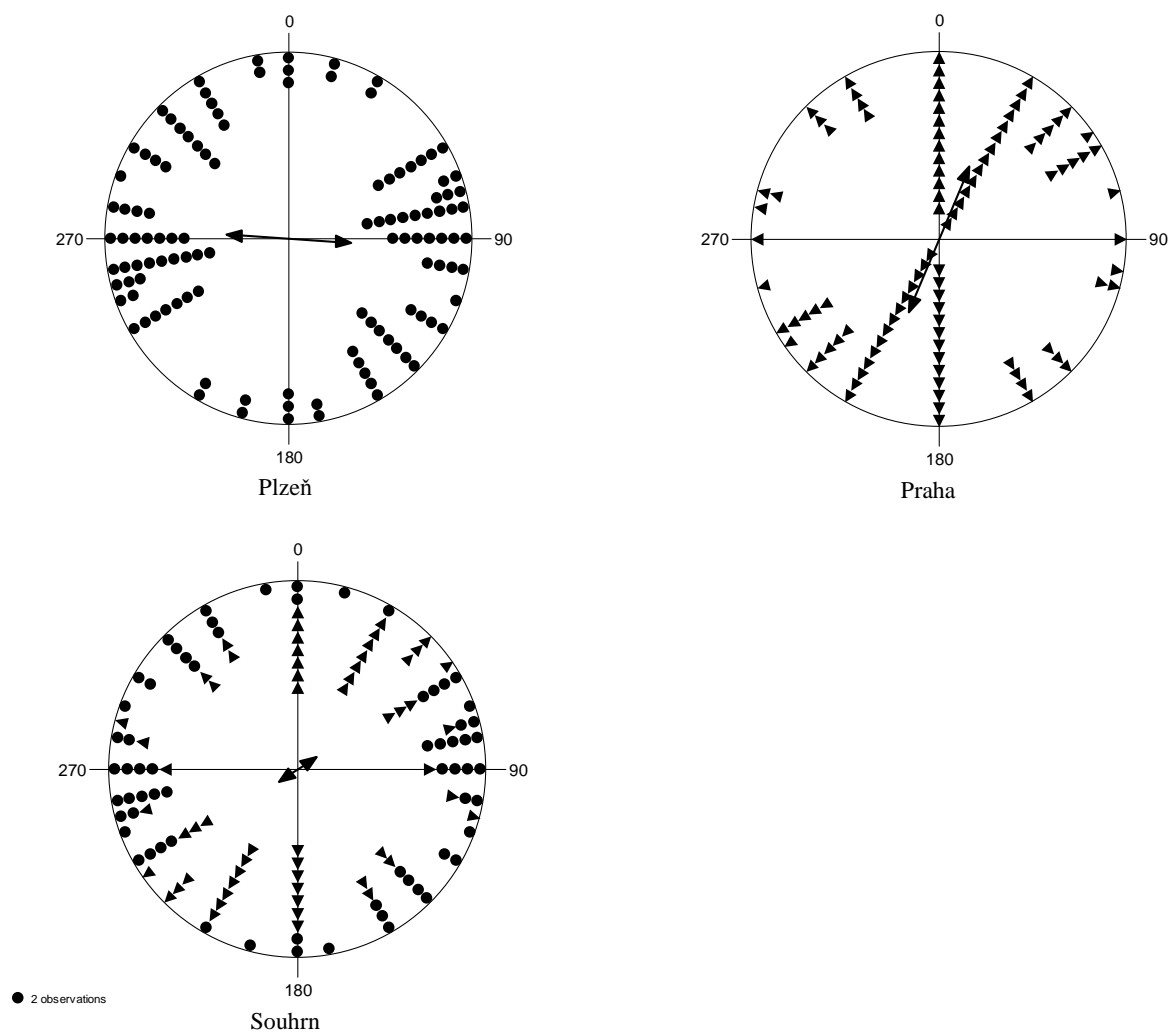
Adaxové (Obr. 8) v zoologické zahradě v Praze vykazovali náhodnou distribuci,  $p = 0,176$ ;  $r = 0,241$ ;  $n = 30$ , hlavní směr  $116^\circ$ . Ve Dvoře Královém bylo jejich postavení podél východozápadní osy přesvědčivé,  $p = 0,000645$ ;  $r = 0,359$ ;  $n = 57$  a směr  $87^\circ$ . Celkově preferovaný směr tělní osy adaxů byl  $94^\circ$ ,  $p = 0,000757$ ;  $r = 0,287$ ;  $n = 87$ .



Obr. 8: Orientace tělní osy adaxů núbijských v pražské a královédvorské zoologické zahradě a souhrnný graf všech zvířat.

### Voduška červená (*Kobus leche*)

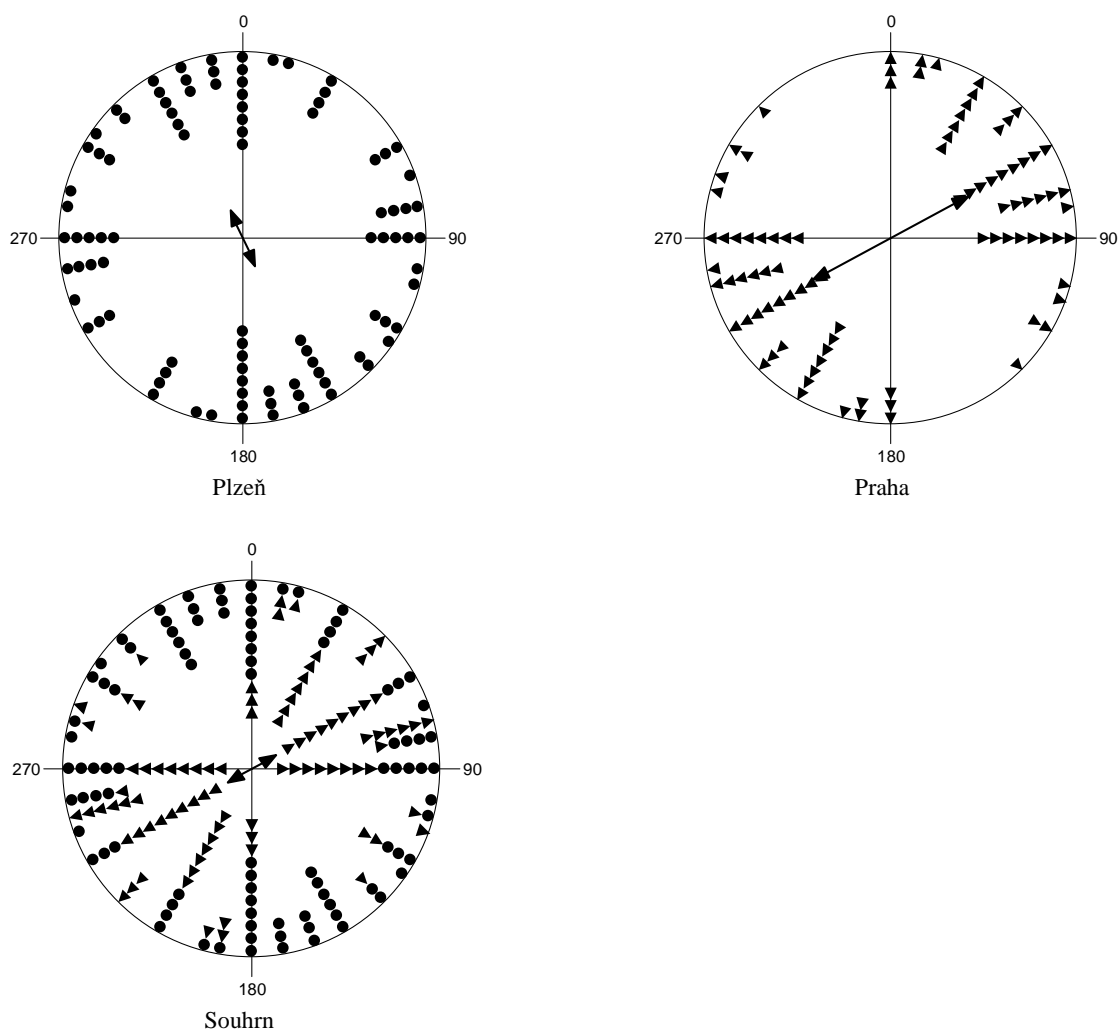
Zvířata v Plzni vykázala odchylku od náhodné distribuce,  $p = 0,001$ ;  $r = 0,340$ ;  $n = 58$ ; hlavní vektor směřoval k  $94^\circ$ . V Praze byla jejich odchylka od nenáhodné distribuce také přesvědčivá  $p = 0,000417$ ;  $r = 0,420$ ;  $n = 50$ , ale jejich směr byl ponejvíce  $23^\circ$ . Po vyhodnocení dat z obou zahrad  $p = 0,2$ ;  $r = 0,122$ ;  $n = 108$ , směr hlavního vektoru  $56^\circ$ . Grafy viz Obr. 9.



Obr. 9: Grafy preferované pozice těla vodušky červené v zoologické zahradě v Plzni a v Praze a souhrnný graf.

Kapybara (*Hydrochoerus hydrochaeris*)

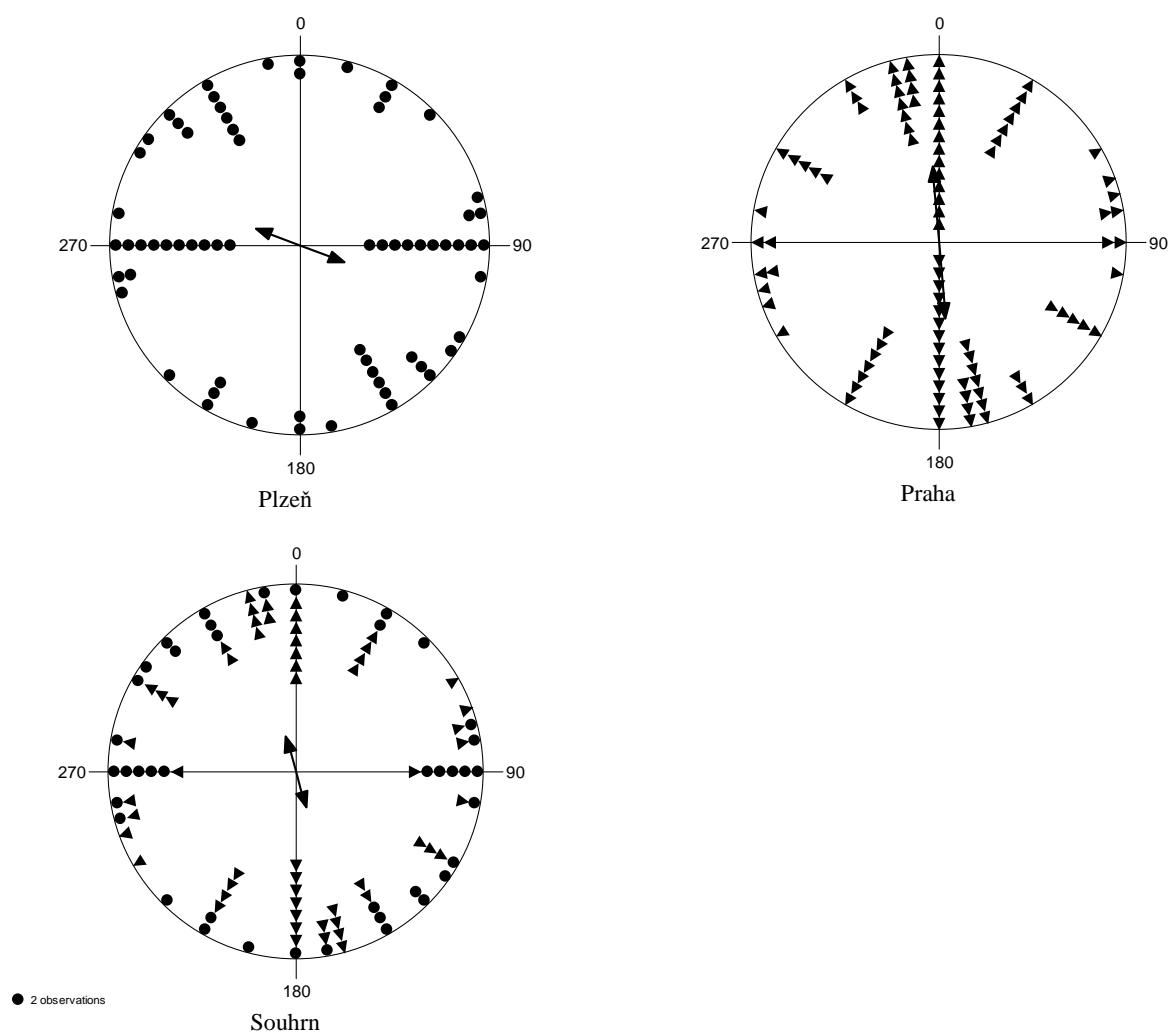
Z vyhodnocení z jednotlivých zahrad se pro Plzeň neprokázala přesvědčivá odchylka od náhodné distribuce ( $p = 0,286$ ;  $r = 0,164$ ;  $n = 47$ , směr hlavního vektoru  $157^\circ$ ), v Praze naopak prokázána byla, a to  $p = 0,0000266$ ;  $r = 0,472$ ;  $n = 45$ , hlavní vektor  $62^\circ$ . Pokud jsem data z obou zahrad zanalyzovala dohromady, neprokázala se směrová preference zvířat ( $p = 0,131$ ;  $r = 0,149$ ;  $n = 92$ , směr hlavního vektoru:  $60^\circ$ ). Grafy jsou uvedeny v Obr. 10.



Obr. 10: Orientace tělní osy kapybar ze zoologické zahrady v Plzni a v Praze a jejich souhrnný graf.

### Vlk evropský (*Canis lupus*)

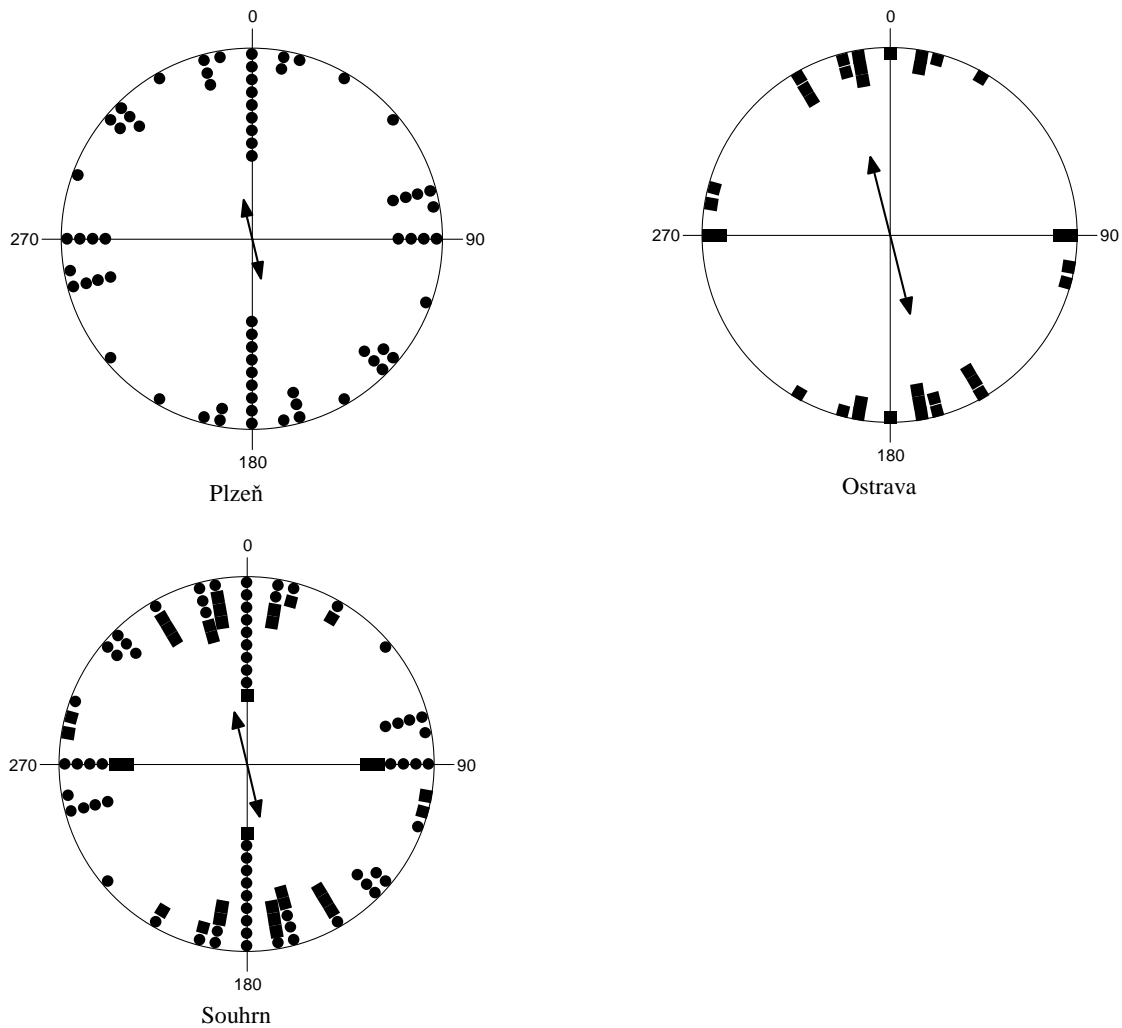
Skupina vlků chovaných v zoologické zahradě v Plzni nevykazovala preferenci k určitému směru,  $p = 0,128$ ;  $r = 0,250$ ;  $n = 33$ , směr hlavního vektoru:  $111^\circ$ , zato v Pražské zoologické zahradě se nápadně orientovali podle severo-j jižní osy:  $p = 0,00024$ ;  $r = 0,410$ ;  $n = 48$ , směr hlavního vektoru:  $176^\circ$ . Data získaná z obou skupin vlků (Obr. 11) prokázala odchylku od náhodné distribuce ( $p = 0,046$ ;  $r = 0,195$ ;  $n = 81$ , směr hlavního vektoru:  $163^\circ$ ).



Obr. 11: Grafy směrové preference vlků evropských při odpočinku v zoologických zahradách v Plzni a v Praze a souhrnný graf.

Irbis horský (*Uncia uncia*)

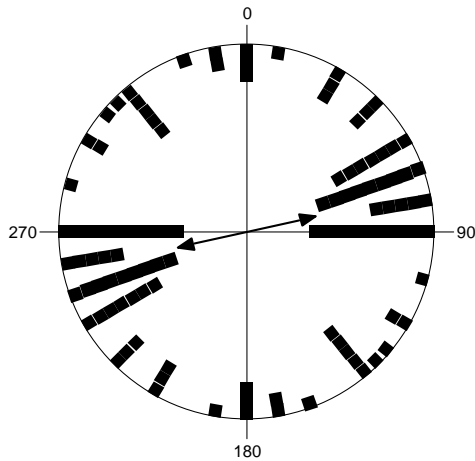
U zvířat v Plzeňské zoo se nepotvrdila odchylka od náhodné distribuce (Obr. 12), Plzeň:  $p = 0,217$ ;  $r = 0,212$ ;  $n = 34$ , hlavní vektor:  $168^\circ$ ; kdežto v zoo Ostrava:  $p = 0,04$ ;  $r = 0,431$ ;  $n = 17$ ;  $166^\circ$ . Souhrnná data prokázala odchylku od náhodné distribuce,  $p = 0,016$ ;  $r = 0,285$ ;  $n = 51$ , směr hlavního vektoru:  $167^\circ$ .



Obr. 12: Preferovaná orientace tělní osy u irbisů sledovaných v zoologické zahradě v Plzni a v Ostravě a souhrnný graf dat.

### Jelen sika (*Cervus nippon*)

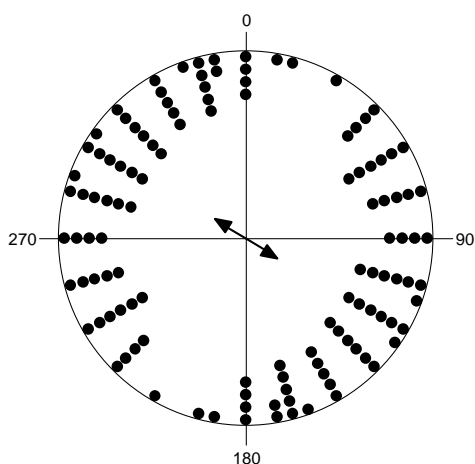
Jeleni sika chovaní v Ostravské zoologické zahradě (viz Obr. 13) se orientovali zhruba podle východo-západní osy,  $p = 0,000486$ ;  $r = 0,376$ ;  $n = 54$ , směr hlavního vektoru:  $77^\circ$ .



Obr. 13: Graf směrové preference jelenů sika v ostravské zoologické zahradě.

### Klokan rudý (*Macropus rufus*)

Skupina klokanů rudých v plzeňské zoo nevykazovala odchylku od náhodné distribuce (Obr. 14),  $p = 0,102$ ;  $r = 0,197$ ;  $n = 59$ ;  $123^\circ$ .

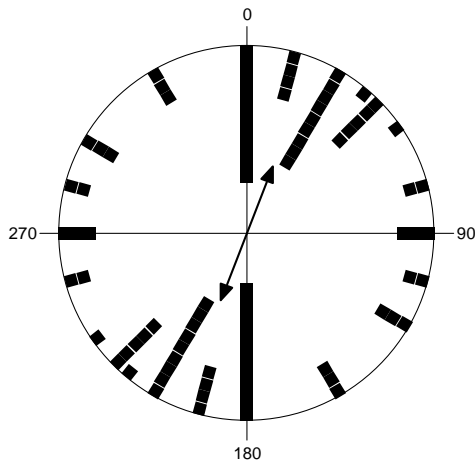


Obr. 14: Graf orientace tělní osy u klokanů rudých v zoologické zahradě v Plzni.



Klokan rudokrký (*Macropus rufogriseus*)

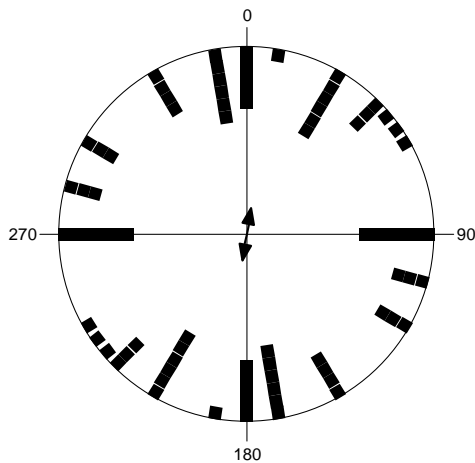
Klokani rudokrcí se v zoo Ostrava směrovali přibližně podle severo-jihní osy (viz Obr. 15), a to  $22^\circ$ ,  $p = 0,001$ ;  $r = 0,384$ ;  $n = 44$ .



Obr. 15: Preferovaná orientace tělní osy u klokanů rudokrkých v zoologické zahradě v Ostravě.

Lama krotká (*Lama guanicoe f. glama*)

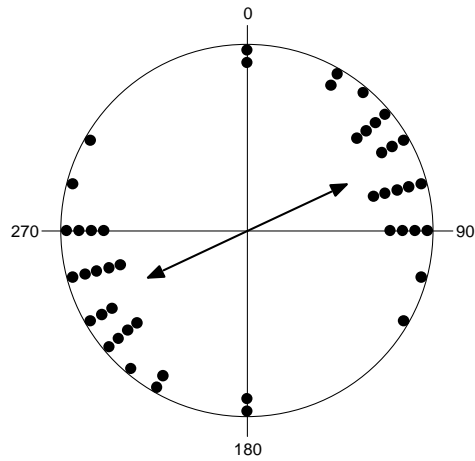
Lamy chované v ostravské zoologické zahradě neprokázaly odchylku od náhodné distribuce (Obr. 16),  $p = 0,443$ ;  $r = 0,143$ ;  $n = 40$ ; směr hlavního vektoru:  $9^\circ$ .



Obr. 16: Orientace tělních os lamy krotké v zoologické zahradě v Ostravě.

Medvěd hnědý (*Ursus arctos*)

Medvědi v zoo Plzeň (viz Obr. 17) se natáčeli přibližně podél 65°,  $p = 0,000175$ ;  $r = 0,590$ ;  $n = 23$ .



Obr. 17: Graf směrové preference medvědů hnědých v plzeňské zoologické zahradě.

## 4. DISKUZE

Ve své práci jsem se snažila obsáhnout co nejširší výběr zvířecích druhů, pokud byl ale určitý druh chován ve více zahradách, využila jsem příležitosti srovnat jednotlivé skupiny. Druhy jsem vybírala s ohledem na počet chovaných zvířat ve skupině a na jejich aktivitu (snahou bylo vybírat větší skupiny méně aktivních zvířat), což se mi ale ne vždy podařilo (např. v případě žiraf, kde byla zvířata povětšinou v pohybu). Také jsem zvažovala architekturu výběhu, aby bylo možné zvířata pozorovat z co nejmenší vzdálenosti, nebo aby nebyla ukryta např. za stromy, kameny, nebo v kotci, čemuž se ale také nedalo vyhnout. Jelikož byla data sbírána v zoologických zahradách, zvířata byla na přítomnost návštěvníků habituována, ale někdy reagovala na jejich přílišný zájem. Některá zvířata se snažila držet ve větší vzdálenosti od okraje výběhu (např. vodušky), zebry projevovaly zvědavost, vlci agresivitu.

Souhrnné grafy jsou pouze orientační, data z jednotlivých zahrad jsem zpracovala do jednoho grafu bez ohledu na množství získaných dat.

### **4.1. Vyhodnocení výsledků**

Zoologické zahrady vystavují širokou škálu druhů, u kterých by se dal magnetický alignment zkoumat. Bohužel na rozdíl od pastvin (Begall et al. 2008) se zde vyskytuje více podnětů, které toto chování mohou ovlivnit, jako např. přítomnost lidí, charakter výběhu, umístění překážek (stromy, klády, krmení), přítomnost dalších druhů, omezený prostor, atd. Po srovnání výsledků u stejných druhů chovaných v různých zoologických zahradách i ze samotného pozorování jsem došla k závěru, že v tomto případě nejpodstatněji orientaci tělní osy ovlivňuje povaha a směr sklonu výběhu. Např. zebry, které obývaly ve Dvoře Králové a v Ostravě architektonicky velmi rozdílné výběhy se pak stavěly opačnými směry. V ostravské zoo se výběh směrem na východ svažoval a zvířata se pohybovala ponejvíce podél západní stěny výběhu, kde bylo rovné prostranství. Proto zebry mohly upřednostňovat postavení severo-jížním směrem. Ve Dvoře Králové obývaly výběh na rovině. Preference dvou hlavních os mohla být dána postavením zdí výběhu, které směřovaly S-J a V-Z směrem. Charakter výběhu mohl mít vliv také na postavení velbloudů dvouhřbých v ostravské zoologické zahradě, kde dávali přednost odpočinku podél klády umístěné ve výběhu kolmo ke sklonu kopce. Také vlci byli ovlivněni sklonem svahu ve svých výbězích, ve zmíněných zoologických zahradách byl směr sklonu opačný a podle toho

mohli vlci upřednostňovat danou polohu. Rozmístění vodušek mohlo být ovlivněno terasovitým uspořádáním výběhu v zoo v Plzni, kde se orientovaly kolmo ke sklonu svahu, oproti rozlehlému a relativně rovnému výběhu v Praze. Charakter výběhů irbisů se v plzeňské a ostravské zoo značně lišil. I když v obou zoologických zahradách, zdá se, preferují stejný směr, mohli být v obou případech limitováni volným prostorem ve výběžích. Mírný sklon svahu od severu k jihu může ovlivnit i postavení jelenů sika v zoo Ostrava. Medvědi v plzeňské a kapybary v pražské zoo byli zjevně ovlivněni stěnami výběhu, podél kterých si lehali. Adaxové núbijští ve Dvoře Králové odpočívali na rovném prostranství, jejich preference východo-západní osy by mohla být považována za alignment. V pražské zoo toto postavení mohlo být ovlivněno sklonem svahu výběhu. Lamy v ostravské zoo se ponejvíce zdržovaly v blízkosti krmelce a přilehlého přístřešku, snažily se být co nejvíce kolem něj a tím mohla být eliminována směrová preference.

Díky velké aktivitě jsem u některých zvířat, například žiraf, nezaznamenala přesvědčivou směrovou preferenci. Zvířata se pohybovala nejvíce v blízkosti košů se senem a krmila se. Aktivními zvířaty byli také klokani rudokrcí v zoologické zahradě v Ostravě, mírný sklon svahu severo-jihním směrem, který také upřednostňovali při své orientaci, na ně neměl výrazný vliv. Za deště se ale schovávali pod kládu vedoucí tímto směrem.

Vliv pozice slunce jsem pozorovala hlavně po ránu, např. u obou skupin zeber, nebo u kapybar v zoo Plzeň a adaxů v zoo Praha, hlavně po chladnějších nocích. Žirafy se vystavovaly slunci spíše v odpoledních hodinách a alespoň při slunění udržovaly stabilnější polohu. Postavení přímo se slunících zvířat jsem nezahrnovala do statistiky, ale slunce jistě mohlo ovlivňovat pozici zvířat. Velbloudi se před přímým sluncem snažili ukrýt do stínu, to mělo hlavní vliv na skupinu chovanou v pražské zoo, kde při slunečných dnech byl stín většinou jen ve východním rohu výběhu. Díky tomu mohly být výsledky ovlivněny, protože velbloudi tak preferovali natáčet se do prostoru výběhu, tedy V-Z směrem. V obou zoologických zahradách se zvířata zdržovala ve skupinách, ve kterých bylo špatně rozeznat počet jedinců. Stín za teplého a slunečného počasí vyhledávaly také vodušky v plzeňské zoo a adaxové v Praze.

Některá zvířata reagovala na přítomnost návštěvníků, a to buď nepřímo, jako např. vodušky a vlci, kteří se pohybovali spíše ve vzdálenějších částech výběhů nebo za keři; zebry často zvýšily svoji pozornost nebo projevíly zvědavost a to hlavně v zoo ve Dvoře Králové. Zájem o návštěvníky jeví i jeleni sika v ostravské zoo, kteří od nich očekávali krmení. Vlci, medvědi nebo irbisové se chovali při přílišném zájmu návštěvníků podrážděně. Naopak například adaxové nebo oba druhy klokanů byli k návštěvníkům a dalším (z mého hlediska rušivým) okolním podnětům naprosto neteční.

Při dešti (přelo pouze při pozorování v zoo Ostrava) nebo nižších ranních teplotách některá zvířata, jako např. žirafy, kapybary, lamy, nebo irbisové, preferovala pobyt v ubikaci, kde se většinou krmila nebo nebyla vidět. Omezenou možnost pozorování zvířat jsem měla ve většině případů také kvůli povaze terénu jednotlivých výběhů (velbloudi v zoo Ostrava, klokani v zoo Plzeň), kvůli množství zeleně ve výběhu (vodušky červené v Plzni, vlci v obou navštívených zahradách, nebo přílišné vzdálenosti zvířat (vodušky v zoo Praha).

Vliv působení větru na alignment zvířat nemohu posoudit, během pozorování bylo bezvětří nebo vál jen mírný vítr. Odhadovala jsem ale pouze jeho směr, přesnou rychlost jsem neměřila.

Ve své práci jsem se snažila posbírat empirická data o alignmentu u různých druhů savců a zjistit, zda alignment odpovídá magnetické polaritě Země. Magnetický alignment je u zvířat se schopností magnetorecepce spontánní odpovědí na působení magnetického pole, která se projevuje především u odpočívajících zvířat a když orientace jejich těla není ovlivněna jinými faktory (Wiltschko a Wiltschko 1995). První zmínku o tomto jevu u savců přinesl článek Begall et al. (2008). Na rozdíl od jejich výzkumu jsem neměla možnost sledovat zvířata shora a v nehybné poloze, což by jistě umožnilo získat přesnější výsledky. Pro množství stromů nebo nízké rozlišení nelze sledovat zvířata v zoologických zahradách prostřednictvím Google Earth. Také zkoumaná velikost vzorku je značně omezená na rozdíl od studie Begall et al. (2008), kdy skot upřednostňoval signifikantní nenáhodnou orientaci těla zhruba S-J směrem. Z přímých sledování ale můžeme získat aktuální informace o počasí, aktivitě zvířat a dalších ovlivňujících jevech. Na nepřesnosti výsledků se může podílet vzdálenost od zvířat, ovlivnění hranicemi výběhu, reakce zvířat na přítomnost návštěvníků. Blízkost a sociální interakce s lidmi vyvolávají u mnoha druhů stres a ovlivňují tak chování těchto zvířat (Fernandez et al. 2009). Faktory, jako přítomnost návštěvníků, jejich počet, aktivita a pozice jsou spojeny se změnou v chování zvířat. Obvykle jsou tyto změny hodnoceny jako negativní (nežádoucí), pozitivní (obohacující), nebo bez zjevného efektu (Davey 2007). Mohou se projevit sníženou nebo naopak zvýšenou aktivitou zvířat, kdy se zvířata snaží zvýšit vzdálenost od návštěvníků nebo se pokouší utéct (viz Fernandez et al. 2009). Návštěvníci mohou sloužit také jako obohacující a měnící se prvek prostředí (viz Davey 2007). Do jaké míry jsou návštěvníci pro zvířata stresovým faktorem, záleží na temperamentu druhu nebo jedince a na chování návštěvníků při setkání se zvířetem (viz Fernandez et al. 2009). Jistě i stálá péče a návyk zvířat na pravidelný přísun potravy může ovlivnit jejich chování, mohou se projevit neklidem nebo očekáváním příchodu ošetřovatele z určitého směru. Také přítomnost rozličných sensorických podnětů ve volné

přírodě a jejich absence a stálost v zajetí může měnit chování zvířat (Wells 2009).

Z odlišných výsledků pozorování u stejných druhů v různých zoologických zahradách vyplývá, že směrová preference k magnetickému poli může být lehce ovlivněna rozdílnými podmínkami prostředí. Na rozdíl od Burda et al. (2009) nemohu u těchto pozorování vyloučit vliv větru, sklonu svahu nebo slunce. Svět slunce může ovlivnit alignment z různých důvodů a to např. kvůli termoregulaci, slunečnímu kompasu nebo se zvířata mohou vyhýbat oslnění (viz Begall et al. 2008), přičemž tato možnost je ale u býložravců, vzhledem k jejich laterálnímu postavení očí a velkému zornému poli, zřejmě přeceňována. Vzhledem k městské poloze zoologických zahrad by na zvířata mohlo ve zvýšené míře působit i elektromagnetické pole elektrického vedení. Magnetické pole by mohlo být ovlivněno i ohradníky železobetonovými a železnými složkami ve výběhu. Extrémně nízkofrekvenční magnetické pole vytvářené dráty elektrického vedení ruší alignment u zvířat (Burda et al. 2009).

Jistě by bylo dobré provést přesnější měření faktorů, které mají na alignment vliv a sledovat zvířata i po ukončení otevírací doby zoologických zahrad.

Bylo by užitečné pozorování zopakovat, hlavně ta, u kterých vyšly přesvědčivé výsledky v různých zoologických zahradách, nebo kde se dá předpokládat malý vliv charakteru výběhu. Více přirozené výběhy umožňují zvířatům chovat se více přirozeně (Davey 2007). Při budoucích pozorování v zoologických zahradách by bylo lepší zaměřit se pouze na zvířata, která obývají přehledný výběh na rovině, rozlišovat od sebe jedince, mláďata a dospělé a porovnat jejich chování, provádět pozorování mimo otevírací dobu zoologických zahrad při podmínkách co nejméně ovlivňujících jejich chování a lépe měřit a hodnotit faktory, které toto chování mohou ovlivnit. O mechanismu alignmentu můžeme pouze polemizovat, mohou se na něm podílet tři způsoby vnímání magnetického pole zmíněné v kapitole 1.2. Alignment může být způsoben či ovlivněn řadou faktorů, mj. světlem slunce, směrem větru, terénními podmínkami, stádovým instinktem a u býložravců též směrem růstu rostlin. Magnetický alignment může synchronizovat směr pohybu celého stáda (usnadňuje efektivní pasení, koordinovaný útěk, efektivní antipredační chování a soudržnost stáda) a také termoregulaci a jistě si zaslouží další zkoumání (Begall et al. 2008; Burda et al. 2009).

Nejpřesnější by jistě bylo testovat zvířata v podmínkách, kde by nebyla ovlivňována vnějšími podněty, jako je počasí, přítomnost lidí nebo dalších druhů, elektrické vedení; pohybovala by se na rovném prostranství a byla by pozorována shora. Bohužel většinu těchto podmínek prostředí zoologické zahrady nespĺňuje a není možné je zcela zajistit. Na výsledcích se také jistě podepsala nepřesná metodika.

## 5. ZÁVĚR

Alignment je postavení v pozici, která je odpovědí na určitý podnět. Testovala jsem alignment u savců v zoologických zahradách. V tomto případě je důležité, aby byly eliminovány různé faktory ovlivňující postavení v závislosti na magnetickém poli, jako je např. povaha terénu, pozice Slunce nebo směr větru. V zoologických zahradách se těmto rušivým elementům nevyhneme; spíše právě naopak. Z tohoto důvodu se výsledky z různých zoo liší a jsou ovlivněné nežádoucími faktory. Pro potvrzení magnetického alignmentu by bylo ideální testovat zvířata neovlivněná jinými, než magnetickými podněty a zpřesnit způsob měření.

## 6. POUŽITÁ LITERATURA

**Angell R. F. et al. (1990)** Effects of a high-voltage direct-current transmission line on beef cattle production. *Bioelectromagnetics* 11: 273 – 282

**Avens L., Lohmann K. J., (2003)** Use of multiple orientation cues by juvenile loggerhead sea turtles *Caretta caretta*. *The Journal of Experimental Biology* 206, 4317 – 4325

**Beazley M., (1981)** Anatomie Země. Albatros, Praha, 121 str.

**Beason R. C., (2005)** Mechanisms of magnetic orientation in birds. *Integrative and Comparative Biology* 45: 565 – 563

**Becker G., (1974)** Einfluss des Magnetfelds auf das Richtungsverhalten von Goldfischen. *Naturwissenschaften* 61: 220 – 221

**Begall S. et al. (2008)** Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 13451 – 13455

**Blakemore R. P., (1975)** Magnetotactic bacteria. *Science* 19: 377 – 379

**Burda H. et al. (1990)** Magnetic compass orientation in the subterranean rodent *Cryptomys hottentotus* (Bathyergidae). *Experientia* 46: 528 – 530

**Burda H. et al., (2009)** Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 5708 – 5713

**Burchard J. F. et al. (1996)** Biological effects of electric and magnetic fields on productivity of dairy cows. *Journal of Dairy Science* 79: 1549 – 1554

**Burchard J. F. et al. (1998)** Effects of electric and magnetic fields on nocturnal melatonin concentrations in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 81: 722 – 727



**Burchard J. F. et al. (2003)** Effect of 10 kV, 30 mT, 60 Hz electric and magnetic fields on milk production and feed intake in nonpregnant dairy cattle. *Bioelectromagnetics* 24: 557 – 563

**Contalbrigo L. et al. (2009)** Effects of different electromagnetic fields on circadian rhythms of some haematochemical parameters in rats. *Biomedical and Environmental Sciences* 22: 348 – 353

**Činčura J., (1983)** Encyklopédia Země. Obzor, Bratislava, 717 str.

**Davey G., (2007)** Visitors' Effects on the Welfare of Animals in the Zoo: A Review. *Journal of Applied Animal Welfare Science* 10: 169 – 183

**Deutschlander M. E. et al. (2003)** Learned magnetic compass orientation by the Siberian hamster, *Phodopus sungorus*. *Animal Behaviour* 65: 779 – 786

**Diego-Rasilla F. J. et al. (2005)** Magnetic compass mediates nocturnal homing by the alpine newt, *Triturus alpestris*. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 58: 361 – 365

**Farrell J. M. et al. (1997)** The effect of pulsed and sinusoidal magnetic fields on the morphology of developing chick embryos. *Bioelectromagnetics* 18: 431 – 438

**Fernandez E. J. et al. (2009)** Animal–visitor interactions in the modern zoo: Conflicts and interventions. *Applied Animal Behaviour Science* 120: 1–8

**Fernie K. J., Bird D. M., (1999)** Effects of electromagnetic fields on body mass and food-intake of american kestrels. *The Condor* 101: 616 – 621

**Fernie K. J., Bird D. M., (2000)** Effects of electromagnetic fields on the growth of nestling american kestrels. *The Condor* 102: 461 – 465

**Fernie K. J., Reynolds S. J., (2005)** The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive and physiology: a review. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 8: 127 - 140

**Fernie K. J. et al. (1999)** Effects of electromagnetic fields of photophasic circulating melatonin levels in american kestrels. *Environmental Health Perspectives* 107: 901 – 904

**Fernie K. J. et al. (2000a)** Effects of electromagnetic fields on the reproductive success of american kestrels. *Physiological and Biochemical Zoology* 73: 60 – 65

**Fernie K. J. et al. (2000b)** Behavior of free-ranging and captive american kestrels under electromagnetic fields. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 59: 597 - 603

**Fransson T. et al. (2001)** Magnetic cues trigger extensive refuelling. *Nature* 414: 35

**van Ginneken V. et al. (2005)** Microelectronic detection of activity level and magnetic orientation of yellow European eel, *Anguilla anguilla* L., in a pond. *Environmental Biology of Fishes* 72: 313 – 320

**Holland R. A. et al. (2006)** Navigation: bat orientation using Earth's magnetic field. *Nature* 444, 653 – 702

**Holland R. A., (2007)** Orientation and navigation in bats: known unknowns or unknown unknowns? *Behav Ecol Sociobiol* 61: 653 – 660

**Holland R. A. et al. (2008)** Bats use magnetite to detect the Earth's magnetic field. *PLoS ONE* 3: e1676

**Hui C. A., (1994)** Lack of association between magnetic patterns and the distribution of free-ranging dolphins. *Journal of Mammalogy* 75: 399 – 405

**Jakeš P., (1984)** *Planeta Země*. Mladá fronta, Praha, 413 str.

**John T. M. et al. (1998)** 60 Hz magnetic field exposure and urinary 6-sulphatoxymelatonin levels in the rat. *Bioelectromagnetics* 19: 172 – 180

**Johnsen S., Lohmann K. J., (2005)** The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience* 6: 703 – 712

**Kalmijn A. J., (1982)** Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. *Science* 218: 916 – 918

**Kirschvink J. L., (1986)** Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans. *The Journal of Experimental Biology* 120: 1 – 24

**Kirschvink J. L., (1997)** Homing in on vertebrates. *Nature* 390: 339 – 340

**Kirschvink et al. (2001)** Magnetite-based magnetoreception. *Current Opinion in Neurobiology* 11: 462 – 467

**Kirschvink et al. (2010)** Biophysics of magnetic orientation: strengthening the interface between theory and experimental design. *Journal of the Royal Society Interface* doi:10.1098

**Klinowska M., (1985)** Cetacean live stranding sites relate to geomagnetic topography. *Aquatic Mammals* 1: 27 – 32

**Kovach W. L., (2009)** Oriana – Circular statistic for Windows ver.3. Kovach Computing Services, Pentraeth, Wales, UK.

**Kumlin T. et al. (2005)** Exposure to a 50-Hz magnetic field induces a circadian rhythm in 6-hydroxymelatonin sulfate excretion in mice. *Journal of Radiation Research* 46: 313 – 318

**Lee J. M. JR. et al. (1993)** Melatonin secretion and puberty in female lambs exposed to environmental electric and magnetic fields. *Biology of Reproduction* 49: 857 – 864

**Lohmann K. J., Johnsen S., (2000)** The neurobiology of magnetoreception in vertebrate animals. *Trends Neuroscience* 23: 153 – 159

**Lovegrove B. G. et al. (1992)** The magnetic compass orientation of the burrows of the Damara mole-rat *Cryptomys damarensis* (Bathyergidae). *Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London / Zoology*: 226: 631 – 633

**Marhold S. et al. (1997)** A magnetic polarity compass for direction finding in a subterranean mammal. *Naturwissenschaften* 84: 421 – 423

**Marhold S. et al. (2000)** Spontaneous directional preference in a subterranean rodent, the blind mole-rat, *Spalax ehrenbergi*. *Folia Zoologica* 49: 7 – 18

**Moritz R. E. et al. (2007)** Magnetic compass: A useful tool underground. In: Begall S., Burda H., Schleich C. (eds) *Subterranean rodents - News from underground*. Springer, Heidelberg, pp 161 – 174

**Muheim R. et al. (2006)** Magnetic compass orientation in C57BL/6J mice. *Learning & Behavior* 34: 366 – 373

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

**Němec P. et al. (2005)** Towards the neural basis of magnetoreception: a neuroanatomical approach. *Naturwissenschaften* 92: 151 – 157

**Němec P., Vácha M., (2007)** Mechanizmy magnetorecepce, Jak živočichové vnímají magnetické pole. *Vesmír* 86: 284 – 289

**Pauk F., Habětín V., (1979)** *Geologie pro zeměpisce*. SPN Praha, 224 str.

**Phillips J. B., Borland S. C., (1992)** Behavioral evidence for use of a light-dependent magnetoreception mechanism by a vertebrate. *Nature* 359: 142 – 144

**Phillips J. B., et al. (2002)** Fixed axis magnetic orientation by an amphibian: non-shoreward-directed compass orientation, misdirected homing or positioning a magnetite-based map detector in a consistent alignment relative to the magnetic field? *The Journal of Experimental Biology* 205: 3903 – 3914

**Phillips et al. (2010)** Light-dependent magnetic compass orientation in amphibians and insects: candidate receptors and candidate molecular mechanisms. *Journal of the Royal Society Interface*, doi:10.1098

**Ritz T. et al. (2000)** A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal* 78: 707 – 718

**Roman A., Tombarkiewicz B., (2009)** Prolonged weakening of the geomagnetic field (GMF) affects the immune system of rats. *Bioelectromagnetics* 30: 21 – 28

**Schlegel P. A., Renner H., (2007)** Innate preference for magnetic compass direction in the Alpine newt, *Triturus alpestris* (Salamandridae, Urodela)? *Journal of Ethology* 25: 185 – 193

**Schlegel P. A., (2007)** Spontaneous preferences for magnetic compass direction in the American red-spotted newt, *Notophtalmus viridescens* (Salamandridae, Urodela). *Journal of Ethology* 25: 177 – 184

**Thalau P. et al. (2006)** The magnetic compass mechanisms of birds and rodents are based on different physical principles. *Journal of the Royal Society Interface* 3: 583 – 587

**Tripp H. M. et al. (2003)** Circularly polarised MF (500  $\mu$ T 50 HZ) does not acutely suppress melatonin secretion from cultured Wistar rat pineal glands. *Bioelectromagnetics* 24: 118 – 124

**Vanýsek V., (1980)** *Základy astronomie a astrofyziky*. Academia, Praha, 544 str.

**Vácha M., Němec P., (2007)** Orientace v geomagnetickém poli, Kompas a mapa. *Vesmír* 86: 224 – 228

**Walker M. M. et al. (1992)** Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *The Journal of Experimental Biology* 171: 67 – 78

**Walker M. M. et al. (1997)** Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature* 390: 371 – 376

**Walker M. M. et al. (2002)** The magnetic sense and its use in long-distance navigation by animals. *Neurobiology* 12: 735 – 744

**Wang Y. et al. (2007)** Bats respond to polarity of magnetic field. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 2901 – 2905

**Wegner R. E. et al. (2006)** Magnetic compass in the cornea: local anaesthesia impairs orientation in a mammal. *The Journal of Experimental Biology* 209: 4747 – 4750

**Wells D. L., (2009)** Sensory stimulation as environmental enrichment for captive animals: A review. *Applied Animal Behaviour Science* 118: 1 – 11

**Whissell P. D., Persinger M. A., (2007)** Developmental effects of perinatal exposure to extremely weak 7 Hz magnetic fields and nitric oxide modulation in the Wistar albino rat. *International Journal of Developmental Neuroscience* 25: 433 – 439

**Wiltschko R., Wiltschko W., (1995)** Magnetic orientation in animals. Springer, *Zoophysiology* Vol. 33, 297 pp.

**Wiltschko R., Wiltschko W., (2003)** Avian navigation: from historical to modern concepts. *Animal Behaviour* 65: 257 – 272

**Wiltschko R., Wiltschko W., (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: 157 – 168

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

**Wiltschko W. et al. (2002)** Lateralization of magnetic compass orientation in a migratory birds. *Nature* 419: 467 – 470

**Wiltschko W. et al. (2007)** Magnetite-based magnetoreception: the effect of repeated pulsing on the orientation of migratory birds. *Journal of Comparative Physiology A* 193: 515 – 522

**Youbicier-Simo B. J. et al. (1997)** Biological effects of continuous exposure of embryos and young chickens to electromagnetic fields emitted by video display units. *Bioelectromagnetics* 18: 514 – 523