

Souhrnná výzkumná zpráva

k projektu

Využití moderních nástrojů
biologgingu, sdílení a
uživatelsky přívětivé analýzy
dat při optimalizaci inkubace
vajec ohrožených druhů ptáků
v lidské péči

Martin Sládeček, Petr Chajma, Lucie
Burešová Pešková, Kateřina Trejbalová,
Iva Babováková, Michal Podhrázský, Petr
Suvorov & Miroslav Šálek

Typ výsledku	Vsouhrn – souhrnná výzkumná zpráva
Identifikační číslo výsledku	SS07020438-V4
PID projektu	SS07020438
Název projektu	Využití moderních nástrojů biologingu, sdílení a uživatelsky přívětivé analýzy dat při optimalizaci inkubace vajec ohrožených druhů ptáků v lidské péči
Program	SS – Program aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostředí pro život
Podprogram	Podprogram 2 – Ekoinovace, technologie a postupy pro ochranu životního prostředí
Veřejná soutěž	7. veřejná soutěž Programu Prostředí pro život
Doba řešení projektu	04/2024–06/2026
Poskytovatel podpory	Technologická agentura ČR
Hlavní příjemce	Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí
Další účastníci projektu	ZOO Dvůr Králové a.s.; Zoo Brno a stanice zájmových činností, příspěvková organizace
Hlavní řešitel	Mgr. Martin Sládeček, Ph.D.
Autoři zprávy	Martin Sládeček, Petr Chajma, Lucie Burešová Pešková, Kateřina Trejbalová, Iva Babováková, Michal Podhrázký, Petr Suvorov & Miroslav Šálek
Verze / datum	v1.0 / červen 2026
Veřejná verze	https://www.fzp.czu.cz/cs/r-6899-projekty-a-spoluprace/r-6923-projekty/r-20308-vyuziti-modernich-nastroju-biologingu-sdileni-a-uzivatelsky-privetive-analyzy-dat-pri-optimalizaci-inkubace-vajec-ohrozenych-druhu-ptaku-v-lidske-peci/o-projektu.html

English metadata

Result title	Summary research report on the development, use and methodological integration of tools for optimising egg incubation in threatened bird species under human care
Result type / project ID	Vsouhrn – Summary research report / SS07020438

Doporučená citace

Sládeček M., Chajma P., Pešková L., Trejbalová K., Babováková I., Podhrázký M., Suvorov P. & Šálek M. 2026 Souhrnná výzkumná zpráva k projektu Využití moderních nástrojů biologingu, sdílení a uživatelsky přívětivé analýzy dat při optimalizaci inkubace vajec ohrožených druhů ptáků v lidské péči. Výsledek typu Vsouhrn, projekt TA ČR SS07020438. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.



**Financováno
Evropskou unií**
NextGenerationEU



Obsah

1. Úvod	5
1.1 Teoretická východiska projektu: Stručný úvod do problematiky inkubace ptačích vajec.....	7
2. Inkubáze – místo, kde se z vajec líhne poznání	10
2.1 Technologická charakteristika Inkubáze, principy zabezpečení a správy dat	11
2.1.1 Přístup do platformy uživatelská struktura a registrace	12
2.1.2 Uživatelé, instituce a správa oprávnění	12
2.1.3 Vlastnictví a odpovědnost za odborná data	12
2.1.4 Licenční režimy a sdílení dat	12
2.1.5 Ochrana osobních údajů	14
2.2 Shromažďovaná data a struktura databáze Inkubáze	14
2.2.1 Zadávání dat do databáze	17
2.3 Orientace v datech a provozní práce se záznamy v Inkubázi	18
2.3.1 Seznamy vajec a filtrování záznamů	18
2.3.2 Barevné štítky vajec	18
2.3.3 Přehled péče o vejce za zvolené období	18
2.3.4 Význam pro každodenní práci	19
2.4 Analytické nástroje pro optimalizaci inkubace	19
2.4.1 Výpočetní postupy používané při optimalizaci nastavení inkubátoru	21
2.4.2 Odhad základních parametrů vejce	22
2.4.3 Výpočet hmotnostní ztráty	22
2.4.4 Tlak vodních par a vodivost skořápky	23
2.4.5 Výpočet optimální vlhkosti pro jednotlivé vejce	24
2.4.6 Optimalizace společné vlhkosti pro skupinu vajec	25
2.4.7 Optimalizace rozmístění vajec mezi inkubátory	26
2.4.8 Výpočet druhových referenčních hodnot	26
2.5 Kontrolní mechanismy při zadávání a zpracování dat v Inkubázi	26
2.5.1 Kontrola přístupu a oprávnění	27
2.5.2 Kontrolní mechanismy při zadávání vejce	27
2.5.3 Kontrolní mechanismy při zadávání průběžných záznamů o inkubaci	27
2.5.4 Kontrolní mechanismy při správě inkubátorů	28
2.5.5 Kontrolní mechanismy pro dávkový import dat	28
2.5.6 Varování uživatele vyplývající z chybějících údajů při optimalizačních výpočtech	28
2.6 Inkupedie – živá encyklopedie ptačí inkubace	28
2.7 Shrnutí datasetu dostupného prostřednictvím Inkubáze	30

3.	Monitoring přirozené inkubace s využitím metod biologingu.....	33
3.1	Proč v chovech inkubaci monitorovat?.....	33
3.2	Hlavní metody a postupy ozkoušené v rámci projektu.....	33
3.3	Měření inkubace pomocí miniaturních dataloggerů AXY5 v biomimetických vaječných podkladcích	35
3.3.1	Měření vnitřní teploty vejce	35
3.3.2	Měření otáčení vejce	36
3.3.3	Zpracování a analýza dat o otáčení.....	36
3.3.4	Měření teploty a vlhkosti v hnízdě pomocí dataloggerů MSR	37
3.3.5	Využití kamerového záznamu při monitoringu inkubace	39
3.4	Příkladové studie založené na využití dat získaných v průběhu projektu.....	41
3.4.1	Příkladová studie 1: Přirozená inkubace není stabilní líheň	41
3.4.2	Příkladová studie 2: Co prozradí kamera o spánku a čištění peří během inkubace?	43
3.4.3	Příkladová studie 3: Jak ptáci skutečně otáčejí vejce	46
4.	Vývoj a výroba biomimetických vaječných podkladků	50
4.1	Konstrukce modelů.....	50
4.1.1	Typy podkladků.....	50
4.1.2	Použité materiály, postup při tisku a plnění	52
4.1.3	Těsnění modelu, povrchová úprava a barvení	52
4.2	Hmotnostní a tepelné vlastnosti biomimetických podkladků	53
4.3	Pokrytí morfoprostoru ptačích vajec a výběr reprezentativních podkladků	55
4.4	Struktura veřejné databáze biomimetických podkladků na Zenodu	59
5.	Přehled dosažených a plánovaných výstupů projektu.....	62
5.1	Inkubáze – platforma pro správu, sdílení a analýzu inkubačních dat	62
5.2	Veřejná databáze inkubačních parametrů v rámci Inkubáze	62
5.3	Metodická příručka pro monitoring inkubace v chovech	62
5.4	Databáze 3D modelů biomimetických vaječných podkladků	63
5.5	Workshop	63
5.6	Souhrnná výzkumná zpráva projektu	63
6.	Závěr a východiska pro další směřování	64
7.	Použitá literatura	65

1. Úvod

Úspěšná inkubace vajec je jedním z klíčových předpokladů dlouhodobě udržitelného chovu ptáků v lidské péči, zejména u druhů ohrožených, obtížně odchovatelných nebo druhů zapojených do záchranných a reintrodukčních programů. Přestože umělá inkubace patří k běžným nástrojům zoologických zahrad a specializovaných chovatelských zařízení, její nastavení je u řady volně žijících druhů stále založeno především na empirických zkušenostech, obecných doporučeních a analogiích s omezeným počtem dobře prostudovaných modelových druhů. U vzácných druhů přitom často chybí dostatečně detailní informace o tom, v jakých teplotních, vlhkostních a mechanických podmínkách probíhá přirozená inkubace a jak se tyto podmínky liší mezi druhy, chovnými situacemi a typy inkubační péče.

Projekt **SS07020438 – Využití moderních nástrojů biologingu, sdílení a uživatelsky přívětivé analýzy dat při optimalizaci inkubace vajec ohrožených druhů ptáků v lidské péči** byl zaměřen na propojení tří oblastí, které byly dosud v chovatelské praxi využívány spíše odděleně: detailního monitoringu inkubace s využitím sofistikovaných dataloggerů, standardizovaného sdílení inkubačních dat získaných v průběhu umělé inkubace a uživatelsky přístupné analytické interpretace těchto dat. Cílem projektu bylo vyvinout a otestovat sadu nástrojů, postupů a datových zdrojů, které umožní chovatelům lépe vyhodnocovat průběh přirozené i umělé inkubace, srovnávat vlastní zkušenosti s daty z jiných chovů a druhů a následně informovaně upravovat inkubační postupy. Výstupy projektu byly koncipovány tak, aby měly potenciál přímo přispět ke snížení ztrát při přirozeném odchovu, zvýšení úspěšnosti líhnutí při umělém odchovu a zvýšení kvality potomstva pocházejícího z umělé inkubace.

Ústředním výstupem projektu je **Inkubáze**, webová platforma pro správu, sdílení a analýzu dat o inkubaci ptačích vajec. Platforma propojuje evidenci vajec, inkubačních pokusů, průběžných měření, výsledků líhnutí a dalších relevantních metadat s analytickými nástroji, které uživateli umožňují hodnotit průběh inkubace v reálném čase nebo zpětně po ukončení inkubačního cyklu. Smyslem platformy není pouze archivace dat, ale především jejich praktické využití: chovatelům má umožnit vyhodnotit konkrétní inkubační případ, porovnat jej s předchozími zkušenostmi a postupně zpřesňovat rozhodování o nastavení teploty, vlhkosti, váhového úbytku, režimu otáčení, přesunu vajec mezi přirozenou a umělou inkubací nebo o interpretaci rizikových odchylek.

Druhým klíčovým výstupem (interně propojeným s Inkubází) je veřejná **databáze inkubačních parametrů**. V rámci databáze jsou shromažďovány a archivovány standardizované informace o umělé inkubaci, které vytvářejí základ pro srovnání mezi druhy, chovnými zařízeními a inkubačními postupy. Ke konci projektu (30.6.2026) zahrnuje databáze údaje o 24 543 vejcích náležejících 470 taxonům, získaných v sedmi chovech. Již nyní se jedná o rozsáhlý a unikátní soubor dat, lze však očekávat, že význam databáze bude narůstat s počtem zapojených institucí a s rostoucím objemem dat. S ohledem na potřebu rozšíření povědomí o Inkubázi i mezi zahraniční odbornou komunitu, je v současné době v pokročilé fázi přípravy odborný manuskript, který Inkubázi a doprovodnou databázi, jakož i jejich potenciál pro zvýšení efektivity odchovů i pro vědu detailně popisuje.

Dalším výstupem je **Metodická příručka pro využití komplexního monitoringu inkubace při chovu v lidské péči**, která převádí zkušenosti s monitoringem inkubace, získané před započítím projektu, ale zejména v jeho průběhu do postupů prakticky použitelných v rámci chovatelských zařízení. Příručka shrnuje doporučení pro výběr a přípravu zařízení, instalaci dataloggerů do hnízd nebo atrap vajec, minimalizaci rušení, stahování a kontrolu dat, interpretaci měření a jejich následné využití v Inkubázi. Zároveň zdůrazňuje, že tyto postupy mohou umožnit včas detekovat odchylky od správného průběhu

inkubace, pomoci analyzovat příčiny neúspěchu přirozeného odchovu a v některých případech podpořit rozhodnutí o přesunu vajec do líhně.

Dalším a v průběhu přípravy projektu neplánovaným výstupem je široce využitelný **dataset modelů pro 3D tisk vaječných podkladků** (atrap vajec). Jakkoliv jejich vývoj a výroba byly původně plánovány pouze pro použití v rámci sběru dat o vnitřní teplotě vajec a jejich otáčení s využitím dataloggerů, nakonec se ukázalo, že potenciál pro využití vaječných podkladků rozmanitých druhů ptáků, jakož i o poptávka po reprodukovatelných a cenově dostupných modelech je mezi chovateli velká. Vznikl proto rozsáhlý soubor modelů, pokrývající drtivou většinu tvarové a velikostní rozmanitosti ptačích vajec, jakož i detailní protokol pro jejich výrobu a série testů, ověřující jejich vlastnosti. Modely jsou několika typů, ať již pro standardní využití v chovech, tak i pro původně zamýšlené využití nosiče pro datalogger. Databáze podkladků je uložena na platformě Zenodo, a její popis je obsahem připravované odborné publikace, popisující detailně proces vývoje a výroby podkladků.

Projekt v neposlední řadě přinesl i unikátní set dat z dataloggerů při jejich použití v chovech, zejména dat o teplotním průběhu inkubace, vlhkosti, přítomnosti rodiče na hnízdě a mechanice otáčení vajec. Sebraná data potvrzují, že biologging může v chovatelské praxi sloužit nejen jako výzkumný nástroj, ale i jako nástroj provozní diagnostiky. Umožňuje identifikovat situace, kdy vejce nejsou inkubována stabilně, kdy dochází k opakovanému vychladnutí nebo přehřívání, kdy je rodičovská péče narušena okolním prostředím, nebo kdy se mechanické podmínky otáčení vajec odchyľují od očekávaného průběhu. Tam, kde dosud není možné formulovat definitivní druhově specifická doporučení, poskytují získaná data alespoň standardizovaný rámec pro rozhodování a pro další cílený sběr dat. Doposud zpracované výsledky jsou v souhrnné zprávě prezentovány formou několika příkladových studií a do budoucna se počítá s jejich publikací v odborné literatuře.

Důležitou součástí projektu byla také průběžná prezentace vznikajících výstupů chovatelské komunitě, která zároveň umožnila těsnou spolupráci s řadou špičkových chovatelských zařízení. Její součástí byl rovněž workshop pro zástupce cílové skupiny uživatelů, zejména zoologických zahrad a dalších chovatelských institucí. **Workshop „Moderní nástroje pro monitoring inkubace a jejich využití v chovech“** sloužil k prezentaci pracovních verzí výstupů, ověření jejich srozumitelnosti a získání zpětné vazby od budoucích uživatelů. V logice projektu nešlo pouze o doprovodnou akci, ale o podstatný prvek implementace: připomínky chovatelů umožnily upravit platformu, metodickou dokumentaci a komunikační způsob prezentace výsledků tak, aby byly využitelné i pro uživatele bez pokročilé zkušenosti s datovou analýzou. Další propagace poté probíhala i při několika setkáních odborných chovatelských komisí na české i mezinárodní scéně.

Hlavní metodické zobrazení vyplývající z projektu je, že optimalizace inkubace u volně žijících druhů ptáků v lidské péči nemůže být dlouhodobě založena pouze na izolovaných zkušenostech jednotlivých zařízení. Efektivnější přístup vyžaduje standardizovaný sběr dat, jejich bezpečné a transparentní sdílení, průběžnou kontrolu kvality a dostupné analytické nástroje, které dokážou převést surová měření do prakticky interpretovatelných doporučení. Přirozená inkubace poskytuje důležitý biologický referenční rámec, umělá inkubace umožňuje cílenou technickou kontrolu podmínek a Inkubáze spolu s dalšími výstupy projektu vytváří prostředí, ve kterém lze oba zdroje informací systematicky propojovat.

Praktická doporučení pro chovatelská zařízení lze shrnout následovně: inkubační postupy by měly být dokumentovány v jednotné struktuře, průběh inkubace by měl být u problematických nebo ochranných významných druhů monitorován pomocí vhodných dataloggerů, získaná data by měla být interpretována ve vztahu k přirozené inkubaci daného nebo příbuzného druhu a výsledky jednotlivých inkubačních pokusů by měly být sdíleny v databázové podobě. Tím se z jednotlivých chovatelských zkušeností stává kumulativní znalostní báze, jejíž hodnota roste s každým dalším vloženým záznamem.

Souhrnná zpráva proto chápe jednotlivé výstupy projektu jako vzájemně propojený systém: dataloggery umožňují měření, metodická příručka standardizuje jejich použití, 3D modely podporují technickou reprodukovatelnost práce s vejci, Inkubáze zajišťuje správu a analýzu dat, veřejná databáze vytváří sdílený zdroj poznání, a odborné rukopisy převádějí hlavní poznatky do vědeckého diskurzu. Společným cílem těchto výstupů je zvýšit informovanost rozhodování při inkubaci vajec v lidské péči, podpořit úspěšnost odchovu ohrožených druhů a vytvořit dlouhodobě udržitelnou platformu pro další rozvoj biologingu a datově podložené chovatelské praxe.

Na vytvoření, ověření a praktickém naplnění výstupů popsaných v této zprávě se podílela řada pracovníků zoologických zahrad a dalších chovatelských zařízení. Autoři děkují zejména Davidu Kodetovi a Barboře Lipanské (Safari Park Dvůr Králové), Anetě Ladrové, Evě Peňázové a Adéle Šmídové (Zoo Brno), Janu Kirnerovi (Zoo Olomouc), Janu Hanelovi (Zoo Liberec), Václavu Štraubovi (Zoo Zlín) a Antonínu Vaidlovi, Pavlu Kovaříkovi a Jiřímu Eliášovi (Zoo Praha) za ochotnou spolupráci při testování metod v provozních podmínkách, umožnění specifických instalací monitorovacích zařízení a poskytnutí cenných dat pro ověření a další rozvoj metodiky. Poděkování patří rovněž celé řadě dalších chovatelů a odborných pracovníků, kteří se v průběhu projektu i v předchozích letech podíleli na sběru a zpřístupnění údajů o inkubaci a odchovu ptáků, jež byly následně začleněny do databáze Inkubáze. Bez jejich dlouhodobé ochoty sdílet zkušenosti a data by nebylo možné vytvořit takto rozsáhlý a prakticky využitelný datový základ. Autoři dále děkují studentům FŽP ČZU, kteří se podíleli na zpracování videozáznamů a dat, zejména Elišce Matějkové a Monice Němcové za zpracování záznamů získaných pomocí dataloggerů, jejichž výsledky jsou v této zprávě prezentovány.

1.1 Teoretická východiska projektu: Stručný úvod do problematiky inkubace ptačích vajec

Ptačí vejce je samostatný vývojový systém, v němž potřebuje být embryo po celou dobu inkubace udržováno v úzkém rozmezí fyzikálních podmínek umožňujících jeho normální růst, výměnu plynů a postupnou spotřebu živin uložených ve vejci. Úspěšný vývoj embrya závisí především na čtyřech vzájemně provázaných parametrech: teplotě, vodní bilanci řízené vlhkostí okolního prostředí, otáčení vejce a dostatečné výměně plynů mezi vejcem a okolím (Deeming 2002). Odchyly v těchto parametrech mohou vést ke zpomalení vývoje, vývojovým abnormalitám, zvýšené embryonální mortalitě, nebo zhoršené kondici mláděte po vylíhnutí (Webb 1987; Deeming 2002; DuRant et al. 2013).

Nejzřejmějším parametrem ovlivňujícím průběh a výsledek inkubace je teplota. Embryo se vyvíjí pouze pokud je teplota vejce nad takzvanou fyziologickou nulou, pod níž se jeho vývoj zastavuje. Ta se u ptáků pohybuje přibližně v rozmezí 23–27 °C. Na opačné straně existuje horní hranice tepelné tolerance; teploty nad přibližně 40,5 °C mohou vést k nevratnému poškození embrya. Optimální teploty se mezi druhy liší (a jen zřídka jsou přesně známy), ale u většiny ptáků se teplota na povrchu inkubovaného vejce nejčastěji pohybuje přibližně mezi 35 a 38,5 °C (Webb 1987; Deeming 2002). Při přirozené inkubaci však teplota vejce není zcela konstantní. Kolísá v závislosti na tom, zda rodič vejce právě zahřívá, zda došlo k inkubační přestávce, jaké jsou okolní podmínky, v jaké pozici se vejce nachází ve snůšce a jaká je inkubační strategie daného druhu (Conway & Martin 2000; Boulton & Cassey 2012; Moreau et al. 2018).

Druhým klíčovým parametrem je vodní bilance vejce. Ptačí vejce v průběhu inkubace postupně ztrácí vodu difuzí vodní páry přes skořápku. Rychlost této ztráty závisí zejména na propustnosti skořápky, teplotě, vlhkosti okolního vzduchu a proudění vzduchu kolem vejce. Při umělé inkubaci se proto

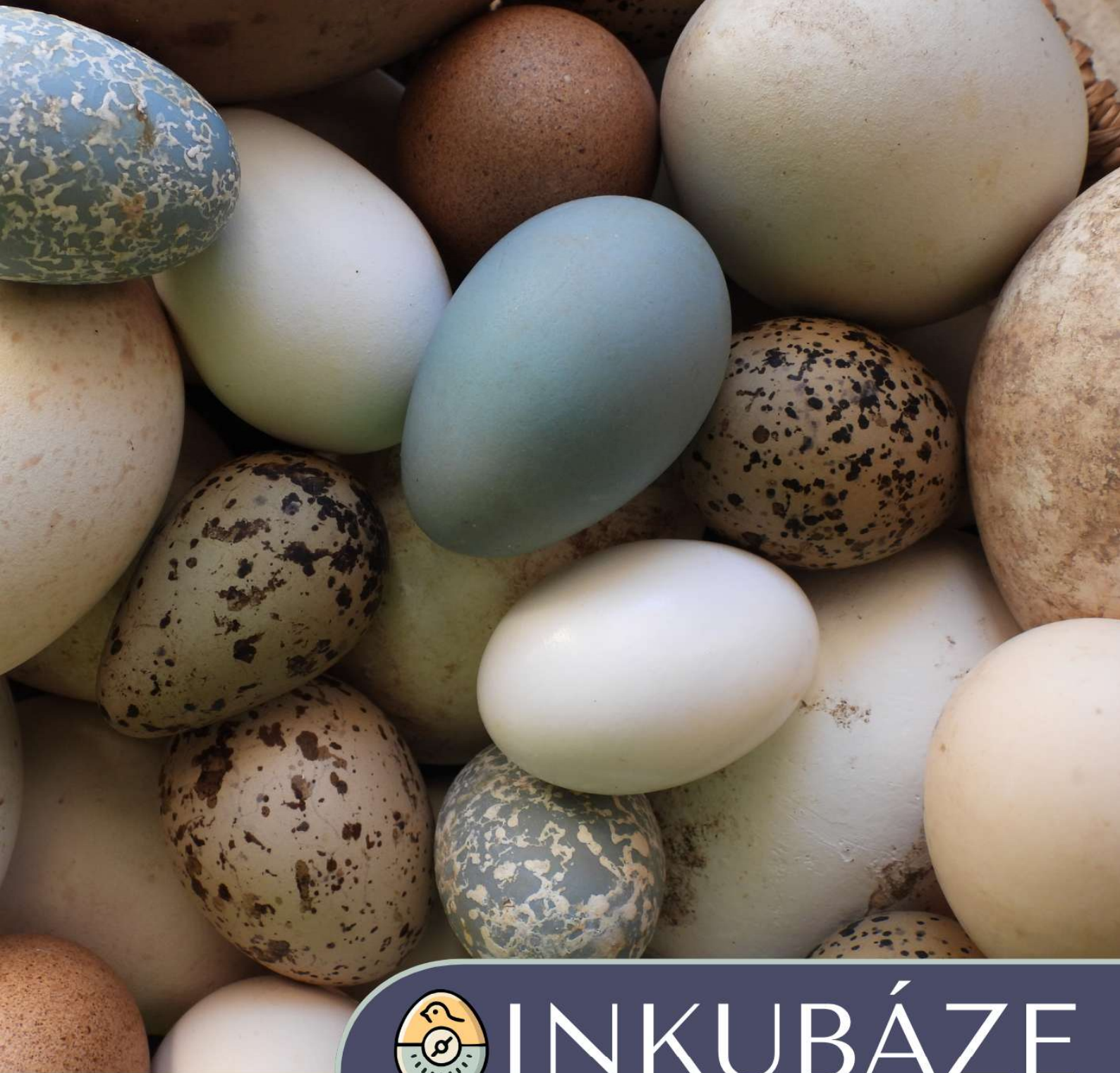
pravidelné vážení vajec používá jako praktický nástroj pro kontrolu, zda se vejce vyvíjí v očekávaném směru. Obecně se předpokládá, že úspěšně inkubovaná vejce ztratí do doby líhnutí přibližně 12–18 % (často bývá jako zjednodušené pravidlo udáván univerzální úbytek okolo 15 %) své počáteční hmotnosti, avšak optimální hodnota se může mezi druhy významně lišit (Rahn & Ar 1974; Ar & Rahn 1980; Tullett 1990), což perfektně ukazují i grafické výstupy prezentované v rámci Inkupedie (kap. 2.6). Příliš rychlý úbytek hmotnosti může znamenat nadměrné vysychání vejce, zatímco příliš pomalý úbytek může vést k zadržování tekutin, otokům embrya a obtížnému líhnutí. Proto patří pravidelné vážení a následná úprava vlhkosti v inkubátoru mezi nejdůležitější praktické kroky při umělé inkubaci.

Třetím zásadním procesem je otáčení vejce. Rodiče při přirozené inkubaci vejce pravidelně posouvají a otáčejí; v umělých líhních tuto funkci nahrazují mechanické otáčecí systémy nebo ruční manipulace. Otáčení brání přilnutí embryonálních membrán ke skořápce, podporuje vývoj cévního systému, správné využití bílku a normální orientaci embrya ve vejci (New 1957; Deeming 1989; Tullett & Deeming 1987). Dostupné srovnávací studie ukazují, že frekvence otáčení není univerzální. Liší se mezi druhy a souvisí mimo jiné s vývojovým typem mláďat a délkou inkubace; altriciální druhy mají obecně tendenci k vyšší frekvenci otáčení než druhy prekociální (Pešková et al. 2025). To je důležité i pro chovatelskou praxi, protože univerzální režim otáčení nemusí odpovídat biologickým potřebám všech druhů.

Čtvrtým základním požadavkem je výměna plynů. Embryo spotřebovává kyslík a produkuje oxid uhličitý, přičemž výměna probíhá přes póry skořápky. Propustnost skořápky pro plyny a vodní páru je druhově specifická a souvisí s velikostí vejce, mikroklimatem hnízda i délkou inkubační doby (Rahn & Ar 1974; Ar & Rahn 1980). V přirozeném hnízdě je výměna plynů zajištěna kombinací vlastností skořápky, struktury hnízdního materiálu, mikroklimatu a chování rodiče. V dobře větrané líhni nebývá kyslík obvykle limitující, avšak špatná ventilace, příliš kompaktní prostředí nebo nevhodně nastavený inkubátor mohou výměnu plynů zhoršit a negativně ovlivnit vývoj embrya (Tullett 1990).

Umělá inkubace se od přirozené inkubace liší tím, že podmínky vývoje embrya nejsou určovány rodičem a hnízdním prostředím, ale technickým nastavením inkubátoru a chovatelskými zásahy. Její výhodou je možnost přesné kontroly teploty, vlhkosti, otáčení a ventilace. Současně však vyžaduje průběžné sledování, protože druhově specifické nároky mnoha volně žijících druhů nejsou dostatečně známy a nelze je vždy bezpečně odvodit z obecných postupů používaných u drůbeže. Z praktického hlediska je proto zásadní zejména pravidelné vážení vajec, evidence nastavení inkubátoru, záznam přesunů mezi líhněmi, sledování fertility a embryonálního vývoje a dokumentace konečného výsledku inkubace.

Právě zde vzniká potřeba systematické evidence a analytické podpory. Jednotlivé chovatelské zkušenosti mají vysokou praktickou hodnotu, ale bez standardizovaného záznamu zůstávají obtížně porovnatelné a jen omezeně využitelné pro další druhy nebo instituce. Databázové a analytické prostředí Inkubáze proto staví na základním principu, že každé vejce představuje měřitelnou vývojovou trajektorii. Pokud jsou průběžně zaznamenávány jeho hmotnost, časový průběh inkubace, inkubační podmínky, zásahy chovatele a konečný výsledek, lze tato data využít nejen pro konkrétní rozhodnutí v probíhající inkubaci, ale také pro postupné zpřesňování druhově specifických doporučení.



INKUBÁZE

Místo, kde se z vajec líhne poznání

- Technologická charakteristika Inkubáze, principy zabezpečení a správy dat
- Shromažďovaná data a struktura databáze Inkubáze
- Orientace v datech a provozní práce se záznamy v Inkubázi
- Analytické nástroje pro optimalizaci inkubace
- Kontrolní mechanismy při zadávání a zpracování dat v Inkubázi
- Inkupedie - živá encyklopedie ptačí inkubace
- Shrnutí datasetu dostupného prostřednictvím Inkubáze

2. Inkubáze – místo, kde se z vajec líhne poznání

Inkubáze (<https://incubase.fzp.czu.cz/>) byla vyvinuta coby otevřená webová platforma vytvořená pro systematickou správu, analýzu a sdílení dat o inkubaci ptačích vajec, fungující v současné době v českém i anglickém jazyce. Jejím základním smyslem je převést dosud často roztříštěné, nejednotně vedené a obtížně sdílitelné záznamy z líhni zoologických zahrad, chovatelských zařízení a dalších kolekcí do jednotného datového prostředí, které je využitelné jak pro každodenní chovatelskou praxi, tak pro dlouhodobý aplikovaný a vědecký výzkum. Platforma proto nefunguje pouze jako archiv záznamů, ale jako propojený systém, který kombinuje standardizované zadávání dat, jejich průběžnou kontrolu, analytické nástroje pro podporu rozhodování, sdílení dat mezi institucemi a průběžně aktualizovanou znalostní bázi o inkubaci ptáků.

První základní složkou Inkubáze je **databáze inkubačních parametrů vajec**, která shromažďuje strukturované údaje o jednotlivých vejcích, inkubačním průběhu, použitých líhních, inkubačních podmínkách, fertilitě, vývoji embrya a výsledku inkubace. V obecné rovině jde zejména o údaje o druhu, původu a identitě vejce, datu snesení a líhnutí, rozměrech a hmotnosti vejce, opakovaných váženích, umístění vejce v konkrétní líhni, nastavení teploty, vlhkosti a otáčení, případných zásazích během inkubace a konečném osudu vejce. Databáze podporuje záznamy z umělé inkubace i z přirozené inkubace rodiči a umožňuje jejich pozdější srovnání. Podrobnější popis databáze, její datové struktury, rozsahu, a významu jako samostatného výsledku projektu je uveden v následující samostatné kapitole (3).

Druhou složkou platformy je sada **chytrých analytických nástrojů**, které na základě zadávaných dat poskytují v reálném čase prakticky využitelná doporučení. Tyto nástroje jsou určeny především pro průběžnou práci v líhni: umožňují sledovat vývoj jednotlivých vajec, vyhodnocovat trajektorii hmotnostního úbytku, porovnávat aktuální vejce s historickými záznamy stejného nebo příbuzného druhu a přesně navrhovat úpravy inkubačních podmínek. Inkubáze tak může pomáhat například s odhadem vhodné relativní vlhkosti, s identifikací vajec, která se odchyľují od očekávaného průběhu, nebo s rozhodováním o optimálním rozdělení vajec mezi více líhni.

Třetí složkou Inkubáze je **prostředí pro správu, archivaci a sdílení dat**. Platforma umožňuje registrovaným uživatelům a institucím vést vlastní inkubační záznamy v jednotné podobě, vyhledávat dostupná data, pracovat s vlastními souhrny a exporty a současně nastavovat podmínky, za nichž mohou být data zpřístupněna ostatním. Důležitou součástí je oddělení individuálních uživatelských účtů od institucionálního vlastnictví dat: data jsou spravována v rámci instituce či chovatelské kolekce, zatímco jednotliví uživatelé mohou data zadávat, upravovat nebo žádat o přístup konkrétní instituci podle své role a oprávnění (viz kap. 2.1.4). Platforma tím vytváří technické i organizační prostředí pro kontrolované sdílení dat, navazování spolupráce mezi chovateli a výzkumníky a vyjednávání podmínek využití dat pro vědecké či aplikační účely.

Čtvrtou složkou je **Inkupedie**, otevřená encyklopedie ptačí inkubace. Jejím účelem je převádět data uložená v Inkubázi do srozumitelných druhových přehledů, které mohou využívat chovatelé, kurátoři, výzkumníci i další zájemci o inkubaci ptáků. Druhové karty shrnují dostupné informace o konkrétních taxonech, včetně základních údajů o vejcích, sezonalitě snášení, inkubační době, fertilitě, úspěšnosti líhnutí, doporučené teplotě a vlhkosti, hmotnostním úbytku vajec a dalších parametrech relevantních pro odchov, zejména pro umělou inkubaci. Inkupedie je koncipována jako dynamický výstup: s každým dalším ověřeným záznamem v databázi se mohou zpřesňovat druhové souhrny, grafy i praktická doporučení.

Celkově tedy Inkubáze propojuje čtyři úrovně práce s inkubačními daty: **sběr a standardizaci dat, okamžitou analytickou podporu chovatelských rozhodnutí, kontrolované sdílení a opakované využití dat a syntézu znalostí v podobě Inkupedie**. Tím vytváří zpětnovazební systém, v němž data rutinně vznikající v líhních nejsou využita pouze jednorázově pro konkrétní vejce, ale stávají se součástí širší znalostní báze. Hodnota této báze bude narůstat s počtem zapojených institucí, druhů a kvalitně dokumentovaných inkubačních případů. Inkubáze je proto nejen technickým nástrojem pro evidenci vajec, ale především infrastrukturním výstupem, který propojuje chovatelskou praxi, aplikovanou ochranu ohrožených druhů a výzkum reprodukční biologie ptáků.

2.1 Technologická charakteristika Inkubáze, principy zabezpečení a správy dat

Inkubáze je serverová webová aplikace určená pro dlouhodobou správu, analýzu a sdílení inkubačních dat. Je postavena na frameworku Python Flask a využívá relační databázi MySQL, do níž jsou ukládány záznamy o vejcích, inkubačních událostech, líhních, uživateli, institucích a souvisejících metadatech. Komunikace aplikace s databází probíhá prostřednictvím SQLAlchemy ORM a změny databázového schématu jsou spravovány migračním systémem Alembic / Flask-Migrate. Aplikace je provozována na serverové infrastruktuře České zemědělské univerzity v Praze pod doménou incubase.fzp.czu.cz a klientům je poskytována prostřednictvím Gunicorn WSGI serveru. Uživatelské rozhraní je generováno na straně serveru pomocí šablonovacího systému Jinja2 a využívá responzivní rozhraní Bootstrap 5. Interaktivní části aplikace, například datové tabulky a vyhledávání druhů, jsou doplněny klientskými JavaScriptovými komponentami komunikujícími se specializovanými JSON API endpointy.

Architektura aplikace odděluje běžné uživatelské operace od procesů, které mohou trvat déle nebo zatěžovat server. Časově náročnější úlohy, například odesílání e-mailů nebo přepočítávání druhových statistik pro Inkupedii, jsou zpracovávány asynchronně pomocí systému Celery s message brokerem RabbitMQ. Statistické výpočty a optimalizační rutiny jsou řešeny pomocí R skriptů spouštěných z prostředí Pythonu. Toto propojení umožňuje kombinovat robustní webovou a databázovou infrastrukturu s analytickými možnostmi jazyka R, který je vhodný pro výpočty inkubačních trajektorií, vyhodnocování hmotnostního úbytku vajec a návrhy úprav inkubačních parametrů. Rozhraní Inkubáze je připraveno jako dvojjazyčné, v české a anglické verzi, s využitím frameworku Flask-Babel.

Zabezpečení aplikace je řešeno na úrovni uživatelské autentizace, ochrany formulářů, omezení rizikových požadavků, kontroly souborových vstupů i odděleného ukládání citlivých konfiguračních údajů. Přístup k neveřejným funkcím Inkubáze vyžaduje registraci a přihlášení uživatele. Autentizace je založena na session-based login systému. Hesla jsou ukládána výhradně zašifrovaná algoritmem PBKDF2-HMAC. Při obnově hesla systém používá časově omezené jednorázové tokeny zasílané e-mailem; původní heslo není nikdy zpětně zobrazováno ani odesíláno. Všechny HTML formuláře jsou chráněny proti útokům typu CSRF prostřednictvím kryptograficky podepsaných tokenů. Citlivé endpointy jsou chráněny omezením četnosti požadavků podle IP adresy, což snižuje riziko „brute-force“ útoků a zneužití opakovanými požadavky. Nahrávání souborů je omezeno na povolené typy souborů a názvy souborů jsou před uložením sanitizovány. Přístupové údaje k databázi, e-mailové heslo, či API klíče jsou uloženy mimo aplikaci v serverovém souboru a nejsou součástí zdrojového kódu aplikace. E-mailová komunikace probíhá přes zabezpečené SSL spojení.

Databáze Inkubáze je zálohována automaticky pomocí plánovaného serverového skriptu využívajícího nástroj mysqldump s parametrem --single-transaction. Tento způsob umožňuje vytvořit konzistentní snapshot databáze bez nutnosti zamykat tabulky a bez podstatného omezení běžného provozu aplikace. Zálohování je nastaveno jako víceúrovňový retenční systém. Denní zálohy jsou uchovávány po dobu 14 dnů, týdenní zálohy po dobu 60 dnů, měsíční zálohy po dobu jednoho roku a roční zálohy jsou uchovávány bez časového omezení. Tento systém poskytuje dostatečnou granularitu pro obnovu po

běžné provozní chybě a současně zajišťuje dlouhodobou archivaci stavu databáze pro auditní, rekonstrukční nebo kontrolní účely.

2.1.1 Přístup do platformy uživatelská struktura a registrace

Inkubáze byla vytvořena jako platforma, která umožňuje bezpečné vedení inkubačních záznamů, jejich kontrolované sdílení a opakované využití pro chovatelskou praxi, výzkum i tvorbu druhových doporučení. Základním principem systému je oddělení individuálního uživatelského přístupu od institucionální odpovědnosti za vložená data. Díky tomu mohou data do platformy zadávat konkrétní uživatelé, ale vlastnictví, licenční režim (viz kap. 2.1.4) a rozhodování o jejich zpřístupnění zůstává na úrovni instituce nebo chovatelské kolekce (tou může být i soukromý chovatel).

Bez registrace je v Inkubázi možné nahlížet pouze do veřejné části platformy, především do Inkupedie. Pro všechny ostatní činnosti je nutná jednoduchá a bezplatná registrace. Registrovaný uživatel může využívat neveřejné funkce platformy, vyhledávat data, podávat žádosti o přístup k datasetům a po schválení příslušné afiliace také zadávat, upravovat nebo spravovat záznamy.

2.1.2 Uživatelé, instituce a správa oprávnění

Uživatelská struktura Inkubáze rozlišuje mezi individuálním uživatelem a institucí. Individuální uživatel má vlastní účet, který slouží k přístupu do platformy a k práci s jejími funkcemi. Instituce představuje organizační záznam reprezentující právního vlastníka nebo správce chovné kolekce a dat vložených do Inkubáze. Vlastnictví dat a jejich licenční režim jsou proto přiřazeny na úrovni instituce, nikoliv pouze na úrovni konkrétního uživatele.

Data vložená uživatelem afiliováním k určité instituci dědí licenční a přístupový režim této instituce. Jedna instituce může mít více afiliovaných uživatelů. Administrátor instituce může schvalovat nebo odmítat žádosti o členství, řídit přístupová oprávnění, reagovat na žádosti o data a v případě potřeby převádět administrátorská práva na jiného uživatele. Uživatelský účet přitom zůstává nezávislý na institucionální afiliaci, takže uživatel může změnit instituci bez nutnosti nové registrace.

Soukromý chovatel může v systému vystupovat obdobně jako instituce. Po vytvoření individuálního účtu založí institucionální záznam reprezentující svou chovnou kolekci a stává se správcem dat, která do systému vloží. Tento princip umožňuje zapojení zoologických zahrad, chovných center i soukromých chovatelů v jednotném datovém a licenčním rámci.

2.1.3 Vlastnictví a odpovědnost za odborná data

Vložená odborná data zůstávají ve vlastnictví přispívající instituce nebo chovatelské kolekce. Provozovatel Inkubáze si nenárokuje vlastnictví záznamů vložených uživateli, ale poskytuje infrastrukturu pro jejich správu, analýzu, archivaci a sdílení. Použití dat pro vědecké publikace, zprávy, metodiky nebo jiné veřejné výstupy musí vždy respektovat licenční režim nastavený vlastníkem dat a zahrnovat řádnou atribuci.

Součástí pravidel používání platformy je také prohlášení, že vkládaná data pocházejí z legálně držených zvířat a ze zákonně prováděných inkubačních aktivit. Odpovědnost za soulad s národní legislativou, mezinárodními pravidly (například CITES) nese původce dat.

2.1.4 Licenční režimy a sdílení dat

Inkubáze pracuje se třemi základními režimy sdílení dat: otevřenou licenci, režimem pouze pro zobrazení a soukromými daty. Tyto režimy představují kompromis mezi otevřeností, vědeckou využitelností, ochranou citlivých chovatelských informací a respektováním institucionálního vlastnictví dat.

Otevřená licence

Otevřená licence je určena institucím, které chtějí svá inkubační data zpřístupnit k co nejširšímu využití. V tomto režimu mohou být data v Inkubázi prohlížena, stahována a dále využívána, včetně využití ve vědeckých publikacích, metodických dokumentech, srovnávacích analýzách nebo dalších veřejných výstupech. Podmínkou využití je řádné uvedení původu dat a citace vlastníka dat podle pravidel nastavených platformou.

Otevřená licence představuje nejvyšší míru zapojení do společné znalostní báze. Data jsou využitelná nejen pro druhové souhrny v Inkupedii a pro optimalizační nástroje platformy, ale také pro samostatné analýzy prováděné dalšími uživateli nebo výzkumnými týmy. Vlastník dat přitom neztrácí autorství ani nárok na uvedení zdroje; otevřenost se týká možnosti data využít, nikoliv převodu jejich vlastnictví.

Režim pouze pro zobrazení

Režim pouze pro zobrazení je kompromisní varianta pro instituce, které chtějí data v Inkubázi zpřístupnit ostatním uživatelům k nahlížení, ale nechťejí automaticky povolit jejich stažení, další zpracování nebo použití v publikacích a veřejných výstupech. Registrovaní uživatelé mohou taková data vyhledat a zobrazit v prostředí platformy, což umožňuje orientační srovnání, zjištění dostupnosti záznamů pro určitý druh nebo navázání kontaktu s vlastníkem dat. Data však nelze bez další dohody exportovat ani použít mimo platformu.

Pokud má jiný uživatel nebo výzkumný tým zájem tato data využít, musí o přístup nebo souhlas s využitím požádat vlastníka dat prostřednictvím standardizovaného mechanismu v Inkubázi. Vlastník dat tak zůstává aktivním účastníkem rozhodování o tom, zda budou data použita například pro vědeckou analýzu, společný projekt, publikaci nebo metodický výstup. Tento režim je vhodný zejména pro instituce, které chtějí být viditelné a zapojené do spolupráce, ale současně chtějí mít kontrolu nad tím, kdy, komu a za jakých podmínek budou jejich data poskytnuta.

Soukromá data

Soukromý režim je určen pro data, která instituce nechce zpřístupnit uživatelům mimo vlastní organizaci. Individuální záznamy v tomto režimu nejsou přímo dostupné externím uživatelům a slouží především pro interní evidenci, práci s vlastními líhněmi a využití analytických nástrojů Inkubáze v rámci dané instituce.

I soukromá data však mohou přispívat k obecnému analytickému potenciálu platformy. Pokud nejsou dodatečně skryta, mohou být zahrnuta do agregovaných analýz, souhrnných statistik a vizualizací prezentovaných v Inkupedii, aniž by byly zpřístupněny jednotlivé záznamy nebo identifikovatelné detaily konkrétního odchovu. Zároveň může být v platformě zjiitelná obecná existence a rozsah datasetu, což umožňuje zájemcům kontaktovat vlastníka dat a požádat o přístup například pro cílenou spolupráci, společnou analýzu nebo spoluautorský výstup.

Dočasné skrytí a embargo

Vedle tří základních licenčních režimů umožňuje Inkubáze také dočasné skrytí dat. Tento mechanismus slouží k ochraně údajů, které jsou citlivé pouze po určitou dobu, například dat z prvního úspěšného odchovu určitého druhu, nebo z jinak mimořádně cenné chovné situace, které chce instituce nejprve interně vyhodnotit, oznámit nebo publikovat.

Po dobu moratoria nejsou data zahrnuta do veřejně viditelných souhrnů, nejsou objevitelná ostatními uživateli a nevstupují ani do druhových karet Inkupedie, a to bez ohledu na jinak nastavený licenční režim. Tento režim je koncipován jako časově omezený, s možností odloženého zpřístupnění po uplynutí stanovené doby. V současné době je maximální doba možného utajení jeden rok.

2.1.5 Ochrana osobních údajů

Ochrana osobních údajů je nastavena v souladu s principem minimalizace zpracovávaných dat. Provozovatelem platformy je Fakulta životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze, která vystupuje jako správce osobních údajů zpracovávaných v rámci platformy. Zpracování osobních údajů je založeno na souhlasu uživatele vyjádřeném přijetím podmínek použití při registraci.

Rozsah osobních údajů je omezen na údaje nezbytné pro provoz systému, zejména jméno, uživatelské jméno, e-mailovou adresu a hash hesla. Platforma nezpracovává platební údaje, citlivé osobní údaje ani sledování nad rámec funkčních session cookies. Geolokační údaje, pokud jsou v systému využívány, se vztahují k instituci nebo chovatelské kolekci, nikoliv k individuálnímu uživateli, a jsou poskytovány uživatelem manuálně. Případný odběr newsletteru a administrativní komunikace jsou řešeny samostatným opt-in souhlasem odděleným od základního souhlasu s používáním platformy.

Mazání účtů a zachování odborné hodnoty dat

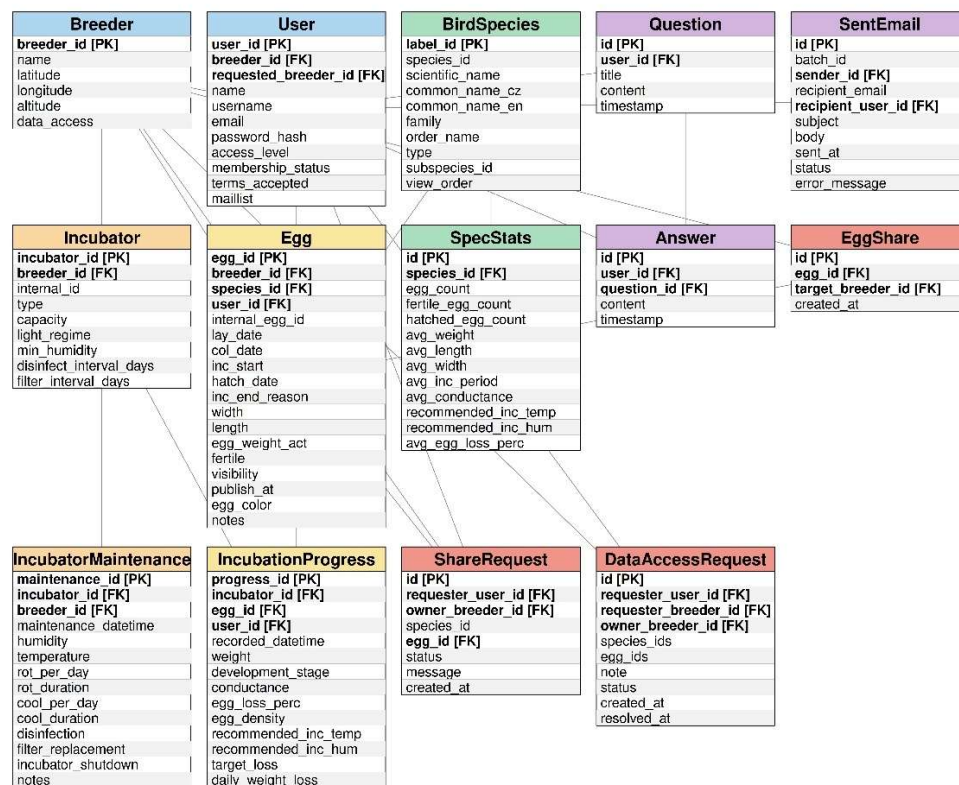
Mazání uživatelských a institucionálních účtů je řešeno tak, aby byla současně respektována práva uživatelů a zachována vědecká integrita odborných dat. Při smazání individuálního uživatelského účtu nejsou automaticky odstraněna odborná inkubační data, která daný uživatel zadal. Vazba na konkrétního uživatele je v souvisejících záznamech nastavena na prázdnou hodnotu, čímž dochází k anonymizaci původního zadavatele a současně je zachována hodnota dat pro dlouhodobé analýzy.

Při smazání institucionálního účtu je naopak odstraněna i související datová sada, protože bez odpovědného vlastníka dat nelze tyto záznamy smysluplně dále spravovat, licencovat ani poskytovat k dalšímu využití.

2.2 Shromažďovaná data a struktura databáze Inkubáze

Databáze inkubačních parametrů, se kterou Inkubáze pracuje (prezentovaná jako samostatný výstup typu Veřejná databáze) je navržena jako relační systém pro standardizovaný záznam celého průběhu inkubace ptačích vajec — od snesení nebo zařazení vejce do evidence až po jeho konečný výsledek. Databáze shromažďuje několik typů dat: identifikační a taxonomické údaje, morfometrická data vajec, jejich fotografie, fenologická data, průběžná měření během inkubace, technické parametry inkubátorů, managementové zásahy a výsledková data. Důležité je, že stejná struktura podporuje záznamy z umělé inkubace i z přirozené inkubace rodiči. To umožňuje srovnávat podmínky v líhni s biologicky relevantními údaji z rodičovské inkubace a vytvářet referenční rámec pro interpretaci umělé inkubace.

Struktura databáze je postavena kolem tří hlavních entit: **vejce**, **inkubátoru** a **druhu**. Tyto entity jsou dále propojeny s údaji o uživateli, institucích, vlastnictví dat, sdílení dat a druhových souhrnech využívaných v Inkupedii. Základní logiku propojení jednotlivých tabulek znázorňuje ER diagram uvedený na obr. 1.

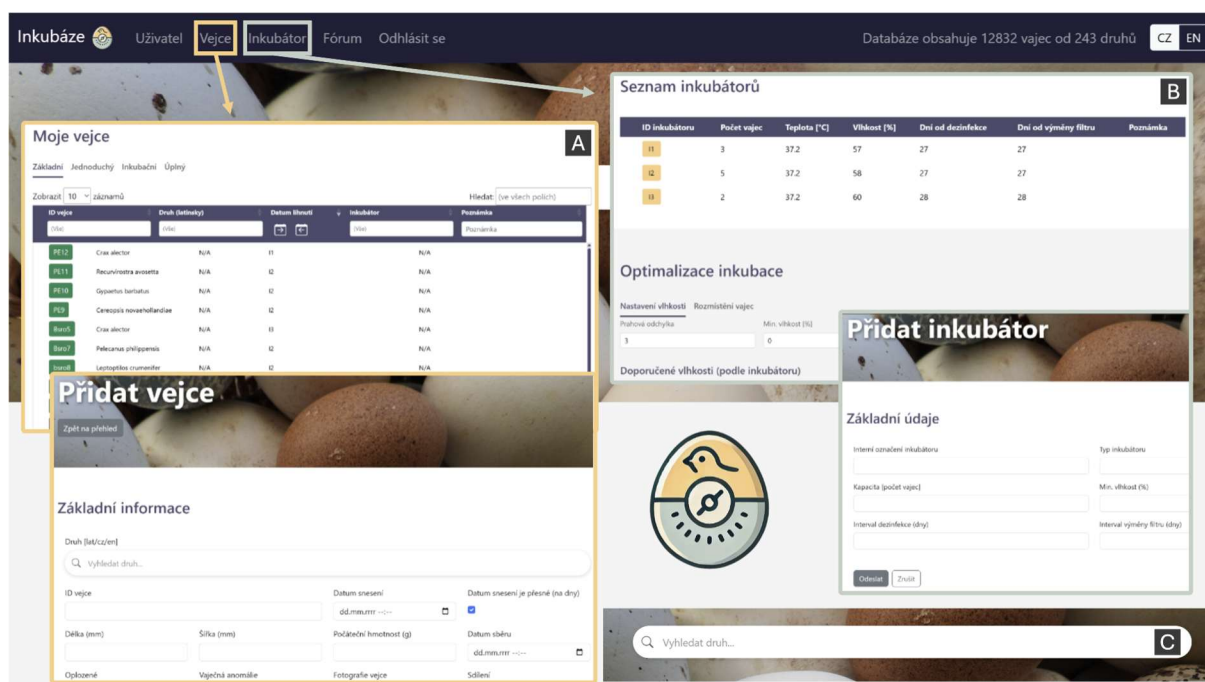


Obrázek 1: Kompletní Entity-Relationships diagram databáze.

Základní jednotkou databáze je jednotlivé **vejce**. U každého vejce jsou ukládány stabilní údaje, které se typicky zadávají při jeho registraci nebo se doplňují během inkubačního cyklu (část zadávacího formuláře (viz obr. 2). Patří mezi ně zejména druhová příslušnost, identifikace vlastníka dat, interní označení vejce, datum snesení a líhnutí, rodičovská identita, místo snesení, rozměry vejce, hmotnost, fertilita, konečný výsledek inkubace, poznámky a případně fotografická dokumentace. Tento základní záznam může být v průběhu inkubace upravován a doplňován podle toho, jak jsou k dispozici další informace.

Druhou vrstvou tvoří opakované průběžné záznamy o inkubaci, které zachycují časově proměnlivé údaje. Sem patří zejména pravidelná vážení vajec, výpočet hmotnostního úbytku, hodnocení fertility a embryonálního vývoje pomocí prosvěcování nebo detekce srdeční aktivity, přesuny vajec mezi inkubátory a záznamy o manuálních zásazích. Databáze umožňuje evidovat například ruční otáčení, chlazení mimo inkubátor nebo zásahy do skořápky používané k úpravě hmotnostního úbytku, jako je propichování či voskování. Při líhnutí lze doplnit také hmotnost mláděte. Tato struktura umožňuje sledovat vejce jako časovou trajektorii, nikoli pouze jako jednorázový záznam.

Samostatnou entitou databáze je **inkubátor**. U každého inkubátoru jsou evidovány jeho identifikace, typ, kapacita a vybrané technické nebo provozní parametry. Na základní záznam inkubátoru navazuje provozní deník, v němž se zaznamenávají změny nastavení, především teplota, vlhkost, režim otáčení, chlazení a údržba. Propojení záznamů vejce s průběžnými záznamy inkubátoru umožňuje zpětně rekonstruovat, v jakých podmínkách se vejce nacházelo v konkrétní fázi vývoje, včetně případných přesunů mezi zařízeními.



Obrázek 2: Inkubáze: A) Karta zadávání vajec, B) Karta inkubátoru, C) Vyhledávání informací o konkrétních druzích na úvodní stránce.

Třetí klíčovou entitou databáze Inkubáze je **druh**, respektive taxon, ke kterému je konkrétní vejce přiřazeno. Druhovát příslušnost není zadávána pouze jako volný text, ale je napojena na kontrolovaný taxonomický a názvoslovný seznam. Tento princip omezuje chyby vznikající nejednotným používáním názvů mezi institucemi, umožňuje spolehlivé slučování záznamů na úrovni druhu nebo vyšší taxonomické úrovně a současně usnadňuje import historických datasetů, v nichž se často vyskytují starší názvy, nejednotné překlady nebo již nepoužívané taxonomické kombinace.

Inkubáze je v současnosti dostupná v češtině a angličtině, s možností pozdějšího rozšíření do dalších jazyků. Tomu odpovídá i struktura ptačího názvosloví, které je v databázi vedeno v českém, anglickém a vědeckém latinském názvosloví. V chovatelské praxi neexistuje jediný univerzálně přijímaný názvoslovný standard, který by byl napříč zoologickými zahradami, chovnými centry a soukromými chovateli používán jednotně. Tento problém je ještě výraznější u starších záznamů, kde se mohou vyskytovat historické názvy druhů, starší taxonomické koncepty, překlady používané pouze lokálně nebo neúplná určení.

Z tohoto důvodu nebyl pro Inkubázi vytvořen pouze jednoduchý seznam platných druhových jmen, ale širší taxonomicko-názvoslovný slovník, zahrnující pro každý taxon všechna dohledaná synonyma ve všech třech používaných jazycích. Jako základní taxonomická páteř byl použit IOC World Bird List v15.1, který poskytuje globální referenční seznam ptačích druhů a jejich oficiálních vědeckých a anglických jmen (Gill et al., 2025). Synonymní vědecká jména a alternativní taxonomické kombinace byly následně dohledávány prostřednictvím GBIF Backbone Taxonomy a GBIF Species API, které jsou určeny mimo jiné k propojování názvů napříč různými taxonomickými zdroji a datovými sadami (GBIF Secretariat, 2023; GBIF Secretariat, 2026). Seznam byl dále rozšířen o názvosloví a synonyma používaná v eBird/Clements Checklist of Birds of the World v2024, široce využívaném v observačních a nálezových databázových systémech (Clements et al., 2024). Pro taxony relevantní zejména v západopalearktické oblasti byly využity také zdroje navazující na HBW and BirdLife International Illustrated Checklist of the Birds of the World a následně aktualizovaný HBW/BirdLife taxonomický checklist, který BirdLife

International používá pro své globální, regionální a národní ochranářské hodnocení (BirdLife International, 2026).

Všechna získaná jména byla následně deduplikována a všechna synonyma byla propojena se společným identifikátorem taxonu. To znamená, že více názvů, synonym nebo jazykových variant může vést ke stejnému taxonu v databázi. Tento princip je důležitý zejména při importu dat, protože umožňuje do značné míry automaticky spárovat záznamy vedené pod různými názvy se stejným platným taxonomickým konceptem. Konfliktní případy, například situace, kdy jeden název mohl odkazovat na více různých taxonů, byly řešeny cílenou manuální kontrolou a opravami, případně manuálním doplňováním názvoslovného slovníku.

Výsledná názvoslovná vrstva obsahuje celkem 48 863 unikátních kombinací českých, anglických a latinských názvů pro 11 507 taxonů, zahrnujících druhy, poddruhy, i názvy čeledí. Zařazení čeledí je prakticky důležité proto, že při současném chovu více druhů v jednom zařízení nemusí být možné určit identitu vejce na úroveň druhu. Typicky se to může týkat například vrubozobých ptáků, ale obdobná situace může nastat i u jiných skupin chovaných společně. V takových případech je možné vejce evidovat alespoň na úrovni čeledi, aby záznam nebyl z databáze ztracen a mohl být později doplněn nebo využit v omezeném rozsahu. Naopak tam, kde jsou v rámci druhu definovány poddruhy a jejich určení je v chovu relevantní, umožňuje Inkubáze evidovat vejce až na úroveň poddruhu.

Databáze umožňuje evidovat také vejce mezidruhových hybridů. Pro tyto případy je v taxonomickém seznamu k dispozici volba „Hybrid – see note“, přičemž rodičovské druhy je nutné specifikovat v poznámce k záznamu. Přestože cílený odchov hybridů není v zoologických zahradách obvykle žádoucí, k nechtěné hybridizaci může v některých chovatelských situacích docházet. Inkubáze tak může dlouhodobě představovat i unikátní zdroj informací o vlastnostech hybridních vajec, například o jejich rozměrech, hmotnosti, fertilitě nebo výsledku inkubace.

V rámci databáze jsou k jednotlivým druhům ukládány souhrnné charakteristiky, které vznikají primárně analýzou v databázi uložených dat.

Z individuálních záznamů jsou následně vytvářeny agregované výstupy pro Inkupedii a analytické nástroje Inkubáze, které jsou ukládány v rámci tabulky *SpecStats* (obr. 1). Po kontrole a zpracování vstupují data do druhových souhrnů, které mohou zahrnovat morfometrii vajec, inkubační dobu, načasování snášení, fertilitu, úspěšnost líhnutí, typické inkubační teploty, hmotnostní úbytek nebo parametry relevantní pro nastavení vlhkosti. V některých případech jsou v této tabulce ukládány i přejaté údaje z jiných, volně přístupných databází, shrnující dosavadní znalosti o životních historiích a dalších znacích druhů. Tyto umožňují používat při výpočtech, či tvorbě druhových karet pro Inkupedii i údaje, které v primárním datasetu chybí, nebo jsou nedostatečně podloženy. Praktické využití této možnosti se do současnosti projevilo zejména u délky inkubační periody, která je klíčová pro většinu prováděných výpočtů a optimalizací.

Součástí databázové struktury jsou také tabulky pro správu uživatelů, institucí a sdílení dat (obr. 1).

2.2.1 Zadávání dat do databáze

Data lze do Inkubáze zadávat dvěma hlavními způsoby. První možností je import historických datasetů, které již existují v digitální podobě a jsou po kontrole a standardizaci převedeny do struktury Inkubáze. Tímto způsobem jsme coby řešitelský tým projektu ve spolupráci s českými zoologickými zahradami připravili a do databáze importovali většinu v současné době zahrnutých dat. Tento způsob importu klade ovšem enormní nároky na připravenost datasetu, jíž je velmi obtížné docílit bez značných programátorských schopností a zkušeností se zpracováním velkých datových sad. Proto v současné

době není k dispozici sada nástrojů, která by umožnila dávkový import takto připravených datasetů uživatelem. Dávkové importy jsou tak možné pouze ve spolupráci se správcí Inkubáze.

Druhou, provozně důležitější možností je průběžné zadávání dat během běžné práce v líhni. Tento způsob snižuje riziko ztráty informací, podporuje úplnost záznamů a umožňuje okamžité využití analytických nástrojů platformy, například při hodnocení hmotnostního úbytku vejce nebo při návrhu úprav nastavení inkubátoru.

2.3 Orientace v datech a provozní práce se záznamy v Inkubázi

Inkubáze není koncipována pouze jako databázové úložiště, ale také jako pracovní prostředí, umožňující pohodlnou každodenní práci s inkubačními daty. Proto obsahuje nástroje pro rychlé filtrování, vyhledávání, kontrolu problematických záznamů a tvorbu přehledů za zvolené období.

2.3.1 Seznamy vajec a filtrování záznamů

Základním způsobem práce s daty jsou tabulkové seznamy vajec. Uživatel může zobrazovat záznamy v několika provozních pohledech, například jako celkový přehled vajec, přehled vajec spojených s konkrétním inkubátorem nebo výběr záznamů relevantních pro určitou instituci. Cílem těchto seznamů je umožnit rychlou orientaci v aktuálně inkubovaných vejcích i v historických datech. Pro orientaci v seznamu vajec je možné zobrazit několik předdefinovaných tabulek, lišících se výběrem sloupců, a to od jednoduchého přehledu s ID vejce, druhem a datem líhnutí, až po úplnou tabulku se všemi sloupci. Jednotlivé výběry sloupců byly vybírány ve spolupráci s chovateli tak, aby pro ně byly dobře využitelné v různých provozních situacích.

V rámci každé tabulky je možné využít interaktivní sloupcově specifické filtry a je možné jí dle jednotlivých sloupců řadit. Uživatel tak může filtrovat například podle druhu, interního označení vejce, data snesení, výsledku inkubace, fertility, inkubátoru, instituce nebo dalších dostupných polí. Vedle toho je možné použít univerzální fulltextové vyhledávání, které prohledává celý seznam napříč všemi sloupci. To je praktické zejména ve větších chovech nebo při práci s historickými daty, kdy uživatel nemusí přesně vědět, ve kterém poli se hledaná informace nachází.

Takové filtrování má význam nejen pro běžnou evidenci, ale i pro kontrolu kvality dat. Uživatel může rychle vyhledat například všechna vejce určitého druhu, vejce z konkrétní sezóny, záznamy bez výsledku inkubace, vejce v určitém inkubátoru nebo případy, u nichž chybí některé podstatné údaje.

2.3.2 Barevné štítky vajec

Pro rychlou orientaci v aktuálním stavu vajec používá Inkubáze barevné štítky. Vejce označená zeleným štítkem jsou vejce, která jsou aktuálně jako aktivní a v průběhu inkubační periody (obr. 2). Šedě označená vejce jsou taková, která byla již z aktivního stavu vyřazena (vylíhla se, nebo byla označena jako odumřelá/neoplozená). Červeně označené štítky vajec znamenají, že vejce nebylo řádně ukončeno, ale je nepravděpodobné, že by u něj stále probíhala plodná inkubace (vejce je v daný moment již delší dobu po konci očekávané inkubační periody).

2.3.3 Přehled péče o vejce za zvolené období

Samostatnou funkcí je vytvoření souhrnu péče o vejce za zadané období, který si uživatel může zobrazit v uživatelské sekci. Uživatel zvolí časové rozmezí, a systém vytvoří agregovaný přehled vajec v daném období. Výstupem je tabulka členěná podle druhu, která shrnuje základní provozní ukazatele: celkový počet vajec, počet oplozených vajec, počet vylíhlých mláďat a počet identifikovaných samic, které se na snášení podílely.

Tento typ přehledu je praktický pro interní hodnocení sezóny, rychlou kontrolu průběhu chovu i komunikaci mezi pracovníky instituce. Svojí formou navíc přesně kopíruje roční výkaz, který všechny zoologické zahrady sdružené v Unii českých a slovenských zoologických zahrad odevzdávají.

2.3.4 Význam pro každodenní práci

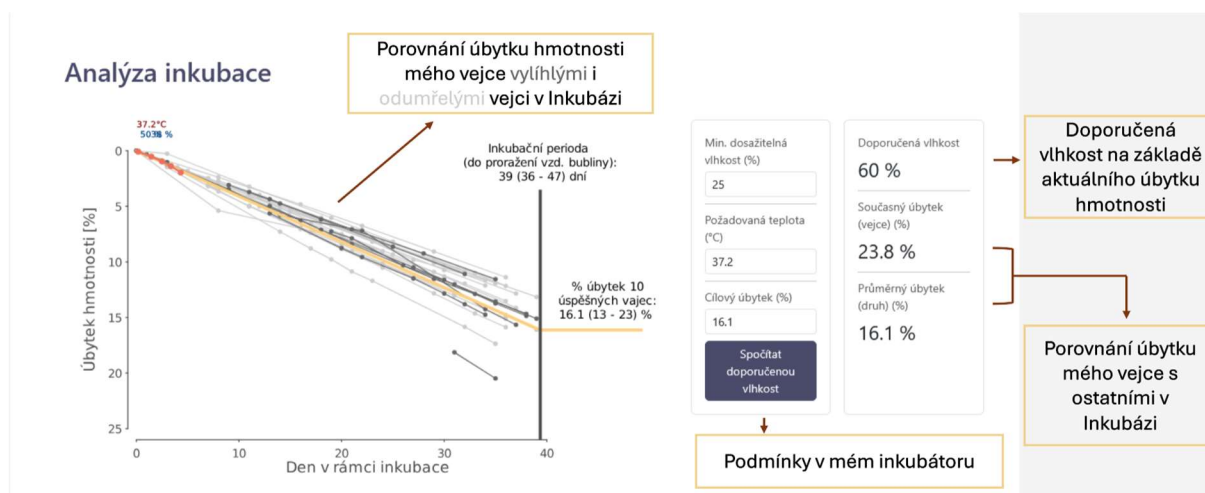
Možnosti filtrování, barevného značení a agregovaných přehledů společně vytvářejí provozní vrstvu Inkubáze. Chovatel se nemusí orientovat pouze podle jednotlivých záznamů, ale může rychle přecházet mezi detailem konkrétního vejce, seznamem všech relevantních vajec a souhrnným pohledem na celou sezónu nebo vybrané období. To je důležité zejména v institucích, kde je současně inkubováno větší množství vajec různých druhů a kde je potřeba rychle rozpoznat, které záznamy jsou úplné, která vejce vyžadují zásah a jaký je celkový výsledek probíhající reprodukční sezóny.

2.4 Analytické nástroje pro optimalizaci inkubace

Jednou z klíčových součástí Inkubáze je sada chytrých analytických nástrojů určených k průběžné optimalizaci umělé inkubace. Jejich hlavním cílem je převést běžně zadávaná provozní data — zejména opakovaná vážení vajec a záznamy o nastavení inkubátoru — do praktických doporučení využitelných při každodenní práci v líhni. Inkubáze tak neslouží pouze k pasivní archivaci dat, ale poskytuje chovateli okamžitou zpětnou vazbu, zda se konkrétní vejce nebo skupina vajec vyvíjí v očekávaném směru a zda je vhodné upravit inkubační podmínky.

Základním principem optimalizačních nástrojů je sledování hmotnostního úbytku vejce, který odráží především ztrátu vody přes skořápku a je jedním z nejpraktičtějších ukazatelů vhodnosti inkubačních podmínek. Příliš rychlý hmotnostní úbytek může signalizovat nadměrné vysychání vejce, zatímco příliš pomalý úbytek může ukazovat na nadměrnou vlhkost prostředí a riziko zadržování tekutin. Protože optimální hmotnostní úbytek se může mezi druhy lišit a u mnoha druhů není přesně znám, Inkubáze kombinuje aktuálně zadávaná data s historickými záznamy uloženými v databázi. Nástroje jsou implementovány na třech úrovních: pro jednotlivé vejce, pro všechna vejce v jednom inkubátoru a pro vejce rozdělená mezi více inkubátorů.

Na úrovni **jednotlivého vejce** je optimalizace dostupná ve chvíli, kdy jsou zadány minimální potřebné informace: přibližné datum snesení, alespoň dvě hmotnostní měření pořízená v různém čase, údaje o nastavení inkubátoru a inkubační doba daného druhu. Systém z těchto údajů vytvoří trajektorii hmotnostního úbytku a porovná ji s referenčními záznamy stejného druhu uloženými v databázi (obr. 3). Výchozím cílem je medián hmotnostního úbytku u úspěšně vylíhnutých vajec daného druhu. Pokud druhově specifická data nejsou k dispozici v dostatečném rozsahu, použije se odhad na úrovni čeledi; pokud nejsou dostupná ani vhodná data pro vyšší taxonomickou skupinu, pracuje systém s obecným cílem celkového hmotnostního úbytku 15 %.

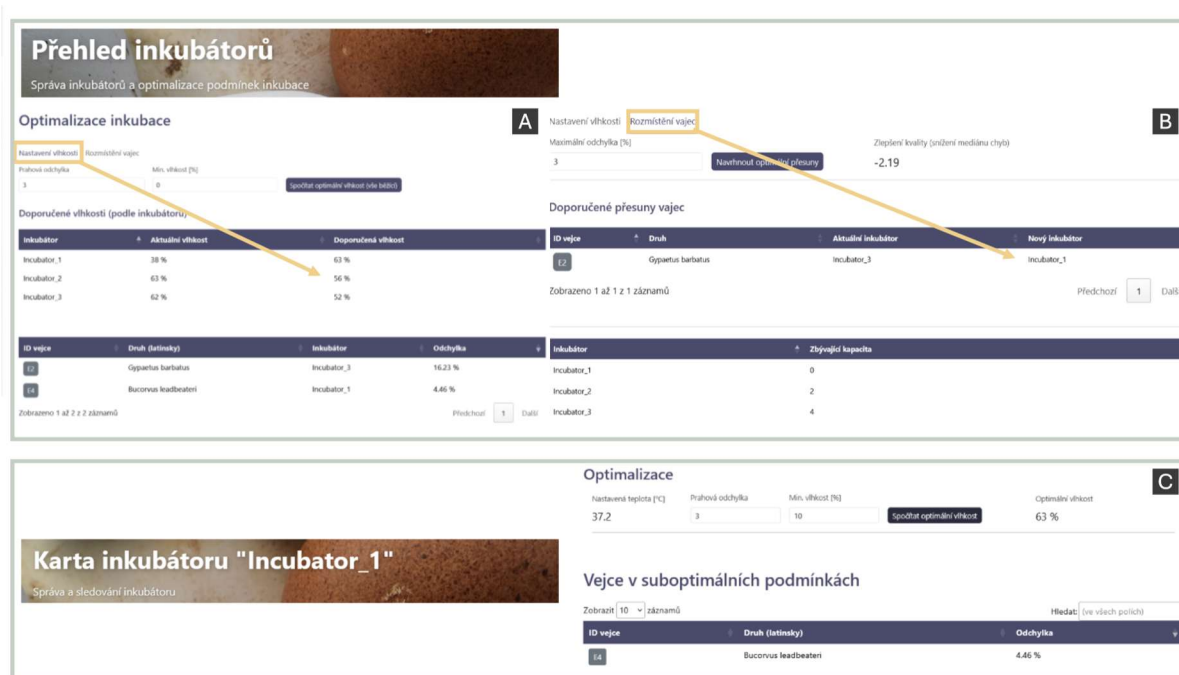


Obrázek 3: Optimalizace inkubace konkrétního vejce na základě průběžného vážení, nastavení inkubátoru a srovnání s průběhem inkubace u předchozích vajec.

Na základě rozdílu mezi aktuální a cílovou trajektorií systém navrhne úpravu relativní vlhkosti v inkubátoru (postup viz kap. 2.4.5), přičemž teplota zůstává zachována (to vychází z celkově velmi konzervativního přístupu chovatelů k nastavení teploty). Uživatel zároveň vidí průběh vývoje daného vejce v grafickém srovnání s historickými záznamy a může v optimalizační kalkulačce testovat alternativní scénáře, například jiný cílový hmotnostní úbytek nebo změnu vybraných vstupních parametrů, včetně zvážení změny teploty. Praktickým výstupem tedy není pouze informace, že se vejce odchyluje od očekávaného průběhu, ale konkrétní návrh, jak upravit podmínky, aby se jeho další vývoj přiblížil cílové trajektorii.

Druhá úroveň optimalizace pracuje s celou skupinou vajec umístěných v jednom inkubátoru (obr. 4). Tato situace je v praxi častá, protože v jednom zařízení může být současně inkubováno více vajec, často i různých druhů nebo různých vývojových stadií. Algoritmus pro každé vejce odhaduje očekávaný konečný hmotnostní úbytek na základě jeho aktuálního vývojového stadia, dosavadní trajektorie a druhově specifických parametrů. Následně hledá takové nastavení vlhkosti, které minimalizuje celkovou odchylku skupiny vajec od jejich cílových hodnot. Cílem tedy není optimalizovat inkubátor podle jediného vejce, ale najít kompromisní nastavení, které je pro aktuální skupinu vajec nejvhodnější.

Tento nástroj je užitečný zejména v situacích, kdy jsou v jednom inkubátoru vejce s odlišnými požadavky nebo odlišným průběhem hmotnostního úbytku. Uživatel může s pomocí filtru podle potřeby upřednostnit vybranou podskupinu vajec, například vejce vzácného, nebo chovatelsky prioritního druhu. Vejce, u nichž predikovaná odchylka od cílové trajektorie překročí nastavený práh, jsou označena jako problematická a systém tím upozorní na možnost jejich přesunu nebo individuálního řešení. Výchozí práh je nastaven na odchylku 3 %, ale může být upraven podle potřeb uživatele.



Obrázek 4: Optimalizace nastavení inkubátoru (c), či skupiny inkubátorů v jednom kroku (a) na základě celé v nich umístěné skupiny vajec a návrh na optimalizaci přerozdělení vajec mezi inkubátory (b).

Třetí úroveň optimalizace pracuje s **více inkubátory současně**. Systém vyhodnocuje predikované hmotnostní trajektorie všech vajec spravovaných uživatelem a hledá případy, kdy by některé vejce mohlo být vhodnější přesunout do jiného inkubátoru s příznivějšími podmínkami. Tato funkce je důležitá zejména v líhních, které pracují s větším počtem vajec, více druhů a několika zařízeními s rozdílným nastavením nebo technickými možnostmi. Pokud je u některého vejce zjištěna výrazná odchylka od optimální trajektorie, systém může navrhnout alternativní inkubátor, v němž by očekávaný další vývoj lépe odpovídal cílovému hmotnostnímu úbytku.

Analytické nástroje Inkubáze jsou navrženy jako mocná rozhodovací podpora, nemohou však zcela nahradit odborný úsudek a zkušenosti chovatele. Doporučení je nutné interpretovat v kontextu druhu, stáří vejce, výsledků prosvěcování, chovatelské priority daného vejce, technických možností líhně a dalších informací, které nemusí být plně zachyceny v databázi. Síla systému spočívá v tom, že chovateli rychle a standardizovaně poskytuje výpočet, který by jinak musel provádět ručně nebo vůbec nebyl k dispozici. To je zvláště důležité u druhů, u nichž je počet dostupných vajec nízký a každé rozhodnutí během inkubace může mít vysokou chovatelskou nebo ochrannou hodnotu.

Přesnost doporučení závisí na množství a kvalitě dat uložených v Inkubázi. U druhů s rozsáhlými historickými záznamy lze využívat druhově specifické referenční hodnoty, zatímco u méně zastoupených taxonů je nutné pracovat s obecným cílem hmotnostního úbytku. S narůstajícím počtem zapojených institucí a kvalitně zdokumentovaných inkubačních případů lze očekávat, že se budou referenční hodnoty zpřesňovat a analytické nástroje budou poskytovat stále robustnější doporučení. Inkubáze je proto koncipována jako systém, jehož praktická hodnota se bude zvyšovat s každým dalším vloženým a validovaným záznamem. Je však zároveň nutné zdůraznit, že již v tuto chvíli se jedná o velmi robustní, a především unikátní nástroj.

2.4.1 Výpočetní postupy používané při optimalizaci nastavení inkubátoru

Optimalizační nástroje Inkubáze vycházejí z jednoduchého biologického principu: během inkubace by vejce mělo ztrácet vodu takovým tempem, aby do konce hlavní inkubační fáze dosáhlo druhově

vhodného celkového hmotnostního úbytku. Protože vodní ztráta závisí na vlastnostech konkrétního vejce, zejména na vodivosti skořápky, a zároveň na teplotě a vlhkosti v inkubátoru, lze z opakovaných vážení a záznamů o nastavení inkubátoru odhadovat, zda se vejce vyvíjí směrem k cílové trajektorii. Výpočetní jádro Inkubáže proto propojuje morfometrii vejce, průběžné hmotnostní ztráty, fyzikální vztahy pro tlak vodních par a optimalizační výpočty relativní vlhkosti.

2.4.2 Odhad základních parametrů vejce

Základními vstupními údaji jsou délka vejce (L), šířka vejce (W), počáteční nebo průběžně měřená hmotnost a datum snesení nebo začátku inkubace. Pokud není počáteční hmotnost známa, lze ji odhadnout z rozměrů vejce. Objem vejce (V) je počítán z délky a šířky podle obecně používaného vztahu:

$$V = k_v \times \frac{L \times W^2}{1000}$$

kde V je objem vejce v cm^3 , L a W jsou délka a šířka vejce v milimetrech a $k_v = 0,51$ je objemový koeficient. Stejný obecný tvar rovnice se používá i pro odhad čerstvé hmotnosti vejce, kde se objemový koeficient nahrazuje hmotnostním koeficientem. Hoyt (1979) ukázal, že pro většinu druhů je hodnota $k_v = 0,51$ blízká reálné hodnotě, jakkoliv jsou druhy, které se v hodnotě koeficientu značně od této hodnoty značně odchyľují a do budoucna tak plánujeme v Inkubázi nahradit tuto univerzální hodnotu druhově specifickými hodnotami. Obdobným způsobem lze dopočítat i hmotnost (Hoyt 1979). V Inkubázi je odhadovaná počáteční hmotnost vyjádřena jako:

$$W_i = k_w \times \frac{L \times W^2}{1000}$$

kde W_i je počáteční hmotnost vejce v gramech a $k_w = 0,54$. Pokud jsou již k dispozici průběžná vážení, může být počáteční hmotnost zpětně dopočtena z nejstaršího vážení extrapolací odhadované denní hmotnostní ztráty:

$$W_{i,\text{pred}} = W_{\text{first}} + \frac{\Delta m}{1000} \times t_{\text{first}}$$

kde W_{first} je nejdříve naměřená hmotnost vejce v gramech, t_{first} je čas od začátku inkubace do prvního vážení ve dnech a Δm je odhadovaná denní hmotnostní ztráta v mg/den . Výsledná počáteční hmotnost nesmí být nižší než maximální naměřená hmotnost vejce, protože vejce by během inkubace nemělo reálně přibývat na hmotnosti. Z rozměrů a aktuální hmotnosti lze dále orientačně odvodit hustotu vejce:

$$\rho = \frac{W_{\text{actual}}}{V}$$

kde ρ je hustota v g/cm^3 , W_{actual} je aktuální hmotnost vejce a V je odhadovaný objem.

2.4.3 Výpočet hmotnostní ztráty

Pravidelné vážení je hlavním praktickým vstupem pro optimalizaci vlhkosti. Biologickým základem tohoto přístupu je skutečnost, že vejce během inkubace ztrácí vodu difúzí přes skořápku a že vhodný celkový úbytek hmotnosti je jedním z klíčových ukazatelů úspěšné inkubace. Rahn a Ar (1974) popsali

vztah mezi délkou inkubace a ztrátou vody u ptačích vajec a Ar a Rahn (1980) shrnuli vodní bilanci vejce během inkubace; v praktické inkubaci se často pracuje s cílovým úbytkem přibližně v rozsahu 12–18 %, s orientační střední hodnotou kolem 15 %, přestože optimální hodnota je druhově specifická, což lze velmi dobře nahlédnout při prohlédnutí grafů v Inkupedii.

Pro každý relevantní záznam (tedy od druhého vážení daného vejce dál) je vypočítána denní hmotnostní ztráta. Výpočet porovnává aktuální hmotnost s nejbližším starším vážením, které je časově vzdálené alespoň 12 hodin, aby nebyl výsledek nadměrně ovlivněn krátkodobou chybou měření:

$$\Delta m_i = \frac{W_j - W_i}{t_i - t_j} \times 1000$$

kde Δm_i je denní hmotnostní ztráta v mg/den, W_j je dřívější hmotnost, W_i pozdější hmotnost a $t_i - t_j$ časový odstup ve dnech. Záporné hodnoty jsou interpretovány jako nereálné přibývání na hmotnosti a jsou oříznuty na nulu. Extrémní skoky mezi váženími jsou považovány za pravděpodobnou chybu měření nebo zápisu a nejsou pro výpočet použity (viz dále).

Z aktuální denní ztráty je odhadován, jaký bude celkový hmotnostní úbytek vejce, pokud bude ztráta pokračovat stejným tempem po celou hlavní inkubační fázi. V Inkubázi je tato fáze standardně vztažena k 96 % inkubační periody, tedy přibližně k době takzvaného „vnitřního líhnutí“, kdy líhnoucí se kuře prorazí do vzduchové bubliny a do té doby přibližně lineární úbytek vody se prudce zrychlí (obecně lze říci, že pokud do této doby ztratí vejce úbytkem vlhkosti v průměru 15%, za zbývajících ~ 4% času vejce ztratí v průměru dalších 5% hmotnosti):

$$\text{loss}_{\text{perc}} = \left(\frac{\Delta m \times 0,001}{W_i} \right) \times (IP \times 0,96) \times 100$$

kde $\text{loss}_{\text{perc}}$ je predikovaná celková hmotnostní ztráta v procentech, Δm denní ztráta v mg/den, W_i počáteční hmotnost vejce a IP inkubační perioda daného druhu ve dnech. Procento času zbývajících do líhnutí je počítáno jako:

$$IP_{\text{perc}} = \frac{t_{\text{inc}}}{IP} \times 100$$

kde t_{inc} je počet dnů od začátku inkubace.

2.4.4 Tlak vodních par a vodivost skořápky

Rychlost ztráty vody z vejce závisí na rozdílu parciálního tlaku vodní páry mezi vnitřkem vejce a okolním vzduchem. Nejprve je proto nutné odhadnout tlak nasycených vodních par při inkubační teplotě. Inkubáze používá empirickou aproximaci tlaku nasycených vodních par, která vyjadřuje závislost na absolutní teplotě:

$$\ln(P_g) = -\frac{5800,2206}{T_K} + 1,3914993 - 4,864 \times 10^{-2} T_K + 4,176 \times 10^{-5} T_K^2 - 1,445 \times 10^{-8} T_K^3 + 6,5460 \ln(T_K)$$

$$T_K = T + 273,15$$

kde T je teplota ve °C, T_K teplota v kelvinech a P_g tlak nasycených vodních par. Výsledek je následně převáděn do jednotek Torr. Výpočet tlaku nasycených vodních par je standardní fyzikální krok při převodu mezi teplotou, relativní vlhkostí a vodním tlakem; obdobné vztahy pro výpočet tlaku vodních par popisuje například Buck (1981).

Vodivost skořápky pro vodní páru (G_{H_2O}) vyjadřuje, jak snadno voda přes skořápku uniká. Je počítána jako poměr denní hmotnostní ztráty a rozdílu tlaku vodní páry mezi vnitřkem vejce a okolím:

$$G_{H_2O} = \frac{\Delta m}{P_g - P_g \times \frac{RH}{100}}$$

kde G_{H_2O} je vodivost skořápky v $\text{mg} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$, Δm je denní hmotnostní ztráta v mg/den , P_g tlak nasycených vodních par při teplotě inkubace a RH relativní vlhkost v inkubátoru. Tento výpočet odpovídá principu, že tok vody přes skořápku je úměrný rozdílu vodního tlaku a vodivosti skořápky (Ar et al. 1974).

Pokud vejce během inkubace prošlo různými inkubátory nebo různým nastavením, teplota a vlhkost se pro dané období počítají jako časově vážený průměr:

$$\bar{T} = \frac{\sum_j T_j \times \Delta t_j}{\sum_j \Delta t_j}$$

$$\bar{RH} = \frac{\sum_j RH_j \times \Delta t_j}{\sum_j \Delta t_j}$$

kde T_j a RH_j jsou teplota a relativní vlhkost v dílčím intervalu a Δt_j délka tohoto intervalu. Krátkodobé změny nastavení tak mají menší váhu než dlouhodobé podmínky.

2.4.5 Výpočet optimální vlhkosti pro jednotlivé vejce

Cílem optimalizace je najít takovou vlhkost, při níž vejce do konce inkubace (respektive do proražení vzduchové bubliny) dosáhne cílového hmotnostního úbytku. Nejprve se vypočte celkové cílové množství vody, které má vejce ztratit:

$$M_{\text{cíl}} = W_i \times \frac{\text{cíl}_{\%}}{100} \times 1000$$

kde $M_{\text{cíl}}$ je cílová ztráta vody v mg , W_i počáteční hmotnost vejce v gramech a $\text{cíl}_{\%}$ cílová celková ztráta hmotnosti v procentech.

Množství vody, které ještě zbývá ztratit, je:

$$M_{\text{zbýv.}} = M_{\text{cíl}} - (W_i - W_{\text{actual}}) \times 1000$$

kde W_{actual} je aktuální hmotnost vejce. Optimální denní ztráta pro zbývající dobu inkubace je:

$$\Delta m_{\text{opt}} = \frac{M_{\text{zb'vá}}}{IP \times 0,96 - t_{\text{inc}}}$$

Z této hodnoty lze při známé vodivosti skořápky odvodit požadovaný rozdíl tlaku vodních par:

$$\Delta P_{\text{cíl}} = \frac{\Delta m_{\text{opt}}}{G_{\text{H}_2\text{O}}}$$

a následně optimální relativní vlhkost:

$$RH_{\text{opt}} = \left(\frac{P_g - \Delta P_{\text{cíl}}}{P_g} \right) \times 100$$

Výsledná hodnota je omezena technickými možnostmi inkubátoru. Úbytek hmotnosti není obvykle problém zpomalit (zvýšením relativní vzdušné vlhkosti), ale zrychlit jej bez strukturálních zásahů do skořápky natolik, aby se dosáhlo požadovaného úbytku problém bývá. Nejnížší dosažitelné hodnoty relativní vlhkosti bývají s ohledem na umístění líhně a počasí mezi 15 a 30 %. Předpokládanou nejnížší dosažitelnou vlhkost je možné v rámci Inkubáze pro jednotlivé inkubátory nastavit. Pokud je vypočtená vlhkost nižší než minimálně dosažitelná vlhkost daného inkubátoru (RH_{min}), je výsledek nastaven na RH_{min} a systém upozorňuje, že požadovaného hmotnostního úbytku nelze při dané teplotě a dané minimální vlhkosti plně dosáhnout. V takovém případě lze hledat také mírnou korekci teploty, protože vyšší teplota zvyšuje tlak nasycených vodních par, a tím i potenciální rozdíl vodních tlaků mezi vejcem a okolím.

2.4.6 Optimalizace společné vlhkosti pro skupinu vajec

V praxi je v jednom inkubátoru často více vajec, která mohou patřit různým druhům, být v různém stádiu nebo mít rozdílnou vodivost skořápky. Není proto možné nastavit ideální vlhkost pro každé vejce zvlášť. Inkubáze řeší tuto situaci jako jednorozměrnou optimalizační úlohu: hledá Brentovou metodou (jednorozměrná optimalizace) jednu společnou hodnotu relativní vlhkosti (RH^*), která minimalizuje odchylku predikované ztráty od cílové ztráty napříč vejci v daném inkubátoru.

Predikovaná celková ztráta hmotnosti při zadané vlhkosti je:

$$\text{loss}_{\text{pred}} = \frac{1000(W_i - W_{\text{actual}}) + G_{\text{H}_2\text{O}} \left(P_g - P_g \times \frac{RH}{100} \right) (IP \times 0,96 - t_{\text{inc}})}{W_i \times 1000} \times 100$$

kde první člen v čitateli představuje již proběhlou ztrátu vody a druhý člen predikuje ztrátu ve zbývajících částech inkubace při zadané vlhkosti.

Společná optimální vlhkost pro inkubátor je definována jako:

$$RH^* = \arg \min_{RH \in [RH_{\text{min}}, 100]} \text{median}_i(|\text{loss}_{\text{pred},i}(RH) - \text{cíl}_i|)$$

kde $\text{loss}_{\text{pred},i}(RH)$ je predikovaná celková ztráta vejce i při vlhkosti RH a cíl_i je cílová ztráta pro daný druh nebo vejce. Použití mediánu místo průměru zvyšuje robustnost výpočtu vůči výskytu odlehlých hodnot. Vejce, jejichž odchylka od cíle při společné optimální vlhkosti překročí definovaný práh,

například 3 procentní body, jsou označena jako problematická a vhodná ke zvážení přesunu do jiného inkubátoru.

2.4.7 Optimalizace rozmístění vajec mezi inkubátory

Nejobecnější úrovní optimalizace je návrh na optimalizaci rozmístění vajec mezi více inkubátory. Pro každé vejce lze vypočítat individuální optimální vlhkost ($RH_{opt,i}$). Pokud je v chovu k dispozici více inkubátorů s různým nastavením a kapacitou, systém hledá takové přiřazení vajec, které sníží rozdíl mezi individuální optimální vlhkostí vejce a vlhkostí inkubátoru, do něhož je vejce umístěno.

Zjednodušeně lze optimalizační kritérium vyjádřit jako minimalizaci součtu odchylek:

$$\min \sum_i |RH_{opt,i} - RH_{set,a(i)}|$$

kde $RH_{opt,i}$ je individuální optimální vlhkost vejce i , $RH_{set,a(i)}$ je nastavená vlhkost inkubátoru, do něhož je vejce i přiřazeno, a $a(i)$ označuje přiřazení vejce ke konkrétnímu inkubátoru. Výpočet zároveň respektuje kapacitní omezení inkubátorů:

$$n_j \leq C_j$$

kde n_j je počet vajec přiřazených do inkubátoru j a C_j jeho kapacita.

Vejce, která jsou již v tolerančním pásmu kolem cílového hmotnostního úbytku, zůstávají ve stávajícím inkubátoru. U ostatních vajec je přesun doporučen pouze tehdy, pokud nové umístění skutečně zmenší rozdíl mezi potřebnou a dostupnou vlhkostí. Prioritně se řeší vejce s největší odchylkou a vejce, která mají nejmenší počet vhodných alternativních inkubátorů. Tento postup tak poskytuje praktický návrh, jak využít dostupné inkubátory tak, aby se problematická vejce dostala blíže ke svým individuálním potřebám.

2.4.8 Výpočet druhových referenčních hodnot

Optimalizační výpočty jsou tím přesnější, čím více dat je pro daný druh v Inkubázi k dispozici. Po doplnění nových záznamů se průběžně aktualizují druhové souhrny, zejména průměrná inkubační perioda, rozměry vajec, počáteční hmotnost, vodivost skořápky, typický hmotnostní úbytek úspěšně inkubovaných vajec a doporučené nastavení teploty a vlhkosti. Doporučené hodnoty teploty a vlhkosti jsou počítány jako časově vážený průměr nastavení inkubátorů v obdobích, kdy byla vejce aktivně inkubována.

Pokud pro konkrétní druh nejsou dostatečná data, systém může použít průměr příbuzných druhů ze stejné čeledi nebo obecnou výchozí hodnotu. Uživatel je při výpočtu informován o tom, z jakého zdroje byly parametry převzaty - zda jde o druhově specifická data, nebo obecný výchozí odhad. To je důležité pro interpretaci doporučení: výpočet založený na vlastních datech daného druhu má větší váhu než výpočet založený na obecné náhradní hodnotě.

2.5 Kontrolní mechanismy při zadávání a zpracování dat v Inkubázi

Inkubáze obsahuje víceúrovňový systém kontrol, jehož cílem je omezit chybné zadávání dat, zachytit nelogické nebo neúplné záznamy a upozornit uživatele na situace, které mohou ovlivnit spolehlivost následných výpočtů. Kontroly probíhají v několika fázích: přímo při vyplňování formulářů, při

serverovém zpracování dat, při importu větších tabulek a následně také při automatických výpočtech nad uloženými záznamy. Tento princip je důležitý zejména proto, že Inkubáze pracuje s daty z různých institucí, druhů, inkubátorů a historických zdrojů, kde mohou vznikat chyby v datech, časech, hmotnostech, taxonomii nebo přiřazení záznamů k instituci.

2.5.1 Kontrola přístupu a oprávnění

První úroveň kontrol se týká přístupu k datům a uživatelských oprávnění. Uživatel musí být pro neveřejné funkce přihlášen a může pracovat pouze s daty, k nimž má oprávnění prostřednictvím své institucionální afiliace. Systém kontroluje, zda je uživatel členem příslušné instituce, zda má právo upravovat konkrétní vejce, zda používá inkubátor patřící jeho instituci a zda nepřistupuje k cizím datům mimo nastavený licenční režim. Tím je zajištěno, že odborné záznamy zůstávají pod kontrolou svého vlastníka a že nedochází k nechtěným zásahům do dat jiné instituce.

Součástí bezpečnostní vrstvy jsou také obecné ochranné mechanismy běžné pro webové aplikace: ochrana formulářů proti neoprávněným požadavkům, omezení počtu pokusů o přihlášení, validace souborových typů při nahrávání fotografií a kontrola toho, že datumové údaje nejsou zadávány do budoucnosti. Tyto kontroly neslouží pouze k technickému zabezpečení, ale zároveň chrání databázi před záznamy, které by byly nedůvěryhodné.

2.5.2 Kontrolní mechanismy při zadávání vejce

Při zakládání nebo úpravě záznamu vejce systém ověřuje základní úplnost a logiku zadaných údajů. Povinné je zejména přiřazení taxonu a interního označení vejce. Aby záznam nebyl časově neurčitý, musí být vyplněn alespoň jeden relevantní datumový údaj. Pokud jsou zadávány rozměry vejce, musí být uvedena délka i šířka současně, obě hodnoty musí být kladné a délka nesmí být menší než šířka.

Důležitou částí je kontrola chronologie inkubačního cyklu. Systém ověřuje, že jednotlivá data dávají biologický a provozní smysl, konkrétně že datum snesení nepředchází pozdějším událostem, začátek přirozené inkubace není před snesením vejce, datum nálezu není před snesením ani po zahájení dalších inkubačních kroků a datum líhnutí není před ukončením inkubace. Povolena časová posloupnost odpovídá logice: snesení vejce → začátek přirozené inkubace → nález nebo zařazení do evidence → chlazení nebo začátek umělé inkubace → přesun do dolíhne (inkubátoru ve speciálním režimu pro finální fázi inkubace) → ukončení inkubace → líhnutí.

Specificky je kontrolována také počáteční hmotnost. Tu lze zadat pouze tehdy, pokud je známé datum nálezu nebo zařazení vejce do evidence. Bez časového ukotvení by totiž hmotnost nemohla být správně interpretována jako počáteční nebo průběžná hodnota. Pokud uživatel vyplní datum líhnutí, systém automaticky nastaví výsledek inkubace jako vylíhnuté vejce, aby se předešlo neúplným nebo rozporným výsledkovým záznamům.

2.5.3 Kontrolní mechanismy při zadávání průběžných záznamů o inkubaci

Druhou zásadní oblastí jsou záznamy o průběhu inkubace, tedy především vážení, přesuny mezi inkubátory a záznamy o aktuálních podmínkách. Každý nový záznam musí časově spadat do reálného průběhu inkubace: nesmí být v budoucnosti a nesmí předcházet datu snesení vejce. Důležité v tomto ohledu je, že defaultně systém pracuje s časem a datumem v okamžiku zadávání dat do systému. To jednak limituje možnosti chyb a jednak motivuje uživatele, aby skutečně zadávali data v reálném čase. Systém také upozorňuje na duplicitní záznamy pro stejné vejce a stejný čas.

Klíčovým předmětem kontroly je monotónní pokles hmotnosti. Vejce by během inkubace mělo postupně ztrácet hmotnost, protože z něj difuzí přes skořápku uniká voda. Při zadání nové hmotnosti proto systém porovnává hodnotu s předchozími i pozdějšími záznamy. Nově zadaná hmotnost nesmí

být vyšší než hmotnosti zaznamenané v minulosti a nesmí být nižší než hmotnosti zaznamenané v budoucnosti. Tento mechanismus pomáhá zachytit překlepy, záměnu vajec, špatné jednotky, chybně opsané desetinné čárky nebo chybně zařazené datum vážení.

2.5.4 Kontrolní mechanismy při správě inkubátorů

Samostatné kontrolní mechanismy se vztahují k evidenci inkubátorů a jejich provozních záznamů. U každého inkubátoru je kontrolováno vyplnění základních údajů, jako je interní označení, typ zařízení a kapacita. Kapacita musí být kladné celé číslo. Pokud je vyplněna minimální dosažitelná vlhkost, musí být v rozsahu 0–100 %. Podobně jsou kontrolovány servisní intervaly, například interval dezinfekce nebo výměny filtru.

Při zadávání záznamů do provozního deníku inkubátoru systém kontroluje datum záznamu a formální platnost zadaných hodnot teploty a vlhkosti. Vlhkost musí být ve fyzikálně a technicky smysluplném rozsahu 0–100 %. Tyto kontroly jsou důležité proto, že záznamy o nastavení inkubátoru vstupují do výpočtů vodivosti skořápky, hmotnostního úbytku a doporučené vlhkosti. Chybný údaj o teplotě nebo vlhkosti by se tedy mohl promítnout do nesprávného optimalizačního doporučení.

2.5.5 Kontrolní mechanismy pro dávkový import dat

Inkubáze v současné době z důvodů popsaných výše nepodporuje hromadný import dat z CSV souborů uživateli, dávkový import byl nicméně připraven a použit pro historické datasety. Každý import prochází sadou kontrol podle typu importovaných dat. U importu vajec se kontroluje přítomnost povinných sloupců, existence daného taxonu v databázi, typ importovaných dat a správný formát datumů. U importu průběžných záznamů jednotlivých vajec je ověřována předchozí existence vejce v dané instituci, existence odpovídajícího inkubátoru a správný časový formát. U importu údržby inkubátorů je kontrolováno platné interní označení inkubátoru a správný formát data.

Chyby jsou zaznamenávány po jednotlivých řádcích. Pokud chyba neblokuje celý import, problematický řádek je přeskočen a import ostatních záznamů pokračuje. Uživatel po dokončení obdrží seznam zjištěných chyb, který může následně využít k opravě zdrojové tabulky. Tento postup je praktický zejména u větších datasetů, kde by zastavení celého importu kvůli jedné chybě bylo neefektivní.

2.5.6 Varování uživatele vyplývající z chybějících údajů při optimalizačních výpočtech

Další kontrolní vrstva vzniká po uložení dat, kdy systém vyhodnocuje, zda jsou dostupné všechny vstupy potřebné pro výpočet stavu vejce a optimalizaci inkubátoru. Pokud některý klíčový údaj chybí, vejce je z optimalizačních výpočtů vyřazeno a uživatel je informován o důvodu. Typickými důvody jsou chybějící průběžná vážení, chybějící hmotnost při snesení (a nedostatek údajů pro její dopočet), neznámá inkubační perioda druhu, nemožnost určit stáří vejce, chybějící počáteční hmotnost, nebo chybějící údaje o teplotě a vlhkosti v inkubátoru.

Pokud nejsou k dispozici druhově specifické referenční hodnoty, systém může použít náhradní zdroje, například průměr příbuzných druhů ze stejné čeledi nebo obecnou výchozí hodnotu. Uživatel je přitom informován, z jakého zdroje výpočet vychází. To je důležité pro interpretaci spolehlivosti doporučení: výpočet založený na vlastních datech daného druhu je silnější než doporučení založené na obecném nebo pro čeleď odvozeném odhadu.

2.6 Inkupedie – živá encyklopedie ptačí inkubace

Jednou z klíčových součástí celého systému Inkubáze je Inkupedie - veřejně přístupná encyklopedie, jejímž cílem je převádět jednotlivé inkubační záznamy do srozumitelných a prakticky upotřebitelných druhových souhrnů. Zatímco hlavní databázové a analytické nástroje Inkubáze slouží především

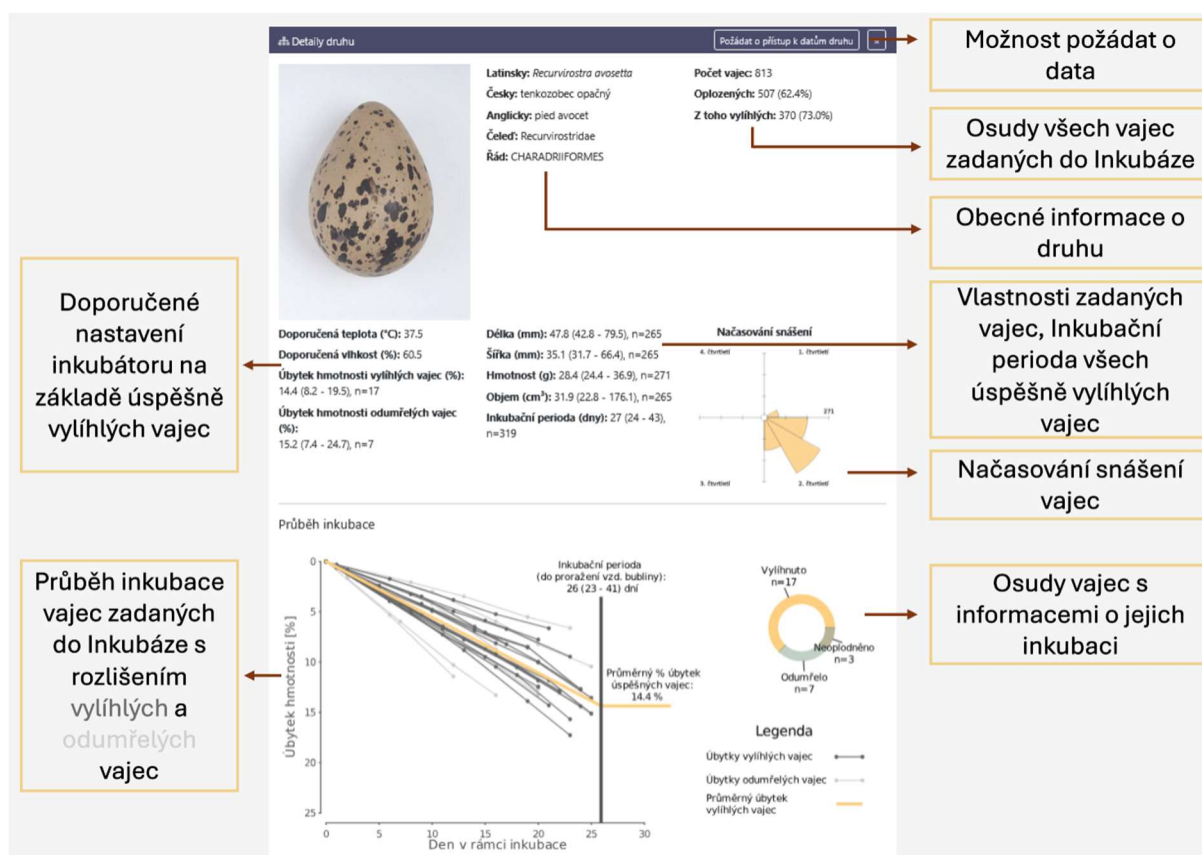
registrovaným uživatelům a institucím, Inkupedie představuje otevřené rozhraní určené chovatelům, kurátorům, výzkumníkům i dalším zájemcům o inkubaci ptačích vajec.

Inkupedie je koncipována jako živá znalostní báze, nikoli jako statický textový atlas. Vstupují do ní neukrytá data vložená do Inkubáze, která po základní kontrole a zpracování vytvářejí druhové statistiky a automaticky se v reálném čase propisují do průběžně generovaných druhových karet. Tyto karty shrnují informace, které jsou pro daný taxon v databázi dostupné, a průběžně se aktualizují s tím, jak se do systému doplňují nové záznamy. Tím se praktická zkušenost jednotlivých chovů postupně převádí do společně využitelného zdroje informací.

Základní jednotkou Inkupedie je druhová karta (obr. 5). Ta obsahuje taxonomické a názvoslovné údaje, tedy vědecký, český a anglický název druhu, čeleď a řád. Dále uvádí počty evidovaných vajec, počty oplozených vajec a počty úspěšně vylíhlých mláďat. Prakticky důležitou součástí jsou hodnoty použitelné při umělé inkubaci: hmotnostní úbytek úspěšně vylíhlých a neúspěšných vajec, délka a šířka vejce, hmotnost, objem a inkubační doba. Součástí karty mohou být také fotografie vajec, graf snáškové sezónnosti a graf průběhu inkubace vyjádřený změnou hmotnosti vejce v čase. Na základě těchto údajů jsou poskytována doporučené inkubační teploty a vlhkosti, které definují takové nastavení inkubátoru, které zajistí průměrnému vejci daného druhu vývoj odpovídající průměrnému váhovému úbytku úspěšných vajec daného druhu.

Druhové karty tak umožňují uživatelům rychle zjistit, jaké hodnoty byly u daného druhu dosud v Inkubázi zaznamenány. Chovatel může porovnat vlastní vejce s agregovanými hodnotami z jiných chovů, například z hlediska velikosti, inkubační doby, typické hmotnostní ztráty nebo používaného nastavení líhně. Kurátor může získat přehled o dostupnosti dat pro konkrétní taxon a o základních ukazatelích reprodukční úspěšnosti. Výzkumník může Inkupedii využít jako rozcestník k identifikaci druhů a datových sad, které mohou být vhodné pro podrobnější analýzu nebo pro navázání spolupráce s vlastníky dat. Inkupedie je zároveň hlavním zpětnovazebním mechanismem, jehož prostřednictvím se data vložená do Inkubáze vracejí zpět chovatelské komunitě.

Důležitou součástí interpretace Inkupedie je vědomí, že všechny výstupy jsou generovány z primárních dat, která mohou být u některých druhů neúplná nebo zatížena nepřesnostmi. Inkupedie na tuto skutečnost výslovně upozorňuje. Hodnoty v druhových kartách proto nemají být chápány jako definitivní biologické konstanty, ale jako aktuální souhrn dosud dostupných záznamů. Jejich spolehlivost poroste s počtem vajec, rozsahem zapojených institucí a úplností zadávaných údajů.



Obrázek 5: Příklad druhové karty v Inkupedii.

2.7 Shrnutí datasetu dostupného prostřednictvím Inkubáže

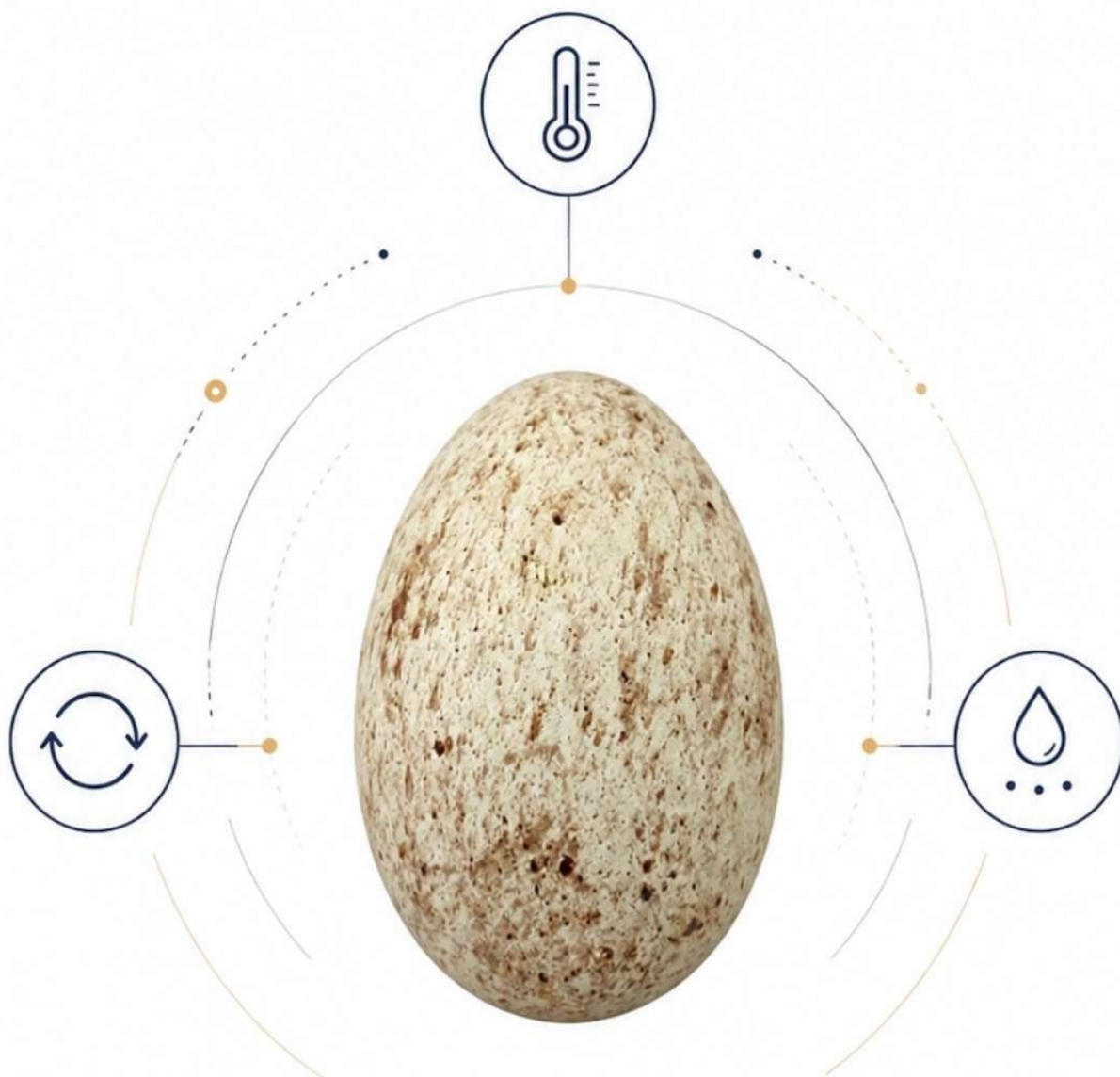
K datu ukončení projektu (30.6.2026) obsahovala Inkubáž soubor 24 543 vajec od 470 druhů, reprezentujících 73 čeledí a 29 řádů. Tento dataset tedy tvořil datovou bázi pro tvorbu Inkupedie v daném momentu. Dataset zahrnoval také řadu ochranných významných taxonů: jeden druh vedený jako vyhynulý v přírodě, 13 kriticky ohrožených druhů, 27 ohrožených druhů, 43 zranitelných druhů a 43 téměř ohrožených druhů.

Pokrytí jednotlivých typů údajů se mezi vejci, druhy i institucemi liší. Fertilita byla zaznamenána u 19 028 vajec od 407 druhů. Konečný osud oplozených vajec, tedy zda došlo k vylíhnutí nebo úhynu embrya, byl dostupný u 11 027 vajec od 357 druhů. Přesné datum snesení bylo známo u 12 596 vajec od 399 druhů, což umožňuje vyhodnocovat fenologii snášení v lidské péči. Rozměry vajec byly dostupné u 13 402 vajec od 392 druhů.

Z hlediska optimalizace inkubace jsou zvláště cenná opakovaná vážení vajec. Ta byla v datasetu dostupná u 11 173 vajec od 373 druhů, celkem ve formě 39 770 jednotlivých hmotnostních záznamů. U 6 508 vajec od 296 druhů bylo možné odhadnout vodivost skořápky, protože byla k dispozici kompletní sada informací, sestávající z kombinace alespoň dvou vážení, odhadu počáteční hmotnosti a dostatečných informací o nastavení inkubátoru mezi měřeními. Právě tato část databáze má nejvyšší praktickou hodnotu pro analytické nástroje Inkubáže, protože umožňuje vyhodnocovat trajektorii hmotnostního úbytku, nastavovat cílovou vlhkost a porovnávat aktuální průběh inkubace s historickými záznamy.

Současný dataset zároveň ukazuje hlavní omezení i potenciál Inkubáže. Data nejsou u všech druhů stejně úplná, protože vznikala v různých institucích, v různých obdobích a často ještě před zavedením jednotné metodiky. Přesto již nyní pokrývají široké spektrum taxonů a poskytují informace, které jsou

pro mnoho druhů mimo lidskou péči obtížně dostupné. S pokračujícím používáním platformy lze očekávat, že podíl kompletních záznamů poroste, zejména u údajů klíčových pro praktickou inkubaci: dat snesení, rozměrů a hmotnosti vajec, průběžných vážení, fertility, výsledku inkubace a nastavení inkubátorů.



Příručka

Monitoring přirozené inkubace
s využitím metod biologingu

- Proč v chovech inkubaci monitorovat
- Hlavní metody a postupy ozkoušené v rámci projektu
- Měření inkubace pomocí miniaturních dataloggerů AXY5 v biomimetických vaječných podkladcích
- Příkladové studie založené na využití dat získaných v průběhu projektu
 1. Přirozená inkubace není stabilní líheň
 2. Co prozradí kamera o spánku a čištění peří během inkubace
 3. Jak ptáci skutečně otáčejí vejce

3. Monitoring přirozené inkubace s využitím metod biologingu

V navazující části souhrnné zprávy přejdeme od monitoringu umělé inkubace k možnostem, jaké nám využití moderních dataloggerů skýtá pro monitoring inkubace přirozené. V rámci projektu jsme se intenzivně věnovali zejména převodu našich dlouholetých zkušeností získaných výzkumem inkubace u volně žijících populací do podmínek chovů. Vznikl tak nejen cenný dataset často unikátních měření, ale především rozsáhlý soubor otestovaných metodických postupů, který prezentujeme formou komplexní metodické příručky, coby samostatného výstupu projektu.

3.1 Proč v chovech inkubaci monitorovat?

Ačkoliv umělá inkubace, jíž jsme se věnovali v předchozí části je v mnoha chovech široce využívanou technikou, ve většině případů je stále preferovanou technikou přirozený odchov rodiči. V takovém případě je úspěch reprodukce závislý zejména na chování rodičů. To je ovšem často ovlivněno značně nepřirozenými podmínkami v expozici, ať již fyzikálními (teplotní, či vlhkostní poměry), nebo biotickými (přítomnost návštěvníků, či ostatních chovaných živočichů). Chovatel tak často ví, že pták sedí na hnízdě, ale bez monitoringu inkubace obvykle neví, jakou teplotu vejce skutečně má, jak často dochází k přerušení inkubace, zda rodiče vejce dostatečně otáčejí, zda se na hnízdě střídají oba partneři nebo zda inkubaci nenarušuje rušení, neklid ve voliére či nevhodné mikroklima. Dále popsané nástroje tak mohou být v první řadě neocenitelné při diagnostice toho, proč se odchov u některého druhu nedaří.

Druhý, a neméně významný důvod pro monitoring přirozené inkubace v chovech je naopak situace, kdy se odchov přirozenou cestou daří lépe, než odchov umělý. Při vědomí faktu, že líhivost vajec v přírodě bývá za optimálních podmínek (s vyloučením vlivu predace apod.) okolo 90 % i více, lze zběžným prolistováním Inkupedie komentované v předchozí části snadno nahlédnout, že tento problém je přítomen u velké části chovaného druhového spektra. Monitoring přirozené inkubace nám v takovém případě umožňuje změřit, jak probíhá úspěšná inkubace rodiči a získat neocenitelnou inspiraci. Přirozená inkubace zde může sloužit jako biologická reference pro nastavení líhně: z měření lze zjistit, jakých teplot vejce dosahuje pod rodičem, jak moc teplota přirozeně kolísá, jak často je vejce otáčeno a jak se mění podmínky během dne, nebo při střídání rodičů. Tyto informace mohou pomoci upravit nastavení inkubátoru, zejména teplotu, režim otáčení, chlazení, vlhkost a celkovou strategii práce s vejcem. U druhů, pro které neexistují dobře fungující inkubační protokoly, může být monitoring rodičovské inkubace jedním z nejlepších zdrojů praktických dat, jakkoliv se v současné době jedná jednoznačně o zdroj nedostatečně využívaný.

Hlavní přínos monitoringu tedy nespočívá v samotném sběru dat, ale v možnosti lépe porozumět příčinám reprodukčních neúspěchů a získat daty podložená vodítka pro konkrétní chovatelská rozhodnutí: zda ponechat vejce rodičům, odebrat je do líhně, změnit uspořádání hnízda, omezit rušení, upravit složení páru, nebo použít data z rodičovské inkubace pro přesnější nastavení inkubátoru.

3.2 Hlavní metody a postupy ozkoušené v rámci projektu

Základních metod, jakými lze inkubaci, či její jednotlivé parametry monitorovat, je několik. Každá z nich má nějaké přednosti a nevýhody a pokud chceme dosáhnout skutečně komplexního monitoringu, je nutné používat jejich kombinaci. Projektový tým má rozsáhlé zkušenosti s využitím řady monitorovacích systémů, z nichž část vyvinul speciálně pro potřeby takového monitoringu. Při tvorbě a testování postupů pro monitoring inkubační péče v chovatelských zařízeních jsme však kladli důraz i na co nejširší možnost využití doporučených postupů. Ve výstupech projektu proto klademe důraz na postupy, které lze provozovat výhradně s využitím komerčně dostupných zařízení.

První metodou je použití **umělého vejce (biomimetického podkladku) s vloženým dataloggerem**. Takový podkladek napodobuje skutečné vejce tvarem, velikostí, hmotností a povrchovou úpravou a po vložení do hnízda je inkubován rodičem jako součást snůšky (detailně viz kap. 3.3). Datalogger umístěný uvnitř podkladku zaznamenává vnitřní teplotu a při použití akcelerometru a magnetometru je možné jej využít také pro detekci pohybů a otáčení vejce. Tato metoda poskytuje informaci přímo z pohledu inkubovaného vejce a je vhodná zejména pro ověření teplotního režimu, frekvence otáčení a stability rodičovské péče. U větších vajec je pro dosažení lepšího vzhledu dataloggerů více, umístěných na několika místech po obvodu vejce. Takový postup lépe změří inkubační teplotu v místě skutečného umístění embrya a umožní také určit typický teplotní gradient, který při inkubaci u většiny vajec vzniká.

Druhou metodou je **měření teploty a vlhkosti v hníždě a jeho okolí**. K tomu se používají dataloggery s externími měřicími sondami, umístěnými jednak přímo do hnízdní výstelky mezi vejce, jednak mimo hnízdo jako referenční záznam okolních podmínek. Porovnáním obou záznamů lze rekonstruovat inkubační rytmus, tedy sekvenci inkubačních sezení a inkubačních přestávek. Tato metoda je vhodná i pro druhy s příliš malými vejci, do nichž nelze vložit datalogger, a zároveň dobře doplňuje data z podkladku. Její interpretace však vyžaduje opatrnost, protože teplota naměřená v hníždě závisí na přesné poloze čidla, hloubce výstelky a kontaktu s tělem rodiče.

Třetí základní metodou je **kontinuální kamerový záznam hnízda**. Kamera umožňuje zjistit, co se na hníždě skutečně děje v okamžicích, kdy datalogger zaznamená změnu teploty nebo pohyb vejce. Díky videozáznamu lze rozlišit inkubační přestávky, střídání partnerů, úpravy hnízda, otáčení vajec, rušení jinými jedinci, agresivní interakce, přítomnost chovatele nebo jiné události, které ovlivňují inkubační podmínky. Kamerový záznam ale lze využít i pro výzkum řady detailů v chování rodičů, které přímo s inkubací nemusí souviset – například toho, kdy rodiče v období inkubací spí, věnují se hygieně peří, či jak spolu komunikují.

Při výzkumech ve volné přírodě se nám rovněž jako velmi efektivní osvědčila metoda RFID záznamu přítomnosti konkrétních rodičů na hníždě. Tuto metodu se nám však z důvodu neexistence vhodného komerčně dostupného zařízení do chovatelské praxe převést nepodařilo.

Výběr vhodného monitorovacího systému musí vycházet nejen z konkrétní otázky, na kterou potřebuji odpovědět, ale ze specifík sledovaného druhu. U druhů citlivých na rušení je vhodné začínat co nejjednodušší instalací, minimalizovat počet návštěv hnízda, provádět zásahy během přirozených inkubačních přestávek, a v případě použití biomimetického měřicího podkladku co nejvěrněji simulovat reálné vejce. U druhů, které manipulují s hnízdním materiálem nebo ničí kabely, je vhodné preferovat zařízení ukrytá uvnitř podkladku a ostatní techniku umístit mimo dosah ptáků. U druhů hnízdících v budkách může být praktičtější instalace kamery shora a vyvedení napájení mimo budku, zatímco u druhů hnízdících na zemi je nutné více řešit maskování techniky, vedení kabelů a stabilitu instalace.

Samostatnou část metodických doporučení tvoří provozní postupy, bez nichž nelze získaná data spolehlivě interpretovat. Při každé instalaci je nutné zaznamenat druh, identitu páru nebo jedince, počet vajec, fázi inkubace, typ a číslo použitého zařízení, nastavení dataloggeru, přesný čas spuštění a ukončení záznamu, umístění zařízení a všechny mimořádné události. Zvláštní pozornost vyžaduje časová synchronizace mezi dataloggery a kamerami. Bez ní nelze přesně propojit pokles teploty, otočení vejce nebo jinou změnu v datech s konkrétním chováním rodiče na záznamu. Originální soubory stažené z dataloggerů a kamer je nutné archiverovat beze změn, analýzy mají probíhat pouze na kopiích a všechny soubory mají být pojmenovány jednotně podle roku, druhu a konkrétní instalace. Respektování těchto postupů nejen že zajistí hladký průběh monitoringu a umožní získat z dat informace, kvůli kterým byl monitoring proveden. Především však umožní data znovu využít i kdykoliv v budoucnu, například v rámci spolupráce na srovnávacích vědeckých studiích.

Nutnou, často však velmi problematickou částí celého procesu monitoringu inkubace je zpracování dat. Volně dostupnými, a i pro osoby bez hlubších analytických schopností přístupnými, nástroji jsou online aplikace vytvořené řešitelským týmem v rámci předchozího projektu, které byly nyní adaptovány na využití komerčně dostupných typů dataloggerů. Data z podkladků lze vizualizovat a předzpracovat pomocí aplikace accelR8 (<https://bergmaps.fzp.czu.cz/accelr8/>) a teplotně-vlhkostní data z hnízda lze analyzovat v aplikaci incub8 (<https://bergfzp.shinyapps.io/incub8/>). Videozáznamy lze pak vyhodnocovat ve volně přístupném programu BORIS (Friard a Gamba 2016) pomocí předem definovaného etogramu. Výsledkem není pouze sada grafů, ale prakticky interpretovatelný obraz průběhu inkubace, který může chovateli pomoci rozhodnout, zda a jak do inkubace zasáhnout.

3.3 Měření inkubace pomocí miniaturních dataloggerů AXY5 v biomimetických vaječných podkladcích

Jednou z nejpřímějších metod monitoringu inkubace je vložení miniaturního dataloggeru do umělého vejce, které rodič přijme jako součást snůšky. Takový podkladek zaznamenává podmínky přímo „z pohledu vejce“, nikoliv pouze mikroklima v hnízdě nebo chování rodiče pozorované zvenčí. V chovatelské praxi je tato metoda vhodná zejména tehdy, když chceme ověřit, zda rodiče vejce skutečně stabilně zahřívají, jak často dochází k inkubačním přestávkám, zda vejce pravidelně otáčejí a jak se přirozený režim inkubace liší od podmínek používaných v líhni. V rámci projektu jsme vyvinuli několik typů biomimetických 3D tištěných podkladků a připravili databázi tiskových modelů, pokrývajících drtivou většinu tvarů a velikostí ptačích vajec (viz kap. 4). Co se týče vhodného dataloggeru, doporučujeme pracovat s komerčně dostupnými dataloggerů typu AXY5-XS (<https://www.technosmart.eu/axy-5-xs/>), který s rozměry 21 × 11 × 7 mm umožňuje měření teploty a snímání senzory akcelerometru a magnetometru, a to až po dobu přibližně dvou týdnů.

3.3.1 Měření vnitřní teploty vejce

Teplotní záznam z dataloggeru vloženého do podkladku poskytuje podstatně relevantnější informaci než měření teploty vzduchu v hnízdě, protože podkladek je přímo zahříván sedícím rodičem a je mechanicky začleněn do snůšky. Přesto je nutné zdůraznit, že teplota naměřená uvnitř umělého vejce není vždy totožná s teplotou embrya ve skutečném vejci. V přirozeném vejci se teplota může výrazně lišit mezi částí přivrácenou k rodiči a částí směřující k podkladu. Tento teplotní gradient je důležitý zejména proto, že embryo není umístěno ve středu vejce. Vyvíjí se na povrchu žloutku, který má nižší hustotu než bílek, a díky systému poutek a vztlakovým vlastnostem žloutku zůstává embryo orientováno blíže horní straně vejce, tedy blíže tělu inkubujícího rodiče.

Z toho vyplývá zásadní interpretační omezení: centrálně umístěný datalogger měří především teplotu vnitřního objemu podkladku, nikoliv nutně teplotu v místě, kde se ve skutečném vejci nachází embryo. U větších vajec proto může být biologicky informativnější model vaječného podkladku s dataloggerem umístěnými blíže ke skořápce, protože lépe zachytí teplotní gradient mezi horní a dolní částí vejce a umožní odhadnout, jaké teplotě může být embryo reálně vystaveno. Námi navržené modely pro tyto případy zahrnují tři, takto laterálně umístěné prostory pro vložení dataloggeru. U menších vajec, kde lze použít pouze jeden centrální datalogger, je vhodné interpretovat naměřené hodnoty zejména jako standardizovaný ukazatel tepelného režimu vejce, vhodný pro srovnání mezi dny, páry, druhy nebo mezi rodičovskou a umělou inkubací, nikoliv jako přesnou absolutní teplotu embrya.

Při instalaci je proto důležité zaznamenat, jaký typ podkladku byl použit, kde je datalogger v podkladku umístěn a jakou má orientaci (kde přesně se nalézají jednotlivá čidla).. U modelů s jedním dataloggerem by měla být poloha při opakovaných instalacích co nejjednodušší. U modelů se třemi dutinami je vhodné orientovat datalogger tak, aby teplotní čidlo směřovalo k povrchu vejce. Umožňuje to lépe

interpretovat rozdíly mezi jednotlivými částmi podkladku a odlišit skutečné změny v inkubačním režimu od artefaktů způsobených polohou senzoru.

Z praktického hlediska lze z teplotních dat získat několik typů informací. Stabilní vysoká teplota s krátkými výkyvy obvykle odpovídá pravidelné inkubaci s krátkými přestávkami nebo střídáním rodičů. Dlouhé poklesy teploty mohou ukazovat na prodloužené opuštění hnízda, rušení nebo neschopnost rodiče udržet vhodné podmínky při inkubaci. Opakované krátké výkyvy mohou souviset se střídáním partnerů, úpravou hnízda, otáčením vajec nebo jiným chováním na hnízdě.

3.3.2 Měření otáčení vejce

Druhou zásadní funkcí dataloggeru v podkladku je záznam otáčení vejce. Otáčení je důležitou součástí inkubace, protože podporuje normální vývoj embryonálních membrán, využití bílku, vývoj cévního systému a správné uložení embrya před líhnutím. Experimentální práce u drůbeže i studie u volně žijících druhů ukazují, že nedostatečné nebo nevhodně načasované otáčení může snižovat líhivost, zatímco přirozené režimy otáčení se mohou výrazně lišit mezi druhy, denní dobou, fází inkubace a ekologickým kontextem (New 1957; Tullett & Deeming 1987; Deeming 1989; Shaffer et al. 2014; Pešková et al. 2024).

Pro spolehlivý záznam otáčení ve všech třech osách musí datalogger zahrnovat nejen tříosý akcelerometr, ale také tříosý magnetometr. Akcelerometr umožňuje určit orientaci vůči gravitačnímu poli, ale sám o sobě nedokáže spolehlivě popsat všechny změny orientace v prostoru, zejména rotaci kolem svislé osy. Magnetometr doplňuje informaci o orientaci vůči zemskému magnetickému poli. Kombinace obou senzorů proto umožňuje převést změny polohy dataloggeru na změny orientace vejce ve třech směrech (Pešková et al. 2024).

Základní podmínkou kvalitního záznamu je, aby se datalogger uvnitř podkladku nepohyboval nezávisle na vejci. Pokud by v dutině volně „plaval“, zaznamenával by pohyby vlastního těla dataloggeru, nikoliv skutečné otočení vejce. Proto musí být v podkladku mechanicky fixován, například přesnou velikostí dutiny nebo jeho jemným vypodložením. U opakovaných měření je zároveň vhodné dodržovat stejnou orientaci vložení dataloggeru, protože to usnadňuje kontrolu dat a srovnání mezi instalacemi.

3.3.3 Zpracování a analýza dat o otáčení

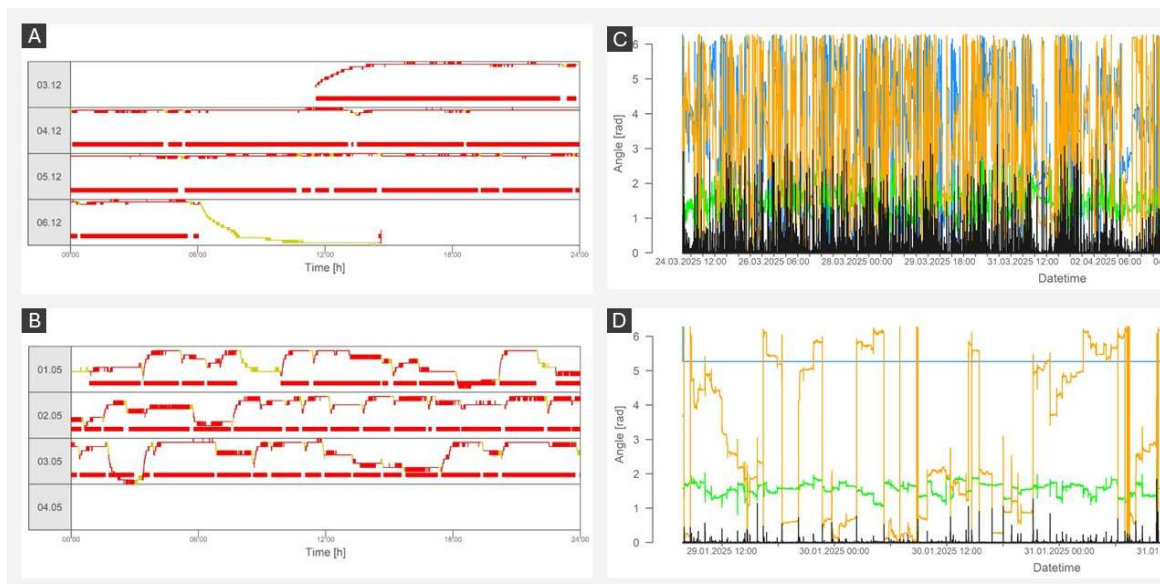
Surová data z akcelerometru a magnetometru nelze interpretovat přímo jako biologicky smysluplné „otočení vejce“. Nejprve je nutné provést řadu poměrně komplikovaných kroků, jejichž cílem je odstranit šum, zkalibrovat senzory a zkombinovat měření obou senzorů do popisu orientace v prostoru. Následně jednotlivé kroky stručně shrnujeme a zdůvodňujeme, pro komplexnější postup lze nahlédnout například do publikace Pešková et al. (2024). Obecně se však jedná o poměrně komplexní analytickou záležitost. Aplikace [accelR8](#) vyvinutá již v rámci předchozího projektu (SS01020383) provede těmito kroky i analyticky nezkušeného uživatele a poskytne mu grafické i sumarizační výstupy jednoduše interpretovatelné i pro potřeby diagnózy chovatelských problémů.

Před samotnou analýzou je potřeba provést několik přípravných procesů. Nejprve je vhodné provést automatickou kalibraci akcelerometru a magnetometru, která minimalizuje systematické chyby měření, vzniklé nehomogenitami v gravitačním (akcelerometr) a magnetickém (magnetometr) poli země. Následuje vyhlazení dat pomocí filtrů s nízkou propustností, které potlačí náhodný šum, a v případě akcelerometru i dynamickou složku zrychlení. Z kalibrovaných a filtrovaných dat jsou následně vypočteny úhly orientace, obvykle označované jako roll (náklon), pitch (sklon) a heading (azimut). Tyto úhly popisují natočení objektu ve třech osách, avšak pro obecnou kvantifikaci otáčení vejce je vhodné je dále převést na reprezentaci pomocí kvaternionů. Tento postup umožňuje sloučit změny orientace

ve všech třech osách do jediné hodnoty celkové úhlové změny mezi dvěma po sobě jdoucími časovými kroky.

V praktické interpretaci obvykle pracujeme se dvěma typy metrik. Prvním je frekvence otočení, tedy počet časových úseků, v nichž byl zaznamenán pohyb vejce větší, než stanovená hladina. Typicky se jedná o počet vteřin/hodinu, kdy byl pohyb větší, než 1° , případně 5° . Druhým typem metrik je součet úhlových změn, který kombinuje informaci o tom, jak často se vejce pohybovalo a jak velký byl rozsah těchto pohybů. Obvykle se jedná o sumu stupňů (případně radiánů) za hodinu či den.

Tyto metriky mohou být následně použity pro další analýzu – při aplikovaném využití v chovech to však není vždy nutné. Již základní vizualizace teploty, úhlů orientace a hodinových součtů úhlových změn může ukázat, zda rodiče vejce pravidelně manipulují, zda otáčení probíhá pouze při střídání partnerů, zda je přítomný denní rytmus, nebo zda vejce zůstává po dlouhé úseky zcela bez pohybu (obr. 6). Při srovnání s kamerovým záznamem lze navíc určit, zda změny orientace odpovídají cílenému otáčení zobákem, úpravám hnízdního materiálu, vstávání a usedání rodiče, nebo neklidu způsobenému rušením (viz kap. 3.3.5).



Obrázek 6: Příklady vizualizace dat získaných multisenzorickými datalogery v podkladcích pro monitoring inkubačních podmínek: Teplota vajec: A) Pelikán kadeřavý (*Pelecanus crispus*) – kontinuální inkubační sezení (občas velmi mírný pokles teploty – interakce mezi jedinci) (Safari Park Dvůr Králové), B) Jeřáb mandžuský (*Grus japonensis*) – kolísání teploty, četné střídání inkubačního sezení a přestávek (Zoo Olomouc); Otáčení vajec: C) Amazónek černotemenný (*Pionites melanocephalus*) – druh s nejvyšší naměřenou frekvencí otáčení vajec (85,87/hod) (Zoo Olomouc), D) Pelikán kadeřavý (*Pelecanus crispus*): druh s nejnižší naměřenou frekvencí otáčení vajec (9,91 hod) (Safari Park Dvůr Králové).

3.3.4 Měření teploty a vlhkosti v hnízdě pomocí dataloggerů MSR

Vedle podkladků s dataloggerem představuje důležitou součást komplexního monitoringu inkubace měření teploty a vlhkosti přímo v hnízdě a v jeho bezprostředním okolí. Komerčně dostupných přístrojů umožňujících aplikaci tohoto přístupu lze nalézt více. Jako nejlepší variantu jsme po zkušenostech vyhodnotili vícekanálové datalogery typu MSR (<https://www.msr.ch/en/product/datalogger-temperature-humidity-pressure-acceleration-msr145/>), které existují ve více variantách. Nám se jako nejpraktičtější osvědčily varianty umožňující současný záznam hodnot ze dvou externích sond, měřících jak teplotu, tak i relativní vzdušnou vlhkost. Jedna sonda je umístěna do hnízdní výstelky mezi vejce a druhá mimo hnízdo jako referenční záznam okolního prostředí. Tento přístup je vhodný zejména tam,

kde je cílem popsat inkubační rytmus rodičů, tedy střídání období aktivní inkubace a inkubačních přestávek, a současně sledovat, jak se podmínky v hnízdě liší od okolního mikroklimatu.

Hlavní výhodou MSR oproti dataloggeru umístěnému přímo ve vaječném podkladku je jeho širší použitelnost. Lze jej nasadit i u druhů s vejci příliš malými pro vložení miniaturního dataloggeru do velikostně věrného podkladku. Tělo přístroje může být skryto mimo vlastní hnízdo, zatímco do hnízdní výstelky je zavedena pouze relativně malá sonda. MSR je proto vhodný pro druhy, u nichž potřebujeme získat informaci o průběhu inkubace, ale není možné nebo praktické použít loggerové vejce. Zároveň dobře doplňuje data z podkladku: zatímco podkladek ukazuje teplotní režim z pohledu vejce, MSR umožňuje interpretovat tento režim ve vztahu k teplotě a vlhkosti okolního prostředí. Na druhou stranu významným omezením je faktická nemožnost standardizace měřených teplot s ohledem na podmínky zažívané embryem. Ve většině případů totiž není možné umístit sondu tak, aby byla vyloučena možnost jejího pohybu vzhledem k okolním vejcím.

Při standardní instalaci MSR dojde k umístění jedné sondy do středu hnízda, ideálně do výstelky mezi vejce nebo těsně vedle snůšky, a druhé sondy mimo hnízdo, obvykle do vzdálenosti do jednoho metru od hnízda. Sonda v hnízdě zaznamenává mikroklima prostoru, v němž se nacházejí vejce, zatímco vnější sonda slouží jako kontrola okolních podmínek. Porovnáním obou časových řad (v menší míře i jen na základě sondy vnitřní) lze odhadnout, kdy rodič na hnízdě seděl a kdy snůšku opustil. Během inkubace bývá teplota v hnízdě stabilnější a často vyšší než okolní teplota; během přestávky se naopak hodnoty v hnízdě postupně přibližují okolním podmínkám. Podobně může na přítomnost rodiče a zakrytí hnízda reagovat i relativní vlhkost.

Při instalaci je nutné věnovat velkou pozornost poloze sondy. Naměřená teplota není přímo teplotou embrya ani přesnou teplotou uvnitř vejce; jde o teplotu v konkrétním místě měření. V ideálním případě by sonda měla z výstelky vyčnívat a nacházet se v rovině s vejce. U hlubších nebo volnějších hnízd může být sonda postupně zahrabána, u druhů aktivně přestavujících hnízdo může být naopak vytažena mimo snůšku. Abychom tomuto alespoň částečně zabránili, sondu je vhodné v hnízdě fixovat tak, aby co nejméně překážela ptákům a zároveň neměnila polohu. U měkkého substrátu může stačit zapíchnutí sondy do výstelky, u volnějších hnízd lze kabel zajistit tenkým drátkem, kolíkem nebo přichycením do tvaru písmene V. Kabel by měl být veden co nejnižší ve výstelce nebo v substrátu, aby nebyl nápadný a aby za něj pták neměl tendenci tahat. Tělo dataloggeru je vhodné umístit mimo dosah ptáka, například pod substrát, za konstrukční prvek voliéry nebo mimo budku. Vzhledem k tomu, že řada druhů (papoušci, tučňáci, někteří dravci, a další) má tendenci datalogger i přidružené kabely ničit, je nutné obecně celou instalaci zamaskovat co možná nejlépe. Zároveň, i když je přístroj určen pro práci v náročnějších podmínkách, je vhodné chránit jej před prachem, vlhkostí a mechanickým poškozením vhodným obalem (například uzavíratelnými igelitovými sáčky).

Datalogger MSR se před instalací nastavuje v dodaném softwaru. Pro inkubační monitoring je vhodná vysoká frekvence záznamu, například jeden záznam za sekundu, protože umožňuje zachytit i krátké inkubační přestávky a rychlé změny teploty. Při dlouhodobém monitoringu je však nutné zohlednit kapacitu baterie a paměti. Orientační výdrž pro MSR při záznamu v sekundovém intervalu je jeden měsíc, což umožňuje pokrýt i delší část inkubační periody bez opakovaného rušení hnízda pro většinu ptačích druhů.

Při každé instalaci je nezbytné zaznamenat přesný čas spuštění, identitu přístroje, polohu obou sond, použitou frekvenci záznamu, druh, identitu páru, počet vajec a fázi inkubace. Stejně důležité je zaznamenat všechny návštěvy hnízda, kontroly, výměny zařízení nebo jiné události, které mohou v datech vyvolat anomálie. Záznam z MSR je často interpretován společně s kamerovým záznamem nebo daty z podkladku, proto musí být časy všech zařízení co nejpřesněji synchronizovány. Bez přesné časové

vazby nelze vždy spolehlivě určit, zda konkrétní pokles teploty odpovídal přirozené přestávce, střídání rodičů, vyrušení chovatelem nebo technické změně polohy senzoru.

Pro vyhodnocení teplotně-vlhkostních dat lze využít aplikaci [incub8](#), vyvinutou řešitelským týmem v rámci předchozího projektu (TJ02000199), která je určena k automatické detekci inkubačního rytmu z dat hnízdního a okolního senzoru a umožní chovateli velmi pohodlně se dostat k informativní vizualizaci i základním a v praxi upotřebitelným kvantitám vyplývajícím z inkubačního rytmu. Aplikace kromě základní vizualizace pracuje se skrytými Markovovými modely, s jejichž pomocí umožňuje s vysokou přesností automaticky odhadnout, kdy byl rodič na hnízdě a kdy probíhala inkubační přestávka. Vstupem jsou časové řady teploty a případně vlhkosti v hnízdě a mimo hnízdo. Výstupem je grafický aktogram inkubace a tabulka predikovaných stavů, kterou lze dále kombinovat s kamerovým záznamem, daty z podkladku, a dalšími. V praxi tak lze z MSR dat získat nejen přehled o tom, zda rodič inkuboval, ale také kvantifikovat délku a četnost přestávek, stabilitu inkubace v průběhu dne a noci nebo reakce rodičů na rušení – tedy charakteristiky s velkým potenciálem pro diagnostiku problémů při přirozené inkubaci.

Z chovatelského hlediska je měření pomocí MSR užitečné zejména u párů s nejistým průběhem inkubace. Umožňuje rozlišit situaci, kdy rodič sedí na hnízdě stabilně, ale vejce se přesto nevyvíjí, od situace, kdy dochází k opakovanému nebo dlouhodobému opouštění snůšky. Pomáhá také vyhodnotit vliv okolních podmínek, například přehřívání snůšky, ochlazování během noci, nevhodnou vlhkost v hnízdním materiálu nebo rozdíly mezi krytými a otevřenými hnízdy. S ohledem na extrémní variabilitu v inkubačních rytmech je však vhodné monitorovat (například u chovatelsky cenných druhů) i páry sedící obvyklým způsobem. Umožní to totiž získat představu (jakýsi referenční dataset) o tom, jak daný druh inkubuje a jak variabilní jeho inkubační rytmus je. To následně umožní lépe identifikovat co je skutečně odchylka indikující nějaký problém.

3.3.5 Využití kamerového záznamu při monitoringu inkubace

Kamerový záznam je další klíčovou součástí komplexního monitoringu inkubace mimo jiné proto, že poskytuje behaviorální kontext k údajům získaným z dataloggerů. Teplotní nebo pohybový záznam sám o sobě často ukáže, že se v hnízdě něco stalo — například poklesla teplota, vejce se pohnulo nebo došlo k delší přestávce v inkubaci — ale bez obrazu nelze vždy určit příčinu. Kamera umožňuje rozlišit, zda daná změna odpovídá běžnému střídání rodičů, inkubační přestávce, úpravě hnízdního materiálu, otáčení vajec, rušení návštěvníky, konfliktu s jiným jedincem, predací, nebo technickému problému s měřicím zařízením.

Hlavní výhodou kamerového záznamu je možnost sledovat inkubační chování bez opakované fyzické kontroly hnízda. To je důležité zejména u citlivých druhů, u nichž může přítomnost člověka vést k opuštění snůšky nebo k narušení normální péče. Kamera umožňuje zpětně vyhodnotit, jak dlouho rodiče na hnízdě sedí, jak často snůšku opouštějí, zda se partneři střídají, který z rodičů inkubuje, zda dochází k nočním přestávkám, jak často ptáci vejce otáčejí a zda se v okolí hnízda objevují rušivé podněty. V chovech tak může pomoci odhalit příčiny reprodukčních neúspěchů, které by jinak zůstaly skryté.

Při výběru kamery je důležité, aby zařízení umožňovalo kontinuální záznam, mělo dostatečnou kapacitu ukládání dat, spolehlivé napájení a použitelné noční vidění. Pro běžný monitoring hnízda postačují cenově dostupné bezpečnostní nebo domácí kamery, pokud umožňují ukládání záznamu na microSD kartu a nevyžadují trvalé připojení k Wi-Fi. Výdrž kamery je obvykle dána především kapacitou powerbanky a velikostí paměťové karty. V metodice jsou jako prakticky použitelné uváděny malé kamery napájené z powerbanky, které při vhodné konfiguraci umožňují několikadenní kontinuální záznam (obr. 7). Pro řadu druhů hnízdních na předem definovaných hnízdních podložkách, či hnízdních

boxech je však možné použít i sofistikovanější kamerové systémy umístěné na fixním místě a disponující dálkovým přenosem a stabilním zdrojem elektrické energie. Řada zoologických zahrad již podobné systémy využívá a s interpretací podobných dat tak mají chovatelé mnohem větší zkušenosti, než s ostatními typy dataloggerů.



Obrázek 7: A) kompletní set pro snímání chování na hnízdě: powerbanka, napájecí kabel, microSD karta, kamera a stojánek, B) instalace kamery u hnízda.

Kamera by měla být umístěna tak, aby v záběru bylo celé hnízdo a jeho bezprostřední okolí. Příliš úzký záběr sice umožní detailní sledování chování na vejcích, ale může přehlédnout příchod druhého rodiče, rušení jinými ptáky nebo pohyb osob v okolí hnízda. Příliš široký záběr naopak ztěžuje rozpoznání jemných projevů chování, například otáčení vajec nebo drobných manipulací v hnízdě. Stejně tak může ztížit identifikaci rodičů (například podle kroužků). Umístění kamery musí vždy odrážet kompromis mezi co největším detailem a požadovaným kontextem. U druhů hnízdících v budkách může být kamera instalována shora nebo z boku budky, u druhů hnízdících na zemi je nutné řešit stabilní uchycení a maskování kamery v substrátu, vegetaci, konstrukci voliéry nebo jiných nenápadných prvcích prostředí.

Zásadní je minimalizovat rušivý vliv kamery. Zařízení by mělo být pokud možno nenápadné, stabilní a umístěné tak, aby neomezovalo pohyb ptáků. Viditelné kabely, kontrolní diody nebo nápadná powerbanka mohou vést k neklidu rodičů nebo k aktivnímu poškození techniky. Kabely je proto vhodné vést mimo dosah ptáků, fixovat je k podkladu, překrýt substrátem nebo hnízdním materiálem a podle potřeby ztmavit či zamaskovat. Svítící kontrolky je vhodné vypnout v nastavení kamery, pokud to zařízení umožňuje, nebo je zakrýt neprůsvitnou páskou. Infračervený přísvit by měl být dostatečný pro noční rozlišení chování, ale nesmí ptáky viditelně rušit.

Jedním z nejdůležitějších kroků je časová synchronizace kamerového záznamu s ostatními dataloggery. Bez přesné časové vazby nelze spolehlivě propojit například pokles teploty v podkladku s okamžikem, kdy rodič opustil hnízdo, nebo pohyb vejce s konkrétní manipulací zaznamenanou na videu. U kamer bez spolehlivých interních hodin je vhodné na začátku záznamu ukázat do objektivu displej telefonu nebo počítače s přesným časem včetně sekund (stejným časem, ve kterém jsou nastavené použité

dataloggeru) a tento čas současně zapsat do instalačního protokolu. Stejný postup je vhodné opakovat při každé výměně baterie, paměťové karty nebo při delší návštěvě hnízda během monitoringu.

Systematické vyhodnocení videozáznamu je vhodné provádět v programu BORIS (Friard a Gamba 2016). Tento software umožňuje vytvořit etogram, tedy předem definovaný seznam sledovaných typů chování, a při přehrávání videa je zaznamenávat pomocí klávesových zkratk. Pro monitoring inkubace jsou typickými kategoriemi například přítomnost rodiče na hnízdě, vlastní inkubace, inkubační přestávka, střídání partnerů, spánek, péče o peří, úprava hnízda, otáčení vajec, návštěva jiného jedince, agresivní interakce nebo reakce na rušení. Některé typy chování se zaznamenávají jako stavové události s počátkem a koncem, například inkubace nebo přítomnost na hnízdě. Jiné se zaznamenávají jako bodové události, například otočení vejce, vokalizace nebo útok na vetřelce. Výstupem analýzy je tabulka událostí s přesným časem, délkou trvání a kategorií chování.

V chovatelské praxi je kamerový záznam užitečný zejména jako nástroj pro interpretaci problémových situací. Pokud se vejce nevyvíjejí správně, kamera může ukázat, že rodič na hnízdě sedí jen málo, často vstává, špatně vejce zakrývá, nechává je mimo kontakt s tělem nebo je neotáčí. Může také odhalit opakované rušení jinými ptáky ve voliéře, agresi mezi partnery, vyrušování návštěvníky nebo zásahy chovatelů v nevhodnou dobu. Naopak u stabilně inkubujících párů může kamerový záznam potvrdit, že rodičovská péče probíhá normálně, a případný problém je třeba hledat spíše v kvalitě vejce, fertilitě, či mikroklimatu chovného zařízení.

3.4 Příkladové studie založené na využití dat získaných v průběhu projektu.

Následně rozebereme formou tří stručných příkladových studií vybrané aspekty, které nám dataset sebraný v průběhu řešení projektů v kolekcích spoluřešitelských organizací i dalších zoologických zahradách umožnil vyhodnotit. Jedná se o unikátní, a doposud v takovémto rozsahu nerealizované vhledy do různých aspektů inkubačního chování. Jejich zajímavost není jen v tom, že se jedná o málo prozkoumané aspekty ptačí biologie, ale i v tom, že přinášejí i prakticky využitelné závěry aplikovatelné při řízení chovů.

3.4.1 Příkladová studie 1: Přirozená inkubace není stabilní líheň

Jedním z nejdůležitějších praktických přínosů biomimetických vaječných podkladků s dataloggerem je možnost zjistit, jakou teplotu vejce (respektive embrya v něm) skutečně zažívá pod rodičem. Přestože jde o veličinu zásadní pro vývoj embrya i pro nastavení umělé inkubace, u většiny druhů je stále málo známa (Deeming & Reynolds, 2015). V líhních se obvykle používají relativně stabilní teploty kolem 37–38 °C, zatímco přirozená inkubace je dynamický proces ovlivněný chováním rodičů, délkou inkubačních přestávek, střídáním partnerů na hnízdě, mikroklimatem hnízda, polohou vejce ve snůšce i konkrétním uspořádáním expozice.

V rámci projektu byly vnitřní teploty měřeny pomocí chytrých podkladků na 56 hnízdech 43 druhů ptáků, reprezentujících 10 řádů (obr. 8). Data pocházela ze Safari Parku Dvůr Králové, Zoo Brno, Zoo Olomouc a Zoo Zlín. Tam, kde to velikost vejce umožňovala, byly použity varianty podkladků se třemi současně zaznamenávajícími dataloggeru, což umožňuje přesněji vystihnout teplotu, kterou skutečně zažívá embryo (viz kap. 3.3.1). Hnízda byla obvykle monitorována přibližně tři dny, což umožnilo zachytit běžný denní průběh inkubace, noční režim i krátkodobé výkyvy spojené s přestávkami nebo změnami chování rodičů. Podkladek s dataloggerem byl vložen do snůšky a zaznamenával teplotu v pravidelných intervalech. Naměřené hodnoty byly následně shrnuty podle ptačích řádů a porovnány s teplotami běžně používanými při umělé inkubaci. Abychom se při měření co nejvíce přiblížili teplotám, které

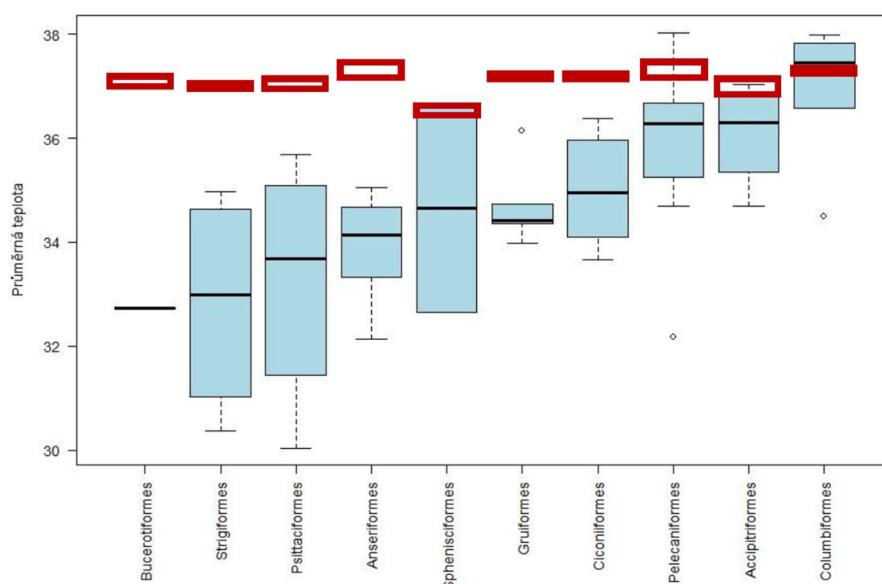
zažívá při inkubaci embryo (tedy teplotám nahoře ve vejci blízko hnízdní nažině inkubujícího rodiče), z víceloggerových podkladků jsme použili v každém okamžiku nejvyšší teplotu.

Výsledky ukazují, že teploty měřené v podkladcích jsou nejen výrazně variabilnější, ale zejména v průměru nižší než standardní teploty používané v líhni. Na grafu (obr. 8) lze vidět srovnání průměrných teplot zaznamenaných v podkladcích s běžně používanými teplotami umělé inkubace. Modré boxploty ukazují variabilitu průměrných teplot měřených v hnízdech daného řádu, zatímco červené značky orientační rozpětí hodnot používaných v inkubátorech pro daný řád (ty jsme zjistili neformální anketou mezi spolupracovníky z řad chovatelů ze zoologických zahrad). U řady skupin leží medián přirozeně měřených teplot přibližně mezi 33–36 °C, zatímco standardní nastavení líhně se pohybuje okolo 37 °C. Naopak u některých řádů, například u části holubů nebo pelikánů a jejich příbuzných, se přirozené teploty líhňovým hodnotám více přibližují.

Pro chovatelskou praxi mají tato měření dvě hlavní využití. Prvním je získání referenčních hodnot pro druhy, u nichž nejsou optimální podmínky umělé inkubace dobře známy. Pokud rodiče daného druhu opakovaně úspěšně inkubují, může záznam z podkladku ukázat, jaké teplotní rozmezí, kolísání a přirozené přestávky jsou pro tento druh běžné. Tyto informace mohou pomoci při rozhodování, zda ponechat stabilní líhňovou teplotu, zda pracovat s řízeným chlazením, nebo zda je vhodné opatrně upravit dosavadní inkubační protokol.

Při úpravě inkubačních protokolů je třeba postupovat s opatrností. Pro druhy, u kterých v současné době používané líhňářské postupy fungují dobře, je pravděpodobně lepší je zachovat (byť se od standardů, které embryo zažívá při přirozené inkubaci značně liší). Pokud je však umělá inkubace u daného druhu neefektivní a líhňivost je nízká, zjištěné hodnoty mohou napovědět, kterým směrem inkubační protokol upravit.

Druhým využitím je diagnostika problémů při přirozeném odchovu. Například u některých hnízd pelikánů jsme při analýze získaných dat zjistili, že měřené teploty jsou vyšší, než bývají v líhni a často překračují 40 °C, což bývá považováno za rizikovou hranici, nad níž může docházet i k úmrtí embrya. Důvodem však nebylo přirozené chování rodičů, ale umístění hnízd blízko topení. V tomto případě byl tedy přímo identifikován jasný problém (který při pokusech o přirozený odchov ve vyhřívaných prostorách bude pravděpodobně nastávat relativně často), který vyžaduje konkrétní opatření.



Obrázek 8: Srovnání průměrných vnitřních teplot měřených dataloggerem v biomimetickém vaječném podkladu s teplotami běžně používanými při umělé inkubaci v jednotlivých ptačích řádech. Modré boxploty znázorňují hodnoty naměřené v hnízdech, červené značky orientační líhňové teploty.

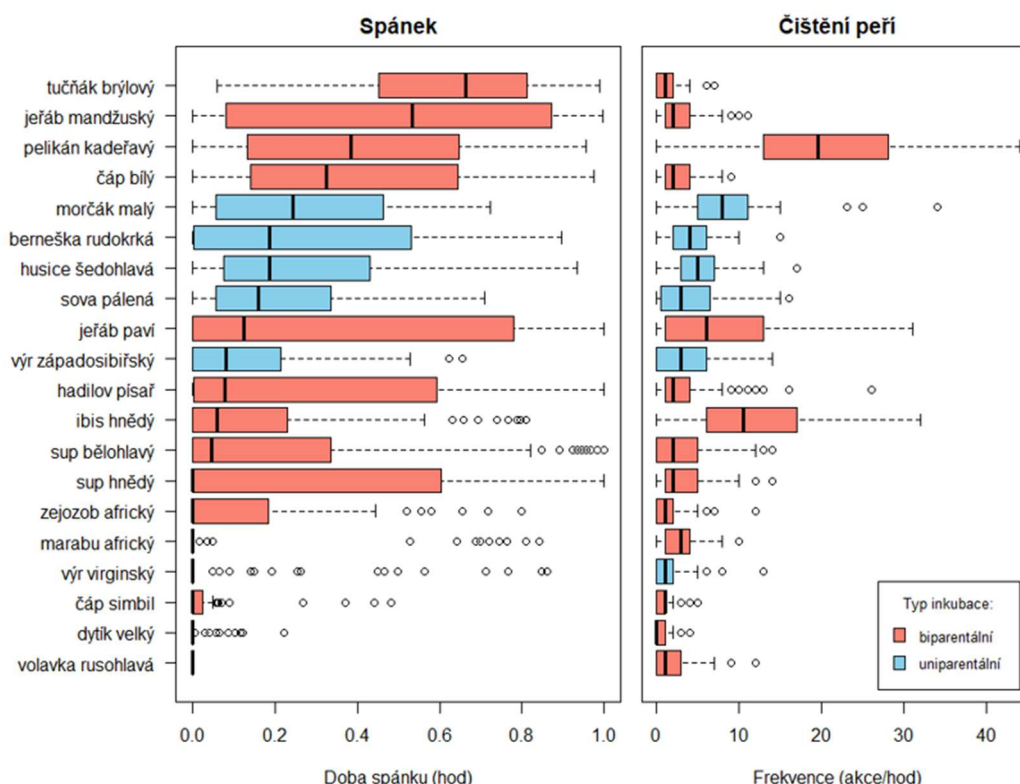
3.4.2 Příkladová studie 2: Co prozradí kamera o spánku a čištění peří během inkubace?

Tato případová studie ukazuje, že kamerový záznam není pouze doplňkem k dataloggerům, ale samostatně velmi užitečným nástrojem pro hodnocení kvality rodičovské péče. Zaměřili jsme se na dvě běžně přehlížené, ale biologicky důležité aktivity inkubujících ptáků: spánek a čištění peří. Obě patří mezi základní sebeudržovací chování, ale během inkubace je pták musí sladit s péčí o snůšku, termoregulací vajec, obranou hnízda a reakcemi na okolní rušení. Právě proto mohou spánek a čištění peří dobře ukazovat, zda má inkubující rodič na hnízdě dostatek klidu a zda mu prostředí umožňuje normálně fungovat.

Analyzovány byly videozáznamy z 21 hnízd 20 druhů ptáků chovaných v zoologických zahradách. Zastoupeny byly druhy s biparentální inkubací, u nichž se na sezení střídají oba rodiče, i druhy s uniparentální inkubací, kde péči o snůšku zajišťuje jeden rodič. Data pocházela ze Safari Parku Dvůr Králové, Zoo Brno, Zoo Olomouc, Zoo Ostrava a Záchrané stanice hl. m. Prahy. Záznamy byly pořízeny kompaktními kamerami s nočním viděním a následně systematicky vyhodnoceny v programu BORIS. Kódovány byly zejména přítomnost rodiče na hnízdě, vlastní inkubace, spánek, čištění peří a přítomnost dalších jedinců v okolí hnízda.

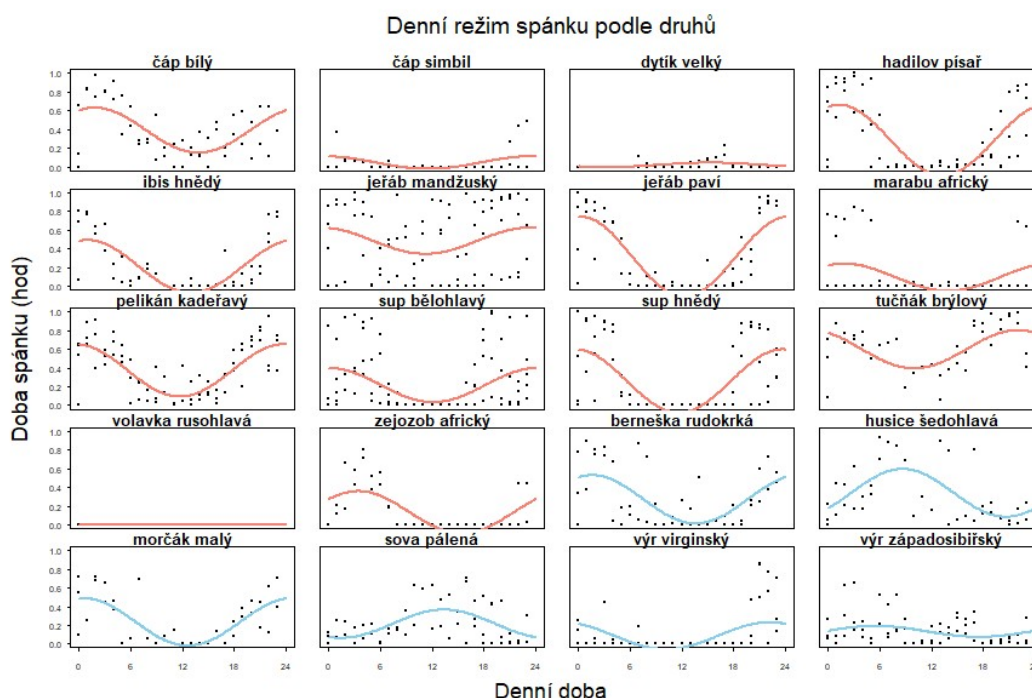
Výsledky ukázaly výrazné rozdíly mezi druhy (obr. 9). Některé druhy, například tučňák brýlový nebo jeřáb mandžuský, spaly na hnízdě poměrně často, zatímco u jiných byl spánek zaznamenán jen minimálně nebo vůbec. Podobně se mezi druhy lišila frekvence čištění peří. Jednou z motivací pro studii bylo otestování hypotézy, že uniparentální druhy (u kterých inkubující rodič nemá v průběhu inkubace čas se vyspat mimo hnízdo, neboť veškerý čas inkubačních přestávek musí trávit sháněním potravy) budou na hnízdě trávit spánkem více času, než druhy biparentální. V rozporu s naším očekáváním však typ inkubace nevysvětloval celkovou dobu spánku ani celkovou frekvenci čištění peří: nelze tedy jednoduše předpokládat, že uniparentálně inkubující druhy budou na hnízdě spát nebo se čistit více než druhy, kde se rodiče střídají.

Srovnání chování na hnízdě



Obrázek 9: Variabilita v době strávené spánkem a čištěním peří na základě měření dataogger v chovech českých zoologických zahrad. Zároveň je zde vidět, že množství času věnované inkubujícím rodičem oběma aktivitám není jednoznačně odlišné mezi uni- a biparentálně inkubujícími druhy, což byla jedna z testovaných hypotéz. Předpokládali jsme totiž, že uniparentálně inkubující druhy jsou nuceny se oběma aktivitám věnovat na hnízdě (na úkor ostražitosti, respektive krypte), zatímco biparentálně inkubující druhy se budou snažit tyto aktivity alokovat do inkubačních přestávek mimo hnízdo.

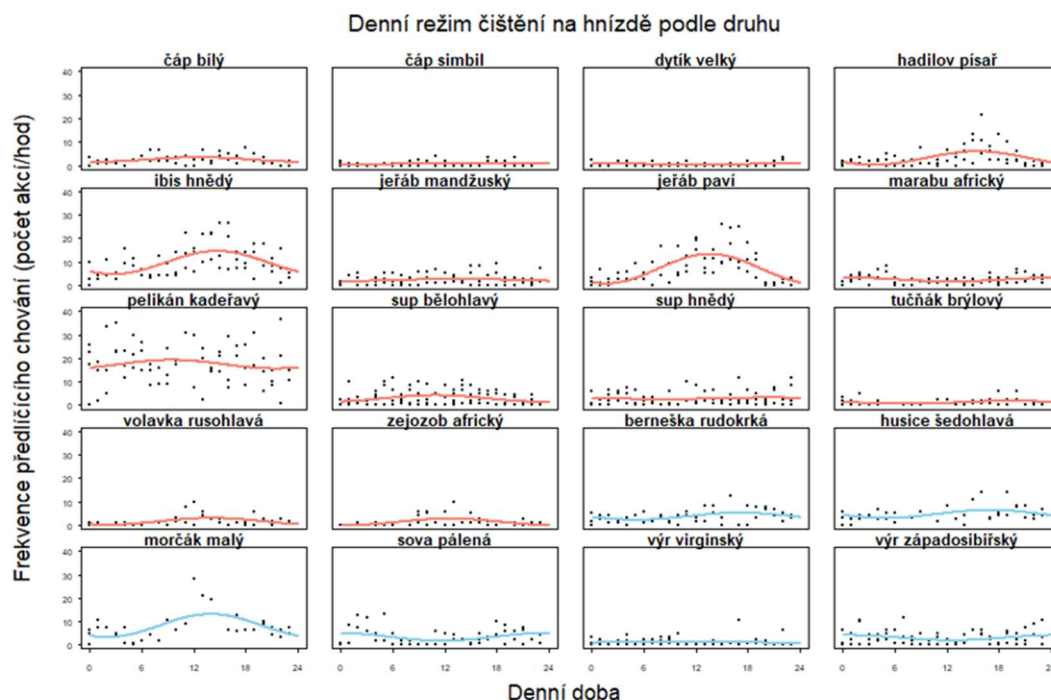
Velmi zřetelně se projevil denní rytmus. Spánek byl u většiny druhů soustředěn především do nočních hodin, byť se vyskytovaly i druhy s převahou denního spánku, či bez výrazné spánkové rytmicity (obr. 10), zatímco čištění peří mělo slabší, ale patrný vrchol během dne, často kolem poledne (obr. 11).



Obrázek 10: Rozložení doby spánku v průběhu dne jednotlivých druhů ptáků. Do grafů byly doplněny modelové křivky odhadnuté lineárním smíšeným modelem s denní dobou dekomponovanou na sinus a cosinus radiánů (to vysvětluje nelineární fit lineárního modelu), které znázorňují průběh cirkadiálního rytmu spánku.

Nejvýznamnějším praktickým (tedy pro chovatelskou praxi využitelným) výsledkem pak byl prokázán vliv přítomnosti dalších jedinců v okolí hnízda na množství spánku. Se zvyšující se frekvencí návštěv jiných ptáků v blízkosti hnízda klesalo množství spánku inkubujícího rodiče. Rušení se tedy nemusí projevit přímo opuštěním snůšky; rodič může na hnízdě zůstat, ale být bdělejší, méně odpočívat a hůře regenerovat. U čištění peří se vliv rušení lišil podle typu inkubace. U biparentálních druhů nebyl zřetelný, zatímco u uniparentálních druhů vyšší frekvence návštěv vedla ke snížení čištění peří. To naznačuje, že rodič, který nemá možnost pravidelného střídání partnerem, může při rušení potlačovat méně urgentní aktivity, aby udržel vyšší ostražitost.

Pro chovatelskou praxi z toho vyplývá několik důležitých závěrů. Klid v okolí hnízda je významný i tehdy, když pták hnízdo neopouští a vejce zůstávají zakrytá. U uniparentálně inkubujících druhů je vhodné věnovat rušení zvláštní pozornost, protože tito rodiče mají menší možnost přesunout odpočinek a sebeúdržbu mimo dobu sezení na snůšce. Sdílené voliéry je proto vhodné během inkubace hodnotit individuálně: u některých párů mohou návštěvy jiných jedinců představovat běžnou sociální situaci, u jiných mohou narušovat klidový režim a kvalitu rodičovské péče.



Obrázek 11: Rozložení předličního chování v průběhu dne jednotlivých druhů ptáků. Do grafů byly doplněny modelové křivky odhadnuté lineárním smíšeným modelem, které znázorňují průběh cirkadiálního rytmu spánkových úseků.

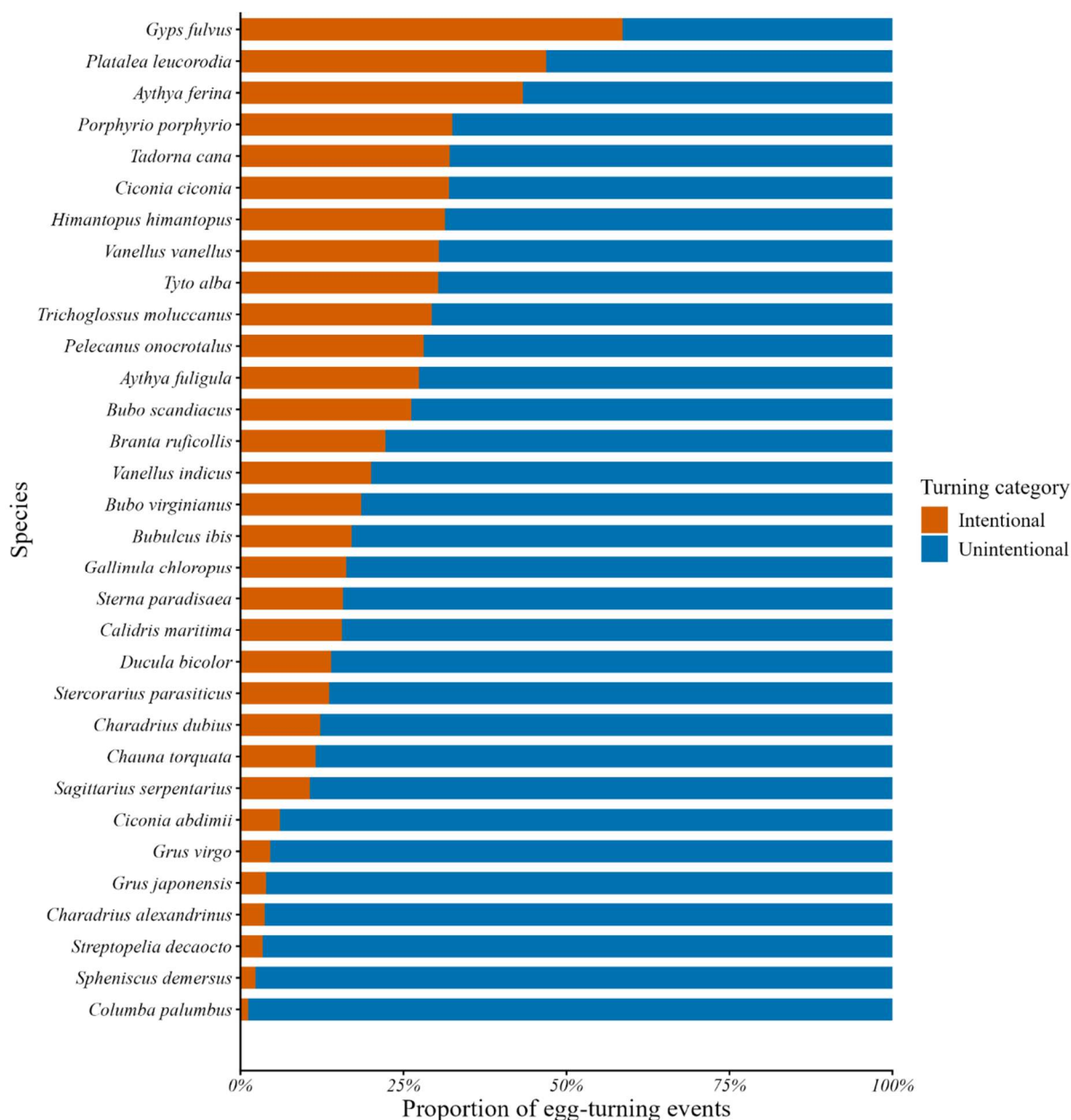
3.4.3 Příkladová studie 3: Jak ptáci skutečně otáčejí vejce

Otáčení vajec je důležitou součástí inkubační péče. Podporuje normální vývoj embrya, brání přichycení embryonálních membrán ke skořápce, přispívá k využití bílku a pomáhá udržovat vhodné podmínky uvnitř vejce (viz kap. 3.3.2). Přesto bylo dosud málo známo o tom, jakými konkrétními pohyby rodiče vejce otáčejí. Často se předpokládá, že pták vejce cíleně posunuje nebo obrací zobákem. Kombinace přesně synchronizovaných datasetů z biomimetického podkladku s dataloggerem a současného kamerového záznamu však umožnila tento předpoklad ověřit mnohem přesněji.

Studie zahrnuje 40 hnízd 32 druhů ptáků z 20 čeledí a kombinuje data z chovů v zoologických zahradách v České republice, s daty získanými od volně žijících ptáků v Arktidě, mírném pásmu i subtropické oblasti. Do hnízd bylo vloženo biomimetické umělé vejce s dataloggerem vybaveným tříosým akcelerometrem a magnetometrem. Ten zaznamenával čas a velikost pohybu vejce, přičemž jako minimální pohyb byla určena změna pozice vejce o 1° za jednu sekundu (viz kap. 3.3.2). Současně bylo hnízdo snímáno kamerou, která umožnila určit, jaké chování rodiče daný pohyb způsobilo. Díky propojení obou metod bylo možné rozlišit cílené manipulace s vejcem, pohyby vzniklé jako vedlejší produkt běžného inkubačního chování a pohyby způsobené prostředím (například v důsledku větru).

Z více než 40 000 analyzovaných sekund spojených s pohybem vejce tvořily pravděpodobně incidentální, tedy nikoli primárně na otáčení vejce zaměřené pohyby, v průměru 76,2 % všech událostí, i když mezi jednotlivými hnízdy byla obrovská variabilita (obr. 12). Cílené manipulace s vejcem představovaly 18,8 % a pasivní pohyby způsobené prostředím, například větrem, pouze 2,5 %. Otáčení vejce tedy u většiny sledovaných druhů bylo převážně vedlejším důsledkem běžného chování rodiče na hnízdě: usedání, vstávání, „vrtění se“ na hnízdě, přešlapování, změny polohy těla nebo manipulace s hnízdním materiálem.

Cílené manipulace však byly mechanicky účinnější. Průměrná úhlová změna při cíleném pohybu byla 0,160 radiánu, tedy přibližně 9,2°, zatímco u incidentálních pohybů činila 0,065 radiánu neboli 3,7° a u pohybů způsobených prostředím 0,021 radiánu, tedy asi 1,2°. Cílené pohyby tedy byly méně časté, ale jednotlivě otáčely vejce o více stupňů. Po zohlednění četnosti i velikosti pohybů však incidentální pohyby stále tvořily hlavní část celkového otáčení, přibližně 65,1 % celkového úhlového posunu, zatímco cílené pohyby přispívaly přibližně 33,0 %.



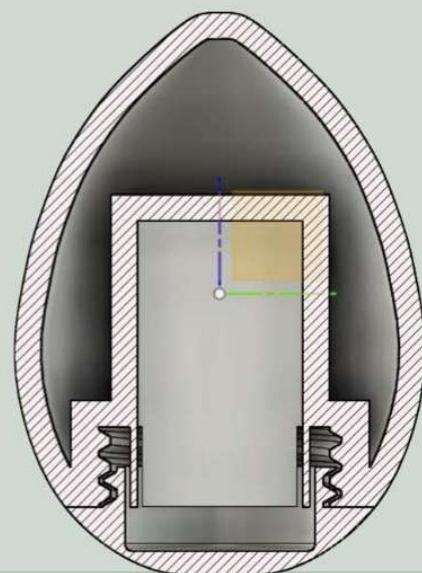
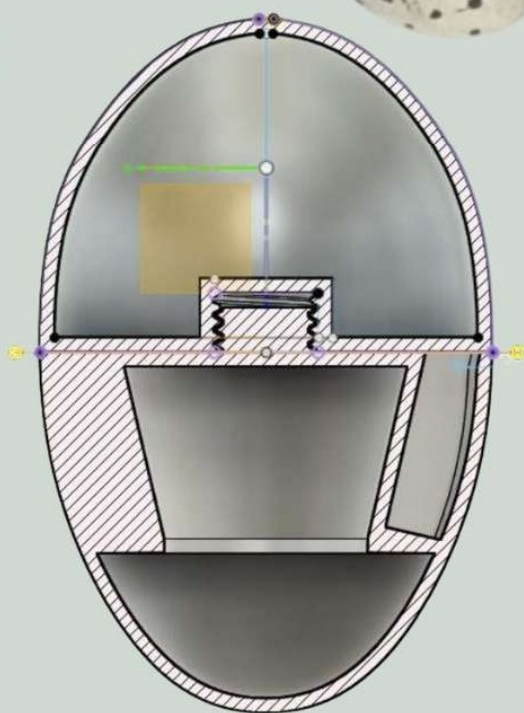
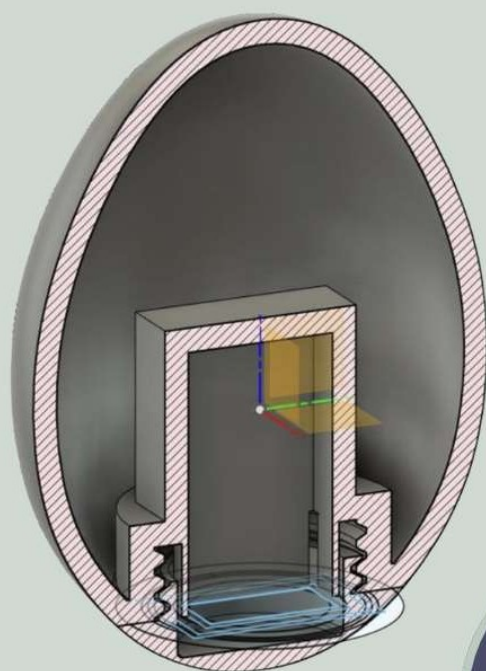
Obrázek 12: Proporce otáčení vajec u vybraných druhů, rozdělený na „intentional“ – tedy cílené otáčení zobákem a „unintentional“ – tedy otáčení vzniklé jako vedlejší produkt ostatních pohybů na hníždě.

Jediným sledovaným biologickým faktorem, který statisticky významně souvisel s podílem cíleného otáčení, byla velikost snůšky. Druhy s většími snůškami měly vyšší podíl cílených manipulací s vejci. Ve větší snůšce totiž nemusí drobné pohyby těla rovnoměrně zasáhnout všechna vejce, a cílená manipulace zobákem proto může být důležitější. Tělesná velikost, vývojový typ mláďat, uni- či biparentální inkubace, původ dat z volné přírody nebo chovu ani frekvence inkubačních přestávek rozdílly mezi druhy jednoznačně nevysvětlily.

Studie tak v rozporu s obecnou představou ukazuje, že cílené otáčení, coby vysoce specializovaná forma rodičovské péče, nemusí být zdaleka vždy dominantním mechanismem, prostřednictvím kterého vejce tento klíčový parametr inkubační péče dostávají.

Přímé praktické dopady této studie nejsou tak bezprostřední jako u měření teploty, vlhkosti nebo hmotnostního úbytku vajec, přesto tato studie přináší několik užitečných chovatelských závěrů. Normální inkubace zahrnuje mnoho drobných pohybů; rodič, který na snůšce sedí zcela strnule a dlouho nemění polohu, nemusí poskytovat vajíčkům stejný mechanický režim jako rodič, který se pravidelně usazuje, vstává, upravuje polohu těla a pracuje s hnízdním materiálem.

Celkově tato případová studie ukazuje, že nástroje vyvinuté v rámci projektu umožňují získat nový vhled i do zdánlivě dobře známých složek rodičovské péče. Otáčení vajec není pouze cílená manipulace s vejcem, ale komplexní výsledek celého inkubačního chování rodiče. Pro chovy je tento poznatek důležitý především tím, že upozorňuje na význam přirozeného, klidného a nerušeného chování na hnízdě: i drobné pohyby, které by při běžné kontrole zůstaly bez povšimnutí, mohou být významnou součástí péče o vyvíjející se embryo.



Umělá vejce

Vývoj a výroba biomimetických
vaječných podkladků

- Konstrukce modelů
- Hmotnostní a tepelné vlastnosti biomimetických podkladků
- Pokrytí morfoprostoru ptačích vajec a výběr reprezentativních podkladků
- Struktura veřejné databáze biomimetických podkladků na Zenodu

4. Vývoj a výroba biomimetických vaječných podkladků

V následné části souhrnné zprávy se detailně zaměříme na vývoj a výrobu **biomimetických 3D tištěných vaječných podkladků**, tedy umělých vajec navržených tak, aby co nejlépe napodobovala přirozená vejce jednotlivých druhů z hlediska tvaru, velikosti, hmotnosti a pro inkubaci relevantních tepelných vlastností. Tato činnost byla původně vnímána pouze jako dílčí součást snahy o vývoj metodických postupů pro měření inkubace a na jejím základě nebyl plánován žádný samostatný výstup. V průběhu řešení projektu se však ukázalo, že přínos námi vyvíjených podkladků v chovech může být výrazně větší a jejich využití coby standardních chovatelských podkladků může znamenat pro chovatele velký přínos, včetně finanční úspory. Zároveň jsme si uvědomili, že spektrum již dostupných dat pro 3D tisk zahrnuje podstatnou část obecné variability ve velikostech a tvarech vajec napříč druhovou diverzitou ptáků. Rozhodli jsme se proto vyplnit systematicky i dosud nevyvinutý zbytek celkového ptačími vejci obsazeného morfoprostoru a vytvořit tak kompletní set modelů, umožňujících jednoduchou výrobu podkladku pro prakticky jakýkoliv ptačí druh (s přihlédnutím k obvyklé míře vnitrodruhové variability ve velikosti a tvaru vejce). A to tak, aby podkladky bylo možné použít nejen jako nosič dataloggeru, ale aby nalezly komplexní uplatnění i v běžné chovatelské praxi. Vznikl tak nejen kompletní a podrobný protokol pro výrobu několika typů podkladků na míru libovolnému ptačímu druhu, ale především databáze 409 tiskových modelů, mezi kterými lze nalézt vejce použitelné pro prakticky jakýkoliv druh žijícího ptáka. Kromě výstupu typu veřejná databáze jsme na základě tohoto úsilí připravili manuskript odborného článku, který databázi i postup výroby detailně popisuje.

4.1 Konstrukce modelů

Základní rozměry modelů vycházejí z druhově specifické délky a šířky vajec získané z Inkubáze, spolupracujících zoologických kolekcí, či dostupných srovnávacích dat o tvaru ptačích vajec (Stoddard et al., 2017). Pokud bylo pro daný druh k dispozici více měření, jako modelovací cíl byla použita mediánová hodnota. Tvar vejce byl rekonstruován podle referenčních fotografií ve vhodném bočním pohledu; fotografie sloužily jako předloha pro profil vejce, zatímco absolutní velikost modelu byla škálována podle měřených rozměrů.

Vlastní modelování probíhalo v prostředí Autodesk Fusion. Postup spočíval v rekonstrukci podélného profilu vejce, jeho otočení kolem podélné osy a vytvoření trojrozměrného tělesa. U dutých a výzkumných modelů byla následně vytvořena skořápka, vnitřní prostor pro plnění a případně dutiny pro datalogger. Standardní tloušťka stěny byla nastavena na 2 mm, což představuje kompromis mezi pevností, tisknutelností, omezením úniku náplně a minimalizací nežádoucí tepelné izolace. U největších modelů byla z důvodu mechanické stability tloušťka stěny navýšena.

4.1.1 Typy podkladků

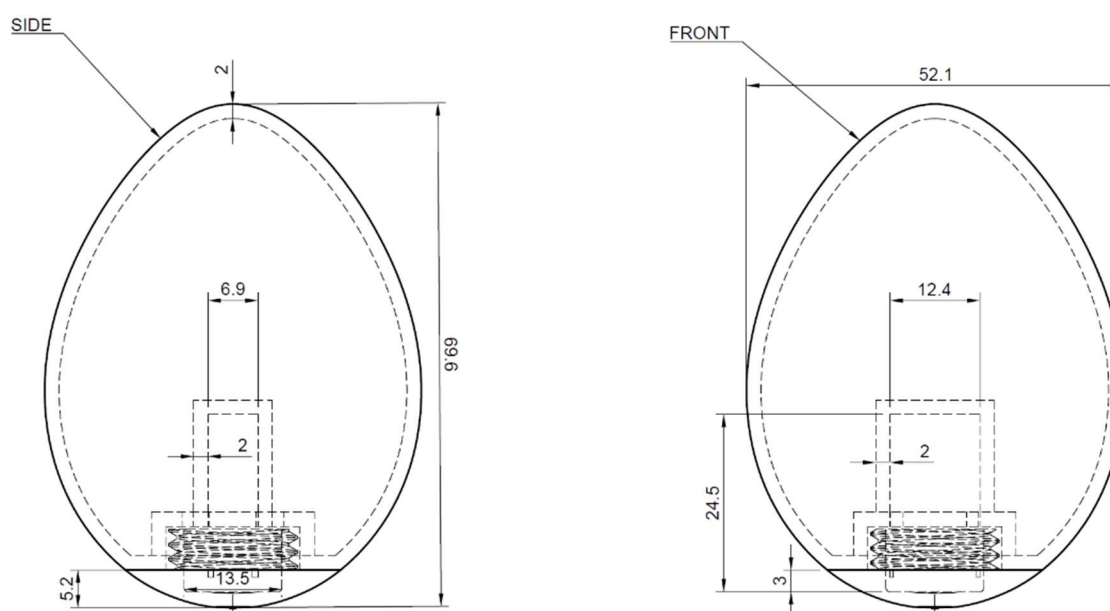
Pro jednotlivé druhy byly vytvořeny až čtyři varianty modelu, jejichž dostupnost závisí na velikosti vejce:

1. **Plný chovatelský model** – jednoduchý model tištěný jako plné nebo částečně vyplněné těleso. Je dostupný pro všechny velikosti vajec a je určen především pro běžné chovatelské použití, vizuální náhradu vejce nebo regulaci hnízdního chování.
2. **Skořápkový plnitelný model** – dutý model určený k naplnění inertním materiálem (nejčastěji gelem pro ultrazvukové vyšetření) tak, aby se přiblížil hmotnosti a tepelné kapacitě skutečného vejce. Tato varianta je dostupná pro vejce o délce ≥ 15 mm. Oproti plnému modelu šetří materiál a čas tisku, jeho nevýhodou je nutnost kombinace s materiálem výplně.
3. **Výzkumný model s jednou dutinou pro datalogger** – model s centrální vnitřní dutinou, uzavíratelným vstupem a možností vložení jednoho miniaturního dataloggeru. Je určen

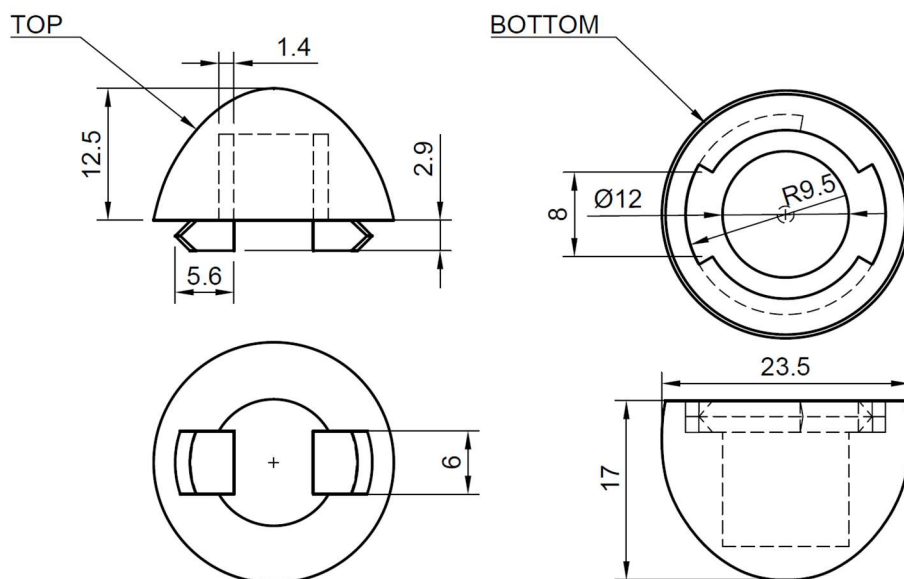
především pro záznam vnitřní teploty a pohybu vejce. Tato varianta je dostupná pro vejce o délce $\geq 25,7$ mm a šířce $\geq 19,3$ mm. Prostory mezi vnitřní strukturou pro umístění dataloggeru a skořápkou jsou rovněž plněny inertním gelovým materiálem.

4. **Výzkumný model se třemi dutinami pro dataloggery** – model umožňující vložení tří dataloggerů v laterálních dutinách umístěných blíže ke skořápce. Slouží zejména k měření teplotních gradientů a povrchovějších teplot, které mohou lépe odpovídat poloze embrya v první části inkubace. Tato varianta je dostupná pro vejce o délce $\geq 45,1$ mm a šířce ≥ 33 mm. Prostory mezi vnitřní strukturou pro umístění dataloggerů a skořápkou jsou rovněž plněny inertním gelovým materiálem.

U větších modelů je vstup k dataloggeru řešen šroubovací čepičkou, obvykle na tupém pólu vejce (obr. 13). U menších vajec, kde standardní závit nelze použít, je model rozdělen na dvě části a uzavírán pomocí vlastního zámkového mechanismu (obr. 14). Pro zajištění sestavitelnosti byly tolerance závitů a spojů upraveny tak, aby zohledňovaly běžné odchylky FFF tisku.



Obrázek 13: Boční a čelní pohled na vejce pro tučňáka brýlového *Spheniscus demersus* s jedním dataloggerem, s rozměry v mm.



Obrázek 14: Pohledy zepředu a zespodu na malé vejce pro sokolíka afrického *Polihierax semitorquatus* s jedním dataloggerem, s rozměry v mm.

4.1.2 Použité materiály, postup při tisku a plnění

Modely jsou určeny pro běžně dostupné FFF/FDM 3D tiskárny. Jako vhodný tiskový materiál jsou doporučeny netoxické, mechanicky odolné a teplotně stabilní filameny, zejména PETG nebo PLA. Pro další povrchovou úpravu je praktické použít světlý, ideálně bílý filament. Doporučená výška vrstvy je nejvýše 0,2 mm, aby byl povrch dostatečně celistvý a detailní. Pro zvýšení pevnosti a omezení prosakování náplně se používá standardní tryska 0,4 mm, minimálně tři perimetry a u plnitelných modelů také nastavení podporující těsnost tisku, například odstupňované vnitřní švy nebo mírně zvýšený *extrusion multiplier*. U velkých vajec je pro zajištění dostatečné strukturální odolnosti vhodné zvýšit počet perimetrů na minimálně šest.

U plnitelných modelů je třeba tisk pozastavit přibližně v 95 % finální výšky vejce, tedy těsně před jeho uzavřením. Do dutiny se následně doplní náplň odpovídající požadované hmotnosti a tepelným vlastnostem. V testovaném postupu byl jako nejvhodnější vybrán a používán komerčně dostupný ultrazvukový gel ředěný vodou přibližně na 55 % objemového podílu, který poskytuje vhodnou kombinaci hustoty, viskozity, tepelného chování a nízké ceny. Použit lze i jinou inertní a netoxickou kapalinu s podobnou hustotou a tepelnými vlastnostmi (například běžně dostupné lubrikační gely), vždy je však nutné před použitím ověřit konečnou hmotnost modelu a jeho těsnost.

4.1.3 Těsnění modelu, povrchová úprava a barvení

Po vytištění je nutné každý podkladek vizuálně zkontrolovat, zejména z hlediska netěsností, kvality závitů, dosedání uzávěru a případné deformace dutin pro datalogger. Menší netěsnosti lze opravit kyanoakrylátovým lepidlem nebo lokálním zatavením materiálu při nízké teplotě. Povrchové nerovnosti se odstraňují jemným broušením nebo pilováním a model se následně opatří základní vrstvou barvy.

Z bezpečnostních důvodů se používají výhradně netoxické akrylové barvy ředěné vodou. Cílem barvení není přesná reprodukce každé jednotlivé skvrny na vejci, ale přiblížení celkového vizuálního dojmu skutečného vejce daného druhu (obr. 15), což může být důležité pro přijetí podkladku rodiči. Základní podkladová vrstva se aplikuje zpravidla airbrushem, barvou ředěnou v poměru přibližně 1 : 3 s vodou, a podle potřeby se opakuje dvakrát až třikrát. U skvrnitých vajec se další ředěná barva, přibližně 1 : 5, nanáší rozstříkem z airbrushu, či hřebenu. U druhů s opotřebeným, špinavým nebo kryptickým

vzhledem vajec, například u pelikánů, lze použít velmi ředěnou hnědou nebo černou barvu v poměru přibližně 1 : 10, která se nanese ručně, nechá částečně zaschnout a následně se jemně omyje tak, aby zůstalo jen slabé reziduální zabarvení. Hotový model musí před vložením do hnízda zcela proschnout a nesmí lepit ani uvolňovat barvu.

Pečlivé barvení a celková vizuální věrnost jsou důležité zejména u druhů citlivých na vzhled vajec nebo u druhů, u nichž je přijetí podkladku nejisté. Podkladky byly po vhodné povrchové úpravě inkubujícími ptáky přijímány obecně dobře. Přesto platí, že vhodnost konkrétního modelu je třeba před použitím u živých ptáků ověřit.



Obrázek 15: Srovnání tvaru a zbarvení vajec u skutečných vajec (nahore) a komplementárních biomimetických podkladků šesti druhů ptáků. Zobrazené podkladky byly rodiči ve všech případech přijaty.

4.2 Hmotnostní a tepelné vlastnosti biomimetických podkladků

Při vývoji biomimetických podkladků bylo cílem, aby umělá vejce nenapodobovala pouze vnější tvar a velikost skutečných vajec, ale aby se jim co nejvíce přibližovala také hmotností a tepelným chováním. Tyto vlastnosti jsou důležité ze dvou důvodů. Zprvu ovlivňují pravděpodobnost přijetí podkladku rodiči a způsob, jakým s ním ptáci v hnízdě manipulují. Zadruhé určují, nakolik věrně může podkladek s dataloggerem zaznamenávat teplotní podmínky, kterým bylo vystaveno skutečné vejce.

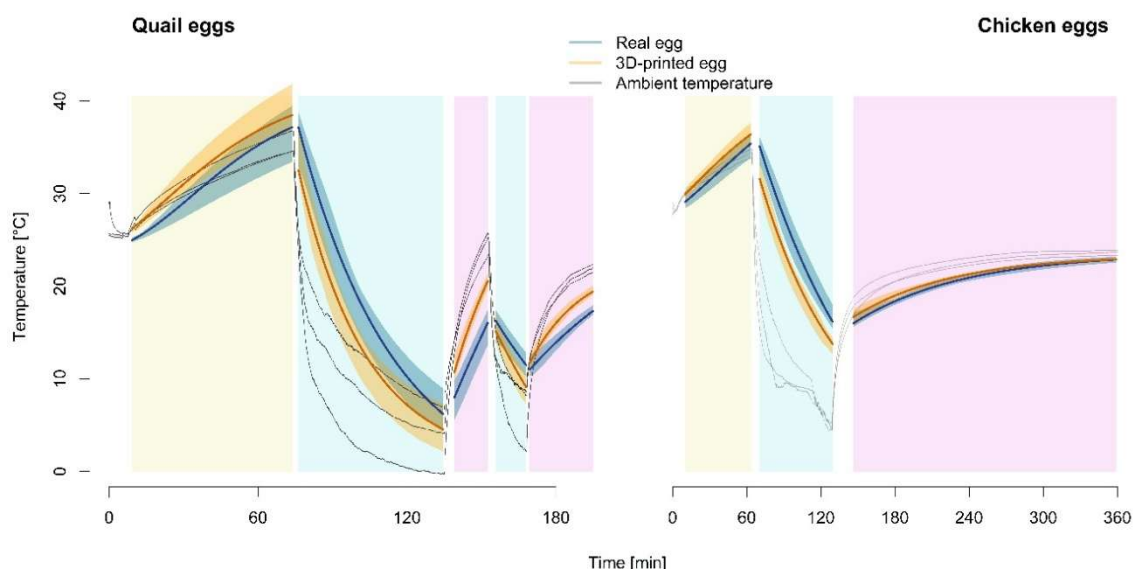
Hmotnost modelů byla nastavována podle odhadované hmotnosti čerstvého vejce daného druhu. Ta byla vypočtena z délky a šířky vejce pomocí standardního vztahu pro odhad hmotnosti ptačích vajec podle Hoyta (1979). S ohledem na fakt, že hmotnost vejce se v průběhu inkubace mění (viz kap. 2.4.3), hmotnost podkladků byla cílena na průměr mezi hmotností čerstvě sneseného vejce a hmotností vejce před začátkem líhnutí. Pro konkrétní výzkumné úkoly je však v případě potřeby možné hmotnost přizpůsobit. U plných chovatelských modelů byla cílová hmotnost řešena úpravou procenta vnitřní výplně při 3D tisku. Pro každý druh bylo zvoleno takové nastavení výplně, které co nejvíce přiblížilo odhadovanou hmotnost vytištěného modelu cílové hmotnosti přirozeného vejce. U skořápkových a dataloggerových modelů byly plastové části tištěny s vysokou pevností, zejména v okolí dutin, závitů a uzávěrů, a chybějící hmotnost byla doplněna inertní náplní. Doporučené množství náplně je pro jednotlivé modely uvedeno v doprovodné tabulce hmotnostního nastavení.

Jako praktická náplň byl ověřen komerčně dostupný ultrazvukový gel ředěný vodou přibližně na 55 % objemového podílu. Tato směs byla zvolena proto, že má vhodnou hustotu, viskozitu a tepelné vlastnosti a zároveň je levná a snadno dostupná. U plnitelných modelů tak lze relativně jednoduše nastavit výslednou hmotnost podkladku tak, aby odpovídala cílové hmotnosti skutečného vejce. Před použitím v chovu je však vždy nutné zkontrolovat reálnou hmotnost vyrobeného podkladku, protože se může lišit podle přesnosti tiskárny, použitého filamentu, nastavení sliceru, množství náplně, lepidla, těsnění a povrchové úpravy.

Tepelné vlastnosti byly ověřeny laboratorní validací na modelech odpovídajících vejším kura domácího a křepelky japonské. Pro každý z těchto dvou typů vajec bylo porovnáváno pět skutečných vajec a pět odpovídajících plněných podkladků s jedním dataloggerem. Vejce byla vystavena opakovaným fázím zahřívání, ochlazování a vyrovnávání na pokojovou teplotu (obr. 16). Teplota ve skutečných vejcích byla měřena sondou umístěnou uvnitř vejce, zatímco v podkladcích byla zaznamenávána dataloggerem vloženým do centrální dutiny.

Validace ukázala, že plněné podkladky s jedním dataloggerem poměrně dobře zachycují hlavní průběh zahřívání a ochlazování skutečných vajec. Průměrné rychlosti teplotních změn byly mezi skutečnými vejci a podkladcí v jednotlivých monotónních fázích obecně podobné. Podkladky tedy poskytují biologicky relevantní záznam teplotní dynamiky, který je výrazně bližší skutečnému vejci než pouhé měření teploty vzduchu v okolí vejce. To potvrzuje jejich vhodnost pro monitoring inkubačně relevantních teplotních podmínek v hnízdě nebo pro srovnání přirozené a umělé inkubace.

Současně se ukázalo, že podkladky reagují na změny okolní teploty o něco rychleji než skutečná vejce. Tento rozdíl byl patrný zejména u menších vajec a souvisí pravděpodobně s přítomností vnitřní dutiny pro datalogger, která snižuje efektivní tepelnou kapacitu modelu ve srovnání s plně homogenním přirozeným vejcem. Rychlejší odezva však nemusí být pouze nevýhodou. Pro některé účely, například detekci krátkých inkubačních přestávek, návratu rodiče na hnízdo, rychlých změn mikroklimatu nebo drobných pohybů vejce, může vyšší citlivost podkladku na změny prostředí zlepšit časové rozlišení záznamu.



Obrázek 16: Teplotní průběh měření v prostředí skutečných vajec (modrá), biomimetických podkladků (oranžová) a okolní teploty zaznamenané mezi vejci (šedá) během experimentu s teplotní validací. Silné čáry znázorňují modelové predikce na úrovni populace, získané pomocí nelineárních smíšených modelů: Gompertzova modelu (béžový blok), modelu exponenciálního poklesu (světle modrý blok) a modelu exponenciálního růstu

(růžový blok). Šrafované pruhy znázorňují rozsah přizpůsobených křivek na úrovni jednotlivých vajec u pěti testovaných vajec v každé skupině.

4.3 Pokrytí morfoprostoru ptačích vajec a výběr reprezentativních podkladků

Pro databázi biomimetických podkladků nebylo cílem vytvořit samostatný model pro každý druh ptáka. Takový postup by byl technicky neefektivní a z hlediska praktického využití zbytečný, protože mnoho druhů má vejce velmi podobné velikosti a tvaru. Základní logikou vývoje proto bylo pokrýt co největší část variability ptačích vajec pomocí omezeného počtu reprezentativních modelů. Pro tento účel byl definován morfoprostor vajec, tedy vícerozměrný prostor popisující hlavní rozdíly ve velikosti a tvaru vajec napříč ptačími druhy.

Morfoprostor byl definován pomocí tří proměnných: **délky vejce** (L), **asymetrie** (A) a **elipticity** (E). Délka vejce reprezentuje jeho celkovou velikost, zatímco asymetrie a elipticita popisují tvar. Asymetrie vyjadřuje, do jaké míry se vejce liší od souměrného elipsoidu a jak výrazně je posunut bod v největší šířce na podélné ose vejce směrem k tupému pólu. Elipticita popisuje relativní protáhlost vejce, tedy vztah mezi jeho délkou a šířkou. Samotná šířka vejce nebyla použita jako samostatná osa morfoprostoru, protože je v použitém tvarovém modelu odvozena z délky a elipticity. Tento přístup navazuje na srovnávací parametrizaci tvaru ptačích vajec podle Bakera (2002) a Stoddardové et al. (2017), která umožňuje porovnávat vejce napříč širokým spektrem ptačích druhů.

Tvar jednotlivých podkladků byl kvantifikován z podélného profilu vejce vytvořeného při modelování. Profil odpovídal polovině podélného řezu vejcem a byl importován do prostředí R jako sada souřadnic (x_i, y_i) , kde x_i představuje polohu bodu podél podélné osy vejce a y_i radiální vzdálenost profilu od rotační osy. Aby bylo možné porovnávat vejce různé velikosti, byly souřadnice nejprve normalizovány. Podélná souřadnice byla převedena na interval $[-1, 1]$, podle vztahu:

$$x_{\text{norm},i} = 2 \times \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} - 1$$

kde $x_{\min}$ a $x_{\max}$ odpovídají oběma pólům vejce. Radiální souřadnice byla standardizována relativně k polovině délky vejce:

$$y_{\text{norm},i} = \frac{y_i}{L/2}$$

kde L je délka vejce. Tím vznikl bezrozměrný profil vejce, v němž je poloha podél vejce vyjádřena relativně od jednoho pólu ke druhému a šířka profilu je vztažena k délce vejce.

Takto upraveným profilem byl následně proložen dvouparametrický geometrický model tvaru vejce podle Bakera (2002):

$$\hat{y}(x) = T(1+x)^{\frac{1}{1+\lambda}}(1-x)^{\frac{\lambda}{1+\lambda}}$$

kde $\hat{y}(x)$ je modelovaná radiální vzdálenost profilu v dané poloze x , T představuje relativní maximální šířku vejce:

$$T = \frac{B}{L}$$

a λ je parametr určující asymetrii vejce. Hodnota $\lambda = 1$ odpovídá symetrickému vejci; odchylky od této hodnoty vyjadřují posun tvaru směrem k jednomu z pólů. Parametry T a λ byly odhadnuty metodou nelineárních nejmenších čtverců, tedy nalezením takových hodnot, které minimalizují součet čtverců rozdílů mezi skutečným normalizovaným profilem vejce a profilem předpovězeným modelem:

$$\sum_{i=1}^n (y_{\text{norm},i} - \hat{y}(x_{\text{norm},i}))^2$$

Z odhadnutých parametrů modelu byly následně odvozeny tvarové ukazatele použité pro definici morfoprostoru. Asymetrie byla vypočtena jako:

$$A = \lambda - 1$$

a elipticita jako:

$$E = \frac{1}{T} - 1$$

Protože $T = B/L$ lze elipticitu zapsat také jako:

$$E = \frac{L}{B} - 1$$

kde B je šířka vejce a L jeho délka. Vyšší hodnota elipticity tedy odpovídá relativně protáhlejšímu vejci. Takto vypočtené hodnoty asymetrie a elipticity jsou srovnatelné s parametrizací použitou v referenčním datasetu Stoddard et al. (2017).

Kvalita proložení tvarového modelu byla kontrolována pomocí normalizované chyby fitu (ε). Ta porovnávala skutečný a modelovaný profil po standardizaci radiálních vzdáleností vůči jejich ekvatoriálnímu poloměru, aby výsledná chyba nebyla závislá na absolutní velikosti vejce:

$$\varepsilon = \frac{7}{n} \sum_i \left(\frac{r_{\text{actual},i}}{r_{\text{actual,eq}}} - \frac{r_{\text{model},i}}{r_{\text{model,eq}}} \right)^2$$

kde $r_{\text{actual},i}$ je skutečná radiální vzdálenost profilu v bodě i , $r_{\text{model},i}$ je odpovídající hodnota předpovězená modelem, $r_{\text{actual,eq}}$ a $r_{\text{model,eq}}$ jsou ekvatoriální poloměry skutečného a modelovaného profilu a n je počet bodů profilu. Silně pyriiformní vejce, typická zejména pro některé bahňáky, nebyla Bakerovým modelem dostatečně dobře popsána, a proto byla hodnocena samostatně zjednodušeným postupem založeným pouze na délce a elipticitě.

Aby bylo možné rozhodnout, zda jeden podkladek může být použit i pro jiné druhy než pro druh, podle něhož byl přímo vytvořen, bylo nutné stanovit biologicky realistické toleranční limity. Ty byly odvozeny z reálné vnitrodruhové variability vajec uložených v inkubázi. Do výpočtu bylo zahrnuto 7 814 vajec od 80 druhů, přičemž použity byly pouze druhy s alespoň 40 změřenými vejci. Pro každý druh s byl vypočten 5. a 95. percentil délký vejce:

$$P_{5,L,s}, P_{95,L,s}$$

a obvyklý rozsah variability délky byl vyjádřen relativně vůči průměrné délce vejce daného druhu:

$$R_{L,s} = \frac{P_{95,L,s} - P_{5,L,s}}{\bar{L}_s}$$

kde $\bar{L}_s$ je průměrná délka vejce druhu s . Stejným způsobem byl pro každý druh vypočten rozsah variability elipticity:

$$R_{E,s} = P_{95,E,s} - P_{5,E,s}$$

kde $P_{5,E,s}$ a $P_{95,E,s}$ jsou 5. a 95. percentil elipticity vypočtené z délky a šířky vajec daného druhu podle vztahu $E = L/B - 1$. Interval mezi 5. a 95. percentilem byl považován za obvyklý rozsah vnitrodruhové variability.

Přijatelná odchylka mezi skutečným vejcem a podkladem byla následně definována jako polovina průměrného vnitrodruhového rozsahu variability napříč druhy:

$$\tau_L = \frac{1}{2} \bar{R}_L$$

$$\tau_E = \frac{1}{2} \bar{R}_E$$

kde τ_L je tolerance pro délku vejce a τ_E tolerance pro elipticitu. Výsledná tolerance byla přibližně 8 % u délky vejce a 0,10 u elipticity. Protože asymetrii nebylo možné přímo odvodit z běžných rozměrových dat uložených v Inkubázi, byla pro ni použita stejná tolerance jako pro elipticitu. To bylo podloženo rešerší několika publikovaných prací (Taff et al. 2022, Bichet et al. 2025), které vnitrodruhovou variabilitu obou charakteristik zároveň měřily a přinesly zjištění, že variabilita asymetrie je (pokud něco) větší, než variabilita v elipticitě. Z tohoto pohledu tak považujeme zvolený toleranční limit za konzervativní.

Druh byl považován za pokrytý určitým podkladem tehdy, pokud jeho průměrná pozice v morfoprostoru spadala do toleranční oblasti daného modelu, tedy pokud platilo:

$$\left| \frac{L_{\text{species}} - L_{\text{model}}}{L_{\text{model}}} \right| \leq \tau_L$$

$$|E_{\text{species}} - E_{\text{model}}| \leq \tau_E$$

$$|A_{\text{species}} - A_{\text{model}}| \leq \tau_A$$

Každý podkladek tak v morfoprostoru neodpovídá pouze jedinému bodu, ale pokrývá určitou toleranční oblast, v níž lze jeho použití považovat za biologicky realistické. To umožnilo vyhodnotit, které části morfoprostoru ptačích vajec jsou již dostupnými modely pokryty a kde je potřeba vytvořit další reprezentativní podkladky.

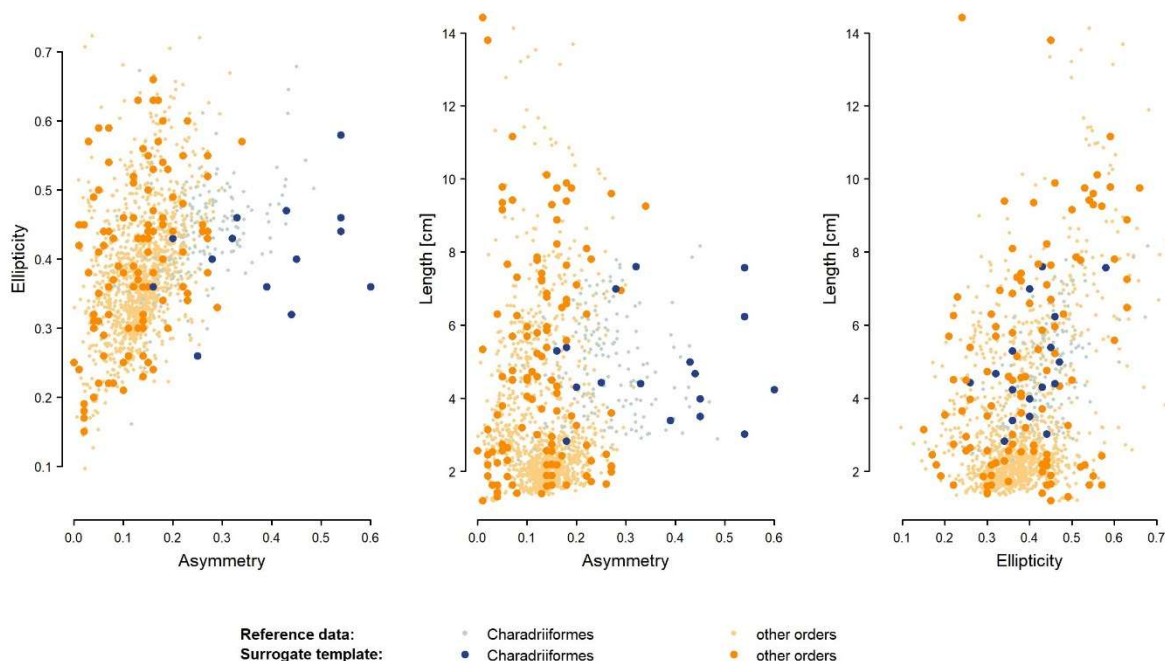
Reprezentativnost původní sady modelů byla vyhodnocena porovnáním s referenčním datasetem tvaru vajec podle Stoddardové et al. (2017), který zahrnuje přibližně 1 400 druhů ptáků a je dle našeho

nejlepšího vědomí zdaleka největším a z hlediska fylogenetické diverzity ptáků nejkompexnějším dostupným datasetem, který potřebné charakteristiky vajec na druhové úrovni udává. Pro každý druh v tomto referenčním datasetu bylo ověřeno, zda jeho průměrná pozice v morfoprostoru spadá do toleranční oblasti alespoň jednoho dostupného podkladku. Pokud ano, byl druh považován za pokrytý. Původní sada 80 modelů pokrývala za těchto kritérií přibližně 60,5 % druhů v referenčním datasetu. Následně byly identifikovány nezastoupené oblasti morfoprostoru, tedy kombinace velikosti a tvaru vajec, pro které v původní sadě neexistoval vhodný podkladek.

Doplňování nezastoupených částí probíhalo dvěma způsoby. U malých vajec, zejména pod hranicí 25 mm délky (ty v původní sadě podkladek zcela chyběly, neboť do nich nelze umístit datalogger), byl morfoprostor rozdělen do pravidelné mřížky podle délky, asymetrie a elipticity. Pro každou obsazenou buňku mřížky byl vybrán fokální druh z datasetu dle Stoddardové et al. (2017) nejbližší jejímu středu a pro něj byl vytvořen reprezentativní model. Tyto malé modely byly vytvořeny především jako plné chovatelské podkladky; pokud délka vejce dosahovala alespoň 15 mm, byla doplněna také plnitelná skořápková varianta.

U větších vajec byl použit výběr kandidátních modelů podle principu maximálního přírůstku pokrytí. Každý dosud nepokrytý druh byl dočasně považován za možného kandidáta pro nový podkladek a bylo spočteno, kolik dalších nepokrytých druhů by se dostalo do jeho toleranční oblasti. Tím vznikla matice pokrytí, která ukazovala, které druhy by byly reprezentovány jednotlivými kandidátními modely. Nové modely byly následně vybírány postupně tak, aby každý další model pokryl co největší počet dosud nepokrytých druhů. Aby se zabránilo zbytečné redundanci, nový model byl vytvořen pouze tehdy, pokud jedinečně zastupoval alespoň tři druhy v referenčním datasetu, včetně kandidátního druhu samotného.

Výsledkem tohoto doplňování byla finální sada podkladek pro 129 fokálních druhů (obr. 17), která zahrnuje 409 digitálních modelů v různých konstrukčních variantách. Po opětovném porovnání s referenčním datasetem bylo zjištěno, že vhodný model je v rámci stanovených tolerančních limitů dostupný pro 98,2 % druhů zahrnutých v referenčním morfometrickém datasetu. Databáze tedy nepokrývá pouze 129 druhů, pro které byly vytvořeny přímé modely, ale poskytuje prakticky použitelný systém výběru podkladek pro drtivou většinu ptačích druhů, což z ní činí doopravdy obecně využitelný nástroj.



Obrázek 17: Pokrytí morfoprostoru ptačích vajec datovým souborem biomimetických podkladků. Tři panely znázorňují párové projekce asymetrie, elipticity a délky vajec u druhů zahrnutých v referenčním datovém souboru (světlé symboly) a u modelů náhradních vajec dostupných v našem konečném datovém souboru (tmavé symboly). Druhy byly považovány za zastoupené, pokud jejich průměrná morfometrická poloha spadala do předem definované tolerance alespoň jednoho náhradního modelu. Druhy z řádu Charadriiformes jsou zobrazeny odděleně od všech ostatních řádů, protože zahrnují vejce s výrazně pyriformním tvarem, která byla vyhodnocena pomocí upravené parametrizace (viz popis výše).

4.4 Struktura veřejné databáze biomimetických podkladků na Zenodu

Databáze biomimetických 3D tištěných vaječných podkladků je uložena jako veřejně dostupný archiv na platformě Zenodo pod DOI 10.5281/zenodo.18955995. Databáze je zveřejněna pod licencí Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0), což umožňuje volné stažení, opakované použití, úpravy i další šíření modelů a souvisejících dat za podmínky řádné citace. Archiv je koncipován tak, aby uživatel získal nejen samotné 3D modely, ale také veškeré doprovodné informace potřebné k jejich výběru, tisku, plnění, úpravě, validaci a případné adaptaci pro další druhy.

Základním souborem databáze je komprimovaný archiv biomimetic_surrogate_egg_models_v1.zip / DataS1.zip, který obsahuje několik skupin souborů. Největší část tvoří složka stl_models/ se samotnými 3D modely ve formátu STL. Tyto soubory představují tisknutelné geometrie podkladků pro 129 fokálních ptačích druhů. Podle velikosti vejce jsou pro jednotlivé druhy dostupné až čtyři konstrukční varianty: plný chovatelský model, plnitelný skořápkový model, výzkumný model s jedním dataloggerem a výzkumný model se třemi dataloggeri. U dělených modelů jsou jednotlivé části, například horní a dolní díl, uloženy jako samostatné STL soubory. Názvy souborů jsou standardizované a obsahují vědecký název druhu, typ modelu a případně označení části modelu, například ve formátu Genus_species_modeltype_part.stl, kde typ modelu odpovídá kódům solid, shell, 1L nebo multi.

Druhou důležitou složkou databáze jsou metadata k jednotlivým druhovým modelům. Tabulka species_metadata.csv obsahuje základní informace o fokálních druzích, pro které byly modely přímo vytvořeny. U každého druhu uvádí cílovou délku a šířku vejce v milimetrech, odhadovanou hmotnost vejce, tvarové parametry, tedy asymetrii a elipticitu, taxonomické zařazení a názvy dostupných STL

souborů pro jednotlivé typy modelů. Tato tabulka slouží jako hlavní rozcestník mezi biologickým druhem, jeho morfometrickými parametry a konkrétními tisknutelnými soubory.

Pro praktické využití databáze u druhů, pro které nebyl vytvořen přímý fokální model, je klíčová tabulka `surrogate_species_selection.csv`. Ta propojuje druhy z referenčního datasetu tvaru ptačích vajec s nejbližšími dostupnými modely podkladků. Pro každý cílový druh uvádí jeho vědecký název, čeleď, řád, tvarové a velikostní parametry vejce, počet dostupných vhodných modelů a seznam nejbližších modelů v pořadí podle vhodnosti. Uživatel tak nemusí odhadovat vhodný podkladek pouze vizuálně, ale může vyhledat model, který spadá do definovaných tolerančních limitů velikosti a tvaru vejce.

Samostatná tabulka `mass_distribution.csv` obsahuje údaje potřebné pro dosažení biologicky realistické hmotnosti podkladků. Pro každý model uvádí cílovou hmotnost vejce, odhadovanou hmotnost plastových částí při standardizovaném nastavení tisku, doporučené množství náplně pro skořápkové a dataloggerové varianty a optimalizované procento výplně pro plné chovatelské modely. Tato tabulka je prakticky důležitá zejména proto, že samotný tvar podkladku nestačí: pro přijetí rodiči, správnou manipulaci ve snůšce i odpovídající tepelnou dynamiku je nutné přiblížit se také hmotnosti skutečného vejce.

Databáze dále obsahuje soubory související s hodnocením pokrytí morfoprostoru a s validací modelů. Soubor `morphospace_coverage.csv` nebo jeho ekvivalent shrnuje podklady použité k vyhodnocení, jak dobře sada podkladků pokrývá variabilitu velikosti a tvaru ptačích vajec. Soubor `thermal_validation.csv` obsahuje výsledky laboratorních testů, při nichž byly porovnávány teplotní trajektorie skutečných vajec a plněných podkladků s dataloggerem. Tyto validační údaje dokumentují, že podklady se z hlediska hlavních trendů zahřívání a ochlazování chovají podobně jako skutečná vejce, byť mohou na rychlé změny teploty reagovat mírně rychleji.

Součástí archivu je také soubor `README.txt`, který popisuje strukturu databáze, pravidla pojmenování souborů, význam jednotlivých modelových variant, doporučený způsob použití a citační instrukce. Pro reprodukovatelnost a další rozšiřování databáze je důležitá složka `code/`, která obsahuje R skripty použité pro výpočet tvarových parametrů vajec, hodnocení pokrytí morfoprostoru, výběr doplňkových modelů a analýzu tepelné validace.

Z hlediska datových formátů je databáze navržena tak, aby byla snadno použitelná napříč běžnými softwarovými nástroji. Geometrie modelů jsou uloženy jako binární STL soubory, které lze otevřít ve slicerech a CAD programech používaných pro 3D tisk. Doprovodné tabulky jsou uloženy jako CSV soubory v kódování UTF-8, s desetinnou tečkou a chybějícími hodnotami označenými jako NA. Tento formát umožňuje práci v tabulkových editorech, R, Pythonu i dalších analytických prostředích.

Přehled dosažených výsledků

Inkubáze — platforma pro správu,
sdílení a analýzu inkubačních dat

Veřejná databáze inkubačních
parametrů v rámci Inkubáze

Manuskript odborného článku
představující Inkubázi

Soubor 3D modelů biomimetických
vaječných podkladků s manuskriptem

Metodická příručka pro monitoring
inkubace v chovech

Workshop a zpětná vazba
cílových uživatelů

5. Přehled dosažených a plánovaných výstupů projektu

Níže jsou jednotlivé výstupy popsány podle jejich současného stavu. Projektová označení O1, O2 a S1 jsou odlišena od klasifikace výsledků podle metodiky hodnocení. U dosud nepřijatých rukopisů nejde o formálně vykazatelný publikační výsledek; tím se stanou až po přijetí nebo vydání.

5.1 Inkubáze – platforma pro správu, sdílení a analýzu inkubačních dat

Stručná charakteristika: Inkubáze je dvojjazyčná webová platforma umožňující standardizované zadávání, správu, kontrolu, vyhledávání a analýzu dat o ptačích vejcích, průběhu inkubace a používaných inkubátorech. Součástí platformy jsou analytické nástroje pro hodnocení hmotnostního úbytku a optimalizaci inkubačních podmínek a veřejná znalostní část nazvaná Inkupedie.

Typ / formální status: Výsledek projektu O1, typu O (ostatní). Jde o dokončený a provozovaný výstup, který bude po skončení projektu dále udržován a rozvíjen.

Dostupnost: Platforma je dostupná na adrese <https://incubase.fzp.czu.cz/>. Inkupedie je veřejně přístupná bez registrace. Zadávání dat, správa neveřejných záznamů a využívání analytických nástrojů vyžadují bezplatnou registraci.

Cíloví uživatelé: Zoologické zahrady, chovná centra, záchranné stanice, soukromí chovatelé, pracovníci líhní, kurátoři chovů a výzkumníci.

5.2 Veřejná databáze inkubačních parametrů v rámci Inkubáze

Stručná charakteristika: Relační databáze shromažďuje standardizované údaje o jednotlivých vejcích, jejich morfometrii, průběžném vážení, inkubačních podmínkách, fertilitě, embryonálním vývoji a výsledku inkubace. K 30. 6. 2026 obsahovala údaje o 24 543 vejcích 470 taxonů.

Typ / formální status: Výsledek projektu S1, typu S – specializovaná veřejná databáze. Výstup je dokončený, avšak jeho obsah se bude dále průběžně rozšiřovat.

Dostupnost: Databáze je zpřístupněna prostřednictvím platformy Inkubáze <https://incubase.fzp.czu.cz/>. Přístup k jednotlivým záznamům se řídí licencí a přístupovým režimem nastaveným vlastníkem dat.

Cíloví uživatelé: Chovatelské instituce, koordinátoři chovných a záchovných programů, výzkumníci a odborníci na reprodukční biologii ptáků.

5.3 Metodická příručka pro monitoring inkubace v chovech

Stručná charakteristika: Metodická příručka shrnuje postupy pro výběr a instalaci dataloggerů, biomimetických podkladků, externích teplotních a vlhkostních sond a kamer. Zabývá se rovněž synchronizací zařízení, dokumentací měření, správou dat, jejich zpracováním a biologickou interpretací.

Typ / formální status: Výsledek projektu O2. O – ostatní výsledek,

Dostupnost: Česká a anglická verze je volně dostupná v elektronické podobě na webu výzkumné skupiny behaviorální ekologie FŽP ČZU. <https://www.fzp.czu.cz/cs/r-6899-projekty-a-spoluprace/r-6923-projekty/r-20308-vyuziti-modernich-nastroju-biologgingu-sdileni-a-uzivatelsky-privetive-analyzy-dat-pri-optimalizaci-inkubace-vajec-ohrozenych-druhu-ptaku-v-lidske-peci/o-projektu.html>

Cíloví uživatelé: Pracovníci zoologických zahrad, chovných center a záchranných stanic, soukromí chovatelé, kurátoři a výzkumníci.

5.4 Soubor 3D modelů biomimetických vaječných podkladků

Stručná charakteristika: Původně neplánovaný výstup zahrnuje 409 tisknutelných modelů založených na 129 reprezentativních ptačích druzích. Datový balík obsahuje různé konstrukční varianty podkladků, metadata, podklady pro výběr vhodného modelu, postupy výroby a výsledky fyzikální validace.

Typ / formální status: Původně neplánovaný výsledek projektu typu O - ostatní. Výstup bude v případě budoucí potřeby doplňován o další modely, ale již v současné době je koncipován tak, že pokrývá drtivou většinu variability ptačích vajec a jeho využití je tak v podstatě univerzální.

Dostupnost: výstup je veřejně dostupný v repozitáři Zenodo (<https://zenodo.org/records/18955995>; DOI: [10.5281/zenodo.18955994](https://doi.org/10.5281/zenodo.18955994)).

Cíloví uživatelé: Zoologické zahrady, chovná centra, záchranné stanice, soukromí chovatelé, výzkumné týmy a vzdělávací pracoviště využívající 3D tisk.

5.5 Workshop

Stručná charakteristika: Workshop „Moderní nástroje pro monitoring inkubace a jejich využití v chovech“ představil odborné veřejnosti první verzi platformy Inkubáze, metody monitoringu přirozené inkubace a výrobu 3D tištěných podkladků. Účastníci si prakticky vyzkoušeli práci s platformou a poskytli zpětnou vazbu k vyvíjeným výstupům.

Typ / formální status: Dokončená implementační, vzdělávací a diseminační aktivita typu W - workshop.

Dostupnost: Workshop proběhl 20. 8. 2025 na Fakultě životního prostředí ČZU v Praze. Prezentace a další podklady byly poskytnuty účastníkům i zájemcům, kteří se akce nemohli zúčastnit.

Cíloví uživatelé: Pracovníci zoologických zahrad, soukromí chovatelé, kurátoři a výzkumníci.

5.6 Souhrnná výzkumná zpráva projektu

Stručná charakteristika: Souhrnná výzkumná zpráva zastřešuje a propojuje všechny hlavní výsledky projektu do jednoho metodického a aplikačního celku. Shrnuje biologická východiska inkubace, vývoj a funkce platformy Inkubáze a databáze inkubačních parametrů, možnosti monitoringu přirozené inkubace, výrobu biomimetických 3D podkladků i praktické poznatky získané v chovatelských zařízeních. Prostřednictvím případových studií ukazuje možnosti využití projektových výstupů při optimalizaci umělé inkubace, diagnostice problémů rodičovské péče a výzkumu inkubační biologie. Zpráva zároveň vymezuje další směřování projektu, zejména rozšiřování uživatelské základny, sdílení dat a budování zpětnovazební smyčky mezi chovateli a výzkumníky.

Typ / formální status: Formální výsledek projektu typu Vsouhrn – souhrnná výzkumná zpráva. Dokument představuje dokončený zastřešující výstup projektu.

Dostupnost: Zpráva je volně dostupná v elektronické podobě na webu výzkumné skupiny behaviorální ekologie FŽP ČZU. <https://www.fzp.czu.cz/cs/r-6899-projekty-a-spoluprace/r-6923-projekty/r-20308-vyuziti-modernich-nastroju-biologgingu-sdileni-a-uzivatelsky-privitive-analyzy-dat-pri-optimalizaci-inkubace-vajec-ohrozenych-druhu-ptaku-v-lidske-peci/o-projektu.html>

Cíloví uživatelé: Pracovníci zoologických zahrad, chovných center a záchranných stanic, soukromí chovatelé, kurátoři a koordinátoři chovných programů, výzkumníci, pracovníci ochrany přírody a poskytovatel podpory.

6. Závěr a východiska pro další směřování

V průběhu projektu se jasně ukázalo, že pro efektivní ladění postupů používaných při inkubaci vajec ohrožených a chovatelsky náročných druhů ptáků nelze dlouhodobě stavět pouze na izolovaných zkušenostech jednotlivých zařízení. Obrovský potenciál leží ve spolupráci a sdílení dat mezi institucemi. Je k němu potřeba propojit standardizovaný sběr dat, jejich efektivní sdílení, uživatelsky přístupnou analýzu a průběžné převádění získaných poznatků zpět do praxe. V průběhu projektu se podařilo vytvořit vzájemně provázaný soubor nástrojů, který tento přístup umožňuje: rozsáhlou databázi inkubačních parametrů, webovou platformu Inkubáze s analytickými funkcemi a veřejnou Inkupedii, metodickou příručku pro monitoring přirozené inkubace, databázi biomimetických 3D modelů vaječných podkladků i unikátní soubory dat o teplotě, chování rodičů a mechanismech otáčení vajec. Významným výsledkem je rovněž skutečnost, že tyto výstupy nevznikaly pouze jako akademické produkty, ale byly vyvíjeny a ověřovány v úzké spolupráci s pracovníky zoologických zahrad a dalších chovatelských zařízení.

Ústředním dlouhodobým výsledkem projektu je Inkubáze jako společná datová a znalostní infrastruktura. Již při ukončení projektu obsahovala data o více než 24 tisících vejcích stovek ptačích druhů a umožňovala nejen jejich evidenci, ale také vyhodnocení hmotnostního úbytku, návrh úprav inkubačních podmínek a tvorbu průběžně aktualizovaných druhových souhrnů v Inkupedii. Data v Inkubázi jsou navíc dostupné (při dodržení konkrétních licenčních podmínek) i vědecké komunitě. Hodnota takového systému však není konečná ani statická. Naopak bude narůstat s každou další zapojenou institucí, s každým novým kvalitně dokumentovaným inkubačním případem a s rostoucí úplností údajů o průběhu i výsledku inkubace. Dokončení technického vývoje proto představuje pouze první krok k plnému využití aplikačního potenciálu projektu.

V následujícím období bude zásadní soustředit se na implementaci výstupů a jejich aktivní šíření mezi potenciální uživatele. Je nezbytné dále zvyšovat povědomí o Inkubázi, Inkupedii, metodické příručce i databázi 3D modelů a současně snižovat praktické bariéry jejich používání. To zahrnuje prezentace na odborných setkáních, workshopy a školení, přímou komunikaci se zoologickými zahradami a koordinátory chovných programů, i průběžnou technickou a metodickou podporu nově zapojených institucí. Zvláštní význam bude mít zahraniční diseminace, protože právě rozšíření platformy mimo české prostředí může výrazně zvýšit taxonomické pokrytí databáze a umožnit získání dostatečně robustních souborů i pro vzácné druhy, u nichž má jednotlivá instituce jen malé množství vajec.

Klíčovým úkolem je postupně vybudovat funkční ekosystém uživatelů, v němž budou mít jednotlivé skupiny jasně definované a vzájemně doplňující role. Chovatelé a chovatelské instituce budou hlavními původci dat a současně příjemci praktických doporučení. Výzkumníci budou (ideálně s přímým zapojením chovatelské komunity) data využívat v rámci vědecké práce, analyzovat a převádět do obecnějších biologických poznatků, druhových referenčních hodnot a metodických doporučení. Správci Inkubáze musí zajišťovat technickou stabilitu systému, ochranu vlastnictví dat, transparentní licenční podmínky a průběžné dotváření efektivní infrastruktury pro převod výsledků analýz do podoby srozumitelné pro chovatelskou praxi.

Zásadním principem dalšího rozvoje musí být vytvoření dobře fungující zpětnovazební smyčky. Data vznikající při každodenní práci v líhních nesmějí končit pouze jako archivní záznamy nebo podklad pro vědecké publikace. Výsledky analýz založených na datech chovatelů se musí prostřednictvím Inkubáze a Inkupedie vracet původcům dat ve formě zpřesněných referenčních hodnot, názorných druhových přehledů, varování před rizikovými odchylkami a konkrétních doporučení pro úpravu inkubačních

postupů. Právě tato návratnost poznání bude hlavní motivací pro dlouhodobé zapojení uživatelů a současně mechanismem, díky němuž se bude kvalita doporučení postupně zvyšovat.

Významnou součástí tohoto procesu budou již připravené odborné rukopisy věnované platformě Inkubáze, biomimetickým podkladům a mechanismům přirozené inkubace. Jejich publikace rozšíří povědomí o výstupech ve vědecké komunitě, podpoří jejich odbornou validaci a pomůže přivést k platformě zájemce o využití dat ve vlastních projektech. Vedle publikování výsledků bude nutné pokračovat také v ověřování analytických doporučení na nových datech, rozšiřovat druhově specifické referenční hodnoty a systematicky sledovat, zda navrhované postupy skutečně vedou ke zvýšení líhnivosti a kvality odchovů.

Projekt tak nevytvořil pouze soubor jednotlivých výsledků, ale základ dlouhodobě rozvíjitelné infrastruktury propojující chovatelskou praxi, aplikovaný výzkum a ochranu biodiverzity. Její další úspěch bude záviset především na počtu aktivních uživatelů, kvalitě sdílených dat, dlouhodobé technické udržitelnosti a schopnosti převádět nové poznatky zpět do každodenní práce chovatelů. Právě udržení tohoto oběhu mezi daty, vědeckým poznáním a praktickým rozhodováním představuje nejdůležitější úkol řešitelského týmu, navazující na ukončený projekt.

7. Použitá literatura

- Abolins-Abols, M., Hanley, D., Moskát, C., Grim, T. & Hauber, M. E. (2019). Anti-parasitic egg rejection by great reed warblers (*Acrocephalus arundinaceus*) tracks differences along an eggshell color gradient. *Behavioural Processes*, 166, 103902. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2019.103902>
- Amat, J. A. & Masero, J. A. (2004). How Kentish plovers, *Charadrius alexandrinus*, cope with heat stress during incubation. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 56, 26–33. <https://doi.org/10.1007/s00265-004-0758-9>
- Andersson, M. (1978). Optimal egg shape in waders. *Ornis Fennica*, 55, 105–109.
- Ar, A. & Rahn, H. (1980). Water in the avian egg: overall budget of incubation. *American Zoologist*, 20, 373–384. <https://doi.org/10.1093/icb/20.2.373>
- Ar, A., Paganelli, C. V., Reeves, R. B., Greene, D. G. & Rahn, H. (1974). The avian egg: water vapor conductance, shell thickness, and functional pore area. *The Condor*, 76, 153–158. doi:10.2307/1366725
- Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*, 20, 1527–1532. doi:10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2
- Baker, D. E. (2002). A geometric method for determining shape of bird eggs. *The Auk*, 119, 1179–1186. <https://doi.org/10.1093/auk/119.4.1179>
- Bártol, I., Karcza, Z., Moskát, C., Røskoft, E. & Kisbenedek, T. (2002). Responses of great reed warblers *Acrocephalus arundinaceus* to experimental brood parasitism: the effects of a cuckoo *Cuculus canorus* dummy and egg mimicry. *Journal of Avian Biology*, 33, 420–425. <https://doi.org/10.1034/j.1600-048X.2002.02945.x>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

- Bichet, C., Moiron, M., Kürten, N., Vedder, O. & Bouwhuis, S. (2025). Egg characteristics of female common terns are repeatable, and vary with maternal age and laying order. *Ecology and Evolution*, 15, e72455. <https://doi.org/10.1002/ece3.72455>
- BirdLife International. (2026). *HBW and BirdLife International digital checklist of the birds of the world. Version 10*. BirdLife International.
- Birkhead, T. R., Thompson, J. E. & Biggins, J. D. (2017). Egg shape in the common guillemot *Uria aalge* and Brünnich's guillemot *U. lomvia*: not a rolling matter? *Journal of Ornithology*, 158, 679–685. <https://doi.org/10.1007/s10336-017-1437-8>
- Boulton, R. L. & Cassey, P. (2012). How avian incubation behaviour influences egg surface temperatures: relationships with egg position, development and clutch size. *Journal of Avian Biology*, 43, 289–296. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048X.2012.05657.x>
- Burnside, R., Shaffer, S., Cuscó, F., Rahman, M. & Scotland, K. (2021). Quantifying egg attendance behaviours of wild Asian houbara can improve artificial incubation outcomes. *Endangered Species Research*, 46, 193–204. <https://doi.org/10.3354/esr01153>
- Cantar, R. V. & Montgomerie, R. D. (1985). The influence of weather on incubation scheduling of the white-rumped sandpiper (*Calidris fuscicollis*): a uniparental incubator in a cold environment. *Behaviour*, 95, 261–289. <https://doi.org/10.1163/156853985X00154>
- Chajma, P., Šálek, M., Burešová Pešková, L., Babováková, I., Trejbalová, K., Vaidl, A., Podhrázký, M., Vrána, P., Suvorov, P. & Sládeček, M. (in prep.). *Open biomimetic 3D-printable surrogate eggs for avian incubation research and conservation breeding*.
- Chen, K. H., Chen, P. C., Liu, K. C. & Chan, C. T. (2015). Wearable sensor-based rehabilitation exercise assessment for knee osteoarthritis. *Sensors*, 15, 4193–4211. <https://doi.org/10.3390/s150204193>
- Clatterbuck, C. A., Young, L. C., VanderWerf, E. A., Naiman, A. D., Bower, G. C. & Shaffer, S. A. (2017). Data loggers in artificial eggs reveal that egg-turning behavior varies on multiple ecological scales in seabirds. *The Auk*, 134, 432–442. <https://doi.org/10.1642/AUK-16-205.1>
- Clements, J. F., Rasmussen, P. C., Schulenberg, T. S., Iliff, M. J., Fredericks, T. A., Gerbracht, J. A., Lepage, D., Spencer, A., Billerman, S. M., Sullivan, B. L., Smith, M. & Wood, C. L. (2024). *The eBird/Clements checklist of Birds of the World: v2024*. Cornell Lab of Ornithology.
- Conway, C. J. & Martin, T. E. (2000). Evolution of passerine incubation behavior: influence of food, temperature, and nest predation. *Evolution*, 54, 670–685. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00068.x>
- Coulson, J. C. & Wooller, R. D. (1984). Incubation under natural conditions in the kittiwake gull, *Rissa tridactyla*. *Animal Behaviour*, 32, 1204–1215. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(84\)80238-9](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(84)80238-9)
- Cresswell, W., Holt, S., Reid, J. M., Whitfield, D. P. & Mellanby, R. J. (2003). Do energetic demands constrain incubation scheduling in a biparental species? *Behavioral Ecology*, 14, 97–102. <https://doi.org/10.1093/beheco/14.1.97>
- Croston, R. & Hauber, M. E. (2014). Spectral tuning and perceptual differences do not explain the rejection of brood parasitic eggs by American robins (*Turdus migratorius*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 68, 351–362. <https://doi.org/10.1007/s00265-013-1659-8>

- Damaziak, K., Pawełska, M., Gozdowski, D. & Niemiec, J. (2018). Short periods of incubation, egg turning during storage and broiler breeder hens age for early development of embryos, hatching results, chicks quality and juvenile growth. *Poultry Science*, 97, 3264–3276. <https://doi.org/10.3382/ps/pey163>
- Deeming, D. C. (1989). Failure to turn eggs during incubation: development of the area vasculosa and embryonic growth. *Journal of Morphology*, 201, 179–186. <https://doi.org/10.1002/jmor.1052010207>
- Deeming, D. C. (Ed.). (2002). *Avian incubation: behaviour, environment, and evolution*. Oxford University Press.
- Deeming, D. C. & Reynolds, S. J. (Eds.). (2015). *Nests, eggs, and incubation: new ideas about avian reproduction*. Oxford University Press.
- DuRant, S. E., Hopkins, W. A., Hepp, G. R. & Walters, J. R. (2013). Ecological, evolutionary, and conservation implications of incubation temperature-dependent phenotypes in birds. *Biological Reviews*, 88, 499–509. <https://doi.org/10.1111/brv.12015>
- Eklund, C. R. & Charlton, F. E. (1959). Measuring the temperatures of incubating penguin eggs. *American Scientist*, 47, 80–86.
- Elibol, O. & Brake, J. (2006). Effect of egg turning angle and frequency during incubation on hatchability and incidence of unhatched broiler embryos with head in the small end of the egg. *Poultry Science*, 85, 1433–1437. <https://doi.org/10.1093/ps/85.8.1433>
- Friard, O. & Gamba, M. (2016). BORIS: a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 1325–1330. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12584>
- Gama, J., Fuller, J. & Leva, P. (2015). *RSpincalc: Conversion between attitude representations of DCM, Euler angles, quaternions, and Euler vectors*. R package version 1.2.
- GBIF Secretariat. (2023). *GBIF Backbone Taxonomy*. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/39omei>
- GBIF Secretariat. (2026). *GBIF Species API*. GBIF Technical Documentation.
- Gill, F., Donsker, D. & Rasmussen, P. (Eds.). (2025). *IOC World Bird List (v15.1)*. <https://doi.org/10.14344/IOC.ML.15.1>
- Hoyt, D. F. (1979). Practical methods of estimating volume and fresh weight of bird eggs. *The Auk*, 96, 73–77.
- Igic, B., Nunez, V., Voss, H. U., Croston, R., Aidala, Z., López, A. V., Tatenhove, A. V., Holford, M. E., Shawkey, M. D. & Hauber, M. E. (2015). Using 3D printed eggs to examine the egg-rejection behaviour of wild birds. *PeerJ*, 3, e965. <https://doi.org/10.7717/peerj.965>
- Incubase. (2026). *Incubase: platforma pro správu, sdílení a analýzu dat o inkubaci ptačích vajec*. Česká zemědělská univerzita v Praze. <https://incubase.fzp.czu.cz/>
- Kerr, E. (2022). *Employing three-dimensional printing technologies and precision hand painting to produce resilient and relevant bird egg replicas*. [Doplňit typ práce / vydavatele podle finálního zdroje.]
- Kolešková, V., Šálek, M. E., Brynychová, K., Chajma, P., Pešková, L., Elhassan, E., Petrusová Vozabulová, E., Janatová, V., Almuheri, A. & Sládeček, M. (2023). Offspring thermal demands and parental brooding

- efficiency differ for precocial birds living in contrasting climates. *Frontiers in Zoology*, 20, 12. <https://doi.org/10.1186/s12983-023-00492-1>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B. & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package: tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Lobo, Y. & Marini, M. Â. (2013). Artificial incubation, egg replacement and adoptive parents in bird management: a test with lesser elaenia *Elaenia chiriquensis*. *Bird Conservation International*, 23, 283–295. <https://doi.org/10.1017/S0959270912000361>
- Meir, M., Nir, A. & Ar, A. (1984). Increasing hatchability of turkey eggs by matching incubator humidity to shell conductance of individual eggs. *Poultry Science*, 63, 1489–1496. doi:10.3382/ps.0631489
- Moreau, J., Perroud, L., Bollache, L., Yannic, G., Teixeira, M., Schmidt, N. M., Reneerkens, J. & Gilg, O. (2018). Discriminating uniparental and biparental breeding strategies by monitoring nest temperature. *Ibis*, 160, 13–22. <https://doi.org/10.1111/ibi.12507>
- New, D. A. T. (1957). A critical period for the turning of hens' eggs. *Development*, 5, 293–299. <https://doi.org/10.1242/dev.5.3.293>
- Oliveira, G. D. S., Dos Santos, V. M., Rodrigues, J. C. & Nascimento, S. T. (2020). Effects of different egg turning frequencies on incubation efficiency parameters. *Poultry Science*, 99, 4417–4420. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.05.045>
- Pešková, L., Sládeček, M., Brynychová, K., Chajma, P., Kolečková, V., Elhassan, E., Bilal, M. & Šálek, M. (2024). Egg turning in a subtropical shorebird has a diel rhythmicity and is affected by predation risk. *Animal Behaviour*, 213, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2024.05.002>
- Pešková, L., Sládeček, M., Šálek, M., Brynychová, K., Chajma, P., Soulsbury, C. D. & Deeming, D. C. (2025). Egg turning rates in birds: a review of recording methods and the influence of egg composition and developmental maturity. *Ornithology*, ukaf045. <https://doi.org/10.1093/ornithology/ukaf045>
- Prusa Research a.s. (2026). *PrusaSlicer, version 2.9.4* [Computer software]. Prusa Research a.s. <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rahn, H. & Ar, A. (1974). The avian egg: incubation time and water loss. *The Condor*, 76, 147–152. <https://doi.org/10.2307/1366724>
- Schwartz, A., Weaver, J. D., Scott, N. R. & Cade, T. J. (1977). Measuring the temperature of eggs during incubation under captive falcons. *The Journal of Wildlife Management*, 41, 12–17. <https://doi.org/10.2307/3800083>
- Shaffer, S. A., Clatterbuck, C. A., Kelsey, E. C., Naiman, A. D., Young, L. C., VanderWerf, E. A., Warzybok, P., Bradley, R., Jahncke, J. & Bower, G. C. (2014). As the egg turns: monitoring egg attendance behavior in wild birds using novel data logging technology. *PLOS ONE*, 9, e97898. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097898>
- Sládeček, M., Chajma, P., Šálek, M. E. et al. (in prep.). *Incubase: an open platform to unlock the hidden potential of hatchery data for avian science and conservation breeding*.

Sládeček, M., Chajma, P., Šálek, M. E. et al. (2026). *Metodická příručka pro využití komplexního monitoringu inkubace při chovu v lidské péči*. Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze. [Pracovní verze; doplnit finální autorský kolektiv.]

Stoddard, M. C., Yong, E. H., Akkaynak, D., Sheard, C., Tobias, J. A. & Mahadevan, L. (2017). Avian egg shape: form, function, and evolution. *Science*, 356, 1249–1254. <https://doi.org/10.1126/science.aaj1945>

Taff, C. C., Ryan, T. A., Uehling, J. J., Injaian, A. S. & Vitousek, M. N. (2022). Within-individual consistency and between-individual variation in the shapes of eggs laid by tree swallows (*Tachycineta bicolor*). *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.02.04.479122>

Tullett, S. G. (1990). Science and the art of incubation. *Poultry Science*, 69, 1–15. <https://doi.org/10.3382/ps.0690001>

Tullett, S. G. & Deeming, D. C. (1987). Failure to turn eggs during incubation: effects on embryo weight, development of the chorioallantois and absorption of albumen. *British Poultry Science*, 28, 239–243. <https://doi.org/10.1080/00071668708416958>

Ueno, A. & Suzuki, K. (2015). Induction of brooding behavior using dummy eggs for cross-fostering birds. *Animal Behaviour and Management*, 51, 81–86. https://doi.org/10.20652/abm.51.3_81

Varney, J. R. & Ellis, D. H. (1974). Telemetering egg for use in incubation and nesting studies. *The Journal of Wildlife Management*, 38, 142–148. <https://doi.org/10.2307/3800209>

Van Hees, V. T., Fang, Z., Langford, J., Assah, F., Mohammad, A., Da Silva, I. C., Trenell, M. I., White, T., Wareham, N. & Brage, S. (2014). Autocalibration of accelerometer data for free-living physical activity assessment using local gravity and temperature: an evaluation on four continents. *Journal of Applied Physiology*, 117, 738–744. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00421.2014>

Webb, D. R. (1987). Thermal tolerance of avian embryos: a review. *The Condor*, 89, 874–898. <https://doi.org/10.2307/1368537>

Wright, R. M. & Phillips, V. E. (1991). Reducing the breeding success of Canada and greylag geese, *Branta canadensis* and *Anser anser*, on gravel pits. *Wildfowl*, 42, 42–44.

Yuan, X., Yu, S., Zhang, S., Wang, G. & Liu, S. (2015). Quaternion-based unscented Kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multisensor system. *Sensors*, 15, 10872–10890. <https://doi.org/10.3390/s150510872>

Zhang, L., An, B., Shu, M., Zhao, C., Yang, X., Suo, Y., Se, Y. & Dabu, X. (2017). Incubation strategies of the black-necked crane (*Grus nigricollis*) in relation to ambient temperature and time of day. *Avian Research*, 8, 19. <https://doi.org/10.1186/s40657-017-0076-3>