

T A
Č R

Program **Prostředí pro život**

Souhrnná výzkumná zpráva o průběhu vytváření a finální podoby cílových výstupů projektu a naplnění cílů projektu

**Projekt SS01020383: Využití multisenzorického
dataloggingu při hodnocení dopadu
environmentálních změn na aktivitu volně
žijících živočichů**

Obsah

1. Úvod	2
2. V1 Multisenzorický datalogger – užitiný vzor	3
2.1. Shrnutí dosažení výstupu V1	3
2.2. Detailní postup řešení V1	3
2.2.1. Prototyp MSD1	5
2.2.2. Prototyp MSD2	7
2.2.3. Prototyp čtečky.....	10
2.2.4. Vývoj firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher	11
2.3. Komentář ke změně v harmonogramu při plnění výsledku V1.....	14
2.3.1. Komentář k dopadu globální krize trhu součástek na průběh projektu	15
2.3.2. Komentář k nutnosti změny technického řešení hardware a vytvoření nového prototypu MSD2	15
2.3.3. Komentář k časové náročnosti programovacích prací při vývoji firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher.....	16
3. V2 Softwarová aplikace pro úpravu, vizualizaci a základní analýzu senzorických dat	16
3.1. Shrnutí dosažení výstupu V2	16
3.2. Detailní postup řešení V2	19
3.2.1. Zpracování dat získaných měřicími senzory.....	21
4. V3 Metodická příručka	24
4.1. Shrnutí dosažení výstupu V3	24
4.2. Detailní postup řešení V3	24
5. V4 Příkladové studie	25
5.1. Shrnutí dosažení výstupu V4	25
5.2. Postup řešení V4.....	25
5.2.1. Postup prací při monitoringu ropuchy obecné.....	26
5.2.2. Postup prací při monitoringu drobných pěvců brhlíka lesního a sýkory koňadry.....	28
5.2.3. Postup prací při monitoringu čejky chocholaté.....	31
5.2.4. Postup prací při monitoringu ježků	32

1. Úvod

V rámci projektu bylo naplánováno dosažení následujících výsledků:

V1 Multisenzorický datalogger – Užitný vzor

V2 Softwarová aplikace pro úpravu, vizualizaci a základní analýzu senzorických dat
– Ostatní výsledky

V3 Metodická příručka – Ostatní výsledky

V4 Příkladové studie – Ostatní výsledky

V5 Souhrnná výzkumná zpráva o průběhu vytváření a finální podoby cílových výstupů a naplnění cílů projektu – Souhrnná výzkumná zpráva

Navzdory změnám v harmonogramu prací způsobených dopadem pandemie Covid-19 na celosvětový trh elektrosoučástek, komplikacemi při vývoji hardware dataloggeru a nadstandardní náročností vývoje software bylo v průběhu projektu v letech 2020 až 2023 dosaženo všech plánovaných výstupů.

Dle zadání bylo vyvinuto miniaturní zařízení pro monitoring volně žijících živočichů – **Multisenzorický datalogger MSD** s certifikovaným užitným vzorem (**V1**). Zařízení splňuje všechny zadané funkční parametry (tepelný, vlhkostní, světelný senzor, akcelerometr, magnetometr a radiovysílač) a dosahuje minimálních rozměrů, jichž bylo možno s požadovanými technickými parametry a možnostmi součástek dostupných na trhu dosáhnout. Zařízení je ovládáno pomocí uživatelského rozhraní „AnimalWatcher“, které umožňuje široké spektrum nastavení jednotlivých funkcí zařízení, režimů snímání a funkcí úspory spotřeby baterie.

Rovněž byly úspěšně dokončeny výsledky (**V2**) **Softwarová aplikace pro úpravu, vizualizaci a základní analýzu senzorických dat**, (**V3**) **Metodická příručka** a (**V4**) **Příkladové studie**, při jejichž naplňování byl v souladu se zadáním částečně využit experimentální prototyp dataloggeru DAL vyvinutý v rámci jiného projektu (viz ISTA: Představení projektu Vymezení se k obdobným projektům a řešením). Výše zdůvodněné komplikace v průběhu projektu a tím vzniklá časová prodleva ve vývoji zařízení neumožnily intenzivnější využívání MSD v terénu navzdory plánovanému harmonogramu. Srovnatelná hmotnost, velikost a zčásti shodná senzorická výbava DAL však umožnila zhodnotit aplikační potenciál vyvinutého dataloggeru MSD (**V1**). Odevzdané výsledky dokládají využitelnost MSD při studiu chování různých modelových druhů živočichů. Poskytují zároveň nástroje pro jednoduchou analýzu a vizualizaci sebraných dat (**V2**), spolu s metodickými pokyny pro účelné využití v terénu (**V3**), které vycházejí ze zkušeností z námi provedených a vyhodnocených příkladových studií (**V4**).

Výsledný produkt má široký potenciál využití v různých formách terénního výzkumu při komplexním monitoringu volně žijících či reintrodukovaných živočichů a při hodnocení vlivu prostředí a dopadu environmentálních změn na jejich chování. Nástroj plánujeme využít v dalších studiích a navazujících projektech v rámci ČR i v zahraničí, a to jak samostatně, tak ve spolupráci s dalšími subjekty. Nadto má toto zařízení potenciál pro další vývoj (např. směrem k větší miniaturizaci, výdrži baterie, dosahu signálu, vnějšího designu, přenosu dat aj.), který může v budoucnu ještě více rozšířit jeho uplatnění v oblasti environmentálního výzkumu. Níže je rozebrán podrobný průběh dosažení jednotlivých výsledků V1 až V4 v časové linii projektu.

2. V1 Multisenzorický datalogger – užitný vzor

2.1. Shrnutí dosažení výstupu V1

Výsledku užitný vzor V1 bylo dosaženo v lednu 2023 získáním certifikátu (CZ 36739 U1). V březnu 2023 byly dokončeny dva plně funkční prototypy Multisenzorického dataloggeru (dále „MSD2“) bez ochranné izolace určené k testování software a uživatelské aplikace AnimalWatcher a dva prototypy čtecího zařízení. Tyto dva prototypy i čtecí zařízení byly použity k otestování funkčnosti jednotlivých komponent a různých variantních nastavení všech senzorů a byla testována výdrž baterie při těchto nastaveních. Po úspěšném ověření funkčnosti byla urychleně zahájena výroba minisérie.

Rozměry MSD2 jsou 10,0 x 20,0 x 6,0 mm, hmotnost činí 1,0 g bez izolace a 1,4 g s ochrannou izolací proti vnějším vlivům prostředí. Výsledek splňuje zadané funkční parametry (čidlo teploty, vlhkosti, světla, magnetometr, akcelerometr, radiovysílač). Velikost a hmotnost dataloggeru je vzhledem k množství použitých součástek mírně vyšší v porovnání s prvotním návrhem. To bohužel znemožňuje plánované využití dataloggeru pro malé modelové druhy pěvců a letounů, u nichž byla již původní plánovaná hmotnost zařízení (1 g) na hranici doporučeného limitu zátěže (5% hmotnosti živočicha). I přesto se stále jedná o velmi miniaturní zařízení, které v poměru multifunkční výbavy a velikosti/hmotnosti nemá na trhu konkurenci a je možné jej využít při monitoringu menších druhů živočichů (od hmotnosti ~28 g). Velkým přínosem zařízení je vysoce sofistikovaný software (uživatelské rozhraní AnimalWatcher) umožňující široké spektrum nastavení funkcí dataloggeru a zajišťující široké spektrum možností jeho využití v různých typech monitoringu.

V dubnu 2023 byla vyrobena minisérie 10 ks zaizolovaných MSD2 pro další testování v terénních podmínkách. Předpokládaná výroba větší série musela být odložena kvůli posunu harmonogramu vývojových prací. Změna v harmonogramu byla zapříčiněna nedostupností součástek následkem celosvětové krize na trhu s polovodiči způsobené pandemií Covid-19, vývojovými komplikacemi konceptu napájení paměti prvního prototypu („MSD1“) a podhodnocenou časovou náročností vývoje software (viz dále Komentář ke změně v harmonogramu při plnění výsledku V1). Po dalších drobných technických úpravách a vyladění bylo zařízení plně funkční v červnu 2023, kdy bylo následně otestováno v terénu na mláďatech modelového druhu čejky chocholaté.

Zařízení se ukázalo být plně funkční, splňuje všechny zadané parametry a lze ho v tuto chvíli použít pro výzkum řady živočišných druhů v experimentálních i terénních podmínkách.

2.2. Detailní postup řešení V1

V **roce 2020** byla provedena důkladná rešerše dostupných součástek k realizaci výroby multisenzorického dataloggeru. Dále byl vypracován technický návrh rozvržení a osazení dataloggeru a návrh řešení zadaných technických požadavků.

Technické požadavky v návrhu zařízení byly následující:

- akcelerometr
- magnetometr
- luxmetr
- teploměr
- vlhkoměr
- měření v reálném čase
- rádiový vysílač pro radiolokaci
- datovou paměť
- kontakty pro nabíjení akumulátoru a komunikaci s PC
- odolnost proti prachu a vodě
- minimální možná velikosti a hmotnost

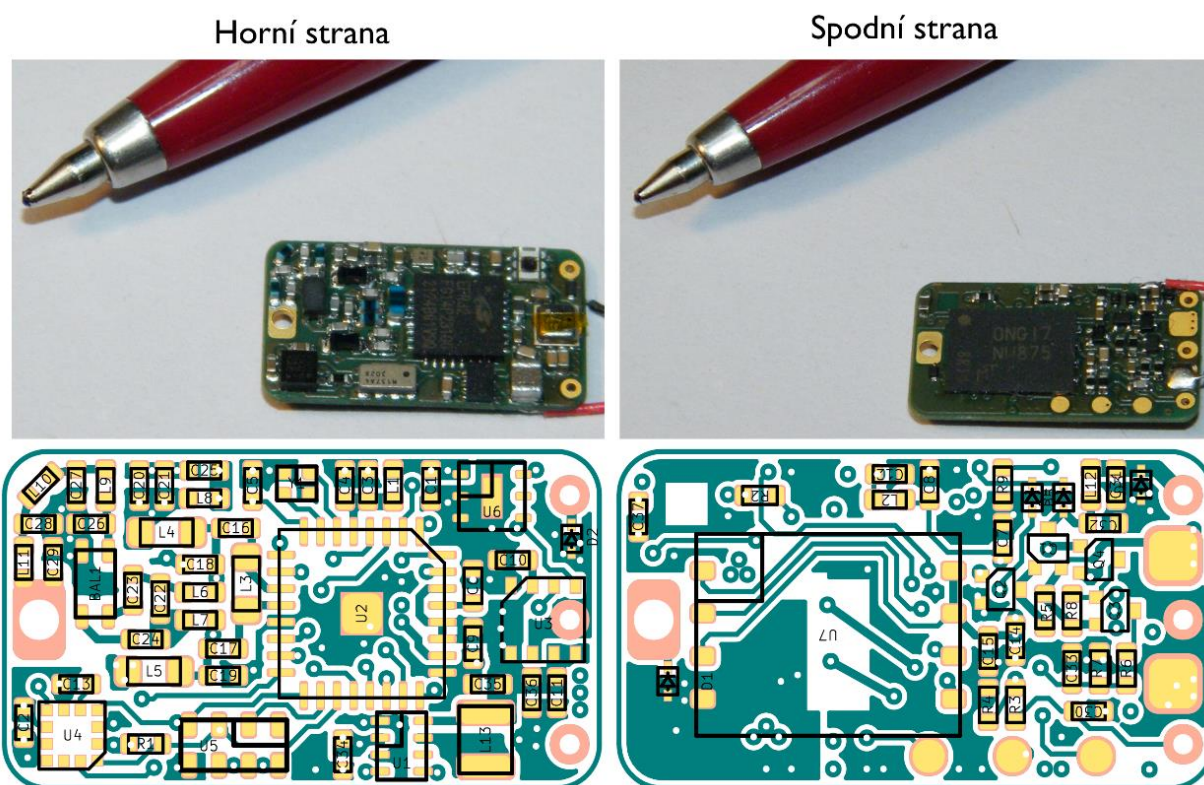
V **roce 2021** byly po důkladné rešerši součástek odděleně testovány jednotlivé dílčí komponenty multisenzorického dataloggeru MSD. Byl vyvinut a sestrojen první prototyp (MSD1), který byl osazen vysílačem (v první fázi bez antény, jejíž podoba teprve vznikala) a všemi požadovanými senzory (tj. pro měření světla, teploty, vlhkosti, pohybu pomocí akcelerometru a magnetometru), při zajištění minimální velikosti a hmotnosti. Dále byl vytvořen návrh čtečky sloužící k nabíjení dataloggeru a jeho komunikaci s počítačem (ke kontrole a nastavení zařízení, stahování a mazání dat). Prototyp MSD1 byl podroben sérii technických testů a byl vytvořen první návrh firmware a uživatelského rozhraní dataloggeru AnimalWatcher umožňující flexibilní uživatelské nastavení. I přesto, že na konci roku 2021 jevil prototyp MSD1 jako funkční, při dalším testování v únoru 2022 byly zjištěny technické komplikace vedoucí k nutnosti vytvoření nového prototypu MSD2, včetně nového návrhu tištěného spoje.

Na průběh projektu v roce 2021 měla bohužel významný vliv nastalá globální krize v dostupnosti čipů a dalších elektronických součástek (viz např. <https://www.cnbc.com/2021/05/07/chip-shortage-is-starting-to-have-major-real-worldconsequences.html>), kdy došlo k radikálnímu snížení výroby a navýšení poptávky na trhu polovodičů. V důsledku toho docházelo k opakovanému a dramatickému prodlužování dodacích lhůt (v řádu desítek týdnů) u součástek, které byly dříve běžně skladem a dostupné do 24 hodin. I přes tuto závažnou překážku, na níž nenesou členové řešitelského týmu žádný díl viny, se ovšem podařilo v roce 2021 většinu klíčových činností splnit. Konkrétně se podařilo objednat vývojové kity obsahující součástky, jejichž dostupnost byla v danou chvíli omezena. Z těchto kitů byly následně jednotlivé komponenty ručně odděleny a využity pro vývoj hardware prototypu MSD1. I přesto, že podobný postup nelze využít k výrobě celé funkční série těchto zařízení, byl tímto způsobem dokončen první prototyp multisenzorického dataloggeru MSD1.

2.2.1. Prototyp MSD1

Prototyp MSD1 se v uvedených použitých klíčových součástkách (přehled viz Tab. 1) a použitých bateriích shoduje s navazujícím (výsledným) prototypem MSD2. Základem prototypu MSD1 byl čtyřvrstvý plošný spoj o rozměrech 10,0 x 18,0 x 0,5 mm, který byl vzhledem k důrazu na malé rozměry osazen z obou stran, a to celkem 78 součástkami (Obr. 1). Hmotnost neosazeného plošného spoje byla 0,26 g, hmotnost kompletně osazeného plošného spoje pak nepřekračovala 0,6 g. Tyto hodnoty bylo třeba s ohledem na vysoké požadavky kladené na minimalizaci celkové hmotnosti zařízení považovat za výrazný úspěch. Celková hmotnost zařízení tak neměla (v závislosti na použité baterii a finální úpravě) překročit hmotnost 1 g, což by v souladu s plánem umožnilo instalaci zařízení i na velmi malé organismy.

Velká pozornost byla věnována volbě použitých součástek. Hlavními kritérii pro jejich výběr byla nízká spotřeba proudu, množství a skladba integrovaných funkcí (tím byla zajištěna mimo jiné velká flexibilita při vývoji a následném rozvoji firmware zařízení), malé rozměry a nízká hmotnost. Při výběru součástek bylo rovněž dbáno na to, aby se jednalo o součástky hojně využívané v dalších odvětvích průmyslu (automobily, mobilní telefony, chytrá elektronika), a to s ohledem na jejich dlouhodobou dostupnost. U široce využívaných součástek je větší jistota, že jejich výroba bude pokračovat i v budoucnu a jejich dostupnost bude po překonání krize na trhu opět vysoká. Volba klíčových komponent včetně stručného zdůvodnění jejich výběru je shrnuta v Tab. 1.



Obr. 1: Technický plán (dole) a ukázka fyzického osazení (nahore) plošného spoje pro MSD1. Osazena není baterie a anténa. Připojené vodiče jsou instalovány pouze pro potřeby vývoje.

Tab. 1: Shrnutí výběru a klíčových vlastností u nejdůležitějších součástí, vybraných pro použití v MSD1.

Funkce	Typ	Výrobce	Výhody
Teplota, relativní vlhkost, tlak	BME280	BOSCH	Senzory lze ovládat nezávisle; 3 v 1 pouzdru
3D akcelerometr, 3D magnetometr	LSM303AH	ST Microelectronics	Senzory lze ovládat nezávisle; 2 v 1 pouzdru; vestavěné FIFO pro 256 vzorků
Luxmetr	OPT3001	Texas Instruments	Automatická volba rozsahů; filtr IR
Rádiový vysílač a přijímač	EFR32FG14P23 1F256GM32-B	Silicon Labs	Mikroprocesor ARM® Cortex®-M4 s vestavěným rádiovým vysílačem/přijímačem; podpora standardních modulačních formátů a komunikačních protokolů; navrženo pro IoT aplikace
Obvod reálného času	RV-3028-C7	Micro Crystal	Továrně kalibrovaný přesný oscilátor; extrémně nízká spotřeba proudu; funkce hodin, kalendáře, alarmu (pro plánované buzení procesoru)
Paměť FLASH	MT29F2G01AB BGDWB-IT:G	Micron	Paměť NAND FLASH 2 Gb (256 MB)
Spínaný zdroj napětí	TPS62840DLCR	Texas Instruments	Snižující měnič napětí; extrémně nízký vlastní odběr proudu; zajišťuje napájecí napětí 1,8 V pro obvody MSD vč. RF.

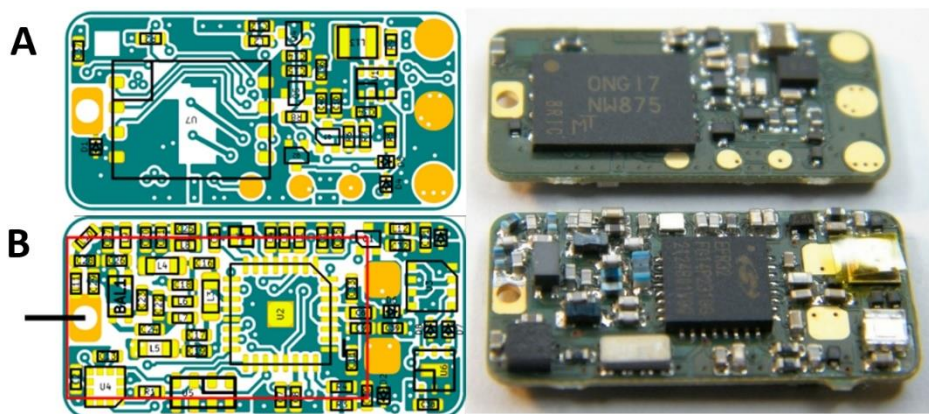
Zcela klíčovou komponentou, určující celkovou výdrž a využitelnost dataloggeru, je baterie. Pro MSD1 bylo zvoleno napájení plochými a obdélníkovými lithium-polymerovými (Li-Po) akumulátory s pracovním rozsahem napětí 2,8 – 4,2 V. Prozatím testovanými typy byly Li-Po 020815 s větší kapacitou (10 mAh), ale rovněž většími rozměry (2,5 x 8,0 x 15,0 mm) a hmotností (0,48 g) a Li-Po 280809 s menší kapacitou (7 mAh) i menšími rozměry (2,8 x 8,0 x 9,0 mm) a hmotností (0,27 g). Pro finální osazení MSD tak byla ověřena možnost využití obou zmíněných akumulátorů, v závislosti na zvoleném modelovém organismu i dalších potřebách konkrétního projektu. Klíčové komponenty MSD1 jsou programovatelné a byly zapojeny tak, aby spotřebu energie každé z nich bylo možné flexibilně řídit pomocí firmware dataloggeru, například

nastavením vhodných provozních módů a doby provozu (viz dále Vývoj firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher).

V roce 2022 byly práce soustředěny na dokončení vývoje hardware a programování firmware spolu s uživatelským rozhraním AnimalWatcher. Vývoj hardware, který se jevil začátkem roku 2021 jako dokončený, byl však zkomplikován neúspěšným pokusem o optimalizaci přístupu v ovládání napájení paměti prototypu MSD1. Řešení tohoto problému bylo věnováno několik týdnů, bohužel však bez uspokojivého výsledku. Bylo tedy nutné zcela změnit způsob řešení napájení paměti. Byl proto vytvořen nový prototyp s označením MSD2.

2.2.2. Prototyp MSD2

Na základě nového návrhu (viz dále Komentář k nutnosti změny technického řešení hardware a vytvoření nového prototypu MSD2) byly zahájeny práce na druhém prototypu (MSD2; Tab. 2, Obr. 2), jehož plně funkční verze včetně zaizolování byla zprovozněna v roce **2023**. Spolu s dokončením druhého, již plně funkčního prototypu MSD2 byl vytvořen také první prototyp funkční čtečky. Prototyp MSD2 je nepatrně větších rozměrů (20,0 x 10,0 mm) než prototyp MSD1, přičemž větší rozměr zajistil úsporné ovládání paměti FLASH (do obvodu byl přidán MOSFET tranzistor) a lepší přístup kontaktů ke čtečce. Koncept obou zařízení (funkčního prototypu MSD2 a čtečky) byl předložen s žádostí o registraci užitného vzoru na Úřadu průmyslového vlastnictví. Tato žádost byla schválena a bylo vydáno Osvědčení o zápisu certifikovaného užitného vzoru 36739 Multisenzorické zařízení pro monitoring živočichů.

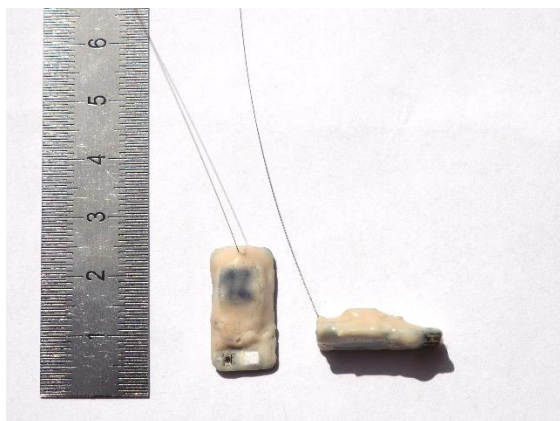


Obr. 2: Technický plán (vlevo) a ukázka fyzického osazení (vpravo) plošného spoje pro MSD2 horní strana (A) a spodní strana (B). Osazena není baterie a anténa.

Tab. 2: Shrnutí výběru a klíčových vlastností u nejdůležitějších součástek, vybraných pro MSD2.

Funkce	Typ	Výrobce	Výhody provedení
Teplotní, vlhkostní a tlakový senzor	BME280	BOSH	3 v 1 pouzdrů, nezávislé ovládání
3D akcelerometr, 3D magnetometr	LSM303AH	ST Microelectronics	2 v 1 pouzdrů, nezávislé ovládání, vestavěné FIFO
Světelný senzor	OPT3001	Texas Instruments	Automatická volba rozsahů, IR filtr
Radio vysílač a přijmač	EFR32FG14P231F256GM32-B	Silicon Labs	Mikroprocesor ARM, vestavěný radiový vysílač/přijímač
Obvod reálného času	RV-3028-C7	Micro Crystal	Přesný, nízká spotřeba proudu, funkce buzení
Paměť FLASH	MT29F2G01ABBGDWB-IT:G	Micron	2Gb (256MB)
Spínaný zdroj napětí	TPS62840DLCR	Texas Instruments	Nízký vlastní odběr, snižuje napětí zařízení na 1.8 V
Mikroprocesor	EFR32FG14P231F256GM32-B	Silicon Labs	Mikroprocesor ARM, vestavěný radiový vysílač/přijímač
Napájecí zdroj	LiPo 280809, napětí: 3,6 V, kapacita: 7 mA/h, váha: 0,27 g		
Převodník UART	Pasivní RC člen		
RC filtr	RC filtr		
Operační zesilovač měření napětí	NCS21872DR2G	ON Semiconductor	Dvojitá přesnost
Operační zesilovač měření proudu + MOSFET transistor	LTC6102IMS8#PBF ISP12DP06NMXTSA1 (MOSFET)	Analog Devices Infineon Technologies	Proudový snímač s nulovým driftem
Převodník USB/UART	FT232RQ	FTDI	
Regulátor napětí	SPX5205M5-L/TR	MaxLinear	Regulátor napětí LDO s nízkým šumem

Po dokončení hardware MSD2 byla zahájena realizace návrhu uživatelského rozhraní AnimalWatcher a byla naprogramována převážná většina firmware čtečky a dataloggeru. Následně byla připravena minisérie 10 kusů MSD2, z toho dva ks s větší baterií o vyšší kapacitě s celkovou finální hmotností 1,7 g a osm s menší baterií o nižší kapacitě s celkovou finální hmotností 1,4 g. Dataloggerby byly plně zaizolovány (Obr. 3) a otestovány v terénních podmínkách na mláďatech modelových druhů čejky chocholaté.



Obr. 3: Prototyp MSD2 po zaizolování a připravený k aplikaci v terénu

Radiovysílač MSD2

Významnou součástí MSD2 je vbudovaný radiovysílač, jehož nezbytnou součástí je anténa. Jako anténa byl po ozkoušení několika variantních materiálů nakonec použit nitinolový drát s nalisovanou dutinkou (Obr. 4). Drát je dutinkou provlečený tam a zpět jako pojistka proti vytržení a poté zalisovaný speciálními kleštěmi.



Obr. 4: Anténa MSD2

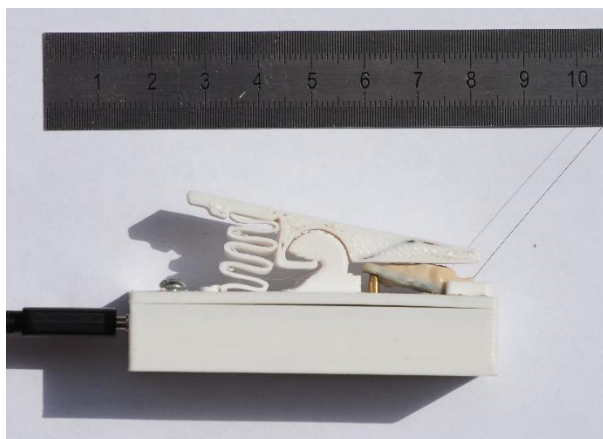
Izolace MSD2

Vzhledem k záměru využívání MSD2 v terénních podmínkách bylo nutno vyřešit izolaci celého zařízení. K mechanickému zapouzdření a současně jako izolace proti vodě byla použita dvousložková polyuretanová pryskyřice Brush-On 50. Tato pryskyřice je dostatečně flexibilní v porovnání s lakem, který může popraskat, zvyšuje křehkost celého zařízení a nenabízí dostatečně spolehlivou ochranu před prachem a vodou. Taktéž byly provedeny testy s jednosložkovým polyuretanovým tmelem SikaFlex-11FC, který má však příliš hustou konzistenci. Pryskyřice byla nanášena ručně v několika vrstvách. Bylo přitom nutno vyvarovat se aplikaci na senzory a elektrické kontakty MSD2.

Pro ochranu čidla vlhkosti byly otestovány dva typy filtrů – paropropustný a teflonový filtr PTFE. Paropropustný filtr způsobil u většiny MSD2 necitlivost čidla na vlhkost, čidlo reagovalo velmi pomalu na zvýšenou vlhkost a dlouho se následně zotavovalo. Zároveň nebylo možné zajistit výrobu tak, aby čidla na jednotlivých kusech prototypů reagovala stejně. Naopak při použití laboratorního PTFE filtru čidlo reagovalo přirozeně rychle, stejně jako bez filtru, a shodně u všech testovaných kusů. Využití PTFE se tedy ukázalo jako podstatně vhodnější. Navíc teflon k čidlu sám přilne a je dále mechanicky fixován polyuretanovou pryskyřicí.

2.2.3. Prototyp čtečky

V **roce 2023** byl dokončen prototyp čtečky (celkem tři funkční kusy) sloužící k nabíjení dataloggeru a jeho komunikaci s počítačem. Toto zařízení disponuje možností nastavení nabíjecího proudu a zároveň měří proud odebíraný dataloggerem. Tato funkce je užitečná zejména při monitoringu spotřeby energie při různých nastaveních a při procesování zabudovaných kontrol funkčnosti dataloggeru. Pomocí 3D tiskárny bylo vyrobeno pouzdro čtečky s úchytovým mechanismem pro datalogger (Obr. 5) zaručující spolehlivé propojení kontaktů mezi čtečkou a dataloggerem a zároveň umožňující flexibilitu ve fixaci různě velkých zařízení (odlišná finální úprava izolace, odlišná velikost baterie).



Obr. 5: Čtečka s prototypem MSD2 vloženým do úchytového mechanismu

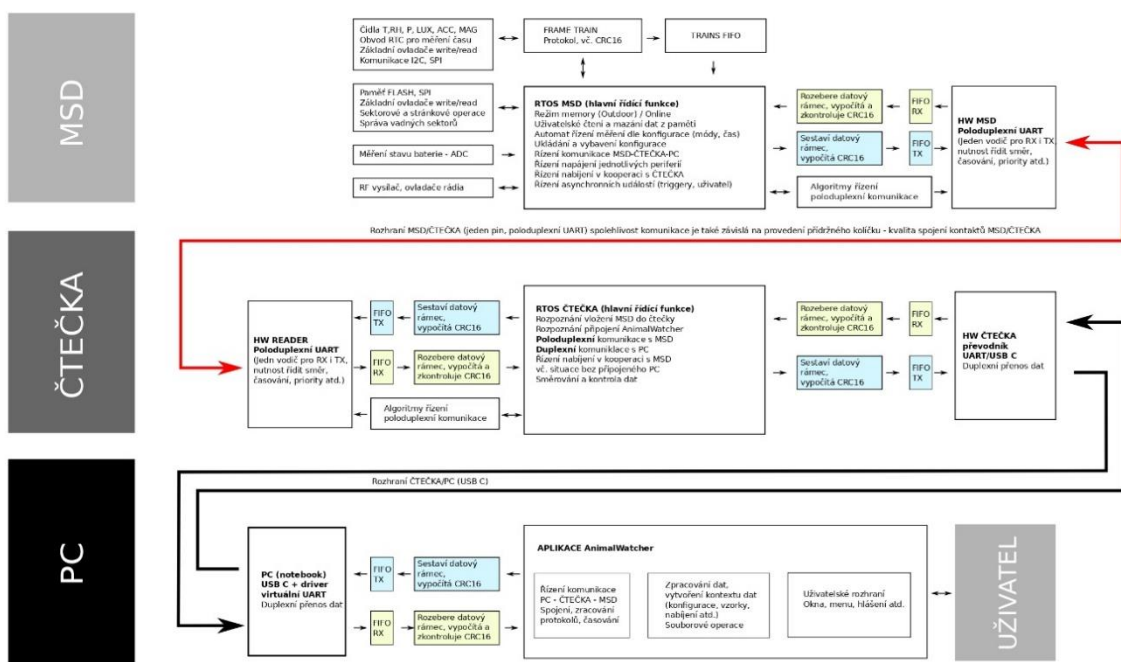
2.2.4. Vývoj firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher

Většina práce v roce **2022** byla věnována vývoji firmware a uživatelského rozhraní aplikace ovládající datalogger (AnimalWatcher). Jak se ukázalo, návrh funkcí zařízení a uživatelských funkcí, který byl vytvořen v roce 2021, vyžadoval více programovacího úsilí, než bylo původně plánováno. Tato koncepce je sice náročná a byla provázena řadou drobných komplikací, ale ve výsledku představuje široce univerzální nástroj pro rozmanité způsoby monitoringu volně žijících živočichů. Aplikace disponuje řadou doplňujících nastavení, která mají za úkol šetřit baterii i paměť. Nabízí například možnost spínání různých módů s odlišným nastavením pomocí prahových hodnot jednotlivých čidel (akcelerometrický, teplotní, vlhkostní, světelný a tlakový spouštěč), nastavení jejich snímání v různých časových oknech nebo dávkované snímání energeticky a paměťově náročných čidel (akcelerometr, magnetometr). Možnost časové prodlevy při spuštění a vysílání ve vybraných časových oknech byla integrována také do radiotelemetrického vysílače, který je inovativní a je velmi důležitou součástí dataloggeru. Díky němu lze každé jednotlivé zařízení bezpečně dohledat i ve složitém terénu, získat je zpět a zajistit sebraná data, což v případě využívaných experimentálních prototypů DAL a jiných komerčně dostupných alternativ nebylo možné.

Firmware

Jedná se o velmi sofistikovaný a komplexní systém algoritmů pracující v reálném čase (RTOS) a zahrnující velké množství řídicích a kontrolních prvků (Obr. 6). Mezi tyto prvky patří například zabezpečení toku dat pomocí cyklického redundantního součtu (CRC16), který je schopen odhalit poruchu v datech (např. prohození pořadí dvou čísel nebo jen změnu jediného bitu) nebo ovládání paměti pomocí algoritmu schopného detekovat vadný/opotřebovaný sektor paměti kdykoliv během sběru dat a data v reálném čase bezpečně přesunout do jiného sektoru. Firmware byl odladěn, a to jak z pohledu časové výkonnosti, tak i z pohledu logické funkce (s omezenými prostředky na úrovni hardware - RAM, FLASH, komunikačních rozhraní I2C, SPI, UART atd.).

Během roku **2022** byl celý systém komunikace hardware-firmware-uživatelské rozhraní z převážné většiny dokončen a zprovozněn. Nicméně stále nebylo ověřeno několik kroků nezbytných k úplnému zprovoznění zařízení. Jednalo se o: způsob zpracování a ukládání dat do *.txt formátu, algoritmus nabíjení, automatické rozpoznávání MSD ve čtečce a dokončení obsluhy radiotelemetrického vysílače. Tyto kroky byly dokončeny během jara roku **2023**, kdy byl předložen plně funkční prototyp MSD2.

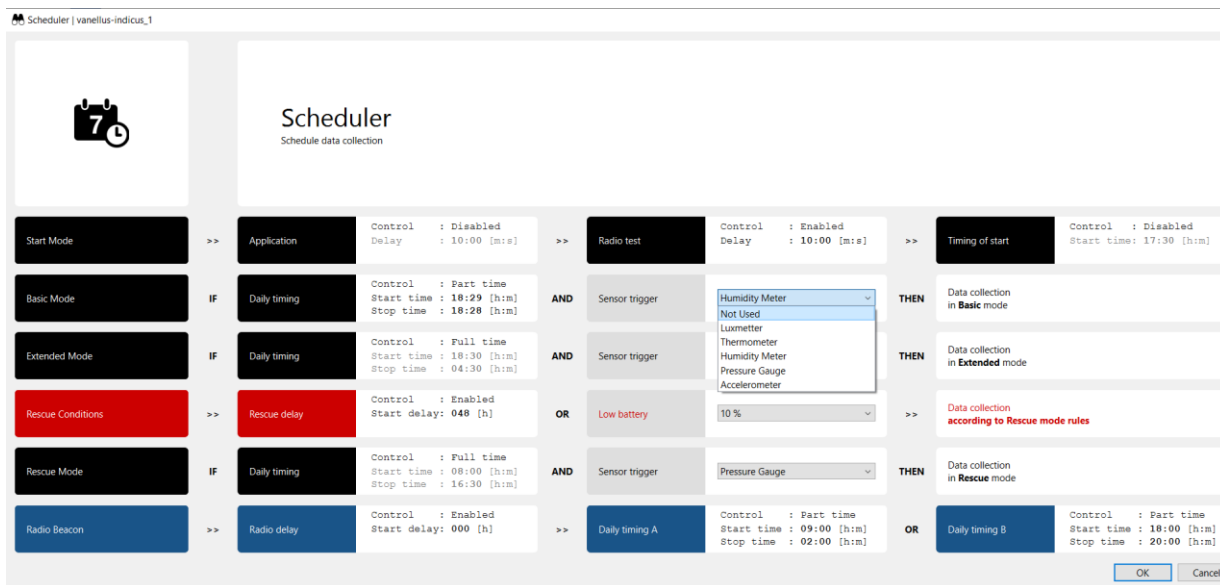


DATA STREAM MSD-ČTEČKA-PC Michal Zajačik 25.1. 2023

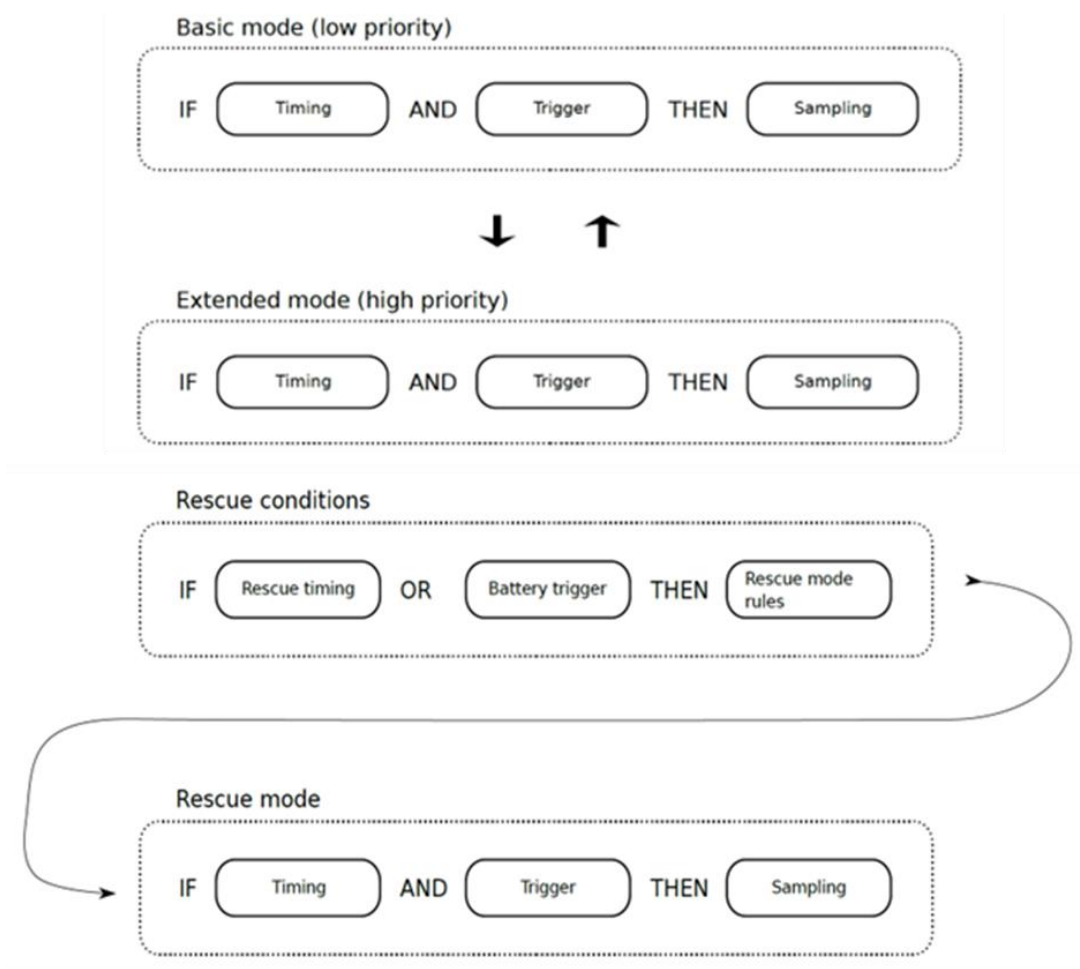
Obr. 6: Blokové schéma toku dat od uživatele do MSD a zpět, a schéma řídicích a kontrolních algoritmů systému. Technické zkratky vysvětlivky: FIFO = metoda First in, First out (první dovnitř, první ven); RX = přijaté (received); TX = odeslané (transmitted); duplexní komunikace = data mohou putovat oběma směry současně; poloduplexní komunikace = data mohou putovat obousměrně, ale pouze jedním směrem v jeden okamžik; CRC16 = cyklický redundantní součet; RTC = reálný čas; I2C + SPI = externí sériové sběrnice (komunikace mezi dvěma a více zařízeními); ADC = mikrokontrolor stavu baterie; UART = univerzální asynchronní přijímač - vysílač.

Uživatelské rozhraní AnimalWatcher

V aplikaci AnimalWatcher lze nastavit čtyři základní módy (Obr. 7): **Start mode** je určen k otestování funkčnosti dataloggeru a nastavení startu zařízení. **Basic mode a Extended mode** jsou určeny ke sběru dat. **Rescue mode** je primárně určen k dohledání zařízení v terénu za nízké spotřeby baterie, tedy za nastavení velmi omezeného nebo žádného sběru dat. Je ovšem možné tento mód využít i k standardnímu sběru dat. V případě aktivace více módů současně se spouštějí dle stupně priority (Rescue mode – prioritá 1; Extended mode – prioritá 2; Basic mode – prioritá 3). Rescue mode může být spuštěn také na základě podprahového (nastavitelného) stavu baterie nebo funkcí odloženého startu „delay“ (Obr. 8).

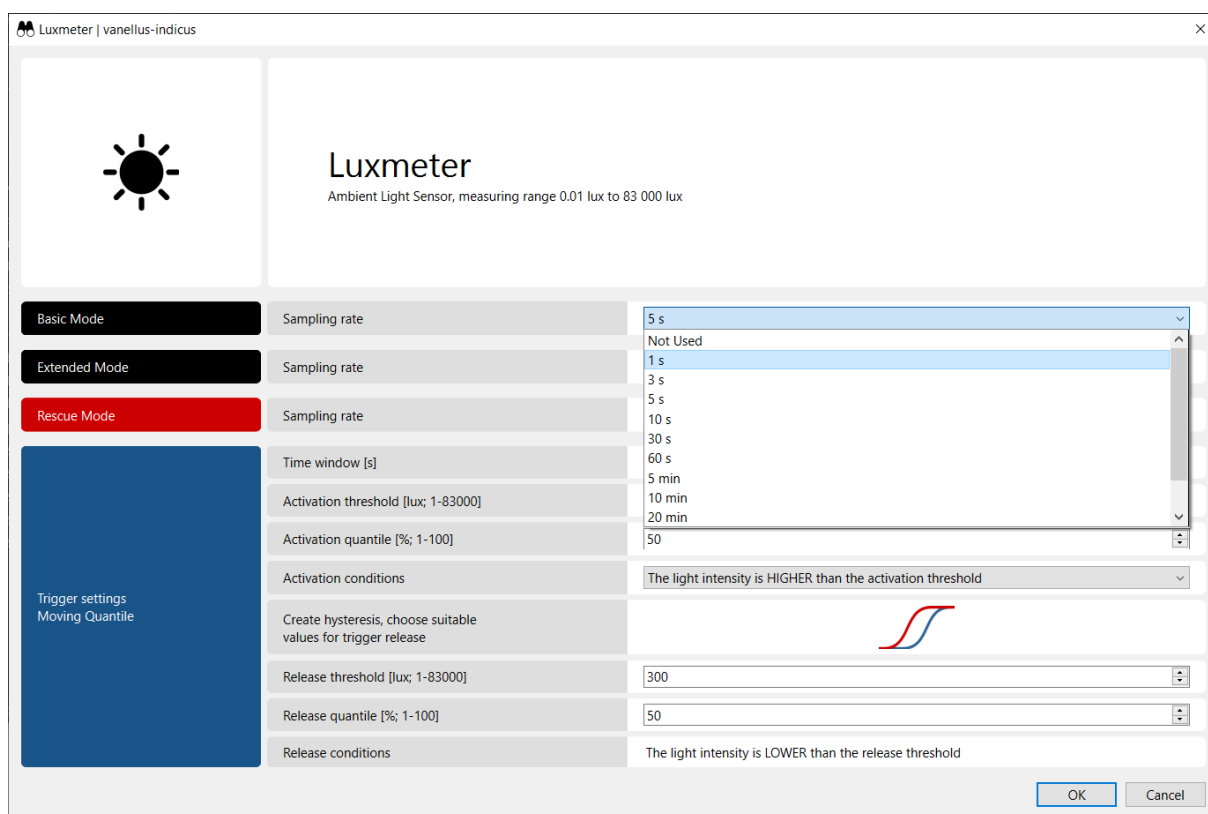


Obr. 7: Okna pro nastavení načasování/zapnutí jednotlivých módů, radiovysílače a spouštěčů (triggerů).



Obr. 8: Schéma priorit a podmínek spuštění módů.

V nastavení jednotlivých čidel je možné zvolit různou frekvenci snímání (s ohledem na hardwarová omezení jednotlivých čidel; např. 1x snímání/sec či min]), a to pro odlišné módy (Obr. 9). Jsou zde integrovány doplňující a zpřesňující výpočty některých veličin (vlhkost, tlak). Dále je možné nastavit senzor jako spouštěč (*trigger*) módu, přičemž lze nastavit konkrétní prahové hodnoty pro aktivaci a deaktivaci spouštěče. Kompletní nastavení pro daný experiment je ukládáno jako soubor *.cfg s možností opětovného načtení při dalším úkonu. Tento systém umožňuje jednoduché uložení konfigurace pro jednotlivé experimenty a jejich sdílení mezi výzkumníky, čímž eliminuje nutnost opakovaně zadávat jednotlivá nastavení. Tím zároveň urychluje práci a snižuje chybovost při nastavení.



Obr. 9: Příklad možností nastavení světelného senzoru s nabídkou frekvencí snímání v různých módech a jeho nastavení jako spouštěče (triggeru) módu.

2.3. Komentář ke změně v harmonogramu při plnění výsledku V1

Harmonogram vývoje dataloggeru byl zpožděn oproti termínům uvedeným v návrhu projektu, kdy bylo plánováno dokončení plně funkčního prototypu v roce 2022. Posun v dokončení tohoto prototypu do roku 2023 byl způsoben kombinací několika faktorů: nedostupností součástek důsledkem globální krize na trhu s polovodiči způsobenou pandemií Covid-19, technickou komplikací při realizaci návrhu úsporného řešení napájení paměti FLASH u prvního prototypu MSD1 a zvýšenou náročností programovacích prací při vytváření firmware a uživatelského rozhraní dataloggeru. Dodání minisérie prototypů, která měla být dostupná již během jara 2022, se tak díky souhře těchto komplikací posunulo do roku 2023. Vzhledem k uvedeným změnám bylo

požádáno o prodloužení projektu do července 2023. Podrobný popis komplikací a zvolenému způsobu jejich řešení je k dispozici níže.

2.3.1. Komentář k dopadu globální krize trhu součástek na průběh projektu

Jak již bylo zmíněno, v roce 2021 byl průběh projektu zkomplikován nepředvídatelným vývojem situace na trhu elektrosoučástek. V globálním měřítku došlo v důsledku koronavirové krize k radikálnímu snížení výroby a navýšení poptávky na trhu polovodičů. Následkem toho začalo docházet k opakovanému prodlužování dodacích lhůt některých klíčových komponent (BME280, TPS62840DLC, OPT3001DNP, LSM303AH, viz tab. 1 a 2), které jsou za standardních podmínek bezproblémově dostupné. Tyto obtížně nahraditelné součástky přitom měly pro vývoj MSD klíčový význam, zejména kvůli zajištění požadované hmotnosti a velikosti dataloggeru. Problematická situace byla obecně velmi podobná i kolem obdobných (a potenciálně alternativních) typů součástek a polovodičů. Při řešení projektu tak bylo nutno hledat operativní, neplánované a alternativní přístupy.

Pro vývoj prvního prototypu MSD byly objednány vývojové kity, které byly počátkem roku 2021 stále ještě dostupné skladem a obsahovaly potřebné součástky. Z těchto kitů byly následně jednotlivé komponenty ručně odděleny a využity pro vývoj hardware prototypu MSD1. Tímto způsobem tak bylo možné pokračovat ve vývoji prototypu MSD1, ač s mírným zpožděním. Zároveň jsme intenzivně hledali jiné distributory (zejména na čínském trhu), u kterých by bylo možné nakoupit větší množství nedostatkových součástek nutných pro výrobu série prototypů potřebné pro testování dataloggerů v terénu.

U většiny součástek se již během roku 2021 podařilo zajistit dostatečné množství pro sériovou výrobu, případně byla přislíbena jejich dodávka. Problémem ovšem zůstala součástka LSM303AH (tab. 1 a 2), která byla v roce 2021 a po většinu roku 2022 nedostupná, případně dostupná za extrémně nevýhodných cenových podmínek. Standardní cena této součástky před krizí byla u společnosti Farnell přibližně 4 USD/ks. V roce 2021 ji bylo možné koupit na čínském trhu za 50 USD/ks. Přitom nabídky dostupné v roce 2021 zahrnovaly velké riziko padělků či nekvalitního zboží, a to bez reálné možnosti reklamace. Nicméně dodací lhůty se i nadále prodlužovaly až k datu přesahujícím plánované ukončení projektu (březen 2023). Vzhledem k tomuto zpoždění již nebylo možné spoléhat na objednávku vytvořenou u ověřeného dovozce a bylo nutné hledat alternativní distributory. Součástky tak byly nakoupeny na jaře roku 2022 u čínského distributora. Vzhledem k vyšší cenové nabídce odpovídající stavu trhu v roce 2022 tak došlo k výraznému navýšení nákladů na výrobu dataloggeru. Ta ovšem výhledově nepochybně klesne při opětovném nasycení trhu.

2.3.2. Komentář k nutnosti změny technického řešení hardware a vytvoření nového prototypu MSD2

Během ledna 2022 byl zjištěn problém s napájením paměti FLASH u vytvořeného prvního prototypu dataloggeru MSD1. Paměť FLASH je na spotřebu proudu energeticky náročná, a to i v pohotovostním režimu (50 μ A). Vzhledem k nízké hmotnosti vyvíjeného zařízení spojeného s výběrem adekvátně lehké baterie, která má pochopitelně omezenou kapacitu, bylo nutné hledat řešení vedoucí k minimalizaci odběru energie. Pro nižší odběr energie je výhodné paměť FLASH odpojovat od napájení a zapínat ji pouze při zápisu dat. Data jsou průběžně ukládána do bufferu

v paměti RAM a přepisována do paměti FLASH ve větších dávkách. Inovativním řešením v rámci prvního prototypu MSD1 bylo použití výstupu VREGSW DC/DC měniče integrovaného procesoru pro napájení paměti FLASH. Toto řešení bylo zvoleno ve snaze o další miniaturizaci a snížení hmotnosti zařízení, tzn. zajištění vypínání a zapínání paměti FLASH bez nutnosti instalace tranzistoru a využití dalšího pinu. Nicméně se ani po několika týdnech experimentování s návrhy různých konfigurací nepodařilo zajistit, aby DC/DC měnič pracoval uvažovaným (nestandardním) způsobem jako spínač. Bylo tedy nutné najít nové řešení spínání paměti FLASH. Byl tak vytvořen nový návrh plošného spoje, v němž byl do obvodu přidán MOSFET tranzistor. Tento tranzistor je ovládaný společně s obvodem (děličem napětí) pro měření napětí baterie. Nebylo tedy nutné přidat další pin pro ovládání tranzistoru.

2.3.3. Komentář k časové náročnosti programovacích prací při vývoji firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher

Programovací náročnost vývoje uživatelského rozhraní AnimalWatcher se ukázala být poměrně nadstandardní. Množství navržených funkcí dataloggeru a s tím související vývoj firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher, spolu s nutností provést další doplňující a zpřesňující výpočty a vytvořit kontrolní algoritmy, překročilo námi odhadovaný rozsah a harmonogram programovacích prací. Nicméně výsledný produkt považujeme za velmi sofistikovaný a dobře navržený. Ve výsledku představuje široce univerzální nástroj pro rozmanité způsoby monitoringu volně žijících živočichů.

3. V2 Softwarová aplikace pro úpravu, vizualizaci a základní analýzu senzorických dat

3.1. Shrnutí dosažení výstupu V2

Pro účely kalibrace, úpravy, sumarizace, vizualizace a analýzy dat nasbíraných dataloggerem MSD byla vyvinuta volně přístupná webová aplikace "accelR8" (<https://bergfzp.shinyapps.io/accelr8/>). Uživatelská data se do aplikace nahrávají prostřednictvím textového souboru vygenerovaného v aplikaci „AnimalWatcher“ bez nutnosti dalších úprav či převodu formátu, přímo přes dialogové okno aplikace „accelR8“. Ta automaticky rozpoznává typ dat pořízený jednotlivými senzory a dává uživateli možnost jejich úpravy a sumarizace.

Algoritmus kalibrace akcelerometru (ACM) byl na základě dat získaných z dataloggeru DAL optimalizován a plně implementován do webové aplikace. Z kalibrovaných dat akcelerometru má uživatel možnost výpočtu dvou nejpoužívanějších metrik dynamického zrychlení zkoumaného subjektu (tj. jeho pohybu), a to ODBA (*Overall Dynamic Body Acceleration*) a VeDBA (*Vector Overall Dynamic Body Acceleration*). Algoritmus kalibrace magnetometrických dat byl původně vyvinut na experimentálně připevněném senzoru magnetometru a po kompletaci závěrečné verze dataloggeru MSD2 dodatečně optimalizován (viz Kap. 3.2.1). Z magnetometrických dat (MAG) má uživatel možnost výpočtu vektoru úhlové změny, jež reprezentuje celkovou změnu natočení

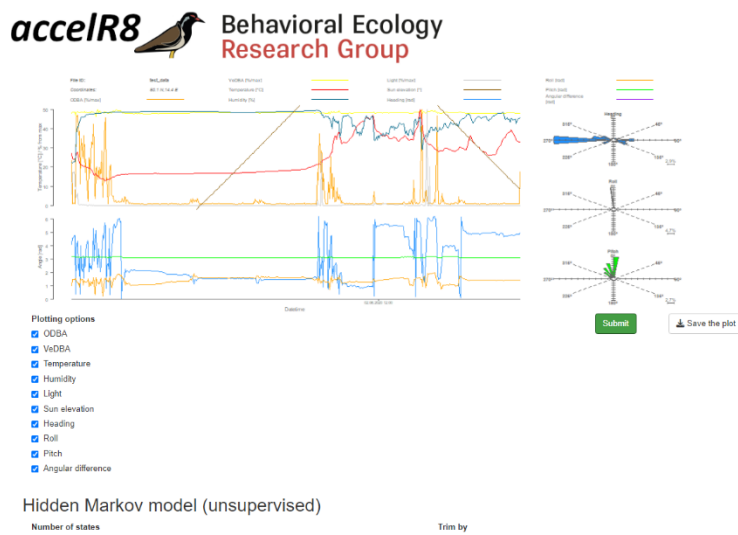
subjektu v určitém čase, a výpočtu úhlových vzdáleností, které znázorňují změnu natočení ve třech zkoumaných osách MAG (*Heading, Roll a Pitch*).

Kromě výpočtu změn zrychlení a polohy subjektu nabízí aplikace možnost sumarizace dat z dalších dostupných senzorů (světelného, teplotního a vlhkostního) pomocí běžně užívaných metrik popisné statistiky. Uživatel si může vybrat z aritmetického průměru, mediánu, minima, maxima a směrodatné odchylky. Kromě zmíněných sumarizací je uživateli poskytnuta možnost nastavení geografické polohy zkoumaného subjektu pomocí geografických souřadnic (WGS 84), díky nimž aplikace spočítá úhel slunce nad obzorem (slouží např. ke stanovení dne a noci) a zároveň dohledá časovou zónu, ve které měření probíhalo, a převede čas MSD na koordinovaný světový čas (UTC). Všechny tyto sumarizace lze spočítat pro libovolné časové okno, jež se v prostředí aplikace definuje v sekundách. Sumarizace je rovněž možno exportovat ve formátu *.txt (Obr. 10).

The screenshot shows the 'accelR8 Behavioral Ecology Research Group' web interface. It features a 'Load the data' section with a file upload field containing 'test_data.txt' and an 'Upload complete' button. Below this are input fields for 'N coordinate (decimal)' (50.1300351798179) and 'E coordinates (decimal)' (14.3704543351808). The 'Calibration' section has checkboxes for 'ACM' and 'MAG', both checked. The 'Preprocessing' section has checkboxes for 'ODBA', 'VeDBA', 'Angles', and 'Sun elevation', all checked. The 'Summarization window [s]' is set to '10'. The 'Summarizing functions' section has checkboxes for 'mean', 'median', 'min', 'max', 'sd', 'angular distance', and 'angular difference', all checked. The 'Plotting options' section has checkboxes for 'ODBA', 'VeDBA', 'Temperature', 'Humidity', 'Light', 'Sun elevation', 'Heading', 'Roll', 'Pitch', and 'Angular difference', all unchecked. The 'Hidden Markov model (unsupervised)' section has a 'Number of states' input field set to '2' and a 'Trim by' input field set to '0'. There are 'Summarize', 'Export the data', 'Submit', and 'Save the plot' buttons.

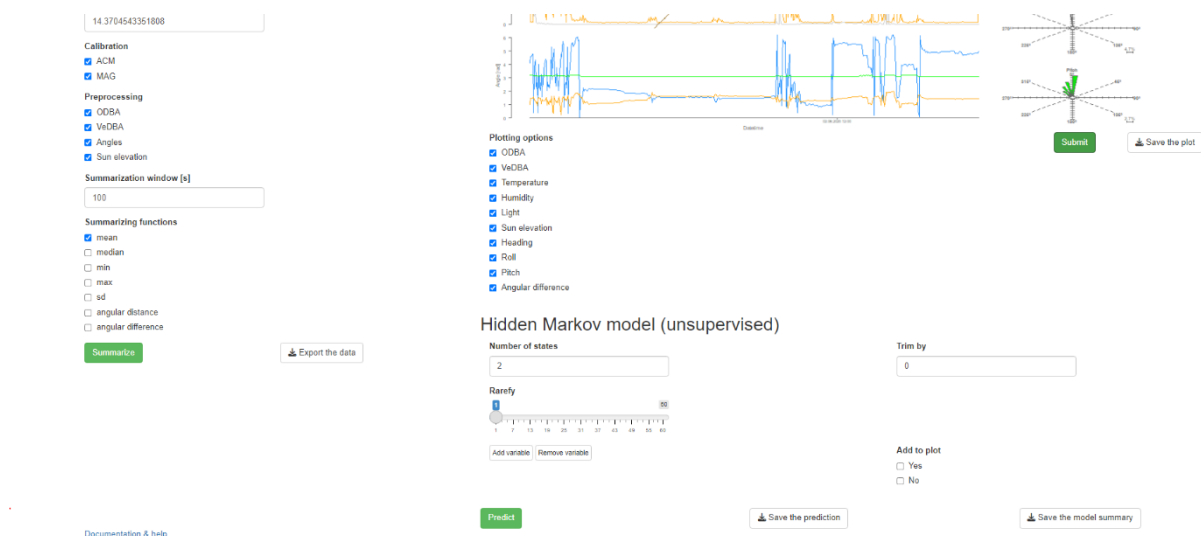
Obr. 10: Uživatelské prostředí aplikace – příklad nastavení sumarizace.

Po výpočtu sumarizace následuje grafické okno s volbou vizualizace dat. Je rozděleno do tří hlavních částí. První z nich zobrazuje graf změn ODBA, VeDBA, teploty, vlhkosti, světelnosti a úhlu slunce nad obzorem. Druhý ukazuje úhlovou změnu a úhlové vzdálenosti. Poslední obsahuje trojici kruhových histogramů, zobrazujících frekvenci úhlů natočení subjektu ve třech osách MAG (Obr. 11).



Obr. 11: Uživatelské prostředí aplikace – příklad grafického výstupu.

Poslední částí aplikace je část analytická (predikční). Umožňuje predikci skrytých stavů (v rámci typického použití dataloggeru jsou to strojově odlišitelné typy chování, viz výsledek **V4 Příkladové studie**) pomocí skrytých Markovových modelů (HMM). Uživatel má možnost nastavit libovolný počet skrytých stavů, libovolný počet prediktorů a použít dvě stacionarizační transformace těchto prediktorů (přirozený logaritmus a jednotková diference). Pro zrychlení výpočtu lze použít funkci „rarefy“, která nařadí vstupní dataset tím, že zachová pouze každou i -tou hodnotu. Po dokončení predikce stavů lze ořezat začátek a konec predikce pomocí příkazu „Trim by“, který odstraňuje úseky predikce ovlivněné instalací a deinstalací zařízení, a přidat predikci do zobrazeného grafu (Obr. 12). Predikci i její sumarizaci (matici přechodu, frekvence stavů a průměrné hodnoty prediktorů pro každý stav, doplněné o směrodatnou odchylku) lze exportovat ve formátu .txt.



Obr. 12: Uživatelské prostředí aplikace – příklad nastavení predikce.

Aplikace "accelR8" byla vyvinuta pomocí programovacích jazyků Shiny a R a algoritmy chování byly modelovány pomocí Markovových a semi-Markovových modelů strojového učení. Umožňuje spuštění z libovolného PC bez nutnosti instalace (a tím i nutnosti vlastnictví administrátorských práv PC) dalšího softwaru. Aplikace byla otestována a je funkční na různých počítačích a různých datasetech sebraných v rámci testování MSD.

3.2. Detailní postup řešení V2

Po důkladné rešerši literatury, zahájení vlastního vývoje, otestování a optimalizaci klíčových postupů v **roce 2020** byly zvoleny adekvátní metody zpracování akcelerometrických dat. Na tomto základě byla vytvořena knihovna funkcí v programovacím jazyce R umožňující analýzu a vizualizaci akcelerometrických a senzorických výstupů. Za použití tréninkových dat a využití Markovových a Semi-Markovových modelů strojového učení byl vytvořen algoritmus automaticky rozlišující a detekující pět typů chování v rámci příkladové studie u mláďat bahňáků ("stání", "ležení", "chůze", "běh", "plavání").

V oblasti **vývoje metod pro zpracování dat** z multisenzorického dataloggeru byly práce v prvním roce projektu soustředěny zejména na rešerši dostupných literárních zdrojů, následovanou vývojem a testováním nástrojů pro vizualizaci, úpravu a analýzu získaných dat v prostředí jazyka R. Zároveň probíhalo pokusné zpracování dat získaných s využitím experimentálního prototypu dataloggeru („DAL“). Jako testovací datasety byly použity jak získané záznamy sledovaných živočichů, tak také kratší nahrávky získané při testování přístroje v laboratorních podmínkách. Při vývoji nástrojů byla velká pozornost kladena na jejich optimalizaci z hlediska výpočetní náročnosti.

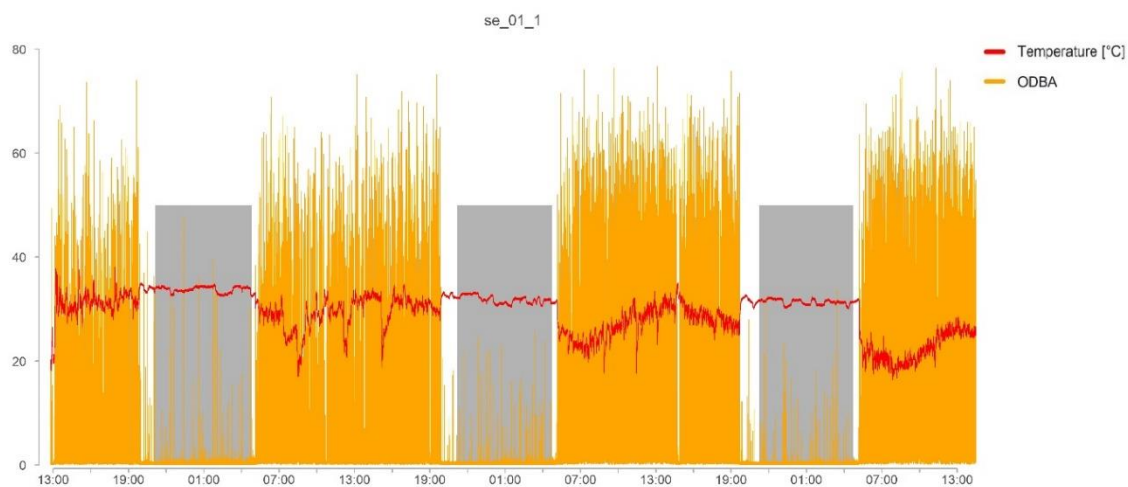
Z hlediska **úpravy dat** byla největší pozornost věnována měřením z akcelerometru, neboť se jedná o signál s velkou mírou šumu. V první řadě byl naprogramován autokalibrační proces, který umožní redukovat chybu, kterou v akcelerometrickém měření způsobují nehomogenity v gravitačním poli země. Využití autokalibrace umožnilo u našich dat snížení takto vzniklé chyby o přibližně 90 %. Dále byla velká pozornost věnována rozdělení surového akcelerometrického signálu na „statickou“ složku (tzv. gravitační posunutí), která může poskytnout zásadní informace o natočení přístroje v prostoru, „dynamickou“ složku poskytující informace o pohybu zkoumaného subjektu a „šum“, který je třeba z dat odstranit. Byly tak prováděny četné pokusy s nejrůznějšími metodami filtrování a zhlazování signálu, částečně na základě postupů doporučených v literatuře a částečně navržených řešiteli projektu. Testovány tak byly četné zhlazovací metody (lokální regrese, klouzavý průměr/medián, Butterworthův filtr, *total variance method* a další). Ze jmenovaných metod se klouzavý medián osvědčil pro oddělení statické složky a *total variance* pro filtraci šumu.

Po oddělení jednotlivých složek akcelerometrického signálu byly práce zaměřeny na **přípravu metrik pro determinaci typu chování**. Jako metriky lze použít jak měření aktivity na jednotlivých osách, tak i souhrnné charakteristiky typu ODBA (*overall dynamic body acceleration*), či VeDBA (*vectorial dynamic body acceleration*). Použít lze rovněž natočení přístroje podél os X a Y, či dynamiku jeho změny v čase. K výpočtu natočení podél osy Z bylo třeba využít zároveň magnetometrických měření (předpokládaných u finálního prototypu dataloggeru MSD). Dále byly učiněny pokusy o odhad alespoň krátkodobé aktuální rychlosti s využitím integrace dynamické složky akcelerace. Měření rychlosti je záležitostí velmi obtížnou vzhledem k relativně velké chybě v důsledku náhodného šumu, která navíc v čase neustále narůstá. I přesto předpokládáme, že

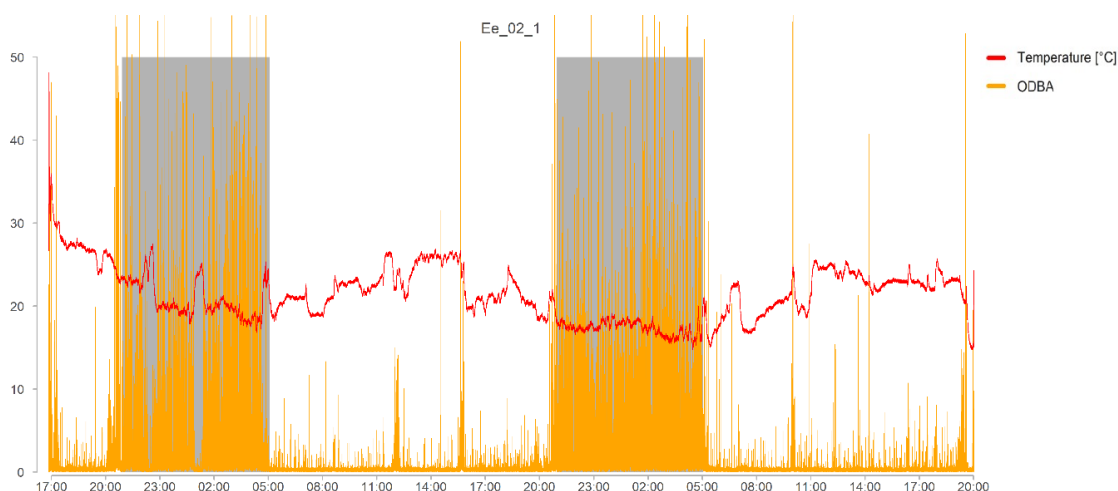
relativní změna rychlosti v krátkodobém měřítku může poskytovat důležitý vhled do chování sledovaných jedinců. S využitím všech zmíněných metrik (a některých jejich variant) bylo následně pracováno na vývoji metod automatické detekce jednotlivých typů chování.

Při samotné **analýze dat** získaných multisenzorickým dataloggerem považujeme i do budoucna za velice nadějně využití metody skrytých Markovových modelů („*hidden Markov models*“, dále HMM) a skrytých semi-Markovových modelů („*hidden semi-Markov models*“, dále HSMM). Jedná se o metody strojového učení, specificky designované pro analýzu časových řad (tedy například jakýkoliv typ signálu zjišťovaný navrženým multisenzorickým dataloggerem). Jejich princip obecně spočívá v predikci „skrytých“ stavů (například typu chování v daném časovém úseku) na základě pozorovaného signálu (akcelerometrické metriky, teplota, jakýkoliv další signál, či libovolná kombinace signálů). Odhadovanými parametry pro HMM jsou pravděpodobnosti počátečních stavů, pravděpodobnosti přechodu mezi jednotlivými stavy a parametry pravděpodobnostního rozdělení zahrnutých signálů za předpokladu platnosti jednotlivých stavů. U HSMM k nim navíc přibývají parametry pravděpodobnostního rozdělení doby trvání jednotlivých stavů. Pro odhad parametrů modelu je možné použít buď řízeného („*supervised*“) tréninku metodou křížové validace, nebo neřízeného („*unsupervised*“) tréninku s využitím Baum-Welchova algoritmu. Metoda řízeného tréninku bývá zpravidla o trochu přesnější, avšak vyžaduje trénovací dataset, tedy například pořízení a analýzu videonahrávek jedinců nesoucích datalogger. Na základě odhadnutých parametrů modelu je pak možné predikovat nejpravděpodobnější posloupnost stavů (například typů chování), a to s využitím Viterbiho algoritmu.

Protože jsme nebyli spokojeni s dostupnou nabídkou softwarových knihoven nabízejících možnost využití těchto metod, byla **naprogramována** vlastní, **plně funkční knihovna funkcí** v programovacím jazyce R. Tato vlastní knihovna umožňuje uživatelsky přívětivou formou analyzovat behaviorální data metodami HMM a HSMM, jakož i tato data a výstupy z modelů vizualizovat (Obr. 13 a 14). Všechny tyto postupy je s využitím námi připravených nástrojů možno využít, a to jak pro modely jednorozměrné (jedna analyzovaná časová řada), tak pro modely mnohorozměrné (více časových řad v rámci jednoho modelu). Stejně tak je možno provádět u obou typů modelů trénink řízený i neřízený.



Obr. 13: Ukázka vizualizace akcelerometrických dat na příkladu volierovaného brhlíka lesního.



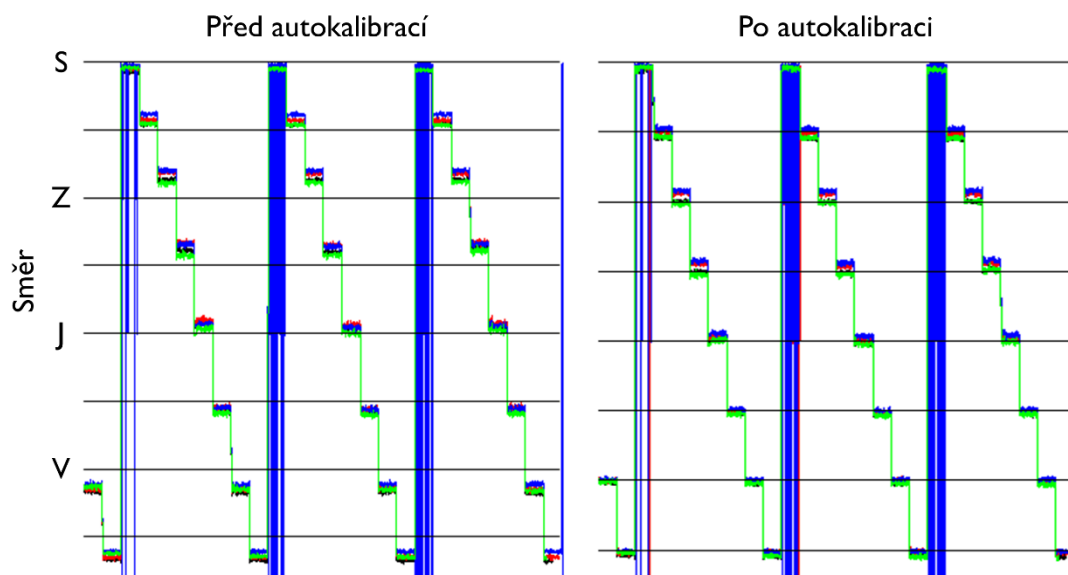
Obr. 14: Ukázka vizualizace akcelerometrických dat na příkladu ježka východního v intravilánu.

Pokusy s uvedenými modely, které byly provedeny v roce 2020, ukázaly, že potenciál obou typů modelů pro analýzu behaviorálních dat je skutečně velký. Řízeným tréninkem dat získaných u mláďat bahňáků se nám podařilo se zhruba 70% pravděpodobností detekovat pět typů chování (“stání”, “ležení”, “chůze”, “běh”, a “plavání”), což lze bezpochyby považovat za úspěch.

V **roce 2021** byly práce v rámci vývoje metod pro práci s daty z multisenzorického dataloggeru soustředěny na několik priorit. Konkrétně se jednalo o **a)** kalibraci a vyčištění magnetometrických dat; **b)** analýzu přesnosti měření hladiny světla a možnosti její interpretace; **c)** optimalizaci a zvýšení efektivity při zpracování velkých datasetů a **d)** aplikaci skrytých Markovových modelů v rámci jednotlivých příkladových studií.

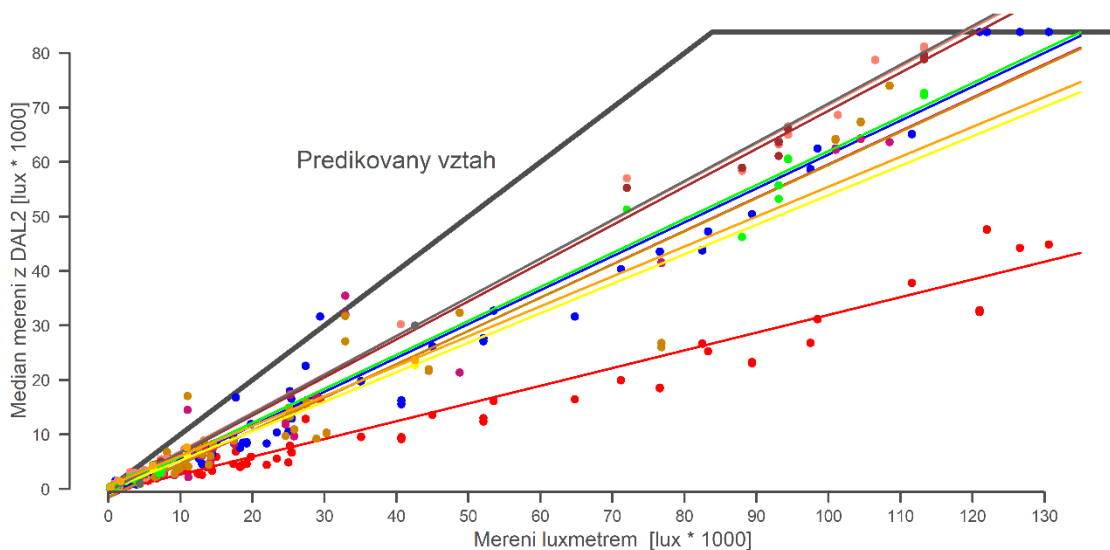
3.2.1. Zpracování dat získaných měřicími senzory

Měření získaná **magnetometrem** jsou zásadní mimo jiné pro určení směru, kterým je datalogger natočen a kterým se tedy sledovaný jedinec pohybuje. Primární měření získaná magnetometrem jsou ovšem, stejně jako v případě měření akcelerometrických, zatížena náhodným šumem, jakož i zkreslena silou zemského magnetického pole v místě měření. Na experimentálně připojeném senzoru magnetometru byla proto sbírána cvičná měření včetně opakovaných měření s natočením senzoru do konkrétních světových stran. Na základě těchto cvičných dat byly následně testovány algoritmy pro autokalibraci a vyčištění získaného signálu. Jako optimální pro odfiltrování šumu se ukázal mediánový filtr s velikostí okna 2-10 vteřin v závislosti na rychlosti předpokládaných pohybů a změn směru (menší velikost okna je nutná u rychle se pohybujících druhů). Pro autokalibraci byl upraven a adaptován autokalibrační algoritmus použitý již dříve pro autokalibraci dat získaných akcelerometrem. Jedná se o iterativní algoritmus založený na vážené regresi (van Hees 2014, doi: 10.1152/jappphysiol.00421.2014). Použití tohoto algoritmu umožnilo úspěšně určit směr natočení dataloggeru s přesností větší než $\pm 10^\circ$ (Obr. 15).



Obr. 15: Vizualizace efektu navrženého autokalibračního algoritmu pro kalibraci magnetometrických dat. Zobrazena jsou data ze čtyř experimentálních běhů, kdy byl datalogger s magnetometrem opakovaně vždy po 30 vteřinách pootočen o 60°. Černé horizontální linie představují teoretické směry (tedy skutečnost), odchylky dat od těchto černých linií představují chybu měření. Výrazné modré pruhy jsou dány oscilací okolo hodnoty 360° (pokud je překročena, jsou hodnoty blízko 0) – jedná se tedy o artefakt vizualizace, kvalita dat v určení severu je obdobná jako pro ostatní světové strany.

Pro validaci a ověření možnosti interpretovatelnosti dat o **hladině světla** získaných v MSD použitým senzorem OPT3001 (viz Tab. 2) byla pořizena série měření, vždy zároveň s luxmetrem Sauter SO 200k. Celkem bylo získáno 560 měření, a to v různou denní dobu (od rozednění do setmění), za různého počasí (slunečno/polojasno/zataženo), na různých místech (přímé slunce/polostín/stín) a v různých oblastech (ČR/Arabská poušť navštívená v rámci jiného projektu). Na základě tohoto datasetu jsme mohli stanovit prahové hodnoty, které lze použít například pro určení pobytu jedince ve stínu, což je důležité při analýzách konkrétních kontextů (viz například analýza zahřívání rodičem u čejek chocholatých v příkladové studii “Využití metod multisenzorického dataloggingu pro sledování vlivu zemědělského hospodaření na život druhů obývajících agroekosystémy na příkladu čejky chocholaté (*Vanellus vanellus*)”. Zároveň tak bylo možné ověřit, jak přesně čidla měří v terénu (různá míra pokrytí prachem a další vlivy prostředí) a jak dobře jsou získané výsledky srovnatelné v rámci jednotlivých instalací dataloggeru či mezi nimi. Analýza výsledků (Obr. 16) v tomto ohledu přinesla několik významných poznatků. Především je zřejmé, že všechny měřené hodnoty z čidla OPT3001 jsou o něco (v průměru přibližně o 40 %) nižší než hodnoty získané luxmetrem Sauter SO 200k. To není nijak překvapivé, neboť čidlo OPT3001 v zařízení DAL neobsahuje difuzní čočku. Na druhou stranu vztah mezi hodnotami získanými oběma čidly je značně specifický pro každý konkrétní kus. Koefficient determinace byl ve všech případech vyšší než 90 %, u většiny dokonce vyšší než 99 %. Toto zjištění mimo jiné naznačuje možnost poměrně snadné kalibrace sebraných dat. K té však bude nutno mít v dané době a na dané lokalitě kromě měření získaných čidlem dataloggeru i měření získaná za standardizovaných podmínek jiným přístrojem (luxmetrem).



Obr. 16: Vztah měření luxmetrem Sauter SO 200k (osa x) a luxmetrem OPT3001 osazeným na akcelerometru (osa y). Měření získaná jednotlivými kusy zařízení jsou proložena regresními přímkami různých barev. Pokud by obě zařízení měřila identicky, všechny body by ležely na tlusté černé čáře. Její zalomení je dáno faktem, že čidlo akcelerometru má horní hranici rozsahu 83865.6 lux. Je-li tedy světelná hladina vyšší než ~83866 lux, čidlo by mělo zaznamenávat tuto maximální hodnotu.

V rámci zpracování datasetů z multisenzorického datalogingu jsme se rovněž zaměřili na úpravu používaných nástrojů a algoritmů ve vztahu k jejich **optimalizaci a větší efektivitě**. Tento proces je klíčový vzhledem k tomu, že datasety získané při používání MSD budou často obsahovat jednotky až desítky milionů řádků získaných jedním přístrojem. Při zpracování dat v R a přípravě nástrojů pro jejich zpracování (které jsou součástí aplikace a dalších výstupů v rámci projektu) jsme tak například přešli na práci s datovou strukturou “data.table” (Dowle M. & Srinivasan A. 2019: Data.table: Extension of ‘data.frame’. R package version 1.12.2.) a dalšími nástroji vzniklými v posledních letech, které umožňují výrazné zrychlení všech výpočetně náročných procesů. Rovněž jsme věnovali významné úsilí optimalizaci kódu námi psaných algoritmů, opět s ohledem na snížení výpočetní náročnosti. Celkem se nám podařilo většinu procesů významným způsobem (často řádově) zkrátit. V průběhu roku 2021 jsme se rovněž intenzivně věnovali zpracování datasetů získaných v rámci jednotlivých příkladových studií (viz výsledek **V4 Příkladové studie**). Z velké části se tak jednalo o rozvíjení jednotlivých aplikací HMM v konkrétních behaviorálních kontextech.

V **roce 2022** byl vývoj softwarové aplikace pro kalibraci, sumarizaci a vizualizaci dat pořízených pomocí MSD (aplikace “accelR8”) a následnou predikci skrytých stavů pomocí skrytých Markovových modelů posunut do fáze plně funkční verze vyžadující finální testování na datových sadách získaných z MSD. Vzhledem k nedostupnosti plně funkčního prototypu vyvíjeného zařízení MSD v plánovaném čase byla aplikace programována částečně s využitím terénních dat získaných pomocí experimentálních prototypů dataloggerů (DAL) a částečně s využitím nasimulovaných chybějících datových řad, které byly pro účel vývoje aplikace vytvořeny s ohledem na připravovanou strukturu datových výstupů.

Po dokončení prototypu a funkční série MSD v roce **2023** byla aplikace upravena tak, aby reflektovala skutečnou strukturu vstupního datového souboru exportovaného poslední verzí uživatelského rozhraní AnimalWatcher. Aplikace byla otestována na různých počítačích a různých datasetech a byla debugována.

4. V3 Metodická příručka

4.1. Shrnutí dosažení výstupu V3

Metodická příručka byla koncipována s cílem poskytnout všem uživatelům vyvinutého multisenzorického dataloggeru MSD kompletní návod a sadu doporučení pro použití MSD2, uživatelského rozhraní AnimalWatcher a webové aplikace AccelR8 v praxi. Příručku tvoří čtyři oddíly: **1)** Stručný úvod k metodám použití multisenzorického dataloggeru, **2)** Popis multisenzorického dataloggeru a manuál k uživatelskému rozhraní AnimalWatcher, **3)** manuál použití Softwarové aplikace pro úpravu, vizualizaci a základní analýzu senzorických dat AccelR8 a **4)** Metodická doporučení pro modelové druhy živočichů. Tato příručka představuje návodného průvodce ke kompletnímu využití multisenzorického dataloggeru od specifikace možností a omezení přes instalaci zařízení na živočicha a práci v ovládací aplikaci po zpracování výsledných datasetů.

4.2. Detailní postup řešení V3

V roce **2021** byly po rešerši literatury připraveny základní osnovy plánované příručky. Vzhledem k tomu, že MSD byl teprve v počátcích vývoje, byly pro některé kapitoly příručky v případě potřeby využity experimentální prototypy dataloggeru (DAL) z depozitu ČZU. Všechny prototypy DAL byly velikostně a hmotnostně srovnatelné s navrhovaným multisenzorickým dataloggerem (MSD) a jejich využití pro vybrané účely umožnilo včas vyladit některé navrhované metodické postupy.

Manuál k uživatelskému rozhraní AnimalWatcher vznikl v roce **2022** krátce před odesláním žádosti o uznání užitého vzoru pro vyvíjený MSD (viz Detailní postup řešení V1 - Vývoj firmware a uživatelského rozhraní AnimalWatcher) a byl dokončen během roku 2023 spolu s finální podobou firmware a uživatelského rozhraní MSD. Popisy funkce jednotlivých senzorů (viz tab. 2) byly průběžně čerpány z existující dokumentace výrobců a byly specifikovány pro účely metodické příručky v průběhu celého vývoje zařízení.

Manuál k webové aplikaci AccelR8 byl vytvářen průběžně s vývojem aplikace zejména během roku 2022. Jeho finální podoba byla dokončena v roce 2023 kdy byla spuštěna plně funkční verze aplikace (viz Detailní postup řešení V2).

Metodická doporučení pro modelové druhy živočichů byla formulována průběžně na základě výsledků a zkušeností z příkladových studií, jejichž detailní průběh je předmětem následující kapitoly – Příkladové studie V4.

Cíl této části projektu byl splněn, metodická příručka je významnou a nedílnou součástí výsledného produktu MSD a poskytuje detailní návod a přehled o širokých možnostech využití zařízení při monitoringu živočichů.

5. V4 Příkladové studie

5.1. Shrnutí dosažení výstupu V4

Detailní příkladové studie využití multisenzorického datalogingu v praxi byly vypracovány na třech modelových skupinách a druzích – obojživelnících (ropuše obecné), ptácích (aktivně se pohybujících kuřatech prekociální čejky chocholaté) a savcích (ježkovi východním a západním). Další plánované studie na pěvcích (brhlík lesní a sýkora koňadra) a netopýrech (netopýr velký) nebyly realizovány z následujících důvodů. Za prvé, u obou druhů pěvců se využití navrhovaného dataloggeru ukázalo jako nevhodné vzhledem ke známkám stresu, který ptáci vykazovali při metodických testech (za využití experimentálních prototypů DAL). Za druhé, po zaizolování výsledného dataloggeru MSD došlo k překročení jeho doporučeného hmotnostního limitu pro zvolené druhy přibližně o 30 % hmotnosti přístroje. Z obdobných důvodů, tedy kvůli překročení doporučeného hmotnostního limitu výsledného zařízení MSD po zaizolování, nebylo možné datalogger použít ani u modelového druhu netopýra velkého, ačkoliv tento druh patří mezi naše největší netopýry. I přes zjištěné limity využití dataloggeru jsme však schopni demonstrovat jeho úspěšnou použitelnost na dalších skupinách živočichů – větších obojživelnících, mláďatech prekociálních ptáků a středně velkých savcích, což poukazuje na širší jeho uplatnitelnosti v biologických studiích.

Tři předložené příkladové studie přehledně shrnují ukázky metod a široké možnosti multisenzorického datalogingu v praxi na modelových příkladech pro řadu vybraných výzkumných otázek. Použité datasey byly získávány za užití jak experimentálních prototypů DAL (ropucha obecná, čejka chocholatá, ježek) tak i dataloggeru MSD2 (čejka chocholatá). I přes limity spojené s omezenou senzorkou výbavou použitých prototypů DAL byl získaný soubor dat dostatečně reprezentativní pro ukázkou širší uplatnitelnosti nástroje vyvíjeného MSD ve výzkumu behaviorální ekologie a v aplikované ochraně přírody.

5.2. Postup řešení V4

V **roce 2020** proběhl sběr pilotních dat za využití dostupných experimentálních prototypů dataloggerů (DAL), a byly testovány různé způsoby odchytů živočichů, instalace a fixace dataloggeru na modelových druzích ježků a čejky chocholaté. U těchto druhů proběhl intenzivní sběr dat pro příkladovou studii a odladění metodiky pro použití dataloggeru jak v experimentálních, tak v terénních podmínkách.

V **roce 2021** proběhlo další odladování metodických postupů v terénu a intenzivní sběr dat spolu s prvotní analýzou získaných datasetů na ježcích a čejce chocholaté. Během dalšího terénního sběru dat u brhlíka lesního došlo k opakovaným ztrátám zařízení, což signalizovalo nutnost

dalších testů v experimentálních podmínkách. Díky těmto opakovaným testům a podrobné analýze chování sledovaných jedinců byl detekován nadměrný stres ptáků způsobený instalovaným zařízením. Zvýšený stres může vést ke změnám v chování a následnému zkrácení výsledků, stejně jako ke zvýšenému riziku úhynu nebo predace monitorovaného jedince. Soubor těchto problémů spojených s využitím tohoto typu dataloggeru na vybraných modelových druzích vedl k rozhodnutí o ukončení této části projektu na drobných pěvcích. V rámci sekce výsledků zaměřených na modelový druh ropucha obecná byl sepsán rukopis příkladové studie a metodická doporučení pro aplikaci zařízení a nastavení jeho funkcí.

V **roce 2022** byl ukončen terénní sběr dat na modelovém druhu čejka chocholatá z důvodu dostatečného množství nasbíraných dat pro splnění cílů sekce věnující se tomuto druhu. Práce tedy byly soustředěny na další analýzu dat a přípravu textů příkladových studií spolu se sepsáním metodických postupů pro instalaci, provoz a deinstalaci zařízení na tělech sledovaných živočichů.

Po úspěšném dokončení plně funkčního prototypu MSD2 v **roce 2023** byly doladěny drobné metodické nesrovnalosti vyplývající z rozdílů velikosti, tvaru a některých funkcí (zejména radiotelemetrie) mezi systémy DAL a MSD. Získané poznatky byly následně uplatněny ve výsledných příkladových studiích o využití vyvinutých dataloggerů u modelových zástupců živočichů ropuchy obecné, čejky chocholaté a ježka. Výjimkou v možnosti využití prototypů DAL byl modelový druh letouna netopýr velký, u kterého je pro navrhované využití multisenzorického dataloggingu i otestování navrhované metodiky nezbytný zabudovaný radiotelemetrický vysílač, kterým prototyp DAL nedisponuje.

Pro kontrolovaný monitoring reakcí živočichů na instalované zařízení byli v letech **2021-22** někteří z nich krátkodobě drženi v zajetí v prostorných voliérách v prostoru areálu ČZU (ropucha obecná, brhlík lesní, sýkora koňadra, ježek). Zde probíhalo testování a optimalizace různých metod fixace dostupného experimentálního prototypu dataloggeru a sběr tréninkových dat. V rámci sběru dat byl vždy pořizován kontinuální videozáznam, který byl následně analyzován a synchronizován s aktivními a senzorickými daty získanými z prototypů DAL. V druhé fázi testování vytvořených metodických postupů pro jednotlivé druhy byl prototyp DAL využit pro sběr dat v terénních podmínkách s cílem získat vhodná data pro navazující výsledky příkladových studií. Během terénních testů se objevily komplikace s využitím dataloggeru na modelových druzích pěvců (detailněji dále). I přes pilotní úspěšné experimenty s instalací zařízení v experimentálních podmínkách se ukázalo, že drobní, dutinově hnízdící pěvci s aktivním pohybem v členité vegetaci zařízení DAL (a později i MSD) opakovaně odstraňovali a/nebo ztráceli a/nebo jejich chování s připevněným dataloggerem bylo nepřírozené. Na základě těchto poznatků byly ukončeny terénní práce na drobných pěvcích se závěrem, že pro tento typ živočicha není vyvinutý DAL (ani MSD) ve stávající podobě použitelný pro spolehlivý a bezpečný biomonitoring.

Výsledky analýz datasetů získaných v průběhu experimentálních i terénních testů byly v roce **2023** použity při vytváření doporučených nastavení funkcí dataloggeru pro modelové druhy živočichů a pomohly tak k dosažení požadované komplexnosti metodické příručky (V3 výsledek tohoto projektu). V tomto roce byla také připravena a doladěna finální verze tohoto výstupu projektu. V následujícím textu jsou popsány metodické postupy prací v jednotlivých letech při monitoringu a využití dataloggerů u vybraných druhů živočichů: u ropuchy obecné, drobných pěvců, ježků a čejky chocholaté, které byly základem pro přípravu metodické příručky.

5.2.1. Postup prací při monitoringu ropuchy obecné

U obojživelníků je obecně velmi náročné najít vhodný způsob upevnění dataloggerů/vysílačů. Díky své anatomii, pohybové flexibilitě a vlhké pokožce se velmi snadno takovýchto zařízení zbavují. Vysoká citlivost jejich pokožky pak vylučuje využití většiny lepidel. Proto bylo v přípravné fázi experimentu v roce **2020** otestováno několik verzí popruhů pro upevnění experimentálních prototypů dataloggerů. Popruhy byly vyvíjeny v 3D modelovacím software Fusion 360 a tisknuté transparentním flexibilním filamentem Flexfill o tvrdosti 98A na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S. Kritérii pro hodnocení vhodnosti upevnění byly zejména volnost pohybu a stálost upevnění, avšak při minimalizaci rizika ztráty prototypu dataloggeru a oděru citlivé kůže obojživelníků. Zvolená varianta nakonec představovala obdélníkovou plošku o šířce prototypu dataloggeru a délce převyšující délku prototypu o 4 mm, na které byla umístěna čtyři oka, sloužící k upevnění fixujícího popruhu z jemné silikonové bužírky pro rybářské vlasce, o průměru 0,5 mm. Na tuto obdélníkovou plošku byl následně gelovým kyanoakrylátovým lepidlem připevněn prototyp dataloggeru, zesponu chráněný kaptonovou páskou. Na silikonovém popruhu bylo z levé přední strany uvázáno oko o průměru lehce převyšujícím průměr přední končetiny konkrétní ropuchy a popruh byl provlečen oběma předními oky. Poté bylo vytvořeno druhé, pravé oko na druhou přední končetinu a popruh byl veden dorsální stranou dataloggeru přes protilehlé spodní oko, aby byl následně omotán kolem podbřišku ropuchy a veden posledním okem. Po kontrole těsnosti byl volný konec popruhu uzlem připevněn ke své části na dorzální straně dataloggeru, čímž jej dodatečně zafixoval (Obr. 17). Navržené a přijaté řešení fixace dataloggeru na těle obojživelníka lze považovat za uspokojivé, jelikož nadměrně nebránilo jeho pohybu, nepůsobilo významnou fyzickou újmu a nedocházelo k častému uvolnění obojživelníka z popruhu.



Obr. 17: Ropucha obecná s experimentálním prototypem dataloggeru.

V druhé polovině roku 2020 proběhl experiment, do něhož bylo zařazeno 23 samic a 18 samců ropuchy obecné. Všechna zvířata byla změřena, zvážena, individuálně označena a náhodně rozdělena do dvou identických polopřirodních habitatů o velikosti 4 x 4 m. Každý z experimentálních habitatů obsahoval část s mozaikovitou zelení, holou půdou, malou vodní plochou a tři dostatečně velké úkryty za účelem zjištění časoprostorových preferencí výskytu zkoumaných živočichů.

Habitat č.1 simuloval prostředí zasažené světelným znečištěním, druhý kontrolní habitat (habitat č.2) zase přirozené prostředí bez světelného znečištění. Oba habitaty byly vizuálně důkladně oddělené, aby se zabránilo vzájemnému ovlivnění. Do rohu habitatu č.1 byl instalován bodový zdroj osvětlení, simulující tradiční (výbojkové) pouliční osvětlení. Barva a intenzita osvětlení byla

zvolena tak, aby co nejlépe odpovídala ploše v bezprostřední blízkosti takového osvětlení a aby byl vytvořen vhodný gradient světelných podmínek.

Každá ropucha byla osazena dataloggerem celkem dvakrát, pokaždé na dva až tři dny, dle kapacity baterie dataloggeru. Během první části experimentu bylo bodové osvětlení zhaslé, následně bylo světlo rozsvíceno a po několika dnech byl experiment opakován znovu, za účelem zhodnocení reakce na světelné znečištění. Paralelně byly ropuchy natáčeny při běžných aktivitách (například krmení). Videá byla následně zpracována v software BORIS (Behavioral Observation Research Interactive Software) a sloužila k zhodnocení možnosti automatické identifikace daných typů chování a pozdější optimalizaci použitých algoritmů.

Vzhledem k tomu, že hlavní část dat (experiment v polopřírodních habitatech s různým světelným režimem) byla sebrána již v prvním roce řešení projektu, v roce 2021 probíhalo zpracování dat. Doplňkově proběhl sběr a vyhodnocení podrobných dat, kdy byl na jedincích instalován experimentální prototyp dataloggeru a zároveň byly pohyby jedinců zaznamenávány na video. Tímto způsobem byly na ropuchách, držných v rámci záchranných transferů prováděných společností NaturaServis, s.r.o., testovány různé snímací frekvence dataloggeru. Pozornost byla soustředěna i na detektabilitu konkrétních behaviorálních projevů (například chození, útok na kořist) v závislosti na různé vzorkovací frekvenci. Hlavní pozornost byla ovšem věnována zpracování dat z experimentu provedeného v roce 2020. V tomto ohledu byl popsán podrobný vzorec chování (načasování a délka aktivity a doby strávené v úkrytu) zkoumaných ropuch během dne i noci za různých teplotních a světelných podmínek, avšak vysoká míra jednotvárnosti jejich pohybů nevedla ke spolehlivému odlišení jednotlivých typů aktivity. Popsaný vzorec byl následně srovnán u jedinců v přirozených podmínkách a u jedinců s umělým nočním přísvitem simulujícím pouliční osvětlení. Zda byl jedinec aktivní se zjišťovalo pomocí jednorozměrného HMM o dvou skrytých stavech (neaktivní, aktivní), na základě celkového dynamického zrychlení, reprezentovaného ODBA, spočítané z akcelerometrických dat prototypu. Použití HMM umožnilo efektivně odfiltrovat přirozený šum akcelerometrických dat, a to individuálně pro jednotlivá nasazení každého akcelerometru (v případě, že by se úroveň šumu lišila).

Detailní výsledky příkladové studie na tomto modelovém druhu jsou předloženy a vizualizovány v oddíle Příkladové studie - Využití metod multisenzorického dataloggingu pro sledování vlivu umělého osvětlení na chování ropuchy obecné (*Bufo bufo*) (viz Příkladové studie ČÁST I) a dokazují velmi širokou uplatnitelnost výsledného produktu u tohoto modelového druhu.

5.2.2. Postup prací při monitoringu drobných pěvců brhlíka lesního a sýkory koňadry

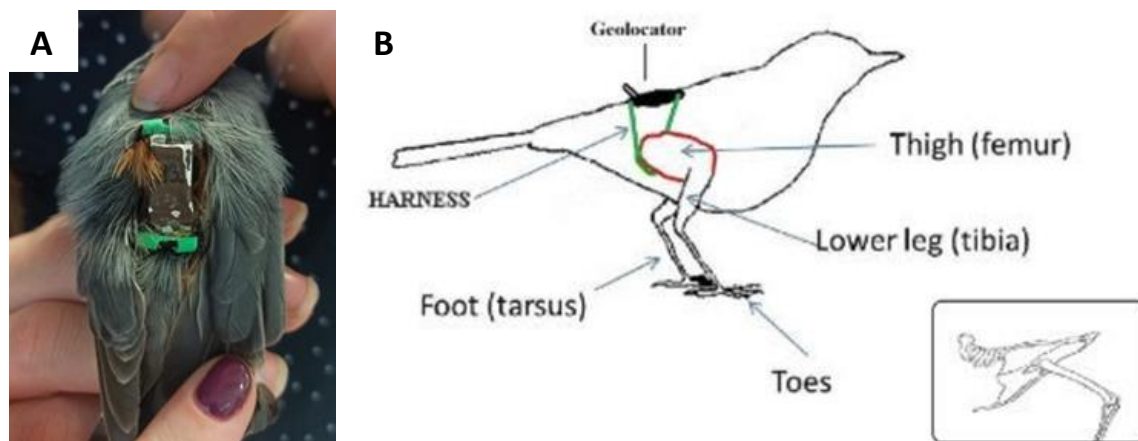
V roce **2020** byly navržené metodické postupy pro instalaci dataloggeru testovány v terénních i experimentálních podmínkách za využití experimentálních prototypů DAL. Práce v terénních podmínkách probíhaly od dubna do května. Vzhledem k tomu, že byl projekt zahájen v průběhu jara, byly využity již instalované ptačí budky Lesů ČR a spolku Brontosarus rozmístěné na několika lokalitách v Praze (Ládví, Hvězda, Divoká Šárka, Ruzyně, Suchdol, Butovice). Budky byly vyčištěny a připraveny na zahníždění, později byla zjišťována jejich obsazenost a fáze inkubace (Obr. 18 A). U obou modelových druhů, hnízdících v budkách, byly testovány nejvhodnější metody odchytu a upevnění dataloggeru. Jako optimální se ukázalo uzavření rodiče v hnízdni budce a jeho opatrný odchyt do ruky. Při krmení mláďat, kdy se rodič zdržoval pouze ve vletovém otvoru, byl k odchytu použit podběrák.



Obr. 18: Kontrola hnízdních budek (A), experimentální voliéra v areálu ČZU (B).

Metoda upevnění dataloggeru sekundovým lepidlem se ukázala jako velmi neefektivní. Ptáci se dokázali dataloggeru zbavit během několika minut po vypuštění. Další testovanou metodou byla fixace dataloggeru ve formě "batochu". Tato metoda je využívána například při monitoringu migrace ptáků za využití geolokátoru. Očka na uchycení popruhů byla vyrobena z bužírky (průměr 3 mm). Datalogger byl upevněn dorzálně nad kostřec metodou "leg-loop harness" (Rappole a Tipton 1991, J. Field Ornithol. 62: 335–337, Obr. 19). Jako materiál na popruh bylo použito pletené hedvábné lanko (doporučeno kolegy z AV ČR zabývajícími se sledováním migrace pomocí geolokátorů). Nicméně i tento materiál se ukázal jako nevhodný. U brhlíka došlo po několika dnech ke ztrátě dataloggeru, který byl nalezen poblíž hnízdní budky. Ke ztrátě dataloggeru došlo také u sýkory, kdy datalogger nebyl vůbec dohledán. Bylo tedy nutné testovat jiné typy materiálu pro upevnění. Vzhledem k vysokému riziku ztráty zařízení, nemožnosti kontinuálního monitoringu chování jedinců s nasazeným dataloggerem a jejich reakcí, bylo další testování situováno do experimentálních podmínek voliéry po ukončení hnízdní sezóny, aby nedocházelo k narušování průběhu hnízdění. Různé způsoby fixace dataloggeru byly nadále testovány v experimentálních podmínkách ve voliérách v areálu ČZU (Obr. 18 B).

Ve voliérách byli jedinci umístěni vždy jednotlivě a sledováni po dobu tří dnů pomocí kamer pořizujících kontinuální záznam. Byl proveden opakovaný pokus s fixací dataloggeru pomocí popruhu z pleteného lanka na sýkoře koňadře. Datalogger byl po krátké době sýkorou odstraněn. Tímto jsme vyloučili naši metodickou chybu při nasazování dataloggeru a shledali tento typ popruhu jako nevhodný. Následně byl testován popruh z teflonové nitě (typ Tangit Uni Lock, Henkel). V tomto případě vydržel datalogger zafixovaný déle, nicméně nakonec byl také sýkorou odstraněn. Tento typ popruhu byl shledán rovněž nevhodným. Třetím zvoleným materiálem byla PTFE Teflon páska, která se ukázala jako nejvhodnější. Testovanému brhlíkovi lesnímu zůstal zafixovaný datalogger bez problémů celé tři dny. Tento pták nejevil známky stresu způsobeného umístěním dataloggerem.



Obr. 19: Samec brhlíka lesního s experimentálním prototypem dataloggeru (A) a náskres uchytení dataloggeru (B).

V roce **2021** byl na základě zkušeností z předchozího roku jako modelový organismus pro kategorii monitoringu hnízdicích pěvců zvolen brhlík lesní. Vzhledem k tomu, že se jedná o druh nepříliš běžný v hnízdních budkách, bylo nutné zajistit monitoring většího množství budek. Před začátkem hnízdní sezony tak bylo vytipováno a vyčištěno přibližně 200 již instalovaných budek, a to v lokalitách Ďáblický háj, Čimický háj, Praha Suchdol, Ruzyně, obora Hvězda, Divoká Šárka, Krč a Ládví. Mimo to bylo v rámci tohoto projektu nakoupeno a instalováno 14 budek, a to v lokalitě Suchdol. V průběhu hnízdního období probíhaly pravidelné kontroly obsazenosti budek. V případě zahnízdění cílového druhu byli rodiče odchyceni, okroužkováni pro možnost pozdější identifikace a byl jim nainstalován experimentální prototyp dataloggeru DAL.

Při instalaci dataloggeru byl na základě testů prováděných ve voliére v předchozí sezoně pro připevnění využit úvaz "leg-loop harness". Datalogger nebo jeho maketa byly upevňovány s využitím PTFE teflonové pásky a pěnové podložky. Dataloggerem bylo osazeno celkem pět ptáků. Bohužel všichni jedinci datalogger ztratili, pravděpodobně již krátce po osazení. Spadlé dataloggery byly intenzivně dohledávány v širším okolí budky a po vyhnízdění přímo v budce. Předpokládali jsme zejména možnost ztráty dataloggeru při průlezu hnízdním otvorem. K hledání v širším okolí budek byl využit také hledač kovů. I přes veškerou snahu bylo bohužel úsilí o znovunalezení dataloggerů neúspěšné, v důsledku čehož došlo k velkým ztrátám na vybavení. Tento fakt znovu zdůrazňuje důležitost kombinace dataloggeru s vysílačem pro možnost radiotelemetrického dohledání, stejně jako nutnost ladění způsobů spolehlivého upevnění zařízení na zádech drobných pěvců.

Po neúspěšných terénních pokusech bylo opět několik jedinců podrobena sledování v experimentálních podmínkách. U všech jedinců testovaných v experimentálních podmínkách a několika jedinců v terénu bylo podrobně sledováno chování formou observace a pořizování videozáznamu. Ptáci téměř vždy jeví známky stresu. Ze zjištěných skutečností usuzujeme, že pro sledování menších druhů pěvců je navrhované zařízení stále příliš těžké nebo velké, a není tudíž vhodné. Na základě toho byly práce na modelových druzích pěvců ukončeny. Chování ptáků v experimentálních voliérách bylo analyzováno pomocí videí v programu BORIS (Friard & Gamba 2016, *Methods in Ecol. & Evol.* 7: 1325–1330, doi: 10.1111/2041-210X.12584), kde byly zadávány jednotlivé typy chování a jejich časový interval (lezení po stromě, poskakování, let, krmení se,

odpočinek). Tato data byla využita při vývoji software a k vytvoření algoritmů pro predikci chování pomocí akcelerometrických dat.

5.2.3. Postup prací při monitoringu čejky chocholaté

Vzhledem k již velmi dobře propracované metodice telemetrie mláďat čejky chocholaté dostupné z předchozích terénních prací nebyla realizace experimentální části výzkumu potřebná. Při terénních pracích v rámci projektu se tak nepředpokládaly metodické komplikace vyžadující držení mláďat v zajetí.

Terénní práce v roce **2020** na mláďatech modelového druhu čejky chocholaté probíhaly od března do konce června v zemědělské krajině Českobudějovicka. V brzkém jaře (březen/duben) byly vytipovány lokality hnízdního výskytu tohoto druhu s různými biotopy. Čejčí hnízda byla nalezena v několika různých typech habitatů pole/mokřina/agroenvi- plocha/vypuštěný rybník/louka. U všech hnízd bylo stanoveno datum líhnutí mláďat. Hnízda pak byla pravidelně kontrolována a byl zaznamenáván jejich stav (detekce líhnutí/vyřazení hnízd z důvodu predace, destrukce, opuštění). Monitorována byla mláďata všech dostupných věkových kategorií v květnu a červnu. Čerstvě vylíhnutá mláďata byla odchycena na hnízdě, zvážena, změřena a okroužkována. Pokud hmotnost mláďate přesáhla 18 g, bylo možné na ně umístit experimentální prototyp dataloggeru. V rámci rodiny (obvykle 4 kuřata) byl na jedno až dvě mláďata umístěn datalogger, na jedno mládě pak vysílačka Lotek PicoPip (0,4 g, <https://www.lotek.com/products/vhf-avian-tags-for-smaller-species/>), která byla již v předchozích letech úspěšně aplikována při výzkumu přežívání mláďat v polní krajině (Obr. 20). Díky aplikovanému vysílači tedy bylo možné rodinku znovu dohledat. V případě nalezení starších mláďat (při pohybu na lokalitě nebo nalezením rodiče vodícího mláďata) a jejich dostatečné hmotnosti byl umístěn set kombinující datalogger a vysílač na jedno mládě. Vzhledem k rozlehlým plochám a místy husté vegetaci bylo znovunalezení malých a skrytě žijících mláďat bez vysílače téměř nemožné.

Dle očekávání se projevila nevýhoda umístění vysílače separátně od dataloggeru, kdy bylo mládě s vysílačem usmrceno predátorem, a tudíž došlo ke ztrátě možnosti lokalizace rodiny, a tedy i druhého mláďate s dataloggerem. Ukázala se tak opět nutnost kombinace obou zařízení. V případě predace mláďate či ztráty dataloggeru je možné dohledat datalogger s vysílačem a nedojde tak ke ztrátě dataloggeru ani cenných dat. Standardně bývá vysílač připevněn na hřbet mláďate pomocí sekundového lepidla, proto jsme se rozhodli tento způsob vyzkoušet i při fixaci dataloggeru. Sekundové lepidlo je vhodným adhezivním přípravkem zejména díky vysoké přilnavosti k prachovému peří a krátkému času schnutí (vhodné i kvůli redukci stresu mláďat při manipulaci). Nicméně u dataloggeru je nutno více dbát na ochranu přístroje před nanesením lepidla a zároveň je nutné zajistit dostatečnou přilnavost. Na spodní stranu dataloggeru byla tedy umístěna kaptonová páska (nezanechává stopy lepidla na adhezivní straně) chránící datalogger před lepidlem. Přilnavost k tělu mláďate byla zvýšena nalepením filcové tkaniny. Na takto připravený datalogger bylo naneseno sekundové lepidlo a zařízení bylo umístěno na dolní část hřbetu mláďate. Datalogger vykazoval kvalitní fixaci, a na mláďatech nebyly pozorovány známky stresu nebo omezení v pohybu z důvodu aplikace zařízení. Jako nejvhodnější se ukázalo gelové sekundové lepidlo, vzhledem k typu aplikátoru konkrétně Locite Super Attak Perfect Pen. Během sběru aktivitních dat byly pořizovány videozáznamy napomáhající následné synchronizaci těchto dat se specifickým typem chování. Tato synchronizace byla pak základem k vytvoření

prediktivních algoritmů jednotlivých typů chování, které byly součástí vývoje výsledku V2 (Softwarová aplikace pro úpravu, vizualizaci a základní analýzu senzorických dat).



Obr. 20: Mláďata čejky chocholaté s připevněným vysílačem Lotek PicoPip (mláďě vpravo) a experimentálním prototypem dataloggeru DAL (mláďě vlevo)

V roce **2021** pokračoval sběr dat v rozsahu obdobném jako v roce 2020. Celkem byly získány záznamy od 18 jedinců. Zvolená metodika sběru dat a uchycení dataloggeru se i při opakovaném testování v terénu ukázala jako úspěšná bez výskytu dalších komplikací. Vzhledem k dostatečnému množství kvalitních sebraných dat bylo rovněž započato s jejich podrobnou analýzou, včetně aplikací skrytých Markovových modelů. S úspěchem se podařilo v záznamech detekovat například chování známé jako *“brooding”*, tedy ohřívání se přitisknutím na břicho rodičům. Nutnost *broodingu* je typická pro velkou část nekrmových ptačích druhů, zejména před dosažením plné endotermie a v nepříznivých teplotních podmínkách. Doba trávená *broodingem* může být ovšem důležitým limitujícím faktorem pro sběr potravy. Studií časových patrností tohoto chování bylo doposud publikováno velice málo, navíc prakticky chybí jakékoliv poznatky o chování mláďat prekociálních ptáků v průběhu noci. Právě v tomto ohledu tak může být využití multisenzorického datalogingu velmi cenným přínosem ve vědeckém výzkumu.

Detailní výsledky příkladové studie na tomto modelovém druhu jsou předloženy a vizualizovány v oddíle Příkladové studie - Využití metod multisenzorického datalogingu pro sledování vlivu zemědělského hospodaření na život druhů obývajících agroekosystémy na příkladu čejky chocholaté (*Vanellus vanellus*) (viz Příkladové studie ČÁST II) a dokazují velmi širokou uplatnitelnost výsledného produktu i u tohoto modelového druhu.

5.2.4. Postup prací při monitoringu ježků

Možnosti využití dataloggeru u ježků (východního a západního) probíhaly práce v roce **2020** jak v experimentálních, tak terénních podmínkách. V experimentálních podmínkách byly nejprve testovány možné způsoby připevnění prototypu DAL (bez radiovysílače). Dále byl pořizován videozáznam chování ježků před a po instalaci akcelerometru. V aréně byli pomocí kamer kontinuálně monitorováni dva ježci po dobu několika dní (Obr. 21). Videozáznamy byly analyzovány v programu BORIS, kde byly zaznamenány jednotlivé vzorce chování (chůze, pobíhání, krmení se, útok, odpočinek) a interakce mezi oběma jedinci. Tato data byla dále využita při vytváření algoritmů k určení a predikci chování pomocí akcelerometrických dat. V

experimentu byli využiti ježci ze záchranné stanice AVES, kteří byli po ukončení pokusu vypuštěni do přírody.

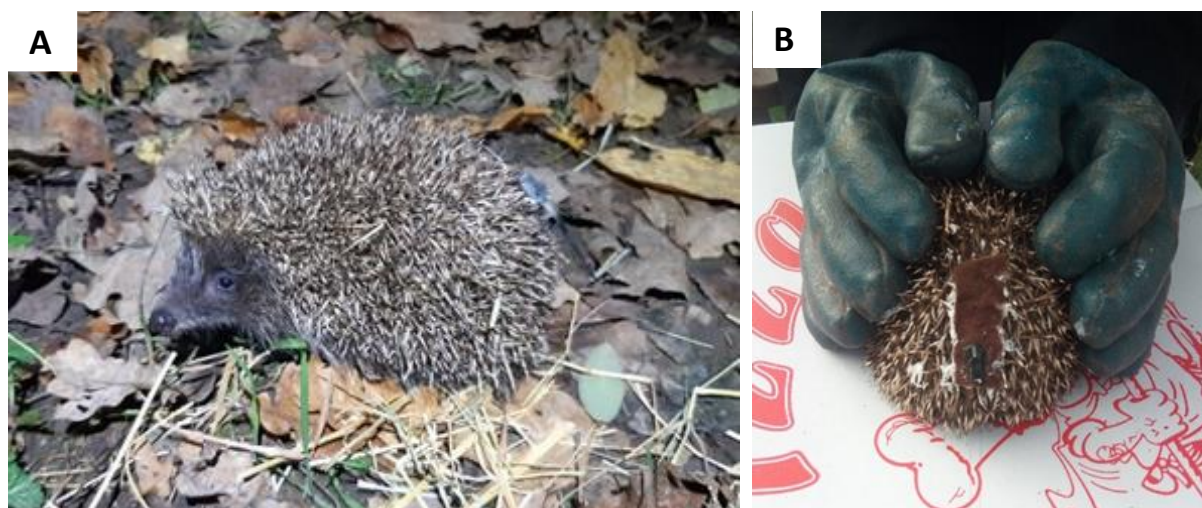


Obr. 21: Dva ježci s experimentálním prototypem dataloggeru DAL (A) monitorování ve výběhu (B).

V terénních podmínkách bylo nejprve testováno radiotelemetrické zaměřování za využití komerčně dostupných vysílaček (Lotek PicoPip) k určení potřebné síly signálu pro úspěšnou lokalizaci jedince ve městě a v otevřené krajině. Další část terénních prací měla prověřit zejména vhodnost umístění a typu uchycení dataloggeru na ježcích pohybujících se v přírodě a dále jistotu dohledání a zpětného odchyty jedinců pomocí vysílače Lotek PicoPip v různých prostředích (zástavba sídliště, zástavba rodinné domy, volná krajina). Testování byli jak volně odchytení jedinci, tak jedinci ze ZS Praha zpětně vypuštěni do přírody.

Problematický se ukázal způsob uchycení dataloggeru pomocí sekundového lepidla na bodlinách. Fixace sekundovým lepidlem se ukázala být nedostatečná zejména v prostředí hustého křoví. Jako alternativní adhezivum byl použit Den Braven MAMUT glue, který se ukázal jako velmi vhodný pro svou flexibilitu, rychlé zasychání, netoxicitu a extrémní přilnavost (Obr. 22 A). Dohledávání ježků pomocí vysílače PicoPip se ovšem ukázalo jako obecně velmi problematické, a to jak v zástavbě, tak v otevřené krajině. Po ztrátě signálu 3 ježků (1x zástavba, 2x volná krajina), byl zapůjčen výkonnější vysílač (m = 15 g), který se ukázal jako znatelně vhodnější pro dohledání tohoto druhu živočicha. Tyto terénní poznatky byly dále využity při návrhu řešení hardware multisenzorického dataloggeru s radiovysílačem MSD.

V průběhu jara **2021** proběhl intenzivní sběr dat o chování ježků v přírodě, a to za využití dataloggeru v kombinaci s vysílačem Lotek Backpack TW-3 (výkonnější vysílač byl zvolen na základě zkušeností z testování v terénu v roce 2020, Obr. 22 B). Sledovány byly dvě skupiny jedinců. První z nich tvořilo 26 volně žijících ježků, sledovaných na několika pražských lokalitách (Suchdol, Lysolaje, Dejvice, Petřiny). Druhou skupinu tvořilo 8 ježků, vypuštěných po přechodném držení v ZS pro volně žijící živočichy Praha Jinonice. V obou skupinách byly dataloggeru připevňovány adhezivem Den Braven Mamut, které bylo úspěšně otestováno v předchozím roce. Jiné typy tohoto adheziva od stejné značky (vyzkoušeno průhledné adhezivum za účelem zachování lepšího maskování jedinců v přírodě) se ukázalo jako pomalu tuhnoucí, a tudíž pro naše potřeby nepoužitelné. Datalogger byl na jedincích ponechán přibližně 3-6 dní. V průběhu této doby byli jedinci každý den telemetricky lokalizováni.



Obr. 22: Vypuštěný ježek s experimentálním dataloggerem při telemetrii (A), ježek s připevněným vysílačem Lotek PicoPip (B).

V roce **2022** proběhly další terénní práce v Praze Dejvicích (intravilán) a v lokalitě Stará Lysá (extravilán). Celkem zde bylo monitorováno 9 ježků (3 volně žijící, 6 vypuštěných zpět do přírody ze ZS pro volně žijící živočichy Praha Jinonice) v časovém rozmezí 1 až 43 dní. Náročnost nočního sběru dat, neoperativnost přesunů mezi relativně vzdálenými lokalitami a nedostatek dostupných experimentálních prototypů dataloggerů DAL vedly k rozhodnutí soustředit se na podrobnější a dlouhodobější monitoring ježků žijících na lokalitách s různou světelnou a disturbanční zátěží v intravilánu hl. města Prahy. V roce 2022 byla testována zejména vhodnost využití dataloggerů při dlouhodobějším monitoringu (až 1,5 měsíce).

Dlouhodobější a důkladnější monitoring byl provázen výměnou dataloggeru vždy po ukončení snímání (datalogger DAL je schopen sbírat data 3 až 4 dny). Během těchto výměn a při dlouhodobější expozici dataloggeru v terénu jsme narazili na nedostatek v použití kaptonové pásky, která byla při krátkodobé expozici v terénu (cca 3 dny) dobře funkční. Tato páska byla použita jako krycí lepenka zajišťující ochranu kontaktů ze spodní strany dataloggeru při jeho fixaci na živočicha. Při výměně dataloggeru a opětovném připevňování nového na předchozí podklad (provedli jsme až 6 výměn dataloggerů na jednom jedinci) spolu s dlouhodobější expozicí setu v terénu (7 až 14 dní) se ukázala kaptonová páska jako nevhodná. Následkem jejího odlepení tak došlo ke ztrátě několika dataloggerů. Byla proto nahrazena elektrická páskou několikrát obtočenou kolem zařízení. Tento způsob připevňování zlepšuje fixaci dataloggeru na podklad (otestovaná bezproblémová expozice v terénu až 12 dní), ale zároveň zvyšuje jeho hmotnost. Je tudíž možné ho využít pouze u druhů, u kterých je k dispozici váhová rezerva, jako je právě ježek. Lze tedy říci, že ačkoliv dochází ke zvýšenému opotřebení přilepené sestavy, u ježků je možné datalogger celkem bez problémů opakovaně vyměňovat. Tím byl získán vzorek dat z dlouhodobě sledovaných zvířat, který užitečně doplnil dataset monitorující chování ježků v intravilánu hl. města Prahy z roku 2021. Zároveň byly otestovány limity použité metodiky a širší možnosti využití multisenzorického dataloggingu v terénní praxi.

Systematickým sběrem dat jsme získali četné zkušenosti, které bylo možné přetavit do formy ověřených metodických doporučení. Především, v případě jedinců vypuštěných ze záchranné

stanice se vyplatilo jejich intenzivní sledování v průběhu první noci po vypuštění. Tito jedinci po vypuštění v neznámém prostředí často v krátké době překonají vzdálenost i několik kilometrů. Jejich pozdější lokalizace bez znalosti trasy přesunu by mohla být vzhledem k dosahu použitého vysílače neúspěšná. V některých případech měli ježci velmi řídké bodliny, což znemožňovalo nasazení dataloggeru tak, aby adhezivum nedoléhalo na kůži a zároveň byl datalogger v řídkých bodlinách dostatečně upevněn. Následkem toho došlo v několika případech krátce po vypuštění (cca 2 hodiny) ke ztrátě dataloggeru. V jednom případě ke ztrátě dataloggeru došlo v důsledku predace nebo zásahu člověka (zařízení bylo nalezeno stržené). V jednom případě došlo k úhynu ježka po vypuštění (4. den).

Detailní výsledky příkladové studie na modelovém druhu ježka jsou předloženy a vizualizovány v oddíle Příkladové studie - Využití metod multisenzorického dataloggingu pro sledování aktivity ježků (*Erinaceus* sp.) v prostředí intravilánu (viz Příkladové studie ČÁST III) a dokazují velmi širokou uplatnitelnost výsledného produktu u tohoto modelového druhu.