

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**SOUVISLOST DAT Z ÚLOVÝCH VAH A
LOKÁLNÍCH ENVIRONMENTÁLNÍCH
PODMÍNEK STANOVISŤ VE VZTAHU KE
ZDRAVOTNÍMU STAVU VČELSTEV**

Diplomová práce

Ondřej STEHLÍK

Vedoucí práce RNDr. Jan Brus, Ph.D.

Olomouc 2026

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá analýzou vztahů mezi daty z úlových vah a teplotních senzorů a lokálními environmentálními podmínkami stanovišť včelstev. Cílem práce bylo identifikovat klíčové klimatické a krajinné faktory ovlivňující denní snůšku a celkovou produktivitu včelstev, s důrazem na hodnocení vlivu meteorologických podmínek a dostupnosti nektarových a pylových zdrojů v okolí včelnic.

Analýza vychází z dat ze dvou stanovišť v Olomouckém kraji – Černotín a Hrádky – za sezónu 2024. Jako zdroje dat byly využity záznamy z úlových senzorů systému VeluBee, interpolovaná meteorologická rastrová data projektu Agropočasí.cz s prostorovým rozlišením 500 × 500 m, satelitní snímky Sentinel-2 zpracované prostřednictvím platformy Google Earth Engine a prostorová data ZABAGED a LPIS. Pro analýzu krajinného kontextu byly vytvořeny bufferové zóny o poloměrech 500 m, 1 km a 2 km kolem každého stanoviště. Prediktivní modelování bylo provedeno metodou Extreme Gradient Boosting (XGBoost) s interpretací pomocí analýzy důležitosti proměnných, hodnot SHAP a křivek ICE a PDP.

Výsledky modelování naznačují, že v rámci analyzovaného souboru dat byl nejvýznamnějším prediktorem denní snůšky výparný deficit vzduchu (VPD) s identifikovaným prahem přibližně 0,65 kPa, pod nímž snůška klesá k nule. Jako další významná proměnná se v modelu projevil vegetační index NDVI lesních porostů v okolí do 1 km od stanoviště. Nejlepší predikční přesnosti dosáhl model kombinující meteorologická data s vegetačními indexy NDVI ($R^2 = 0,746$). Analýza krajinné struktury odhalila výrazný kontrast mezi lokalitami: intenzivně zemědělské okolí lokality Černotín bylo spojeno s vyšší, avšak krátkodobější snůškou, zatímco diverzifikovanější okolí lokality Hrádky bylo spojeno s nižší, ale delší a stabilnější snůškou. Práce navrhuje a ověřuje metodický postup propojení úlových, meteorologických, satelitních a prostorových dat pro hodnocení stanovištních podmínek včelstev.

KLÍČOVÁ SLOVA

precizní včelařství; úlové váhy; prediktivní modelování; krajinný kontext; výparný deficit vzduchu

Počet stran práce: 53

Počet příloh: 5 (z toho 5 volné)

ANNOTATION

This master's thesis analyses the relationships between data from hive scales and temperature sensors and local environmental conditions at honeybee colony sites. The aim of the thesis was to identify key climatic and landscape factors influencing daily nectar flow and overall colony productivity, with emphasis on assessing the effects of meteorological conditions and the availability of nectar and pollen sources in the vicinity of apiaries.

The analysis is based on data from two sites in the Olomouc Region — Černotín and Hrádky — for the 2024 season. The data sources included records from VeluBee hive sensors, interpolated meteorological raster data from the Agropočasi.cz project with a spatial resolution of 500×500 m, Sentinel-2 satellite imagery processed using Google Earth Engine, and ZABAGED and LPIS spatial datasets. Buffer zones with radii of 500 m, 1 km and 2 km were created around each site to analyse the landscape context. Predictive modelling was performed using the Extreme Gradient Boosting algorithm (XGBoost), with interpretation based on feature importance analysis, SHAP values, and ICE and PDP curves.

The modelling results suggest that, within the analysed dataset, the most important predictor of daily nectar flow was vapour pressure deficit (VPD), with an identified threshold of approximately 0.65 kPa, below which nectar flow dropped to near zero. Another important variable in the model was the NDVI vegetation index of forest stands within 1 km of the site. The highest predictive accuracy was achieved by the model combining meteorological data with NDVI vegetation indices ($R^2 = 0.746$). The landscape structure analysis revealed a marked contrast between the two sites: the intensively agricultural surroundings of Černotín were associated with higher but shorter-term nectar flow, whereas the more diversified surroundings of Hrádky were associated with lower but longer and more stable nectar flow. The thesis proposes and validates a methodological workflow for integrating hive, meteorological, satellite and spatial data to assess environmental conditions at honeybee colony sites.

KEYWORDS

precision beekeeping; hive scales; predictive modelling; landscape context; vapour pressure deficit

Number of pages: 53

Number of appendixes: 5

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Chtěl bych poděkovat především svému vedoucímu práce RNDr. Janu Brusovi, Ph.D. za poskytnutí konzultací, kdykoliv to bylo třeba a za nespočet rad, které jsem do této práce promítnul. Dále musím poděkovat svému odbornému konzultantovi Mgr. Jiřímu Danihlíkovi, Ph.D. za poskytnutí úlových dat a detailních informací o životu včel.

Za poskytnutá meteorologická data děkuji týmu projektu agropocasi.cz, hlavně Ing. Martinu Opatrnému, který se mnou řešil předání dat a jejich technické parametry.

Diplomová práce vznikla s podporou projektu **NAZV QL24010241**.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Ondřej STEHLÍK
Osobní číslo: R240576
Studijní program: N0532A330009 Geoinformatika a kartografie
Téma práce: Souvislost dat z úlových vah a lokálních environmentálních podmínek stanovišť ve vztahu ke zdravotnímu stavu včelstev
Zadávající katedra: Katedra geoinformatiky

Zásady pro vypracování

Cílem diplomové práce je analyzovat vztahy mezi vývojem úlových vah, stanovištními podmínkami, dostupností nektarových a pylových zdrojů v okolí včelnic a zdravotním stavem včelstev. Zvláštní důraz bude kladen na hodnocení vlivu klimatických faktorů, zejména teploty a srážek, na snůškové poměry během roku a na celkovou produktivitu a kondici včelstev. Na základě dat získaných z několika včelnic situovaných v odlišných geografických a environmentálních podmínkách budou identifikovány klíčové faktory, které ovlivňují výkonnost včelstev, s cílem přispět k optimalizaci stanovištního managementu.

Text práce student zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku a poster. Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá student v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG student odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky student odevzdá pouze přílohy určené vedoucím práce.

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran
Rozsah grafických prací: dle potřeby
Forma zpracování diplomové práce: elektronická

Seznam doporučené literatury:

Czeakońska, K., Łopuch, S., Miścicki, S. et al. Monitoring of hive weight changes in various landscapes. *Apidologie* 54, 30 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13592-023-01012-0>
Rogers, S., & Staub, B. (2013). Standard use of Geographic Information System (GIS) techniques in honey bee research. *Journal of Apicultural Research*, 52, 1 – 48. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.4.08>.
Jürgen Degenfeller, Matthias Templ,
Modeling bee hive dynamics: Assessing colony health using hive weight and environmental parameters,
Computers and Electronics in Agriculture,
Volume 218,
2024

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jan Brus, Ph.D.
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 9. prosince 2024
Termín odevzdání diplomové práce: 4. května 2026

LS.

prof. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan



prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 10. prosince 2024

OBSAH

1	CÍLE PRÁCE	11
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	13
2.1	Včely medonosné a jejich význam	13
2.2	Fyziologie a vitalita včelstev	13
2.3	Precizní včelařství – monitoring pomocí senzorů	14
2.4	Vliv environmentálních podmínek na aktivitu a produktivitu včel	15
2.4.1	Meteorologické faktory	15
2.4.2	Fenologie a dostupnost potravinových zdrojů	16
2.4.3	Klimatické změny a variabilita počasí	17
2.5	Krajinný kontext a sběr potravy	17
2.6	Integrace senzorických a environmentálních dat	19
2.7	Shrnutí a identifikace výzkumné mezery	19
3	METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	21
3.1	Použité metody	21
3.2	Použitá data	22
3.3	Použité programy	24
3.4	Postup zpracování	25
3.5	Použití AI	25
4	VLASTNÍ ŘEŠENÍ	26
4.1	Příprava a předzpracování senzorických dat	26
4.2	Vizuální inspekce dat a identifikace snůšek	27
4.3	Zpracování meteorologických rastrů	30
4.4	Zpracování satelitních snímků Sentinel-2 a interpolace vegetačních indexů	31
4.5	Prostorové analýzy krajinného kontextu	33
4.6	Zonální statistiky NDVI	38
4.7	Zpracování tabulkových dat	39
4.7.1	Předzpracování tabulek zonálních statistik	39
4.7.2	Výpočet odvozených proměnných	40
4.7.3	Trénování a vyhodnocování prediktivního modelu	41
5	VÝSLEDKY	43
5.1	Průběh úlových dat a vymezení snůškových období	43
5.2	Krajinný kontext stanovišť a dostupnost nektarodárných zdrojů	44
5.3	Fenologická dynamika vegetace – časové řady NDVI	47
5.4	Meteorologický kontext snůšky a odvozené proměnné	49
5.5	Prediktivní modelování denní snůšky	52
6	DISKUZE	57
7	ZÁVĚR	61

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
CCD	Colony Collapse Disorder (syndrom kolapsu včelstev)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
ČZU	Česká zemědělská univerzita v Praze
GEE	Google Earth Engine
GIS	geografický informační systém
ICE	Individual Conditional Expectation
LPIS	Land Parcel Identification System (registr zemědělské půdy)
MAE	Mean Absolute Error (střední absolutní chyba)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDYI	Normalized Difference Yellowness Index
NetCDF	Network Common Data Form
PDP	Partial Dependence Plot (graf parciální závislosti)
RMSE	Root Mean Square Error (střední kvadratická chyba)
SCL	Scene Classification Layer
SET5	suma efektivních teplot nad prahem 5 °C
SHAP	SHapley Additive exPlanations
S-JTSK	Systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
UP	Univerzita Palackého v Olomouci
VPD	Vapour Pressure Deficit (výparný deficit vzduchu)
WGS 84	World Geodetic System 1984
XGBoost	Extreme Gradient Boosting
ZABAGED	Základní báze geografických dat České republiky

ÚVOD

Včela medonosná (*Apis mellifera*) patří mezi ekologicky i ekonomicky nejvýznamnější druhy hmyzu. Její role při opylování zemědělských plodin je nezastupitelná a globální hodnota opylovacích služeb se odhaduje na stovky miliard USD ročně. Přesto čelí včelstva v posledních desetiletích narůstajícímu tlaku biotických i abiotických stresorů – od parazitů a patogenů přes expozici pesticidům až po dopady klimatické změny a úbytek diverzifikovaných potravinových zdrojů v intenzivně obhospodařované krajině.

Včelaři na tyto výzvy reagují mimo jiné přijetím technologií precizního včelařství, které umožňují kontinuální dálkový monitoring stavu včelstev prostřednictvím úlových vah, teplotních senzorů a dalších zařízení. Jejich interpretace je však závislá na znalosti širšího kontextu, zejména meteorologických podmínek, fenologie kvetoucích rostlin a struktury krajiny v okolí stanoviště.

Přestože literatura nabízí řadu dílčích studií zaměřených na vliv počasí nebo krajiny na včelstva, chybí v podmínkách České republiky práce, která by systematicky propojila data z úlových senzorů s meteorologickými daty a prostorovou analýzou krajinného kontextu. Tato diplomová práce na uvedenou mezeru navazuje propojením úlových senzorických dat s meteorologickými a prostorovými daty ve dvou modelových lokalitách Olomouckého kraje. Výsledkem práce je ucelený postup zpracování a vyhodnocení úlových, meteorologických, satelitních a prostorových dat, který umožňuje porovnat rozdíly mezi sledovanými stanovišti a popsat jejich vztah k průběhu snůšky.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je analyzovat vztahy mezi vývojem úlových vah, stanovištními podmínkami, dostupností nektarových a pylových zdrojů v okolí včelnic a zdravotním stavem včelstev. Zvláštní důraz je kladen na hodnocení vlivu klimatických faktorů, zejména teploty a srážek, na snůškové poměry během roku a na celkovou produktivitu a kondici včelstev. Na základě dat získaných ze včelnic situovaných v odlišných geografických a environmentálních podmínkách jsou identifikovány faktory, které mohou ovlivňovat výkonnost včelstev, s cílem přispět k optimalizaci stanovištního managementu.

Práce se zaměřuje na propojení senzorických dat z úlových vah s meteorologickými, satelitními a prostorovými daty. Senzorická data poskytují informace o hmotnostním vývoji úlů a úlové teplotě. Meteorologická data umožňují popsat průběh teploty vzduchu, srážek, slunečního svitu, relativní vlhkosti a dalších proměnných ovlivňujících letovou aktivitu včel i produkci nektaru. Satelitní a prostorová data jsou využita k hodnocení vegetační dynamiky, krajinné struktury a dostupnosti potenciálních nektarových a pylových zdrojů v okolí sledovaných stanovišť.

Dílčím cílem práce je zpracovat a vyhodnotit časové řady z úlových vah systému VeluBee na lokalitách Černotín a Hrádky. V rámci tohoto kroku jsou identifikována hlavní snůšková období, výrazné zásahy včelaře a začátek plodování na základě průběhu úlové teploty. Denní hmotnostní změny úlů jsou následně použity jako ukazatel snůškové aktivity a produktivity sledovaných včelstev.

Dalším dílčím cílem je popsat meteorologické podmínky sledovaných lokalit s využitím rastrových dat projektu Agropočasi.cz. Z těchto dat jsou pro jednotlivé lokality a bufferové zóny odvozeny denní hodnoty základních meteorologických proměnných a vypočítány odvozené ukazatele, zejména suma efektivních teplot nad prahem 5 °C, výparný deficit vzduchu a klouzavé nebo zpožděné meteorologické proměnné. Tyto ukazatele slouží k hodnocení průběhu sezóny a jako vstupní proměnné pro prediktivní modelování denní snůšky.

Dalším cílem je zhodnotit krajinný a fenologický kontext obou stanovišť. Krajinná struktura je analyzována pomocí prostorových dat ZABAGED a LPIS v bufferových zónách o poloměrech 500 m, 1 km a 2 km. Zvláštní pozornost je věnována zastoupení orné půdy, trvalých travních porostů, sadů, zahrad, lesních porostů a zemědělských plodin s nektarodárným potenciálem. Fenologická dynamika vegetace je hodnocena pomocí vegetačních indexů NDVI a NDYI odvozených ze snímků Sentinel-2.

Navazujícím cílem je vytvořit prediktivní model denní snůšky pomocí algoritmu XGBoost a posoudit, které meteorologické, vegetační a krajinné proměnné mají v rámci analyzovaného souboru dat nejsilnější vztah k denním hmotnostním přírůstkům úlů. Model je interpretován pomocí důležitosti vstupních proměnných, SHAP hodnot a křivek ICE/PDP. Cílem modelování není vytvoření obecně platného predikčního systému pro všechna stanoviště, ale ověření, zda lze propojením dostupných datových zdrojů zachytit hlavní vztahy mezi průběhem snůšky a lokálními environmentálními podmínkami.

Vzhledem k dostupným datům není zdravotní stav včelstev v této práci hodnocen jako veterinární nebo diagnostický zdravotní stav. Práce nepracuje s přímými údaji o napadení kleštikem včelím, výskytu patogenů, množství plodu, síle včelstev ani s laboratorními rozbory. Zdravotní stav je proto posuzován nepřímo prostřednictvím dostupných senzorických ukazatelů, zejména průběhu hmotnosti úlů, denní snůšky, úlové teploty, termoregulační stability a celkové produktivity. Tyto ukazatele umožňují hodnotit vitalitu a funkční kondici včelstva, nikoli jednoznačně diagnostikovat příčiny případného oslabení.

Výsledkem práce je metodický postup propojující úlová, meteorologická, satelitní a prostorová data pro hodnocení stanovištních podmínek včelstev. Přínosem práce je zejména ověření možnosti využití geoinformatických metod, dat dálkového průzkumu Země a prediktivního modelování při interpretaci dat z úlových vah. Výsledky mohou sloužit jako podklad pro další výzkum v rámci precizního včelařství.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Včely medonosné a jejich význam

Včela medonosná (*Apis mellifera* Linnaeus, 1758) náleží do řádu blanokřídlých (*Hymenoptera*), čeledi včelovitých (*Apidae*) a rodu *Apis* (Grimaldi a Engel, 2005; Engel, 1999). Jedná se o eusociální hmyz žijící v početných společenstvech s jasně definovanou dělbou práce. Včelstvo se skládá z jedné královny, tisíců sterilních dělnic a v produktivním období také trubců. Populace včelstva se pohybuje mezi 10 000–20 000 jedinci v zimě a 30 000–50 000 jedinci v době snůšky (Čavojský, 1981). Dělnice představují nejpočetnější skupinu v úlu a jejich úkoly se mění v závislosti na věku, přičemž létavky odpovědné za sběr potravy tvoří přibližně polovinu celkové populace včelstva.

Včely medonosné jsou klíčovými opylovači zemědělských plodin. Klein et al. (2007) zjistili, že produkce 91 ze 107 hlavních světových potravinářských plodin závisí v různé míře na živočišném opylování. Roční tržní hodnota globální produkce plodin přímo přičitatelná živočišnému opylování dosahuje 235–577 miliard USD (Potts, 2016). Jakýkoli pokles vitality nebo početnosti včelstev se proto přímo odráží ve výnosech plodin i v druhové rozmanitosti krajiny (Potts, 2016).

Včelstva jsou vystavena narůstajícímu tlaku biotických i abiotických stresorů. Kunc et al. (2019) identifikují ztráty včelstev jako multifaktoriální problém zahrnující syndrom kolapsu včelstev (CCD), parazity (zejména *Varroa destructor*), patogeny, expozici pesticidům, nedostatek diverzifikovaných potravinových zdrojů a dopady klimatické změny. Pochopení vlivů environmentálních podmínek na včelstva je proto zásadní pro implementaci efektivních managementových strategií a ochranu tohoto klíčového opylovače (Steinhauer et al., 2018).

2.2 Fyziologie a vitalita včelstev

Fyziologické procesy včelstev determinují jejich schopnost přežít nepříznivé podmínky a efektivně se rozvinout v produktivní sezóně. Klíčovým regulačním prvkem je protein vitelogenin, jehož hladiny v organismu dělnic zásadně ovlivňují jejich životnost a odolnost vůči stresovým faktorům (Amdam a Omholt, 2002; Seehuus et al., 2006). Hladiny vitelogeninu dosahují vrcholu u 7–10 dnů starých krmíček a klesají při přechodu dělnice na snůškovou aktivitu, přičemž létavky vykazují jeho nejnižší koncentrace (Amdam et al., 2012). Naopak zimní dělnice akumulují vitelogenin ve vysokých hladinách, což jim umožňuje přežít 6–10 měsíců v kontrastu s typickou 4–6týdenní životností letních dělnic (Amdam et al., 2012; Remolina a Hughes, 2008). Zimní dělnice se vyznačují zvýšenými zásobami proteinů, lipidů a glykogenu, které umožňují přežití zimy a zajištění jarního rozvoje včelstva (Kunc et al., 2019).

Včelstva přežívají zimu v aktivním stavu bez hibernace prostřednictvím tvorby zimního chomáče. Chomáč se skládá z horké centrální zóny a vnější izolační vrstvy živých včel minimalizující tepelné ztráty (Stabentheiner et al., 2003; Southwick, 1982). Během aktivního chovu plodu včely termoregulují prostor plodového hnízda na 34,5–35,5 °C (Zacepins et al., 2016; Arias-Calluari et al., 2025). Tento teplotní signál je přímo měřitelný úlovými senzory a slouží jako indikátor začátku plodování – přechod na soustavně udržovanou teplotu v tomto rozmezí signalizuje aktivní chov plodu. Znalost fyziologického

stavu včelstva je tak zásadní pro správnou interpretaci dat ze senzorových systémů (Kunc et al., 2019).

2.3 Precizní včelařství – monitoring pomocí senzorů

Precizní včelařství představuje aplikaci moderních senzorových technologií a analytických metod pro kontinuální monitoring a optimalizaci managementu včelstev (Zacepíns et al., 2015). Tento přístup umožňuje včelařům získávat detailní informace o stavu včelstev bez nutnosti častých fyzických inspekcí, které mohou včelstvo stresovat. Měřenými parametry jsou nejčastěji hmotnost úlu, teplota uvnitř úlu, relativní vlhkost, akustické signály a video záznamy letového provozu. Hmotnost úlu patří mezi nejdůležitější sledované parametry – poskytuje informace o průběhu snůšky, spotřebě zásob a vhodném načasování včelařských zásahů (Fitzgerald et al., 2015).

Na území České republiky existuje již několik prodejců systémů úlových vah a jedním z nich je například VeluBee. Jejich dosud nejmodernější produkt se jmenuje VeluBee Hive, který kombinuje řídicí jednotku a váhu s přesností $\pm 100\text{g}$ a teplotní senzory vnitřní a venkovní s přesností $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Systém je znázorněn na Obr. 1



Obr. 1 Systém VeluBee Hive (zdroj: <https://www.velubee.cz/velubee-hive>)

Kaňovská (2024) provedla první výzkum adopce technologií precizního včelařství v České republice a zjistila, že zájem včelařů o tato zařízení je nižší než zájem výrobců. Mezi hlavní bariéry patří pořizovací cena, slabší IT znalosti, tradiční včelařské praktiky a vyšší věk včelařů. I přes technologickou dostupnost systémů precizního včelařství tak zůstává jejich rozšíření v českém prostředí omezené sociálními a ekonomickými faktory.

2.4 Vliv environmentálních podmínek na aktivitu a produktivitu včel

Aktivita včelstev a jejich produktivita jsou spjaté s podmínkami vnějšího prostředí. Environmentální faktory ovlivňují nejen přímou letovou aktivitu sběraček, ale i fyziologické procesy v rámci celého včelstva, dostupnost a kvalitu potravinových zdrojů a celkovou vitalitu kolonie. Pro správnou interpretaci dat získaných z hmotnostních a teplotních senzorů v úlech je nezbytné pochopit mechanismy, kterými působí meteorologické podmínky, fenologie rostlin a dlouhodobé klimatické změny na chování a zdraví včel medonosných. Tato kapitola shrnuje současný stav poznání vlivu environmentálních faktorů na včelstva, přičemž klade důraz na parametry, které lze kvantifikovat pomocí meteorologických dat a prostorových analýz.

2.4.1 Meteorologické faktory

Meteorologické podmínky představují jeden z hlavních limitujících faktorů pro snůškovou aktivitu včel medonosných. Jednotlivé parametry působí jak samostatně, tak ve vzájemné interakci, přičemž jejich kombinace určuje, zda jsou podmínky pro sběr optimální, suboptimální nebo zcela nevhodné.

Teplota vzduchu patří mezi nejdůležitější meteorologické faktory ovlivňující letovou aktivitu včel. Minimální teplota pro zahájení letové aktivity se pohybuje kolem 10 °C, přičemž při nižších teplotách dochází k výraznému omezení až úplnému zastavení sběrové aktivity (Vincze et al., 2025). Optimální rozmezí pro intenzivní snůšku leží mezi 20 a 30 °C (Vincze et al., 2025; Czeakońska et al., 2023). Extrémně vysoké teploty nad 40 °C naopak představují stresový faktor – dělnice prioritně zůstávají v úlu a věnují energii chlazení hnízda namísto sběru (Rodríguez-Vásquez et al., 2024). Clarke a Robert (2018) zjistili silnou pozitivní korelaci letové aktivity s teplotou ($R^2 = 0,53\text{--}0,66$). Czeakońska et al. (2023) prokázali, že denní přírůstky hmotnosti úlů byly nejsilněji korelovány s teplotou ve 13:00 hodin, což odpovídá období nejvyšší snůškové aktivity během dne.

Srážky inhibují letovou aktivitu přímo i nepřímo. Déšť mechanicky brání letu dělnic, snižuje viditelnost a zhoršuje orientaci, takže při intenzivních srážkách se snůšková aktivita prakticky zastavuje (Vincze et al., 2025). Krátkodobé srážky navíc nařadí nektar ve květech a sníží jeho atraktivitu pro včely. Přiměřené srážky po období sucha však mohou produkci nektaru naopak zvýšit, neboť zajišťují dostatečnou vlhkost půdy pro fyziologické procesy rostlin (Vincze et al., 2025; Solovev, 2020). Czeakońska et al. (2023) pozorovali, že vliv srážek na hmotnostní změny úlů byl komplexní a silně závislý na kontextu ostatních meteorologických faktorů.

Sluneční svit působí jako přímý stimul snůškové aktivity – ovlivňuje nejen teplotu vzduchu, ale funguje i jako signál iniciující letovou aktivitu dělnic. Vincze et al. (2025) shrnují, že aktivita včel se mění lineárně s intenzitou záření až do přibližně 460 W/m², po jejímž překročení celková aktivita klesá, pravděpodobně vlivem nadměrného zahřátí. Sluneční svit zároveň stimuluje sekreci nektaru u mnoha rostlinných druhů. Clarke a Robert (2018) prokázali, že sluneční radiace společně s teplotou patří mezi nejvýznamnější prediktory snůškové aktivity s kombinovaným $R^2 = 0,62\text{--}0,72$.

Rychlost větru představuje mechanickou překážku pro let včel. Při rychlostech do 2 m/s nemá vítr na aktivitu prakticky žádný vliv, avšak s rostoucí rychlostí se snůšková aktivita postupně snižuje. Kritická hranice se nachází kolem 5–6 m/s, při jejímž překročení se počet

letů výrazně redukuje a včely mají obtíže s orientací a návratem do úlu (Vincze et al., 2025; Czekońska et al., 2023). Extrémně silný vítr nad 10 m/s snůšku téměř zcela zastavuje.

Relativní vlhkost vzduchu ovlivňuje snůšku komplexním způsobem. Optimální rozmezí pro intenzivní sběr leží mezi 60 a 70 %. Nízká vlhkost (< 30 %) způsobuje rychlé vysychání nektaru ve květech a zvyšuje riziko dehydratace včel, zatímco vysoká vlhkost (> 90 %) v kombinaci se srážkami nebo mlhou snižuje letovou aktivitu a ztěžuje orientaci. (Vincze et al., 2025)

Výparný deficit vzduchu (VPD – *Vapour Pressure Deficit*) vyjadřuje rozdíl mezi tlakem nasycené vodní páry při dané teplotě a skutečným tlakem vodní páry, a zachycuje tak kombinovaný vliv teploty a vlhkosti na odpařování vody z nektaru. Vysoké VPD způsobuje zahušťování nektaru ve květech, nízké VPD jeho ředění. Chabert et al. (2020) prokázali, že VPD vysvětloval 56 % variability koncentrace cukrů v nektaru, přičemž optimální teplota pro sekreci nektaru byla 32 °C. Koncentrace cukrů v nektaru přímo ovlivňuje atraktivitu nektaru pro včely a jejich motivaci ke sběru, a tím i denní přírůstek hmotnosti úlu. Způsob výpočtu VPD z meteorologických dat je popsán v kapitole 3.

Komplexní působení meteorologických faktorů. Jednotlivé parametry nepůsobí izolovaně. Clarke a Robert (2018) vyvinuli prediktivní model kombinující teplotu, sluneční radiaci, vlhkost a vítr, který dosáhl $R^2 = 0,66$. Czekońska et al. (2023) zjistili, že meteorologické proměnné vysvětlovaly přibližně 30 % variability denních přírůstků hmotnosti úlů, přičemž nejvyšší vysvětlovací sílu měly teplota vzduchu a délka slunečního svitu.

2.4.2 Fenologie a dostupnost potravinových zdrojů

Produkce nektaru a pylu rostlinami není konstantní, ale vykazuje výraznou časovou a prostorovou variabilitu v závislosti na meteorologických podmínkách, druhu rostliny a dostupnosti vody v půdě. Pro včelstva je zásadní nejen celkové množství dostupných zdrojů, ale také jejich časové rozložení a nutriční kvalita.

Fenologické fáze rostlin, zejména nástup kvetení, jsou výrazně ovlivněny teplotou vzduchu, srážkami a délkou osvitů. Vyšší jarní teploty urychlují kvetení časných druhů, zatímco chladné jaro jej zpožďuje a zkracuje dobu kvetení, což včelám ztěžuje efektivní využití dostupných zdrojů (Lecocq et al., 2015). Klimatická změna způsobuje posun fenologických fází, přičemž včelstva a rostliny reagují různou rychlostí. Nürnberger et al. (2019) prokázali, že teplejší zimy způsobují dřívější začátek plodování včelstev, což nemusí korespondovat s dostupností pylu v krajině, zatímco opožděný rozvoj včelstev v chladném jaru vede k menší populaci dělnic a sníženým zásobám medu během sezóny.

Nektar a pyl představují základní zdroje energie a živin. Nektar poskytuje sacharidy pro energetický metabolismus, zatímco pyl je zdrojem bílkovin, lipidů a vitaminů nutných pro vývoj plodu a udržení imunity (Pasquale et al., 2013; Czekońska et al., 2023). Nedostatečný příjem pylu, zejména v jarním období, zpomaluje růst kolonie, oslabuje imunitu a zkracuje životnost dělnic. Koncentrace cukrů v nektaru je přímo ovlivněna meteorologickými podmínkami – výparným deficitem vzduchu, teplotou a vlhkostí, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole.

V podmínkách České republiky hrají klíčovou roli tradiční snůškové zdroje – akát (*Robinia pseudoacacia*), lípa (*Tilia* spp.), řepka (*Brassica napus*) a slunečnice (*Helianthus annuus*). Akát je extrémně citlivý na pozdní jarní mrazíky, které mohou způsobit nulovou snůšku pro celou sezónu, přičemž optimální podmínky pro sekreci nektaru u akátu zahrnují teplotu kolem 20 °C (Farkas a Zajác, 2007). Periody intenzivní snůšky (hlavní snůška akátu a ovocných stromů na jaře, lípy a řepky v první polovině léta) se střídají s obdobími

nedostatku potravy, kdy jsou včelstva závislá na nashromážděných zásobách nebo musí být přikrmována (Goulson a Nicholls, 2022).

Monitoring hmotnosti úlů pomocí elektronických vah umožňuje přesnou identifikaci snůškových období a kvantifikaci denních přírůstků. Denní přírůstky hmotnosti odpovídají množství přineseného nektaru po odečtení denní spotřeby včelstva, přičemž pokles hmotnosti v nočních hodinách odráží odpařování vody z nektaru (Kazda et al., 2024). Dlouhodobý monitoring hmotnostních změn tak poskytuje přímý obraz o dostupnosti potravinových zdrojů v okolí stanoviště (Czekońska et al., 2023).

2.4.3 Klimatické změny a variabilita počasí

Globální klimatická změna představuje narůstající hrozbu pro včelstva a jejich potravinové zdroje. Průměrná teplota vzduchu vzrostla za poslední století přibližně o 0,5 °C a do roku 2100 se očekává její nárůst až o 4 °C (Thuiller, 2007). Tyto změny mají přímý i nepřímý dopad na včelstva, která patří mezi nejvýznamnější opylovače v zemědělsky obhospodařovaných oblastech střední Evropy.

Zvyšující se teploty způsobují posuny fenologických fází rostlin i hmyzu, přičemž tyto změny neprobíhají synchronně. Thackeray et al. (2010) zjistili, že terestrické rostliny vykazují fenologický posun v průměru 5–6 dní na dekádu, zatímco odezva bezobratlých je pomalejší – přibližně 4 dny na dekádu. Tento rozdíl může vést k trofické desynchronizaci mezi včelami a jejich potravinovými zdroji. V podmínkách střední Evropy mohou fenologické posuny způsobit, že jarní kvetení časných druhů proběhne dříve, než jsou včelstva po zimě dostatečně silná pro efektivní sběr. Nürnberger et al. (2019) zjistili, že včelstva s opožděnou fenologií měla v časném jaru menší populaci dělnic a redukované zásoby medu. Naopak teplejší zimy způsobují dřívejší začátek plodování, což zvyšuje populaci roztoče *Varroa destructor* a oslabuje včelstva.

Klimatická změna zvyšuje frekvenci a intenzitu extrémních meteorologických jevů. Vlny veder nad 40 °C přinutí včely věnovat energii termoregulaci úlu namísto sběru (Rodríguez-Vásquez et al., 2024). Dlouhodobá sucha omezují produkci nektaru a nutí včely létat delší vzdálenosti za alternativními zdroji, čímž se snižuje efektivita sběru (Kimani, 2017). Pozdní jarní mrazíky mohou zcela zničit snůšku akátu, který je v České republice jedním z hlavních zdrojů nektaru v květnu. Narůstající nepředvídatelnost klimatu komplikuje plánování včelařské sezóny a management včelstev, zvyšuje náklady a negativně ovlivňuje rentabilitu včelařství (Rodríguez-Vásquez et al., 2024; Neov et al., 2019).

Dopady klimatické změny na včelařství jsou doloženy i v podmínkách střední Evropy. Wang (2021) zjistila v České republice, že nadprůměrné zvýšení roční teploty vzduchu předchází výrazně vyšším zimním ztrátám včelstev v následujícím roce. Switanek et al. (2017) pozorovali v Rakousku výrazné korelace mezi teplejšími a sušším předchozím rokem a zvýšenou zimní úmrtností včelstev. Čech (2025) prokázal na datech z let 2013–2023 v České republice, že zvýšené únorové anomálie teploty vzduchu a rychlosti větru statisticky signifikantně negativně ovlivňovaly zimní přežití včelstev, přičemž únor představuje klíčové přechodové období při přechodu ze zimního klidu do jarního rozvoje.

2.5 Krajinový kontext a sběr potravy

Dostupnost a kvalita potravinových zdrojů pro včely není determinována pouze meteorologickými podmínkami, ale v rozhodující míře také strukturou a typem krajiny v okolí úlu. Prostorové uspořádání habitatů, jejich diverzita a vzájemná konektivita přímo ovlivňují efektivitu sběru, produktivitu včelstev a jejich celkovou vitalitu.

Včely medonosné se rutinně pohybují do přibližně 1,5 km od úlu, avšak při nedostatku zdrojů v bezprostředním okolí mohou dosahovat vzdálenosti 10 km i více (Steffan-Dewenter a Kuhn, 2003). Vzdálenost letů závisí na dostupnosti zdrojů – v oblastech s pestrá strukturou habitatů jsou lety kratší než v intenzivně zemědělských oblastech (Steffan-Dewenter a Kuhn, 2003). Více než 90 % snůškových letů přitom směřuje do vzdálenosti 1 538 m od úlu (Danner et al., 2014). Pro prostorové analýzy vztahu mezi krajinou a produktivitou včelstev se běžně využívá metoda bufferových zón kolem stanoviště. Lecocq et al. (2015) prokázali, že vliv krajiny na produktivitu byl výraznější v radiusu 1 km než v radiusu 3 km, přičemž v radiusu 3 km byla zjištěna statisticky signifikantní rozdílnost mezi urbánními, zemědělskými a smíšenými krajinami ($F = 3,531$; $p = 0,030$). Na základě těchto poznatků byly v této práci zvoleny bufferové zóny o poloměrech 500 m, 1 km a 2 km.

Typ krajiny v okolí úlu významně ovlivňuje produktivitu včelstev, protože určuje množství, diverzitu i časovou dostupnost potravních zdrojů. Lecocq et al. (2015) v Dánsku zjistili, že včelstva umístěná v urbánním prostředí dosahovala vyšší produktivity než včelstva v zemědělské nebo smíšené krajině; v okruhu 3 km činila průměrná hmotnost urbánních včelstev 57,50 kg, zatímco u zemědělských lokalit 45,94 kg. Vyšší produktivita v městském prostředí je spojována především s větší prostorovou heterogenitou a vyšší diverzitou kvetoucích rostlin v parcích, zahradách a dalších zelených plochách, které mohou poskytovat potravní zdroje v průběhu delší části sezóny. Tento přínos se výrazněji projevuje zejména v letním období, kdy v intenzivně obhospodařované zemědělské krajině po odkvětu hlavních plodin často dochází k omezení potravní nabídky. Zemědělská krajina sice může během kvetení masově pěstovaných plodin poskytovat velmi bohatou, avšak časově omezenou snůšku, po níž může následovat delší období nedostatku diverzifikovaných zdrojů (Westphal et al., 2009; Blettler et al., 2022). Typickým příkladem je řepka olejná (*Brassica napus*), která v době květu představuje pro včely významný zdroj nektaru a pylu, avšak po jejím odkvětu se potravní nabídka v intenzivních agrosystémech často výrazně snižuje (Westphal et al., 2009). Lesní porosty a dřevinná vegetace naopak mohou představovat stabilnější složku krajiny, protože poskytují včelám potravní zdroje v podobě nektaru, pylu i medovice a současně mohou zlepšovat mikroklimatické podmínky stanoviště, například ochranou před větrem nebo zmírněním účinků nepříznivého počasí (Donkersley, 2019; Requier a Leonhardt, 2020; Rutschmann et al., 2023).

Krajinná heterogenita, tedy rozmanitost uspořádání různých typů habitatů, má pozitivní vliv na diverzitu opylovačů a efektivitu opylování (Potts, 2016). Lecocq et al. (2015) zjistili, že smíšená krajina bez dominantního habitatu vykazovala paradoxně nejhorší produktivitu včelstev, pravděpodobně z důvodu absence rozsáhlých snůškových ploch.

Krajinný kontext má přímý vliv na interpretaci dat z úlových vah. Včelstva v různých typech krajiny vykazují odlišné hmotnostní profily a dynamiku změn. Czekońska et al. (2023) zjistili, že meteorologické proměnné vysvětlovaly přibližně 30 % variability hmotnosti včelstev, zatímco struktura krajiny přispívala k variabilitě v menší, ale stále významné míře. Ačkoli pro podmínky České republiky není tento vztah jednoznačně doložen jednou souhrnnou studií, výsledky ze středoevropského prostoru naznačují, že lesní a semi-přirozené habitaty mohou podporovat stabilnější výkonnost včelstev než intenzivně obhospodařovaná zemědělská krajina, zejména díky zmírnění dopadů období potravního nedostatku a vyššímu podílu přírodě blízkých zdrojů v krajině (Verrier et al., 2024). Současně však výzkum z lesních krajin střední Evropy ukazuje, že vztah mezi lesní krajinou a výkonností včelstev není zcela jednoznačný, protože včely v lesně dominovaných oblastech často létají za potravou na větší vzdálenosti, a dostupnost zdrojů se výrazně mění v průběhu sezóny (Rutschmann et al., 2023). Naopak urbánní prostředí může při

dostatečné diverzitě kvetoucích rostlin dosahovat i vyšší produktivity než zemědělská krajina, jak ukázala studie z Dánska, v níž byla včelstva v převážně urbánní krajině produktivnější než v krajině zemědělské nebo smíšené (Lecocq et al., 2015).

2.6 Integrace senzorických a environmentálních dat

Precizní včelařství využívá moderní senzorové technologie pro kontinuální monitoring včelstev. Úspěšná aplikace těchto technologií vyžaduje integraci dat ze senzorů instalovaných v úlech s externími environmentálními daty, která umožňuje komplexní pochopení dynamiky včelstev a vytváří základ pro prediktivní modely podporující rozhodování včelařů. Podobně jako precizní zemědělství lze i precizní včelařství rozdělit do tří fází: sběr dat, analýza dat a aplikace (Zacepins et al., 2015).

Hmotnost úlu patří mezi nejdůležitější sledované parametry (Fitzgerald et al., 2015). Automatizované váhové systémy poskytují informace o klíčových událostech ve včelstvu – začátku snůšky, spotřebě zásob, vhodném čase pro přidání nástavků nebo zahájení sklizně medu (Kviesis et al., 2020). Změny hmotnosti úlu mezi dvěma po sobě jdoucími dny poskytují informace o rychlosti sběru potravy v produktivních měsících nebo o rychlosti spotřeby zásob v neproduktivních měsících (Lecocq et al., 2015). Meikle et al. (2008) prokázali, že denní variabilita v hmotnosti úlu poskytuje přímé měřítko aktivity včelstva. Teplota uvnitř úlu doplňuje obraz o termoregulační schopnosti a celkovém zdravotním stavu kolonie – přechod na soustavně udržovanou teplotu 34,5–35,5 °C signalizuje aktivní chov plodu.

Senzorická data musí být integrována s environmentálními daty, aby bylo možné pochopit kauzální vztahy mezi vnějšími podmínkami a chováním včel. Pro přiřazení lokálních meteorologických podmínek ke konkrétním stanovištím lze využít interpolované rastrové vrstvy s vysokým prostorovým rozlišením, například produkty tvořené podle metodiky (Možný et al., 2023), která zahrnuje nadmořskou výšku jako vysvětlující proměnnou a dosahuje rozlišení 500 × 500 m. Robustillo et al. (2022) rozlišují endogenní proměnné měřené uvnitř úlu (teplota, vlhkost, hmotnost) a exogenní proměnné reprezentující vnější meteorologické podmínky. Integrace těchto dvou typů dat umožňuje vytvářet predikce s dostatečným časovým předstihem pro identifikaci anomálií ohrožujících zdraví včelstva.

Většina současných projektů precizního včelařství zůstala ve stadiu deskriptivní analýzy dat (Ochoa et al., 2019; Zacepins et al., 2015). Technické výzvy zahrnují výpadky senzorů, ztrátu síťového připojení a mezery v datech. Kviesis et al. (2020) zdokumentovali, že ačkoli jsou váhové systémy převážně spolehlivé, mezery v datech způsobené poruchami nebo vybitím baterie omezují využitelnost dat pro analytické účely.

Kontinuální monitoring hmotnosti a teploty úlu se stává standardním postupem v včelařské praxi a funguje jako základ implementace precizního včelařství (Kviesis et al., 2020). Integrace senzorických dat z úlů s meteorologickými daty a s daty o struktuře krajiny v okolí stanovišť vytváří základ pro komplexní pochopení dynamiky včelstev a pro rozvoj prediktivních nástrojů podporujících rozhodování včelařů.

2.7 Shrnutí a identifikace výzkumné mezery

Teoretická část diplomové práce syntetizovala poznatky z oblasti precizního včelařství a environmentálních vlivů na včelstva včely medonosné. Včely představují klíčové opylovače zemědělských plodin a jejich produktivita a zdraví jsou výrazně ovlivněny komplexem biotických i abiotických faktorů. Fyziologické procesy včelstev, zejména dynamika

vitelogeninu a životního cyklu dělnic, determinují schopnost kolonií přežít zimní období a efektivně se rozvinout v produktivní sezóně.

Precizní včelařství využívá kontinuální monitoring parametrů včelstev pomocí senzorů měřících hmotnost a teplotu úlu. Hmotnost úlu odráží produktivitu včelstva během snůšky, zatímco teplota poskytuje informace o termoregulační schopnosti a zdravotním stavu kolonie. Meteorologické faktory – zejména teplota vzduchu, úhrn srážek, délka slunečního svitu a rychlost větru – přímo ovlivňují snůškovou aktivitu včel, fenologii kvetoucích rostlin a produkci nektaru a pylu. Klimatická změna způsobuje fenologické posuny a trofickou desynchronizaci mezi včelami a jejich potravinovými zdroji a zvyšuje frekvenci extrémních meteorologických jevů, které představují rostoucí hrozbu pro včelstva.

Krajinný kontext v okolí úlu, zejména v radiusu 1–2 km, zásadně ovlivňuje dostupnost a kvalitu potravinových zdrojů. Urbánní prostředí poskytuje kontinuální a diverzifikovanou potravu, intenzivně zemědělské oblasti vykazují periodický nedostatek zdrojů po skončení kvetení hlavních plodin a lesy nabízejí relativně stabilní zdroje potravy. Integrace senzorických dat z úlů s environmentálními daty umožňuje aplikaci pokročilých statistických metod a strojového učení, avšak většina současných studií zůstává v rovině deskriptivní analýzy.

Identifikace výzkumné mezery: Přestože existuje rozsáhlá literatura o jednotlivých environmentálních faktorech ovlivňujících včelstva, pouze omezený počet studií integruje senzorová data z precizního včelařství s komplexní analýzou lokálních environmentálních podmínek zahrnujících jak meteorologické faktory, tak prostorovou strukturu krajiny. Většina výzkumů se zaměřuje buď na meteorologické vlivy v širokém měřítku, nebo na krajinný kontext bez detailní časové dynamiky meteorologických proměnných. **V podmínkách České republiky chybí studie, které by systematicky kombinovaly data z úlových vah, teplotních senzorů s meteorologickými daty a s analýzou krajinného kontextu** v relevantním funkčním radiusu včelstev.

3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

3.1 Použité metody

Metody prostorové analýzy. V rámci prostorové analýzy byly aplikovány metody tvorby bufferových zón, zonálních statistik a překryvných vektorových operací v prostředí GIS. Bufferové zóny o poloměrech 500 m, 1 km a 2 km sloužily jako prostorový rámec pro extrakci hodnot meteorologických a vegetačních dat i pro hodnocení krajinného kontextu stanovišť. Zonální statistiky byly vypočítány nástrojem Zonal Statistics as Table pro vícerozměrné rastrové datasety, který umožňuje zpracování celé časové řady v jedné operaci. Z vektorových překryvných operací byly využity Pairwise Clip (prostorový ořez vrstev na příslušné bufferové zóny), Erase (odstranění polygonů bez nektarodárného potenciálu z vrstev krajinného pokryvu) a Dissolve (atributové sjednocení sousedících polygonů stejného typu krajinného pokryvu).

Zpracování vícerozměrných rastrových dat. Pro práci s meteorologickými rastrovými daty bylo nezbytné převést sadu samostatných denních rastrových souborů do vícerozměrného formátu umožňujícího efektivní zpracování časových řad v prostředí ArcGIS Pro. Jako výstupní formát byl zvolen nativní rastrový formát Esri (.crf – Cloud Raster Format), který nativně podporuje vícerozměrné časové řady a umožňuje jejich hromadné zpracování nástrojem Zonal Statistics as Table.

Whittakerovo vyhlazení časových řad. Whittakerovo vyhlazení (*Whittaker-Eilers smoother*) bylo použito pro interpolaci nepravidelných časových řad vegetačních indexů NDVI a NDYI do podoby spojitých denních hodnot. Satelitní snímky Sentinel-2 často obsahují oblačnost a proto není obzvlášť na území České republiky vždy vhodný každý snímek pro potřebnou práci. Časové řady vegetačních indexů tedy obsahují mezery jak v čase, tak v prostoru.

Whittakerovo vyhlazení řeší tento problém minimalizací účelové funkce:

$$Q = \sum_i w_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^d z_i)^2$$

kde y_i jsou původní pozorované hodnoty, z_i jsou vyhlazené hodnoty, w_i jsou váhy pozorování (1 pro platný pixel, 0 pro chybějící), λ je parametr hladkosti a Δ^d je operátor difference řádu d . První člen penalizuje odchylku od pozorování, druhý člen penalizuje změny v d -té derivaci vyhlazené křivky. Řešení soustavy lineárních rovnic poskytuje optimální kompromis mezi věrností pozorováním a hladkostí výsledné křivky (Eilers, 2003). Byly použity parametry $\lambda = 100$ a $d = 2$.

Posouzení multikolinearity. Korelační analýza byla využita k posouzení vzájemných závislostí mezi meteorologickými proměnnými za účelem identifikace multikolinearity ve vstupním datovém souboru. Na základě výsledků korelační analýzy byla z prediktivního modelu vyřazena proměnná venkovní teplota ze senzoru VeluBee, která vykazovala vysokou vzájemnou korelaci s teplotními proměnnými z dat Agropočasí.cz a zároveň nesla riziko systematického zkreslení měření vlivem přímého slunečního záření na senzor.

Odvozené proměnné. Pro charakterizaci fenologického a meteorologického kontextu snůšky byla vypočítána sada odvozených proměnných. *Suma efektivních teplot nad prahem 5 °C (SET5)* slouží jako fenologický indikátor postupu vegetační sezóny. Denní přírůstek je definován jako kladný rozdíl průměrné denní teploty a biologického prahu, kumulativní suma pak jako postupný součet těchto přírůstků od 1. 1. 2024:

$$SET5_t = \sum_{i=1}^t \max(TAV G_i - 5, 0)$$

Výparný deficit vzduchu (VPD – *Vapour Pressure Deficit*) vyjadřuje rozdíl mezi tlakem nasycené vodní páry při dané teplotě a skutečným tlakem vodní páry. Vysoké VPD indikuje suchý vzduch způsobující zahušťování nektaru, nízké VPD naopak jeho ředění, přičemž vliv VPD na koncentraci cukru v nektaru byl prokázán Chabertem et al. (2020). VPD byl vypočítán z průměrné denní teploty (TAVG) a průměrné denní relativní vlhkosti vzduchu (HAVG) podle Magnusovy rovnice (Allen et al., 1998):

$$VPD = 0,6108 \times e^{\frac{17,27 \times TAVG}{TAVG + 237,3}} \times \left(1 - \frac{HAVG}{100}\right)$$

kde výsledek je v kPa a konstanta 0,6108 odpovídá tlaku nasycené vodní páry při 0 °C. Klouzávé průměry vybraných meteorologických proměnných za okna délky 3 a 7 dní zachycují přetrvávající vliv počasí na snůšku. Byly vypočítány jako průměr aktuálního a předchozích $n - 1$ dní: TAVG_roll3, TAVG_roll7, SSV_roll3, SSV_roll7, SRA_roll3, SRA_roll7, VPD_roll3 a VPD_roll7. Zpožděné proměnné o jeden den zachycují podmínky předchozího dne: SRA_lag1 a FAVG_lag1.

Prediktivní modelování – XGBoost. Pro prediktivní modelování byl zvolen algoritmus Extreme Gradient Boosting (Chen a Guestrin, 2016). Jedná se o ansámblovou metodu strojového učení, která iterativně trénuje sérii rozhodovacích stromů, přičemž každý nový strom se snaží korigovat chyby předchozích. Výsledný model je váženým součtem predikcí všech stromů. Cílovou proměnnou byl denní přírůstek hmotnosti úlu (snůška). Výkonnost modelu byla hodnocena na základě metrik střední kvadratické chyby (RMSE), střední absolutní chyby (MAE) a koeficientu determinace (R^2) v rámci desetinásobné křížové validace (*10-fold cross validation*).

Interpretace prediktivního modelu. Interpretace modelu byla provedena třemi komplementárními metodami. *Analýza důležitosti vstupních proměnných (feature importance)* kvantifikuje příspěvek každé proměnné k celkové predikční schopnosti modelu na základě průměrného snížení chyby při větvení stromů. Metoda *SHAP (SHapley Additive exPlanations)* poskytuje lokální i globální interpretaci tím, že každé proměnné přiřazuje příspěvek k predikci pro každý jednotlivý záznam, čímž umožňuje posoudit směr a velikost efektu proměnné v závislosti na jejích hodnotách. Křivky *ICE (Individual Conditional Expectation)* zobrazují, jak se mění predikce modelu při změně hodnoty jedné proměnné při zachování ostatních. Agregovanou formou ICE křivek je *PDP (Partial Dependence Plot)*, který umožňuje identifikaci prahových hodnot proměnných ovlivňujících snůšku.

Vizualizace časových řad. Pro vizuální exploraci dat byly využity metody vizualizace časových řad v podobě liniových grafů, které umožnily identifikaci období snůšky, začátku plodování a zásahů včelaře do monitorovaných úlů.

3.2 Použitá data

Práce kombinuje více datových zdrojů, jejichž integrace umožňuje propojení senzorických záznamů o stavu včelstev s lokálními environmentálními podmínkami. Stěžejní jsou senzorická data úlových vah systému VeluBee poskytující informace o hmotnostním a teplotním stavu úlů. Pro meteorologický kontext byly použity rastrové vrstvy z projektu Agropočasí.cz. Fenologický kontext krajiny byl zachycen prostřednictvím satelitních snímků družice Sentinel-2. Strukturu krajiny v okolí stanovišť popisují data ZABAGED a LPIS.

Senzorická data z úlových vah

Senzorická data z úlových vah poskytl Mgr. Jiří Danihlík, Ph.D., vlastník monitorovaných včelstev a odborný konzultant práce. Data byla získána prostřednictvím monitorovacího systému VeluBee, který byl instalován na dvou stanovištích v Olomouckém kraji – v obcích Černotín a v Hrádky. Na každém stanovišti byly monitorovány dva úly, celkem čtyři úly. Systém zaznamenával hmotnost úlu, teplotu uvnitř úlu, venkovní teplotu, relativní vlhkost vzduchu a atmosférický tlak v časovém rozlišení tří hodin. Venkovní teplota, relativní vlhkost a atmosférický tlak byly zaznamenávány vždy pro celé stanoviště, neboť úly jsou na každém stanovišti umístěny v bezprostřední blízkosti. Veškeré skripty jsou součástí elektronických volných příloh, jako Příloha 1.

Celkové datové pokrytí zahrnuje období od 25. 8. 2023 do 14. 3. 2026. Pro analytické účely bylo využito pouze období 1. 1. 2024 – 31. 10. 2024, které bylo vyhodnoceno jako datově kompletní a bez výpadků senzorů. Data mimo toto období vykazovala výpadky nebo chybná měření způsobená poruchami systému. Tato filtrace předchází chybné interpretaci průběhu stavu včelstev, jako je například falešná identifikace snůšky, výběru medu nebo kolapsu kolonie.

Meteorologická data

Meteorologická data byla poskytnuta projektem Agropočasí.cz ve formě denních rastrových vrstev ve formátu GeoTIFF s prostorovým rozlišením 500 × 500 m na pixel. Časový rámec poskytnutých dat zahrnuje období od 1. 3. 2022 do 7. 2. 2026. Rastrové vrstvy jsou produktem interpolace hodnot naměřených stanicemi sítě ČHMÚ podle metodiky Možný et al. (2023). Tato metodika využívá geostatistické metody zohledňující prostorovou závislost mezi stanicemi a zahrnuje nadmořskou výšku jako vysvětlující proměnnou prostřednictvím digitálního modelu reliéfu DMR5G, čímž zpřesňuje výsledné hodnoty zejména v členitém terénu. Pro analýzu byly využity tyto proměnné: průměrná denní rychlost větru (FAVG, m/s), průměrná denní relativní vlhkost vzduchu (HAVG, %), denní úhrn srážek (SRA, mm), denní úhrn trvání slunečního svitu (SSV, hod.), průměrná denní teplota vzduchu (TAVG, °C), maximální denní teplota vzduchu (TMA, °C) a minimální denní teplota vzduchu (TMI, °C).

Prostorová data o krajinné struktuře

Pro analýzu dostupnosti nektarových a pylových zdrojů v okolí stanovišť byly využity dva prostorové datové zdroje.

LPIS – polygonová vrstva geoprostorových žádostí 2024 (díly půdních bloků) byla stažena ze storymapy: Veřejné exporty dat LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2026) ve formátu Shapefile v souřadnicovém systému S-JTSK (EPSG: 5514). Vrstva obsahovala atribut deklarované pěstované plodiny pro rok 2024. Deklarace plodin vychází ze zákresu provedeného samotnými žadateli o zemědělské dotace nad ortofotem v měřítku 1 : 600 až 1 : 800 (Ministerstvo zemědělství, 2025). Na základě odborné literatury byl každé plodině přiřazen binární atribut nektarodárného potenciálu; výčet hodnocených plodin a jejich zařazení je uveden v kap. 4.[č.].

ZABAGED (Základní báze geografických dat ČR, ČÚZK) – vektorová topografická databáze sloužila k identifikaci ploch s potenciálním nektarodárným a pylovým významem. Vybrány byly tyto kategorie plošných prvků: les a křoví, les bez určení, les jehličnatý, les listnatý, les smíšený, orná půda, sad a zahrada, trvalý travní porost a udržovaná zeleň. ZABAGED dále sloužila pro celkové zhodnocení struktury krajiny v okolí studovaných stanovišť.

Kombinací obou datových zdrojů byly vytvořeny vrstvy ploch s potenciálním nektarodárným a pylovým přínosem pro včelstva, které sloužily jako zónové vrstvy pro

výpočet zonálních statistik vegetačních indexů. Postup jejich přípravy je podrobně popsán v kap. 4..

Data dálkového průzkumu Země

Vegetační indexy NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a NDYI (Normalized Difference Yellowness Index) byly získány ze sbírky COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED prostřednictvím platformy Google Earth Engine (GEE). Pro zpracování dat bylo využito rozhraní GEE Python API spolu s knihovnou geemap. Analýza pokrývala období 1. 3. 2024 – 31. 10. 2024 a byla prostorově omezena na buffery o poloměru 2 km kolem každé lokality. Před výpočtem indexů bylo provedeno maskování neplatných pixelů s využitím vrstvy klasifikace scény (SCL – Scene Classification Layer). Jako neplatné byly označeny pixely tříd: oblačné stíny (3), střední pravděpodobnost výskytu mraků (8), vysoká pravděpodobnost výskytu mraků (9) a cirrus (10). Snímky s podílem neplatných pixelů vyšším než 30 % byly z analýzy vyloučeny. Indexy byly vypočítány jako $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$ a $NDYI = (B3 - B2) / (B3 + B2)$. Výsledné denní mozaiky byly exportovány do Google Drive ve formátu GeoTIFF s rozlišením 10 m/pixel.

Index NDYI byl zahrnut jako potenciální indikátor fenologie kvetení v krajině. Jeho výpovědní hodnota se ukázala jako omezená – index reagoval citlivě primárně na kvetení řepky olejné, zatímco pro ostatní období sezóny nevykazoval dostatečnou rozlišovací schopnost. Z tohoto důvodu nebyl NDYI v prediktivních modelech využit.

3.3 Použité programy

ArcGIS Pro verze 3.6.2 (Esri) byl využit pro veškeré prostorové analýzy a zpracování rastrových a vektorových dat – konkrétně pro tvorbu bufferových zón, překryvné vektorové operace (Pairwise Clip, Erase, Dissolve), ruční sloučení vícerozměrných rastrových datasetů do souboru meteo_5514.crf a výpočet zonálních statistik.

Python verze 3.14.0 byl využit pro automatizaci zpracování dat prostřednictvím vlastních skriptů. Konkrétně byly použity tyto knihovny: ArcPy (součást ArcGIS Pro 3.6.2) pro skriptované zpracování meteorologických rastrů v prostředí ArcGIS Pro; rasterio verze 1.5.0 a xarray verze 2025.1.1 pro sestavení výsledných NetCDF souborů z denních rastrů vegetačních indexů; scipy verze 1.17.1 pro Whittakerovo vyhlazení časových řad vegetačních indexů; geemap verze 0.37.2 a earthengine-api verze 1.7.18 pro přístup ke cloudové platformě Google Earth Engine, stažení satelitních snímků Sentinel-2 a výpočet vegetačních indexů NDVI a NDYI. Veškeré skripty jsou součástí elektronických volných příloh, jako Příloha 2.

Google Earth Engine (GEE) je cloudová platforma společnosti Google pro zpracování satelitních dat. Byla využita pro přístup ke sbírce COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, maskování neplatných pixelů a export denních mozaik vegetačních indexů.

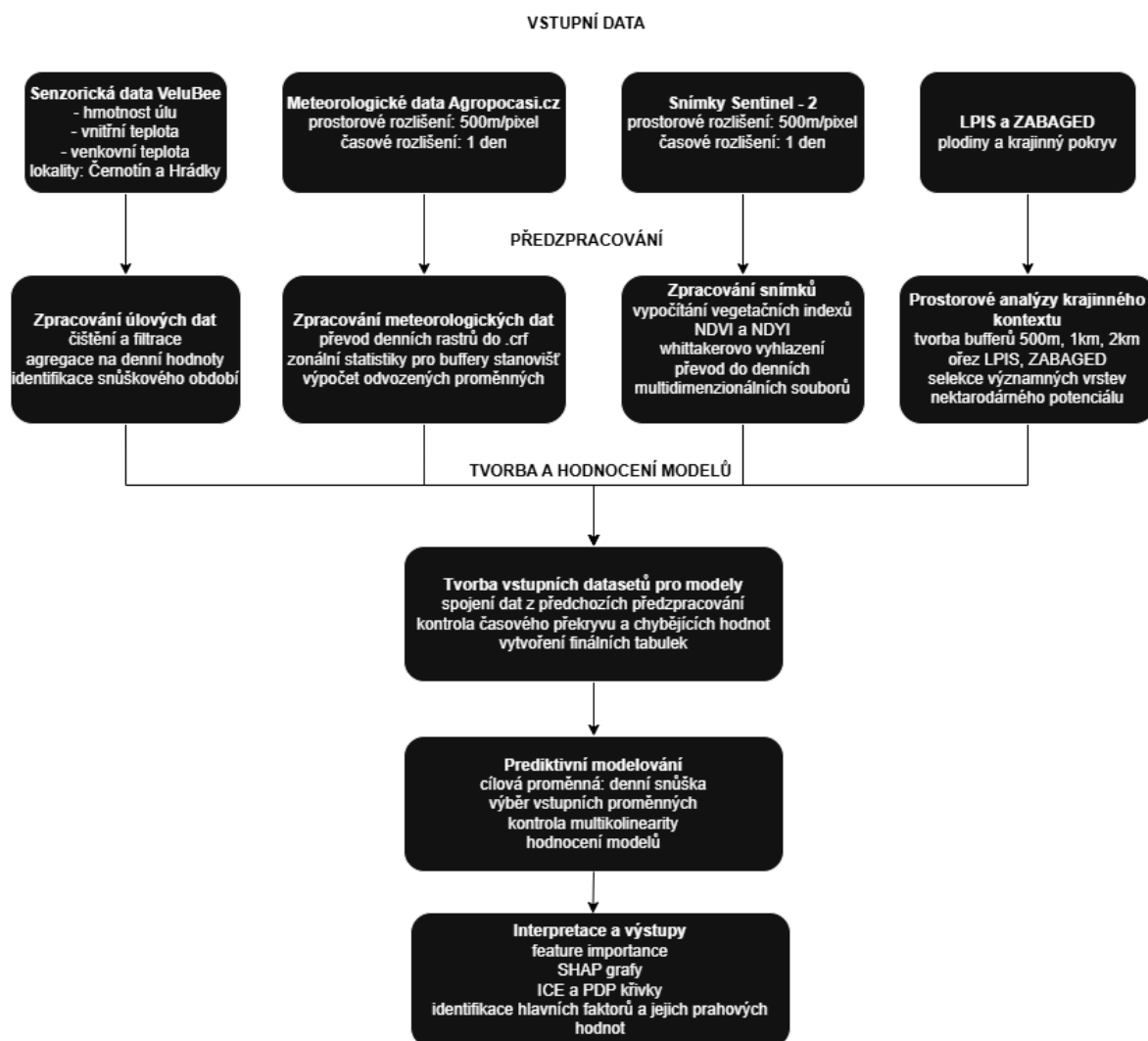
Orange verze 3.39.0 (Biolab, Univerzita v Lublani) byl využit pro předzpracování senzorických dat, agregaci časových řad, pivotování výstupních tabulek zonálních statistik, slučování datasetů, přípravu vstupního datasetu pro prediktivní model a trénování a vyhodnocení modelu XGBoost včetně jeho interpretace. Veškerá Orange workflow jsou součástí elektronických volných příloh, jako Příloha 3. Výsledky hodnocení jednotlivých modelů včetně explain model, SHAP a nejvýznamnějších prediktorů pomocí PDP/ICE jsou součástí elektronických volných příloh, jako Příloha 4.

Microsoft Excel verze 2603 (build 16.0.19822.20086), 64bitová verze, součást Microsoft 365 MSO, byl využit pro výpočet odvozených proměnných – sumy efektivních teplot (SET5),

výparného deficitu vzduchu (VPD), klouzavých průměrů a zpožděných hodnot vybraných meteorologických proměnných.

3.4 Postup zpracování

Celkový postup zpracování dat je schematicky znázorněn na Obr. 2. Diagram zachycuje návaznost jednotlivých kroků od předzpracování sensorických dat a prostorových analýz přes integraci datových zdrojů až po přípravu vstupního datasetu a trénování prediktivního modelu. Podrobný popis jednotlivých kroků je uveden v kapitole 4.



Obr. 2 Schéma zpracování

3.5 Použití AI

V souladu s doporučeními Univerzity Palackého v Olomouci v oblasti využití nástrojů umělé inteligence (ai.upol.cz/doporučení) byl při zpracování diplomové práce využit jazykový model Claude Sonnet 4.6 (Anthropic). Nástroj byl použit pro stylistickou úpravu a formální zpřesnění odborného textu a pro spolupráci při tvorbě a optimalizaci vlastních Python skriptů využitých při zpracování dat.

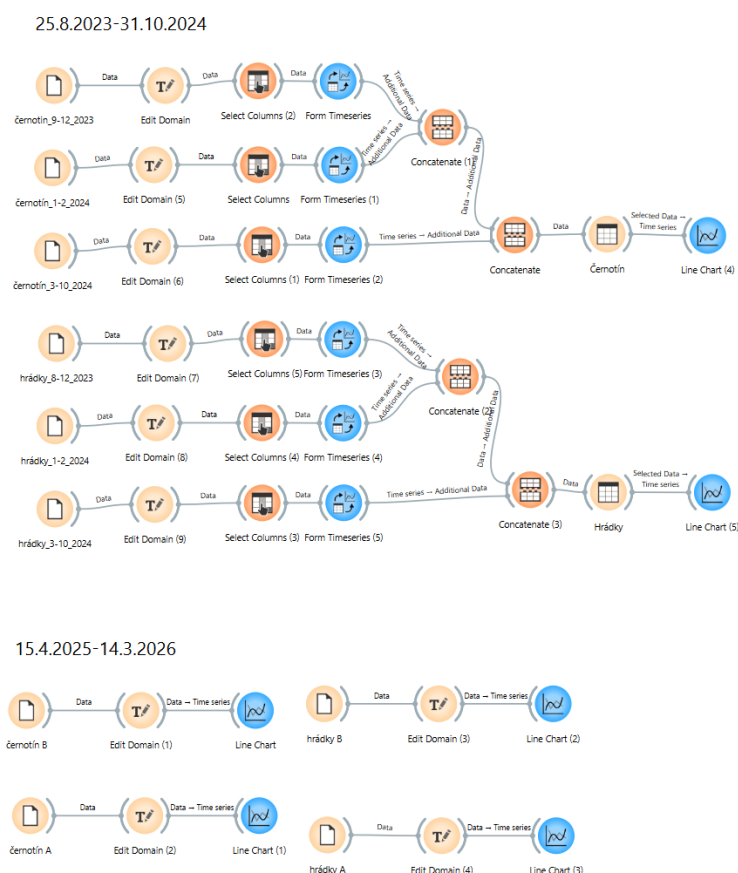
4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Příprava a předzpracování senzorických dat

Senzorická data z úlových vah byla dodána ve formátech .xlsx a .csv, přičemž soubory ve formátu .csv byly nejprve převedeny do formátu .xlsx. Před dalším zpracováním bylo nutné provést několik úprav vstupních souborů. Datum a čas záznamu byly v původních souborech uloženy jako samostatné sloupce, které byly sloučeny do jednoho sloupce ve formátu dd.mm.rrrr h:mm. Dále bylo nutné odstranit oddělovač tisíců v hodnotách atmosférického tlaku – původní formát hodnot (např. 1,015.3 hPa) nebyl programem Orange správně interpretován jako číslo.

Upravené vstupní soubory byly načteny do prostředí Orange, kde byly pro každou lokalitu zvlášť sestaveny spojitě časové řady pokrývající celé dostupné období (25. 8. 2023 – 31. 10. 2024). Pro každý vstupní soubor byl pomocí widgetu Edit Domain nastaven správný datový typ sloupců, widgetem Select Columns byly vybrány relevantní proměnné a widgetem Form Timeseries byl soubor převeden do formátu časové řady. Tři dílčí časové řady pro každou lokalitu byly spojeny do jedné pomocí widgetu Concatenate. Výsledkem byly dvě souhrnné časové řady – jedna pro lokalitu Černotín (úly Čer1 a Čer3) a jedna pro lokalitu Hrádky (úly H1 a H2). Postup sestavení časových řad je znázorněn na Obr. 3.

Data z období od 15. 4. 2025 do 14. 3. 2026 byla zpracována odděleně pouze pro vizuální kontrolu průběhu dat, neboť toto období obsahovalo chybná měření způsobená poruchou senzorů a do analytické části práce zahrnuta nebyla.



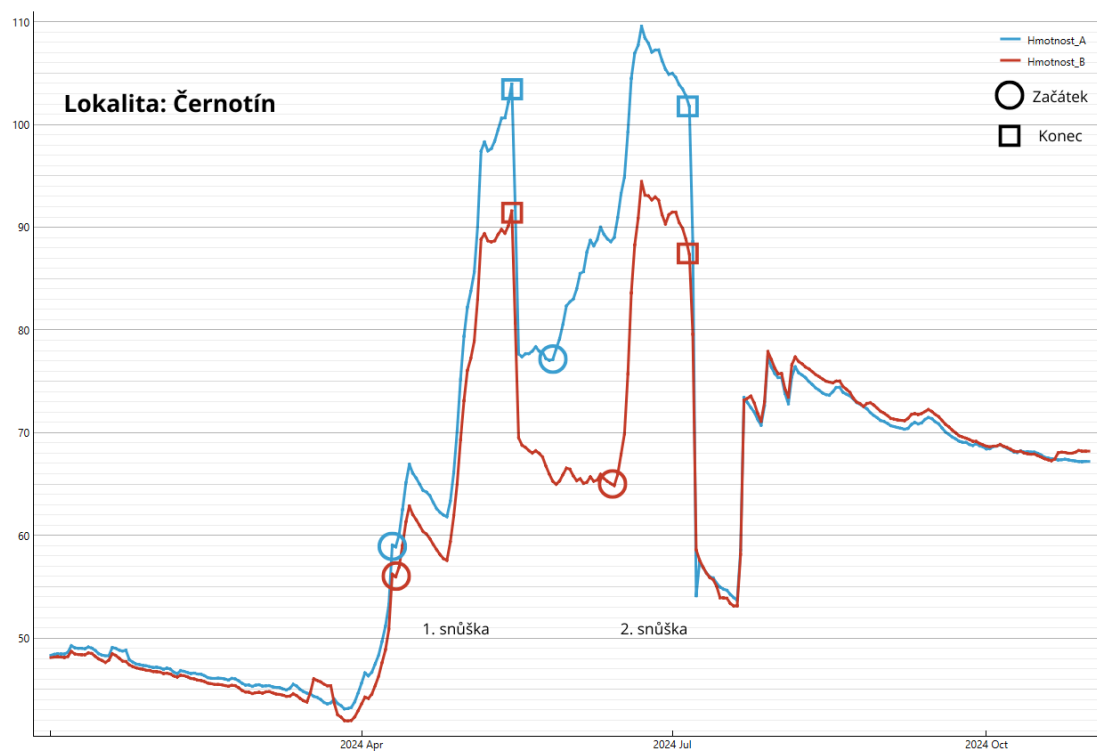
Agregace tříhodinových záznamů na denní úroveň a výpočet proměnné snůška byly provedeny pomocí Python skriptu **00_agragace.py** spuštěného v prostředí Orange prostřednictvím widgetu Python Script. Skript nejprve převedl sloupec data na formát datetime a všechny měřené proměnné na číselný datový typ. Záznamy byly seřazeny chronologicky a agregovány po dnech výpočtem denního průměru pro všechny měřené proměnné – hmotnost obou úlů, úlové teploty, venkovní teplota, relativní vlhkost, atmosférický tlak, síla signálu a napětí baterie.

Proměnná **snůška** byla vypočítána samostatně pro každý úl jako rozdíl poslední naměřené hodnoty hmotnosti daného dne a poslední naměřené hodnoty hmotnosti dne předchozího. Použití posledního denního záznamu namísto denního průměru bylo záměrné – průměr hmotnosti by denní přírůstek zkresloval, protože hmotnost úlu se v průběhu dne mění vlivem letové aktivity včel. Výstupem skriptu byl denně agregovaný dataset se čtyřmi sloupci snůšky (snuska_Cer1, snuska_Cer3, snuska_H1, snuska_H2) připravený pro navazující analýzu.

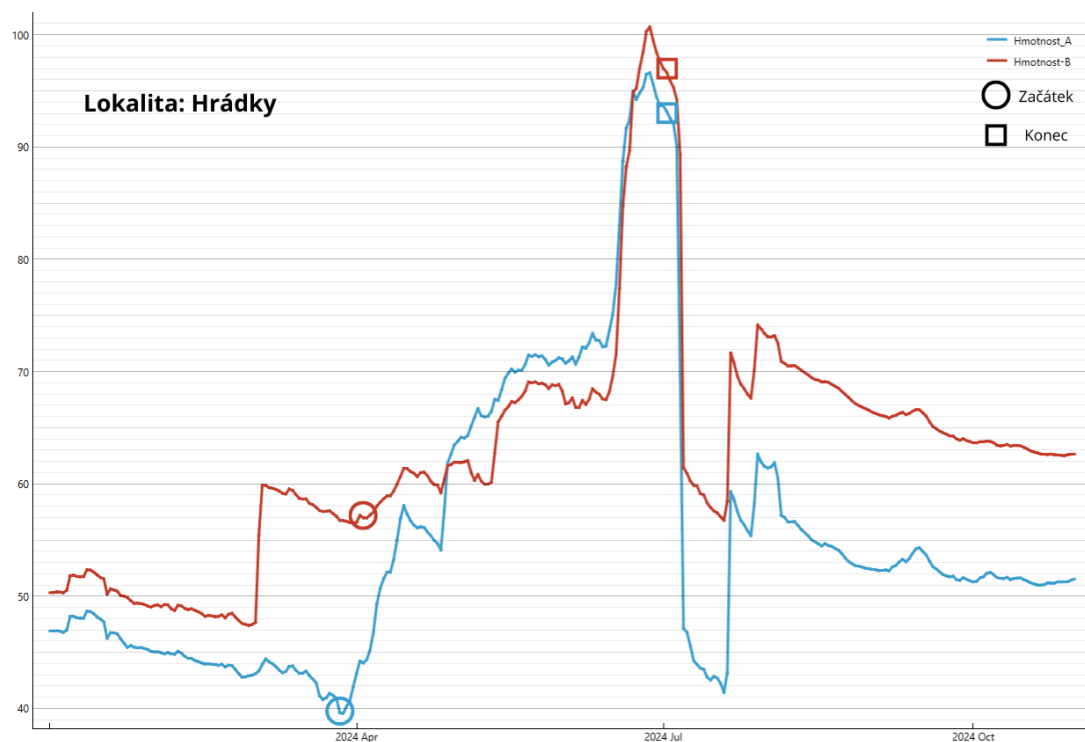
4.2 Vizuální inspekce dat a identifikace snůšek

Po agregaci na denní záznamy byla provedena vizuální inspekce časových řad v prostředí Orange pomocí widgetu Line Chart. Inspekce probíhala samostatně pro každý úl a zaměřovala se na tři klíčové informace: identifikaci období snůšky, identifikaci zásahů včelaře a identifikace začátku plodování.

Období snůšky byla definována vizuálně ve spolupráci s Mgr. Jiřím Danihlíkem, Ph.D. jako úseky časové řady hmotnosti, v nichž docházelo k soustavnému nárůstu hmotnosti úlu odpovídajícímu aktivnímu sběru nektaru. Takto byla vymezeny následující období: pro Černotín úl A dvě období snůšky (2. 4. – 15. 5. a 27. 5. – 6. 7.), pro Černotín úl B rovněž dvě období (30. 3. – 15. 5. a 14. 6. – 2. 7.), pro Hrádky úl A jedno období (28. 3. – 30. 6.) a pro Hrádky úl B jedno období (3. 4. – 4. 7.). Na lokalitě Černotín byla snůška rozdělena do dvou období z důvodu výběru mezi včelařem mezi nimi [doplnit přibližné datum výběru medu], zatímco na lokalitě Hrádky probíhala snůška jako jeden nepřerušovaný celek.

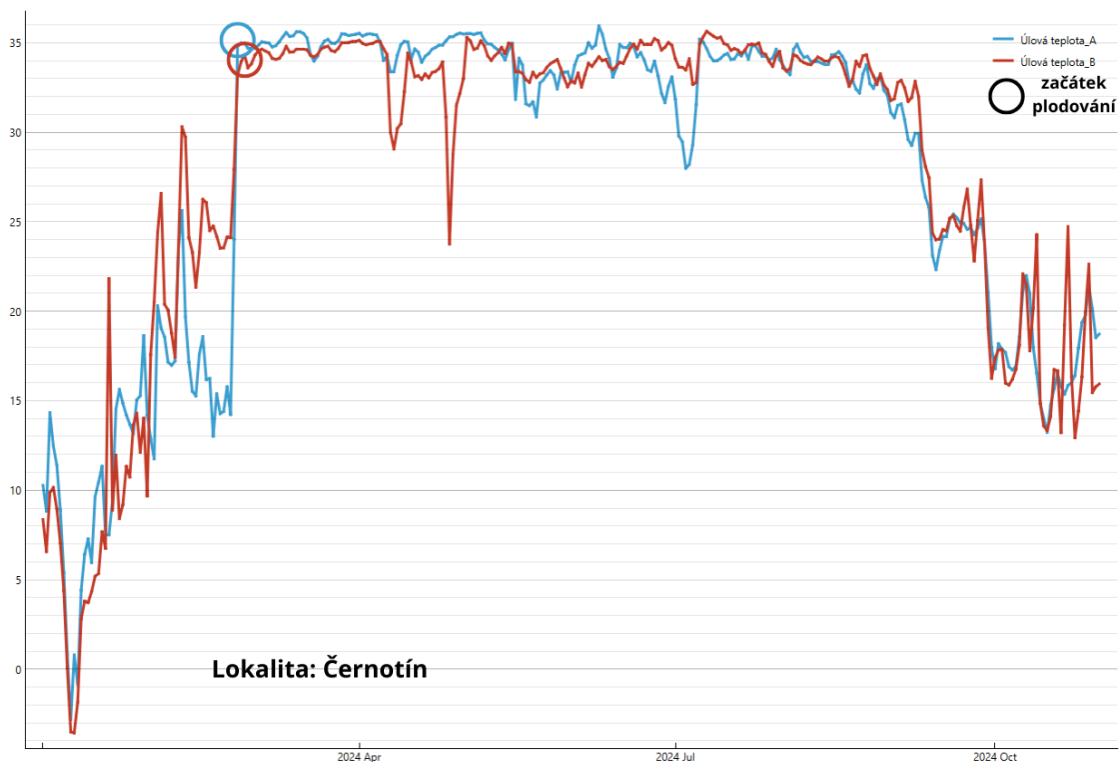


Obr. 4 Lokalita Černotín, průběh hmotnosti a vyznačení snůšek úlů A a B

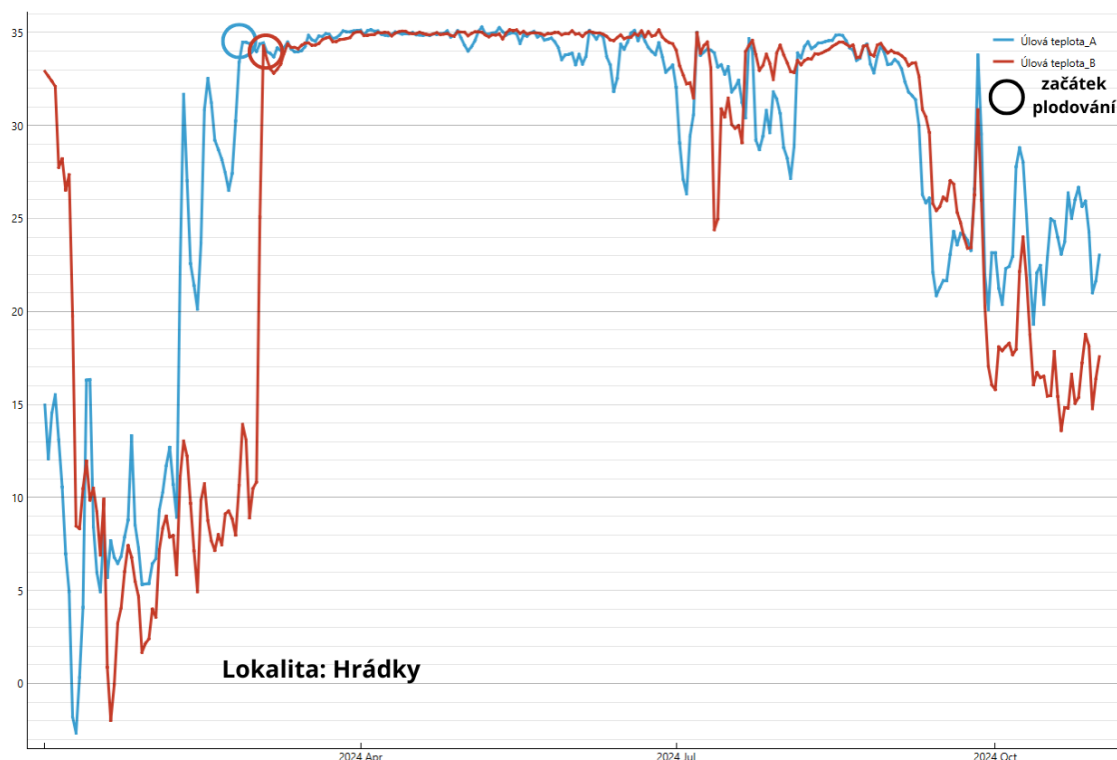


Obr. 5 Lokalita Hrádky, průběh hmotnosti a vyznačení snůšek úlů A a B

Začátek plodování byl identifikován na základě teplotní křivky úlové teploty – přechod na soustavně udržovanou teplotu v rozmezí 33–35 °C je charakteristickým projevem aktivního chovu plodu, při němž včely termoregulují prostor plodového hnízda. Na lokalitě Černotín včely začaly plodovat v úlu A od 24. února, v úlu B od 27. února dle Obr. 6 a na lokalitě Hrádky v úlu A 27. února, úl B poté od 4. března dle Obr. 7.



Obr. 6 Lokalita Černotín, začátek plodování úlů A a B



Obr. 7 Lokalita Hrádky, začátek plodování úlů A a B

V časových řadách hmotnosti byly dále identifikovány náhlé velké poklesy odpovídající zásahům včelaře, které přímo navazují na definovaný konec snůšek. Tyto zásahy nebyly z dat odstraněny jednotlivě, ale byly eliminovány nepřímo – analytická data byla pomocí widgetu Time Slice omezena výhradně na výše vymezená období snůšky, čímž byly zásahy mimo tato období automaticky vyloučeny.

Po definici snůškových období byla data rozdělena na úrovni jednotlivých úlů. Pomocí widgetu Select Columns byly pro každý úl zvlášť ponechány pouze relevantní proměnné – datum, hmotnost daného úlu, úlová teplota daného úlu, venkovní teplota, relativní vlhkost, atmosférický tlak a snůška – zatímco proměnné druhého úlu a technické sloupce jako signál a napětí baterie byly vyřazeny. Výsledkem byly čtyři samostatné datasety, každý odpovídající jednomu úlu v jeho analytickém období.

4.3 Zpracování meteorologických rastrů

Meteorologická data byla poskytnuta projektem Agropočasi.cz ve formě denních rastrů souborů ve formátu GeoTIFF s prostorovým rozlišením 500×500 m (podrobná charakteristika datového zdroje viz kap. 3). Pro analytické účely bylo nutné převést samostatné denní rastrové soubory každé meteorologické proměnné do vícerozměrného formátu umožňujícího efektivní zpracování časové řady v prostředí ArcGIS Pro. Tento převod byl realizován pomocí vlastního skriptu 01_meteo.py v jazyce Python využívajícího knihovnu ArcPy.

Skript zpracovával každou meteorologickou proměnnou samostatně v následujících krocích. Pro každou proměnnou byla vytvořena souborová geodatabáze (File Geodatabase) a v ní Mosaic Dataset v souřadnicovém systému WGS 84 / UTM Zone 33N (EPSG: 32633). Do Mosaic Datasetu byly přidány všechny denní GeoTIFF rastry dané proměnné a bylo přidáno atributové pole Date, jehož hodnoty byly automaticky odvozeny z názvů souborů. Nástrojem Build Multidimensional Info byl k datasetu přidán vícerozměrný popis zahrnující název proměnné, její jednotku a časovou dimenzi. Výsledný dataset byl uložen ve formátu .crf (Cloud Raster Format). Skript byl spuštěn samostatně pro každou ze sedmi použitých meteorologických proměnných (FAVG, HAVG, SRA, SSV, TAVG, TMA, TMI).

Sedm takto vzniklých .crf souborů bylo následně v prostředí ArcGIS Pro sloučeno do jednoho vícerozměrného rastru s názvem meteo_5514.crf nástrojem Merge Multidimensional Rasters (Multidimensional Tools). Výsledný dataset obsahuje všechny meteorologické proměnné v jediném vícerozměrném souboru sdílejícím společnou prostorovou mřížku a časovou dimenzi. Zároveň byl v tomto kroku souřadnicový systém převeden z WGS 84 / UTM Zone 33N (EPSG: 32633) do systému S-JTSK / Křovák East North (EPSG: 5514), čímž bylo dosaženo souladu se zbývajících prostorovými datovými vrstvami využívanými v analýze (ZABAGED, LPIS, buffery stanovišť).

Zonální statistiky meteorologických proměnných byly následně vypočítány z rastru meteo_5514.crf nástrojem Zonal Statistics as Table v jeho variantě pro vícerozměrné datasety, která umožňuje zpracování celé časové řady v jedné operaci. Jako zónová vrstva sloužila vrstva vzniklá nástrojem Multiple Ring Buffer obsahující bufferové zóny o poloměrech 500 m, 1 km a 2 km pro obě stanoviště, přičemž jako identifikátor zóny sloužil atribut lokality. Při každém spuštění nástroje byl aktivován výběr příslušné velikosti bufferu. Nástroj byl spuštěn třikrát – samostatně pro každou velikost bufferu.

Výsledkem byly tři výstupní tabulky, každá obsahující průměrné denní hodnoty všech sedmi meteorologických proměnných pro obě lokality. Tabulky byly exportovány do formátu .xlsx a pojmenovány podle velikosti bufferu (meteo_500m.xlsx, meteo_1km.xlsx, meteo_2km.xlsx). Uspořádání atributů v tabulce odpovídalo dlouhému formátu, kdy v jednom sloupci je název proměnné a v řádcích postupně časová řada hodnot první proměnné a poté další proměnné.

4.4 Zpracování satelitních snímků Sentinel-2 a interpolace vegetačních indexů

Stažení snímků a výpočet vegetačních indexů v Google Earth Engine

Satelitní snímky Sentinel-2 byly zpracovány prostřednictvím cloudové platformy Google Earth Engine (GEE) pomocí vlastního skriptu v jazyce Python využívajícího knihovnu geemap. Jako zdroj dat byla využita sbírka **COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED**. Analýza pokrývala období 1. 3. 2024 – 31. 10. 2024 a byla prostorově omezena na buffery o poloměru 2 km kolem každé lokality.

Před výpočtem indexů bylo provedeno maskování neplatných pixelů s využitím vrstvy klasifikace scény (**SCL – Scene Classification Layer**), která je součástí produktu Sentinel-2 L2A. Jako neplatné byly označeny pixely následujících tříd: oblačné stíny (třída 3), střední pravděpodobnost výskytu mraků (třída 8), vysoká pravděpodobnost výskytu mraků (třída 9) a cirrus (třída 10). Pixely mimo pokrytí dlaždic Sentinel-2 byly rovněž považovány za neplatné. Při výpočtu podílu neplatných pixelů v rámci bufferu bylo použito volání `unmask(0)`, které zajistilo, že pixely mimo prostorové pokrytí dlaždic byly klasifikovány jako neplatné s hodnotou 0, a nikoliv ignorovány. Bez tohoto kroku by mohlo docházet k

systematickému nadhodnocování podílu platných pixelů, neboť metoda `reduceRegion` s reduktorem `mean()` počítá průměr pouze přes existující pixely. Snímky, u nichž podíl neplatných pixelů v rámci bufferu překročil **30 %**, byly z analýzy vyloučeny.

Z přijatých snímků byly vypočítány dva vegetační indexy. **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*) je standardním ukazatelem množství a kondice zelené vegetace. Využívá kontrastu mezi vysokou odrazivostí vegetace v blízkém infračerveném pásmu a nízkou odrazivostí v červeném pásmu:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

kde B8 je pásmo blízkého infračerveného záření (NIR, střední vlnová délka 842 nm) a B4 je červené pásmo (RED, střední vlnová délka 665 nm). Hodnoty NDVI se pohybují v rozmezí -1 až +1, přičemž vyšší kladné hodnoty odpovídají hustší a vitálnější vegetaci.

NDYI (*Normalized Difference Yellowness Index*) byl zahrnut jako potenciální indikátor fenologie kvetení v krajině, zejména pro zachycení kvetení řepky olejné, které se projevuje výrazným nárůstem odrazivosti v zeleném pásmu. Index je definován jako:

$$NDYI = \frac{B3 - B2}{B3 + B2}$$

kde B3 je zelené pásmo (GREEN, střední vlnová délka 560 nm) a B2 je modré pásmo (BLUE, střední vlnová délka 490 nm).

Výsledné snímky byly exportovány jako denní mozaiky do Google Drive ve formátu GeoTIFF s prostorovým rozlišením 10 m/pixel v souřadnicovém systému WGS 84 (EPSG: 4326). Soubory byly organizovány do dvou složek podle indexu (NDVI_Exports_DP3 a NDYI_Exports_DP3) a pojmenovány ve formátu INDEX_Lokalita_X_RRRR-MM-DD.tif.

Reprojekce a ořez snímků

Protože platforma GEE nepodporuje nativní export do souřadnicového systému S-JTSK / Křovák East North (EPSG: 5514), byla reprojekce provedena dodatečně pomocí skriptu `02_proj_5514.py` využívajícího knihovnu `rasterio`. Skript provedl pro každý snímek reprojekci z EPSG: 4326 do EPSG: 5514 s prostorovým rozlišením 10 m/pixel metodou bilineární interpolace a následně ořízl rastr na příslušný buffer 2 km podle lokality. Příslušnost souboru k lokalitě byla určena automaticky parsováním názvu souboru – identifikátory `Lokalita_1` a `Lokalita_2` byly přemapovány na názvy `Hrádky` a `Černotín`. Výstupem byly složky `NDVI_Exports_DP3_5514` a `NDYI_Exports_DP3_5514` obsahující reprojektované a oříznuté snímky v souřadnicovém systému shodném s ostatními prostorovými datovými vrstvami využívanými v analýze.

Whittakerovo vyhlazení a interpolace na denní záznamy

Satelitní snímky jsou dostupné pouze pro dny s dostatečně nízkou oblačností, takže výsledné časové řady indexů obsahovaly záznamy s mezerami způsobenými oblačností. Pro získání spojitě denní časové řady bylo aplikováno **Whittakerovo vyhlazení** (*Whittaker smoother*) pomocí vlastního skriptu `03_whittaker.py` využívajícího knihovnu `scipy`.

Whittakerovo vyhlazení je numerická metoda, která hledá kompromis mezi dvěma kritérii: věrností původním pozorováním a hladkostí výsledné křivky. Matematicky je formulována jako minimalizace účelové funkce:

$$Q = \sum_i w_i (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^d z_i)^2$$

kde y_{ij} jsou původní pozorované hodnoty, z_{ij} jsou vyhlazené hodnoty, w_{ij} jsou váhy pozorování (1 pro platný pixel, 0 pro chybějící), λ je parametr hladkosti a Δ^d je operátor difference řádu d . První člen penalizuje odchylku od pozorování, druhý člen penalizuje změny ve d -té derivaci vyhlazené křivky. Řešení soustavy lineárních rovnic poskytuje optimální kompromis mezi oběma kritérii.

Vyhazení bylo aplikováno samostatně pro každý pixel časové řady. Byly použity tyto parametry: $\lambda = 100$ (střední úroveň hladkosti) a **řád difference $d = 2$** , který penalizuje druhou derivaci vyhlazené křivky a zajišťuje tak plynulý průběh bez nežádoucích oscilací. Pro smysluplné proložení křivky bylo vyžadováno minimálně **3 platná pozorování** na pixel. Vyhazení bylo striktně omezeno na interpolaci v rámci rozsahu dostupných dat – hodnoty před prvním a po posledním platném pozorování daného pixelu byly ponechány jako NaN, aby nedocházelo k nefyzikální extrapolaci mimo sledované období.

Výstupem Whittakerova vyhlazení byly složky NDVI_daily_5514 a NDYI_daily_5514, každá s podsložkami pro lokality Černotín a Hrádky, obsahující denní GeoTIFF rastry za dostupné období. [zde vložit graf vyhlazené časové řady NDVI pro obě lokality]

Sestavení výsledných NetCDF souborů

Z denních rastrů byl pomocí vlastního skriptu v jazyce Python využívajícího knihovny rasterio a xarray sestaven výsledný NetCDF soubor pro každou lokalitu. Výstupem byly celkem **dva NetCDF soubory** – jeden pro lokalitu Černotín a jeden pro lokalitu Hrádky – přičemž každý soubor obsahoval obě proměnné (NDVI i NDYI) na společné prostorové mřížce.

Před sestavením datasetu byl pro každou lokalitu vypočítán společný prostorový rozsah jako sjednocení extentů všech dostupných denních rastrů, zarovnaný na pixelovou mřížku s rozlišením 10 m/pixel. Snímky, jejichž prostorový rozsah se od referenční mřížky odlišoval, byly na ni přesamplovány metodou nejbližšího souseda (*nearest neighbour resampling*). Do výsledného datasetu byly zahrnuty pouze dny společné pro obě proměnné (NDVI i NDYI).

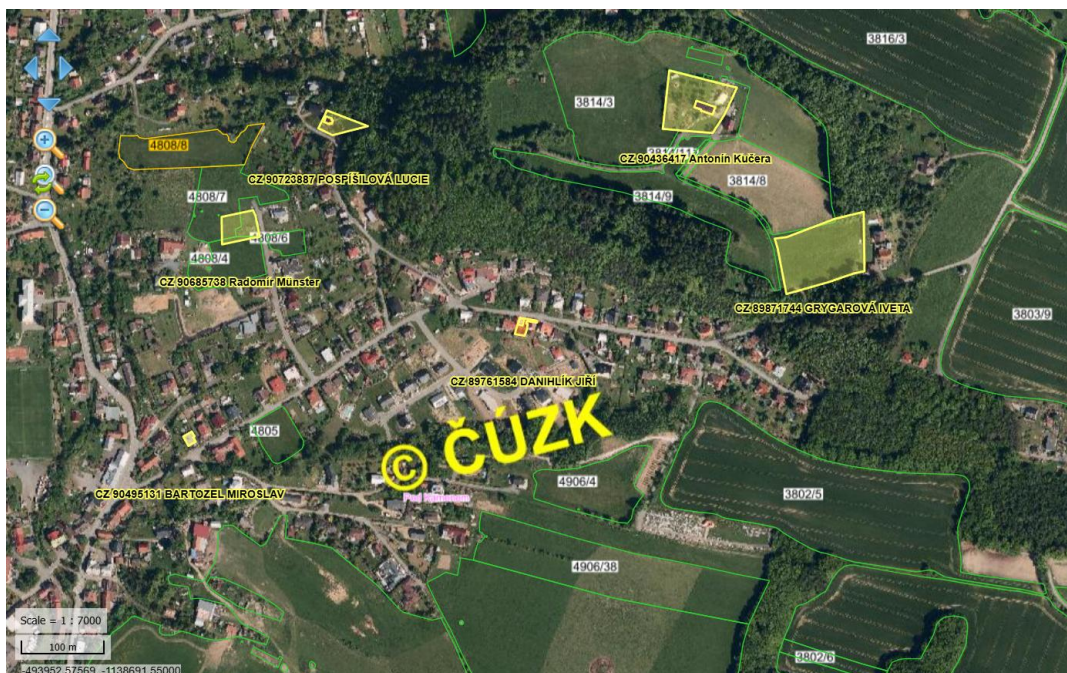
4.5 Prostorové analýzy krajinného kontextu

Tvorba bufferových zón

Základem prostorové analýzy bylo vytvoření bufferových zón kolem obou stanovišť. Souřadnice úlů byly poskytnuty Mgr. Jiřím Danihlíkem, Ph.D. a ověřeny v mapové prohlížečce portálu LPIS, kde je dostupná vrstva registrovaných stanovišť včelstev.



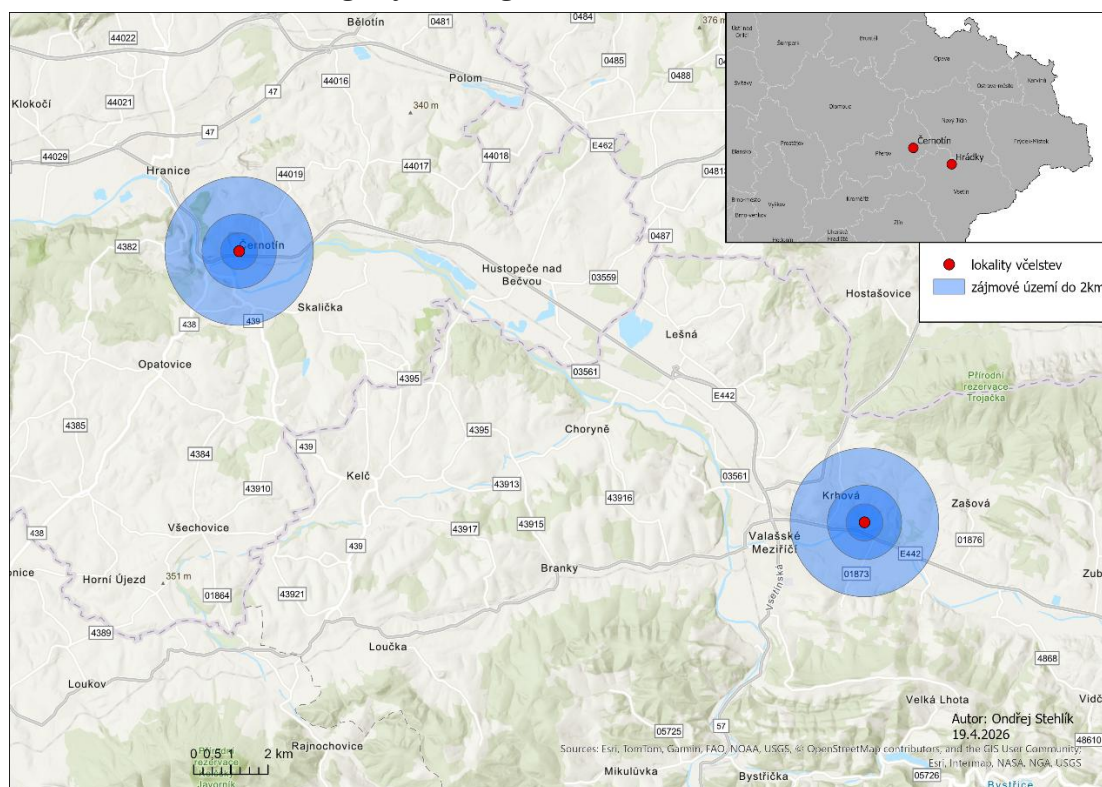
Obr. 8 Stanoviště včelstev Černotín (zdroj: <https://mze.gov.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>)



Obr. 9 Stanoviště včelstev Hrádky (zdroj: <https://mze.gov.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>)

Ze souřadnic byly v prostředí ArcGIS Pro vytvořeny bodové prvky pojmenované podle lokalit a nad nimi byly nástrojem Buffer vygenerovány bufferové zóny o poloměrech 500 m, 1 km a 2 km v souřadnicovém systému S-JTSK / Křovák East North (EPSG: 5514). Všechny tři velikosti bufferů byly uloženy v jedné výsledné vektorové vrstvě. Při navazujících analytických operacích – orezech, zonálních statistikách a výpočtech ploch – byl vždy aktivován výběr příslušné velikosti bufferu, s nímž nástroje následně pracovaly. Tato vrstva

bufferů sloužila jako prostorový rámec pro veškeré navazující analýzy krajinného kontextu a extrakci hodnot meteorologických a vegetačních dat.



Obr. 10 Zájmová území Černošín a Hrádky, bufferové zóny

Jako pracovní radius pro přípravu vrstev potenciálních nektarodárných ploch byl zvolen buffer 2 km, neboť představuje maximální radius, pro který jsou prováděny všechny navazující zonální statistiky a zároveň je to radius efektivního sběru nektaru včel. Zmenšení ořezané vrstvy na menší buffery lze kdykoli provést dodatečně, zatímco data oříznutá na menší plochu již nelze zpětně rozšířit.

Hodnocení nektarodárného potenciálu zemědělských plodin

Pro posouzení nektarodárného potenciálu zemědělských plodin přítomných v okolí stanovišť byla využita data LPIS – vrstva geoprostorových žádostí pro rok 2024 stažená z geoportálu AgriGIS Ministerstva zemědělství ČR (agrigis.gov.cz). Vrstva byla v prostředí ArcGIS Pro oříznutá nástrojem Clip na 2 km buffer každé lokality a u vzniklých polygonů byly operací Calculate Geometry přepočítány rozlohy. Pomocí nástroje Summary Statistics byly zjištěny všechny plodiny vyskytující se v daném bufferu spolu s jejich celkovou rozlohou.

Nektarodárný potenciál jednotlivých plodin byl hodnocen na základě odborné literatury – publikací Včelí pastva (Švamberský, 2014) a Včelařské dřeviny a byliny (Haragsim, 2013). Hodnoceny byly pouze ty plodiny, které se skutečně vyskytovaly na studovaných lokalitách. U plodin s nejednoznačným druhovým složením, jako jsou jetelotravní směsi nebo směsi s leguminózami, byl nektarodárný potenciál určen expertním odhadem na základě deklarovaného druhového složení směsi – směsi s převahou jetelovin nebo s přítomností leguminóz byly hodnoceny jako nektarodárné, zatímco směsi čistě travní jako plochy bez nektarodárného potenciálu. Každé plodině byl přiřazen binární atribut nektarodárného potenciálu: hodnota 1 pro plodiny s nektarovým nebo pylovým přínosem pro včely, hodnota 0 pro plodiny bez výraznějšího významu pro včelí snůšku.

Do kategorie nektarodárných plodin a porostů (potenciál 1) byly zařazeny řepka ozimá (*Brassica napus* var. *napus*), vojtěška setá (*Medicago sativa*), jetel luční (*Trifolium pratense*), jetelotravní směs s převahou jetelovin, jetelotravní směs s převahou travin, luscoobilní směs bez podsevu, trávy s leguminózami, dočasný travní porost, sója (*Glycine max*), svazenka vratičolistá (*Phacelia tanacetifolia*), peluška jarní (hrách rolní) (*Pisum sativum* var. *arvense*), směs pro nektarodárný úhor (ekoplatba) a směs pro krmný biopás.

Do kategorie plodin a porostů bez nektarodárného potenciálu (potenciál 0) byly zařazeny pšenice setá ozimá (*Triticum aestivum*), pšenice setá jarní (*Triticum aestivum*), ječmen jarní (*Hordeum vulgare*), ječmen ozimý víceřadý (*Hordeum vulgare*), kukuřice na siláž (*Zea mays*), brambory konzumní pozdní (*Solanum tuberosum*), kostřava luční (*Festuca pratensis*), jilek mnohokvětý jednoletý (*Lolium multiflorum*), srha laločnatá (*Dactylis glomerata*), oves pluchatý jarní (*Avena sativa*), směs trav čeledi lipnicovité a trávy pro ochranné pásy.

Parcely s plodinami bez nektarodárného potenciálu byly vyexportovány jako samostatná vektorová vrstva sloužící v navazujícím kroku k operaci Erase.

Příprava vrstev ZABAGED

Z topografické databáze ZABAGED (Základní báze geografických dat ČR, ČÚZK) byly vybrány vrstvy plošných prvků krajinného pokryvu s potenciálním nektarodárným a pylovým významem pro včelstva. Konkrétně se jednalo o tyto kategorie: les a křoví, les bez určení, les jehličnatý, les listnatý, les smíšený, orná půda, sad a zahrada, trvalý travní porost a udržovaná zeleň.

ZABAGED obsahuje kromě typologicky rozlišených lesních kategorií také kategorii les bez určení, která nerozlišuje druhové složení porostu. Zahrnutí jednotlivých lesních typů do analýzy bylo záměrné – různé typy lesů poskytují včelám odlišné zdroje. Listnaté lesy jsou bohaté na nektarodárné dřeviny produkující květní nektar a pyl (Haragsim, 2013). Jehličnaté lesy naproti tomu představují důležitý zdroj medovice – sladkých výměšků mšic a červců živících se mizou jehličnanů, které včely sbírají a zpracovávají na lesní med (Karabagias et al., 2020).

Zahrnutím všech lesních kategorií včetně jehličnatých lesů bylo umožněno komplexnější zachycení nektarodárného potenciálu krajiny, neboť zjednodušení na jedinou kategorii „les“ nebo vyloučení jehličnanů by tento zdroj zcela opominulo.

Každá vrstva byla nejprve oříznutá nástrojem Clip na 2 km buffer příslušné lokality. Následně byl ke každé vrstvě přidán atributový sloupec TYP_P obsahující název kategorie krajinného pokryvu upravený pro potřeby analýzy. Všechny takto připravené vrstvy byly sloučeny nástrojem Merge do jedné výsledné polygonové vrstvy.

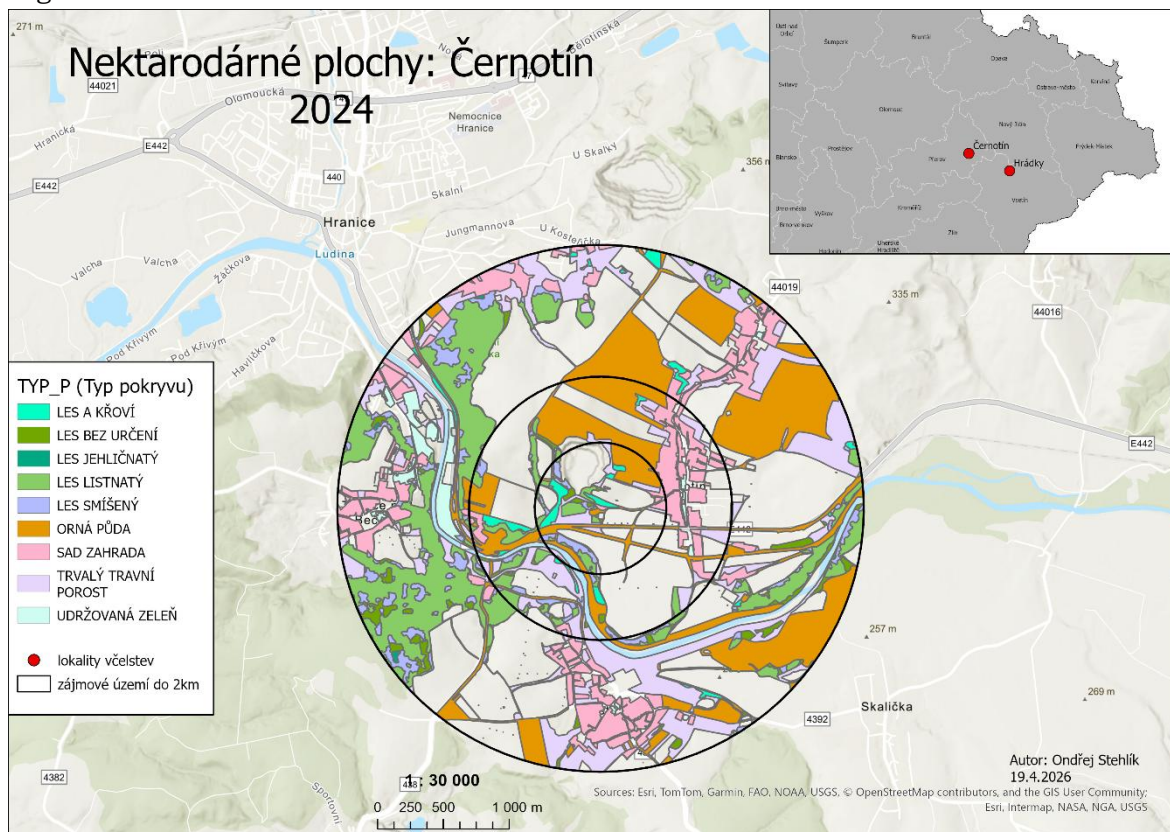
Vytvoření vrstev nektarodárných ploch

Výsledné vrstvy nektarodárných ploch vznikly třístupňovým dávkovým zpracováním v prostředí ArcGIS Pro.

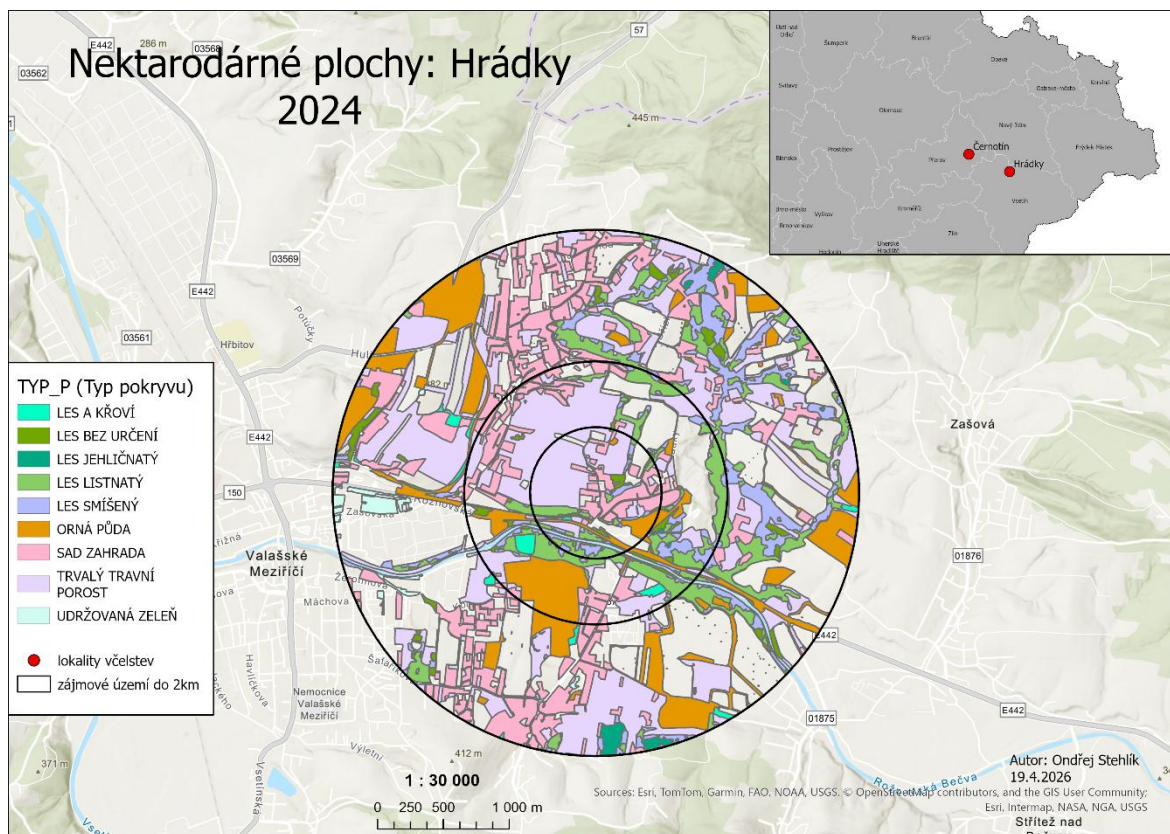
V prvním kroku byly sloučené vrstvy ZABAGED pro každou lokalitu (MERGE_Typy_Černotín a MERGE_Typy_Hrádky), připravené v předchozím kroku oříznutím na 2 km buffer, podrobeny dávkové operaci Pairwise Clip vůči třem úrovním bufferových zón (500 m, 1 km, 2 km). Výsledkem bylo šest vrstev – pro každou kombinaci lokality a velikosti bufferu jedna vrstva.

Ve druhém kroku byla nad těmito šesti vrstvami provedena dávková operace Erase s využitím polygonů zemědělských parcel LPIS označených jako plochy bez nektarodárného potenciálu (atribut nektarodárného potenciálu = 0). Jako vstupní vrstva pro Erase sloužily polygony LPIS oříznuté na 2 km buffer příslušné lokality. Tímto krokem byly z každé vrstvy odstraněny plochy orné půdy bez nektarodárného potenciálu a zachovány pouze ty zemědělské parcely, které byly označeny jako nektarodárné.

Ve třetím kroku byl nad výsledky operace Erase proveden dávkový Dissolve podle atributu TYP_P (typ krajinného pokryvu), čímž byly atributově sjednoceny sousedící polygony stejného typu. Výsledkem bylo šest výsledných vrstev pojmenovaných systematicky podle lokality a velikosti bufferu: Nek_Černotín_500m, Nek_Černotín_1km, Nek_Černotín_2km, Nek_Hrádky_500m, Nek_Hrádky_1km a Nek_Hrádky_2km. Tyto vrstvy zachycují prostorové rozmístění ploch s potenciálním nektarodárným a pylovým přínosem pro včelstva v okolí obou stanovišť a přímo vstupují do navazujícího výpočtu zonálních statistik vegetačních indexů.



Obr. 11 Nektarodárné plochy: Černotín, 2024



Obr. 12 Nektarodárné plochy: Hrádky, 2024

4.6 Zonální statistiky NDVI

Po dokončení přípravy vrstev nektarodárných ploch a sestavení NetCDF souborů s denními časovými řadami NDVI a NDYI (viz kap. 4.[č.]) byly vypočítány zonální statistiky vegetačních indexů v prostředí ArcGIS Pro.

Výpočet byl proveden nástrojem Zonal Statistics as Table v jeho variantě pro vícerozměrné datasety jako dávková operace. Pro každou lokalitu zvlášť vstupoval jako rastrová vrstva NetCDF soubor NDVI příslušné lokality a jako zónová vrstva sloužily vrstvy nektarodárných ploch dané lokality. Atribut TYP_P sloužil jako identifikátor zóny. Nástroj byl spuštěn pro každou kombinaci lokality a velikosti bufferu, celkem tedy šestkrát.

Pro každou kombinaci dne, typu krajinného pokryvu a lokality byly vypočítány dvě statistiky: průměrná hodnota indexu (mean) reprezentující průměrnou fenologickou aktivitu daného typu pokryvu v daný den a suma rozlohy (sum of area) vyjadřující celkovou plochu daného typu pokryvu v bufferu.

Výsledkem bylo šest výstupních tabulek odpovídajících kombinacím lokality (Černotín, Hrádky) a velikosti bufferu (500 m, 1 km, 2 km), exportovaných do formátu .xlsx.

Časové pokrytí výsledných tabulek bylo omezeno dostupností použitelných satelitních snímků po Whittakerově vyhlazení. Obě lokality neleží na stejné dlaždici Sentinel-2, a proto se liší dostupnost snímků i výsledné časové rozsahy – pro lokalitu Černotín pokrývají období 29. 4. 2024 – 21. 10. 2024, pro lokalitu Hrádky období 1. 5. 2024 – 18. 10. 2024.

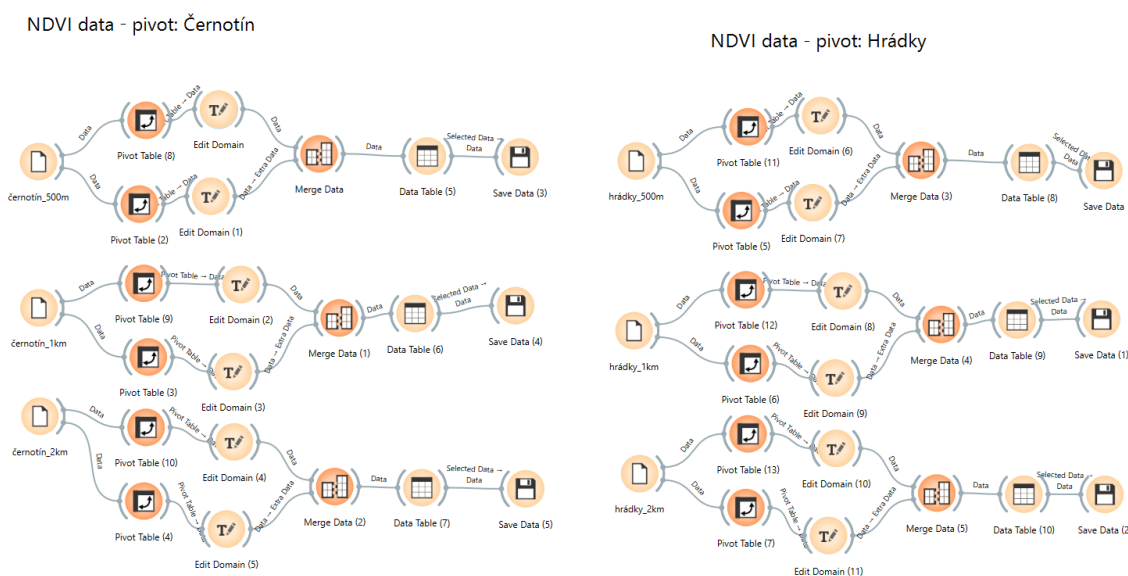
4.7 Zpracování tabulkových dat

4.7.1 Předzpracování tabulek zonálních statistik

Výstupní tabulky zonálních statistik z prostředí ArcGIS Pro – jak pro vegetační indexy, tak pro meteorologické proměnné – měly strukturu dlouhého formátu (*long format*), v níž každý řádek odpovídal kombinaci jednoho dne, jedné lokality a jedné proměnné nebo typu krajinného pokryvu. Před dalším zpracováním bylo nutné tyto tabulky převést do širokého formátu (*wide format*), kde každý řádek odpovídá jednomu dni a každá proměnná nebo typ pokryvu tvoří samostatný sloupec.

U tabulek meteorologických proměnných obsahoval sloupec Variable název proměnné (FAVG, HAVG, SRA, SSV, TAVG, TMA, TMI) a sloupec MEAN její průměrnou denní hodnotu pro danou lokalitu. Převod do širokého formátu byl proveden widgetem Pivot Table. Protože každý řádek obsahoval pouze jednu hodnotu, postačoval jeden pivot na tabulku.

U tabulek vegetačních indexů NDVI obsahoval každý řádek vedle průměrné hodnoty indexu pro daný typ krajinného pokryvu také jeho rozlohu v bufferu. Protože widget Pivot Table neumožňuje souběžný pivot více atributů najednou, byl postup rozdělen do dvou paralelních větví: první pivot transformoval průměrné hodnoty NDVI podle typu krajinného pokryvu (TYP_P), druhý pivot transformoval odpovídající rozlohy (AREA). Výstupy obou větví byly po úpravě datových typů widgetem Edit Domain spojeny widgetem Merge Data na základě společného klíče data záznamu.



Obr. 13 Pivot NDVI - workflow

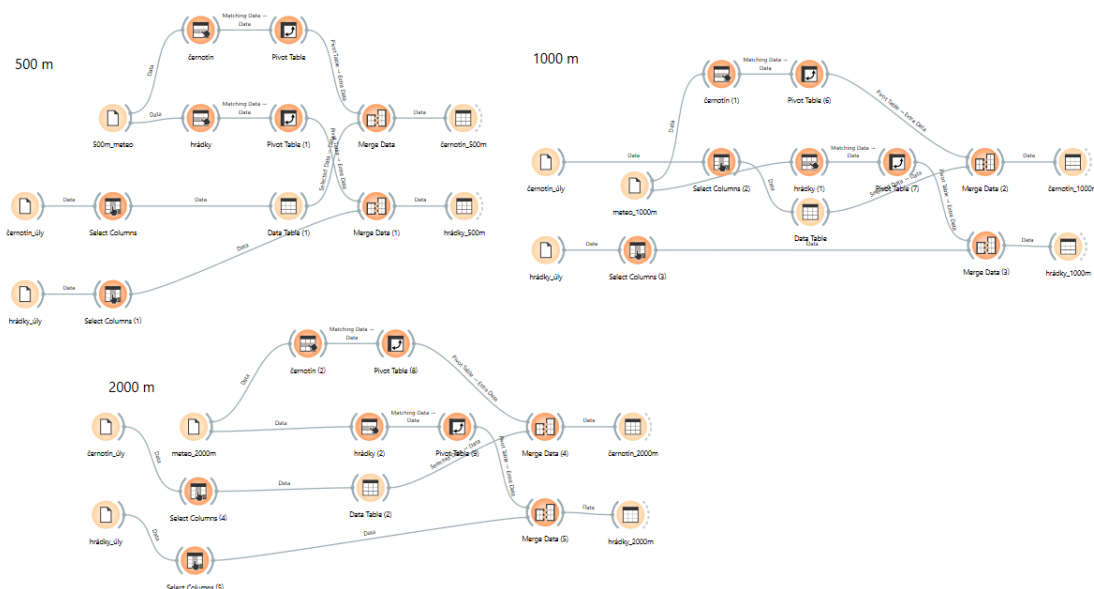
Rozdělení meteo dat podle lokalit a spojení s úlovými daty

Tabulky meteorologických proměnných obsahovaly záznamy pro obě lokality společně. Rozdělení na jednotlivé lokality bylo provedeno widgetem Select Rows s podmínkou shody hodnoty sloupce Lokalita. Takto byly z každé tabulky extrahovány záznamy příslušející lokalitě Černotín a záznamy příslušející lokalitě Hrádky.

Úlová data byla před spojením upravena widgetem Select Columns, kterým byly vyřazeny technické sloupce nevyužitelné pro analytické účely – konkrétně poslední_cas_dne, Baterie

[V] a Signál [%]. Ponechány byly proměnné: den, Hmotnost_A, Hmotnost_B, Úlová teplota_A, Úlová teplota_B, poslední_hmotnost_A, poslední_hmotnost_B, snuska_A, snuska_B, Venkovní teplota [°C], Relativní vlhkost [%] a Tlak [hPa].

Pivotovaná meteorologická data pro každou lokalitu byla následně spojena s příslušnými úlovými daty widgetem Merge Data na základě společného klíče data záznamu. Workflow bylo sestaveno samostatně pro každou kombinaci lokality a velikosti bufferu (Obr. 14). Výsledkem bylo šest datasetů – černotín_500m, černotín_1km, černotín_2km, hrádky_500m, hrádky_1km, hrádky_2km – každý pokrývající období 1. 1. 2024 – 31. 10. 2024.



Obr. 14 spojení meteorologických proměnných s úlovými daty - workflow

4.7.2 Výpočet odvozených proměnných

Po exportu spojených datasetů z prostředí Orange byly v prostředí Microsoft Excel vypočítány odvozené proměnné: fenologický indikátor postupu vegetační sezóny (SET5), výparný deficit vzduchu (VPD), klouzavé průměry vybraných meteorologických proměnných za okna 3 a 7 dní a zpožděné hodnoty vybraných meteorologických proměnných o jeden den. Výpočet byl proveden v Excelu, neboť prostředí Orange neposkytuje dostatečnou podporu pro kumulativní a posuvné výpočty nad časovými řadami.

Suma efektivních teplot (SET5) byla vypočítána jako kumulativní tepelná suma od 1. 1. 2024 s biologickým prahem 5 °C; matematická definice a zdůvodnění volby prahu jsou uvedeny v kap. 3.

Výparný deficit vzduchu (VPD) byl vypočítán z průměrné denní teploty (TAVG) a průměrné denní relativní vlhkosti (HAVG) podle Magnusovy rovnice; vzorec je uveden v kap. 3. Zařazení VPD vychází z poznatků Chabert et al. (2020), kteří prokázali, že výparný deficit vzduchu vysvětloval 56 % variability koncentrace cukru v nektaru.

Klouzavé průměry (rolling) zachycují přetrvávající vliv meteorologických podmínek na snůšku. Byly vypočítány jako průměr aktuálního a předchozích n-1 dní pro okna délky 3 a 7 dní: TAVG_roll3, TAVG_roll7, SSV_roll3, SSV_roll7, SRA_roll3, SRA_roll7, VPD_roll3 a VPD_roll7. Třidenní okno zachycuje bezprostřední meteorologické podmínky ovlivňující

letovou aktivitu včel, sedmidenní okno zachycuje střednědobý vliv počasí na produkci nektaru v krajině.

Zpožděné proměnné (lag) zachycují efekt meteorologických podmínek předchozího dne: SRA_lag1 (úhrn srážek předchozího dne) a FAVG_lag1 (průměrná rychlost větru předchozího dne). Déšť a silný vítr omezují letovou aktivitu včel a jejich efekt přetrvává i den následující – po dešti jsou květy mokré a obnova produkce nektaru je zpožděna, po silném větru včelstva déle obnovují intenzitu sběru.

4.7.3 Trénování a vyhodnocování prediktivního modelu

Prediktivní model byl trénován v prostředí Orange s využitím algoritmu Extreme Gradient Boosting (XGBoost), implementovaného ve widgetu Gradient Boosting. Model byl nastaven s těmito hyperparametry: počet stromů 300, rychlost učení (*learning rate*) 0,05, maximální hloubka stromu 4, regularizační parametr lambda 1, podíl tréninkových instancí pro každý strom 0,80 a podíl příznaků pro každý strom 0,80. Bylo zapnuto deterministické trénování (*replicable training*) zajišťující reprodukovatelnost výsledků. Toto nastavení (Obr. 15) bylo zvoleno jako finální na základě doporučení o gradient boosting metodách (Friedman, 2000).

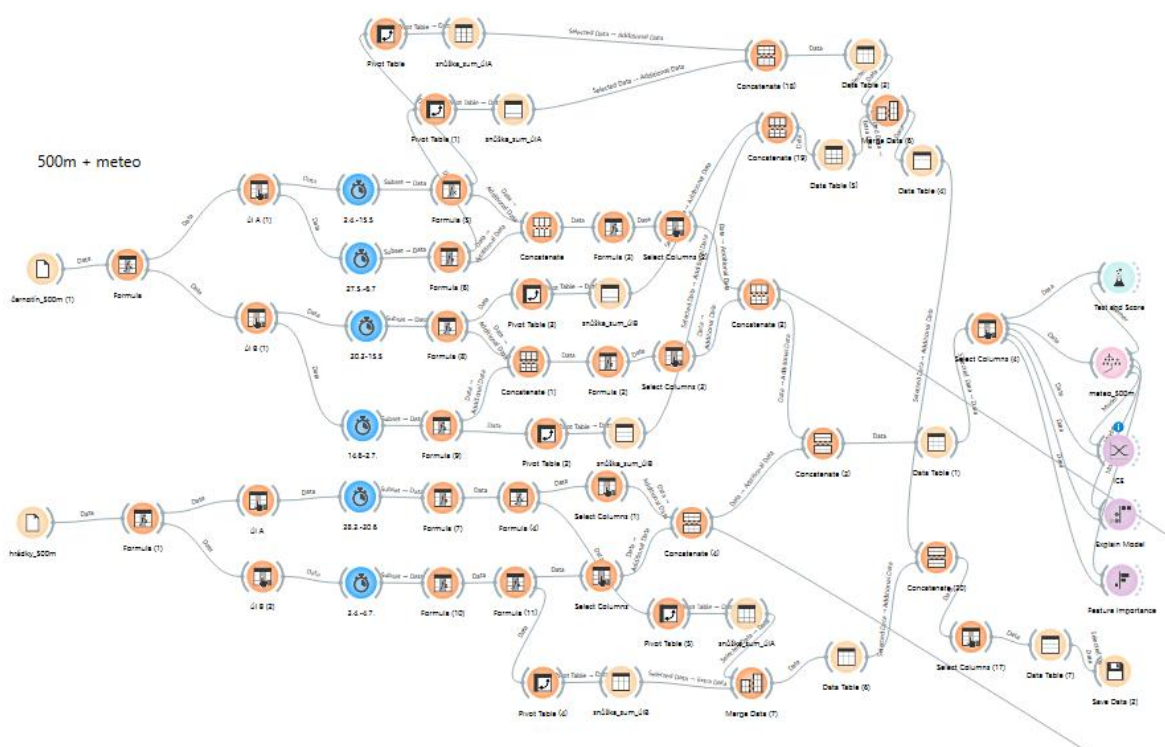
The image shows the configuration window for the 'Gradient Boosting' widget in the Orange3 data mining software. The widget is named 'meteo_2000m'. The selected method is 'Extreme Gradient Boosting (xgboost)'. The 'Basic Properties' section includes: 'Number of trees' set to 300, 'Learning rate' set to 0,050, 'Replicable training' checked, and 'Regularization' (Lambda) set to 1. The 'Growth Control' section has 'Limit depth of individual trees' set to 4. The 'Subsampling' section has: 'Fraction of training instances' set to 0,80, 'Fraction of features for each tree' set to 0,80, 'Fraction of features for each level' set to 1,00, and 'Fraction of features for each split' set to 1,00. At the bottom, the 'Apply Automatically' checkbox is checked.

Obr. 15 Nastavení XGBoost modelu

Výkonnost modelu byla hodnocena metodou desetinásobné křížové validace (*10-fold cross validation*) v widgetu Test and Score. Celý dataset (330 záznamů) byl opakovaně rozdělen

na trénovací a testovací část, přičemž model byl vždy trénován na 9 částech a testován na zbývající části. Jako hodnotící metriky byly sledovány RMSE, MAE a R^2 . Více viz. kap. 5.5, kde jsou detailně rozebrány výsledky těchto metrik.

Paralelně bylo sestaveno druhé workflow, v němž byly datasety úlová data + meteo data rozšířeny o data vegetačních indexů NDVI. Připojení NDVI tabulek bylo provedeno widgetem Merge Data v režimu připojení sloupců (*Append columns from Extra data*) s párováním podle indexu řádku. Před vstupem do modelu byl widgetem Select Rows zajištěn výběr pouze těch záznamů, pro které byly současně definovány hodnota snůšky i hodnota plochy orné půdy (jako indikátor dostupnosti NDVI dat). Tímto filtrem bylo z 176 záznamů zachováno 146, přičemž vyřazené záznamy odpovídaly dnům mimo časové pokrytí satelitních snímků po Whittakerově vyhlazení. Model byl trénován a vyhodnocen identickým způsobem jako v případě datasetu bez NDVI.



Obr. 16 trénování modelů – workflow (500m + meteo)

Interpretace modelů byla provedena třemi komplementárními nástroji: widgetem Feature Importance pro hodnocení důležitosti vstupních proměnných, widgetem Explain Model pro výpočet hodnot SHAP a widgetem ICE pro vizualizaci křivek Individual Conditional Expectation. Součástí výstupu widgetu ICE je rovněž graf parciální závislosti (PDP – Partial Dependence Plot), který umožňuje identifikaci prahových hodnot proměnných ovlivňujících predikovanou snůšku.

5 VÝSLEDKY

Kapitola prezentuje výsledky analýzy vztahů mezi daty z úlových vah a teplotních senzorů a lokálními environmentálními podmínkami dvou stanovišť v Olomouckém kraji za sezónu 2024. Nejprve je popsán průběh snůšky a vymezení snůškových období pro všechna čtyři sledovaná včelstva (kap. 5.1), následuje charakteristika krajinného kontextu obou stanovišť včetně hodnocení nektarodárného potenciálu zemědělských plodin (kap. 5.2) a analýza fenologické dynamiky vegetace na základě satelitních indexů NDVI (kap. 5.3). Kapitola 5.4 popisuje průběh meteorologické sezóny 2024 a odvozené proměnné vstupující do prediktivního modelu. Výsledky prediktivního modelování metodou XGBoost včetně identifikace klíčových prediktorů a jejich prahových hodnot jsou shrnuty v kapitole 5.5.

5.1 Průběh úlových dat a vymezení snůškových období

Na základě vizuální inspekce časových řad hmotnosti úlů byla ve spolupráci s Mgr. Jiřím Danihlíkem, Ph.D. vymezeny hlavní snůšková období jednotlivých včelstev. Za snůškové období byly považovány úseky časové řady, ve kterých docházelo k soustavnému nárůstu hmotnosti úlu odpovídajícímu aktivnímu sběru nektaru. Metodický postup vymezení snůšek je popsán v kapitole 4.2.

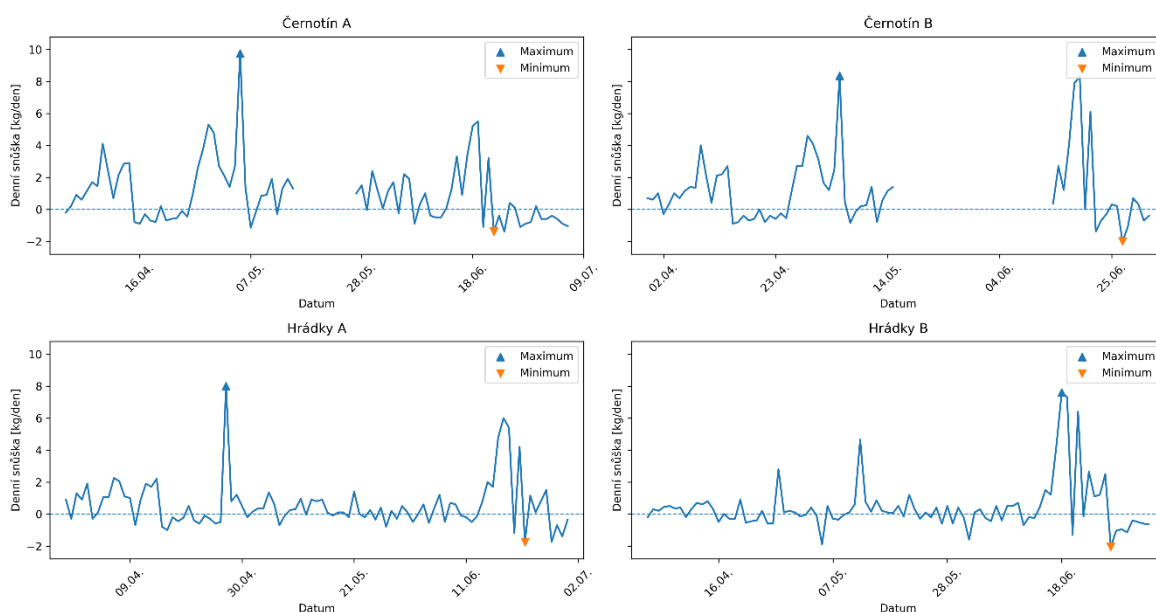
Na lokalitě Černotín byla u obou sledovaných úlů identifikována dvě oddělená snůšková období. Jejich oddělení souviselo s výběrem medu, který se v časové řadě projevil náhlým poklesem hmotnosti. Naproti tomu na lokalitě Hrádky probíhala snůška u obou úlů jako jedno delší nepřerušené období zakončené výběrem medu. Přehled vymezených snůškových období, jejich délky, kumulativních přírůstků a průměrných denních hodnot uvádí Tabulka 1.

Tabulka 1 Přehled vymezených snůškových období a základních charakteristik denní snůšky

Lokalita	Úl	Období snůšky	Délka období	Kumulativní přírůstek	Průměrný denní přírůstek
Černotín	A	2. 4. – 15. 5.	43 dní	57,8 kg	1,34 kg/den
Černotín	A	27. 5. – 6. 7.	40 dní	25,1 kg	0,63 kg/den
Černotín	B	30. 3. – 15. 5.	45 dní	48,5 kg	1,08 kg/den
Černotín	B	14. 6. – 2. 7.	18 dní	26,0 kg	1,44 kg/den
Hrádky	A	28. 3. – 30. 6.	93 dní	55,9 kg	0,60 kg/den
Hrádky	B	3. 4. – 4. 7.	91 dní	39,2 kg	0,43 kg/den

Z porovnání obou lokalit vyplývá rozdílný charakter snůšky. V Černotíně byly zaznamenány vyšší kumulativní přírůstky, avšak snůška měla výrazněji impulsivní průběh a byla rozdělena do dvou samostatných vln. Celkový sezónní přírůstek dosáhl 82,9 kg u úlu A a 74,4 kg u úlu B. V lokalitě Hrádky byly kumulativní přírůstky nižší, konkrétně 55,9 kg u úlu A a 39,2 kg u úlu B, avšak snůška zde probíhala podstatně déle a bez výrazného přerušování. Původní text uvádí právě tento rozdíl mezi krátkodobější a intenzivnější snůškou v Černotíně a delším, rovnoměrnějším průběhem v lokalitě Hrádky.

Denní hodnoty snůšky ukazují rozdílnou dynamiku mezi oběma lokalitami. V Černotíně se snůška koncentrovala do kratších období s výraznějšími denními vrcholy, zatímco v lokalitě Hrádky byl její průběh pozvolnější a časově delší. Maximální denní přírůstky dosáhly v Černotíně 9,75 kg/den u úlu A a 8,35 kg/den u úlu B, zatímco v lokalitě Hrádky činila maxima 8,0 kg/den u úlu A a 7,6 kg/den u úlu B. Celkový průběh denní snůšky je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 Denní snůška sledovaných úlů ve vymezených snůškových obdobích roku 2024

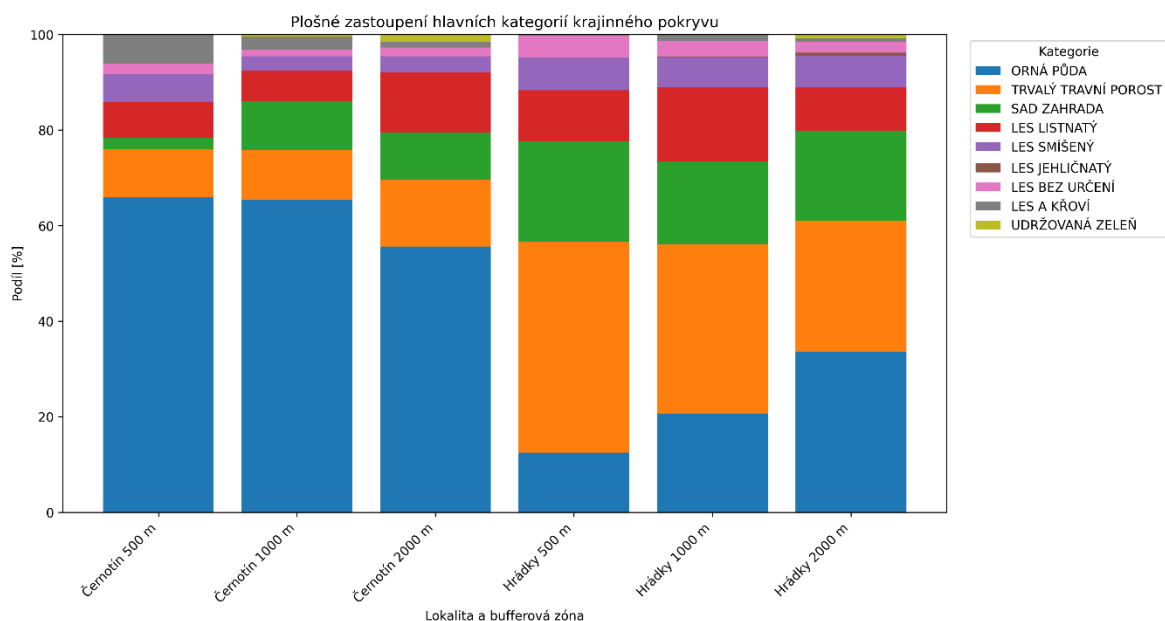
Denní snůška byla vypočtena jako rozdíl mezi poslední zaznamenanou hmotností daného dne a poslední zaznamenanou hmotností předchozího dne. Do grafu jsou zahrnuty pouze hodnoty spadající do ručně vymezených snůškových období. Symboly označují maximální a minimální denní hodnotu pro každý úl.

5.2 Krajinný kontext stanovišť a dostupnost nektarodárných zdrojů

Analýza krajinného pokryvu v bufferových zónách 500 m, 1 km a 2 km ukázala výrazný rozdíl mezi oběma sledovanými stanovišti. Černotín představuje lokalitu s převahou intenzivně zemědělské krajiny, zatímco Hrádky se vyznačují diverzifikovanějším krajinným kontextem zejména v bezprostředním okolí úlů.

V Černotíně byla dominantní kategorií krajinného pokryvu orná půda, která převažovala ve všech sledovaných vzdálenostech. Její podíl byl nejvyšší v 500 m a 1 km bufferu, kde tvořila přibližně dvě třetiny analyzované plochy. Teprve ve 2 km bufferu se její relativní zastoupení mírně snížilo v důsledku narůstajícího podílu dalších krajinných kategorií, zejména lesních porostů a sídelní zeleně. Podíl sadů a zahrad byl v bezprostředním okolí stanoviště nízký a výrazněji narůstal až ve větší vzdálenosti od úlů.

Hrádky vykazovaly odlišný charakter krajiny. V nejbližším 500 m okolí úlů zde nepřevažovala orná půda, ale trvalé travní porosty, doplněné výrazným podílem sadů a zahrad. Orná půda získávala na významu až ve větších vzdálenostech, její podíl však zůstal nižší než v Černotíně. Výraznější zastoupení lesních porostů bylo patrné zejména v 1 km bufferu. Přehled plošného zastoupení hlavních kategorií krajinného pokryvu uvádí



Obr. 18 Plošné zastoupení hlavních kategorií krajinného pokryvu v bufferových zónách sledovaných lokalit

Z pohledu potravní nabídky pro včelstva není rozhodující pouze celkový podíl orné půdy, ale především druhové složení pěstovaných plodin a časové rozložení jejich kvetení. Proto bylo samostatně hodnoceno zastoupení plodin s nektarodárným potenciálem podle dat LPIS. Celková rozloha těchto plodin byla ve všech sledovaných bufferových zónách vyšší v Černotíně než v lokalitě Hrádky. Největší rozdíl byl patrný ve 2 km bufferu, kde součet ploch nektarodárných plodin dosáhl v Černotíně 161,5 ha, zatímco v lokalitě Hrádky 115,18 ha. Rozdíl mezi lokalitami byl patrný také v 500 m a 1 km bufferu, kde Černotín vykazoval vyšší plošné zastoupení potenciálních nektarodárných zdrojů.

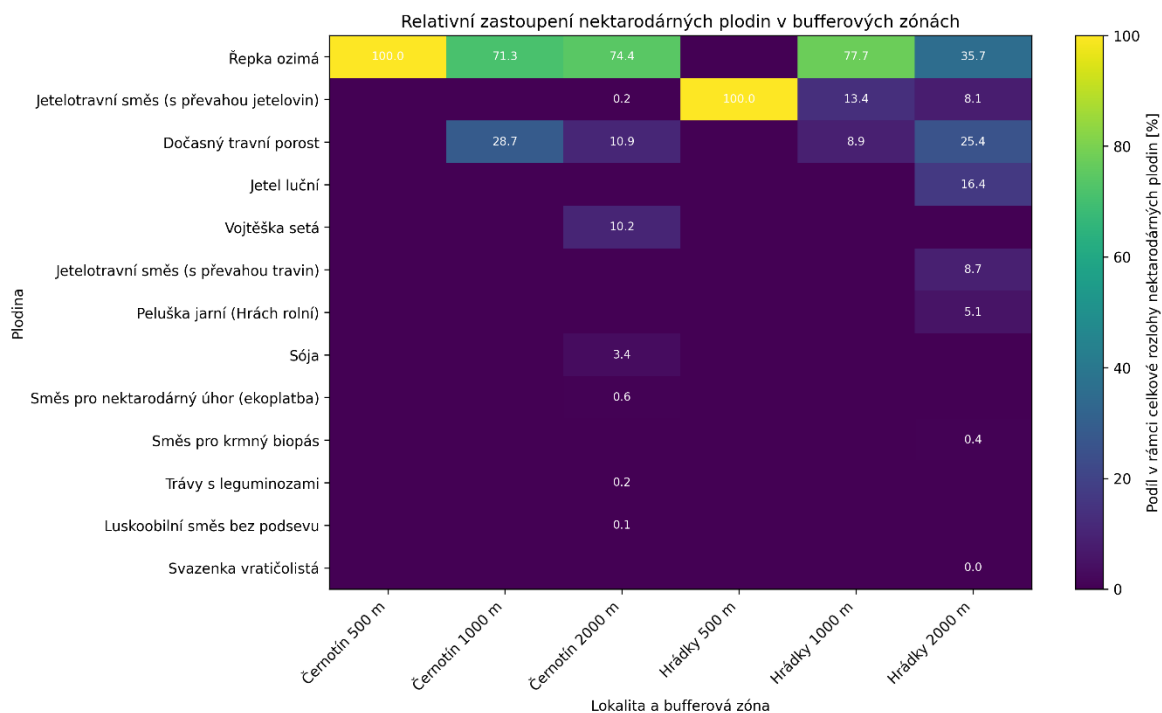
Tabulka 2 Celková rozloha nektarodárných plodin v bufferových zónách sledovaných lokalit.

Lokalita	buffer	plodina	rozloha (ha)
Hrádky	500	Jetelotravní směs (s převahou jetelovin)	3.41
Hrádky	1000	Dočasný travní porost	2.27
Hrádky	1000	Jetelotravní směs (s převahou jetelovin)	3.42
Hrádky	1000	Řepka ozimá	19.81
Hrádky	2000	Dočasný travní porost	29.29
Hrádky	2000	Jetel luční	18.94
Hrádky	2000	Jetelotravní směs (s převahou jetelovin)	9.39
Hrádky	2000	Jetelotravní směs (s převahou travin)	9.96
Hrádky	2000	Peluška jarní (Hrách rolní)	5.91
Hrádky	2000	Směs pro krmný biopás	0.50
Hrádky	2000	Svazenka vratičolistá	0.04
Hrádky	2000	Řepka ozimá	41.15
Černotín	500	Řepka ozimá	6.55
Černotín	1000	Dočasný travní porost	12.44
Černotín	1000	Řepka ozimá	30.86

Černotín	2000	Dočasný travní porost	17.60
Černotín	2000	Jetelotravní směs (s převahou jetelovin)	0.26
Černotín	2000	Luskoobilní směs bez podsevu	0.23
Černotín	2000	Směs pro nektarodárný úhor (ekoplatba)	0.92
Černotín	2000	Sója	5.54
Černotín	2000	Trávy s leguminozami	0.37
Černotín	2000	Vojtěška setá	16.49
Černotín	2000	Řepka ozimá	120.10

Přestože Černotín dosahoval vyšší celkové rozlohy nektarodárných plodin, jejich skladba byla výrazně koncentrována do jedné dominantní plodiny – řepky ozimé. V 500 m bufferu byla řepka jedinou identifikovanou nektarodárnou plodinou a ve větších bufferových zónách si udržovala převládající podíl. V 1 km bufferu představovala přibližně 71 % celkové rozlohy nektarodárných plodin a ve 2 km bufferu přibližně 74 %. Kromě řepky se ve větších vzdálenostech objevovaly také dočasné travní porosty, vojtěška setá a další plodiny, jejich podíl však byl ve srovnání s řepkou výrazně nižší.

V lokalitě Hrádky byla celková plocha nektarodárných plodin nižší, ale jejich skladba byla pestřejší. V 500 m bufferu byla zastoupena pouze jetelotravní směs s převahou jetelovin. V 1 km bufferu již dominovala řepka ozimá, která tvořila přibližně 78 % celkové rozlohy nektarodárných plodin, doplněná jetelotravní směsí a dočasným travním porostem. Největší pestrost skladby byla zjištěna ve 2 km bufferu, kde vedle řepky významněji vystupovaly také dočasný travní porost, jetel luční, jetelotravní směsi, peluška jarní a další minoritní plodiny. Relativní složení nektarodárných plodin je znázorněno v heatmapě Obr. 19, která vyjadřuje podíl jednotlivých plodin v rámci celkové rozlohy nektarodárných plodin daného bufferu.



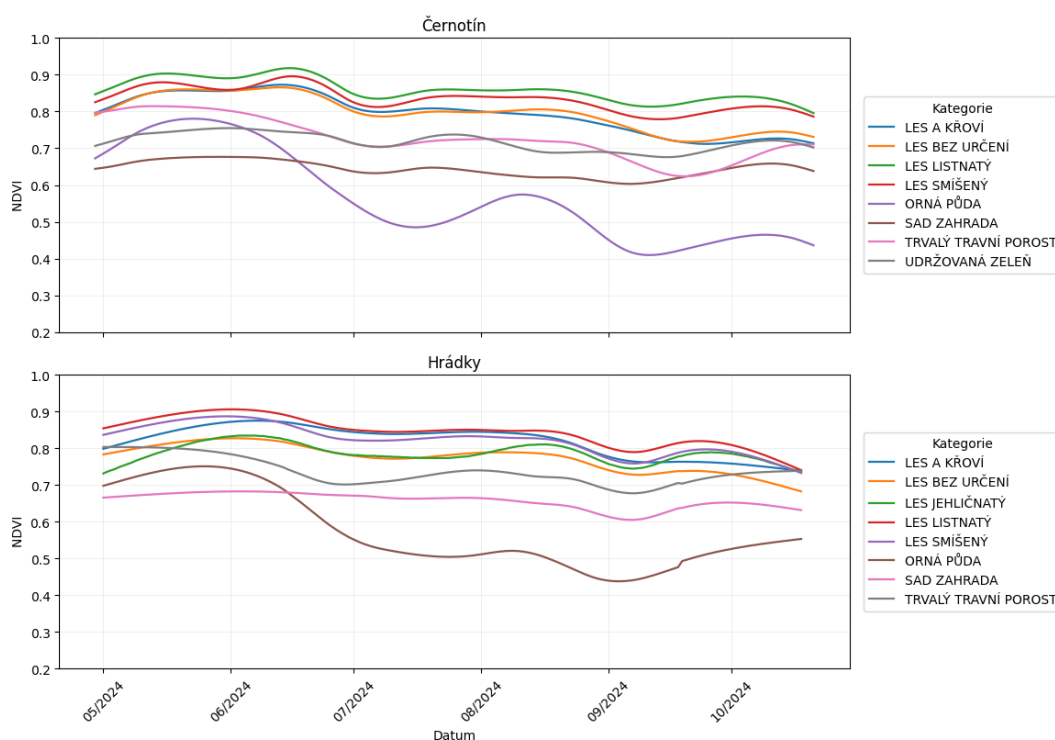
Obr. 19 Relativní zastoupení nektarodárných plodin v bufferových zónách sledovaných lokalit.

Výsledky analýz ukazují, že obě lokality představují odlišné typy stanovištního prostředí. Černotín je charakteristický vyšším zastoupením orné půdy a vyšší celkovou rozlohou plodin s nektarodárným potenciálem, avšak s výraznou závislostí na řepce ozimé jako dominantním zdroji. Taková skladba vytváří předpoklad pro intenzivní, ale časově omezenou snůšku v období kvetení této plodiny. Hrádky naopak vykazují pestřejší krajinnou strukturu v bezprostředním okolí stanoviště a rozmanitější skladbu nektarodárných plodin, zejména ve 2 km bufferu. Přestože celková plocha těchto plodin byla v lokalitě Hrádky nižší, jejich pestřejší skladba může přispívat k časově rozloženější nabídce potenciálních snůškových zdrojů.

5.3 Fenologická dynamika vegetace – časové řady NDVI

Fenologická dynamika vegetace byla hodnocena pomocí časových řad vegetačního indexu NDVI odvozeného ze snímků Sentinel-2. Analýza byla provedena pro hlavní kategorie krajinného pokryvu s potenciálním nektarodárným nebo pylovým významem v bufferových zónách 500 m, 1 km a 2 km kolem obou sledovaných stanovišť. Protože průběh NDVI pro stejnou kategorii krajinného pokryvu se mezi buffery jedné lokality výrazně neliší, jsou v této kapitole prezentovány výsledky za 1 km buffer jako reprezentativní dle Obr. 20.

Časové pokrytí vegetačních indexů bylo omezeno dostupností vhodných satelitních snímků a následným Whittakerovým vyhlazením časových řad. Pro lokalitu Černotín zahrnovala výsledná časová řada období od 29. dubna do 21. října 2024, pro lokalitu Hrádky období od 1. května do 18. října 2024. Z tohoto důvodu nebyla zachycena nejranější jarní fáze vegetační sezóny, včetně části počátečního vývoje časně kvetoucích plodin.



Obr. 20 Časové řady NDVI hlavních kategorií krajinného pokryvu v 1000m bufferu sledovaných lokalit

Nejvyšší a zároveň nejstabilnější hodnoty NDVI byly zaznamenány u lesních porostů. Listnaté a smíšené lesy dosahovaly vysokých hodnot již na počátku dostupné časové řady a jejich průběh odpovídal postupnému nástupu plného olistění, stabilní letní fázi a pozvolnému podzimnímu poklesu. Jehličnaté lesy, které byly zastoupeny pouze v širších bufferových zónách, vykazovaly menší sezónní amplitudu a stabilnější průběh v průběhu vegetační sezóny. Lesní porosty tak v časových řadách představovaly vegetačně stabilní složku krajiny.

Orná půda měla oproti lesním porostům výrazně dynamičtější průběh. Na obou lokalitách byl patrný výrazný jarní až časně letní vrchol NDVI, po němž následoval rychlý pokles v letním období. Tento průběh odpovídá fenologickému vývoji zemědělských plodin a jejich sklizni. Vrchol NDVI orné půdy časově korespondoval s obdobím, kdy byla na orné půdě obou lokalit dominantní nektarodárnou plodinou řepka ozimá. Samotný index NDVI však zachycuje především množství a vitalitu zelené biomasy, nikoli přímo kvetení. Proto byl pro doplňující interpretaci využit také index NDYI, který lépe reaguje na žluté kvetoucí porosty řepky.

Index NDYI vykazoval nejvyšší interpretační přínos právě u orné půdy v období kvetení řepky ozimé. V době vrcholu vegetační aktivity orné půdy došlo k výraznému zvýšení NDYI, které následně po skončení kvetení rychle pokleslo. Tento průběh potvrzuje, že NDYI je vhodný zejména pro identifikaci žlutě kvetoucích plodin, zatímco u ostatních kategorií krajinného pokryvu a v dalších částech sezóny byla jeho rozlišovací schopnost omezená. Z tohoto důvodu nebyl NDYI dále využit jako vstupní proměnná v prediktivním modelování.

Trvalé travní porosty vykazovaly odlišný sezónní průběh než orná půda. Vysokých hodnot NDVI dosahovaly již na počátku dostupné časové řady, což naznačuje, že jejich jarní maximum mohlo nastat ještě před začátkem období zachyceného satelitními daty. Následný průběh byl pozvolnější než u orné půdy a podzimní pokles probíhal plynuleji. Tato dynamika odpovídá stabilnějšímu vegetačnímu krytu a menší závislosti na jednorázových fenologických událostech, jako je kvetení nebo sklizeň jedné dominantní plodiny.

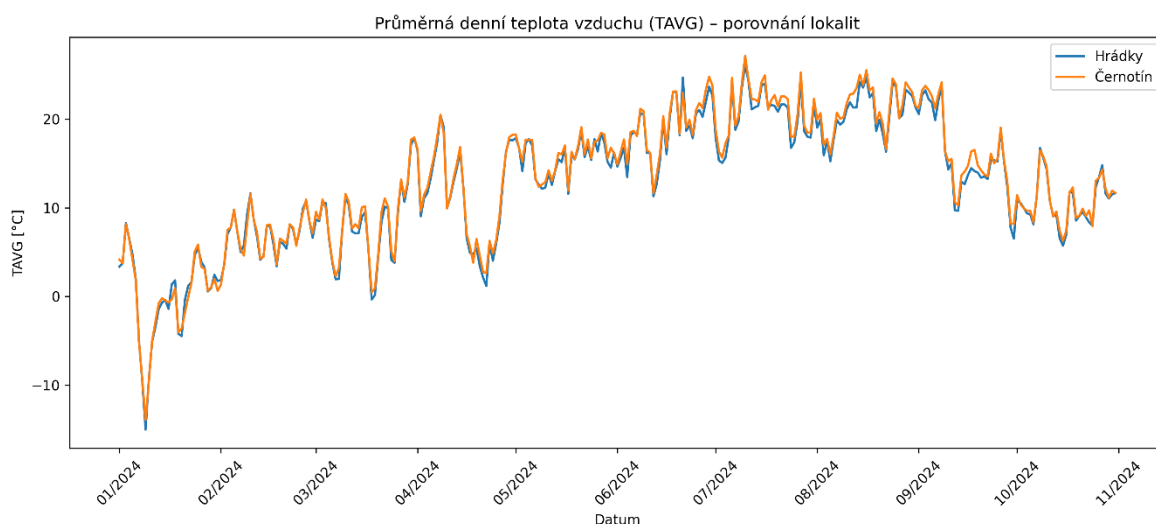
Sady a zahrady vykazovaly meziroční průběh s vysokými hodnotami v jarním a letním období a s postupným poklesem na konci vegetační sezóny. Jejich časová dynamika byla méně výrazně impulsivní než u orné půdy, což odpovídá heterogennějšímu charakteru této kategorie. V rámci prostorové analýzy představují sady a zahrady potenciálně významný doplněk potravní nabídky včelstev, zejména v bližším okolí stanovišť, kde mohou přispívat k větší druhové i fenologické pestrosti dostupných zdrojů.

Souhrnně časové řady NDVI ukazují rozdílnou fenologickou dynamiku hlavních vegetačních kategorií. Orná půda vykazovala nejvýraznější sezónní amplitudu a jasně vymezený vrchol odpovídající fenologickému vývoji polních plodin. Lesní porosty, trvalé travní porosty, sady a zahrady naopak představovaly stabilnější vegetační složky s pozvolnějším sezónním průběhem. Tyto rozdíly jsou důležité pro interpretaci časového rozložení potenciálních potravních zdrojů v okolí stanovišť, protože ukazují, zda je vegetační aktivita v krajině soustředěna do krátkého intenzivního období, nebo zda je rozložena rovnoměrněji v čase.

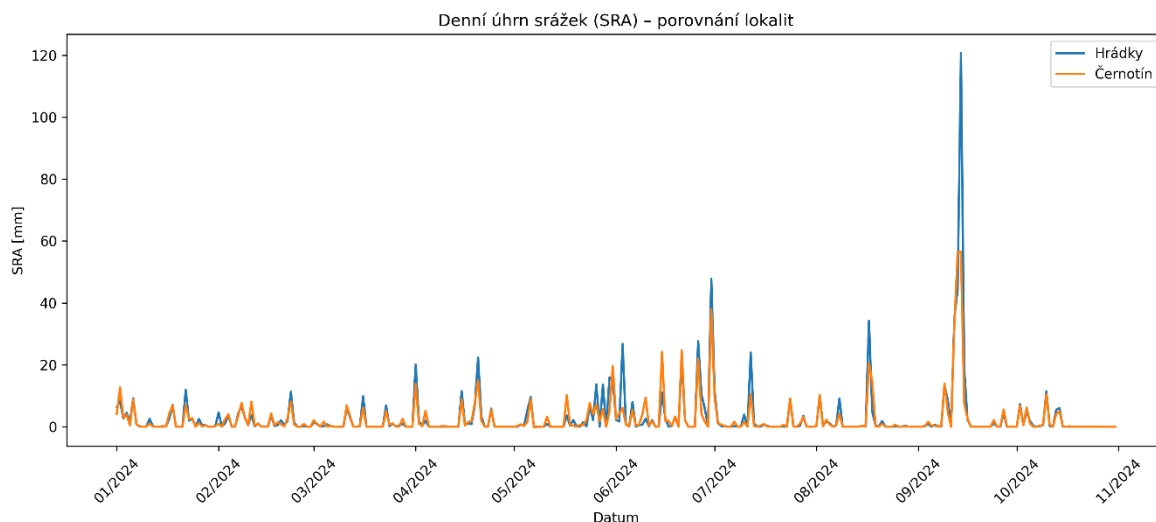
5.4 Meteorologický kontext snůšky a odvozené proměnné

Meteorologické podmínky sledovaných lokalit byly hodnoceny na základě denních rastrových dat projektu Agropočasí.cz. Cílem této části nebylo pouze popsat průběh počasí během sezóny 2024, ale především vytvořit soubor meteorologických a odvozených proměnných využitelných pro interpretaci denní snůšky a následné prediktivní modelování. Do analýzy byly zahrnuty jak proměnné popisující aktuální podmínky konkrétního dne, tak ukazatele zachycující kumulativní, zpožděný nebo krátkodobě přetrvávající vliv počasí.

Základní meteorologické proměnné zahrnovaly průměrnou Obr. 21, minimální a maximální denní teplotu vzduchu, denní úhrn srážek, průměrnou relativní vlhkost vzduchu, délku slunečního svitu a průměrnou rychlost větru. Tyto proměnné charakterizují aktuální podmínky, které mohou přímo ovlivňovat letovou aktivitu včel, dostupnost nektaru a krátkodobou dynamiku hmotnostních změn úlů. Průběh průměrné denní teploty ukázal postupný nástup vegetační sezóny v jarním období a dosažení nejvyšších hodnot během letních měsíců. Srážkové epizody byly během sezóny rozloženy nerovnoměrně a střídaly se s obdobími teplejšího a suššího počasí, jak lze vidět na Obr. 22

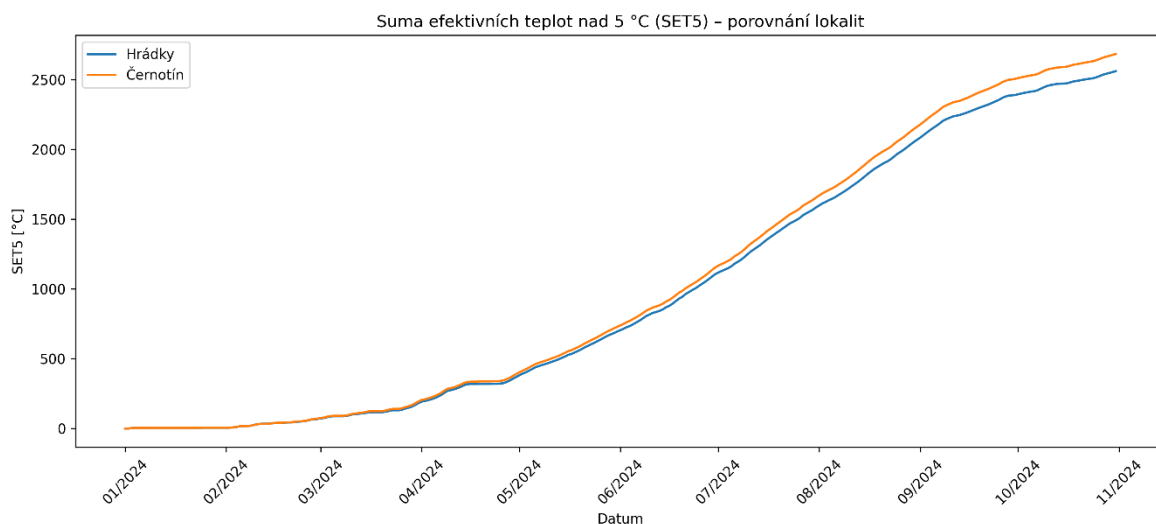


Obr. 21 Průměrná denní teplota vzduchu (TAVG) – porovnání lokalit



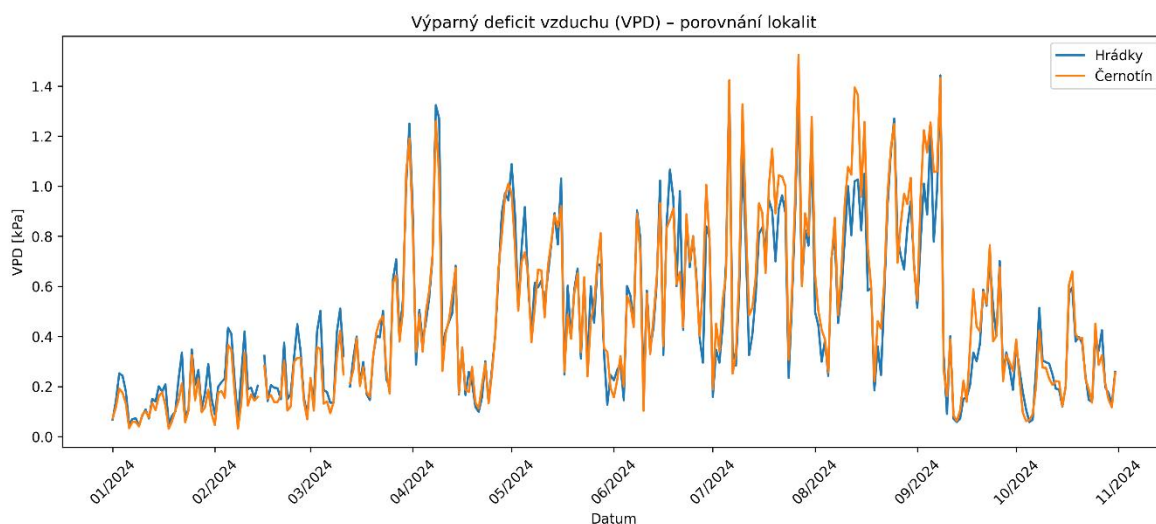
Obr. 22 Denní úhrn srážek (SRA) – porovnání lokalit

Kromě základních denních hodnot byly vypočítány také odvozené proměnné popisující širší fenologický a atmosférický kontext snůšky. Fenologický průběh sezóny byl vyjádřen pomocí sumy efektivních teplot nad prahem 5 °C, která kumuluje denní teplotní přebytky nad zvolenou biologickou hranicí. SET5 tak nepopisuje pouze aktuální teplotu daného dne, ale postup vegetační sezóny a akumulaci tepla dostupného pro vývoj rostlin. Z hlediska interpretace snůšky je tato proměnná důležitá zejména proto, že dostupnost nektarodárných a pylových zdrojů je silně vázána na fenologický vývoj vegetace.



Obr. 23 Suma efektivních teplot nad 5 °C (SET5) - porovnání lokalit

Druhou významnou odvozenou proměnnou byl výparný deficit vzduchu. VPD kombinuje vliv teploty a relativní vlhkosti vzduchu a vyjadřuje, do jaké míry je vzduch vzdálen stavu nasycení vodní párou. Ve vztahu ke snůšce může být významnější než samotná teplota nebo relativní vlhkost, protože souvisí s odpařováním vody z nektaru a tím i s jeho koncentrací a atraktivitou pro včely.

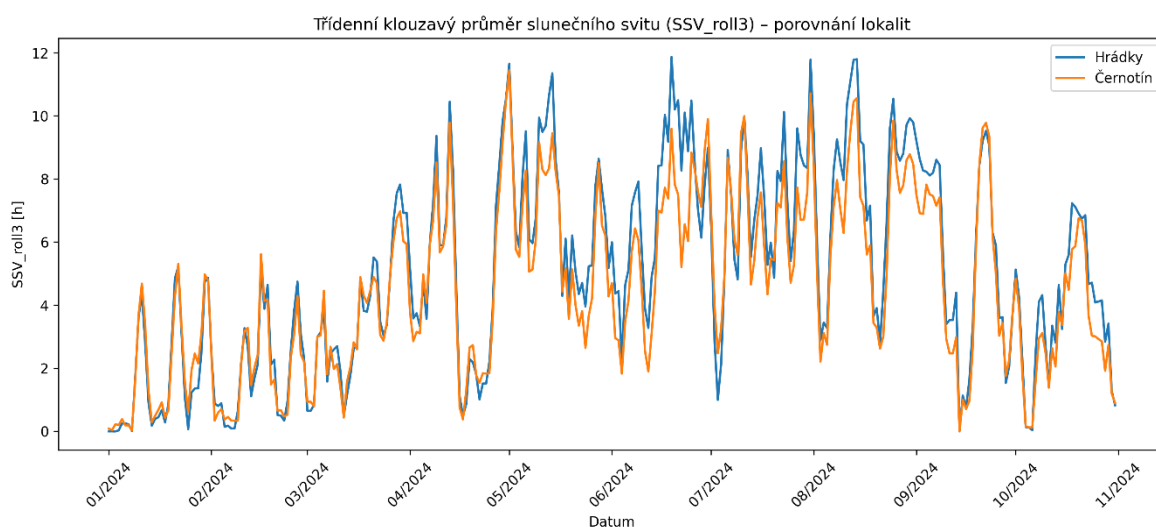


Obr. 24 Výparný deficit vzduchu (VPD) - porovnání lokalit

Samostatnou skupinu tvořily klouzavé a zpožděné proměnné. Jejich zahrnutí vycházelo z předpokladu, že denní snůška nemusí reagovat pouze na meteorologické podmínky konkrétního dne, ale také na podmínky předchozích dní. Z tohoto důvodu byly pro vybrané proměnné vypočítány třídenní a sedmidenní klouzavé průměry. Ty zachycují krátkodobě

přetrvávající charakter počasí a mohou lépe popsat souvislé příznivé nebo nepříznivé období než samotná denní hodnota.

Význam těchto proměnných lze ilustrovat například na délce slunečního svitu. Proměnná SSV popisuje počet hodin slunečního svitu v konkrétním dni, zatímco SSV_roll3 vyjadřuje průměrnou délku slunečního svitu za aktuální a předchozí dva dny. Tato hodnota může lépe vystihovat souvislé období příznivých letových podmínek a vyšší energetické dostupnosti pro rostliny než jednorázový denní údaj. Podobně SSV_roll7 zachycuje delší týdenní charakter počasí, který může souviset s průběžnou fenologickou aktivitou vegetace a produkcí nektaru.



Obr. 25 Třídenní klouzavý průměr slunečního svitu (SSV_roll3) - porovnání lokalit

Analogicky byly vypočítány klouzavé průměry pro teplotu, srážky a VPD. Proměnné TAVG_roll3 a TAVG_roll7 popisují krátkodobý teplotní kontext, který může lépe vystihovat stabilně teplé nebo chladné období než teplota jednoho dne. Proměnné SRA_roll3 a SRA_roll7 zachycují kumulativní vláhový kontext předcházejících dní, který může mít odlišný význam než samotný denní úhrn srážek. Krátkodobé srážky mohou omezovat letovou aktivitu, zatímco vláha akumulovaná v předchozích dnech může podporovat vegetační aktivitu a produkci nektaru. Proměnné VPD_roll3 a VPD_roll7 pak vyjadřují přetrvávající charakter atmosférické suchosti nebo vlhkosti.

Kromě klouzavých průměrů byly vytvořeny také zpožděné proměnné. SRA_lag1 popisuje srážky předchozího dne, které mohou ovlivnit aktuální dostupnost a koncentraci nektaru nebo stav vegetace. FAVG_lag1 zachycuje průměrnou rychlost větru předchozího dne, která může souviset s přetrvávajícími nepříznivými podmínkami pro letovou aktivitu. Tyto proměnné byly zahrnuty proto, aby model mohl zohlednit i krátkodobé opožděné reakce včelstev a vegetace na meteorologický průběh.

Přehled a kontext všech meteorologických proměnných popisuje Tabulka 3

Tabulka 3 Skupiny a kontext meteorologických proměnných

Skupina proměnných	Proměnné	Význam pro interpretaci snůšky
Základní denní proměnné	TAVG, TMA, TMI, SRA, HAVG, SSV, FAVG	Aktuální meteorologické podmínky daného dne
Fenologické proměnné	SET5	Postup vegetační sezóny a akumulace tepla
Atmosférické proměnné	VPD	Kombinovaný vliv teploty a vlhkosti, důležité pro hustotu nektaru
Klouzavé průměry	TAVG_roll3, TAVG_roll7, SSV_roll3, SSV_roll7, SRA_roll3, SRA_roll7, VPD_roll3, VPD_roll7	Krátkodobě přetrvávající charakter počasí
Zpožděné proměnné	SRA_lag1, FAVG_lag1	Vliv meteorologických podmínek předchozího dne

Základní sezónní průběh meteorologických proměnných byl vzhledem k relativní blízkosti obou lokalit podobný. Rozdíly mezi stanovišti se projevily především v konkrétních denních hodnotách jednotlivých proměnných a v jejich souvislosti s rozdílným krajinným a fenologickým kontextem. Meteorologické podmínky proto nebyly interpretovány samostatně, ale jako jedna ze složek širšího systému faktorů ovlivňujících denní snůšku.

Vytvořená sada meteorologických a odvozených proměnných umožnila zachytit nejen aktuální podmínky daného dne, ale také postup vegetační sezóny, vlhkostně-teplotní charakter vzduchu, krátkodobě přetrvávající průběh počasí a možné opožděné účinky vybraných proměnných. Tato kombinace proměnných následně vytvořila vstupní základ pro prediktivní modelování denní snůšky a pro interpretaci vztahů mezi meteorologickými podmínkami, vegetační dynamikou a hmotnostními změnami úlů.

5.5 Prediktivní modelování denní snůšky

Prediktivní modelování bylo provedeno s cílem ověřit, zda lze denní snůšku sledovaných včelstev popsat pomocí kombinace meteorologických, vegetačních a prostorově odvozených proměnných. Cílovou proměnnou byl denní přírůstek hmotnosti úlu vyjádřený v kg/den. Pro modelování byl použit algoritmus XGBoost, který umožňuje zachytit nelineární vztahy a interakce mezi vstupními proměnnými. Cílem modelování nebylo vytvořit obecně platný predikční systém pro všechna stanoviště, ale vyhodnotit, které proměnné měly v analyzovaném souboru dat nejsilnější vztah k denní snůšce.

Celkem bylo testováno šest variant modelu. První skupinu tvořily modely založené pouze na meteorologických proměnných odvozených z bufferových zón 500 m, 1 km a 2 km. Druhou skupinu tvořily modely, ve kterých byla meteorologická data doplněna o vegetační indexy NDVI ze stejných prostorových úrovní. Výkonnost modelů byla hodnocena pomocí metrik MSE, RMSE, MAE a koeficientu determinace R^2 v rámci desetinásobné křížové validace.

Při interpretaci výsledků je nutné zohlednit rozdílný počet záznamů použitých pro jednotlivé skupiny modelů. Modely založené pouze na meteorologických proměnných byly hodnoceny na 330 záznamech, zatímco modely kombinující meteorologická data s NDVI pracovaly pouze se 146 záznamy. Tento rozdíl byl způsoben omezenou dostupností satelitních dat a následně odvozených hodnot NDVI. Výsledky modelů s NDVI proto nejsou přímo srovnatelné s čistě meteorologickými modely ve smyslu jednoznačného zlepšení predikce po přidání vegetačních indexů. Jsou interpretovány jako samostatné varianty modelování nad menším datovým subsetem, které ukazují potenciální přínos vegetačních informací v období, pro které byly hodnoty NDVI dostupné.

Tabulka 4 Přehled metrik modelů

Model	Vstupní data	Počet záznamů	MSE	RMSE [kg/den]	MAE [kg/den]	R ²
meteo_500m	meteorologická data 500 m	330	0,954	0,977	0,609	0,710
meteo_1000m	meteorologická data 1000 m	330	0,948	0,974	0,604	0,712
meteo_2000m	meteorologická data 2000 m	330	0,936	0,967	0,602	0,715
meteo_500m + NDVI	meteorologická data 500 m + NDVI	146	0,948	0,974	0,595	0,714
meteo_1000m + NDVI	meteorologická data 1000 m + NDVI	146	0,924	0,961	0,585	0,746
meteo_2000m + NDVI	meteorologická data 2000 m + NDVI	146	0,952	0,976	0,594	0,713

Modely využívající pouze meteorologická data dosáhly velmi podobné predikční přesnosti. Hodnoty R² se pohybovaly v úzkém rozmezí 0,710–0,715 a hodnoty RMSE mezi 0,967 a 0,977 kg/den. Nejlepší výsledek z čistě meteorologických modelů dosáhla varianta meteo_2000m s hodnotou R² = 0,715 a RMSE = 0,967 kg/den. Rozdíly mezi meteorologickými modely byly malé, což naznačuje, že samotná změna velikosti bufferu meteorologických vstupů v rozsahu 500–2000 m neměla v analyzovaném souboru dat zásadní vliv na predikční přesnost.

Modely doplněné o NDVI dosáhly rozdílných výsledků podle použité bufferové zóny. Nejvyšší přesnosti ze všech testovaných variant dosáhl model meteo_1000m + NDVI s hodnotou R² = 0,746, RMSE = 0,961 kg/den a MAE = 0,585 kg/den. Tento model byl proto zvolen jako referenční pro další interpretaci pomocí důležitosti proměnných, SHAP hodnot a ICE/PDP křivek. Vzhledem k menšímu počtu záznamů u modelů s NDVI však tento

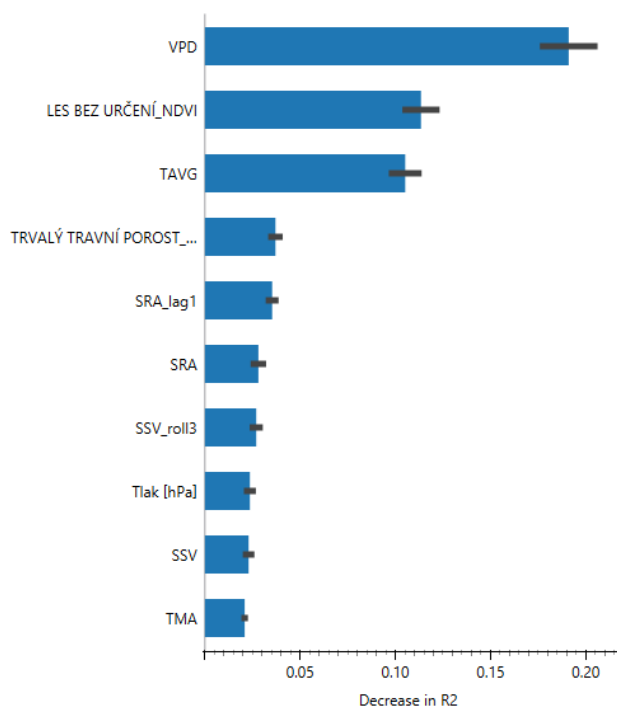
výsledek nelze chápat jako jednoznačný důkaz obecného zlepšení predikce po přidání vegetačních indexů. Spíše naznačuje, že vegetační indexy mohou v období své dostupnosti poskytovat doplňující informaci o fenologickém a krajinném kontextu snůšky.

Důležitost vstupních proměnných

Analýza důležitosti vstupních proměnných referenčního modelu meteo_1000m + NDVI ukázala, že nejvýznamnější proměnnou byl výparný deficit vzduchu. VPD dosáhlo nejvyššího významu při hodnocení modelu a mělo výraznější vliv než ostatní vstupní proměnné. Tento výsledek naznačuje, že v analyzovaném souboru dat byla denní snůška silně spojena s kombinovaným vlivem teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

Význam VPD lze interpretovat v souvislosti s tím, že tato proměnná nepopisuje pouze aktuální teplotu nebo vlhkost izolovaně, ale vyjadřuje, do jaké míry je vzduch vzdálen stavu nasycení vodní párou. Ve vztahu ke snůšce je tento ukazatel důležitý, protože souvisí s odpařováním vody z nektaru a tím i s jeho koncentrací a atraktivitou pro včely. Nízké hodnoty VPD mohou odpovídat vlhčím nebo chladnějším podmínkám, kdy je snůšková aktivita omezená, zatímco vyšší hodnoty mohou být spojeny s příznivějšími podmínkami pro letovou aktivitu a sběr.

Další významné proměnné zahrnovaly vegetační indexy vybraných kategorií krajinného pokryvu a proměnné zachycující krátkodobý charakter počasí. Interpretace vegetačních indexů však vyžaduje opatrnost. NDVI konkrétní kategorie krajinného pokryvu nemusí vyjadřovat pouze dostupnost nektaru nebo pylu, ale může zároveň zachycovat širší fenologický vývoj lokality, sezónní průběh vegetace nebo prostorovou příslušnost záznamu ke konkrétnímu stanovišti. Význam těchto proměnných proto nelze chápat jako přímý důkaz kauzálního vlivu konkrétního typu porostu na snůšku, ale jako indikaci toho, že model využíval vegetační a fenologickou informaci obsaženou v datech.



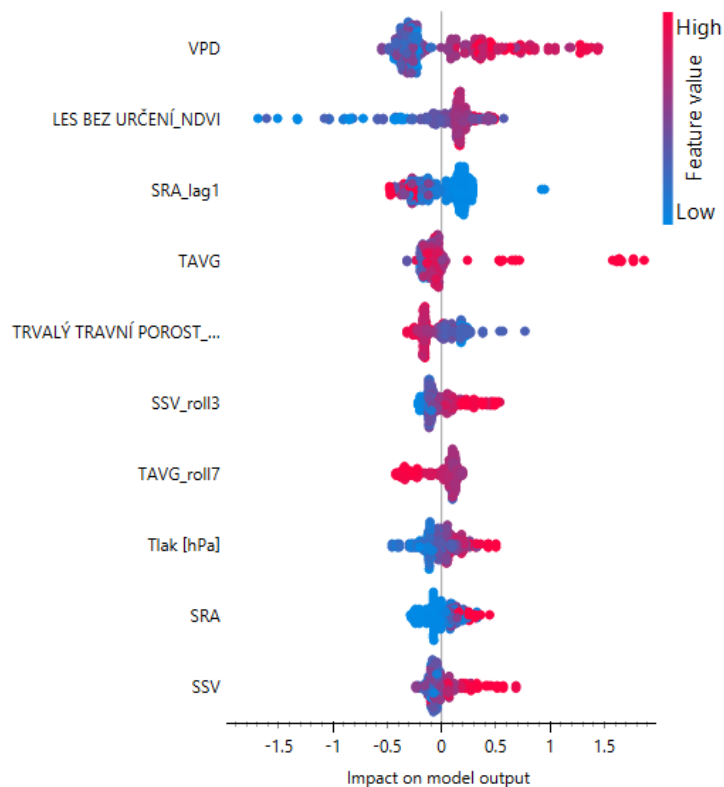
Obr. 26 Důležitost proměnných v referenčním modelu

Interpretace modelu pomocí SHAP hodnot

Pro podrobnější interpretaci referenčního modelu byly využity SHAP hodnoty. Ty umožňují posoudit, jak jednotlivé proměnné přispívaly k výsledné predikci modelu u konkrétních záznamů. Kladné hodnoty SHAP zvyšují predikovanou denní snůšku, zatímco záporné hodnoty ji snižují.

SHAP analýza potvrdila dominantní význam VPD. Nízké hodnoty VPD byly v modelu spojeny s nízkými nebo zápornými příspěvky k predikované snůšce. Vyšší hodnoty VPD naopak přispívaly k vyšší predikované snůšce, avšak vztah nebyl čistě lineární. To naznačuje, že snůška nereagovala na změny VPD rovnoměrně v celém rozsahu hodnot, ale spíše prahově nebo nelineárně.

SHAP hodnoty dále ukázaly, že model při predikci denní snůšky využíval nejen aktuální meteorologické hodnoty, ale také proměnné popisující krátkodobě přetrvávající charakter počasí a vegetační stav krajiny. To odpovídá předpokladu, že denní snůška nemusí být ovlivněna pouze podmínkami konkrétního dne, ale také průběhem počasí a vegetačního vývoje v předchozím období.

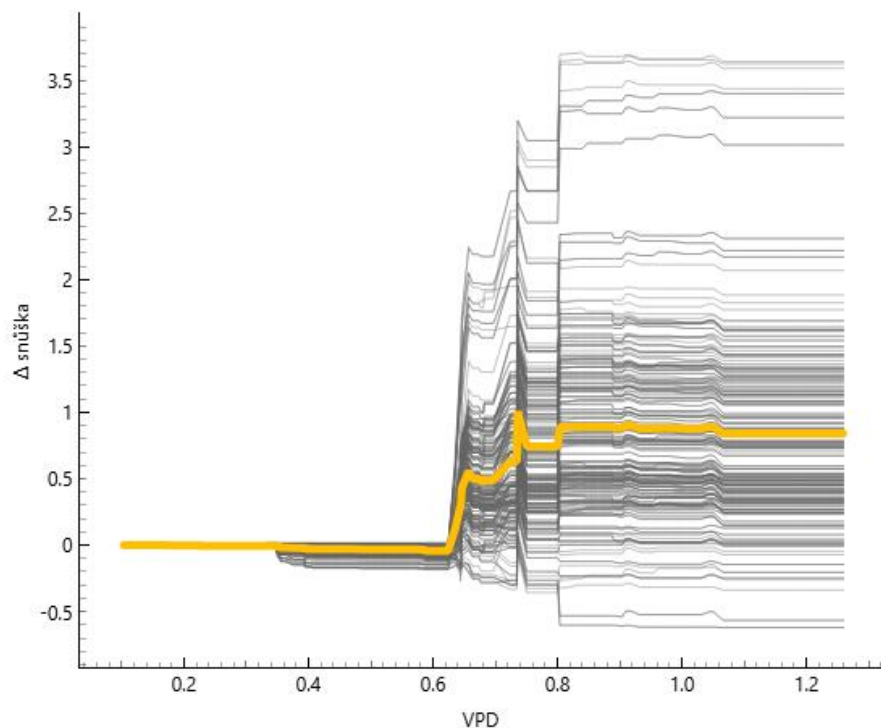


Obr. 27 SHAP graf referenčního modelu

Prahové vztahy podle ICE/PDP křivek

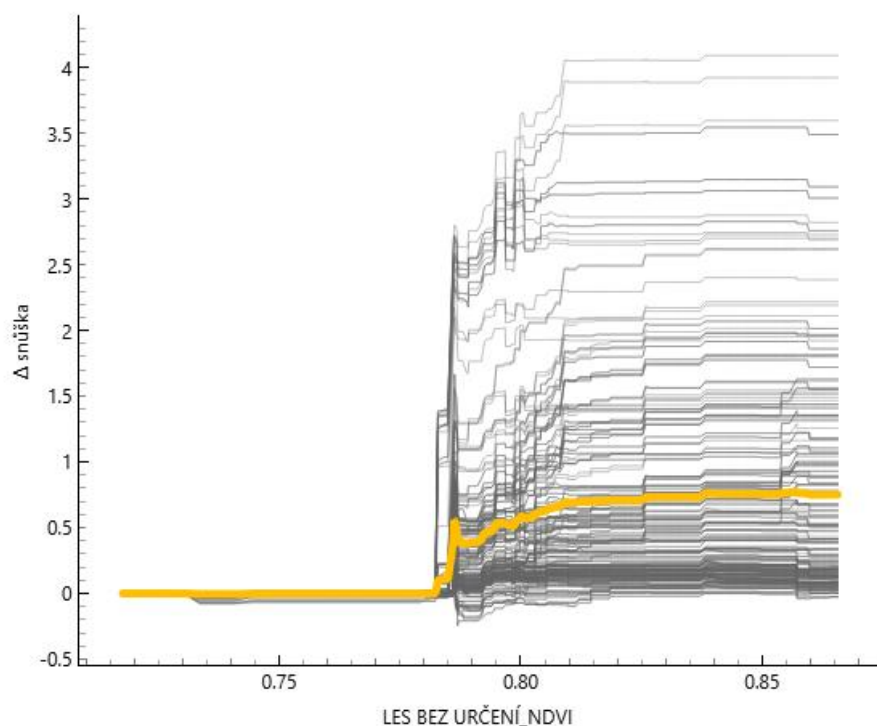
Křivky ICE a PDP byly využity pro identifikaci nelineárních a prahových vztahů mezi vybranými proměnnými a predikovanou denní snůškou. Nejvýraznější prahový vztah byl zjištěn u výparného deficitu vzduchu. Při hodnotách VPD přibližně pod 0,65 kPa model predikoval nízké až nulové hodnoty denní snůšky. Nad touto hranicí predikovaná snůška narůstala, avšak další růst VPD již nevedl k jednoznačně lineárnímu zvyšování predikované snůšky.

Tento vztah je nutné interpretovat jako modelový výsledek zjištěný v analyzovaném souboru dat, nikoli jako obecně platnou biologickou hranici. Prahová hodnota přibližně 0,65 kPa může sloužit jako orientační indikátor podmínek, při nichž byla v dostupných datech sledována výrazně nižší denní snůška. Nelze ji však bez další validace zobecňovat na jiné lokality, sezóny nebo včelstva.



Obr. 28 Graf PDP - výparný deficit vzduchu

Podobně byly interpretovány také vztahy u dalších významných proměnných, například teploty vzduchu, slunečního svitu nebo vybraných vegetačních indexů. U těchto proměnných byly patrné nelineární odezvy, jejich interpretace však byla méně jednoznačná než u VPD. Výsledky proto ukazují, že jednotlivé meteorologické nebo vegetační ukazatele nevysvětlují průběh snůšky izolovaně, ale v kombinaci s dalšími proměnnými.



Obr. 29 Graf PDP - LES BEZ URČENÍ_NDVI

6 DISKUZE

Předložená diplomová práce analyzovala vztah mezi daty z úlových vah a teplotních senzorů a lokálními environmentálními podmínkami na dvou stanovištích v Olomouckém kraji v průběhu sezóny 2024. Kondice sledovaných včelstev byla konzultována s vlastníkem a odborným konzultantem práce, Mgr. Jiřím Danihlíkem, Ph.D. Podle jeho hodnocení nevykazovala včelstva v průběhu sledovaného období zjevné zdravotní komplikace, které by zásadně ovlivnily interpretaci hmotnostních a teplotních záznamů. Toto hodnocení bylo v souladu s dostupnými senzorickými daty, protože úlové teploty vykazovaly konzistentní průběh odpovídající udržování stabilního teplotního režimu v období plodování a kumulativní snůšky dosáhly hodnot odpovídajících produktivním včelstvům.

Přesto je nutné zdůraznit, že zdravotní stav včelstev nebyl v této práci hodnocen ve veterinárním nebo diagnostickém smyslu. Práce nepracovala s přímými údaji o napadení kleštíkem včelím, výskytu patogenů, množství plodu, síle včelstva ani laboratorními rozbory. Interpretace zdravotního stavu proto vycházela pouze z nepřímých senzorických ukazatelů, zejména z průběhu hmotnosti úlů, denní snůšky, úlové teploty a termoregulační stability. Stabilní udržování teploty v prostoru plodového hnízda je v literatuře popisováno jako významný projev aktivního chovu plodu a funkční termoregulace včelstva (Zacepíns et al., 2016; Arias-Calluari et al., 2025). Výsledky práce je proto vhodné chápat jako hodnocení funkční kondice a produkční odezvy včelstev v daných stanovištních podmínkách, nikoli jako přímou diagnostiku jejich zdravotního stavu.

Hmotnostní změny úlů zároveň nelze jednoznačně přičítat pouze environmentálním podmínkám. Denní přírůstky a poklesy hmotnosti jsou výsledkem kombinace více faktorů,

mezi které patří dostupnost potravních zdrojů, aktuální meteorologické podmínky, síla včelstva, množství plodu, zásoby, včelařské zásahy a další nepozorované vlivy. Environmentální proměnné analyzované v této práci proto představují významnou, ale nikoli jedinou část faktorů ovlivňujících průběh denní snůšky.

Výsledky práce ukázaly výrazný kontrast mezi lokalitami Černotín a Hrádky. Lokalita Černotín vykazovala vyšší celkový sezónní přírůstek hmotnosti, avšak snůška zde měla kratší a více impulsivní charakter. Lokalita Hrádky naopak dosáhla nižšího celkového přírůstku, ale snůška zde probíhala po delší období a měla rovnoměrnější průběh. Tento rozdíl byl v analyzované sezóně spojen s odlišným krajinným a plodinovým kontextem obou stanovišť. Černotín byl charakterizován vyšším zastoupením orné půdy a výraznou koncentrací nektarodárného potenciálu do řepky ozimé, zatímco Hrádky vykazovaly pestřejší bezprostřední okolí s vyšším podílem trvalých travních porostů, sadů a zahrad.

Tento výsledek odpovídá poznatkům uvedeným v rešeršní části práce, podle nichž krajinná struktura ovlivňuje nejen množství dostupných potravních zdrojů, ale také jejich časové rozložení. Zemědělská krajina s rozsáhlými plochami kvetoucích plodin může poskytovat intenzivní snůšku v krátkém období, avšak po odkvětu dominantní plodiny může následovat omezení potravní nabídky. Naopak pestřejší krajina s vyšším zastoupením různých vegetačních prvků může poskytovat zdroje rozložené do delší části sezóny (Lecocq et al., 2015; Westphal et al., 2009; Czekońska et al., 2023). Výsledky této práce tomuto obecnému předpokladu odpovídají, avšak vzhledem k omezenému počtu lokalit a jedné analyzované sezóně je nelze zobecňovat na všechny typy zemědělské a diverzifikované krajiny.

Dominance řepky ozimé v okolí Černotína může být jedním z faktorů souvisejících s intenzivním jarním průběhem snůšky. Řepka představuje významný zdroj nektaru a pylu, ale její přínos je časově omezen obdobím kvetení (Westphal et al., 2009). Po skončení kvetení dominantní plodiny může v intenzivně zemědělské krajině dojít k poklesu dostupnosti zdrojů, pokud nejsou v okolí zastoupeny další nektarodárné plodiny nebo přírodě blízké vegetační prvky. Hrádky měly sice nižší celkovou rozlohu plodin s nektarodárným potenciálem, ale pestřejší skladba krajinných prvků a širší spektrum potenciálních zdrojů mohly přispívat k časově rozloženější dostupnosti potravy.

Fenologická dynamika vegetace zachycená pomocí NDVI doplnila prostorovou analýzu krajiny o časový rozměr. Časové řady NDVI ukázaly, že jednotlivé kategorie krajinného pokryvu se lišily sezónním průběhem vegetační aktivity. Orná půda vykazovala výraznější sezónní amplitudu, zatímco lesní porosty, trvalé travní porosty, sady a zahrady měly stabilnější průběh. Tyto rozdíly mohou pomoci vysvětlit, proč samotná plocha určité krajinné kategorie není dostatečná pro interpretaci snůšky. Důležitý je také časový průběh vegetační aktivity a její návaznost na období dostupnosti nektaru a pylu.

Význam vegetačních indexů je však nutné interpretovat opatrně. NDVI zachycuje především množství a vitalitu zelené biomasy, nikoli přímo produkci nektaru, pylu nebo medovice. Pokud se v modelu projevilo NDVI lesních porostů jako významná proměnná, nelze z toho vyvozovat, že lesní porosty samy o sobě přímo zvyšovaly denní snůšku. Tato proměnná mohla odrážet širší fenologický stav vegetace, sezónní vývoj krajiny, mikroklimatický kontext nebo rozdíly mezi lokalitami. V tomto smyslu je vhodnější chápat NDVI jako doplňkový indikátor vegetačního a prostorového kontextu, nikoli jako přímý ukazatel množství dostupné snůšky.

Meteorologické proměnné představovaly druhou hlavní skupinu faktorů vstupujících do interpretace denní snůšky. Výsledky modelování ukázaly, že nejvýznamnější proměnnou referenčního modelu byl výparný deficit vzduchu. VPD kombinuje vliv teploty a relativní vlhkosti vzduchu a vyjadřuje, do jaké míry je vzduch vzdálen stavu nasycení vodní párou.

Ve vztahu ke snůšce je tento ukazatel biologicky dobře interpretovatelný, protože souvisí s odpařováním vody z nektaru a tím i s jeho koncentrací. V rešeršní části bylo uvedeno, že VPD může významně souviset s koncentrací cukrů v nektaru (Chabert et al., 2020).

Modelové výsledky naznačily, že při nízkých hodnotách VPD byla predikovaná denní snůška velmi nízká nebo blízká nule. Identifikovaná hodnota přibližně 0,65 kPa však musí být chápána pouze jako orientační prah zjištěný v analyzovaném souboru dat. Nelze ji považovat za obecně platnou biologickou hranici pro včelstva nebo pro produkci nektaru. Tato hodnota může být ovlivněna průběhem sezóny 2024, vlastnostmi sledovaných lokalit, rozsahem dat i použitým modelovacím postupem. Pro její případné zobecnění by bylo nutné ověření na dalších lokalitách, sezónách a nezávislých datových souborech.

Vedle VPD se v modelování uplatnily také proměnné zachycující krátkodobý charakter počasí, například klouzavé průměry slunečního svitu, teploty, srážek nebo VPD. Jejich význam odpovídá předpokladu, že denní snůška nemusí reagovat pouze na podmínky konkrétního dne, ale také na průběh počasí v předchozích dnech. Letová aktivita včel, produkce nektaru i jeho dostupnost mohou být ovlivněny kombinací teploty, slunečního svitu, srážek, vlhkosti a dalších meteorologických faktorů (Clarke a Robert, 2018; Czekońska et al., 2023; Vincze et al., 2025). Zahrnutí klouzavých a zpožděných proměnných proto představovalo vhodný způsob, jak zachytit krátkodobě přetrvávající meteorologický kontext.

Z hlediska prediktivního modelování bylo možné denní snůšku v analyzovaném souboru dat popsat s relativně dobrou přesností. Čistě meteorologické modely dosáhly podobných výsledků napříč testovanými bufferovými zónami, což naznačuje, že změna prostorového měřítka meteorologických vstupů mezi 500 m, 1 km a 2 km neměla na přesnost modelu zásadní vliv. Nejvyšší hodnoty R^2 dosáhl model meteo_1000m + NDVI, který byl dále použit jako referenční model pro interpretaci.

Tento výsledek je však nutné hodnotit opatrně. Modely založené pouze na meteorologických proměnných byly hodnoceny na 330 záznamech, zatímco modely kombinující meteorologická data s NDVI pracovaly pouze se 146 záznamy. Tento rozdíl byl způsoben omezenou dostupností satelitních dat a následně odvozených hodnot NDVI. Vyšší přesnost modelu meteo_1000m + NDVI proto nelze chápat jako jednoznačný důkaz, že přidání vegetačních indexů obecně zvyšuje přesnost predikce denní snůšky. Vhodnější je interpretovat tento výsledek jako indikaci možného přínosu vegetačních informací v období, pro které byly dostupné.

Modelové vztahy identifikované pomocí SHAP, ICE a PDP křivek poskytly užitečný pohled na chování referenčního modelu, ale nelze je chápat jako důkaz přímého kauzálního působení jednotlivých proměnných. Tyto metody ukazují, jak model využíval vstupní proměnné při predikci denní snůšky, nikoli to, zda daná proměnná sama o sobě biologicky způsobila pozorovaný přírůstek hmotnosti. Přínos těchto metod spočívá především v tom, že umožňují identifikovat nelineární vztahy, orientační prahové hodnoty a proměnné, které byly pro model významné. Výsledky interpretace modelu proto slouží spíše k porozumění modelovým vztahům než k formulaci obecných biologických zákonitostí.

Samostatným metodickým omezením je způsob validace modelu. Desetinásobná křížová validace poskytuje základní odhad predikční přesnosti, avšak u časově a prostorově strukturovaných dat může vést k optimističtějším výsledkům. Záznamy ze stejné lokality, stejného úlu nebo blízkého časového období mohou být současně zastoupeny v trénovací i testovací části. Model tak může částečně využívat podobnost sousedních dnů nebo lokálně specifické vlastnosti dat. V navazujícím výzkumu by proto bylo vhodné ověřit predikční schopnost modelu také pomocí blokové validace, například vynecháním celé lokality, konkrétního úlu nebo časového období.

Významným omezením práce je rozsah dostupných dat. Analýza byla provedena pouze na dvou lokalitách, čtyřech úlech a jedné hlavní sezóně. Takový rozsah umožňuje podrobně popsat rozdíly mezi sledovanými stanovišti a ověřit metodický postup propojení dat, ale neumožňuje plnou generalizaci výsledků. Zjištěné vztahy mohou být ovlivněny specifickým průběhem sezóny 2024, konkrétním stavem sledovaných včelstev i vlastnostmi daných lokalit. Pro ověření stability výsledků by bylo vhodné rozšířit analýzu na více let, více stanovišť a větší počet včelstev.

Dalším omezením je absence přímých dat o skutečné dostupnosti nektaru a pylu v terénu. Krajinový a fenologický kontext byl hodnocen prostřednictvím prostorových dat, deklarovaných plodin LPIS a vegetačních indexů Sentinel-2. Tyto zdroje umožňují popsat strukturu krajiny a vegetační dynamiku, ale nezachycují přímo množství dostupného nektaru, pylu ani medovice. Podobně binární hodnocení nektarodárného potenciálu plodin zjednodušuje skutečnou variabilitu mezi druhy, odrůdami, agrotechnickými postupy a aktuálními meteorologickými podmínkami. Do budoucna by bylo vhodné propojit tento přístup s terénním ověřením fenologických fází, skutečného kvetení a případně i dostupnosti snůškových zdrojů.

Práce současně nehodnotila vliv pesticidů, konkurenci jiných včelstev, přesné včelařské zásahy ani detailní sílu jednotlivých kolonií. Tyto faktory mohou ovlivňovat denní hmotnostní změny úlů a mohou být významné zejména v intenzivně zemědělské krajině. Jejich nezahrnutí neznamená, že nejsou důležité, ale že nebyly dostupné v podobě použitelných datových vrstev nebo časových záznamů. Výsledky je proto nutné interpretovat jako vztahy mezi dostupnými environmentálními proměnnými a denní snůškou, nikoli jako úplné vysvětlení všech faktorů ovlivňujících výkonnost včelstev.

Navzdory uvedeným omezením práce ukazuje, že propojení úlových vah, meteorologických dat, satelitních vegetačních indexů a prostorových dat může rozšířit interpretaci senzorických záznamů z včelstev. Tento přístup odpovídá širšímu směřování precizního včelařství, které využívá kontinuální monitoring a propojení senzorických a environmentálních dat pro lepší porozumění stavu a vývoji včelstev (Zacepíns et al., 2015; Kviesis et al., 2020). Samotná hmotnostní křivka úlu poskytuje informaci o tom, kdy k přírůstkům nebo poklesům dochází, ale její propojení s počasím, fenologií a krajinovým kontextem umožňuje tyto změny interpretovat v širších souvislostech.

Do budoucna by bylo vhodné rozšířit analýzu o delší časové řady, více lokalit a nezávislou validaci modelu. Přínosné by bylo také zahrnutí dalších datových zdrojů, například detailnějších fenologických pozorování, informací o včelařských zásazích, zdravotním stavu včelstev, výskytu medovice, používání pesticidů nebo hustotě okolních včelstev. Takové rozšíření by umožnilo lépe oddělit vliv krajinových, meteorologických a biologických faktorů a posoudit, nakolik jsou zjištěné vztahy stabilní napříč různými sezónami a typy krajiny.

7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat vztahy mezi vývojem úlových vah, stanovištními podmínkami a dostupností nektarových a pylových zdrojů v okolí včelnic ve vztahu ke kondici sledovaných včelstev. Práce propojila senzorická data z úlových vah systému VeluBee, meteorologická rastrová data projektu Agropočasí.cz, satelitní snímky Sentinel-2 a prostorová data ZABAGED a LPIS. Analýza byla provedena pro dvě stanoviště v Olomouckém kraji, Černotín a Hrádky, za sezónu 2024.

V práci byl vytvořen metodický postup umožňující propojit hmotnostní a teplotní záznamy z úlů s meteorologickými, vegetačními a prostorovými proměnnými. V rámci zpracování byla identifikována hlavní snůšková období, začátek plodování, výběry medu a denní hmotnostní změny úlů. Následně byl zhodnocen krajinný kontext obou stanovišť, dostupnost plodin s nektarodárným potenciálem, fenologická dynamika vegetace pomocí NDVI a průběh meteorologických a odvozených proměnných.

Výsledky ukázaly výrazný rozdíl mezi sledovanými lokalitami. Černotín byl charakterizován vyšším zastoupením orné půdy a výraznou vazbou nektarodárného potenciálu na řepku ozimou. Tomu odpovídal vyšší, ale časově koncentrovanější průběh snůšky. Hrádky měly v bezprostředním okolí pestřejší krajinnou strukturu s vyšším zastoupením trvalých travních porostů, sadů a zahrad. Snůška zde byla nižší, ale probíhala déle a rovnoměrněji. Tyto výsledky naznačují, že rozdílný krajinný a plodinový kontext může souviset s odlišným charakterem snůšky, nelze jej však na základě dvou lokalit a jedné sezóny interpretovat jako obecně platný kauzální vztah.

Meteorologická analýza ukázala význam proměnných zachycujících nejen aktuální podmínky daného dne, ale také krátkodobý a kumulativní průběh počasí. Důležitou odvozenou proměnnou byl výparný deficit vzduchu, který kombinuje vliv teploty a relativní vlhkosti vzduchu. V prediktivním modelování se VPD ukázal jako nejvýznamnější proměnná referenčního modelu. Modelové křivky naznačily pokles predikované snůšky při hodnotách VPD přibližně pod 0,65 kPa. Tuto hodnotu je však nutné chápat pouze jako orientační práh zjištěný v analyzovaném souboru dat, nikoli jako obecně platnou biologickou hranici.

Prediktivní modelování bylo provedeno metodou XGBoost. Čistě meteorologické modely dosáhly podobné přesnosti napříč bufferovými zónami 500 m, 1 km a 2 km. Nejvyšší hodnoty R^2 dosáhl model kombinující meteorologická data z 1 km bufferu s vegetačními indexy NDVI. Tento výsledek však musí být interpretován opatrně, protože modely s NDVI pracovaly s menším počtem záznamů než čistě meteorologické modely. Přidání NDVI proto nelze chápat jako jednoznačný důkaz obecného zlepšení predikční přesnosti, ale spíše jako indikaci možného přínosu vegetačních informací v období, pro které byly satelitní hodnoty dostupné.

Interpretace modelu pomocí důležitosti proměnných, SHAP hodnot a ICE/PDP křivek umožnila identifikovat hlavní modelové vztahy mezi vstupními proměnnými a denní snůškou. Tyto vztahy však nelze chápat jako důkaz přímého kauzálního působení jednotlivých faktorů. Ukazují především to, jak model využíval dostupné proměnné při predikci denních hmotnostních změn úlů. Přesto poskytují užitečný podklad pro interpretaci vztahů mezi počasím, fenologickým vývojem vegetace, krajinným kontextem a snůškovou aktivitou.

Zdravotní stav včelstev nebyl v práci hodnocen diagnosticky. Dostupná data neobsahovala přímé údaje o napadení kleštikem včelím, výskytu patogenů, množství plodu ani laboratorní ukazatele. Kondice včelstev proto byla posuzována nepřímou prostřednictvím

průběhu hmotnosti úlů, denní snůšky, úlové teploty a termoregulační stability. Výsledky tak umožňují hodnotit funkční projevy vitality a produktivity včelstev, nikoli jednoznačně určovat příčiny případných zdravotních problémů.

Hlavním limitem práce je omezený rozsah dat. Analýza vycházela ze dvou lokalit, čtyř úlů a jedné hlavní sezóny. Výsledky proto nelze bez dalšího ověření zobecňovat na jiné oblasti, roky nebo typy krajiny. Dalšími omezeními jsou absence přímých terénních dat o skutečné dostupnosti nektaru a pylu, chybějící informace o pesticidní zátěži, konkurenci jiných včelstev, přesné síle kolonií a detailních včelařských zásazích. Pro ověření stability zjištěných vztahů by bylo vhodné rozšířit analýzu na více sezón, více stanovišť a větší počet úlů a využít také nezávislou validaci modelu.

Přínosem práce je návrh a ověření geoinformatického postupu, který propojuje data z úlových vah s meteorologickými, satelitními a prostorovými daty. Tento přístup umožňuje interpretovat senzorická data z úlů v širším environmentálním kontextu a může sloužit jako základ pro další výzkum v oblasti precizního včelařství. Výsledky práce ukazují, že kombinace úlových vah, meteorologických dat, vegetačních indexů a prostorové analýzy krajiny má potenciál přispět k lepšímu hodnocení stanovištních podmínek včelstev a k podpoře rozhodování včelařů.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

ALLEN, Richard G; Luis S PEREIRA; Dirk RAES a Martin SMITH, 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.

AMDAM, Gro V.; Erin FENNERN a Heli HAVUKAINEN, 2012. Vitellogenin in Honey Bee Behavior and Lifespan. In: C. Giovanni GALIZIA; Dorothea EISENHARDT a Martin GIURFA, ed. *Honeybee Neurobiology and Behavior: A Tribute to Randolf Menzel*. Online. Dordrecht: Springer Netherlands, s. 17–29 [vid. 2026-04-20]. ISBN 978-94-007-2099-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-007-2099-2_2

AMDAM, Gro Vang a Stig W. OMHOLT, 2002. The Regulatory Anatomy of Honeybee Lifespan. *Journal of Theoretical Biology*. Online. **216**(2), 209–228. ISSN 0022-5193. Dostupné z: doi:10.1006/jtbi.2002.2545

ARIAS-CALLUARI, Karina; Theotime COLIN; Tanya LATTY; Mary MYERSCOUGH a Eduardo G. ALTMANN, 2025. *Assessing Honey Bee Colony Health Using Temperature Time Series*. Online. 31. květen 2025. Neuvedeno: arXiv. [vid. 2025-09-20]. Dostupné z: doi:10.48550/arXiv.2506.00602

BLETTLER, Diego C.; José A. BIURRUN-MANRESA a Guillermina A. FAGÚNDEZ, 2022. A review of the effects of agricultural intensification and the use of pesticides on honey bees and their products and possible palliatives. *Spanish Journal of Agricultural Research*. Online. **20**(4), e03R02-e03R02. ISSN 2171-9292. Dostupné z: doi:10.5424/sjar/2022204-19516

CLARKE, Dominic a Daniel ROBERT, 2018. Predictive modelling of honey bee foraging activity using local weather conditions. *Apidologie*. Online. **49**(3), 386–396. ISSN 1297-9678. Dostupné z: doi:10.1007/s13592-018-0565-3

CZEKOŃSKA, Krystyna; Sylwia ŁOPUCH a Stanisław MIŚCICKI, 2023. The effect of meteorological and environmental variables on food collection by honey bees (*Apis mellifera*). *Ecological Indicators*. Online. **156**, 111140. ISSN 1470160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2023.111140

ČAVOJSKÝ, Valent, 1981. *Včelárstvo*. Bratislava: Příroda.

ČECH, Štěpán, 2025. *HODNOCENÍ VLIVU VÝVOJE KLIMATU NA ÚSPĚŠNOST ZIMOVÁNÍ VČELSTEV VČELY MEDONOSNÉ V ČESKU*. Olomouc. Univerzita Palackého v Olomouci.

DANNER, Nadja; Stephan HÄRTEL a Ingolf STEFFAN-DEWENTER, 2014. Maize pollen foraging by honey bees in relation to crop area and landscape context. *Basic and Applied Ecology*. Online. **15**(8), 677–684. ISSN 1439-1791. Dostupné z: doi:10.1016/j.baae.2014.08.010

DONKERSLEY, Philip, 2019. Trees for bees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Online. **270–271**, 79–83. ISSN 0167-8809. Dostupné z: doi:10.1016/j.agee.2018.10.024

EILERS, Paul H. C., 2003. A Perfect Smoother. *Analytical Chemistry*. Online. **75**(14), 3631–3636. ISSN 0003-2700, 1520-6882. Dostupné z: doi:10.1021/ac034173t

FARKAS, Ágnes a Edit ZAJÁ CZ, 2007. Nectar Production for the Hungarian Honey Industry.

FITZGERALD, Darren W.; Fiona Edwards MURPHY; William M. D. WRIGHT; Pádraig M. WHELAN a Emanuel M. POPOVICI, 2015. Design and development of a smart weighing

scale for beehive monitoring. In: *2015 26th Irish Signals and Systems Conference (ISSC): 2015 26th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. Online. Carlow, Ireland: IEEE, s. 1–6 [vid. 2026-04-20]. ISBN 978-1-4673-6974-9. Dostupné z: doi:10.1109/ISSC.2015.7163763

FRIEDMAN, Jerome, 2000. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*. Online. **29**. Dostupné z: doi:10.1214/aos/1013203451

GOULSON, Dave a Elizabeth NICHOLLS, 2022. Anthropogenic influences on bee foraging. *Science*. Online. **375**(6584), 970–972. Dostupné z: doi:10.1126/science.abn0185

GRIMALDI, David A. a Michael S. ENGEL, 2005. *Evolution of the insects*. Cambridge [etc.]: Cambridge university press. ISBN 978-0-521-82149-0.

HARAGSIM, Oldřich, 2013. *Včelařské dřeviny a byliny*. Neuvedeno: Grada Publishing a.s. ISBN 978-80-247-4647-0.

CHABERT, Stan; Christopher SÉNÉCHAL; André FOUGEROUX; Jérémy POUSSE; Fabien RICHARD; Emma NOZIÈRES; Olivier GEIST; Vincent GUILLEMARD; Solenne LEYLAVERGNE; Constance MALARD; Alexandre BENOIST; Gabriel CARRÉ; Édith CAUMES; Charlotte CENIER; Alain TREIL; Sébastien DANFLOUS a Bernard E. VAISSIÈRE, 2020. Effect of environmental conditions and genotype on nectar secretion in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *OCL*. Online. **27**, 51. ISSN 2272-6977, 2257-6614. Dostupné z: doi:10.1051/ocl/2020040

CHEN, Tianqi a Carlos GUESTRIN, 2016. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *arXiv.org*. Online [vid. 2026-04-20]. Dostupné z: doi:10.1145/2939672.2939785

KAŇOVSKÁ, Lucie, 2024. The Use of Products with a Monitoring System for Remote Bee Detection in Beekeeping in Czechia. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*. Online. **1**(March), 67–81. ISSN 1804-1930. Dostupné z: doi:10.7160/aol.2024.160106

KARABAGIAS, Ioannis K.; Sofia KARABOURNIOTI; Vassilios K. KARABAGIAS a Anastasia V. BADEKA, 2020. Palynological, physico-chemical and bioactivity parameters determination, of a less common Greek honeydew honey: “dryomelo”. *Food Control*. Online. [vid. 2026-04-17]. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodcont.2019.106940

KAZDA, Jan; Jan BARTOŠKA; Aneta BOKŠOVÁ a Martina STEJSKALOVÁ, 2024. *Využití úlových vah a čipování dělnic RFID čipy ke zjištění vlivu intenzivního zemědělství na včely a čmeláky*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze; Výzkumný ústav včelařský, s.r.o. ISBN 978-80-87196-52-6.

KIMANI, James, 2017. EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON BEE FARMING. A CRITICAL REVIEW OF LITERATURE. *International Journal of Climatic Studies*. Online. **1**(1), 65–73. ISSN 2710-1061. Dostupné z: doi:10.47604/ijcs.1203

KLEIN, Alexandra-Maria; Bernard E. VAISSIÈRE; James H. CANE; Ingolf STEFFAN-DEWENTER; Saul A. CUNNINGHAM; Claire KREMEN a Teja TSCHARNTKE, 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings. Biological Sciences*. Online. **274**(1608), 303–313. ISSN 0962-8452. Dostupné z: doi:10.1098/rspb.2006.3721

KUNC, Martin; Pavel DOBEŠ; Jana HURYCHOVÁ; Libor VOJTEK; Silvana POIANI; Jiří DANIHLÍK; Jaroslav HAVLÍK; Dalibor TITĚRA a Pavel HYRŠL, 2019. The Year of the Honey Bee (*Apis mellifera* L.) with Respect to Its Physiology and Immunity: A Search for Biochemical Markers of Longevity. *Insects*. Online. **10**(8), 244. ISSN 2075-4450. Dostupné z: doi:10.3390/insects10080244

KVIESIS, Armands; Aleksejs ZACEPINS; Sascha FIEDLER; Vitalijs KOMASILOVS a Janis LACEKLIS-BERTMANIS, 2020. AUTOMATED SYSTEM FOR BEE COLONY WEIGHT MONITORING. *AGROFOR*. Online. **5**(2) [vid. 2025-09-21]. ISSN 2490-3442, 2490-3434. Dostupné z: doi:10.7251/AGRENG2002044K

LECOCQ, Antoine; Per KRYGER; Flemming VEJSNÆS a Annette Bruun JENSEN, 2015. Weight Watching and the Effect of Landscape on Honeybee Colony Productivity: Investigating the Value of Colony Weight Monitoring for the Beekeeping Industry. *PLOS ONE*. Online. **10**(7), e0132473. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0132473

MEIKLE, William G.; Brian G. RECTOR; Guy MERCADIER a Niels HOLST, 2008. Within-day variation in continuous hive weight data as a measure of honey bee colony activity. *Apidologie*. Online. **39**(6), 694–707. ISSN 0044-8435, 1297-9678. Dostupné z: doi:10.1051/apido:2008055

MICHAEL S ENGEL, 1999. *The taxonomy of recent and fossil honey bees (Hymenoptera: Apidae; Apis)*. Online [vid. 2026-04-20]. Dostupné z: <http://archive.org/details/biostor-28973>

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2025. Geoportál: Geoprostorová žádost (GSA) České republiky 2025. *Geoprostorová žádost (GSA) České republiky 2025*. OnlineNeuvedeno: Národní geoportál INSPIRE [vid. 2026-04-20]. Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/php/micka/record/basic/665f4e08-726c-43a1-85f8-397139c0a8017c>

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2026. Data LPIS - SHP za celou ČR. *AgriGIS*. OnlineNeuvedeno: Ministerstvo zemědělství [vid. 2026-04-20]. Dostupné z: <https://agrigis.gov.cz/portal/apps/storymaps/stories/99ddc665f57a4843b878e86c23e99b31>

MOŽNÝ, Martin; Martin OPATRŇÝ; Lenka HÁJKOVÁ; Vojtěch VLACH; Adéla MUSILOVÁ; Veronika OUŠKOVÁ; Luboš TÜRKTOTT a Vera POTOPOVÁ, 2023. *Webová aplikace Agropočasí*. Certifikovaná metodika. Praha: Český hydrometeorologický ústav; Česká zemědělská univerzita.

NEOV, Boyko; Ani GEORGIEVA; Rositsa SHUMKOVA; Georgi RADOSLAVOV a Peter HRISTOV, 2019. Biotic and Abiotic Factors Associated with Colonies Mortalities of Managed Honey Bee (*Apis mellifera*). *Diversity*. Online. **11**(12), 237. ISSN 1424-2818. Dostupné z: doi:10.3390/d11120237

NÜRNBERGER, Fabian; Stephan HÄRTEL a Ingolf STEFFAN-DEWENTER, 2019. Seasonal timing in honey bee colonies: phenology shifts affect honey stores and varroa infestation levels. *Oecologia*. Online. **189**(4), 1121–1131. ISSN 0029-8549, 1432-1939. Dostupné z: doi:10.1007/s00442-019-04377-1

OCHOA, Isidro Zavaleta; Sebastián GUTIERREZ a Francisco RODRÍGUEZ, 2019. Internet of Things: Low Cost Monitoring BeeHive System using Wireless Sensor Network. In: *2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV): 2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*. Online. s. 1–7 [vid. 2026-04-20]. Dostupné z: doi:10.1109/ICEV.2019.8920622

PASQUALE, Garance Di; Marion SALIGNON; Yves Le CONTE; Luc P. BELZUNCES; Axel DECOURTYE; André KRETZSCHMAR; Séverine SUCHAIL; Jean-Luc BRUNET a Cédric ALAUX, 2013. Influence of Pollen Nutrition on Honey Bee Health: Do Pollen Quality and Diversity Matter? *PLOS ONE*. Online. **8**(8), e72016. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0072016

POTTS, Simon G., 2016. *The assessment report on pollinators, pollination and food production: summary for policymakers*. Bonn, Germany: Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. ISBN 978-92-807-3568-0.

REMOLINA, Silvia C. a Kimberly A. HUGHES, 2008. Evolution and mechanisms of long life and high fertility in queen honey bees. *AGE*. Online. **30**(2–3), 177–185. ISSN 0161-9152, 1574-4647. Dostupné z: doi:10.1007/s11357-008-9061-4

REQUIER, Fabrice a S. D. LEONHARDT, 2020. Beyond flowers: including non-floral resources in bee conservation schemes. *Journal of Insect Conservation*. Online. **24**(1) [vid. 2026-04-20]. ISSN 1366-638X. Dostupné z: doi:10.1007/s10841-019-00206-1

ROBUSTILLO, María C.; Carlos J. PÉREZ a María I. PARRA, 2022. Predicting internal conditions of beehives using precision beekeeping. *Biosystems Engineering*. Online. **221**, 19–29. ISSN 15375110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2022.06.006

RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, Samantha; Alfonso Antero GARDEA-BEJAR; Alejandro ROMO-CHACÓN; Jaqueline GARCÍA-HERNÁNDEZ; Humberto GONZÁLEZ-RÍOS a Jesús Antonio OROZCO-AVÍLA, 2024. HIVE TEMPERATURE REGULATION BY HONEYBEES IN RESPONSE TO EXTREME CONDITIONS. *Agrociencia*. Online. [vid. 2025-09-21]. ISSN 2521-9766, 1405-3195. Dostupné z: doi:10.47163/agrociencia.v58i3.3082

RUTSCHMANN, Benjamin; Patrick L. KOHL a Ingolf STEFFAN-DEWENTER, 2023. Foraging distances, habitat preferences and seasonal colony performance of honeybees in Central European forest landscapes. *Journal of Applied Ecology*. Online. **60**(6), 1056–1066. ISSN 1365-2664. Dostupné z: doi:10.1111/1365-2664.14389

SEEHUUS, Siri-Christine; Kari NORBERG; Ulrike GIMSA; Trygve KREKLING a Gro V. AMDAM, 2006. Reproductive protein protects functionally sterile honey bee workers from oxidative stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Online. **103**(4), 962–967. ISSN 0027-8424, 1091-6490. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.0502681103

SOLOVEV, V V, 2020. Influence of weather conditions on the honey productivity of bee colonies in the Valdai district of the Novgorod region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Online. **613**(1), 012142. ISSN 1755-1315. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/613/1/012142

SOUTHWICK, Edward E, 1982. Metabolic energy of intact honey bee colonies. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*. Online. **71**(2), 277–281. ISSN 03009629. Dostupné z: doi:10.1016/0300-9629(82)90400-5

STABENTHEINER, Anton; Helga PRESSL; Thomas PAPST; Norbert HRASSNIGG a Karl CRAILSHEIM, 2003. Endothermic heat production in honeybee winter clusters. *Journal of Experimental Biology*. Online. **206**(2), 353–358. ISSN 0022-0949. Dostupné z: doi:10.1242/jeb.00082

STEFFAN-DEWENTER, Ingolf a Arno KUHN, 2003. Honeybee foraging in differentially structured landscapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. Online. **270**(1515), 569–575. ISSN 0962-8452. Dostupné z: doi:10.1098/rspb.2002.2292

STEINHAEUER, Nathalie; Kelly KULHANEK; Karina ANTÚNEZ; Hannelie HUMAN; Panuwan CHANTAWANNAKUL; Marie-Pierre CHAUZAT a Dennis VANENGELSDORP, 2018. Drivers of colony losses. *Current Opinion in Insect Science*. Online. **26**, Ecology • Parasites/Parasitoids/Biological control, 142–148. ISSN 2214-5745. Dostupné z: doi:10.1016/j.cois.2018.02.004

SWITANEK, Matthew; Karl CRAILSHEIM; Heimo TRUHETZ a Robert BRODSCHNEIDER, 2017. Modelling seasonal effects of temperature and precipitation on honey bee winter

mortality in a temperate climate. *Science of The Total Environment*. Online. **579**, 1581–1587. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.178

THACKERAY, Stephen J.; Timothy H. SPARKS; Morten FREDERIKSEN; Sarah BURTHE; Philip J. BACON; James R. BELL; Marc S. BOTHAM; Tom M. BRERETON; Paul W. BRIGHT; Laurence CARVALHO; Tim CLUTTON-BROCK; Alistair DAWSON; Martin EDWARDS; J. Malcolm ELLIOTT; Richard HARRINGTON; David JOHNS; Ian D. JONES; James T. JONES; David I. LEECH; David B. ROY; W. Andy SCOTT; Matt SMITH; Richard J. SMITHERS; Ian J. WINFIELD a Sarah WANLESS, 2010. Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Global Change Biology*. Online. **16**(12), 3304–3313. ISSN 1365-2486. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02165.x

THUILLER, Wilfried, 2007. Climate change and the ecologist. *Nature*. Online. **448**(7153), 550–552. ISSN 1476-4687. Dostupné z: doi:10.1038/448550a

VERRIER, Elise; Vincent BRETAGNOLLE; Pierrick AUPINEL; Axel DECOURTYE; Mickaël HENRY; François REBAUDO a Fabrice REQUIER, 2024. Semi-natural habitats mitigate the impact of food shortage on honey bees in farmlands. *Science of The Total Environment*. Online. **950**, 175309. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2024.175309

VINCZE, Csilla; Ádám LEELŐSSY; Edit ZAJÁČZ a Róbert MÉSZÁROS, 2025. A review of short-term weather impacts on honey production. *International Journal of Biometeorology*. Online. **69**(2), 303–317. ISSN 0020-7128. Dostupné z: doi:10.1007/s00484-024-02824-0

WANG, Yuan, 2021. *Portrayal of Likely Climate Change Impacts on Beekeeping Based on Earth Observation Data*. Olomouc, Czech Republic. Palacký University Olomouc.

WESTPHAL, C.; I. STEFFAN-DEWENTER a T. TSCHARNTKE, 2009. Mass flowering oilseed rape improves early colony growth but not sexual reproduction of bumblebees. *Journal of Applied Ecology*. Online. **46**(1), 187–193. ISSN 0021-8901, 1365-2664. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2664.2008.01580.x

ZACEPINS, Aleksejs; Valters BRUSBARDIS; Jurijs MEITALOVS a Egils STALIDZANS, 2015. Challenges in the development of Precision Beekeeping. *Biosystems Engineering*. Online. **130**, 60–71. ISSN 1537-5110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2014.12.001

ZACEPINS, Aleksejs; Armands KVIESIS; Egils STALIDZANS; Marta LIEPNIECE a Jurijs MEITALOVS, 2016. Remote detection of the swarming of honey bee colonies by single-point temperature monitoring. *Biosystems Engineering*. Online. **148**, 76–80. ISSN 15375110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.05.012

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 (elektronická volná) **Úlová data**

Příloha 2 (elektronická volná) **Zpracovatelské python skripty dat**

Příloha 3 (elektronická volná) **Použitá Orange workflow**

Příloha 4 (elektronická volná) **Výsledky jednotlivých modelů, jejich SHAP a PDP/ICE**

Příloha 5 (elektronická volná) **Poster**

Popis struktury odevzdávaných digitálních dat na datové úložiště katedry

vstupni_data

ulova_data

ndvi_export

ndyi_export

geoprostor_zadost_2024

ZABAGED_5514

vystupni_data

NetCDF

NDVI_excely

ulova_data_meteo

python_skripty

orange_workflow

modely

meteo_500m

meteo_500m + NDVI

meteo_1000m

meteo_1000m + NDVI

meteo_2000m

meteo_2000m + NDVI

metriky_XGBoost

Text_prace

poster

web

assets

docs

UPOZORNĚNÍ: Vstupní meteorologické rastry nejsou součástí odevzdávaných digitálních dat z důvodu omezení licenčními podmínkami poskytovatele. Na data „geoprostor_zadost_2024“ a „ZABAGED_5514“ poskytované [ČÚZK](#) se vztahují podmínky licence [Creative Commons CC BY 4.0](#).