



Bakalářská práce

Morfologická stavba očí hmyzu a jejich adaptace na vnější prostředí

<i>Studijní program:</i>	B0114A300075 Přírodopis se zaměřením na vzdělávání
<i>Studijní obory:</i>	Přírodopis se zaměřením na vzdělávání Matematika se zaměřením na vzdělávání
<i>Autor práce:</i>	Eliška Mänzelová
<i>Vedoucí práce:</i>	RNDr. Adéla Hartlová, Ph.D. Katedra biologie
<i>Konzultanti práce:</i>	Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D. Katedra materiálu Jiří Preisler Česká společnost entomologická

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Morfologická stavba očí hmyzu a jejich adaptace na vnější prostředí

<i>Jméno a příjmení:</i>	Eliška Mänzelová
<i>Osobní číslo:</i>	P20000393
<i>Studijní program:</i>	B0114A300075 Přírodopis se zaměřením na vzdělávání
<i>Specializace:</i>	Přírodopis se zaměřením na vzdělávání Matematika se zaměřením na vzdělávání
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra chemie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši o dostupných poznatcích o očích hmyzu a jejich adaptacích na vnější prostředí.
2. Popište metody sběru suchozemského hmyzu.
3. V terénu zhotovte různé typy pastí a odchyťte minimálně 10 druhů hmyzu. Od každého druhu alespoň 3 jedince.
4. Zařadte odchytený hmyz do systému a pozorujte ho pod binokulární lupou. Proveďte fotodokumentaci.
5. Z odchyteného hmyzu odpreparujte hlavy a zhotovte preparát použitelný pro elektronové mikroskopování.
6. Pozorujte zhotovené preparáty pod elektronovým mikroskopem, pořídte fotodokumentaci a porovnejte tyto preparáty mezi sebou.
7. Na základě získaných poznatků zhotovte atlas očí pozorovaného hmyzu a uveďte závěry ze svého pozorování.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 až 50 normostran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

1. ANDĚRA, Miloš. Atlas fauny České republiky. Ilustroval Jan SOVÁK. Praha: Academia, 2018, 664 s. Atlas (Academia). ISBN 978-80-200-2756-6.
2. MACEK, Jan a kol. Blanokřídílí České republiky. I: Žahadloví. Praha: Academia, 2010. Atlas Academia). ISBN 978-80-200-1890-8.
3. HANEL, Lubomír. Stručný obrazový klíč k určování hlavních skupin suchozemských šestinožců (Hexapoda). Praha: Univerzita Karlova, Pedagogická fakulta, 2018. ISBN 978-80-7603-050-3.
4. KOLIBÁČ, Jiří, Karel HUDEC, Zdeněk LAŠTŮVKA a Milan PEŇÁZ. Příroda České republiky: průvodce faunou. Druhé, upravené a doplněné vydání. Praha: Academia, 2019. ISBN 978-80-200-2993-5.
5. MACEK, Jan, Ladislav ROLLER, Karel BENEŠ, Kamil HOLÝ a Jaroslav HOLUŠA. Blanokřídílí České a Slovenské republiky. Praha: Academia, 2020. Atlas (Academia). ISBN 978-80-200-1890-8.
6. NIEDOBOVÁ, Jana a Pavla ŘEZNÍČKOVÁ. Odchyťové a odběrové metody bezobratlých. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. ISBN 978-80-7375-983-4.

Vedoucí práce: RNDr. Adéla Hartlová, Ph.D.
Katedra biologie

Konzultanti práce: Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.
Katedra materiálu
Jiří Preisler
Česká společnost entomologická

Datum zadání práce: 10. října 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2023

prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.
děkan

L.S.

prof. Ing. Josef Šedlbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. října 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

V prvé řadě bych ráda poděkovala RNDr Adéle Hartlové, Ph.D., za její cennou pomoc a inspiraci při tvorbě mé bakalářské práce. Vážím si jejích odborných rad, pozornosti a připomínek k mé bakalářské práci.

Ráda bych dále vyjádřila své upřímné poděkování Ing. Pavlu Kejzlarovi, Ph.D., za jeho cenný čas a výpomoc při pozorování pomocí elektronového mikroskopu.

Také bych chtěla vyjádřit vděčnost panu Jiřímu Preislerovi za jeho cenné konzultace, čas a ochotu poskytnout důležitou literaturu a kontakty na další relevantní odborníky.

Nakonec bych ráda poděkovala rodině a přátelům, díky kterým jsem bakalářskou práci byla schopna dokončit.

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na morfologickou stavbu očí hmyzu a jejich adaptaci na vnější prostředí. Teoretická část je zaměřena na podrobný popis vnější a vnitřní stavby očí hmyzu. Dále také na popis různých metod odchyty a sběru hmyzu. Praktická část využívá kombinaci experimentálních metod, jako je mikroskopie a obrazová analýza.

Klíčová slova: hmyz, oči, morfologie, vnější prostředí, složené oči, ommatidia, jednoduché oči

Annotation

The bachelor thesis focuses on the morphological structure of insect eyes and their adaptation to the external environment. The theoretical part focuses on a detailed description of the external and internal structure of insect eyes. Furthermore, it also describes the different methods of trapping and collecting insects. The practical part uses a combination of experimental methods such as microscopy and image analysis.

Keywords: insects, eyes, morphology, external environment, compound eyes, ommatidia, simple eyes

Obsah

Úvod.....	13
1 Zrakové orgány hmyzu (orgány vizuální).....	14
1.1 Barevné a tvarové vidění.....	17
2 Základní struktura vizuálních orgánů.....	19
2.1 Rohovka.....	19
2.2 Krystalické tělísko.....	20
2.3 Pigmentové buňky.....	20
2.4 Sítnice.....	21
2.5 Odrazová vrstva.....	21
2.6 Bazální blána.....	22
2.7 Zrakové nervy.....	23
3 Druhy očí hmyzu.....	24
3.1 Jednoduchá očka.....	24
3.1.1 Dorzální ocelli.....	24
3.1.2 Stemmata.....	25
3.2 Složené oči hmyzu.....	25
3.2.1 Evoluce složených očí.....	26
3.3 Ommatidia.....	27
4 Metody sběru různých druhů hmyzu.....	30
4.1 Smýkání.....	30
4.2 Motýlářská síť.....	31
4.3 Vodní pasti.....	31
4.4 Pivní pasti.....	32
4.5 Masové pasti.....	32
4.6 Nárazové pasti.....	32
4.7 Sklepávání hmyzu.....	33
4.8 Manuální odchyt.....	33
4.9 Prosívání.....	34
4.10 Malaiseho past.....	34
4.11 Lov na světlo.....	35
4.12 Lov pomocí feromonů.....	36
4.13 Odběr půdní mezofauny.....	36
4.14 Vysávání.....	36
4.15 Barevné pasti.....	37
4.16 Lepové pasti.....	37
4.17 Další sběrná místa.....	38
5 Oči vybraných druhů hmyzu.....	39
5.1 Slunéčko východní (<i>Harmonia axyridis</i>).....	39
5.2 Sršeň obecná (<i>Vespa crabro</i>).....	39
5.3 Ruměnice pospolná (<i>Pyrrhocoris apterus</i>).....	40
5.4 Mandelinka havezová (<i>Oreina cacaliae</i>).....	41
5.5 Vosa útočná (<i>Vespula germanica</i>).....	42
5.6 <i>Suillia pallida</i>	43

5.7 Škvor obecný (<i>Forficula auricularia</i>).....	44
5.8 Octomilka obecná (<i>Drosophila melanogaster</i>).....	45
5.9 Bzučivka obecná (<i>Calliphora vicina</i>).....	46
5.10 Bzučivka zední (<i>Pollenia rudis</i>).....	47
5.11 Včela medonosná (<i>Apis mellifera</i>).....	47
6 Metodologie.....	49
6.1 Umisťování masových a pivních pastí.....	49
6.1.1 Pivní a masové pasti v lese.....	50
6.1.2 Pivní a masové pasti na kompostu.....	51
6.2 Ruční odchyt.....	52
6.3 Sběr vzorků.....	53
6.3.1 Usmrcení hmyzu.....	53
6.4 Určení vzorků.....	54
6.5 Postup přípravy vzorků.....	54
6.6 Práce s lupou.....	55
6.7 Práce s elektronovým mikroskopem.....	55
7 Výsledky.....	57
7.1 Tabulka.....	57
7.2 Výsledný popis struktur a fotodokumentace.....	58
7.2.1 Slunéčko východní (<i>Harmonia axyridis</i>).....	58
7.2.2 Sršeň obecná (<i>Vespa crabro</i>).....	60
7.2.3 Ruměnice pospolná (<i>Pyrrhocoris apterus</i>).....	63
7.2.4 Mandelinka havezová (<i>Oreina cacaliae</i>).....	64
7.2.5 Vosa útočná (<i>Vespula germanica</i>).....	66
7.2.6 <i>Suillia pallida</i>	69
7.2.7 Škvor obecný (<i>Forficula auricularia</i>).....	72
7.2.8 Octomilka obecná (<i>Drosophila melanogaster</i>).....	74
7.2.9 Bzučivka obecná (<i>Calliphora vicina</i>).....	76
7.2.10 Bzučivka zední (<i>Pollenia rudis</i>).....	78
7.2.11 Včela medonosná (<i>Apis mellifera</i>).....	81
7.3 Diskuze.....	83
Závěr.....	85
Literatura a odkazy.....	86

Tabulka obrázků

Obrázek 1: Struktura ommatidia v podélném řezu (vlevo) a v příčných řezech v několika úrovních hloubky sítnice (vpravo). 1) Rohovka; 2) krystalické tělísko; 3) čípek; 4) terciární pigmentové buňky; 5) primární pigmentová buňka; 6) sekundární pigmentová buňka; 7) štětinka; 8) fotoreceptorové buňky R3R7; 13) fotoreceptorová buňka R2; 14) fotoreceptorová buňka R8; 15) fotoreceptorová buňka R1; 16) axony; 17) a 18) rhabdomery buněk R7 a R8, v uvedeném pořadí; 19) a 20) vnější fotoreceptorové rhabdomery (KATANAEV, KRYUCHKOV 2011).....	29
Obrázek 2: Pivní past umístěna v lese ve Starých Křečanech.....	51
Obrázek 3: Masová past umístěna v lese ve Starých Křečanech.....	51
Obrázek 4: Pivní a masová past umístěny v blízkosti kompostu ve Starých Křečanech	52
Obrázek 5: Slunéčko východní (<i>Harmonia axyridis</i>) pod binokulární lupou.....	59
Obrázek 6: Slunéčko východní (<i>Harmonia axyridis</i>) snímek z elektronového mikroskopu.....	60
Obrázek 7: Sršeň obecná (<i>Vespa crabro</i>) pod binokulární lupou.....	61
Obrázek 8: Sršeň obecná (<i>Vespa crabro</i>) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu.....	62
Obrázek 9: Sršeň obecná (<i>Vespa crabro</i>) snímek ocelli z elektronového mikroskopu....	62
Obrázek 10: Ruměnice pospolná (<i>Pyrrhocoris apterus</i>) pod binokulární lupou.....	63
Obrázek 11: Ruměnice pospolná (<i>Pyrrhocoris apterus</i>) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu.....	64
Obrázek 12: Mandelinka havezová (<i>Oreina cacaliae</i>) pod binokulární lupou.....	65
Obrázek 13: Mandelinka havezová (<i>Oreina cacaliae</i>) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu.....	66
Obrázek 14: Vosa útočná (<i>Vespula germanica</i>) pod binokulární lupou.....	67
Obrázek 15: Vosa útočná (<i>Vespula germanica</i>) snímek hlavy z elektronového mikroskopu.....	68
Obrázek 16: Vosa útočná (<i>Vespula germanica</i>) detailní snímek složeného oka z elektronového mikroskopu.....	68
Obrázek 17: Vosa útočná (<i>Vespula germanica</i>) snímek ocelli z elektronového mikroskopu.....	69
Obrázek 18: <i>Suillia pallida</i> pod binokulární lupou.....	70
Obrázek 19: <i>Suillia pallida</i> – snímek ukazující uspořádání jednotlivých ommatidií z elektronového mikroskopu.....	71
Obrázek 20: <i>Suillia pallida</i> – snímek ukazující povrch ommatidií z elektronového mikroskopu.....	71
Obrázek 21: Škvor obecný (<i>Forficula auricularia</i>) pod binokulární lupou.....	72
Obrázek 22: Škvor obecný (<i>Forficula auricularia</i>) snímek ukazující uspořádání jednotlivých ommatidií z elektronového mikroskopu.....	73
Obrázek 23: Škvor obecný (<i>Forficula auricularia</i>) snímek z elektronového mikroskopu ukazující vláskovité struktury v rozích některých ommatidií.....	73
Obrázek 24: Octomilka obecná (<i>Drosophila melanogaster</i>) pod binokulární lupou.....	74
Obrázek 25: Octomilka obecná (<i>Drosophila melanogaster</i>) snímek oka z elektronového mikroskopu.....	75

Obrázek 26: Octomilka obecná (<i>Drosophila melanogaster</i>) detailní snímek oka z elektronového mikroskopu.....	75
Obrázek 27: Bzučivka obecná (<i>Calliphora vicina</i>) pod binokulární lupou.....	76
Obrázek 28: Bzučivka obecná (<i>Calliphora vicina</i>) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu.....	77
Obrázek 29: Bzučivka obecná (<i>Calliphora vicina</i>) detailní snímek ommatidií okrajové části oka z elektronového mikroskopu.....	77
Obrázek 30: Bzučivka obecná (<i>Calliphora vicina</i>) povrchová struktura ommatidií z elektronového mikroskopu.....	78
Obrázek 31: Bzučivka zední (<i>Pollenia rudis</i>) pod binokulární lupou.....	79
Obrázek 32: Bzučivka zední (<i>Pollenia rudis</i>) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu.....	80
Obrázek 33: Bzučivka zední (<i>Pollenia rudis</i>) detailní snímek struktury ommatidií z elektronového mikroskopu.....	80
Obrázek 34: Včela medonosná (<i>Apis mellifera</i>) hlava pod binokulární lupou.....	81
Obrázek 35: Včela medonosná (<i>Apis mellifera</i>) snímek oka z elektronového mikroskopu.....	82
Obrázek 36: Včela medonosná (<i>Apis mellifera</i>) detailní snímek oka a štětin z elektronového mikroskopu.....	82

Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka pozorovaného hmyzu.....	57
--	----

Úvod

Za posledních 400 milionů let se hmyz rozdělil do nejméně jednoho milionu druhů, které tvoří více než polovinu všech známých živých organismů. Jedná se o nejúspěšnější skupinu živočichů, která obývá prakticky všechna prostředí naší planety a vyskytují se v různých variantách a velikostech, od 0,1 milimetru (*Dicopomorpha echmepterygis*) (GAHLHOFF JR 1998) až po půl metru (*Phobaeticus chani*) (HENNEMANN, CONLE 2008), což z nich činí nejúspěšnější skupinu v živočišné říši (BORST 2009).

Vědět, kam letět, jak varovat nebo přilákat partnera, kde se ukrýt před nebezpečím, kde nalézt potravu, jak bezpečně určit co je květina a zároveň její květy s nejlepším nektarem nebo jak se orientovat při návratu domů, to vše jsou pro hmyz klíčové dovednosti. Pro všechny uvedené úkoly a ostatně i pro mnoho dalších hraje zásadní roli v hmyzím životě, od larvy až po dospělého jedince, zrak.

Cílem této práce je prozkoumat a analyzovat morfologickou stavbu očí hmyzu a porozumět mechanismům, které hmyzu umožňují efektivní vnímání světla a adaptaci na různé světelné podmínky. Práce je zaměřena na různé struktury očí hmyzu, jako jsou složené oči, ommatidia a jednoduché oči, ocelli, a jejich vztah k vnímání světla a orientaci v prostředí.

V rámci této práce byla použita kombinace experimentálních metod, jako je mikroskopie a obrazová analýza, spolu s literární rešerší a analýzou dostupných dat. Jedním z cílů je snaha o objasnění klíčových aspektů morfologické stavby očí hmyzu a představení nových poznatků a pochopení v této oblasti.

1 Zrakové orgány hmyzu (orgány vizuální)

Smysl zrakový patří mezi nejdůležitější smysly, které hmyz vlastní. Pomocí zraku si hmyz dokáže uvědomovat vzdálené i bližší okolí. Tato schopnost mu umožňuje lokalizovat kořist a předává mu informace o jejich pohybech. S výjimkou několika velmi základních reflexů jsou oči hmyzu a příslušné části hmyzí nervové soustavy zodpovědné za zpracování vizuálních informací již dlouho předmětem intenzivního výzkumu. Stále však není možné propojit vizuální vstupy hmyzu s jeho behaviorálními výstupy (BORST 2009).

Mimo jiné také víme, že zrak umožňuje hmyzu únik z případného nebezpečí. Pro přežití hmyzu je nejzásadnější rychlá a přesná orientace ve vnějším světě, k čemuž výrazně napomáhá schopnost vidění. I přesto, že zrak způsobuje jakousi výhodu, existují také různé druhy hmyzu, které oči nemají, jako například druh brouka z čeledi pírníkovití (*Ptiliidae*) jménem *Nelloptodes gretae* (NARODOSLAWSKY 2020), tyto druhy žijí například v jeskyních, nebo se řadí mezi málo aktivní (OBENBERGER 1952). Přibližně před 300 lety provedl van Leuwenhoek první známou studii hmyzích očí. Jeho prezentace toho, jak vypadá svíčka při pohledu přes odloupenou soustavu čoček mouchy, dala vzniknout rozšířenému mylnému názoru, že hmyz vidí četné obrazy svého okolí (BORST 2009). Vidění je poměrně obsáhlý okruh, který líčí různé způsoby, jakými se dá okolní svět vnímat. Popisuje mnoho stupňů mezi uvědomováním si světla a tmy, či částečného vnímání stínů až po velmi dokonale vyvinutý zrak. Hmyzu tudíž pomáhají světločivné buňky k vnímání světelného záření, takzvané fotoreceptory, které se u hmyzu nachází v různých stádiích dokonalosti (OBENBERGER 1952). Každá buňka přijme nějaký impuls z okolního prostředí, na tento podnět organismus reaguje synapsí, které umožní bezprostřední přenos nervového vzruchu.

Nejvíce vyvinutá zraková ústrojí se vyskytují u dravých či loupeživých druhů hmyzu, u kterých je také známá vysoká výbornost letu. Mezi takový hmyz se řadí například vážky, jejichž oči jsou jedinečně perfektním zařízením smyslového vnímání zraku. V některých případech jsou velké a dokonalé oči také pomocníkem při určování pohlaví hmyzu, kdy obrovské oči mají spíše samci, jelikož ti si za letu musí vyhlédnout

samičku, které mohou být i ve vzdálenějším okolí. Tento úkaz se dá dobře pozorovat a je typický pro samce rodu *Diptera* a *Hymenoptera* (OBENBERGER 1952).

Vědci se již několik let snaží toto dokonalé vidění napodobit. Nová kamera, postavená mezinárodním vědeckým týmem a složená ze 180 čoček, umožňuje vidět svět očima hmyzu. Prototyp fotoaparátu nabízí díky velkému množství objektivů a speciální technologii velmi širokoúhlé záběry – dokáže ukázat obraz v úhlu až 180 stupňů, ale stále ještě trpí velmi nízkým rozlišením obrazu. Vědci doufají, že tato kamera najde své využití v medicíně a ve veřejném či osobním zabezpečení. Za myšlenou pomoci v lékařství vědci doufají, že by tato kamera mohla výrazně ulehčit endoskopické pozorování a zkoumání vnitřních orgánů lidského těla. Co se týče bezpečnostní složky, tam je možnost, že by se systém mohl použít v bezpečnostních kamerách, kdy se při využití pouze dvou těchto zařízení bude pokrývat úplně celé zorné pole (BORST, PLETT 2013).

Při zaměření se na primitivní vizuální orgány hmyzu, které obsahují pouze ty nejobyčejnější fotoreceptory, tak ty mají od předem zmíněné efektivitu a dokonalosti poměrně dost daleko. V této nejprimitivnější formě je oko orgán, který jen vnímá světelné změny v okolí, bez jakýchkoliv dodatečných specifických schopností, mezi které patří vnímání barevných rozdílů, tvarů nebo pohybu v okolním prostředí. Veškeré tyto speciální schopnosti jsou odkázané na celkové rozvinutí pozorovacího orgánu a také na vývoji náležitých smyslových center v nervovém systému (OBENBERGER 1952).

Navigace pomocí zraku využívá skutečnosti, že pouze jedno všesměrové oko může vždy vidět slunce nebo jiné bodové optické majáky ve stejnou dobu. Jediné, co je třeba při přímém letu udělat, je udržovat všesměrovou polohu majáku¹. Při velké oblačnosti může oko detekovat i velmi malé množství UV světla procházejícího skrz mraky (HOLECOVÁ 2012).

1 Jako přírodní světelné majáky mohou sloužit například Slunce, Měsíc nebo jasnější hvězdy (HOLECOVÁ 2012).

Hmyz má oči zpravidla lokalizovány na hlavě a ať jde o oči jednoduché či složené, tak je jejich nervové centrum formováno protocerebrem² (OBENBERGER 1952). Létaající hmyz nedokáže rozeznat jednu věc od druhé, pokud se nacházejí pod jeho tělem. Jedno omatidium zaznamenává změny světlejších a temnějších odstínů, když přelétá nad objekty, jako jsou kameny a tráva. Tuto změnu vidí i ostatní omatidia. Mozek hmyzu využívá časový posun k určení směru a rychlosti letu nad zemí. Kromě mechanického rychloměru na tykadlech hmyzu se k řízení letu používá i vizuální rychloměr (HOLECOVÁ 2012).

Ocelli, ommatidia složených očí i stemmata, což jsou veškeré oční útvary hmyzu, mají tuto kolektivní vlastnost: vždy se skládají ze dvou různých částí – z dioptrické části a z receptorické části (OBENBERGER 1952).

Všechny aparáty tvořící oko hmyzu se značí ektodermálním původem a jejich dioptrické i receptorické složky jsou specializované epidermální buňky. Pokud se někde v těle vyskytuje látka, která je citlivá na světlo a ta produkuje jinou látku, která při osvětlení může podráždit nerv, získáme nejjednodušší typ vizuálního orgánu (ŽĎÁREK 2021).

Primární vlastností fotoreceptorických orgánů hmyzu je průhlednost kutikulární části nad korespondujícími smyslovými buňkami. Tato skutečnost bezprostředně vede k tomu, že prakticky každá smyslová buňka, pokud splní podmínku průhlednosti mezi sebou a povrchem, se může stát fotoreceptorickou buňkou a nebo orgánem. Tento fenomén byl pozorován u larev vyšších *Dipter*, u kterých byly určité orgány smyslové vysvětlovány jako chemoreceptorické, avšak po důkladnějším zkoumání bylo zjištěno, že jejich externí část má vlastnosti transparentní čočky, z čehož plyne, že se jedná o fotoreceptorické orgány.

Fotoreceptorické orgány mají velmi jemný, hustý hřebenovitý vzhled, přičemž každé hřebenovité vlákno představuje koncovou, mírně ztlustělý díl neurofibril procházející sensorickou buňkou. Obvykle jsou dvě a více buněk shromážděny dohromady tak, že v tomto případě příčně umístěné hřebínky, jsou ve všech buňkách

² Protocerebrum je přední část mozku členovců, která vnímá a zpracovává nervové vzruchy očí a dalších orgánů. Obsahuje optická centra a neuropily, které slouží jako slučující systémy pro přední smyslové orgány, oči (OBENBERGER 1952).

blízko sebe a tvoří jakousi optickou tyč nebo rhabdom. Jednotlivé hřebeny, které svou strukturou vytvoří rhabdom, přitom nazýváme rhabdomery (OBENBERGER 1952). Rhabdomery jsou tedy jednotlivé struktury tvořící rhabdom, který se z nich vytvoří. Jednoduše řečeno rhabdom je zraková tyčinka nacházející se v sítnici hmyzího oka. Rhabdom se nachází pod rohovkou a leží ve střední části všech ommatidií, zrakových oddílů složených očí. Vstupující paprsky světla procházejí transparentním kuželem, který zapříčiní, že se paprsky seběhnou na hlavičce rhabdomu. Rhabdom sám o sobě je tedy tyčinkovitý a skládá se z prolínajících se prstových výběžků, na kterých se podílí malý počet fotoreceptorových buněk. Rhabdomy jsou způsobilé k rozlišení vlnové délky a roviny polarizace. Tato dovednost se využívá u navádění včel pomocí vzorů polarizace na obloze místo Slunce, když je obloha zatažená, je zapříčiněna způsobem, jakým jsou molekuly fotopigmentu organizovány na mikrokalcích v rhabdomech. Fotony jsou detekovány v případě, že světločivná část molekuly fotopigmentu leží v rovině polarizace daného fotonu (LAND 2018).

1.1 Barevné a tvarové vidění

Barevné vidění mají u bezobratlých mají zejména pavouci, hmyz a korýši. Opylovači musí být schopni rozeznávat barvy. Zvýšená citlivost včel a čmeláků na vnímání UV spektra jim pomáhá při vyhledávání potravy jako navigace. Například pro včely jsou rostliny v tomto spektru esteticky přitažlivější, protože více kontrastují s okolním prostředím. Mnoho živočichů dokáže rozlišit barvy v UV spektru, většina živočichů však nedokáže rozeznat barvy ve tmě (ŠIKL 2012). Ovšem existují také výjimky, jako jsou například sovy, které, jakožto noční dravci, mají jedno z nejvyvinutějších přizpůsobení k vidění ve tmě (VESELOVSKÝ 2001).

Díky vypouknutému tvaru oka se osa každého ommatidia mírně liší od osy ommatidia sousedního a jejich samostatná zorná pole se téměř nepřekrývají. Výsledkem je, že okolní svět vidí hmyz pouze jako mozaiku zářivých, jasně zbarvených skvrn (ŽDÁREK 2021). Rozptýlené světlo může fotochemicky opravit fotokonvertované zrakové pigmenty díky červeným stínícím pigmentům v očích much a vážek. Podobný účel mají i žlutě zbarvená pigmentová zrnka, která slouží jako světelná zornice uvnitř

fotoreceptorových buněk. Spektra citlivosti jsou jemně vyladěna pigmentovými granulemi, které lemují rhabdom (STAVENGA 2002). Co se týče vnímání tvarů, tam platí pravidlo, že rozlišovací schopnost složeného oka se zvyšuje s průměrem ommatidia i poloměrem zakřivení celého složeného oka (ŽDÁREK 2021).

Je možné, že různá zraková zaměření, jako je prostorové, barevné a polarizační vidění, mají různou důležitost pro biologickou zdatnost, vzhledem ke značné rozmanitosti v uspořádání očí hmyzu. Má se za to, že závisí přímo na vlastnostech vizuálního prostoru. Pokud je rozhodující detekce polarizace, rozlišování okolí do vzájemně odlišných skupin, může jí být věnována značná hřbetní část oka. Tato část oka může být významná i v případě, kdy je cílem nalezení kořisti nebo partnera. Kromě toho se velká plocha předního oka, umístěného v čelní části, používá, když je cílem uchopit pohybující se kořist. Ve většině případů dochází k překrývání gradientů a je obtížné jasně rozlišit jednotlivé funkce očních oblastí (STAVENGA 2002).

2 Základní struktura vizuálních orgánů

Složené oči hmyzu jsou postaveny z ommatidií, z nichž každé představuje funkční jednotku tvořenou vysoce konzervovaným souborem buněk, bez ohledu na adaptaci v průběhu času. Jedno ommatidium tvoří dvě rohovkové nebo primární pigmentové buňky, čtyři krystalické kuželové buňky a často osm fotoreceptorových buněk. Tyto buňky jsou tvořeny jednou nebo více rhabdomerami, což jsou husté shluky mikrovilů. Rhabdomery často vznikají, když je větší množství rhabdomů blízko u sebe (BUSCHBECK, FRIEDRICH 2008).

2.1 Rohovka

Rohovka je průhledná část překrývající oko, která plní důležité dioptrické a bariérové funkce. Hlavní ochranou proti tekutinám a patogenům je epitel, který tuto úlohu plní produkcí těsných spojů a udržováním stálé populace prostřednictvím diferenciací a zrání dělicích se buněk v základní buněčné vrstvě (EGHRARI et al. 2015).

Její velice důležitou součástí je schopnost kombinace prakticky dokonalé průhlednosti a propustnosti s dokonale přesným tvarem, kvůli zaostření přicházejícího světla. Navíc musí být mechanicky značně odolná, aby byla schopná ochránit vnitřní obsah oka. V některých případech mohou změny při vývoji jedné nebo více vrstev rohovky způsobit zvýšení rozptylu světla a následné snížení, či ztrátu průhlednosti rohovky (MEEK, KNUPP 2015). Rohovka se vyvíjí z vnějšího zárodečného listu, neboli z ektodermu, z kterého vzniká epitelová tkáň, a z buněk neurální lišty. Podle nejnovějších výzkumů hrají signály z čočky rozhodující roli při usměrňování růstu buněk odvozených právě z neurální lišty, které tvoří rohovku. Tyto buňky se nazývají corneagenní buňky (WILSON et al. 2003).

2.2 Krystalické tělísko

Krystalické tělísko, které se nachází mezi mikročočkou a rhabdomem, je hlavní zaostřovací složkou ommatidia, jelikož koncentrační schopnost rohovkové čočky samotné je poměrně slabá. K blokování většího rozptýlení světla slouží černé stínící pigmenty, které vytvářejí neprůhledné bariéry mezi sousedními ommatidii (SONG 2017). Hřbetní okrajová část dioptrického aparátu krystalického kuželu je tenčí a menší než zbytek oka (HOMBERG, PAECH 2002). Krystalické tělísko se také často označuje jako krystalický kužel právě kvůli svému tvaru.

Dioptrický efekt v každém ommatidiu je podle výzkumu složených očí způsoben jak zakřivenými plochami na povrchu rohovky a na hrotu čípku, tak zvláštním poklesem indexu lomu světla od osy k okrajové části tohoto dioptrického aparátu (KUNZE, HAUSEN 1971).

2.3 Pigmentové buňky

Testováním bylo zjištěno, že krystalické tělísko je obklopeno dvěma primárními pigmentovými buňkami. Testy byly prováděny na očích divokých jedinců *T. infestans* a *R. prolixus* a mimo dvou základních pigmentových buněk se na každém z ommatidií nachází 24 sekundárních pigmentových buněk. Barva očí tohoto hmyzu, zaměřeného primárně na lov, byla za normálních okolností tmavě hnědá a bylo zjištěno, že pokud došlo v průběhu vývoje k mutaci, pak tyto jedinci měli jasně červenou barvu očí. Toto je zdůvodněno nedostatkem pigmentů, konkrétně screeningových, uvnitř buněk retikuly (INSAUSTI et al. 2013).

Pigmentová vrstva slouží primárně k pohlcování bludného světla, tedy takového světla, které dopadá na receptorickou část pod špatným úhlem a mohlo by se případně stát rušivým elementem (OBENBERGER 1952). Každé ommatidium složeného oka octomilek (*Drosophila*) má čtyři přilehlé části, ve kterých nacházejí pigmentové buňky, a které jsou lokalizovány podélně od dioptrického aparátu a spolu s percipientními orgány se táhnou až k vnějšímu optickému gangliu (NOLTE 1952).

Co se týče kukly nacházející se v rané fázi svého života, tak se nové typy buněk stále definují. Když dvě buňky rostou a odsouvají ostatní buňky, aby se vyhnuly kontaktu s buňkami jiných struktur, lze hlavní pigmentové buňky odlišit od okolních buněk. Dvě hlavní pigmentové buňky se pak k sobě přibližují a dotýkají se, čímž vytvářejí prstencovitou strukturu obklopující buňky krystalického tělíska (CARTHEW 2007).

2.4 Sítnice

Sítnice je jedena z nejdůležitějších částí oka vnímající a reagující na světlo. Svůj vysoký význam má právě proto, jelikož umožňuje vnímat paprsky světla, které na ní dopadají (PROVAZNÍK 2020). Všechny její vrstvy se vyvíjejí poměrně složitým způsobem z vnitřního zárodečného listu (HORNOVÁ 2011). Nervová vlákna spojují buňky sítnice se zrakovou kůrou. Zrakový nerv, díky kterému se zpracovávají podněty ze sítnice do zrakového centra, je tvořen nervovými vlákny ze sítnice, která se spojují za očním orgánem (JELÍNKOVÁ 2018).

Aby složené oko pracovalo tak jak má, musí být receptory v ommatidiu rozmístěny po celé sítnici. Nejdůležitější podmínkou správné funkce je stejná polarita všech receptorů. To platí zejména pro dvoukřídlé, jejichž receptorové buňky jsou závislé na svém geometrickém uspořádání (LAWRENCE, SHELTON 1975).

Rozsáhlá území, zóny, pásy nebo pruhy s různými morfologickými nebo funkčními charakteristikami, toto vše se dá pozorovat na hmyzí sítnici. Ví se poměrně málo o mechanismech regulujících vytváření dříve zmíněných vzorů pozorovaných u mnoha druhů hmyzu, a to navzdory významnému pokroku v pochopení základních genetických procesů řídicích náhodnou i lokalizovanou specifikaci například u ocotmilek (*Drosophila*) (WERNET et al. 2015).

2.5 Odrazová vrstva

Tapetum lucidum je reflexní neboli odrazová vrstva, která se u hmyzu nachází na zadní stěně očí. Je lokalizována se přímo za sítnicí a je charakteristická převážně pro

noční živočichy, jelikož zlepšuje noční vidění tím, že odráží světelné paprsky zpátky na buňky sítnice (NOVÁK 2006).

Zajímavá je studie odrazové vrstvy motýlů. Postupným porovnáváním drobných struktur reflexního systému u různých čeledí těchto bezobratlých živočichů byla zjištěna záře očí. Možnost výskytu tohoto fenoménu je tracheální odrazová vrstva rhabdomu, přesněji na jeho konci. Byl vypořádan u některých druhů denních i nočních motýlů, přičemž odstíny záře se liší u jednotlivých druhů, ale v rámci jednoho oka nedochází k žádným výraznějším změnám (RIBI 1979).

2.6 Bazální blána

Všechny mnohobuněčné organizmy živočišné říše mají bazální membrány, což jsou jemné specializované mezibuněčné hmoty, které pokrývají většinu jejich tkání. Bazální membrány si většinou zachovaly své původní složení a funkce (KRAMER 2005). Studiemi několika živočišných druhů např. octomilek (*Drosophila*), háďátek obecných (*Caenorhabditis elegans*) a myši domácích (*Mus musculus*) se zjistilo, že základní složkou pro počáteční tvorbu bazální blány je laminin (JAYADEV, SHERWOOD 2017). Laminin je glykoprotein. Laminy obsahující šroubovicovou část tvořenou heptodami a dělí se na 15 různých typů, kde každý z nich má 3 podřetězce, které mají vlastní speciální kombinace. Tkáňová specificita je dána právě kombinací řetězců. Většina mutací je smrtelná, proto jsou laminy pro funkci bazální blány nezbytné. Hrají klíčovou roli v koordinaci komplikované komunikace mezi bazálními membránami (GULDAGER KRING RASMUSSEN, KARSDAL 2016).

Dřívější studie prokázaly, že veškeré bazální membrány v sobě nosí biologické komponenty jako například laminin, kolagen typu IV a lineární polysacharid ve formě proteoglykanu zvaný heparansulfát. Bazální blány také mohou obsahovat i specifické složky určitých tkání. Kromě změn struktury při tvorbě bazální membrány mají tyto složky jedinečné biologické vlastnosti (STANLEY 1982).

2.7 Zrakové nervy

Receptory sítnice transformují světelné impulsy na elektrické impulsy, které jsou pak přenášeny přes bipolární a gangliové buňky do zrakového nervu, který začíná na papile. Podle studie mikroskopické struktury živočišných tkání obsahuje zrakový nerv přibližně jeden milion nervových vláken (KŘÍŽ 2007).

Zrakový nerv je tvořen na bázi zrakového aparátu nervovými vlákny vyrůstajícími z buněk ganglie sítnice (CHALUPECKÝ 1908). Nově diferencované axony smyslových buněk se v průběhu života larev pojí s receptorovými axony, které se nachází v jejich blízkosti a směřují do periferního nervu nejčastěji do toho, který se nachází nejbližší. Tato část periferního nervu je následně přenáší do centrální nervové soustavy. Nikdy však nebylo prokázáno, jak je spojení mezi povrchem a centrální nervovou soustavou vytvořilo, pravděpodobně to bylo buď nervy vyrážejícími ze středu, nebo avantgardními axony rostoucími dovnitř z povrchu, ačkoli některé údaje z embryonálního vývoje naznačují, že první axony vstupují do vyvíjejícího se nervového systému tak, že rostou směrem ven od centrální nervové soustavy (SAKATA 2009).

3 Druhy očí hmyzu

Hmyz má různé potřeby a využití očí než-li lidé. Oči hmyzu plní především specializované úkoly pro orientaci v různých podmínkách, které jsou nezbytné pro přežití druhu (ŽDÁREK 2021).

Druhy očí hmyzu se dělí na dva hlavní sektory, jednoduchá očka a očka složená. Každý druh hmyzu, na kterém se vyskytují složená očka, tak má i očka jednoduchá. Toto pravidlo však neplatí i opačným způsobem, jelikož ne všechen hmyz který má očka jednoduchá musí nutně také mít očka složená (ANON. 2017).

3.1 Jednoduchá očka

Jednoduché oči jsou první a nejzákladnější odrůdou očí. Jak již jejich název napovídá jedná se o mnohem jednodušší typ, než níže uvedená očka složená. U jednoduchých očí existuje pouze jedna dioptrická formace pro všechny příslušné receptorové buňky, která se vyskytuje spíše ve skupinách po třech a jsou často umístěny v přibližně rovnoramenném trojúhelníku na vrcholu čela a blíž k temeni (OBENBERGER 1952). Trojice ocell jsou popsány jako špatně zostřující jednokomorové oči, které promítají rozmazaný obraz. Testováním se došlo k závěrům, že například u různokřídlíc (*Anisoptera*) detekuje tato trojice obzor a pomáhá při navádění a řízení letu (BUSCHBECK, FRIEDRICH 2008).

3.1.1 Dorzální ocelli

Na hlavách mnoha druhů hmyzu se vedle složených očí nacházejí i jednoduché čočkové oči, tzv. dorzální ocelli. Skládají se pouze z jediné čočky s velkým otvorem, na který navazuje několik desítek až stovek fotoreceptorů. Tyto fotoreceptory se dále sbíhají do několika desítek interneuronů. Interneurony se promítají do cílového orgánu buď přímo, nebo prostřednictvím malého počtu nervových vzruchů cílových neuropilů (GOODMAN 1981). Neuropil je kousek mozkové šedé hmoty, která plní mezery mezi cévkami a perikaryi. Přestože se může zdát, že je účel ocelli jednoduchý, zůstal až do dnes záhadou. Dřívější výzkumy nedokázaly odhalit behaviorální reakce, které by byly

motivovány přímo pomocí ocellií. Tato skutečnost vedla k vytvoření různých a rozmanitých hypotéz o funkci ocellií, které byly umocněny obrovskou variabilitou počtu a tvaru ocellií (BERRY et al. 2007).

3.1.2 Stemmata

Další skupinou ocellií jsou takzvaná stemmata, neboli laterální ocelli. Stemmata jsou inervována laterálně z optických laloků a obvykle je skupina na každé straně hlavy. Počet stemmat je variabilní, pohybuje se od nuly do sedmi a počet a uspořádání mohou být diagnostické. Jsou charakteristické pro hmyz s proměnou dokonalou, přesněji pro jeho larvy (OBENBERGER 1952). Stemmata se obvykle skládají z jediné retinuly, vlastní světločivné části oka, se strukturou podobnou struktuře ommatidií u složených očí. Ve skutečnosti se stemmata podobají samostatným, různě tvarovaným ommatidiím. Dioptický aparát obvykle tvoří bikonvexní rohovková čočka a sklivec nebo krystalické těleso tvořené čtyřmi Semperovými buňkami. Různý počet fotoreceptorových buněk je obvykle seskupen kolem axiálního rhabdomu a tvoří sítnici. Na hlavě jsou stemmata umístěna vždy laterálně. Stemmata, jak jsou charakterizována výše, byla původně pozorována u holometabolních larev hmyzu, ačkoli některé jiné druhy, například stonožkovci (*Myriapoda*), mají tyto oči také (KOENEMANN 2005).

3.2 Složené oči hmyzu

Nejrozšířenějším druhem oka na Zemi je složené oko. Široké zorné pole, vynikající citlivost na detekci pohybu a neomezená hloubka ostrosti, to jsou všechno vlastnosti složeného oka. Tkáň sítnice je přesně poskládána do tvaru kopule soustavou zrakových jednotek zvaných ommatidia. Rozlišovací schopnost oka je dána tím, jak jemně je obraz, který vytváří, pixelován. Na každém pixelu se většinou u složených očí podílí vždy jedno ommatidium. Pro takto dokonalý zrak je velmi zásadní a důležité přesné uspořádání ommatidiálních buněk a celých ommatidií. Existují čočky s různými tvary, jako jsou čtverce nebo šestiúhelníky (PICHAUD, CASARES 2022). Jsou funkčně srovnatelné s jednokomorovými očima, ve kterých je obraz obrácen naruby. Zakřivení fotorecepční tkáň umožňuje prostorové rozlišení, což je pravděpodobně

nejvýznamnější vizuální vlastnost oka. Míra maximálního prostorového rozlišení, kterého lze dosáhnout, je ovlivněna celkovou velikostí a zakřivením oka. Míra se poměrně často liší v jednotlivých oblastech (BUSCHBECK, FRIEDRICH 2008).

Hmyz využívá složené oči jako dokonalé navigační nástroje a naprosto přesné dálkoměry (ŽDÁREK 2021).

Studium složených očí se posunulo opravdu daleko. Již v roce 2006 byl v časopise Science vydán článek o výrobě umělých složených očí inspirovaných jejich skutečnými biologickými vlastnostmi. Umělé použití složených očí přitáhlo velký zájem vědců. Při výrobě byla použita metoda optického dělení, která umožnila přesně změřit velikost bodu paprsku v ohniskové rovině mikročoček a jader vlnovodů, vazební ztráty, délku vnímaných vln a především úhlovou přijatelnost. Umožnila také vizualizaci šíření světla mikročočkami (JEONG et al. 2006).

3.2.1 Evoluce složených očí

Ve své základní formě se v složené oči hmyzu zachovaly nejméně 360 milionů let. Zkoumání vzdálených příbuzných druhů poukazuje na fakt, že složené oko může být ještě mnohem starší. Složené oči jsou poměrně běžné mezi druhy korýšů (*Crustacea*), z nichž mnohé mají extrémně složité konstrukce připomínající složené oči hmyzu (BUSCHBECK, FRIEDRICH 2008).

U hmyzu s proměnou dokonalou byly změny embryonálního vývoje nezbytné, jelikož musela vzniknout také samostatná morfologie larvy, vycházející ale z původního zdroje. Lze se také domnívat, že ke změnám mechanismů embryonální diferenciacce došlo během postembryogenní diferenciacce dospělých znaků vycházejících z původního larválního tělesného plánu. Toto všechno logicky zahrnuje také evoluční přechod vývoje oka, který je pravděpodobně úzce spojen s nástupem diferenciacce sítnice a celého zrakového systému dospělců až po určitém časovém posunu (FRIEDRICH 2003). Do jaké míry je vše geneticky dáno, je ale do dnešního dne poměrně nejasné.

3.3 Ommatidia

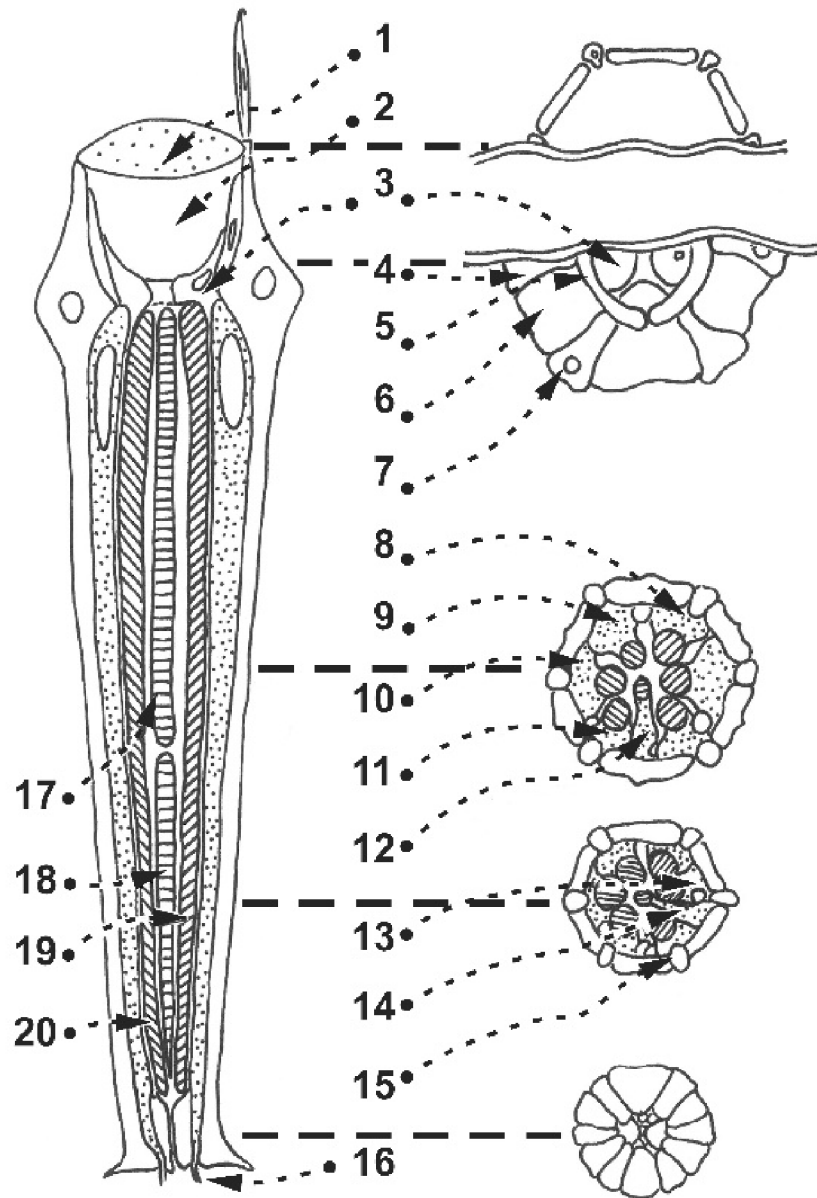
Složené oko se může skládat z až několika desítek tisíc jednoduchých oček, ommatidií. Jednotlivé části, nejčastěji ve tvaru šestiúhelníku nebo čtverce, transparentní vrstvy oka představují rohovku tohoto drobného oka (ŽDÁREK 2021).

Buněčný vývoj jednotlivých ommatidií začíná buněčnými shluky, které se vytvoří hluboko v morfogenetickém poli a dají vzniknout ommatidiu. Část nediferencovaných buněk tvoří periodické kruhové uspořádání nebo shluky přibližně 20 buněk, které se začleňují do valivé brázdy. Tato struktura ztrácí řadu buněk a vzniká struktura se sedmi až devíti buňkami, která připomíná oblouk. Z nich se nakonec vyvine pěti-buněčný strukturální počátek ommatidia. V každém ommatidiu jsou tři různé typy pigmentových buněk. Čtyři čípkové buňky jsou obklopeny dvěma hlavními pigmentovými buňkami, které pomáhají vytvářet čočku a dodávají zralému oku červenou barvu. Každá buňka, která se nestane primární pigmentovou buňkou, čípkem nebo fotoreceptorem, se nakonec vyvine v sekundární nebo terciární pigmentovou buňku. Každé ommatidium má kolem sebe šest sekundárních pigmentových buněk a každý vrcholek má štětinové komplexy a terciární pigmentové buňky (KUMAR 2012).

Při studii úhlů dopadajících světelných paprsků bylo zjištěno, že interommatidiální úhel nebo optické schopnosti každého ommatidia ve složeném oku jsou součástí limitujících faktorů pro ostrost. Ostrost vidění je ale také ovlivněna mírou světla a rychlosti pohybu hmyzu. Jednoduchý typ oka má rychlejší nárůst ostrosti s růstem velikosti. Ve složeném oku je interommatidiální úhel mírně pod limitující rozlišovací schopností ommatidií (BARLOW 1952).

Dřívější studie došly k závěru, že ommatidia hlavní části oka obsahují identické spektrální receptory. V průběhu let se však stále více ukazuje, že spektrálně různorodá ommatidia, která tvoří oči motýlů a můr, jsou rozptýlena náhodně. Ve skutečnosti byla různá struktura složení ommatidií navržena pro blanokřídlé (*Hymenoptera*), a dvoukřídlé (*Diptera*). Nedávná studie zjistila, že stejně jako motýli (*Lepidoptera*) mají i čmeláci (*Bombus*) v sítnici tři různé formy ommatidií. Zjistilo se, že i v sítnici včely medonosné (*Apis mellifera*) se vyskytují tři různé formy ommatidií s různorodým

složením fotoreceptorů. Tento objev byl poměrně důležitý, jelikož včely jsou základem studií hmyzu schopného barevného vidění. Dlouho se mělo za to, že ommatidia včely medonosné jsou identické, což bylo v roce 2005 vyvráceno (WAKAKUWA 2005). Údaje, které pocházejí z mnoha skupin hmyzu, ukazují na možný vztah mezi heterogenitou a barevným viděním. Různé třídy ommatidií jsou určeny společnou expresí postranních a stínících pigmentů, jak je patrné z výzkumu odrazových spekter odebraných z jednotlivých ommatidií. Výzkum souvislostí heterogenity a barevného vidění umožnilo epi-iluminační zařízení, které je schopno rychle posoudit nerovnoměrné rozložení tříd (STAVENGA 2002).



Obrázek 1: Struktura ommatidia v podélném řezu (vlevo) a v příčných řezech v několika úrovních hloubky sítnice (vpravo). 1) Rohovka; 2) krystalické tělísko; 3) čípek; 4) terciární pigmentové buňky; 5) primární pigmentová buňka; 6) sekundární pigmentová buňka; 7) štětinka; 8) fotoreceptorové buňky R3R7; 9) fotoreceptorová buňka R2; 10) fotoreceptorová buňka R8; 11) fotoreceptorová buňka R1; 12) axony; 13) a 14) rhabdomery buněk R7 a R8, v uvedeném pořadí; 15) a 16) vnější fotoreceptorové rhabdomery (KATANAEV, KRYUCHKOV 2011).

4 Metody sběru různých druhů hmyzu

Existuje mnoho různých způsobů, které slouží k odchycení hmyzu. Některé metody jsou vhodné pro sbírání létacího hmyzu, jiné pak zase ke sběru hmyzu lezoucího. Jelikož chceme hmyz pozorovat a zkoumat, musí se nejdříve sebrat ze svého přirozeného prostředí. Metody sběru se bezprostředně odvíjejí od prostředí, ve kterém se hmyz nachází. Pro jasnější představu a přehlednější popis postupů odchyty hmyzu a k němu potřebných nástrojů si jednotlivé, často používané, metody blíže přiblížíme.

4.1 Smýkání

Smýkání je jedna z nejčastěji provozovaných metod při odchyty suchozemského hmyzu. K jejímu provedení je potřeba nástroj, nazývaný se smýkací síť (NOVÁK 1969). K jejímu plnému sestavení je nutný rám, který je nejčastěji kruhovitěho tvaru a vyrobený z ocelové kulatiny, jelikož se jedná o část, která udržuje celou síť otevřenou. Rám je následně připevněn na hůl, která se při sběru drží (SCHAUFF 2004). Běžná velikost holí je mezi 60 cm a 120 cm. Poslední část smýkací sítě je pytel, který se upevňuje k rámu. Vnitřek sběrného pytle je často z bílého monofilu a jeho venkovní ochranná látka je dnes vyráběna například z polyamidové textilie. Jelikož se nejčastěji smýkání provádí na keřích a přes různé porosty, musí být smýkadlo dobře chráněno, ale látka nesmí být ani přehnaně hustá a ani příliš řídká.

Smýkání je prováděno za chůze, vždy tak, že po každém kroku mávneme sítí. Mávnutí uskutečníme obloukovým pohybem a kolmo na rostliny z bylinného a keřového patra. Se smýkací sítí by se mělo pracovat rychle, a se smýkačkou se musí neustále pohybovat proto, aby hmyz neuletěl (NOVÁK 1969).

Do pytle se nejčastěji odchytí jedinci z řádu dvoukřídlých (*Diptera*), rovnokřídlých (*Orthoptera*), či blanokřídlých (*Hymenoptera*). Také často živočichové z řádu pavouků (*Araneae*).

4.2 Motýlářská síť

Motýlářská síť je, jak již název vypovídá, typická pro sběr létavého hmyzu, především motýlů (NOVÁK 1969). Jedná se o pomůcku sestavenou z tyče a jemné síťky připevněnou k lehkému kruhovému rámu. Od smýkací sítě se liší převážně vahou, kdy motýlářská síť je lehčí, a také její síť je mnohem tenčí, zatímco smýkací síť má velmi pevný vak. Jelikož se síť používá převážně ve vzduchu, nebyla by větší hmotnost vhodná (SCHAUFF 2004).

Síť je možné sestavit i doma. Vlastním sestavením se dá lépe přizpůsobit potřebám uživatele, myšleno velikostí a tvarem, což následně pomůže k efektivnějšímu sběru vybraného hmyzu.

Jak již název vypovídá a jak je již výše zmíněno, tato síť slouží převážně pro odchyt z řádu motýlů (*Lepidoptera*).

4.3 Vodní pasti

Podle rámcové směrnice ES o vodě jsou vodní bezobratlí důležitou součástí bioty, kterou lze využít k hodnocení ekologického stavu toků (NIEDOBOVÁ, ŘEZNÍČKOVÁ 2014). Na lov vodního hmyzu se využívá speciální síť vizuálně podobná smýkací síti. Rám, který je nejčastěji kruhovitý či trojúhelníkovitý tvaru vyrobený z ocelové kulatiny. Pytel bývá vyroben z plátna (MISSISSIPPI ENTOMOLOGICAL MUSEUM 2006).

Stejně jako je vodní síť podobná síti na smýkání, také postup sběru hmyzu se nijak zásadně neliší. Používají se stejné pohyby, jak na hladině tak i pod ní. Vzhledem k hustotě vody a množství sedimentu je s tímto typem sítě obtížnější hmyz ulovit a způsob použití není tak rychlý a flexibilní jako při smýkání.

Do sítě se nejčastěji odchyťávají dospělci a larvy potápníků (*Dytiscidae*), vodoměrek (*Hydrometridae*) nebo larvy komárů (*Culicidae*) a vážek (*Odonata*).

4.4 Pivní pasti

Pivní pasti se řadí mezi pasti na návnadu, kdy se do určité odchytačací misky přidá vábnička pro hmyz (RUCHIN 2022). Bývají vyrobeny například z plastových lahví. Postup výroby může být následující. Nejprve se v potřebné výšce nádoba nařízne a rozdělí. Menší část se vloží hrdlem dolů do části větší, čímž vznikne volná cesta pro vstup hmyzu. Takto připravené části se k sobě připevní. Následně se, pro lepší orientaci, může každá z lahví popsat. Nakonec stačí přidat například provázek na přichycení a past je hotová.

Do pastí s aktivním kvašením cukrů jsou přitahovány četné druhy hmyzu. Jako například dvoukřídli (*Diptera*), síťokřídli (*Neuroptera*), blanokřídli (*Hymenoptera*), nebo motýli (*Lepidoptera*) (RUCHIN 2022).

4.5 Masové pasti

Masové pasti se stejně tak jako pasti pivní řadí mezi návnadové. Při výrobě masových pastí se může postupovat velmi podobně jako u pastí pivních. Jediný rozdíl nastane při upevňování vábničky. Jako návnada se použije kus masa nebo šunky, to se vloží do pytlíku či sáčku, který ale obsahuje, několik drobných děr, které se popřípadě mohou vyříznout. Takto připravená návnada se připevní k vnitřní straně hrdla a následně se celá past umístí do přírody (MANKO 2018).

4.6 Nárazové pasti

Další z metod pro odchyt létavého hmyzu jsou takzvané nárazové pasti. Ty, jak již jejich název napovídá, fungují tak, že letící hmyz narazí do průhledné překážky, například do průhledného skla nebo plexiskla, a po ochromení spadne do nádoby, která je připravená pod pastí. Ve sběrné nádobě se nachází určité fixační médium, například ethanol či slaná voda. Nad překážku se často přidává stříška, aby déšť nepoškodil fixační médium (KUNDRATA 2012).

4.7 Sklepávání hmyzu

Pokud je snaha odchytit hmyz sídlící na vysokých rostlinách, zejména keřích a stromech, je účinným způsobem sklepvadlo, pod nímž si můžeme představit například obrácený deštník nebo pevnou síť (NOVÁK 1969). Sklepvadlo se umístí pod dané rostlinstvo a poté se holí několikrát rázně a silně udeří do větvi nebo do kmene, jelikož se velké množství druhů dokáže silně přidržovat a mírné udeření by tak nebylo účinné. Při sklepvání je nutné, stejně tak jako u smýkání příslušným plátnem neustále pohybovat a otřásat s ním, aby se zamezilo úniku hmyzu. Sklepvat je nejvhodnější brzy ráno nebo za chladného počasí, kdy není denní hmyz příliš aktivní (SCHAUFF 2004).

Je možné použít tři druhy sklepvadel: deštníkové, síťové, nebo americké. Každý druh má své výhody i nevýhody, z jednoho mohou setřesení jedinci uniknout jednodušeji, ale na druhou stranu se do daného typu snáze odchytnou a naopak (NOVÁK 1969).

Nejčastěji je možné touto metodou odchytit například plošnice (*Heteroptera*), larvy motýlů (*Lepidoptera*), pisivky (*Psocoptera*), nebo hmyz z řádu brouci (*Coleoptera*) (SCHAUFF 2004).

4.8 Manuální odchyt

K manuálnímu odchytu není potřeba žádné speciální vybavení. Jestliže hmyz není nebezpečný, ohrožený a je dostatečně veliký, dá se manuální odchyt provádět holýma rukama. Vyhledat hmyz pro tento sběr je možné na rostlinách či v úkrytech – pod kameny, kůrou stromů, v trsech trávy. Mezi možné pomůcky pro manuální odchyt hmyzu se mohou řadit například rukavice, pinzeta, úložná krabička pro hmyz, zahradní lopatka, exhaustor...

Exhaustor je pomůcka při lovení drobného hmyzu, který by bylo obtížné či nemožné vzít do rukou bez poškození, nebo je daný hmyz velmi rychlý, pomocí exhaustoru se jednoduše nasaje a díky vestavěnému filtru se značně sníží riziko

poškození hmyzu. Exhaustory se vyrábějí buď lahvé, nebo trubkové (WINKLER 1974).

4.9 Prosívání

Existuje mnoho druhů mravenců, brouků, roztočů, vidličnatek a dalších zřídka sbíraných členovců, kteří žijí v půdě a v listech. Nejjednodušší způsob, jak tento hmyz odchytnout, je sebrat část samotné půdy a poté z ní hmyz extrahovat.

Prosívadlo je složeno z dlouhého pytle, k jedné části tohoto pytle je upevněn nejčastěji kruhový rám a v horní třetině se nachází síto. Dolní část pytle je uzavřena, aby se zde mohl hromadit prosev nebo v některých případech odchytnout požadovaný hmyz (KUNDRATA 2012).

Při prosívání se do prostoru mezi dvěma železnými kruhy vybavenými rukojetí vhazují lopatkou různé materiály, jako je tlející listí, větvičky a další půdní materiál (NOVÁK 1969). Po vhození dostatečného množství materiálu se začne prosívat a to tak, že se rychlými krouživými pohyby třese prosívadlem. Díky tomuto pohybu se z materiálu uvolňují drobné části, které dopadají do dolní části pytle. Větší kusy hmyzu, které se mohou rovnou odchytnout, se zachytí už v horní části síta, zatímco menší a drobnější kusy se dostanou až do prosevu. Z prosevu se hmyz vytřídí tak, že se po celkovém prosetí odváže spodní část a sebraný materiál se vysype (KUNDRATA 2012).

4.10 Malaiseho past

Mechanismus pro lov hmyzu pohybujícího se vzduchem je Malaiseho past. Tato past je pojmenovaná po jejím vynálezci René Malaiseovi³ (SCHAUFF 2004).

Past se skládá ze svislé stěny a trychtýřovitým rukávem z monofilu. Hmyz při letu narazí do vertikální stěny a reaguje lezením na konec rukávu. Rukáv se postupně zužuje a na jeho konci se nachází sběrná nádoba s fixačním médiem. Rukáv je nasměrován tím způsobem, že jeho zakončení je umístěno nejvýše z celé pasti. To je

3 Švédský entomolog, badatel a sběratel umění (VÅRDAL, TAEGER 2011).

z toho důvodu, že hmyz má sklony k lezení nahoru. V konstrukci rozlišujeme dva typy pastí.

První past je s konstrukcí. Konstrukce bývá vyrobená z tyčí z duralu a v podstatě se významně podobá konstrukci stanů, používaných k turistice.

Druhá past je bez konstrukce. Tento příklad pasti se připravuje tak, že se zavěsí na okolní stromy a následně se upevní do půdy. Fixačním médiem je především lín (MAZÁČ 2014).

U tohoto druhu pasti je, více než u jakékoliv jiné, důležitá volba správného místa pro konstrukci. Nejvhodnější je umístění do prostoru, ve kterém se nevyskytují vysoké byliny. Doporučovaná je instalace po směru předpokládaného proudění vzduchu – tak, aby nám vítr pomohl nahnat hmyz do pasti.

Touto pastí se nejčastěji chytají dvoukřídlí (*Diptera*) a blanokřídlí (*Hymenoptera*) (MATTHEWS, MATTHEWS 2017; MAZÁČ 2014).

4.11 Lov na světlo

Mnoho druhů hmyzu přilétá po setmění ke světlu. K odchycení takového hmyzu se využívá speciální druh vizuální pasti a to past světelná. Světelné pasti se od sebe liší podle toho, jaký typ světla se použije. Obvyklé jsou pasti s ultrafialovým světlem nebo bez něj. Zdroje osvětlení mohou zahrnovat zářivky, rtuťové výbojky, černá světla nebo světelné diody. Designy se liší podle hmyzu, na který jsou zaměřeny. Světelné pasti se hojně používají k odchytu a následnému zkoumání nočních motýlů (BABŮREK 2017).

Nejjednodušším způsobem, jak tento druh pasti vyrobit je připevnění bílého, či velmi světlého plátna k nějaké konstrukci nebo ke stromům, následně stačí k plátnu připevnit dostatečně silný zdroj světla a past je hotová. Pro sběr hmyzu je potřeba motýlářská síťka nebo pinzeta. Úspěšnost lovu na světlo je závislá převážně na povětrnostních podmínkách a celkové volbě místa. Nejvhodnější dobou pro lovení jsou teplé letní noci za bezvětří, při zatažené obloze nebo za slabého nočního deště (NOVÁK 1969).

4.12 Lov pomocí feromonů

Mezi spolehlivé substance, které se používají při likvidaci, odchytu a monitoringu hmyzu, patří také feromony. Tyto látky obstarávají zprostředkování vnitrodruhového vzájemného působení. Jedinec nějakého druhu vyprodukuje konkrétní feromon a jiný jedinec stejného druhu na něj zareaguje změnou chování nebo fyziologickou reakcí.

Lov pomocí feromonů se nejčastěji využívá tak, že se do pastí lákají samci hmyzu pomocí pohlavních feromonů samic. Feromonové lapáky jsou vybavené lepkavou deskou a odparníkem uvolňujícím druhově specifický, uměle syntetizovaný buď sexuální, méně často využívaný agregační, poplašný nebo značkovací feromon. Při využití sexuálního feromonu se do pasti láká opačné pohlaví, při využití agregačního feromonu se do pasti lákají obě pohlaví a ve výjimečných případech dokonce i larvy (KODRÍK 2004).

4.13 Odběr půdní mezofauny

Při využití této metody se odebírá půdní edafon. K získání vzorků z půdy se využívá Berleseův-Tullgrenův trychtýř. Vzorek půdy se nejprve umístí na sítko nad nálevkou a nechá se určitou dobu vysychat. Nad vzorek se poté zavěsí topná žárovka, která nutí organismy k přesunu trychtýřem do sběrné nádoby. Sběrná nádoba může obsahovat fixační médium (TAJOVSKÝ 2008). Existuje několik metod pro analýzu půdní mezofauny, včetně mikroskopického pozorování, kdy se využívají různé barvicí techniky, aby se identifikovaly a počítaly různé druhy organismů. Další metody zahrnují elektrofyzikální měření, chemickou analýzu a další techniky.

4.14 Vysávání

Sací pasti fungují tak, že veškerý létací hmyz je shromažďován na síťovém filtru nebo je vtažen vírem do nádoby.

Některé z větších sacích pastí jsou provozovány nepřetržitě v pevně daných polohách pro vzorkování vzduchu a ty se využívají zejména pro odchyt mšic

(*Aphidoidea*) a jiného drobného hmyzu přenášeného větrem. Často se také využívají pro detekci daného hmyzu, jelikož se může jednat o škůdce, kteří mohou zamořit či zničit úrodu. Menší verze mohou být umístěny na polích nebo na přezku batohu, takže lze odebírat vzorky z různých částí plodin. Je dobré a důležité dbát na to, aby nedošlo k poškození rostlin. Sací pasti se používají převážně k odběru vzorků menšího, pohyblivějšího hmyzu, včetně jejich přirozených nepřátel, ale některé speciální sací lapače mohou být také použity k odběru vzdušných spor chorob (FRYČ 2021; FRYČ, RYCHLÝ 2018).

4.15 Barevné pasti

Mnoho druhů hmyzu je závislých na rostlinách, které kvetou a velké množství kvetoucích rostlin je závislých na určitých druzích hmyzu. Hmyz potřebuje květy, jelikož ty poskytují vydatný zdroj potravy v podobě nektaru nebo pylu. Při nasednutí na květ se zároveň na jeho tělo přichycuje pyl, který je následně přemísťován na další odlišné květy, a to pomáhá rostlinám s výměnou genetické informace. Testováním se ukázalo, že průměrný počet zachycených druhů závisí na barvě misky a na prostředí, v jakém se misky nachází. Přičemž různé druhy reagují na různé barvy. Například blanokřídlí se chytají spíše do bílých misek, zatímco brouci žijící na květech zase do misek žlutých (PERLÍK, ŠEBEK 2019).

4.16 Lepové pasti

Lepové pasti se mohou v ČR využívat pouze k odchytu hmyzu. Jak již název naznačuje leповé pasti obsahují speciální nevysychavá lepidla, do kterých se nalákaný hmyz zachytí. Tyto pasti se často využívají v domácnostech, pokud se chceme nežádoucích návštěvníků zbavit. Lepové pasti se pak musí měnit dříve, než jsou úplně plné hmyzu, nebo než se stačí zcela zaprášit (RETTICH, RÖDL 2002). Tyto pasti se nejčastěji využívají na švábovité hmyz, nebo v létě jako mucholapky.

4.17 Další sběrná místa

Zatímco hexapodi jsou v přírodě často sbíráni během vegetačního období, několik druhů, tolerujících nízké teploty a sníh, lze nalézt po celou zimu, kdy je teplota vzduchu nad bodem mrazu. Příkladem těchto skupin jsou pavoukovci (*Arachnida*), někteří chvostoskoci (*Collembola*), sněžnice (*Boreus*) a někteří brouci (*Coleoptera*). Zajímavé může být pozorování šestinožců, vyskytujících se v blízkosti lidských obydlí, sklepích, spižárnách nebo na půdách (HANEL 2018).

5 Oči vybraných druhů hmyzu

5.1 Slunéčko východní (*Harmonia axyridis*)

Tento mnohobarevný, původem asijský, brouk byl v minulém století předmětem intenzivního výzkumu, přičemž se probírala témata od populační dynamiky a genetiky až po praktickou biologickou kontrolu. Velmi rozsáhlá pestrobarevnost je pravděpodobně dědičná a úzce spojená s řadou alel. Tyto vícebarevné vzory mohou sloužit k celé řadě životně důležitých faktorů, jako například k výstražnému vzhledu, maskování nebo vzájemné signalizaci (KOCH 2003; TSUJI 2018).

Studii bylo zjištěno, že oválné složené oko je umístěno na vnějších stranách hlavy a je složené z hladkých ommatidií. Ommatidia se v závislosti na poloze poměrně výrazně liší. Zatímco tato jednoduchá očka, která se nachází v centrální oblasti oka, mají šestiúhelníkový tvar, ommatidia lokalizovaná v periferních částech oka mají nepravidelný tvar pětiúhelníku, nebo dokonce tvar čtverce. Tyto struktury jsou tvořeny rohovkovou čočkou, krystalickým čípkem, osmi buňkami sítnice, rhabdomem, bazální membránou a pigmentovými zrnky (WU 2011). Podle výzkumu se složené oči přizpůsobují změnám světla a tmy prostřednictvím stáčení rhabdomů a podélného pohybu pigmentových granulí. Ověření výskytu transportních genů a jejich identifikace se potvrdilo klonováním transkriptů v jejich plné délce (WU 2011; TSUJI 2018).

5.2 Sršeň obecná (*Vespa crabro*)

Vespa crabro je původem evropská sršeň. Tento druh se na rozdíl od jiných vyskytuje po celé Evropě. Život těchto letců se dělí na dvě základní fáze: založení a růst. Po zimním období sezónního klidu zakládají jednotlivé královny na jaře své kolonie. Kolonie se během léta rozrůstá, jelikož se v průběhu vytvářejí tisíce dělnic, a na přelomu léta a podzimu dochází k produkci nové generace samců a samic. Dělnice druhů, které jsou svou morfologií odlišné od královny, jsou obvykle neschopny páření, ačkoli mají vaječníky a v nepřítomnosti královny kladou haploidní samčí vajíčka.

Dalším charakteristickým znakem tohoto druhu je, že si často staví hnízda v malých uzavřených místech, včetně stromových dutin (CINI 2018; FOSTER et al. 2002).

Největší společenský blanokřídlý hmyz, sršni, zaujme nejen svou velikostí a žihadlem, ale také tím, že ho lze pozorovat při letu i v noci, čímž se liší od menších vespíků. Bylo však upozorováno, že množství světla v okolním prostředí má vliv na schopnost sršňů létat. Výzkumem bylo zjištěno, že dělnice snižují rychlost letu při nízkém osvětlení, zatímco trubci nikoli. Snižování rychlosti letu za těchto podmínek je pravděpodobně behaviorální adaptací, která má kompenzovat negativní účinky změněných neuronálních procesů ve smyslových neuronech ve tmě (KELBER 2011; SPIEWOK, SCHMOLZ 2006).

Všechny vespídy, včetně sršňů, mají důlek na čelní straně oka. Výsledkem je, že ommatidie vnímají malou část zorného pole dvakrát. Oblast přední části oka s nejkratšími vnitro-ommatidálními úhly, a tedy s nejlepším potenciálním rozlišením, je také oblastí s největšími a nejcitlivějšími ommatidiami, což ukazuje na existenci ostré zóny. Oči těchto sršňů mají větší fazetové čočky a delší ohniskovou vzdálenost. Uprostřed horní části hlavy, mezi složenýma očima se nachází tři ocelli (KELBER 2011).

5.3 Ruměnice pospolná (*Pyrrhocoris apterus*)

Pyrrhocoris apterus slouží již mnoho let jako spolehlivý model pro biologické studie. Zejména po objevu takzvaného "papírového faktoru", sloučeniny s účinkem juvenilních hormonů, které oddalují metamorfózu. Na tomto modelovém hmyzu bylo provedeno mnoho výzkumů v oblastech, jako je embryologie, vývojová a reprodukční biologie, endokrinologie, biochemie a biogeografie, cytogenetika a formální genetika, diapauza, bionomie, etologie, patologie, voltinismus, migrace, polymorfismus křídel, patogeny, predátoři a symbionti (SOCHA 1993). Pokud nastanou nepříznivé podmínky, může ruměnice prodloužit svůj generační cyklus o jeden rok ale i více let. Tento jev se označuje jako prodloužená diapauza (MACEK a spol. 2020).

Samičky ruměnic jsou často o něco větší a širší a jejich délka se pohybuje od 6,5 mm do 12 mm. Velikost předních křídel je různá; mohou být krátká nebo zcela chybět. Často mají červenou barvu s černými skvrnami. V klidu jsou křídla po překřížení hřbetu držena naplocho u těla. Tykadla červených ruměnic mají čtyři články a obvykle jsou nejméně o polovinu delší než tělo.

Oči jsou výrazné a vypadají téměř jako by vycházela z části podobné ramenu (HODGSON 2008). Za normálních okolností mají oči ruměnice hnědočervenou barvu a studiem bylo zjištěno, že jedinci se žlutými mutacemi postrádají červený pigment, což vede k pouze hnědé barvě očí. Červené, žluté nebo bílé fenotypové zbarvení vnější části těla lze rozpoznat již v prvním larválním svlékání, jelikož oční pigmentace je přítomna již na konci embryonálního života (SLAMA 1998). Když byly složené oči tohoto hmyzu odstraněny, ztratil se rytmus jeho lokomoční aktivity i fotoperiodické reakce. To prokázalo přítomnost fotoreceptorů pro fotoperiodickou reakci i lokomoční cykly ve složených očích. Složené oči ruměnice jsou vůči tělu poměrně veliké a jsou umístěny na obou stranách hlavy. Oči u tohoto druhu jsou velmi dobře vyvinuté, což poukazuje na to, že zrak hraje v jejich životě a přežití důležitou roli (HODKOVA 2015; HODGSON 2008). Ruměnice, stejně jako jiný hmyz, využívají svůj zrak pro navigaci v okolním prostředí, lokaci potravy a na vyhnutí se predátorům. Jsou také schopny rozlišovat mezi světlem a tmou, což jim napomáhá s rozvržením času a aktivit. (HOLECOVÁ 2012; ŠIKL 2012)

5.4 Mandelinka havezová (*Oreina cacaliae*)

Mandelinka havezová je hmyz, který se v naší přírodě vyskytuje obvykle od května do října a to především v horských oblastech (BRANDOS 2020). Ve vysoké bylinné vegetaci tento se tento brouk živí na rostlinách jako jsou starček Fuchsův (*Senecio ovatus*) a havez česnáčková (*Adenostyles alliariae*) (GEISER 1998), podle které je odvozen samotný název brouka. Tento druh hmyzu je velmi vzácným typem živorodého hmyzu, který zvládne konzumovat toxické a nebezpečné rostliny a dále také ukládat toxické sloučeniny (MONTAGNA 2014).

Tento brouk patří do čeledi mandelinkovití (*Chrysomelidae*), pro které platí, že mají téměř čtvercový tvar hlavy. Čelní štítek, který shora kryje svrchní část hlavy hmyzu je skoro stejně dlouhý jako široký. Povrch je zřetelně mikoretikulovaný a po povrchu se jeví jako mírně lesklý (GE 2015; BOROWIEC 2007). Jedná se o brouky s tmavě modrým až fialovým okrajem podél švu je zbarvení obvykle kovově modré nebo tmavě zelené (ANDĚRA 2018).

Přední část, ve které se nacházejí složené oči je krátká a široká, jejíž tvar by se dal přirovnat lichoběžníku. Složené oči jsou středně velké, ve vertikálním směru se jeví mírně protáhlé, což jim dodává ledvinovitý tvar. Čočky jsou výrazně vypouklé (GE 2015). V minulosti bylo prokázáno, že extraokulární fotoreceptory jsou pozůstalé larvální znaky, které se během metamorfózy částečně přesouvají do optických laloků, kde pak dále zůstávají během dospělosti. Světlo díky těmto oblastem proniklé stěnou hlavové části a je mu tak umožněno stimulovat fotoreceptory (HEIDENREICH et al. 2009).

5.5 Vosa útočná (*Vespula germanica*)

Tyto vosy se od běžných vos obecných (*Vespula vulgaris*) rozeznají jiným vzorem na čele. *Vespula germanica* má souvislý žlutý štítek se třemi černými tečkami v trojúhelníku a souvislý žlutý pruh na zadní straně očí. (MACEK a spol. 2010). Hnízda, která si staví jsou velká, mají šedou barvu a jsou umístěná poměrně hluboko pod zemí. Každá z nich se skládá přibližně ze 7500 jednotlivých buněk (KOLIBÁČ a spol. 2019). Hnízda si staví jednoletá a z papíroviny, což je směs mrtvé rostlinné hmoty, kterou rozžvýkají (HANEL 2018). Zásadní hospodářská role vos spočívá ve škodách, které způsobují na plodinách ve vinicích a v sadech, a v jejich sklonu krást med z úlů. Také jsou ale známé tím, že zabíjí a požírají mnoho jiného, často pro hospodáře škodlivého hmyzu, jako jsou mouchy a housenky (THOMAS 1960).

U vos se vizuální rozlišení vyvíjí společně s vizuálními signály. Maximální velikost úhlu mnohoúhelníkového oka ovlivňuje jak velikost oka, tak s přítomnost vizuálních signálů (SHEEHAN et al. 2014). U druhů rodu *Vespula* jsou přítomny jak složené oči, které vytvářejí obrazy, tak tři hřbetní jednoduché oči neboli ocelli, o nichž

se předpokládá, že rychle předávají informace o světle (LINK 2020). Jedním z jedinečných rysů očí tohoto rodu je uspořádání jejich ommatidií. Horní polovina oka je tvořena ommatidii orientovanými nahoru, zatímco spodní polovina je orientována dolů. Toto uspořádání umožňuje vosám téměř 360stupňové vidění, aniž by musely hýbat hlavou. Kromě toho jsou ommatidie na okrajích oka větší a rozmístěné ve větších vzdálenostech, což vosám poskytuje širší zorné pole (SPAETHE, WEHNER 2003). V oblasti hřbetního okraje se nachází orgány, které umožňují vosám detekovat polarizované světlo, což je užitečné zejména pro navigaci a orientaci (NARENDRA et al. 2007). Zajímavé je, že vosy rodu *Vespula* mají v každém oku jiný počet ommatidií. Pravé oko má kolem 5000 ommatidií, zatímco levé jich má pouze kolem 3000. Není zcela jasné, proč tomu tak je, ale jednou z možností je, že tento fenomén umožňuje lépe detekovat pohyb v určitém směru (WARRANT et al. 2010).

5.6 *Suillia pallida*

Suillia pallida je hmyz z čeledi lanýžkovití (*Heleomyzidae*). *Heleomyzidae* je čeleď much, která je veřejnosti obecně poměrně neznámá, ale díky své jedinečnosti má značnou pozornost v různých biologických a ekologických výzkumech. Mouchy z čeledi *Heleomyzidae* jsou široce rozšířené a často se vyskytují ve sladkovodním prostředí, jako jsou rybníky a potoky. Tyto drobné, tenké mušky mají křídla, na kterých jsou často rozpoznatelné vzory černých teček nebo pruhů. Jejich životní cyklus je často poměrně jednoduchý, samičky kladou vajíčka na vodní hladinu, kde se z nich vyvíjejí larvy, které se živí rozkládajícími se organickými zbytky (OZEROV 1997). V jedné studii, provedené Andersonem et al. (2018), bylo zjištěno, že larvy *Suillia pallida* mohou trávit různé organické materiály, včetně živočišných tkání, rostlinných zbytků, a dokonce i průmyslových materiálů, jako jsou plasty. Díky své schopnosti pomáhat při rozkladu a ecyklaci odpadků mají zásadní význam v přírodním i umělém prostředí.

Suillia pallida je významný druh mouchy s jedinečným potravním chováním, který hraje důležitou roli v ekosystému. Její schopnost rozkládat širokou škálu organických látek (ANDERSON et al. 2018) a přežít v různých typech půdy z ní činí cenný nástroj pro bioremediační úsilí (MAKAROVA, LEE 2018), zatímco její

přítomnost na lidských ostatcích může poskytnout důležité forenzní informace (CHARABIDZE et al. 2014).

Podle nejnovějších studií mají mouchy čeledi *Heleomyzidae* v porovnání s jiným hmyzem poměrně málo ommatidií v očích. Počet se pohybuje okolo 4000 (WARRANT et al. 2004). To naznačuje, že *Heleomyzidae* mohou mít ve srovnání s jiným hmyzem relativně nízkou zrakovou ostrost a citlivost na světlo. Oči *Suillia pallida* se liší uspořádáním ommatidií. Na rozdíl od pravidelného šestiúhelníkového vzoru, jsou ommatidie *Suillia pallida* uspořádány spirálovitě. Tohoto neobvyklého uspořádání si poprvé všiml A. C. Neville v 50. letech 20. století, ale jeho význam byl plně doceněn až nedávno.

Vědci zjistili, že spirálovitá struktura očí mouchy *Suillia pallida* je adaptivní a umožňuje jí detekovat polarizované světlo. Polarizace je vlastnost světla, která může poskytnout informace o poloze slunce, což je nezbytné pro navigaci a orientaci. Schopnost očí *Suillia pallida* detekovat polarizované světlo podrobně zkoumali vědci z Lundské univerzity ve Švédsku. Pomocí elektrofyziologických záznamů prokázali, že jsou mouchy schopny detekovat lineárně polarizované světlo a že citlivost jejich očí je nejvyšší v ultrafialové oblasti. Zjistili také, že spirálové uspořádání ommatidií zlepšuje detekci tohoto světla (KELBER, BALKENIUS 2016; FOSTER, KELBER, 2020).

5.7 Škvor obecný (*Forficula auricularia*)

Jedná se o druh hmyzu patřící do čeledi škvorovití, který se vědecky nazývá *Forficula auricularia*. Jeho přirozeným prostředím je Asie a palearktická oblast. Zastavuje se u kvetoucích rostlin řebříčku obecného (*Achillea millefolium*), břečťanu (*Hedera*), skalníku Dammerově (*Cotoneaster dammeri*) a netýkavky nedůtklivé (*Impatiens noli-tangere*). Jsou to noční, samotářští všežravci. Dostává se jim rodičovského vedení, při které péči o mláďata zajišťují samice. Škvor obecný je bilaterálně souměrný (ENCYCLOPEDIA OF LIFE 2022).

Jednou z nejzajímavějších vlastností škvorů je jejich schopnost vidět při slabém světle. Tato schopnost je daná tím, že každé ommatidium obsahuje velké množství

tyčinek, které hmyzu umožňují detekovat i ty nejmenší zdroje světla. Ve skutečnosti jsou oči škvorů tak citlivé na světlo, že dokonce zvládnou rozlišovat mezi polarizovaným a nepolarizovaným světlem, což jim pomáhá v orientaci v prostředí. Oči dokážou vnímat i pohyb. Je to dáno tím, že tyčinkové buňky každého ommatidia mají určitou strukturu, která jim umožňuje rozpoznat pohyb přicházející z různých směrů. Tato schopnost je pro škvora klíčová, protože mu umožňuje uniknout predátorům a orientovat se v okolí. Oči *Forficula auricularia* jsou polokulovité, vyčnívají z hlavy a jsou zakřivené směrem ven. Výška a délka bočně umístěných oválných složených očí jsou stejné. Obvodový hřeben je obklopuje. Ocelli se nevyskytují. Je zajímavé, že oči škvorů ovlivňují také jejich pářící návyky. Samice hodnotí potenciální partnery pomocí očí a často si vybírají samce s největšíma a nejsymetričtějšima očima (WARRANT 2004; WARRANT, DACKE 2011; NEUBERT 2017; ZINKLER, ZINKLER 1998).

5.8 Octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*)

Octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*) je důležitým modelovým organismem pro genetický výzkum díky své malé velikosti, krátké generační době a relativně jednoduchému genomu. Octomilky se v laboratoři snadno chovají a rychle se jim rodí velké množství potomků. To vědcům umožňuje rychle vytvořit velké populace mušek pro genetické testování a experimenty. Octomilka je ideálním modelovým organismem pro studium růstu a chování, protože je malá a lze s ní snadno manipulovat a pozorovat ji pod mikroskopem (BELLEN, et al. 2010). Velmi jednoduchý genom *Drosophily melanogaster* je další výhodou jejího využití v genetických studiích. Genom octomilky je podstatně menší než genom člověka, má 180 milionů párů bází. Tento genom má navíc mnoho opakujících se sekvencí, což usnadňuje identifikaci a analýzu určitých genů (GREENSPAN, FERVEUR 2000).

Každé ommatidium v oku drozofily se skládá z osmi fotoreceptorových buněk a podpůrných buněk. Fotoreceptorové buňky jsou zodpovědné za detekci světla, zatímco podpůrné buňky pomáhají udržovat strukturu ommatidia. Ommatidia jsou uspořádána do šestiúhelníkové mřížky, kdy každé ommatidium směřuje trochu jiným směrem. Tato speciální orientace ommatidií umožňuje široké zorné pole a účinnou detekci

pohybujících se objektů. Jejich velikost a tvar se v různých částech oka liší, přičemž větší ommatidia se nacházejí ve středu oka a menší na jeho okrajích. Uspořádání fotoreceptorových buněk v ommatidiu umožňuje účinnou detekci a rozlišování světla (READY 2002). Pro vznik oka octomilky, který je přísně kontrolovaným procesem, je nutná koordinovaná exprese několika genů. Gen „eyeless”, který je nezbytný pro vznik primárního očního orgánu, je jedním z hlavních regulátorů vývoje oka u drozofily. Mezi další geny, které se podílejí na vývoji oka, patří geny regulující buněčnou diferenciaci, buněčnou signalizaci a tvorbu určitých struktur oka (KUMAR 2010).

5.9 Bzučivka obecná (*Calliphora vicina*)

Bzučivky jsou jednou z nejznámějších skupin hmyzu. Bzučivky se používají v biochirurgii a v terapii odstraňování červů a mají značný lékařský a veterinární význam vzhledem k jejich schopnosti přenášet patogeny, potenciálu vyvolávat traumatickou myiázu a jejich využití (SZPILA et al. 2008). *Calliphora vicina* je druh mouchy, který se běžně vyskytuje v Evropě a Asii. Je známá, protože je jedním z prvních druhů hmyzu, který kolonizuje rozkládající se tělo, což z ní činí důležitý indikační druh pro odhad postmortálního intervalu (AMENDT et al. 2007). Kromě forenzního významu je bzučivka obecná studována také pro své potenciální lékařské využití. Vědci v larvách identifikovali několik sloučenin, které mají antimikrobiální a protizánětlivé vlastnosti. To naznačuje, že by mohly být využity při hojení ran a dalších lékařských zákrocích (MAŠÁN et al. 2020).

Oči mouchy *Calliphora vicina* byly předmětem mnoha studií kvůli jejich jedinečným vlastnostem a významu pro chování much. Ommatidie oka jsou organizovaně uspořádány a tvoří kulovitou strukturu, která pokrývá většinu hlavy mouchy. Díky tomu hmyz vidí téměř všemi směry, což mu poskytuje široké zorné pole. Zajímavým rysem oka *Calliphora vicina* je přítomnost specializované struktury zvané pseudopupila, která vzniká odrazem světla od povrchu krystalické tyčinky uvnitř každého ommatidia (WARRANT, DACKÉ 2011). Navzdory svým působivým zrakovým schopnostem má oko této mouchy určitá omezení, zejména za špatných světelných podmínek. Vědci však zjistili, že tato moucha je schopna kompenzovat tyto

nedostatky zvětšením velikosti svých ommatidií, což jí umožňuje shromažďovat více světla a zvýšit její zrakovou citlivost (BARNETT et al. 2007).

5.10 Bzučivka zední (*Pollenia rudis*)

V holarktické zóně je *Pollenia rudis*, hojně rozšířena. *Allolobophora chlorotica* a *Eisenia rosea* jsou dva druhy žížal, na kterých jejich larvy nejvíce parazitují. Početnost této bzučivky je zřejmě ovlivněna koncentrací živočichů z čeledi žížalovitých (*Lumbricidae*). Dospělci much se obvykle zdržují venku, kde často navštěvují květy a plody. Bzučivky, které patří do čeledi *Calliphoridae*, jsou známé tím, že za chladného počasí často vyhledávají úkryt venku. Bylo zjištěno, že dospělci *P. rudis* často přezimují v konstrukcích (FAULDE 2001).

Oči samice jsou dichoptické, menší oči odděleny čelem, zatímco oči samců jsou holoptické, velké oči zaujímající téměř celou hlavu (RICHARDS 1972). Ommatidie oka *Pollenia rudis* jsou uspořádány do pravidelného šestiúhelníkového vzoru a tvoří kulovitý tvar, který pokrývá většinu hlavy mouchy. Každé ommatidium v oku těchto much obsahuje specializovanou čočku a shluk fotoreceptorových buněk, které detekují světlo a vysílají signály do mozku k vytvoření obrazu (MARSHALL, CHAPMAN 2016). Kromě toho každé ommatidium obsahuje pigmentové buňky, které pomáhají filtrovat a pohlcovat světlo, což mouše umožňuje lépe vidět na jasném slunečním světle (HORRIDGE, GIDDINGS 1988).

5.11 Včela medonosná (*Apis mellifera*)

Od 17. století, kdy člověk poprvé přivezl *Apis mellifera* na jiné kontinenty, než jsou její původní, což je Evropa, západní Asie a Afrika, se rozšířila i do východní Asie, Austrálie, Severní a Jižní Ameriky. Louky, otevřené lesní plochy a zahrady patří mezi stanoviště, která včely medonosné upřednostňují, protože se v nich nachází dostatek vhodných kvetoucích rostlin. Pokud mají k dispozici dostatek vody, potravy a úkrytů, může se jim dařit i na pastvinách, v pouštích a bažinách. K hnízdění potřebují štěrbinu, například v dutých stromech *Apis mellifera* má často červenohnědou barvu s černými pruhy a oranžovožlutými kroužky na břiše. Na hrudi mají více chlupů než na břiše.

Kromě toho mají na zadních nohách pylové košíčky. Většina nohou včely medonosné má tmavě hnědou nebo černou barvu. Ve včelstvu tvoří převážnou část samic včel medonosných sterilní dělnice. Rozmnožovat se a klást vajíčka mohou pouze královny. V jednom včelstvu je obvykle jen jedna reprodukční královna. Chemické signály jsou základem komunikace včel rodu *Apis mellifera* a většina jejich vjemů a komunikačních činností se točí kolem čichu a chuti. Členové včelstva jsou navzájem chemicky propojeni. Včelstva používají charakteristické chemické znaky svých včelstev k vzájemné identifikaci a k rozpoznání včel ze sousedních včelstev (HAMMOND, BLANKENSHIP 2009).

Včelí složené oko se skládá asi ze 6900 ommatidií, které jsou obklopeny pigmentovými buňkami. Mezi těmito buňkami se nachází vláskové buňky, které pokrývají celý povrch oka nerozvětvenými chloupky. Celý povrch oka pokrývá vrstva chitinu, která je reaguje s chitinem tělní stěny. Každé ommatidium se skládá z krystalického čípku, vnější čočky a rhabdomu, který je obklopen osmi, někdy i devíti dlouhými sítnicovými buňkami, které se táhnou od čípku až k bazální membráně. Kromě toho má každé ommatidium přibližně dvacet osm pigmentových buněk, včetně dvou rohokových pigmentových buněk, které obklopují krystalický čípek (PHILLIPS 1905). Jednotlivé ommatidie jsou uspořádány do šestiúhelníku a tvoří zakřivený povrch, který pokrývá většinu hlavy včely (LAND, FERNALD 1992). Toto uspořádání umožňuje včele medonosné vidět všemi směry, včetně směru nahoru a dolů, což je důležité pro navigaci a orientaci (SOMANATHAN et al. 2010).

6 Metodologie

6.1 Umisťování masových a pivních pastí

Pasti byly umístěny v lese a na kompostu v severočeské vesnici, ve Starých Křečanech. Ruční odchyt byl prováděn individuálně ve stejné oblasti. Po dobu několika týdnů byly na předem vybraná místa umístěny pasti s návnadou. Jako návnada bylo jednotlivě v plastové pasti použito pivo a maso. Severní Čechy jsou bohaté na druhy hmyzu, zajímavým druhem hmyzu, který se v této oblasti vyskytuje, je například vážka. V Severních Čechách lze pozorovat vážky mnohobarvé, hnědavé či křehké. Předpokládaným úlovkem při umisťování pastí byli mimo jiné vosy, které jsou běžným hmyzím druhem v této oblasti, sršně, které jsou poměrně běžné v lesích, parcích a zahradách nebo nějaké druhy komárů, kteří jsou v Severních Čechách poměrně běžní, jelikož se zde nachází řada řek a vodních nádrží.

Pivní pasti. Některé druhy hmyzu jsou známe svou přitažlivostí k pivu. Například mouchy, komáři a vosy. Je to pravděpodobně dáno sladkou chutí piva, kvasinkami nebo aromatem, které z něj jde cítit. Proto byly pasti vytvořeny s představou odchytu právě těchto druhů hmyzu.

Pivní pasti byly vyrobeny z plastových lahví. Nejprve se v potřebné výšce (odhadem v jedné třetině) nařízly nožem a následně po celé šířce odstříhly nůžkami. Horní část PET lahve byla oříznuta tak, aby vzniklo víčko s uzávěrem a dolní část tak, aby vznikla nádoba, do které se později nalila návnada. Menší část byla vložena hrdlem dolů do části větší, čímž vznikla volná cesta pro vstup hmyzu. Takto připravené části k sobě byly připevněny lepicí páskou. Následně byla, pro lepší orientaci, každá z lahví popsána. Nakonec byly, pomocí skalpelu, vyříznuty do každé lahve 2 dírký, kterými byla protažena stuha pro pohodlnější upevnění v přírodě. Do lahví bylo nalito pivo a poté byly umístěny do mnou předem určených lokalit. Po umístění lahví na určená místa byla past pravidelně kontrolována, aby se ověřilo, zda se na ni nepřilepilo příliš mnoho hmyzu nebo zda nebyla negativně ovlivněna povětrnostními a jinými meteorologickými podmínkami.

Masové pasti. Poměrně velké množství druhů hmyzu je přitahováno masem, nebo zvířecími bílkovinami. Nejznámějšími jsou některé druhy much, mûr nebo brouků. Maso se proto často používá jako relativně atraktivní návnada při výrobě hmyzí pasti. Při výrobě bylo myšleno na potenciální nebezpečí přilákání jiných druhů zvěře, jako například koček, myší nebo jiných divokých zvířat. Pasti byly užity opatrně a byly pravidelně kontrolovány.

Při výrobě masových pastí se postupovalo obdobně jako u pastí pivních. Jediný rozdíl nastal při upevňování vábničky. Jako návnada byl použit kus masa, který byl vložen do igelitového pytlíku, do kterého bylo skalpelem vyřezáno několik drobných děr. Takto připravená návnada byla připevněna k vnitřní straně hrdla a následně byla připravená past umístěna do přírody. Poté, co byly lahve umístěny na jejich určená místa, byla i tato past pravidelně kontrolována, aby bylo zajištěno, že není příliš zamořená hmyzem nebo vlivem počasí nebo jiných povětrnostních podmínek.

6.1.1 Pivní a masové pasti v lese

Lesy patří mezi důležité přírodní zdroje, které hostí mnoho druhů hmyzu. Lesy nabízejí obrovskou rozmanitost, včetně brouků, housenek, motýlů, vos a včel. Umístění pastí na hmyz bylo vykonáno s myšlenkou, že může poskytnout cenné informace o druzích hmyzu, kteří se v daném lesním prostředí vyskytují. Při umístění pastí byl brán ohled na to, aby byly bezpečné pro okolní prostředí a aby neohrožovaly životy zvířat, jako jsou například ohrožené druhy hmyzu nebo zvěře. Pasti byly pravidelně kontrolovány a odstraňovány, aby nedošlo k nežádoucímu odchytu jiných zvířat.

V přirozeném prostředí, které lesy nabízejí, se hmyzu dobře daří a může se tedy rychle rozmnožovat. V důsledku toho se hmyz, vyskytující se v lesích, může vyskytovat v prostředí, které je blízké jeho přirozené podobě, což by mohlo být pro některé testy významné. Hmyz nalezený v lesích by měl být čistší a méně kontaminovaný než hmyz z jiných prostředí, jelikož lesy jsou obvykle méně znečištěné než městské nebo průmyslové oblasti.

Souřadnice umístění pivní pasti v lese: 50.944461, 14.502562

Souřadnice umístění masové pasti ve lese: 50.944243, 14.502067



Obrázek 2: Pivní past umístěna v lese ve Starých Křečanech



Obrázek 3: Masová past umístěna v lese ve Starých Křečanech

6.1.2 Pivní a masové pasti na kompostu

Z podobného důvodu jako umístění pastí do lesa byly pasti umístěny na kompost. Kompostování je proces, při kterém se organický materiál rozkládá a vytváří se tak půda bohatá na živiny, která může podporovat růst mnoha druhů rostlin, ale také hmyzu. Vytváří teplé a vlhké prostředí, které je ideální pro růst a rozmnožování hmyzu. To vede k závěru, že je možné najít velké množství různých druhů hmyzu právě v blízkosti kompostu, které by mohly být vhodné pro následné pozorování a testování.

Jednou z výhod využití oblasti s kompostem je to, že je snadno dostupný a může být vyroben i v domácím prostředí. Při sběru hmyzu bylo dbáno na to, aby nedošlo k narušení ekosystému kompostu.

Souřadnice umístění pivní pasti na kompostu: 50.948894, 14.493674

Souřadnice umístění masové pasti na kompostu: 50.948895, 14.493702



Obrázek 4: Pivní a masová past umístěny v blízkosti kompostu ve Starých Křečanech

6.2 Ruční odchyt

Ruční sběr hmyzu pro testování byl poměrně jednoduchý proces, jelikož se nemuselo předem nic vyrábět. Při individuálním odchytu byla použita síťka, pinzeta nebo byl hmyz odchycen manuálně rukama za použití rukavic. Hmyz byl sbírán opatrně, aby nedošlo k jeho poškození. Veškeré sebrané vzorky byly uloženy v nádobách s víkem. Nejčastějšími místy sběru byly zahrady, louky a okraje lesa.

6.3 Sběr vzorků

Pasti byly pravidelně kontrolovány a vyprazdňovány. Pro uchování odchyceného hmyzu pro další studium a pozorování, aby se hmyz nepoškodil byl zvolen skleněný a papírový box. Část hmyzu byla uchována ve skleněném boxu s víčkem, tento způsob uchování je vhodný pro menší druhy hmyzu. Sklenice byly očištěné a suché. Aby se hmyz udržel v místě položení, byly skleněné boxy vybaveny vatovou podestýlkou. Ostatní hmyz byl uložen v papírovém boxu, kde byl jako podestýlka pro udržení hmyzu na místě použit ubrousek.

Hmyz, který byl odchycen ručně byl nejprve usmrcena a následně uložen do skleněných boxů s odstranitelným víkem. I v těchto nádobách byla použita podestýlka z vaty, aby se hmyz udržel na jednom místě.

6.3.1 Usmrcení hmyzu

Hmyz, který byl odchycen živý musel být pro možnost dalšího manipulování a testování usmrcen. Hmyz byl předávkován anestetiky. Jako smrtidlo byl použit diethylether. Diethylether je organická bezbarvá, hořlavá kapalina, která má charakteristický sladký zápach. Usmrcení hmyzu diethyletherem je poměrně běžná a účinná metoda, která se používá k usmrcení hmyzu pro další studium.

Byla připravena větší uzavíratelná sklenice, velikost byla dostatečná na to, aby se do ní hmyz bez problémů vešel. Následně byl připraven diethylether, při zacházení s touto hořlavinou bylo postupováno opatrně a s obezřetností. Bylo dbáno na to, aby se v blízkosti nenacházel žádný otevřený oheň. Po nasazení ochranných rukavic se vzal kus vatového tamponu, který se nasákl diethyletherem. Tento nasáklý vatový tampon byl následně vložen do sklenice s hmyzem. Sklenice byla rychle uzavřena víkem a bylo dbáno na to, aby byla dobře a pevně utažena, aby se diethylether nedostal ven. Poté se počkalo několik minut, během kterých byl skleněný box ve stálé poloze. K úplnému usmrcení hmyzu došlo během několika vteřin.

Po usmrcení byl hmyz vyndán z použité sklenice a následně uschován, jelikož byl tímto způsobem připraven k další manipulaci a následnému studiu.

6.4 Určení vzorků

Před určením hmyzu byla zaznamenána data o každém odchyceném jedinci. Jako jsou informace o místě a čase sběru, prostředí, ve kterém byl hmyz nalezen a také o formě odchyty. Tato data byla zaznamenána s myšlenkou poskytnutí kontextu a s představou o lepším porozumění rozšíření hmyzu.

Hmyz byl určen pomocí klíčů a konzultace s odborníky, aby bylo zajištěno přesné přidělení jednotlivých druhů hmyzu.

Určení hmyzu pomocí klíčů bylo provedeno pomocí seznamů obsahujících důležité morfologické znaky, které se dají pozorovat u jednotlivých jedinců. Mezi tyto znaky patří například velikost těla, barva, tvar křídel, antény nebo nohy. Postupně byl konkrétní druh identifikován. Byly využity jak tištěné, tak elektronické druhy klíčů. Tištěné klíče byly využity *Stručný obrazový klíč k určování hlavních skupin suchozemských šestinožců (Hexapoda)*. (HANEL 2018) a *Atlas fauny České republiky* (ANDĚRA 2018). Jako elektronický klíč byla použita aplikace *Seek* od iNaturalist.

Některé fotky hmyzu byly poslány odborníkům v oblasti entomologie. Hmyz byl poslán odborníkům, jako jsou Mgr. Tkoč Michal, Ph.D. a RNDr. Jindřich Roháček, Csc. Kontakty na entomology nám poskytl pan Jiří Preisler, je člen Entomologického klubu při Labských pískovcích. Fotky vzorků byly provedeny pomocí binokulární lupy, přičemž byl hmyz vyfocen z různých směrů a úhlů. Výsledné fotografie byly očíslovány, uloženy na disk a poslány odborníkům k určení. Odborné konzultace velmi výrazně pomohly při obtížnější identifikaci hmyzu jako je například hmyz z čeledi lanýžkovití (*Heleomyzidae*), *Suillia pallida*.

6.5 Postup přípravy vzorků

Příprava vzorků byla nedílnou součástí k následnému pozorování hmyzu. Cílem bylo detailní zkoumání anatomických struktur, morfologie a fyziologie hmyzu. Proto bylo velmi důležité vzorky připravit správným způsobem.

Prvním krokem při přípravě vzorků hmyzu byl odchyt jedinců. Hmyz byl odchycen ručně nebo pomocí masových a pivních pastí.

Po odchyčení hmyzu bylo nutné hmyz, který byl ještě naživu usmrtit. Jako smrtidlo byl použit ether. To umožnilo další manipulování s hmyzem a testování tohoto hmyzu.

Po odchyčení a usmrcení byl hmyz uschován ve skleněných nebo papírových boxech s odstranitelnými uzávěry.

Nakonec byl hotový vzorek připraven pro pozorování pod binokulární lupou a pod oddělení hlavy od těla také pod elektronovým mikroskopem. Výsledky pozorování byly zdokumentovány fotograficky.

6.6 Práce s lupou

Pro práci byla použita binokulární lupa⁴.

Nejprve byl připraven pracovní prostor. Bylo zvoleno dobře osvětlené místo v laboratoři, aby byla zajištěná optimální viditelnost. Před prací byl zajištěn dostatek prostoru pro práci a také bylo zajištěno, aby pracovní plocha byla čistá. Následně byla binokulární lupa nastavena tak, aby vyhovovala potřebám pro pozorování odchyčených jedinců. Pozorovaný obraz byl v reálném čase převáděn na monitor, což umožnilo detailnější pozorování hmyzu a okamžitou fotodokumentaci. Vzorky byly čisté a dobře připravené pro pozorování. Případné nečistoty, zbytky nebo jiné nežádoucí materiály, které by mohly negativně ovlivnit pozorování byly odstraněny.

Při pozorování se postupovalo tak, že oči byly přiloženy ke korekčním čočkám a obraz se postupně zaostřoval tak, aby byl co nejostřejší. Postupně se upravovalo zaostřování i pozorovací úhel. Se vzorkem bylo pohybováno podle potřeby. Při pohybování bylo dbáno na to, aby nedošlo ke znečištění vzorku. Veškeré pozorování bylo zdokumentováno pomocí fotografií.

6.7 Práce s elektronovým mikroskopem

Dále bylo pozorování provedeno elektronovým mikroskopem⁵.

4 Binokulární lupa je mikroskop, který umožňuje současné vidění oběma očima. Jedná se o velmi užitečnou pomůcku při zkoumání drobných objektů, jako je například právě hmyz.

Před umístěním preparátu na kovovou mřížku byla ve většině případech hlava hmyzu oddělena od těla. Povrch vzorku poté bylo potřeba připravit pro lepší výsledky pozorování. Byla nutná povrchová úprava v podobě nanesení tenké vrstvy kovu. Připravený vzorek byl umístěn do elektronového mikroskopu. Práce s elektronovým mikroskopem vyžaduje školení a znalosti o technických aspektech a bezpečnostních opatřeních, tudíž operátor, Ing. Pavel Kejzlar Ph.D., nastavil v mikroskopu požadované parametry, jako je zvětšení, ostrost a intenzita paprsku, a následně provedl i samotné pozorování.

Během pozorování byly provedeny fotodokumentace vzorku, které byly dále analyzovány.

5 Elektronový mikroskop je stroj, pomocí kterého se dají zkoumat nanostruktury různých biologických preparátů. K výzkumu preparátu pomocí elektronové mikroskopie se využívá elektronový svazek, který je zaostřován elektromagnetickým polem za pomoci elektromagnetických čoček. Vzorky se nechávají pokovit velmi tenkou vrstvou iridia, paladia nebo zlata. Tím preparáty změňí svou barvu. Mezi výhody oproti optickému mikroskopování patří jeho rozlišovací schopnost. Jelikož vzorky pozorujeme ve svazku elektronů, musí být vodivé a je nutné pracovat ve vakuu.

7 Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny nejdůležitější výsledky a závěry, získané prostřednictvím našeho pozorování. Cílem pozorování bylo zjistit morfologickou stavbu očí hmyzu, získat tak relevantní informace o jejich vlastnostech a vysvětlit tak, jakým způsobem se hmyz dokázal adaptovat na vnější prostředí. Tato kapitola představuje klíčová zjištění a diskutuje jejich význam ve světle našeho výzkumu a zároveň poskytuje stručný popis použitých metodik.

Kapitola je uspořádána tak, že na prvním místě je zařazení odchyceného a následně pozorovaného hmyzu, tento aspekt je doprovázen fotodokumentací a nakonec jsou veškeré struktury popsány.

7.1 Tabulka

V této podkapitole je uvedena Tabulka 1 s podrobnými údaji o odchyceném hmyzu, jako je druhová identifikace v češtině a latině, lokalita a technika odchyty včetně kategorizace jednotlivých druhů. Tato tabulka, která podává přehled o rozmanitosti hmyzu v naší výzkumné oblasti, je důležitou pomůckou pro evidenci a organizaci provedeného pozorování. Každý řádek tabulky reprezentuje jeden druh hmyzu, který byl během výzkumu úspěšně identifikován a zaznamenán. Informace v tabulce mimo jiné pomáhají získat určitý pohled na druhovou kompozici a distribuci hmyzu v severních Čechách.

Tabulka 1: Tabulka pozorovaného hmyzu

Tabulka pozorovaného hmyzu						
	Česky	Latinsky	Souřadnice odchyty	Způsob odchyty	Řád	Čeď
1.	Slunéčko východní	<i>Harmonia axyridis</i>	50.948714, 14.494059	Ruční	Brouci (<i>Coleoptera</i>)	Slunéčkovití (<i>Coccinellidae</i>)
2.	Sršeň obecná	<i>Vespa crabro</i>	50.944461, 14.502562	Pivní past	Blanokřídlí (<i>Hymenoptera</i>)	Sršňovití (<i>Vespidae</i>)

3.	Ruměnice pospolná	<i>Pyrrhocoris apterus</i>	50.949187, 14.494944	Ruční	Ploštice (<i>Heteroptera</i>)	Ruměnicovití (<i>Pyrrhocoridae</i>)
4.	Mandelinka havezová	<i>Oreina cacaliae</i>	50.948857, 14.493820	Ruční	Brouci (<i>Coleoptera</i>)	Mandelinkovití (<i>Chrysomelidae</i>)
5.	Vosa útočná	<i>Vespula germanica</i>	50.948894, 14.493674	Pivní past	Blanokřídlí (<i>Hymenoptera</i>)	Sršňovití (<i>Vespidae</i>)
6.	--	<i>Suillia pallida</i>	50.944461, 14.502562	Pivní past	Dvoukřídlí (<i>Diptera</i>)	Lanýžkovití (<i>Heleomyzidae</i>)
7.	Škvor obecný	<i>Forficula auricularia</i>	50.944243, 14.502067	Masová past	Škvoři (<i>Dermaptera</i>)	Škvorovití (<i>Forticulidae</i>)
8.	Octomilka obecná	<i>Drosophila melanogaster</i>	50.944461, 14.502562	Pivní past	Dvoukřídlí (<i>Diptera</i>)	Octomilkovití (<i>Drosophilidae</i>)
9.	Bzučivka obecná	<i>Calliphora vicina</i>	50.948895, 14.493702	Masová past	Dvoukřídlí (<i>Diptera</i>)	Bzučivkovití (<i>Calliphoridae</i>)
10.	Bzučivka zední	<i>Pollenia rudis</i>	50.948895, 14.493702	Masová past	Dvoukřídlí (<i>Diptera</i>)	Bzučivkovití (<i>Calliphoridae</i>)
11.	Včela medonosná	<i>Apis mellifera</i>	50.6188811, 15.2181139	Ruční	Blanokřídlí (<i>Hymenoptera</i>)	Včelovití (<i>Apidae</i>)

7.2 Výsledný popis struktur a fotodokumentace

Tato kapitola se zaměřuje na podrobný popis struktur očí hmyzu, které byly pozorovány a analyzovány. V kapitole je také zahrnuta fotodokumentace, která umožňuje vizuálně zaznamenat a sdílet objevy. Na každém snímku z binokulární lupy se v rohu obrázku nachází měřítko.

7.2.1 Slunéčko východní (*Harmonia axyridis*)

Na obrázku 5 je slunéčko východní umístěno pod binokulární lupou a na obrázku 6 je umístěno pod elektronovým mikroskopem.

Na obrázku 5 pozorovaného vzorku pod binokulární lupou je pohled na oko slunéčka východního částečně znemožněn jeho robustním exoskeletem a okolními pancéřovými pláty. Oči jsou umístěny v exoskeletu, který slouží jako vnější ochranný obal. Exoskelet obklopuje celé tělo brouka včetně hlavy a je tvořen tvrdými destičkami.

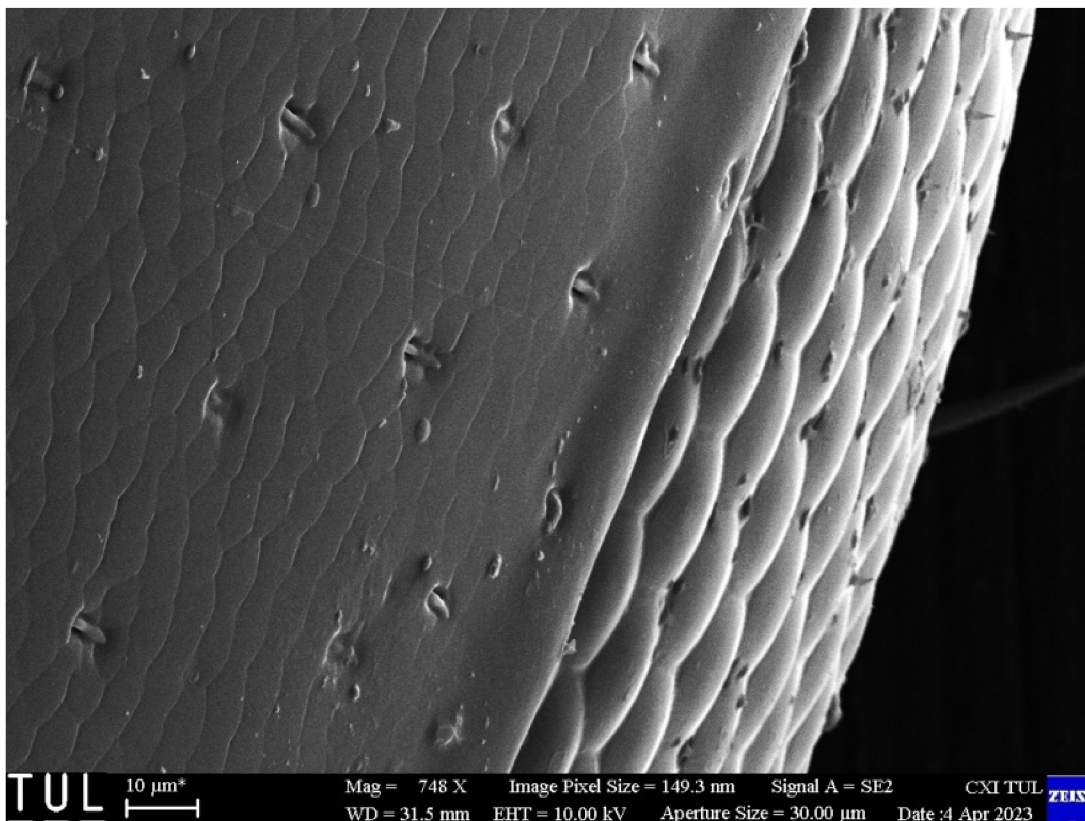
Tyto destičky tvoří pevný pancíř, který chrání jemné vnitřní struktury, například oči, před možným poškozením. Lesklý a klenutý povrch oka zůstává na snímku skrytý, což ztěžuje pozorování jeho složité struktury. Navzdory těmto okolnostem lze zahlédnout obecnou polohu oka. Je vidět, že oči jsou umístěny na přední části hlavy a zabírají její poměrně velkou část.



2000 μm

Obrázek 5: Slunéčko východní (*Harmonia axyridis*) pod binokulární lupou

Pod elektronovým mikroskopem je zřetelný vypouklý tvar jednotlivých ommatidií. Je zřejmé, že ommatidia jsou na sebe, v periferní části oka, zajímavě navázána a nejsou od sebe zřetelně oddělena. Mimo jiné je také na obrázku vidět jemná struktura pancíře chránící oči slunéčka. Na obrázku 6 jsou dobře viditelné jemné struktury a malé trnité výstupky pancíře.



Obrázek 6: Sluněčko východní (*Harmonia axyridis*) snímek z elektronového mikroskopu

7.2.2 Sršeň obecná (*Vespa crabro*)

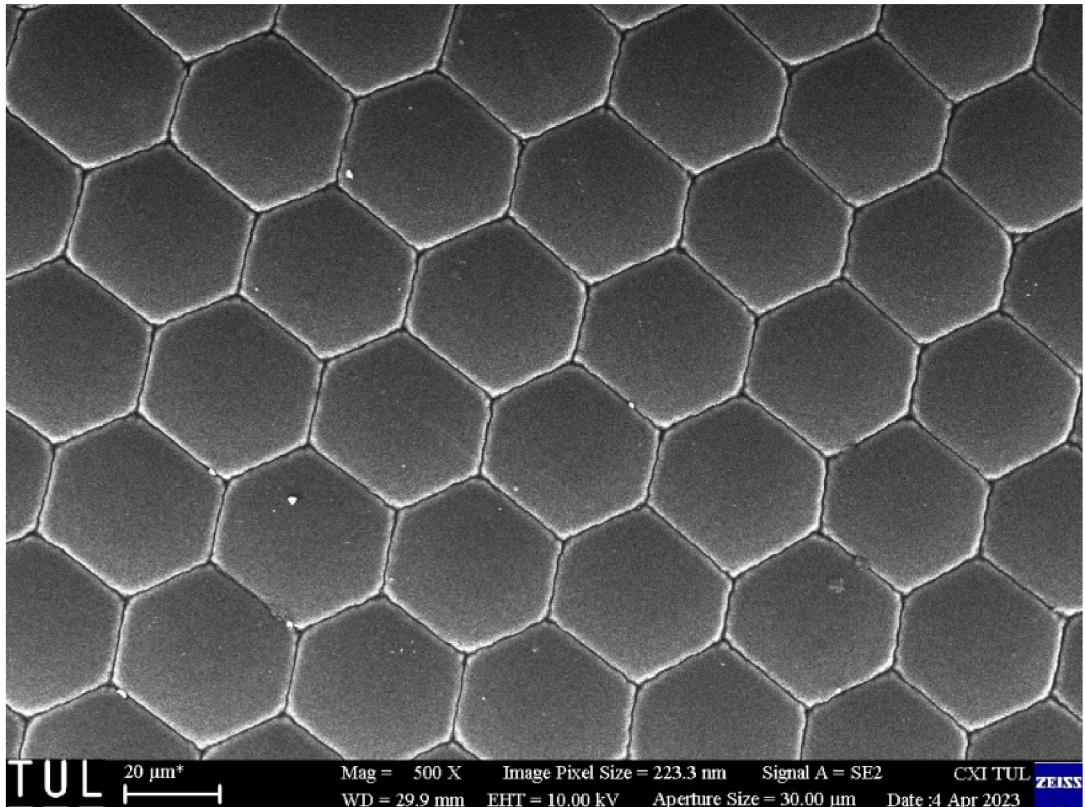
Na obrázku 7 je hlava sršně umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 8 a 9 je umístěna pod elektronovým mikroskopem, což odhaluje detailní pohled na její rysy.

Pod binokulární lupou se sršňí oko jeví jako velmi nápadná a mnohotvárná struktura. Složené oči jsou velké a dominují přední části hlavy sršně. Oči se skládají z četných ommatidií, které svým umístěním připomínají mozaiku drobných čoček. Každé ommatidium se pod světlem binokulární lupy výrazně leskne. Ocelli na vrchní části hlavy se jeví jako tři drobné tečky uspořádané do trojúhelníku. Jsou o poznání menší než složené oči a postrádají jejich složitou mnohotvárnou strukturu. Připomínají jednoduché, hladké kopule s lesklým povrchem.

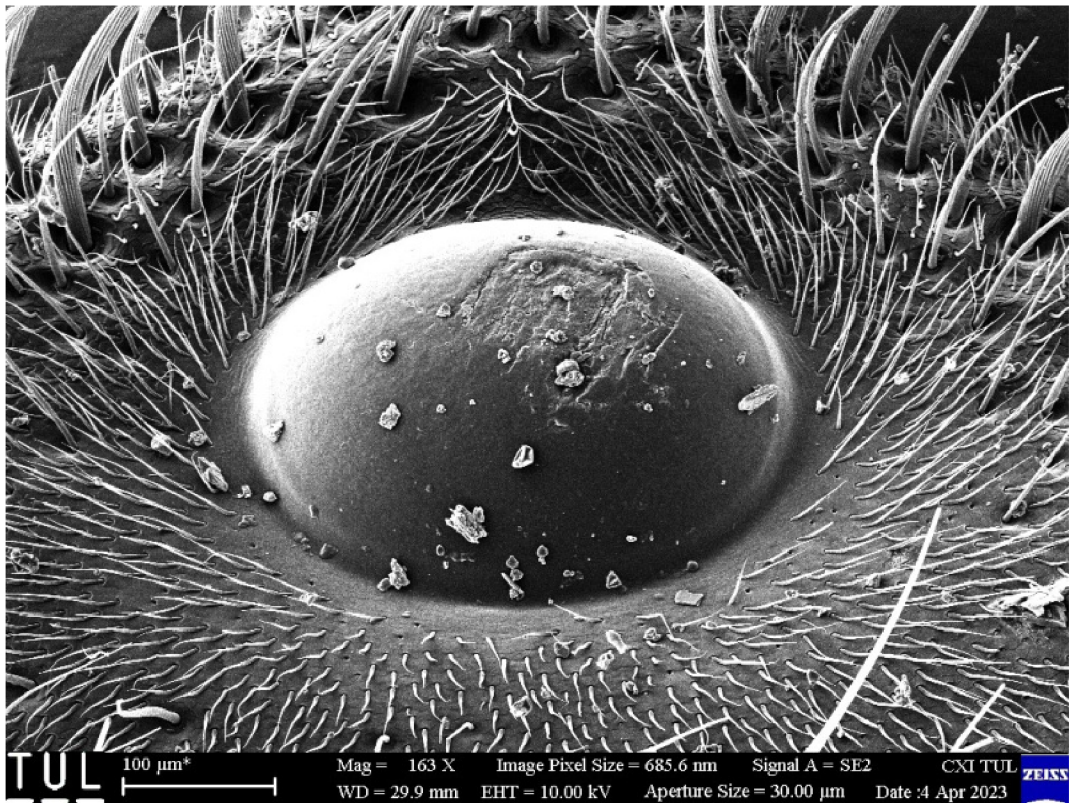


Obrázek 7: Sršeň obecná (*Vespa crabro*) pod binokulární lupou

Pod elektronovým mikroskopem jsou detaily sršního oka viditelné ještě zřetelněji. Je vidět, že ommatidia jsou šestiúhelníkového tvaru a jsou uspořádána ve velmi těsné blízkosti. Každé jednotlivé ommatidium má pravidelný, mírně protáhlý tvar. Obrázek 8 ukazuje, že povrch těchto ommatidií je jemně strukturovaný mikroskopickými vroubkami a rýhami. Ocelli se i pod elektronovým mikroskopem jeví jako hladké vypouklé kopule. Při pohledu na ocelli, obrázek 9, je zřejmé, že mají hladký povrch bez vroubků a rýh, čímž se značně liší od složených očí.



Obrázek 8: Sršeň obecná (*Vespa crabro*) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu



Obrázek 9: Sršeň obecná (*Vespa crabro*) snímek ocelli z elektronového mikroskopu

7.2.3 Ruměnice pospolná (*Pyrrhocoris apterus*)

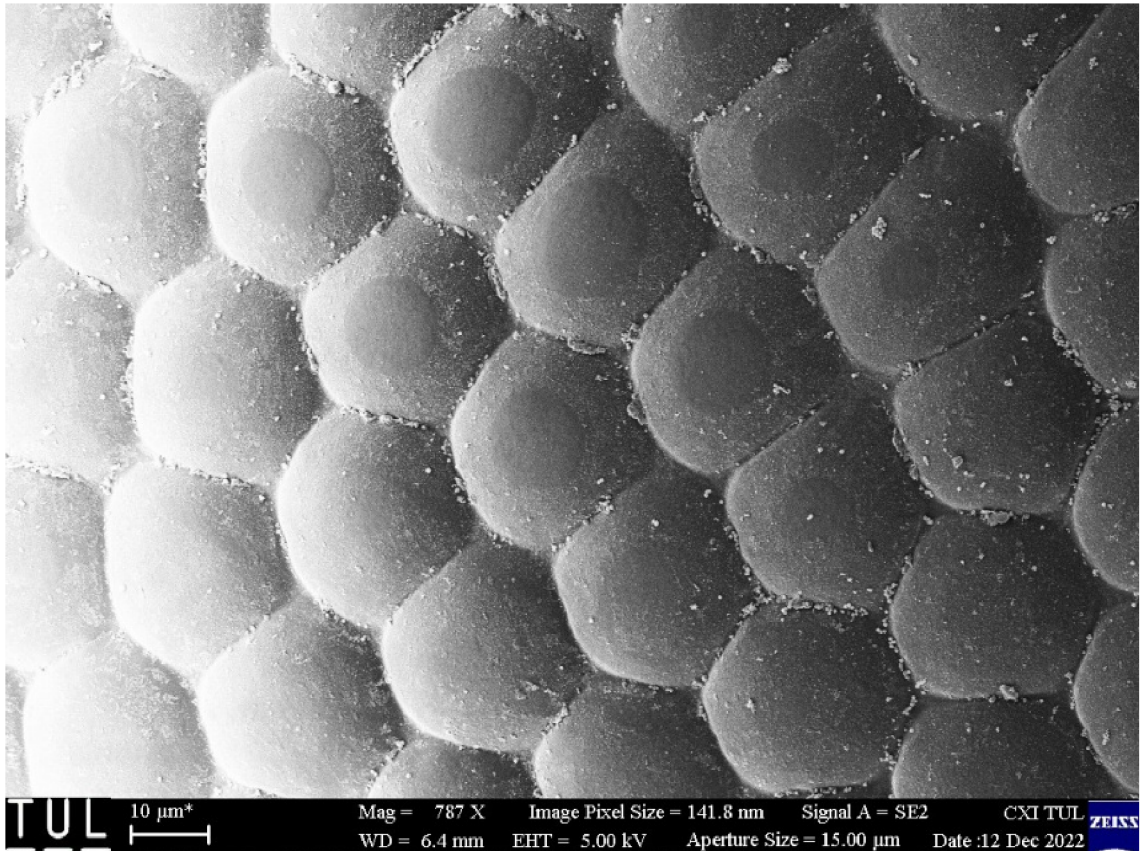
Na obrázku 10 je ruměnice pospolná umístěna pod binokulární lupou a na obrázku 11 je umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Pod binokulární lupou jsou oči ruměnice jasně viditelné. Oči jsou umístěny na obou stranách hlavy. Vzhledem k velikosti hlavy jsou oči ruměnice ještě stále poměrně velké. Povrch očí je hladký, lesklý a odráží světlo.



Obrázek 10: Ruměnice pospolná (*Pyrrhocoris apterus*) pod binokulární lupou

Na obrázku 11, snímaného z elektronového mikroskopu, je vidět vnější struktura jednotlivých ommatidií. Ommatidia mají šestiúhelníkový tvar. Na snímku je vidět, jak ommatidia tvoří mozaikovitý vzor, který je těsně u sebe a pokrývá celý povrch oka. Každé ommatidium je mírně vyvýšené a vyznačuje se zřetelnými okraji, což vytváří pravidelné uspořádání. Povrch každého ommatidia má mikroskopickou strukturu s jemnými vroubkami a rýhami. Na snímku je viditelná přítomnost drobných řas kolem okrajů oka. Rohovka tak tvoří kruhovitý útvar uvnitř každého ommatidia.

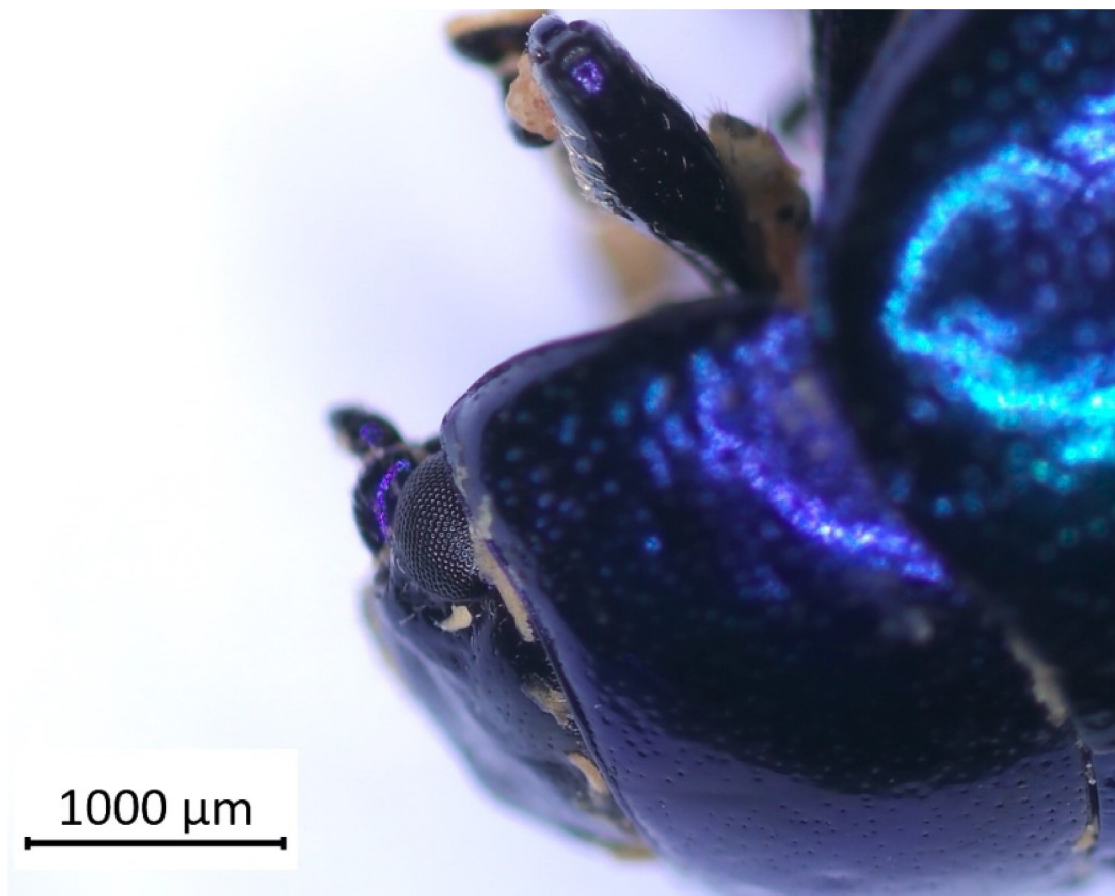


Obrázek 11: Ruměnice pospolná (*Pyrrhocoris apterus*) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu

7.2.4 Mandelinka havezová (*Oreina cacaliae*)

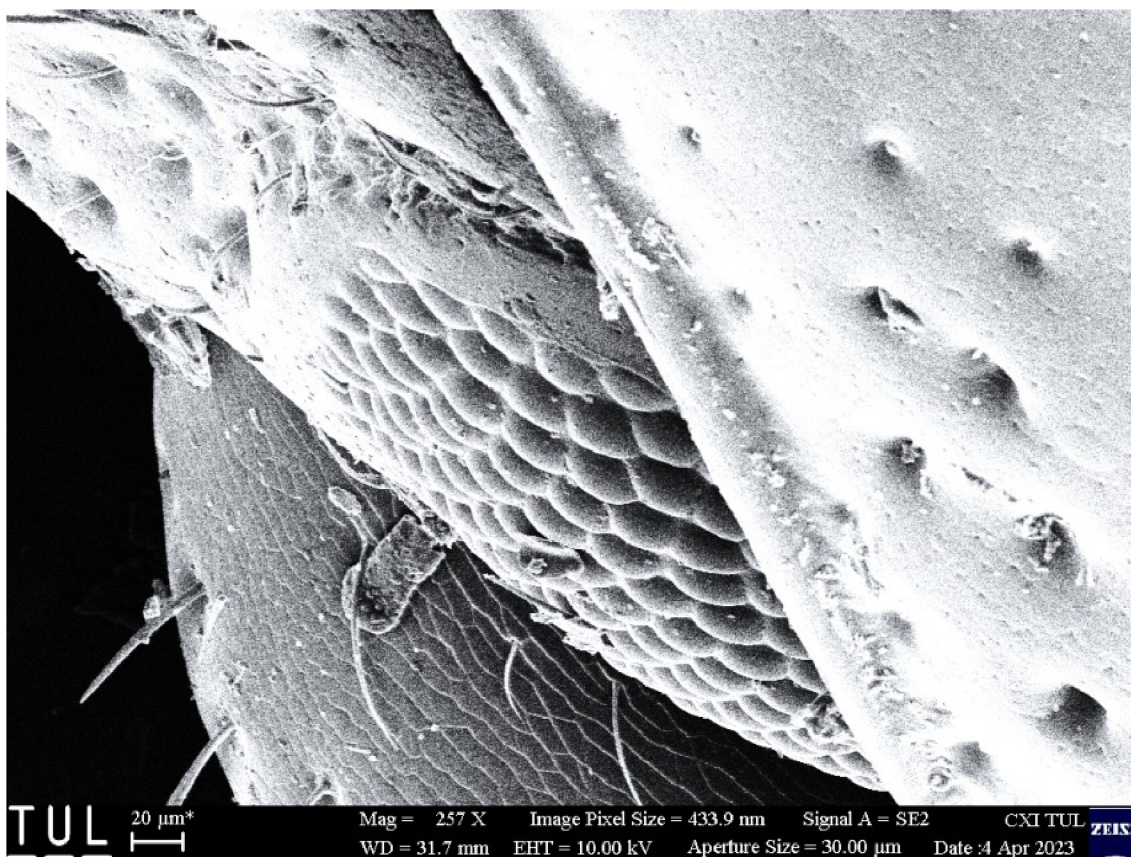
Na obrázku 12 je zaostřené oko mandelinky havezové umístěné pod binokulární lupou a na obrázku 13 je tato mandelinka umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Na obrázku 12, pod binokulární lupou, jsou oči mandelinky havezové zřetelně viditelné po stranách hlavy. V poměru k tělu brouka se zdají být poměrně velké a jsou umístěny na obou stranách hlavy. Povrch očí odráží světlo a dodává mu lesklý vzhled.



Obrázek 12: Mandelinka havezová (*Oreina cacaliae*) pod binokulární lupou

Ze snímku z elektronového mikroskopu je patrné, že jednotlivá ommatidia mají tvar šestiúhelníka a jsou uspořádány těsně vedle sebe. Z obrázku 13 je zřetelný vypouklý tvar jednotlivých ommatidií. Jednotlivá ommatidia jsou rozeznatelná, s viditelnými hranicemi, které vytvářejí mozaikovitý vzor na povrchu oka. Snímek mimo jiné také zachycuje malé smyslové chloupky na okraji oka. Nad těmito smyslovými chloupky jsou dobře viditelné jemné struktury a malé výstupky na povrchu pancíře mandelinky.



Obrázek 13: Mandelinka havezová (*Oreina cacaliae*) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu

7.2.5 Vosa útočná (*Vespula germanica*)

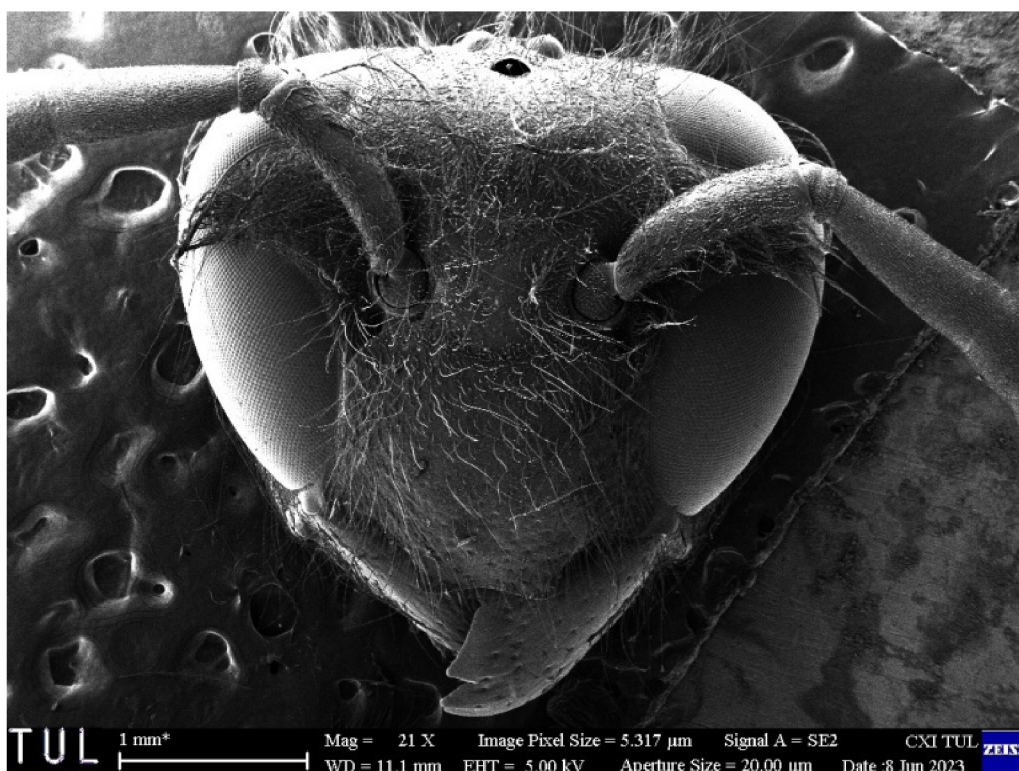
Na obrázku 14 je vosa útočná umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 15, 16 a 17 je hlava této vosy umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Vosa byla pod binokulární lupou umístěna z boku. Na obrázku 14 je vidět jedno z jejích očí. Je zřejmé, že oči tohoto letce dominují přední části hlavy. Pod binokulární lupou se oko jeví jako velmi tmavá struktura, která světlo spíše pohlcuje než-li odráží. Na vrchní části hlavy jsou vidět ocelli, drobné tečky uspořádané do trojúhelníku. Ocelli jsou o poznání menší než složené oči. Připomínají jednoduché, hladké kopule s lesklým povrchem, který odráží světlo.

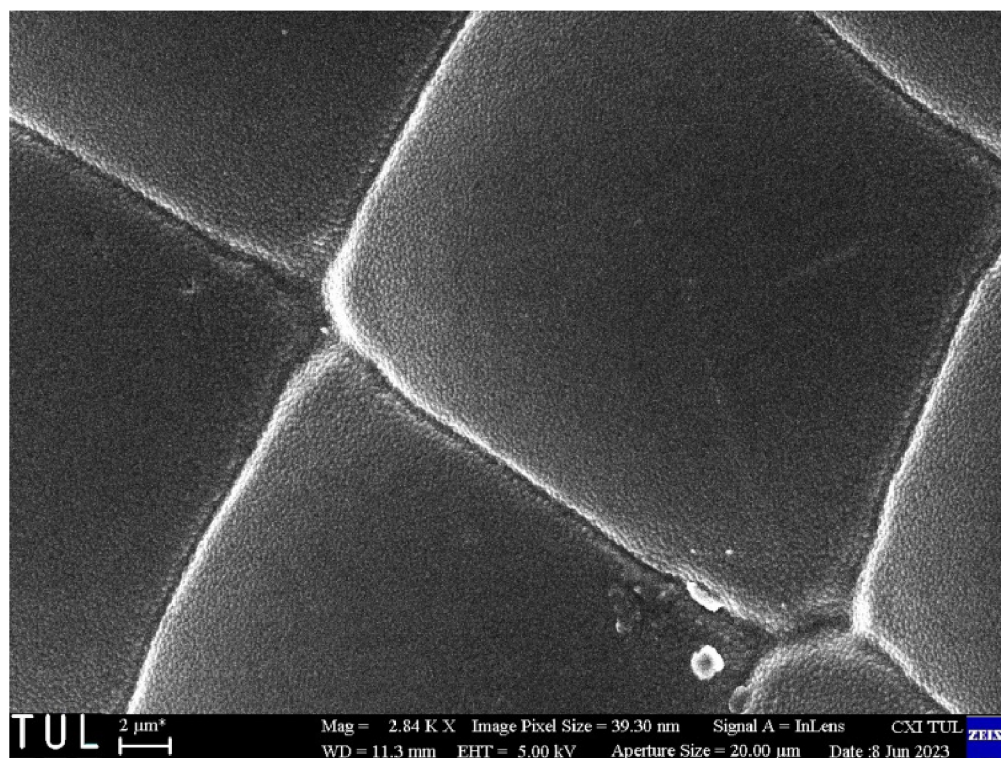


Obrázek 14: *Vosa útočná (Vespula germanica)* pod binokulární lupou

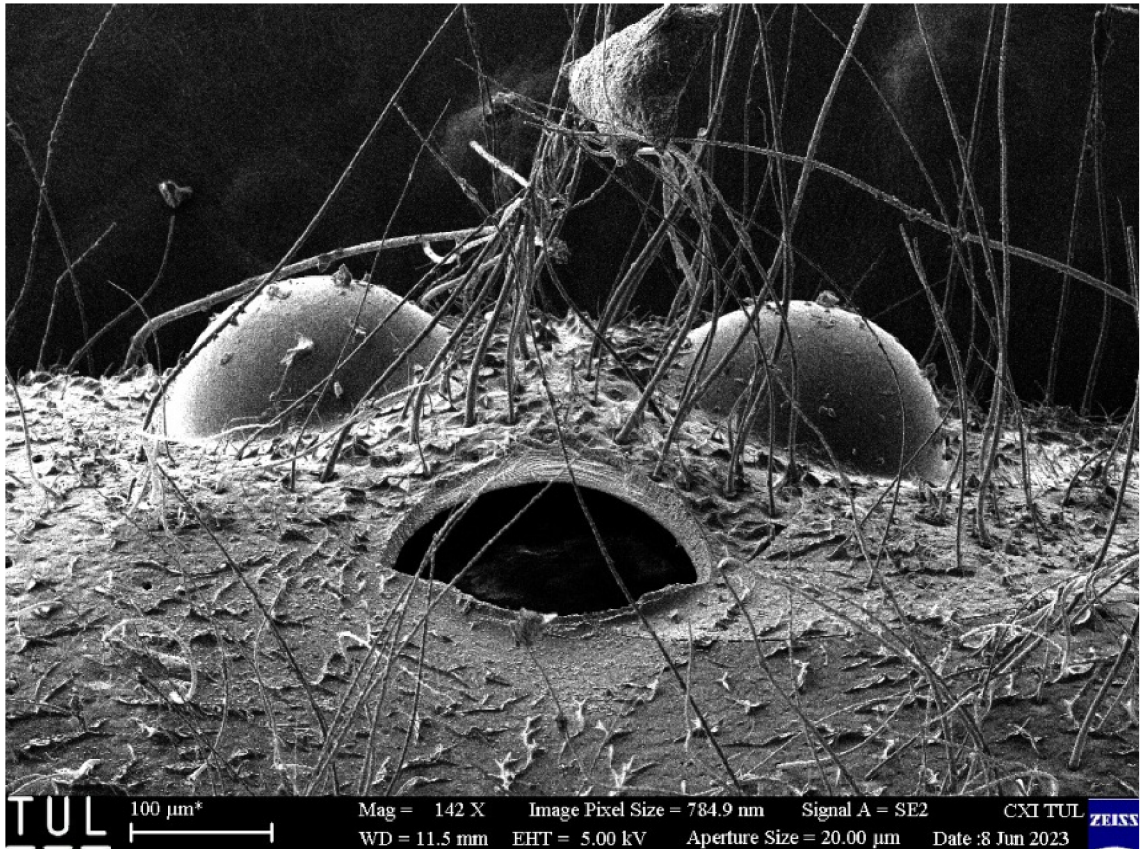
Z obrázku 15 z elektronového mikroskopu je patrné, že oči jsou umístěny na obou stranách hlavy vosy. Oči jsou veliké a mají oválný tvar. Ocelli na vrchní části hlavy se jeví jako drobné tečky uspořádané do trojúhelníku. Po přiblížení je na obrázku 16 patrná struktura složených očí. Oči se skládají z četných čtyřhranných ommatidií. Povrch těchto ommatidií je jemně strukturovaný mikroskopickými vroubkami a rýhami. Při pohledu pod elektronovým mikroskopem vypadají ocelli na obrázku 17 jako hladké, vypouklé kopule. Pozorovaný vzorek měl pouze dvě viditelné ocelli, které mají plochý povrch bez vroubků. V místě chybějící ocelli je vidět jakým způsobem jsou ocelli hmyzu umístěny na hlavě. Je zřejmé, že po vyjmutí ocelli zůstává na hlavě prázdné místo. Ze snímku je patrná tloušťka a struktura exoskeletonu na vrchní části hlavy vosy.



Obrázek 15: Vosa útočná (*Vespula germanica*) snímek hlavy z elektronového mikroskopu



Obrázek 16: Vosa útočná (*Vespula germanica*) detailní snímek složeného oka z elektronového mikroskopu



Obrázek 17: *Vosa útočná (Vespa germanica)* snímek ocelli z elektronového mikroskopu

7.2.6 *Suillia pallida*

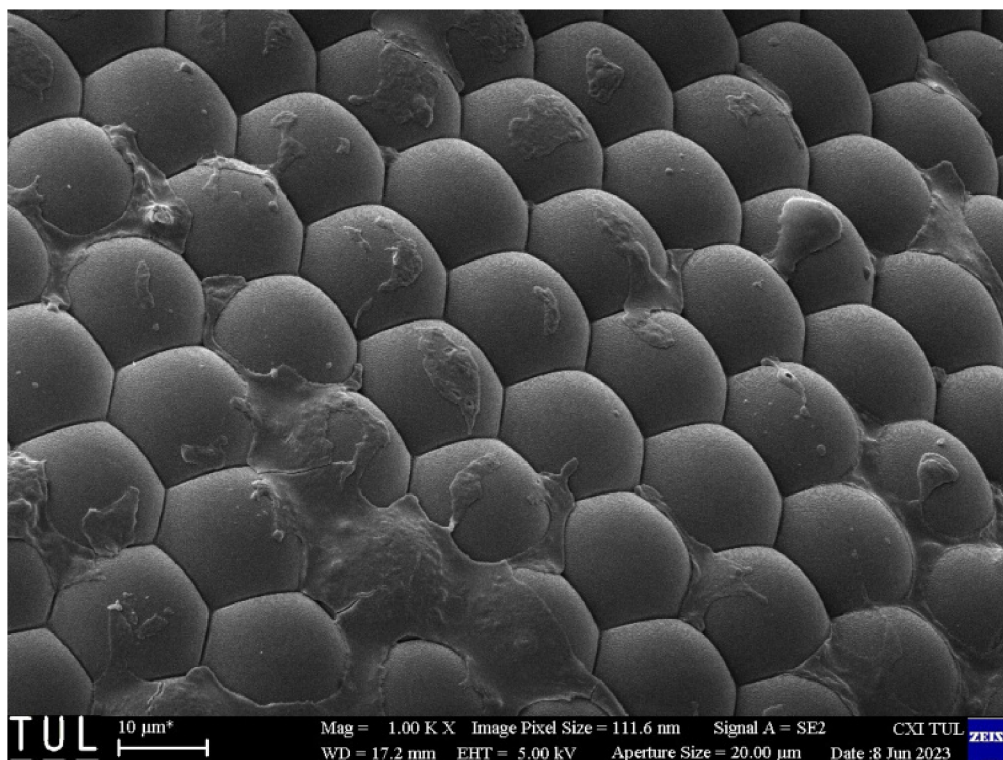
Na obrázku 18 je *Suillia pallida* umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 19 a 20 je její hlava umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Při pozorování binokulární lupou se oko mouchy *Suillia* jeví jako složená struktura na obou stranách hlavy. Oči jsou v porovnání s velikostí mouchy poměrně velké a jsou umístěny vypoukle na stranách hlavy. Povrch oka má načervenalou barvu, ve středu je barva světlejší a pozorováním blíže k okrajům postupně tmavne. Barvy uvnitř oka nejsou jednotné, což způsobuje, že zajímavé tmavé části oka připomínají drobné žilky.

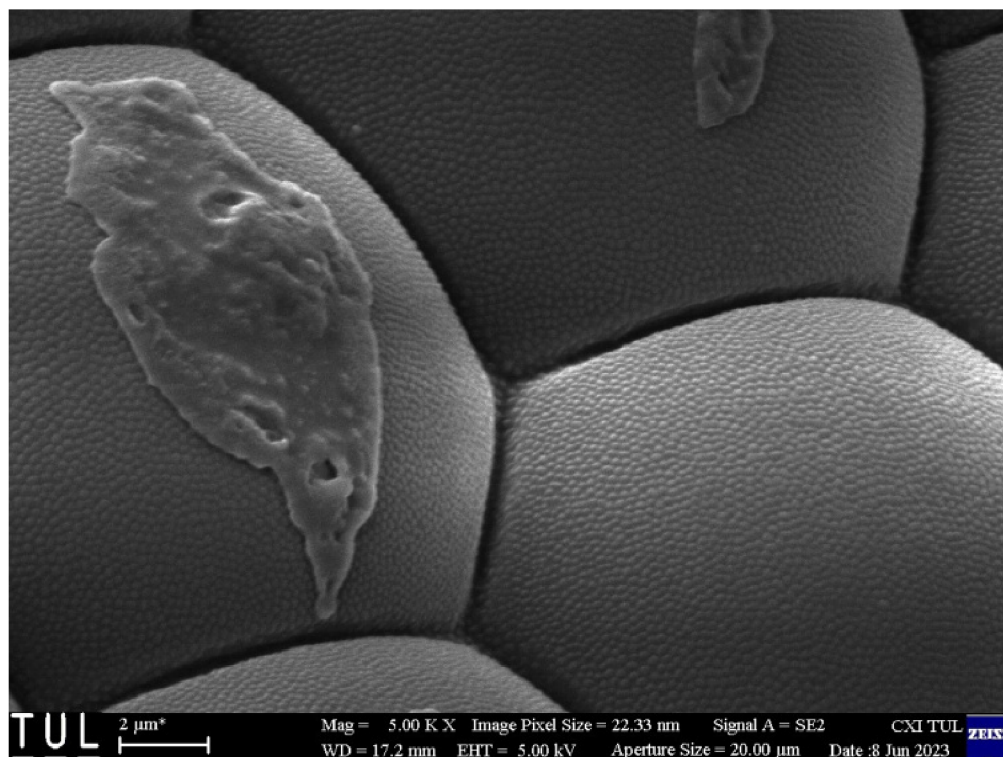


Obrázek 18: *Suillia pallida* pod binokulární lupou

Po přiblížení elektronovým mikroskopem je zřejmá složená struktura oka. Oko se skládá z četných šestihranných ommatidií, které tvoří mozaikovitý vzor na povrchu oka. Jednotlivé ommatidie jsou rozlišitelné a lze pozorovat jejich hranice, což dokazuje složenou strukturu oka. Z obrázku 19 je zřetelný vypouklý tvar jednotlivých ommatidií. Po dalším přiblížení je na obrázku 20 dobře pozorovatelná povrchová struktura jednotlivých ommatidií. Povrch je pokryt mikroskopickými vroubkami a rýhami, které tvoří poměrně pravidelné vzory.



Obrázek 19: *Suillia pallida* – snímek ukazující uspořádání jednotlivých ommatidií z elektronového mikroskopu



Obrázek 20: *Suillia pallida* – snímek ukazující povrch ommatidií z elektronového mikroskopu

7.2.7 Škvor obecný (*Forficula auricularia*)

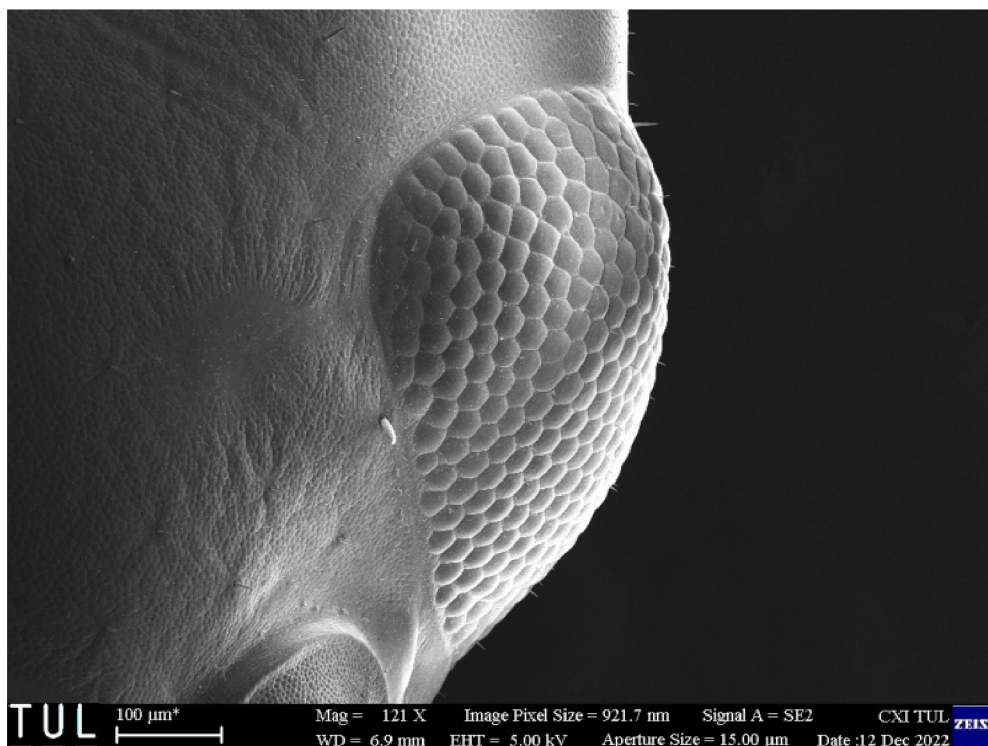
Na obrázku 21 je škvor umístěn pod binokulární lupou a na obrázcích 22 a 23 je umístěn pod elektronovým mikroskopem.

Pod binokulární lupou byly oči škvora dobře viditelné. Oči jsou umístěny po stranách hlavy a v porovnání s velikostí hlavy hmyzu jsou spíše menší. Oči mají tmavé zabarvení. Povrch jednotlivých ommatidií je lesklý a odráží dopadající světlo. Po zaměření se na oči je vidět jejich složený charakter, jelikož jsou na fotce vidět jednotlivá ommatidia.

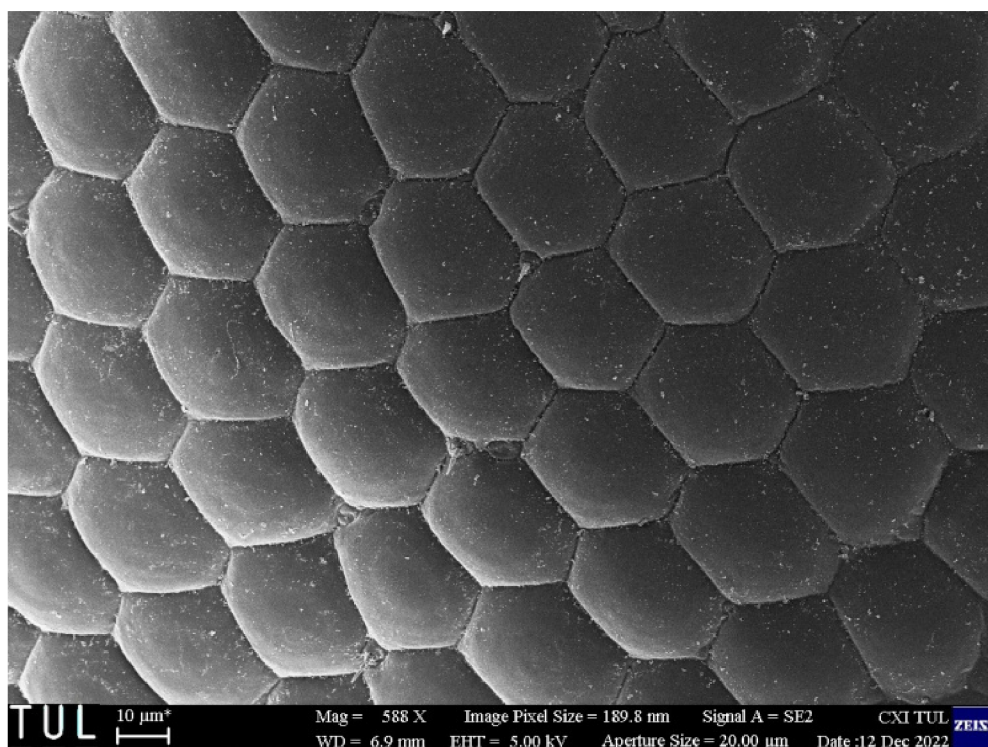


Obrázek 21: Škvor obecný (*Forficula auricularia*) pod binokulární lupou

Ze snímku z elektronového mikroskopu je zřejmé, že se oči skládají z šestihranných ommatidií. Ommatidia jsou uspořádána těsně vedle a mají vypouklý tvar. Jednotlivá ommatidia jsou rozeznatelná a jejich hranice vytvářejí na povrchu oka mozaikovitý vzor. Po větším přiblížení je na obrázku 23 vidět několik vláskovitých struktur na rozích některých ommatidií.



Obrázek 22: Škvor obecný (*Forficula auricularia*) snímek ukazující uspořádání jednotlivých ommatidií z elektronového mikroskopu



Obrázek 23: Škvor obecný (*Forficula auricularia*) snímek z elektronového mikroskopu ukazující vláskovité struktury v rozích některých ommatidií

7.2.8 Octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*)

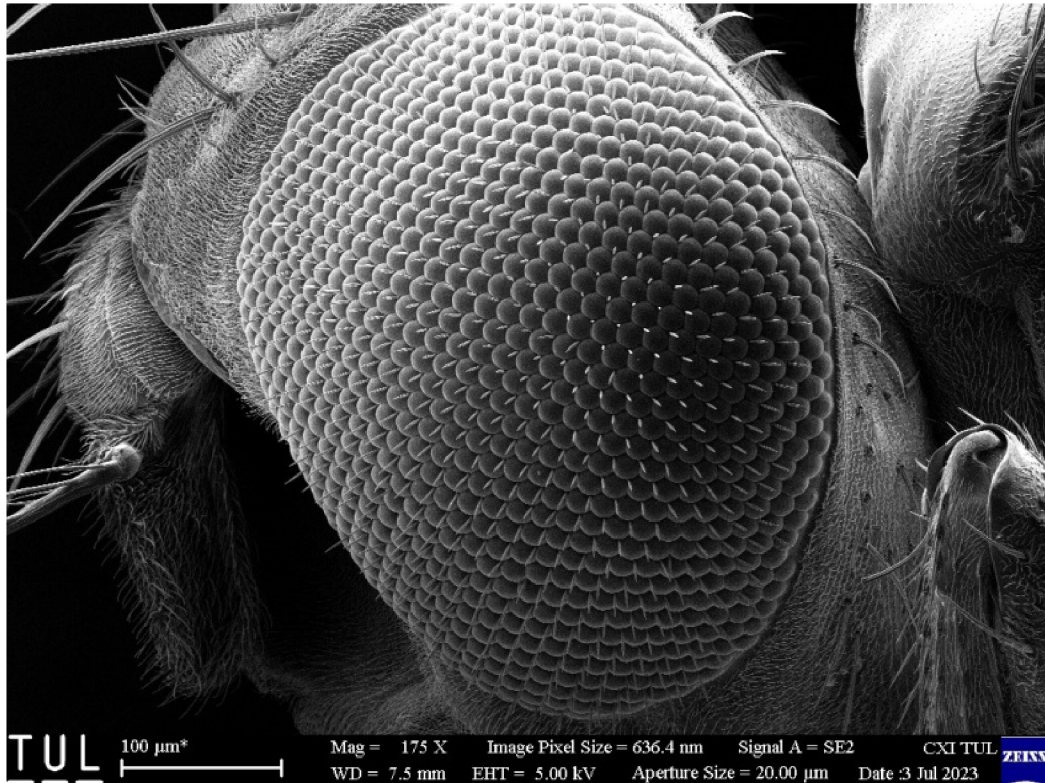
Na obrázku 24 je octomilka umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 25 a 26 je umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Na obrázku 24, pořízeného z binokulární lupy, jsou oči velmi zřetelné a dobře viditelné. Oči octomilky jsou v poměru k velikosti jejího těla velké a jsou umístěny po stranách hlavy. Oči mají barvu pohybující se v několika odstínech červené. Povrch očí se pod binokulární lupou jeví jako hladký a lesklý. Octomilka obecná má složené oči, které se skládají z mnoha jednotlivých ommatidií. Ommatidie jsou hustě uspořádány a pokrývají celý povrch oka.

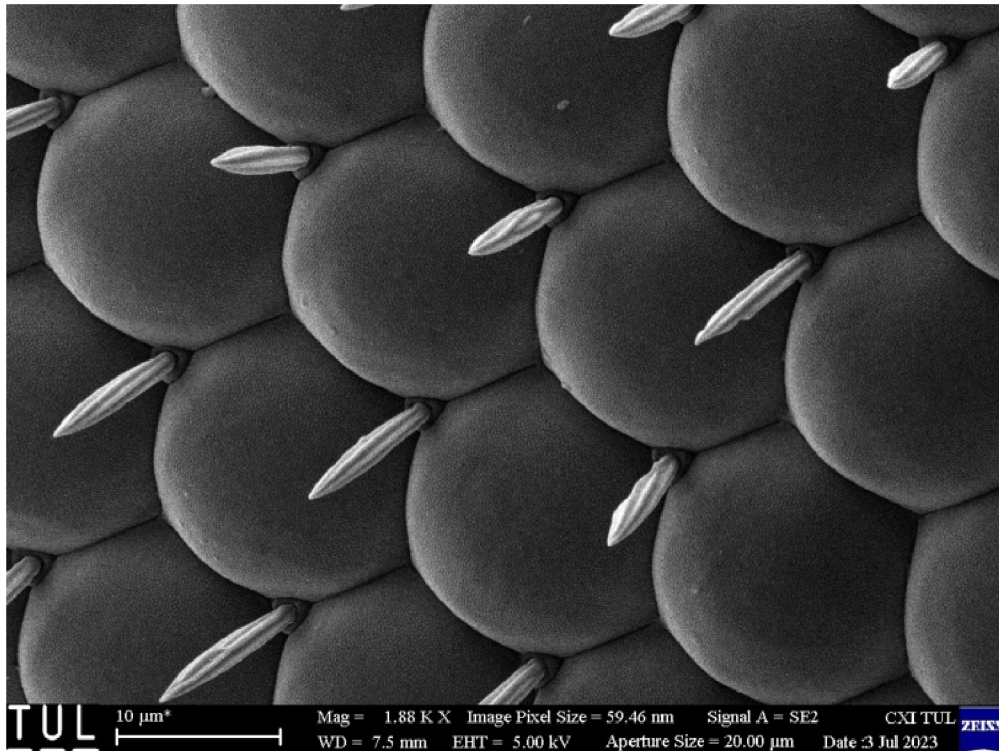


Obrázek 24: Octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*) pod binokulární lupou

Snímek z elektronového mikroskopu ukazuje, že složené oči octomilky jsou vypouklé, veliké a mají oválný tvar. Jednotlivá ommatidia jsou uspořádána ve velmi těsné blízkosti a vytvářejí mozaikovitý vzor na povrchu oka. Povrch oka pokrývají drobné štětinky. Po přiblížení je z obrázku 26 vidět, že štětinky jsou také uspořádané a každého ommatidia se dotýkají přesně tři štětinky. Ommatidia mají šestiúhelníkový tvar.



Obrázek 25: Octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*) snímek oka z elektronového mikroskopu



Obrázek 26: Octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*) detailní snímek oka z elektronového mikroskopu

7.2.9 Bzučivka obecná (*Calliphora vicina*)

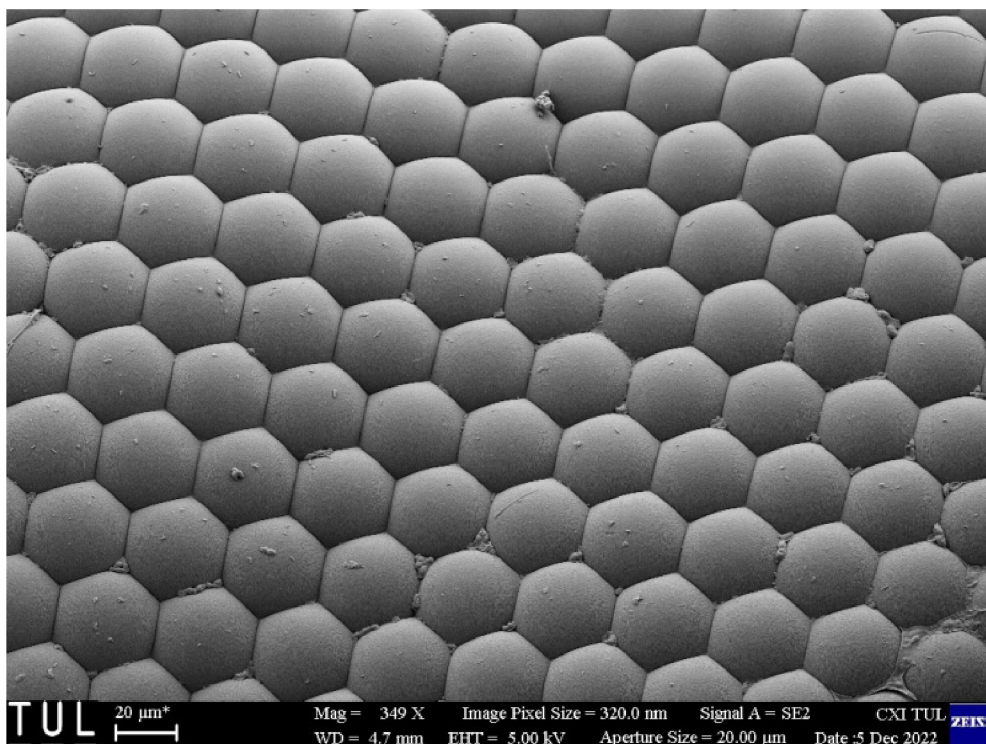
Na obrázku 27 je bzučivka obecná umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 28 a 29 je umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Při pozorování mouchy pod binokulární lupou jsou její oči velmi dobře viditelné. Oči jsou umístěny po stranách hlavy a jsou velmi nápadné. Svou velikostí zabírají velkou část hlavy mouchy. Povrch je tmavý, lesklý a odráží světlo. Na obrázku 27 není zřetelná složená povaha očí, ani jejich povrchová struktura.

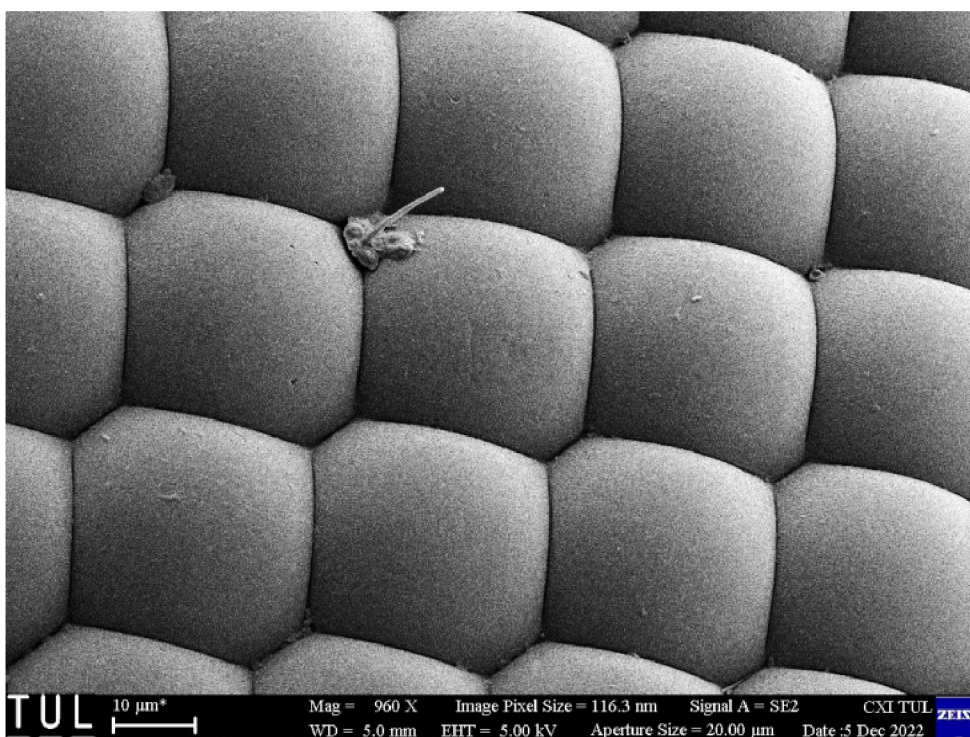


Obrázek 27: Bzučivka obecná (*Calliphora vicina*) pod binokulární lupou

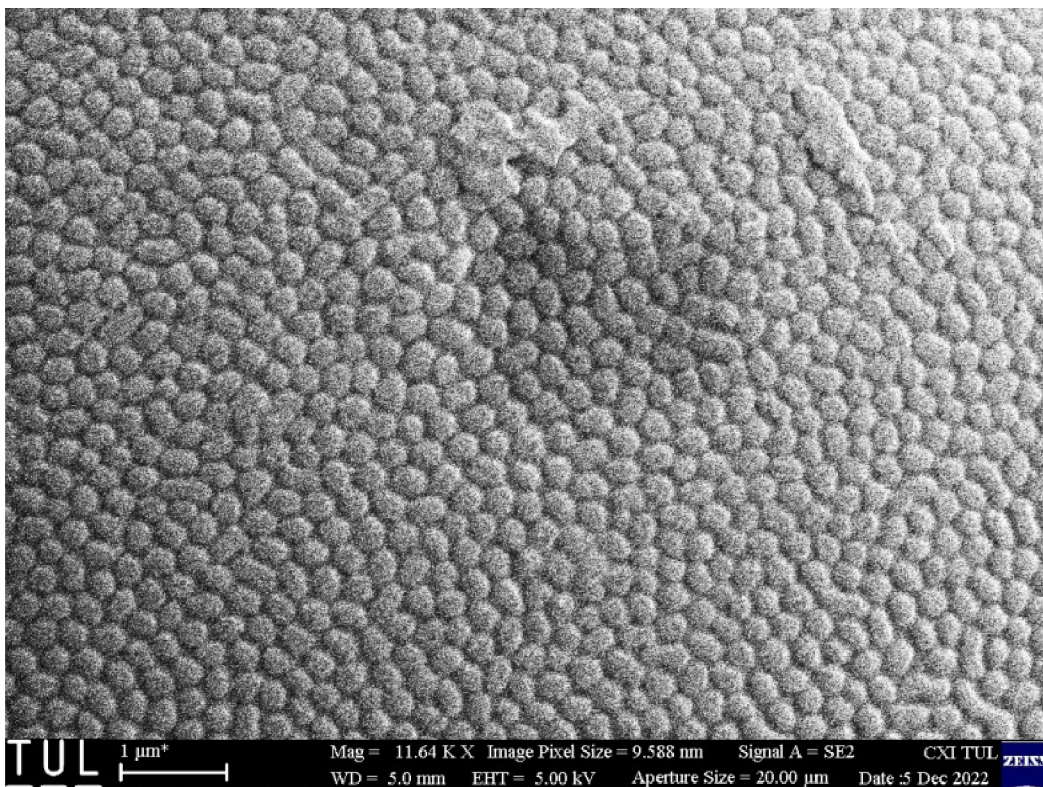
Na snímku z elektronového mikroskopu je dobře viditelný šestiúhelníkový tvar ommatidií. Na obrázku 28 jsou šestiúhelníková ommatidia ze středu oka a na obrázku 29 jsou ommatidia z okrajových částí oka. Okrajová ommatidia mají stále ještě šestiúhelníkový tvar, který už ale není tak pravidelný, jako tvar ommatidií ze středu oka. Po přiblížení je na obrázku 30 vidět jemná mikroskopická struktura, která se nachází na povrchu každého ommatidia.



Obrázek 28: Bzučivka obecná (*Calliphora vicina*) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu



Obrázek 29: Bzučivka obecná (*Calliphora vicina*) detailní snímek ommatidií okrajové části oka z elektronového mikroskopu



Obrázek 30: Bzučivka obecná (*Calliphora vicina*) povrchová struktura ommatidií z elektronového mikroskopu

7.2.10 Bzučivka zední (*Pollenia rudis*)

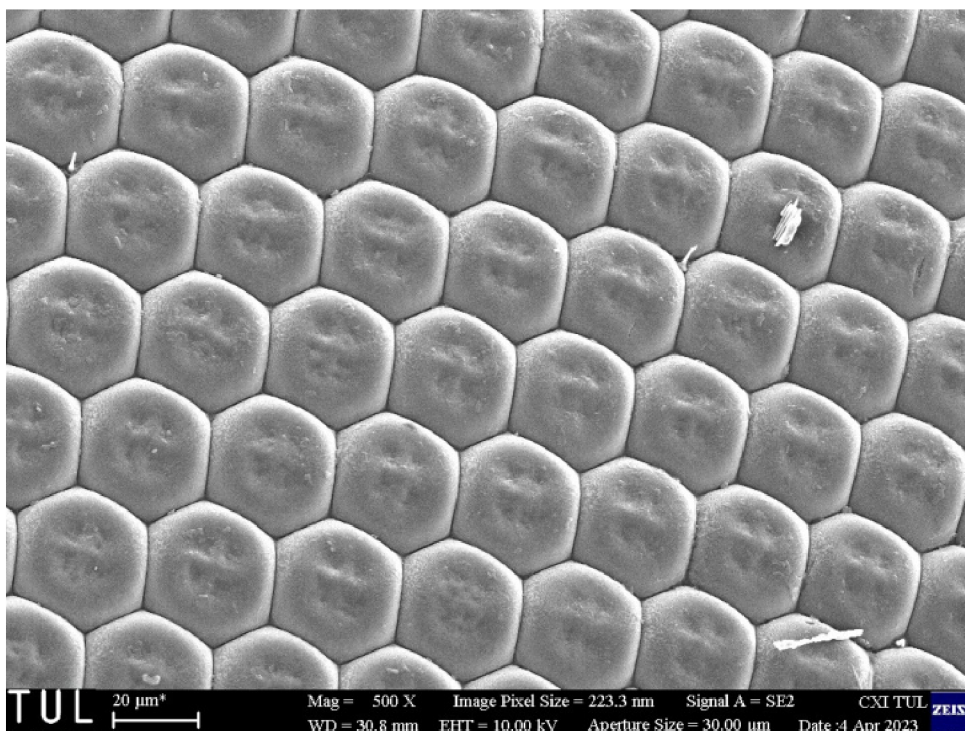
Na obrázku 31 je bzučivka zední umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 32 a 33 je umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Oko mouchy je při pohledu binokulární lupou zcela zřetelné. Oko je poměrně nápadné a nachází se po stranách hlavy mouchy. Povrch oka má načervenalou barvu. Barvy uvnitř oka nejsou jednotné. Oko se jeví jako velmi nápadná a mnohotvárná struktura. Oko se skládá z četných ommatidií, které svým umístěním připomínají mozaiku drobných a různě barevných čoček.

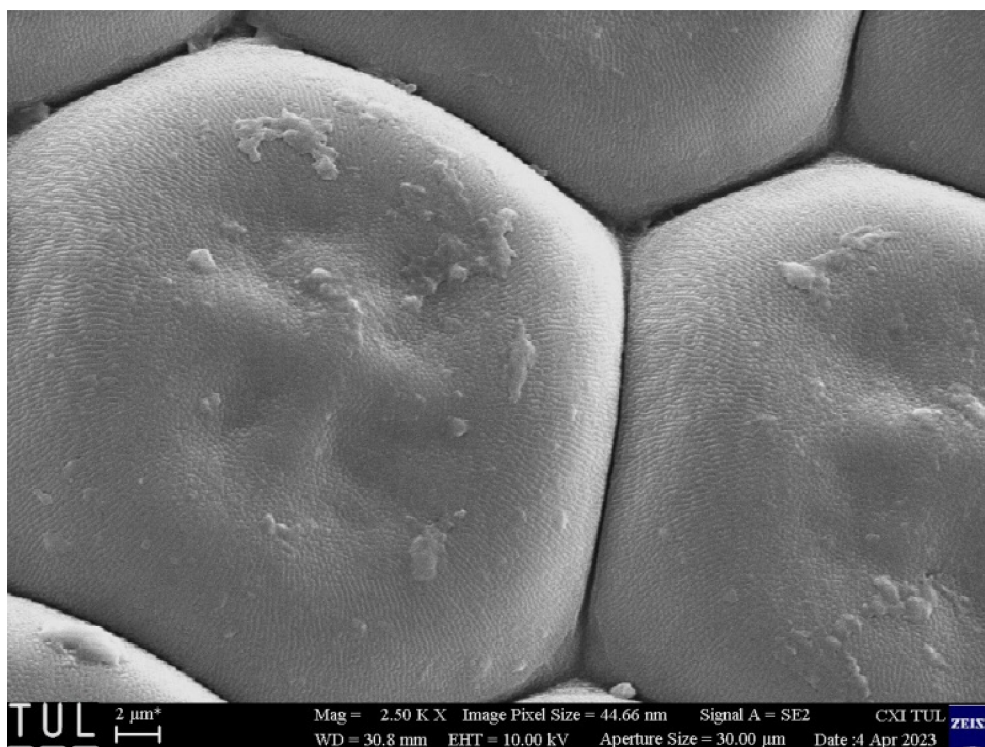


Obrázek 31: Bzučivka zední (*Pollenia rudis*) pod binokulární lupou

Ze snímku z elektronového mikroskopu jsou detaily oka viditelné ještě zřetelněji. Je vidět, že ommatidia jsou šestiúhelníkového tvaru a jsou uspořádaná ve velmi těsné blízkosti. Každé jednotlivé ommatidium má mírně protáhlý tvar. Po dalším přiblížení je na obrázku 33 dobře pozorovatelná povrchová struktura jednotlivých ommatidií. Povrch je pokryt mikroskopickými vroubkami a rýhami.



Obrázek 32: Bzučivka zední (*Pollenia rudis*) snímek ommatidií z elektronového mikroskopu



Obrázek 33: Bzučivka zední (*Pollenia rudis*) detailní snímek struktury ommatidií z elektronového mikroskopu

7.2.11 Včela medonosná (*Apis mellifera*)

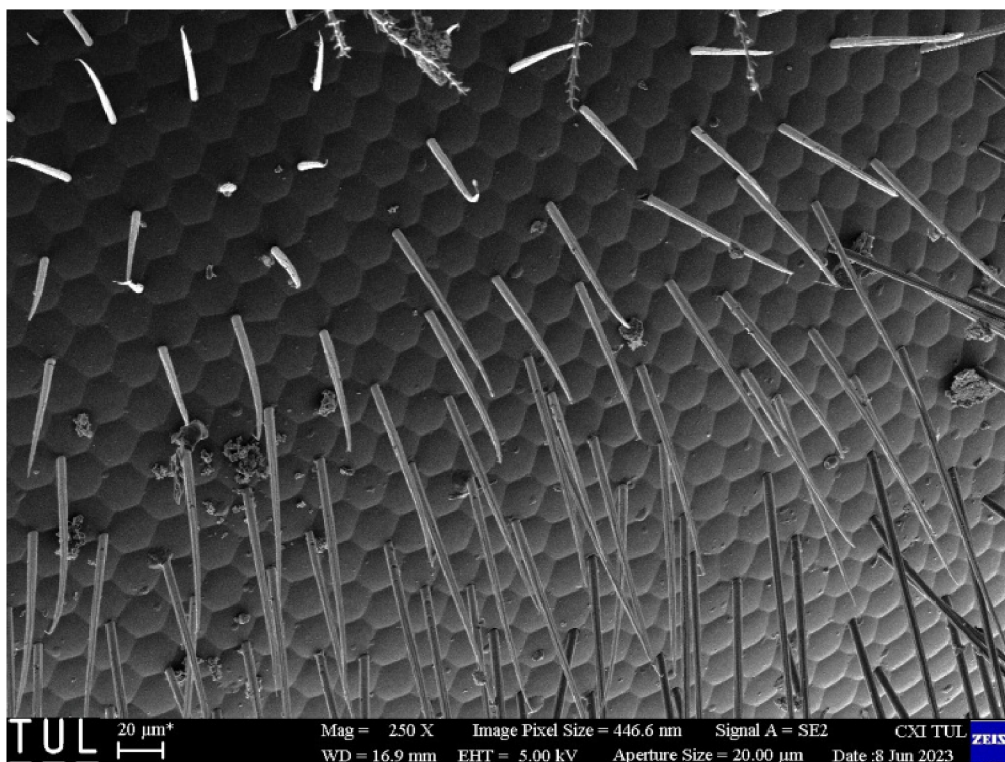
Na obrázku 34 je včela umístěna pod binokulární lupou a na obrázcích 35 a 36 je umístěna pod elektronovým mikroskopem.

Oči včely jsou umístěny po stranách hlavy a jsou nápadné svou velikostí a výraznou strukturou. Oči mají protáhlý, oválný tvar. Povrch očí se pod binokulární lupou jeví jako hladký a lesklý. Oči včely medonosné jsou složené a skládají se z velkého množství jednotlivých šestihorných ommatidií. Oči včely medonosné mají v blízkosti drobné chloupky, které na obrázku 34 vypadají jako když vycházejí přímo z povrchu očí.

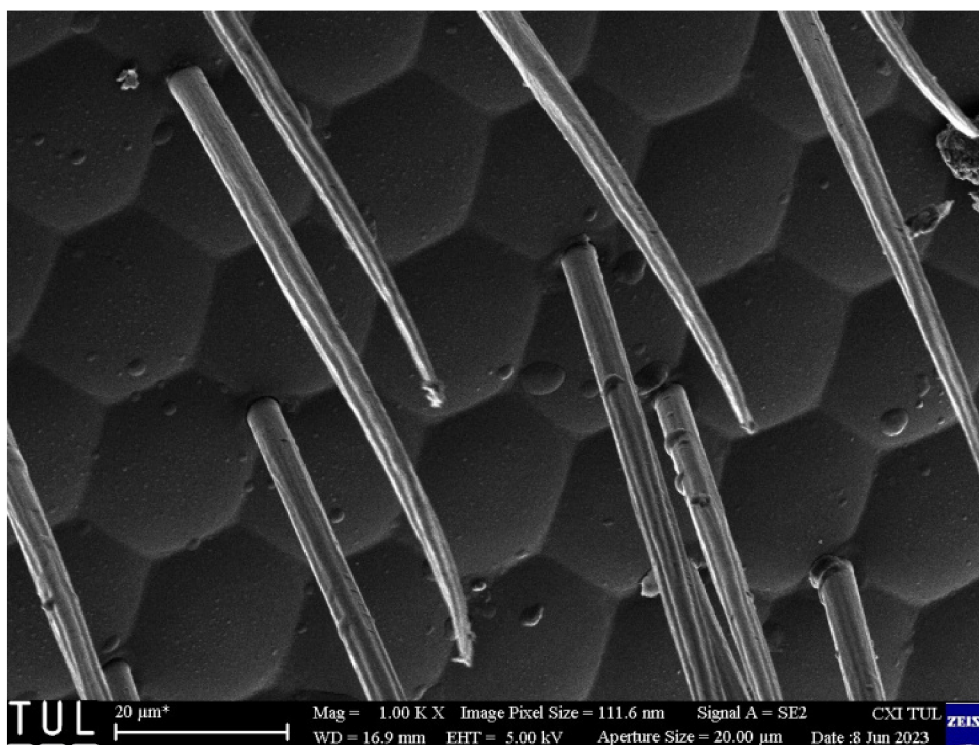


Obrázek 34: Včela medonosná (*Apis mellifera*) hlava pod binokulární lupou

Po přiblížení v elektronovém mikroskopu, je na obrázku 35 vidět, že povrch očí pokrývá opravdu velké množství drobných štětiček. Ommatidia jsou uspořádaná ve velmi těsné blízkosti a vytvářejí mozaikovitý vzor na povrchu oka. Na obrázku 36, z elektronového mikroskopu, je velmi dobře vidět tvar jednotlivých ommatidií. Každé ommatidium má tvar pravidelného šestiúhelníku.



Obrázek 35: Včela medonosná (*Apis mellifera*) snímek oka z elektronového mikroskopu



Obrázek 36: Včela medonosná (*Apis mellifera*) detailní snímek oka a štětinek z elektronového mikroskopu

7.3 Diskuze

Diskuze je zaměřena na různé aspekty morfologické stavby očí hmyzu, jako je umístění složených očí, ommatidia a jejich tvar, a přítomnost ocelli.

V teoretické části práce bylo zmíněno, že většina hmyzu má ommatidia, což jsou základní stavební jednotky složeného oka, uspořádaná těsně vedle sebe. Většinouým rysem ommatidií je jejich charakteristický šestiúhelníkový tvar. Díky těsnému uspořádání ommatidií a jejich šestiúhelníkovému tvaru se oční povrch stává schopným zachytit co nejvíce světla a informací ze širokého zorného pole.

Předchozí studie naznačují, že šestiúhelníkový tvar ommatidií hmyzu není pouhou náhodou, ale je výsledkem evolučního procesu přizpůsobení. Například výzkum včely medonosné (*Apis mellifera*) ukázal, že tvar ommatidií je optimalizován tak, aby minimalizoval chromatickou aberaci a zlepšoval rozlišovací schopnost. Díky elektronovému mikroskopu bylo potvrzeno, že včely mají mimořádně pravidelný tvar ommatidií a také byla potvrzena přítomnost vláskových buněk, které pokrývaly celý povrch oka nerozvětvenými chloupky. Tyto chloupky poskytují ochranu tím, že pomáhají udržet prach, nečistoty a cizí částice mimo citlivý povrch očí.

Studie z roku 2011, od autora jménem Chun Yuan Wu, dokázala, že ommatidia složených očí sluněčka východního (*Harmonia axyridis*) se výrazně liší v závislosti na poloze a to tak, že v periferní části oka mají nepravidelný tvar pětiúhelníku či dokonce čtverce. Při mém pozorování jsem však tento tvar nevypozorovala, jelikož pozorování tohoto druhu hmyzu bylo náročné. Obtíže spočívaly v natočení hlavy hmyzu, a proto je možné, že pozorovaná odchylka ve tvaru ommatidií byla způsobena touto situací. Nebyla jsem proto schopna potvrdit zmiňované rozdíly tvaru ommatidií ve vnějších částech oka. Pozorováním však bylo potvrzeno, že ommatidia byla na sebe, v periferní části oka, navázána jiným způsobem než u ostatních vzorků a nebyla od sebe zřetelně oddělena.

Studie z roku 1952 od Jana Obenbergera uvádí, že jednoduché očí se vyskytují nejčastěji ve skupinách po třech a jsou často umístěny v přibližně rovnoramenném

trojúhelníku na vrcholu čela a blíže k temeni. Snímky ocell z binokulární lupy i z elektronového mikroskopu potvrzují tyto závěry. Z vybraného hmyzu měla tato jednoduchá očka na hlavě většina létavého hmyzu. Druhy létavého hmyzu, které ocelli neměly byly *Suillia Pallida* a octomilka obecná (*Drosophila melanogaster*). Je možné, že přítomnost nebo nepřítomnost ocell různých octomilek lze připsat evolučním adaptacím a rozdílům v jejich ekologických podmínkách a životním stylu.

Tento jev tedy může být vysvětlen několika způsoby. Obecně platí, že druhy octomilek, které vykazují silnou denní aktivitu a při svém chování jsou do značné míry závislé na zraku, mají obvykle dobře vyvinuté ocelli. Avšak existují také octomilky, které začínají být aktivní spíše až při západu slunce nebo v noci, a proto se méně spoléhají na zrakové signály, mohou mít redukované nebo chybějící ocelli.

Závěr

Hmyz vykazuje širokou škálu očních struktur, které se liší v závislosti na jejich životním stylu, potravních preferencích a prostředí, ve kterém žijí.

Práce prokázala, že složené oči jsou běžnou a charakteristickou součástí hmyzu a jejich ommatidie vytvářejí mozaiku vizuálních informací o okolí. Tato složená oční struktura umožňuje hmyzu vnímat světlo a pohyb ve všech směrech, což je důležité pro jeho orientaci, hledání potravy a vyhýbání se predátorům.

Z výsledků vnější stavby očí a jejich umístění na hlavě hmyzu lze vyvodit, že letci mají obecně větší oči, než-li nelétavý hmyz. To potvrzuje, že díky větším očím mají výhodu v navigaci a orientaci ve vzduchu. Velké oči umožňují létavému hmyzu lépe rozpoznávat pohybující se objekty a rychleji na ně reagovat. Umožňují letcům rychle najít potravu, přizpůsobit se změnám prostředí a vyhnout se překážkám. Letci si vyvinuli oči, které dokážou rychle a citlivě reagovat na různé světelné situace, protože světlo je pro orientaci a navigaci ve vzduchu klíčové. Jejich velké oči jim pomáhají lépe vidět za špatných světelných podmínek, jelikož propouštějí více světla.

Práce potvrzuje, že morfologická stavba očí hmyzu je úzce propojena s jeho adaptací na vnější prostředí. Letci vyvinuli větší oči, které jim umožňují lépe vidět a reagovat na pohybující se objekty ve vzduchu. Složené oči jsou pak klíčové pro všechny druhy hmyzu, umožňují jim vnímat světlo a orientovat se ve svém prostředí.

Literatura a odkazy

"*Forficula auricularia*." ENCYCLOPEDIA OF LIFE, Species recognized by EOL Dynamic Hierarchy April 2022. Dostupné z: *Forficula auricularia* Linnaeus 1758 - Encyclopedia of Life (eol.org)

AMENDT, J., CAMPOBASSO, C. P., GAUDRY, E., REITER, C., LEBLANC, H. N., & HALL, M. J. *Best practice in forensic entomology – standards and guidelines*. International Journal of Legal Medicine, 2007

ANDĚRA, Miloš. *Atlas fauny České republiky*. Ilustroval Jan SOVÁK. Praha: Academia, 2018, 664 s. Atlas.

ANDERSON, K.E., ROGERS, S.W., CASTLE, S.C. AND GREEN, L.E. *The potential for Heleomyzidae (Diptera) to facilitate breakdown of synthetic polymers*. Environmental entomology, 2018

ANON. *The Eye of the Fly - Field Station*. Uwm.edu: University of Wisconsin Milwaukee [online]. 2017. Dostupné z: <https://uwm.edu/field-station/the-eye-of-the-fly/>

BABŮREK, Jan. *Aktivita bezobratlých v zimě a ověření vybraných metod jejich odchytu v zimním období*. 2017.

BARLOW, Horace B. *The size of ommatidia in apposition eyes*. Journal of experimental Biology, 1952

BARNETT, P. D., WARREN, B., & OSORIO, D. *Insect spatial resolving power and the limits to resolution*. Vision research, 2007

BELLEN, H. J., et al. *The fruit fly as a model organism: the coming of age of Drosophila genetics*. Genetics, 2010

BERRY, Richard P.; WARRANT, Eric J.; STANGE, Gert. *Form vision in the insect dorsal ocelli: an anatomical and optical analysis of the locust ocelli*. Vision research, 2007, 47.10: 1382-1393.

BOROWIEC, Lech. *Two new species of Cassida Linnaeus, 1758 (Coleoptera: Chrysomelidae: Cassidinae) from Madagascar and notes on subgenera of the genus Cassida*. Zootaxa, 2007

BORST, Alexander; PLETT, Johannes. *Seeing the world through an insect's eyes*. Nature, 2013

BORST, Alexander. *Drosophila's view on insect vision*. Current biology, 2009, R36-R47.

BRANDOS, Otakar. *Mandelinka havezová (Oreina cacaliae), brouk: Mandelinka havezová - brouk Karpatského oblouku a oblasti Sudet* [online]. 25.3.2020. Dostupné z: <https://www.treking.cz/priroda/mandelinka-havezova.htm>

BRIAN, Thomas (Editor). *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Academic Press; 2nd edition, 2016.

BUSCHBECK, Elke K.; FRIEDRICH, Markus. *Evolution of insect eyes: tales of ancient heritage, deconstruction, reconstruction, remodeling, and recycling*. Evolution: Education and Outreach, 2008

BUSCHBECK, Elke K.; FRIEDRICH, Markus. *Evolution of insect eyes: tales of ancient heritage, deconstruction, reconstruction, remodeling, and recycling*. Evolution: Education and Outreach, 2008

CARTHEW, Richard W. *Pattern formation in the Drosophila eye*. Current opinion in genetics & development, 2007

CINI, Alessandro, et al. *Competition between the native and the introduced hornets Vespa crabro and Vespa velutina: a comparison of potentially relevant life-history traits*. Ecological Entomology, 2018

EGHRARI, Allen O.; RIAZUDDIN, S. Amer; GOTTSCH, John D. *Overview of the cornea: structure, function, and development*. Progress in molecular biology and translational science, 2015.

FAULDE, Michael, et al. *Hospital infestation by the cluster fly, Pollenia rudis sensu stricto Fabricius 1794 (Diptera: Calliphoridae), and its possible role in transmission of*

bacterial pathogens in Germany. International journal of hygiene and environmental health. 2001

FOSTER, J.J., & KELBER, A. *Polarization vision in flies: neural mechanisms and functional roles.* Current Opinion in Neurobiology, 2020

FOSTER, Kevin R.; GULLIVER, John; RATNIEKS, Francis LW. *Worker policing in the European hornet *Vespa crabro*.* Insectes sociaux, 2002

FRIEDRICH, Markus. *Evolution of insect eye development: first insights from fruit fly, grasshopper and flour beetle.* Integrative and comparative biology, 2003

FRIEDRICH, Markus. *Evolution of insect eye development: first insights from fruit fly, grasshopper and flour beetle.* Integrative and comparative biology, 2003

FRYČ, David a Svatopluk RYCHLÝ. *HOSPODÁŘSKY VÝZNAMNÉ MŠICE* [online]. 2018. Dostupné z:

FRYČ, David. *Nálety mšic do sacích pastí Johnson-Taylor v roce 2020* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/skudci/nalety-msic-do-sacich-pasti-johnson-taylor-v-roce-2020>

GAHLHOFF JR, Jerry E. University of Florida *Book of Insect Records Chapter 38 Smallest Adult.* 1998

GE, Si-Qin, et al. *Transformation of head structures during the metamorphosis of *Chrysomela populi* (Coleoptera: Chrysomelidae).* Arthropod Systematics & Phylogeny, 2015

GEISER, Elisabeth. *8000 Jahre alte Reste des Bergblattkäfers' *Oreina cacaliae*' (SCHRANK) von der Pasterze.* na, 1998.

GILBERT, Cole. *Form and function of stemmata in larvae of holometabolous insects.* Annual review of entomology, 1994, 323-349.

GOODMAN, Lesley J. *Organisation and physiology of the insect dorsal ocellar system.* Handbook of sensory physiology vol VII/6c, 1981, 201-286.

- GREENSPAN, R. J., & FERVEUR, J. F. *Courtship in Drosophila*. Annu. Rev. Genet., 2000
- GULDAGER KRING RASMUSSEN, D. a KARSDAL, M. A. *Biochemistry of Collagens, Laminins and Elastin: Structure, Function and Biomarkers*, 2016
- HAMMOND, G. a M. BLANKENSHIP. *Apis mellifera: honey bee*. Animal Diversity Web [online]. 2009. Dostupné z: https://animaldiversity.org/accounts/Apis_mellifera/
- HANEL, Lubomír. *Stručný obrazový klíč k určování hlavních skupin suchozemských šestinožců (Hexapoda)*. Praha: Univerzita Karlova, Pedagogická fakulta, 2018
- HEIDENREICH, Uta; SCHMITZ, Anke; SCHMITT, Michael. *Extraocular photoreceptors and frontal grooves in Criocerinae (Coleoptera: Chrysomelidae)*. In: Research on Chrysomelidae, Volume 2. Brill, 2009
- HENNEMANN, Frank H.; CONLE, Oskar V. *Revision of Oriental Phasmatodea: The tribe Pharnaciini Günther*, 1953, including the description of the world's longest insect, and a survey of the family Phasmatidae Gray, 1835 with keys to the subfamilies and tribes (Phasmatodea: "Anareolatae": Phasmatidae). Zootaxa, 2008
- HODGSON, Erin W. *Red fire bugs* [online]. Utah State University Extension, 2008. Dostupné z: https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1945&context=extension_curall
- HODKOVA, Magdalena. *Why is the number of days required for induction of adult diapause in the linden bug *Pyrrhocoris apterus* fewer in the larval than in the adult stage?*. Journal of insect physiology, 2015
- HOLECOVÁ, Milada. *Vybrané kapitoly z etologie hmyzu*. 2012.
- HOMBERG, Uwe; PAECH, Agnes. *Ultrastructure and orientation of ommatidia in the dorsal rim area of the locust compound eye*. Arthropod Structure & Development, 2002
- HORNOVÁ, Jara. *Oční propedeutika*. Grada, 2011.
- HORRIDGE, G. A., & GIDDINGS, C. W. *Spectral and polarization sensitivity of single cells in the fly retina*. Journal of Comparative Physiology A, 1988

https://eagri.cz/public/web/file/577984/Hospodarsky_vyznamne_msice_20_.pdf

CHALUPECKÝ, Jindřich. *Oční lékařství: pro posluchače i praktické lékaře. 2.*, přeprac. vyd. Praha: Hejda a Tuček, 1908

CHARABIDZE, D., COLINET, H., DEPEME, A., GAUDRY, E., HEDOUIN, V. AND GOSSET, D. *First record of adult and larval Suillia pallida (Meigen) (Diptera: Heleomyzidae) on a human corpse*. Forensic Science International, 2014

INSAUSTI, Teresita C.; LE GALL, Marion; LAZZARI, Claudio R. *Oxidative stress, photodamage and the role of screening pigments in insect eyes*. Journal of Experimental Biology, 2013

Insect nets. Mississippi Entomological Museum [online]. 2006 Dostupné z: <https://mississippientomologicalmuseum.org.msstate.edu/collecting.preparation.methods/Insect.nets.htm>

JAYADEV, Ranjay; SHERWOOD, David R. *Basement membranes*. Current Biology, 2017

JELÍNKOVÁ, Aneta. *Biofyzika vidění*. 2018.

JEONG, Ki-Hun; KIM, Jaeyoun; LEE, Luke P. *Biologically inspired artificial compound eyes*. science, 2006

KELBER, A., & BALKENIUS, A. *Polarization vision in flies: a historical review*. Journal of Comparative Physiology A, 2016

KELBER, Almut, et al. *Hornets can fly at night without obvious adaptations of eyes and ocelli*. PLoS One, 2011

KODRÍK, Dalibor. *FYZIOLOGIE HMYZU*. [online] 2004. Učební texty. Masarykova univerzita. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/podzim2009/Bi7630/um/fyz-hmyz-2004.pdf>

KOENEMANN, Stefan; JENNER, Ronald. *Crustacea and arthropod relationships*. CRC Press, 2005.

- KOCH, R. L. *The multicolored Asian lady beetle, Harmonia axyridis: a review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts*. Journal of Insect Science, 2003
- KOLIBÁČ, Jiří, Karel HUDEC, Zdeněk LAŠTŮVKA a Milan PEŇÁZ. *Příroda České republiky: průvodce faunou*. Druhé, upravené a doplněné vydání. Praha: Academia, 2019
- KRAMER, James M. *Basement membranes*. WormBook: The Online Review of C. elegans Biology [Internet], 2005.
- KRAPP, H. G. (2009). *Ocelli*. Current Biology, 19(11), R435-R437. Dostupné z: [https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822\(09\)00884-7.pdf](https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822(09)00884-7.pdf)
- KŘÍŽ, Pavel. *Zraková ostrost*. Bakalářská práce. Brno: Masarykova Univerzita. Lékařská fakulta. Katedra optometrie a ortoptiky, 2007.
- KUMAR, J. P. *The molecular circuitry governing retinal determination*. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms, 2010
- KUMAR, Justin P. *Building an ommatidium one cell at a time*. Developmental Dynamics, 2012
- KUNDRATA, Robin. *Entomologie: Metody sběru hmyzu* [online]. FRVŠ G4 1772, 2012. Univerzita Karlova. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/studium/predmety/index.php?do=download&did=196867&kod=OPBB2B111A>.
- KUNZE, P.; HAUSEN, K. *Inhomogeneous refractive index in the crystalline cone of a moth eye*. Nature, 1971
- LAND, M. F., & FERNALD, R. D. *The evolution of eyes*. Annual Review of Neuroscience, 1992
- LAND, Michael. *Rhabdom: anatomy*. Britannica.com [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/rhabdom>
- LAWRENCE, P. A.; SHELTON, P. M. J. *The determination of polarity in the developing insect retina*. 1975.

LINDGREN, Staffan. Links, useful web. *I spy with my little eye–eyes of the world*, 2020. Dostupné z: <https://natureanaimo.ca/2020/08/i-spy-with-my-little-eye-eyes-of-the-world/>

MACEK, Jan, Jakub STRAKA, Petr BOGUSCH, Libor DVOŘÁK, Pavel BEZDĚČKA a Pavel TYRNER. *Blanokřídli České republiky I*. Praha: Academia, 2010. Atlas (Academia). ISBN 978-80-200-1890-8.

MACEK, Jan, Ladislav ROLLER, Karel BENEŠ, Kamil HOLÝ a Jaroslav HOLUŠA. *Blanokřídli České a Slovenské republiky*. Praha: Academia, 2020. Atlas (Academia).

MAKAROVA, O. and LEE, K.E. *Evaluation of Heleomyzid Flies as Biodegraders of Composted Organic Waste*. Waste and Biomass Valorization, 2018

MANKO, Peter, et al. *Efficiency of traps in collecting selected Diptera families according to the used bait: comparison of baits and mixtures in a field experiment*. European Journal of Ecology, 2018

MARSHALL, J., & CHAPMAN, R. *The eyes of insects: from compound eyes to neural circuits*. Current Biology, 2016

MAŠÁN, P., ŠKORVANOVÁ, S., FARKAŠOVÁ, Z., KUPCOVÁ, S., & LUKÁČOVÁ, M. *The antimicrobial and anti-inflammatory activities of the blowfly Calliphora vicina larval excretions and secretions*. BMC complementary medicine and therapies, 2020

MATTHEWS, Robert W.; MATTHEWS, Janice R. *The Malaise trap: its utility and potential for sampling insect populations*. The Great Lakes Entomologist, 2017

MAZÁČ, David. *MALAISEHO PASTI, NÁRAZOVÉ PASTI A FEROMONY*. Entosphinx [online]. 2014. Dostupné z: http://www.entosphinx.cz/cs/aktuality/detail/6_5-dil-serialu-o-sberu-hmyzu

MEEK, Keith M.; KNUPP, Carlo. *Corneal structure and transparency*. Progress in retinal and eye research, 2015.

MONTAGNA, Matteo, et al. *A new strain of Wolbachia in an Alpine population of the viviparous Oreina cacaliae (Coleoptera: Chrysomelidae)*. Environmental Entomology, 2014

- NARENDRA, A., GOURMAUD, S., & ZEIL, J. *A specialized dorsal rim area for polarized light detection in the compound eye of the Australian ant, Iridomyrmex purpureus*. *Journal of Experimental Biology*, 2007
- NARODOSLAWSKY, Benedikt. *Inside Fridays for Future: Die faszinierende Geschichte der Klimabewegung in Österreich*. Falter Verlag, 2020
- NEUBERT, David, et al. *The head of the earwig Forficula auricularia (Dermaptera) and its evolutionary implications*. *Arthropod Systematics & Phylogeny*, 2017
- NEVILLE, A.C. *The structure and function of the compound eyes of insects*. *The Journal of Experimental Biology*, 1951
- NIEDOBOVÁ, Jana a Pavla ŘEZNÍČKOVÁ. *Odchytové a odběrové metody bezobratlých*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014.
- NOLTE, D. J. *The eye-pigmentary system of Drosophila: The pigment cells*. *Journal of Genetics*, 1950
- NOVÁK, Jiří. *Tapetum lucidum: Anatomie a morfologie živočichů*. Biolib.cz [online]. 2006. Dostupné z: <https://www.biolib.cz/cz/glossaryterm/id3935/>
- NOVÁK, Karel. *Metody sběru a preparace hmyzu*. Praha: Academia, 1969.
- OBENBERGER, Jan. *Entomologie I*. Praha: ČSAV, 1952. Práce Čs. akademie věd.
- OZEROV, A. L. *Heleomyzidae (Diptera) of the world*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd. 1997
- PERLÍK, Michal a Pavel ŠEBEK. *Na barvě záleží: O efektivitě barevných misek při sběru florikolního hmyzu* [online]. 2019. Dostupné z: <https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pdf/na-barve-zalezi-o-efektivite-barevnych-misek-pri-s.pdf>
- PHILLIPS, Everett Franklin. *Structure and development of the compound eye of the honey bee*. Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1905.
- PICHAUD, Franck; CASARES, Fernando. *Shaping an optical dome: The size and shape of the insect compound eye*. In: *Seminars in Cell & Developmental Biology*. Academic Press, 2022.

- PROVAZNÍK, Štěpán. *Digitální zařízení a vliv na vidění*. 2020. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- READY, D. F. *Development of the Drosophila retina*. In *The Development of Drosophila melanogaster* (pp. 1277-1325). Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2002
- RETTICH, František a Pavel RÖDL. *Standardní metodika k provádění ochranné desinsekce při výskytu švábovitých: standardní metodika speciální ochranné deratizace*. Praha: Státní zdravotní ústav, 2002
- RIBI, Willi A. *Structural differences in the tracheal tapetum of diurnal butterflies*. Zeitschrift für Naturforschung C, 1979
- RICHARDS, Paul Glyndwr. *Biology of the cluster fly, Pollenia rudis (Fabricius) (Diptera: Calliphoridae)*. 1972
- RUCHIN, Alexander B., et al. *Dataset: Coleoptera (Insecta) Collected from Beer Traps in "Smolny" National Park (Russia)*. Data, 2022
- SAKATA, Lisandro M., et al. *Optical coherence tomography of the retina and optic nerve—a review*. *Clinical & experimental ophthalmology*, 2009
- SHEEHAN, M. J., JINN, J., & TIBBETTS, E. A. *Coevolution of visual signals and eye morphology in Polistes paper wasps*. *Biology letters*, 2014
- SCHAUFF, M. E. *Collecting and preserving insects and mites: techniques and tools*. USDA, 2004.
- SLAMA, Karel. *Autosomal recessive mutations affecting body colour in Pyrrhocoris apterus (Hemiptera: Pyrrhocoridae)*. *EUROPEAN JOURNAL OF ENTOMOLOGY*, 1998
- SOCHA, Radomír. *Pyrrhocoris apterus (Heteroptera)-an experimental model species: a review*. *Eur. J. Entomol*, 1993
- SOMANATHAN, H., BORGES, R. M., WARRANT, E. J., KELBER, A., & WALLÉN, R. *Visual ecology of Indian carpenter bees II: adaptations of eyes and ocelli to nocturnal and diurnal lifestyles*. *Journal of Comparative Physiology A*, 2010

- SONG, Young Min, et al. *Artificially engineered compound eye sensing systems*. Smart Sensors and Systems: Innovations for Medical, Environmental, and IoT Applications, 2017
- SPAETHE, J., & WEHNER, R. *The eyes of Vespula wasps: optical characteristics and spatial resolution of worker and drone eyes*. Journal of Comparative Physiology A, 2003
- SPIEWOK, Sebastian; SCHMOLZ, Erik. *Changes in temperature and light alter the flight speed of hornets (Vespa crabro L.)*. Physiological and Biochemical Zoology, 2006
- STANLEY, John R., et al. *Structure and function of basement membrane*. Journal of Investigative Dermatology, 1982
- STAVENGA, D. *Colour in the eyes of insects*. Journal of Comparative Physiology A, 2002
- STAVENGA, Doekele G. *Reflections on colourful ommatidia of butterfly eyes*. Journal of Experimental Biology, 2002
- SZPILA, K.; PAPE, T.; RUSINEK, A. *Morphology of the first instar of Calliphora vicina, Phormia regina and Lucilia illustris (Diptera, Calliphoridae)*. Medical and Veterinary Entomology, 2008
- ŠIKL, Radovan. *Zrakové vnímání*. Grada Publishing as, 2012.
- TAJOVSKÝ, K. 16. *Půdní fauna*. [online]. 2008 Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/habilitace/1431/Schlaghamersky/habilitace/D1_Tajovsky_ed_2008_-_16_Pudni_fauna_Louky_Bilych_Karpat_.pdf
- THOMAS, Colin Robert, et al. *The European wasp (Vespula germanica Fab.) in New Zealand. The European wasp (Vespula germanica Fab.) in New Zealand.*, 1960
- TSUJI, Tomohiro, et al. *Molecular characterization of eye pigmentation-related ABC transporter genes in the ladybird beetle Harmonia axyridis reveals striking gene duplication of the white gene*. Zoological science, 2018

- VÅRDAL, Hege; TAEGER, Andreas. *The life of René Malaise: from the wild east to a sunken island*. Zootaxa, 2011
- VESELOVSKÝ, Zdeněk. *Obecná ornitologie*. Vyd. 1. Ilustrace Jan Dungel. Praha: Academia, 2001
- WAKAKUWA, Motohiro, et al. *Spectral heterogeneity of honeybee ommatidia*. Naturwissenschaften, 2005
- WARRANT, E. J. *Seeing better at night: life style, eye design and the optimum strategy of spatial and temporal summation*. Vision research, 2004
- WARRANT, E. J., & DACKER, M. *Vision and visual navigation in nocturnal insects*. Annual review of entomology, 2011
- WARRANT, E. J., & DACKER, M. *Vision and visual navigation in nocturnal insects*. Annual review of entomology, 2011
- WARRANT, E. J., KELBER, A., GISLÉN, A., GREINER, B., RIBI, W. A., & WCISLO, W. T. *Asymmetry in the spatial resolution of the left and right compound eyes in the nocturnal bee Megalopta genalis*. Journal of Experimental Biology, 2010
- WARRANT, E. J., KELBER, A., GISLÉN, A., GREINER, B., RIBI, W., & WCISLO, W. T. *Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee*. Current Biology, 2004
- WERNET, Mathias F.; PERRY, Michael W.; DESPLAN, Claude. *The evolutionary diversity of insect retinal mosaics: common design principles and emerging molecular logic*. Trends in Genetics, 2015
- WILSON, Steven E.; NETTO, Marcelo; AMBRÓSIO JR, Renato. *Corneal cells: chatty in development, homeostasis, wound healing, and disease*. American journal of ophthalmology, 2003.
- WINKLER, Josef Rudolf. *Sbíráme hmyz a zakládáme entomologickou sbírku*. Praha: SZN, 1974. Lesnická knihovna (Státní zemědělské nakladatelství).

WU, Chun Yuan, et al. *External morphology, microstructure and light/dark adaptational changes of the compound eyes of Harmonia axyridis ab. conspicua (Coleoptera: Coccinellidae)*. Acta Entomologica Sinica, 2011

ZINKLER, D., & ZINKLER, M. *The compound eyes of Forficula auricularia L. (Dermaptera: Forficulidae)—a comparative SEM and TEM study*. Zoologischer Anzeiger-A Journal of Comparative Zoology, 237(3-4), 1998

ŽDÁREK, Jan. *Ohrožení hmyzem?: neobvyklá setkání po 40 letech*. Praha: Academia, 2021. ISBN 978-80-200-3030-6.

Obrázek 1:

KATANAEV, V. L.; KRYUCHKOV, M. V. *The eye of Drosophila as a model system for studying intracellular signaling in ontogenesis and pathogenesis*. Biochemistry (Moscow), 2011