

KOMPARACE HLUKU Z PROVOZU UAS, MODELŮ A GA LETADEL

Výzkumná zpráva 2024

Ing. Adam Kleczatský, Ph.D.

Ing. Zdeněk Svatý, Ph.D.

Ing. Michal Černý

Ing. Tomáš Tluchoř



Navigační 787
Jeneč 252 61

info@ans.cz
www.rlp.cz

Obsah

Prohlášení.....	2
Seznam zkratk.....	5
Úvod	6
1) Současný stav.....	7
1.1) Hluk a UAS	
1.1) Hluk a GA	
2) Výzkumný problém a hypotézy	10
3) Metodika	11
3.1) Postup měření	
3.2) Technika	
3.3) Podmínky měření	
3.3) Korekce měření	
3.4) Limitace	
4) Výsledky	19
4.1) Měření v extravilánu – letadla GA	
4.2) Měření v extravilánu – vis UA	
4.3) Měření v intravilánu – vis UA	
4.4) Měření v extravilánu – přelet UA	
4.5) Měření v extravilánu – přelet modelů	
4.6) Srovnání výsledků	
5) Diskuze	30
6) Závěr.....	33
Reference.....	35
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Přílohy	37
Příloha 1: Extrahovaná naměřená data	
Příloha 2: Fotodokumentace letadel GA	

Prohlášení

Tento dokument vznikl jako součást a zároveň jeden z výsledků spolupráce mezi subjekty:

- Řízení letového provozu České republiky, státní podnik (ŘLP ČR, s.p.);
- Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA);
- Ministerstvo dopravy (MD);
- Státní zkušebna strojů a.s.;
- Aeroklub České republiky z.s. (AeČR);
- Aeroklub Zbraslavice z.s.;
- Letecká amatérská asociace České republiky (LAA);
- Svaz modelářů České republiky z.s. (SMČR);
- Aliance pro bezpilotní letecký průmysl, z.s. (UAVA);
- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní (ČVUT FD);
- Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.;
- Správa informačních technologií města Plzně, p.o.;
- TELINK, spol. s r.o.;
- Wingtra AG;
- Flapper s.r.o.;
- MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o.

Tělo dokumentu je koncipováno jako certifikovaná závěrečná zpráva Státní zkušebny strojů a.s., respektující přesah a záměr realizace měření. Výsledky mají pouze informativní charakter.

Závěrečná zpráva *Komparace hluku z provozu UAS, modelů a GA letadel* (dále jen „Zpráva“) podléhá ochraně dle zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

Jakékoli užití Zprávy, včetně jejího rozmnožování, šíření, zveřejňování nebo jiného zpřístupňování třetím osobám, je přípustné pouze s předchozím souhlasem Řízení letového provozu České republiky, státní podnik. Porušení této povinnosti může mít za následek vznik odpovědnosti za škodu, případně jiných právních důsledků podle příslušných právních předpisů.



Manažerské shrnutí

Jaro
2024

Komparace
hluku z
provozu UA,
modelů a
GA letadel

4 MODELY 8 GA

20 UA

2 lokality



Vis a přelet



120 M

Měřeno ve
výškách
do 120 m

Certifikované měření



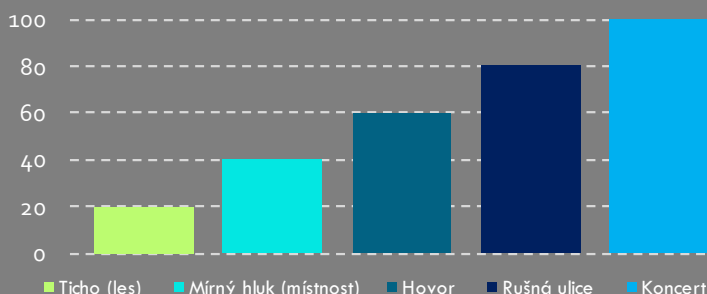
Měření akustický tlak



Ve spolupráci s EASA



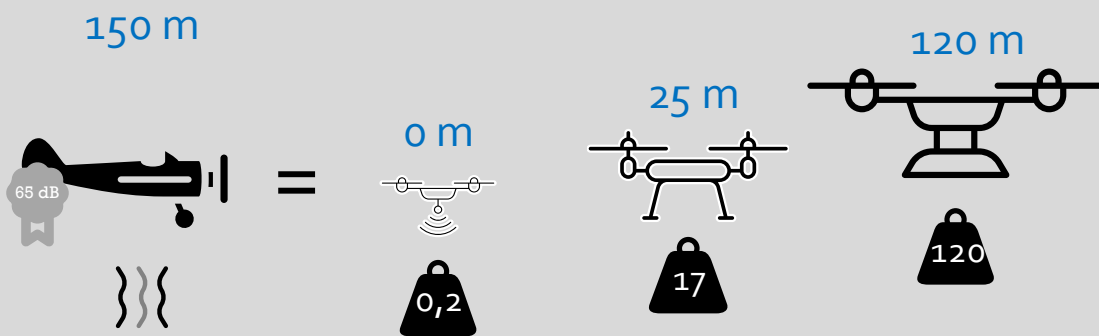
Hluková stupnice



Půlkilové modely jsou hlučné jako Mini 4 Pro

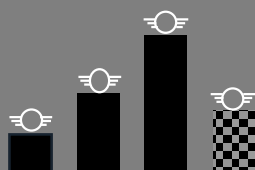


Srovnatelnost hlučnosti UA s porovnáním s letadlem GA letícím ve 150 m



Třídy

S vyšší třídou UA
vždy neroste hluk



... platí i pro
UA bez štítku

Samokřídla

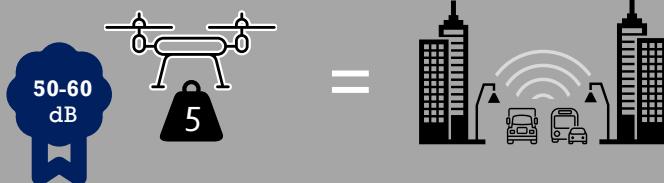
Letadlo Wingtrag t r a
je v 50 m slyšitelná jako
šepot ve větší místnosti.



40 dB

UA ve městech

UA < 5 kg do 25 m



hlučná jako exponovaná část města



STÁTNÍ ZKUŠEBNA STROJŮ a.s.
The Government Testing Laboratory of Machines J.S.C.
Třanovského 622/11

CZ-163 04 Praha 6-Řepy

Česká republika

Strana 5 ze 40

Počet příloh 2

Závěrečná zpráva č.: 45 842

Název: KOMPARACE HLUKU Z PROVOZU UAS, MODELŮ A GA LETADEL
Objednavatel: Řízení letového provozu ČR, s.p., Navigační 787, 252 61 Jeneč, ČR
Smlouva č: OBJ0002788 **Ze dne:** 15.04.2024

Zprávu zpracoval: Ing. Miroslav Kubásek, Ph.D.

Zprávu schválil: Ing. Ivan Čermák
Funkce / Position: Vedoucí zkušební laboratoře
Dne: 12.02.2025

Podpis:

Podpis:

Razítko:



Poučení:

Veškeré předpisy a nedatované odkazy norem se používají ve znění jejich změn a doplňků bez jejich citování. Uvedené údaje se týkají jen posuzovaného vzorku, předložené dokumentace a ve Státní zkušebně strojů a.s. provedených zkoušek, posouzení a zpracované dokumentace. Odkaz na zprávu musí obsahovat identifikaci Státní zkušebny strojů a.s.

Dokumentace k zakázce a záznam o zkoušce jsou uloženy v odborném útvaru zkušební laboratoře Státní zkušebny strojů a.s.

Seznam zkratek

Zkratka	Cizojazyčný název	Český název
AGL	Above Ground Level	výška nad zemským povrchem
ANSI	American National Standards Institute	americký národní standardizační institut
ČR	Czech Republic	česká republika
dB	-	decibel (<i>jednotka hluku</i>)
DJI	Dà-Jiāng Innovations	-
L_p	-	hladina akustického tlaku
L_{pA}	-	stupnice citlivosti lidského ucha
L_w	-	hladina akustického výkonu zdroje
MTOM	Maximal Take-off Mass	maximální vzletová hmotnost
GA	General Aviation	všeobecné letectví
Q	-	činitel směrovosti
r	-	vzdálenost
RTF	Ready To Fly	model letadla připravený k letu (<i>nevyžadující stavební dovednosti</i>)
RTK	Real-time kinematic positioning	-
UA	Unmanned Aircraft	bezpilotní letadlo
UAS	Unmanned Aircraft System	bezpilotní systém
VFR	Visual Flight Rules	lety za viditelnosti

Úvod

Bezpilotní letadla (UA – Unmanned Aircraft), bezpilotní systémy (UAS – Unmanned Aircraft System), nebo také drony, jsou relativně novým civilně používaným dopravním prostředkem, který zejména v poslední dekádě zaznamenal značný rozmach. Tak, jak se stále významněji rozšiřovaly možnosti využití bezpilotních letadel pro širokou veřejnost, byla identifikována potřeba rozvoje stávající regulace a s tím přirozené zaměření výzkumu na oblasti, které jsou s provozem bezpilotních letadel nedílně spojeny. Jednou z těchto oblastí, zkoumající dopady globálních technologií, je také akustická emise z dopravy a její dopad na osoby vyskytující se v okolí jejího zdroje. Aktuálně platná evropská regulace je poměrně rozsáhlým souborem pravidel a postupů, ve kterých se akustická emise, resp. hluk, několikrát zmiňuje. Kromě pravidel stanovení hluku vyvozovaného bezpilotním letadlem pro výrobce, je hluk také jedním z ukazatelů, prostřednictvím něhož lze samotný provoz bezpilotního letadla v daném prostoru vymezit. Vymezení provozu se provádí formou vnitrostátně určených zeměpisných zón, ať již vstupu bezpilotních letadel jen zamezujících, nebo stanovujících určité vstupní podmínky např. ve vztahu k úrovni hluku, případně minimální výšky přeletu. Tato vymezení vázaná k dedikovanému prostoru by však měla projít racionálním hodnocením vztaženým k místním hygienickým limitům, které mají přímý dopad na regulaci dalších potenciálních zdrojů hluku (v letecké dopravě samotné, případně ve stavebnictví nebo strojírenství). Stanovení reálného dopadu hluku letících bezpilotních letadel a jeho komparací s ostatními zdroji hluku může pomoci v racionalizaci rozhodnutí autorit při povolování či restrikci provozu bezpilotních letadel.



Cílem zprávy je zhodnotit míru a dopad hluku vyvozovaného bezpilotními letadly a letadly s posádkou na palubě směrem k zemi. Toho bude dosaženo pomocí aplikace vybrané metody měření úrovně hlukové emise v různorodém provozním prostředí, prostřednictvím běžně používaných i atypických bezpilotních letadel. Dopad bude porovnán s hlukem vyvozovaným letadly s posádkou na palubě.



Kapitoly 1) a 2) jsou obsahově identické s verzí této zprávy z roku 2023.

1) Současný stav

Zvuky jsou nedílnou součástí každodenního života a také základním zdrojem přenosu informací. Vzhledem k jejich charakteristickým vlastnostem mohou mít jak pozitivní, tak negativní vliv. Zvuky, které nejsou v danou chvíli na daném místě požadovány, a zvuky, které mohou obtěžovat, nebo dokonce škodí lidskému zdraví, nazýváme hlukem [1]. Expozice hluku je určována hladinou akustického tlaku A. Váhový filtr A zohledňuje vnímání lidského ucha. Pro představu je v Tabulce 1 uvedena stupnice citlivosti lidského ucha (L_{pA}):

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých hladin hluku [2, 3]

L_{pA}	Popis působení jednotlivých hladin
20 dB	hluboké ticho – lze přirovnat k zasněženému lesu, nahrávacímu studiu
30 dB	příjemné ticho – noční klid v přírodě, obytná místnost s uzavřenými okny bez vlivu ruchu ulice
40 dB	velmi mírný hluk – obytné místnosti
60 dB	mírný hluk – běžný hovor (v 1 m)
75 dB	hluk – nákladní vozidlo, frekventovaná dopravní tepna
85 dB	silný hluk – ve strojírenském provozu – při trvalém pobytu osob nastává trvalá porucha sluchu
100 dB	silný hluk – hudební skupina
110 dB	velmi silný hluk – pneumatické kladivo
130 dB	práh bolesti – start vojenské stíhačky – přichází bolest ucha
140 dB	práh bolesti – tryskový motor (ve vzdálenosti 25 m)
160 dB	protržení bubínku

Obtěžování hlukem je definováno jako psychický stav vznikající při mimovolném vnímání vlivů, ke kterým má jedinec záporný postoj a na které reaguje pocity odporu, podrážděností a v některých případech i psychosomatickými poruchami [4]. Hladinu akustického tlaku lze spočítat podle vzorce (1) uvedeného níže.

$$L_p = L_w - 10 * \log_{10} \frac{Q}{4\pi R^2} \quad (1)$$

kde je L_p [dB] hladina akustického tlaku v dané vzdálenosti,
 L_w [dB] hladina akustického výkonu zdroje,
 Q [-] činitel směrovosti,
 r [m] vzdálenost mezi zdrojem a konkrétním místem.

Ochranu obyvatel před hlukem určuje z legislativního hlediska zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví [5], který pro přenos hluku rozlišuje níže popsané chráněné prostory. K těmto chráněným prostorům jsou určeny přípustné hygienické limity hluku dle nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Tento zákon [6] dále definuje prostory, které jsou předmětem ochrany, a limity pro ně poplatné. Některé z nich jsou uvedené níže:

- a) Chráněný venkovní prostor – každý nezastavěný pozemek, který je užíván k rekreaci, léčebné péči či výuce. Chráněným venkovním prostorem není lesní a zemědělský pozemek a ani zahrada u rodinného domu není chráněný venkovní prostor a nevztahují se tedy pro tento prostor hygienické limity hluku.
- b) Chráněný venkovní prostor stavby – prostor do vzdálenosti 2 metrů před fasádou, zejména v části před prostorem významným z hlediska pronikání hluku z exteriéru do chráněného vnitřního prostoru stavby. Prostorem významným z hlediska pronikání hluku je dle nařízení vlády č. 272/2011 Sb. [6] prostor před výplní otvoru obvodového pláště stavby zajišťující přímé přirozené větrání, za níž se nachází chráněný vnitřní prostor stavby, pokud tento chráněný prostor nelze přímo větrat jinak.

Hygienické limity (viz Tabulka 2) hluku uvedené v tomto nařízení se porovnávají s vypočítanou nebo změřenou ekvivalentní hladinou akustického tlaku A . Pro denní dobu se ekvivalentní hladina akustického tlaku L_{Aeq} stanovuje pro 8 nejhluchnějších a na sebe navazujících hodin ($L_{Aeq,8h}$) a 1 nejhluchnější hodinu ($L_{Aeq,1h}$) pro noční dobu.

Tabulka 2: Hygienické limity hluku pro exteriér

Druh chráněného prostoru	Hygienický limit	
	Denní doba $L_{Aeq,8h}$ [dB]	Noční doba $L_{Aeq,1h}$ [dB]
Chráněný venkovní prostor staveb lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	45	35
Chráněný venkovní prostor lůžkových zdravotnických zařízení včetně lázní	50	40
Chráněný venkovní prostor ostatních staveb a ostatní chráněný venkovní prostor	50	40

Kromě ochrany vnějších prostorů, pro které jsou stanoveny hygienické limity, je předmětem zákona [5] také ochrana vnitřních prostorů staveb, ve kterých jsou obytné místnosti. S rozlišením na denní dobu, resp. dobu pobytu, pak rozlišujeme hygienické limity od 25 do 45 dB.

1.1) Hluk a UAS

Jak bylo zmíněno výše – se stále významněji rozšiřující se paletou možností využití bezpilotních letadel a počtu strojů využívaných širokou veřejností, byla identifikována potřeba rozvoje regulace a zaměření výzkumu pro oblast hluku. Například v roce 2020 standardizační plán ANSI (American National Standards Institute) [7] došel k závěru, že nejsou k dispozici žádné specifické standardy pro hluk bezpilotních letadel, a tomuto tématu byla dána vysoká priorita. Pokud je žádoucí stanovit adekvátně nastavenou normu, je nutné znát provozní charakteristiky bezpilotních letadel, které jsou spojeny s hodnotami akustického projevu. V oblasti souhrnu dosavadního (do roku 2021) výzkumu dopadu hluku bezpilotních letadel se zabývala studie autorky Beaty Schäffer a kol [8]. Na základě přezkumu literatury se zaměřila na postupy měření a charakteristik emisí hluku a účinky hluku na člověka. Přezkoumání emisních charakteristik odhalilo, že síla zdroje závisí především na modelu bezpilotního letadla a užitečném zatížení, stejně tak jako provozním stavu.

Současný stav definují především hlavní prameny práva, pro evropské prostředí situačně definovatelné jako „harmonizovaná legislativa“, představující soubor nařízení [9–11]. Pro oblast hluku a jeho měření

je primárně nutné vycházet z [10], které popisuje metody měření hluku přenášeného vzduchem, které se použijí pro stanovení hladiny akustického výkonu bezpilotních letadel tříd C1, C2 a C3. Dále stanoví základní normu pro měření vyzařovaného hluku a podrobné zkušební postupy pro měření hladiny akustického tlaku na měřicí ploše zdroje a pro výpočet hladiny akustického výkonu zdroje. Dle metodiky zkušební postupu uvedeného v [10] musí výrobci, kteří na trh uvolňují bezpilotní letadla tříd 1, 2 a 3, provést měření hluku přenášeného vzduchem. Tento postup specifikuje maximální povolené hladiny akustického výkonu pro různé třídy UA. Postup předepisuje podmínky zkušební metodiky, spočívající v letu bezpilotního letadla „ve stabilní poloze, příčně a vertikálně, 0,5 m nad počátkem měřicí polokoule při maximální vzletové hmotnosti (MTOM) a s plně nabitou baterií bezpilotního letadla. Je-li bezpilotní letadlo uvedeno na trh s příslušenstvím, které může být k němu připevněno, zkouší se s tímto příslušenstvím a bez něj ve všech možných konfiguracích bezpilotního letadla.“ Měřicí metodika vychází z normy [12], která je považována za základní normu pro měření vyzařovaného hluku.

1.1) Hluk a GA

Hluk letadel s posádkou na palubě je předmětem standardů a doporučených postupů ICAO (příloha 16/I k Úmluvě o civilním letectví), přičemž jeho vlivem se zabývá také ICAO Doc 9911 „Recommended Method for Computing“ [13]. Metodiku převzatou z tohoto dokumentu používá také analýza [14] Ministerstva dopravy Spojených států amerických, která zkoumala hlukové složky provozu vybraných letadel GA pod 5,7 tun MTOM. Měření ministerstva u náhodně vybraných letadel (viz v Tabulce 3 níže) vykazalo pro lety ve 300 m AGL uvedené hodnoty.

Tabulka 3: Hodnoty hluku GA [14]

Typ	Výrobce	Model	MTOM [t]	Ø hodnota hluku ¹ ve 300 m [dB]
Letoun	Cessna Aircraft Company	182	1,4	67,2
Letoun	Cessna Aircraft Company	208B	4	71,7
Vrtulník	Robinson Helicopter Company	R44	1,1	70
Vrtulník	Bell Helicopter	407	2,3	73,7
Vrtulník	Hughes Helicopters, Schweizer Aircraft Corporation, Sikorsky Aircraft	S300	1,2	65,5

¹ Průměrná naměřená hodnota expozice zvuku ze vzdálenosti 60 m dle metodiky ICAO Doc 9911.

2) Výzkumný problém a hypotézy

Hlukové emise spojené s provozem UA mohou představovat problém pro okolní prostředí. Provoz by se měl za podpory legislativních pravidel uskutečňovat způsobem, který v co nejmenší míře ohrožuje osoby i zvířata na zemi. Základní výzkumná otázka spočívá v tom, jaká je skutečná hodnota hlukové emise z letících UA rozličných typologií, letících v různých výškách. Je uvažováno také v popisu kontextu okolního hluku prostředí, ve kterém se lidé i zvířata běžně pohybují. To může zahrnovat také komparaci hlukové emise letadel s posádkou na palubě a provozu, který je současnou předpisovou základnou těmto letadlům umožněn. Dle leteckých předpisů nesmí takové (VFR) lety, s výjimkou vzletu a přistání nebo s výjimkou povolení vydaného Úřadem pro civilní letectví, být prováděny ve výšce nižší než 300 m AGL nad zastavěnými městy či shromážděním a 150 m AGL kdekoli jinde. Ačkoliv je metodika a druh vybraného měření odlišný, je pro účely zachování kontinuity a komparace výsledků první hypotéza identická s předchozí verzí této zprávy (2023). Druhá, nově stanovená hypotéza, ověřuje závislost třídy letadla na výsledném akustickém tlaku a třetí, taktéž nově stanovená hypotéza, je změněna a týká se výsledného porovnávání hluku UA, která byla předmětem obou měření.



- I. Všechna UA měřená v experimentu dokážou generovat menší akustickou emisi při letech ve výšce 50 m, než letadla s posádkou na palubě (měřená v experimentu) letící v nejnižší minimální výšce letu dle použitelného předpisu (150 m).
- II. S rostoucí třídou UA (dle nařízení (EU) 2019/947) vždy roste velikost akustického tlaku při letu za stejných podmínek.
- III. UA s nejvyšším akustickým tlakem v 50 m nebude hlučnější, než letadlo GA, které mělo nejvyšší akustický tlak naměřený ve 150 m.

3) Metodika

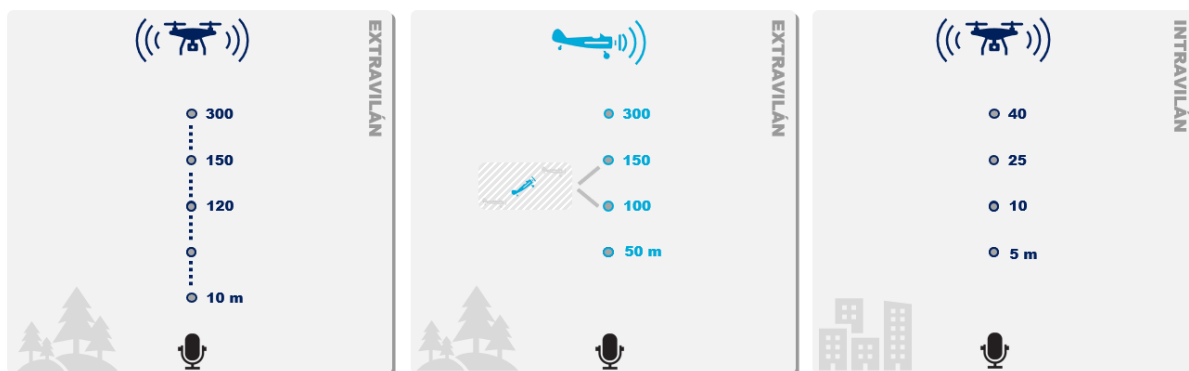
Zpráva je postavena na výzkumné metodě experimentu, který řeší vztah mezi složkami hluku v závislosti na podmínkách prostředí a typu sledovaného zdroje, který je hlukovým původcem. Na základě rešeršní činnosti uvedené výše jsou formulovány podmínky experimentu, stojící na měření letadel bezpilotních a pilotovaných, tj. s posádkou na palubě.

Metodika měření vychází především z pravidel uvedených ve směrnici EASA [15], standardem SAE AIR902 a ISO 3744:2010 [12, 16]. Oproti verzi zprávy z roku 2023 v experimentu dochází výhradně k měření akustického tlaku. Akustický tlak $L_{pAeq,T}$ je měřen u letadel při dopředném letu a, umožňuje-li to také konstrukce letadla, také pro let ve visu. Měření probíhalo v následujícím rozdělení:

- a) Hladina akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$ [dB] – extravilán. Měření hladiny akustického tlaku pilotovaných letadel prováděného při průletu či (v případě UA) visu, a to v jedné až čtyř výškách od 40 do 300 m. Měření akustického tlaku UA prováděného v letových výškách od 15 do 300 m. Měřeno dle [12].
- b) Hladina akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$ [dB] – intravilán. Měření hladiny akustického tlaku u 6 vybraných bezpilotních letadel (rok uvedení na trh 2021 až 2024) prováděného při visu, a to ve výškách od 10 do 40 m. Měřeno dle [12].

Výška měření letadla závisí na okolních vlivech tak, aby byla splněna pravidla metodiky [15]. Jedná se zejména o pozadí okolního prostředí, pro který je stanoven požadavek na dostatečný rozdíl mezi akustickým tlakem UA a referenční hodnotou pozadí. Pro dosažení požadovaného rozdílu je tak možno variovat výšky měření v intervalu 15 až 300 m AGL. Jak ilustruje Obrázek 1, jsou definované ideální výšky měření: 25, 50, 80, 120, 150, 200 a 250 m AGL pro UA. Pro GA letadla pak: 50, 150, 300 m AGL. Dále je měřen hlukový projev letadel GA, které nad měřicím zařízením provádí stoupání ze 100 do 150 m AGL za plného výkonu pohonné jednotky. Pro GA je přesné dodržení těchto výškových hladin omezené, a proto je nutno uvažovat jistou míru variace. Záměrem je získání výsledného akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$ v různých výškách tak, aby byl patrný jeho nárůst (či pokles) a zároveň došlo ke splnění následujících pravidel [15].

- Měření je považováno za přípustné, je-li hodnota naměřeného akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$ u prolétávajícího letadla alespoň o 15 dB vyšší, nežli (referenční) hodnota hluku měřeného pozadí. V opačném případě je nutné snížit výšku průletu, ve výjimečných případech až na 10 m AGL.
- Výška průletů je standardně stanovena v intervalu 17 až 150 m, s optimální výškou 50 m, která je referenční v rámci metodik využívaných EASA.



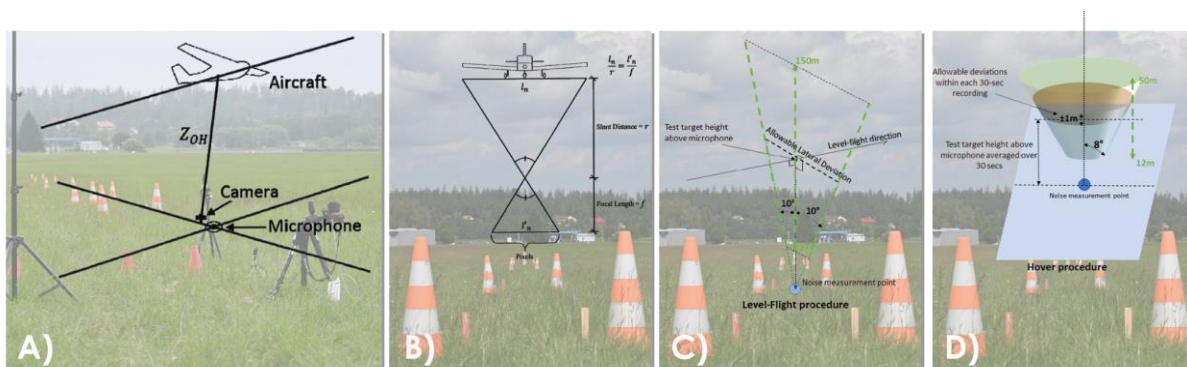
Obrázek 1: Ilustrace principu měření

Pro získání celkového obrazu hlukové emise emitované jak letadly bezpilotními, tak těmi s posádkou na palubě, je nutné zohlednit případné změny v úrovni referenčního akustického tlaku prostředí. Během experimentu jsou měřeny hodnoty akustického tlaku, a to jak pro měřená letadla, tak pro hodnotu akustického tlaku (klidového) okolí (referenční hodnota akustického tlaku okolí). Tato hodnota je průměrována ze všech hodnot referenčního hluku okolí, které jsou naměřeny před každým měřením hladiny akustického tlaku a výkonu pro daný typ letadla. Podrobné podmínky, parametry a postupy měření definuje metodika EASA. Pro kontext měření jsou níže ve zprávě popsány základní podmínky a postup měření, které byly dodrženy.

3.1) Postup měření

Postup měření je sestaven na základě metodik EASA, standardem SAE AIR902 a ISO 3744:2010 [12, 15, 16]. Před měřením je proveden sběr informací o letadlech. Jedná se o základní popisné charakteristiky daného letadla jako je typ, rozměry, vybavení a hmotnost. UA byly při letech zatíženy do maxima MTOM, GA nikoliv. Vzhledem k absenci přesných polohových informací z palubního vybavení stroje, je pro určení rychlosti nutno využít rychlostí průletu a výšky stroje fotometrické měření. Pro fotometrické měření je využito kalibrační pole, které je vytyčeno s využitím geodetického GNSS přijímače. Trajektorie pro jednotlivé lety je vyznačena využitím reflexních kuželů podél osy letu. Kužely jsou zároveň využity pro indikaci referenčních vzdáleností potřebných pro kalibraci fotometrického měření v odstupech 15, 25, 50 a 75 m. Současně s tím je jednoznačně definována poloha fotoaparátu, mikrofону a referenční linie pro definici souřadného systému. Snímky jsou pořízeny s využitím sekvenčního snímkování (burst mode – 8 Hz), rozlišení snímků 24 Mpx (6000 x 4000 px), režimem priority uzávěrky (1/1000 s). Fotoaparát je fixně zaostřen na nekonečno v rámci prvotní kalibrace a jeho nastavení dále není měněno. Fotoaparát je umístěn na stativu s otočnou hlavou, kdy je kalibrační snímek vždy pořízen v horizontální rovině (využití libel stativu i elektronické libely fotoaparátu) a následně otáčen do svislé polohy. Poloha senzoru je v ose letu s odstupem 1,8 m od mikrofónu ve výšce 0,5 m nad zemí. Referenční lano (využitě pro indikaci osy Y kolmé ke směru letu) je ve výšce 2 m nad zemí. Při vlastním měření je snímkování spuštěno s využitím dálkového ovladače a elektronické uzávěrky (z důvodu zabránění ovlivnění mikrofónů v blízkosti fotoaparátu).

V určeném bodě osy je umístěna technika, která je určená k měření hluku a digitálního fotografického škálování. Obrázek 2 ilustruje nastavení experimentu v souladu s metodikou pro digitální fotografické škálování.



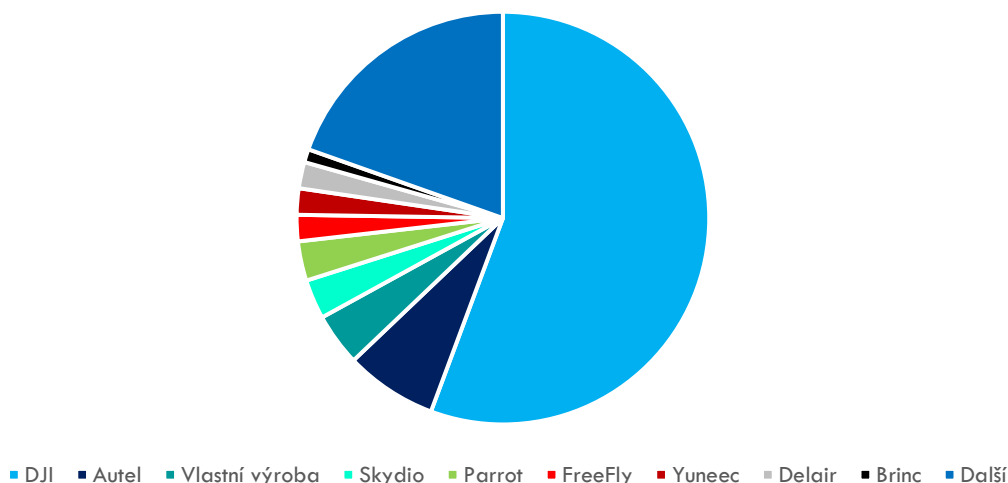
Obrázek 2: A) Pomyslná geometrie pro akustický test, B) Základní geometrie fotografického škálování, obojí vycházející z [16], C) Zobrazení přijatelných hranic letu při měření průletu, D) Zobrazení přijatelných hranic letu při měření ve visu [19] (vše graficky upraveno)

Postup se liší v závislosti na typu letadla (pilotované či bezpilotní) a jeho konstrukce (schopnost visu). Před každým měřením hlukového projevu letadla je nejdříve změřena velikost hlukové složky pozadí (klidové prostředí). Letadla schopna visu visí nad místem měření zhruba 30 s. Letadla schopná průletu

prolétávají nad snímacím zařízením v dané výšce tak, aby se za letu nacházela kolmo nad mikrofonem zhruba v polovině jednoho měřicího cyklu. Pro bezpilotní letadla je dále stanovena minimální výška průletu (v intervalu 17-50 m), ve které je hlukový projev letadla vyšší nežli pozadí, a to alespoň o 15 dB. Na základě odhadované výdrže letadla je následně realizován průlet v intervalech 17-150 m. Pokud se hlukový projev letadla blíží naměřené hodnotě pozadí, resp. její odchylce měření, je měření ukončeno. U letadel s posádkou je vždy realizováno měření při průletech ve výškách 50, 150 a 300 m, společně s měřením projevu maximálního výkonu motoru a stoupání ze 100 do 150 m. Dle výdrže pohonné jednotky letadla byla snaha respektovat výchozí metodiky a průlety realizovat 3x v každém směru průletu nad mikrofonem.

3.2) Technika

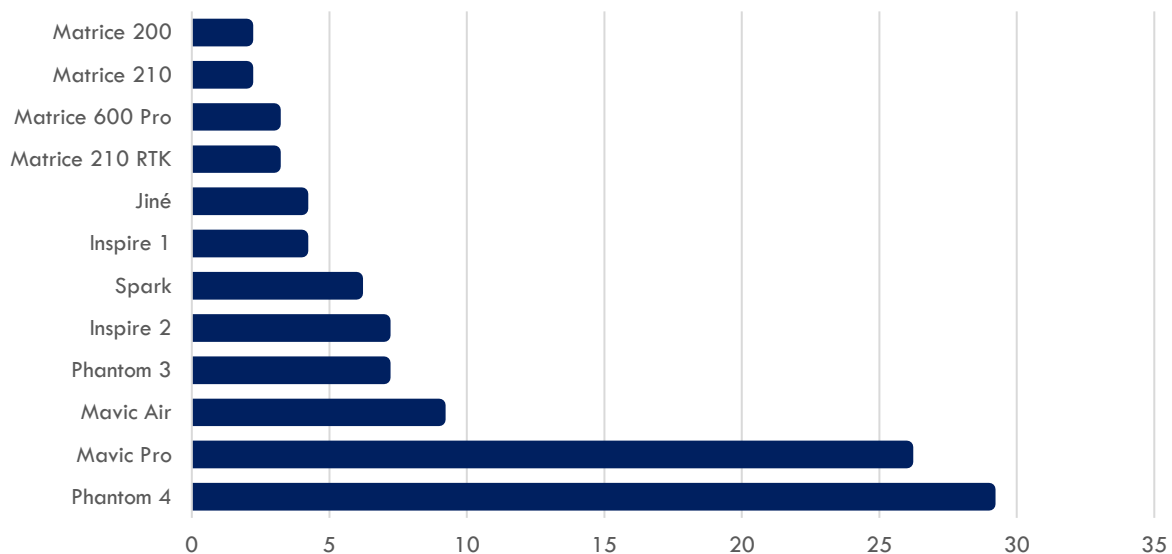
Stěžejní proměnou realizace experimentu je užitá technika, která zajistí spolehlivé a věrohodné měření dat. Zároveň bude v případě použitých UA reflektovat aktuální stav letadlového parku vybraného profesionálního provozovatele² v ČR, potažmo světového trhu s těmito stroji. Výběr UA pro uvažovaný experiment vychází z obecně dostupných informací o zastoupení jednotlivých výrobců bezpilotní techniky na světových trzích. Obrázek 3 poukazuje na fakt, že více než polovina prodeje připadá na výrobce DJI. Vzhledem ke skladbě produktového portfolia u jednotlivých prodejců elektroniky a bezpilotní techniky v ČR se rovněž lze domnívat, že poměr prodeje výrobků DJI v ČR bude o něco vyšší.



Obrázek 3: Podíl světového trhu dílčích výrobců UAS [17]

Pokud se zaměříme na modelové řady daného výrobce, z historických statistik vyplývá, že mezi nejprodávanější modely patří ty ze středového spektra produktů. Jedná se o poloprofesionální UA s hmotností do 1,5 kg a nižší. Obrázek 4 ukazuje, že v případě výrobce DJI jde o modelové řady Phantom, Mavic a robustnějšího řešení v podobě Inspire a Matrice. V kontextu současné skladby modelového portfolia lze očekávat primární zastoupení řad Mavic a Matrice, dále pak řady Mini, které v době realizace níže citované statistiky nebyly na trhu k dispozici.

² Osoba poskytující letovou činnost za úplatu či zajištění vlastní podnikatelské činnosti.



Obrázek 4: Podíl prodeje individuálních modelových řad výrobce DJI [18]

Pro vlastní měření byla vybrána škála pilotovaných a bezpilotních letadel. Hlavním cílem výběru bylo vytvořit sadu testovacích bezpilotních letadel, která reflektuje současný trh s uživatelskými UA. V případě letadel s posádkou na palubě šlo o zvolení průřezu letadly, která jsou běžně využívána při sportovně-rekreačním provozu v rámci aeroklubu. Pro zajištění techniky byl osloven Aeroklub Zbraslavice, který zajišťoval měřené přelety GA letadel. Pro výběr GA letadel nebyl určen předem definovaný klíč. Vzhledem k možnostem rozsahu měření nebyla využita letadla s posádkou na palubě o konstrukci typu vrtulník a jiné, které lze v rámci GA létání identifikovat. Na základě výše uvedených parametrů byla v experimentu testována následující letadla, a to prostřednictvím dále uvedených měřících zařízení.

Tabulka 4: Letadlový park měření (UA), elektropohon

ID	Výrobce	Model	Konstrukce	Rok uvedení na trh	MTOM (kg)
1	DJI	Matrice 3TD	Koptéra	2024	1,61
2	DJI	Flycart 30*	Koptéra	2024	95
3	DJI	Matrice 30T	Koptéra	2022	4
4	DJI	Mavic Pro	Koptéra	2016	0,734
5	DJI	Inspire 2	Koptéra	2016	4,25
6	DJI	Mavic 2 Enterprise	Koptéra	2018	1,1
7	DJI	Matrice 210	Koptéra	2017	6,14
8	DJI	Matrice M300 RTK	Koptéra	2020	9
9	WingtraOne	Gen 2	Samokřídlo	2021	4,5
10	DJI	Matrice 350 RTK	Koptéra	2023	9,2
11	DJI	Mavic 3 Multispectral	Koptéra	2022	1,3
12	DJI	Mini 4 Pro ³	Koptéra	2023	0,249
13	Yuneec	H520E RTK	Koptéra	2017	3,25
14	DJI	M600 Pro	Koptéra	2016	15,5
15	LIAZ	SkySpotter 150*	Vrtulník	2018	120
16	ThunderFly	TF-G2	Vírník	2022	1,5
17	AgentFly Technologies	Gorgon X8-B*	Koptéra	2024	17
18	Flapper	Nimble+	Ornitoptéra	2023	0,114
19	DJI	Phantom 4 Pro	Koptéra	2016	1,388
20	DJI	Mavic 3 Classic	Koptéra	2022	1,1
21	DJI	Mini 2	Koptéra	2020	0,249

* Vysoce specializované a méně dostupné UA s pořizovací cenou v řádu vyšších stovek tisíc až stovek miliónů Kč

Tabulka 5: Letadlový park měření (dálkově řízené modely, elektropohon)

ID	Model	Motor	Rotor (průměr, poč. lopatek)	Konstrukce	Ot./min. (tis.)	MTOM (kg)
22	Yak-55	Dualsky XM 2834CA-7	GWS 10x6 (254, 2)	Letoun	1,5	0,5
23	3dlabprint Mitsubishi A6M2 Zero	Kavan C3530-1400	APC 9x9 E (228,6; 2)	Letoun	17	0,6
24	Ambrosia	RacerStar BR2830	Graupner Cam Folding 10x5 (254, 2)	Letoun	15	0,6
25	Elexant F3A	Hacker C50-13 XL Acro 6,7:1 Competition	APC 20x13 E (508 mm, 2)	Letoun	47	5

Tabulka 6: Letadlový park měření (GA letadla, spalovací pístový motor)

ID	Výrobce	Model	Konstrukce	MTOM (kg)
26	Flying Machines	FM301 Stream	Motorové rogallo (SLZ)	450
27	Ekolot	JK-05L Junior	Letoun (SLZ)	450
28	AutoGyro	Calidus 915 iS	Vírník (SLZ)	600
29	Aerospool	WT-9 Dynamic GT	Letoun (SLZ)	600
30	Aeropilot	Legend 600	Letoun (SLZ)	600
31	Pitts Specia	S1C	Letoun (SLZ)	544
32	Zlín	Z-142	Letoun	1050
33	Zlín	Z-43	Letoun	1100

Tabulka 7: Měřicí aparát

Typ ⁴	Výrobce	Model a číslo
Analyzátor	B&K	PULSE 3050-A-060, výr.č. 305-111575, OL č. 8012-OL-10146-23
Mikrofon	B&K	4190, výr.č. 2322559, OL č. 8012-OL-10205-22
Mikrofon	B&K	4190, výr.č. 2322560, OL č. 8012-OL-10206-22
Kalibrátor	B&K	4231, výr.č. 3011573, KL č. 8012-KL-10003-21
Thermo-hygro-barometr	Testo	445, výr.č. 00506575/103, KL č. TLK-180026, TPM-180299, VLM-180067
Měřičské pásmo	BMI Ergoline	Ev. č. 760187, KL č. VUGTK/47761/2021
GNSS Přijímač	LEICA	GS18
Fotoaparát	SONY	Alpha A7 III
Objektiv	SONY	FE 50mm f/1.8

3.3) Podmínky měření

V návaznosti na stanovené hypotézy bylo provedeno experimentální měření ve dvou, z hlediska emisí okolního hluku (pozadí), odlišných prostředích. Extravilán – volné přírodní prostředí a intravilán – městská zástavba, centrum města, poblíž rušné komunikace. Pro potřebu experimentu byla vybrána lokalita (extravilán) tak, aby bylo možné provést měření hluku nejen u bezpilotních letadel, ale také při průletu pilotovaných letadel. Zvolená lokalita intravilánu se nachází v širším centru Kolína, travnaté plochy poblíž křižovatky silnic Pražská a U Mýta. Jedná se o zastavěné území v blízkosti od čtyřproudové komunikace. Výběr této lokality umožní zahrnutí vlivu městského prostředí na celkově naměřenou hlukovou emisi. Pro měření v extravilánu byla využita západní část letiště Zbraslavice (LKZB), která se nachází v prostředí obklopeném lesy, loukami, obcí a silnicí I. třídy, která je vzdálena

³ Verze Fly More Combo s MTOM 249 g.

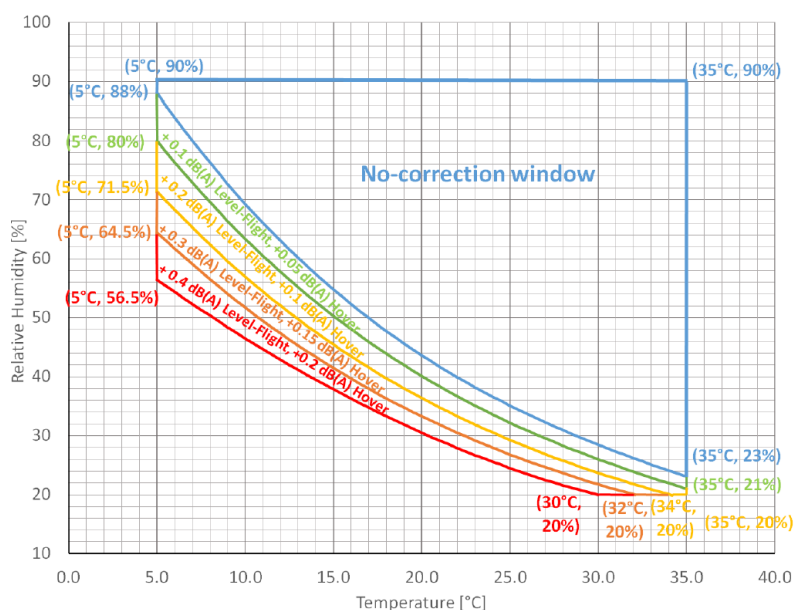
⁴ V době použití byly přístroje a zkušební zařízení v souladu s předpisy pro jejich ověřování a kalibraci.

téměř kilometr od místa měření. Mapové snímky z místa měření a přilehlého okolí jsou zobrazeny na obrázku 5.



Obrázek 5: Oblasti měření (zdroj mapových podkladů: www.google.com)

V rámci měření byly sledovány meteorologické jevy jako vítr a teplota, jak uvádí Noise.UAS.008 [15] (meteorologickou obálku ilustruje Obrázek č. 6). V případě nedodržení podmínek spojených s referenčními atmosférickými podmínkami, případně s dalšími externími vlivy (např. okolní letecký provoz) bylo měření přerušeno, případně opakováno.



Obrázek 6 Meteorologická obálka pro korekci vlivu atmosférické absorpce [15]

Za referenční atmosférické podmínky jsou uvažovány: hodnoty atmosférického tlaku hladiny moře 101325 Pa, teplota okolního vzduchu 25 °C, relativní vlhkost 70 % a nulový vítr. Z pohledu metodiky existuje další set výchozích podmínek, které je nutné dodržet, ale vzhledem k jejich rozsáhlosti zde uvedeny nejsou. V případě nedodržení těchto podmínek měření je vyžadována korekce při přepočtu hlukového projevu.

3.3) Korekce měření

Při realizaci měření je použita metoda digitálního fotografického škálování dle [16]. Tato metoda slouží k přesné korekci dat vztahujících se k reálné výšce přeletu letadla nad mikrofonom a určení odchylky

stroje od ideální osy či bodu měření. Hlavní motivací pro použití škálování je poskytnutí relevantních dat pro jednotnou databázi akustických projevů bezpilotních letadel EASA [19]. Zpřesnění dat je vhodné zejména v případech, kdy se předpokládají odchylky od údajů poskytovaných palubními systémy letadla, z nichž se obvykle vychází při pilotáži. Tato korekce je aplikována výhradně na bezpilotní letadla, která nejsou pro účely studie klasifikována jako „model“ nebo letadlo kategorie GA. Korekce měření se provádí, pokud je na základě digitálního fotografického škálování identifikována odchylka výšky přeletu UA větší než ± 5 m od cílové výšky přeletu v dané měřicí sérii. Tato korekce je zohledněna ve výsledcích interpretovaných v kapitole 4. Korekce znamená vyjmutí měřicí série ze skupiny interpretovaných výsledků. Práh filtru, v němž se korekce provádí, vychází z účelu studie. Na základě výsledků předchozí studie se předpokládá, že odchylka výšky přeletu do ± 5 m má dopad na měřený akustický tlak $A L_{pAeq, T}$ v rozsahu desetin až jednotek decibelů. Tato odchylka je pro zamýšlený účel studie a požadovanou přesnost výsledků zanedbatelná také s přihlédnutím k faktu, že se očekává vyjmutí nižších jednotek měření, která jsou navíc součástí několika hodnot měřených pro stejnou výšku, z nichž je tvořen aritmetický průměr. Například: pro měření v 50 m je naměřeno 6 přeletů UA, z čehož je naměřená hodnota jednoho z měření pod prahem filtru (vyjmuta). Celkový akustický tlak $A L_{pAeq, T}$ je pak spočten jako aritmetický průměr 5 hodnot.

3.4) Limitace

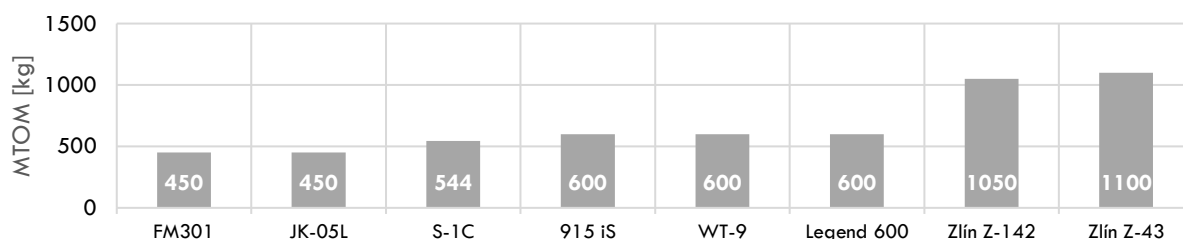
Pro realizaci experimentu identifikujeme následující limitace (vč. jejich příčin a řešení v rámci měření):

- a) Limitace spojené s letadly a měřenými veličinami. Ačkoliv existuje široká škála konstrukcí UA a také RTF (Ready to Fly) modelů letadel, experiment ověřuje primárně stroje konstrukčního typu koptéra. U vybraných UA (letadla RTF, letadla konstrukce typu samokřídlo atp.) nebylo možné realizovat měření ve všech výškách, a to vzhledem k letovým vlastnostem stroje. Velikost statistického vzorku je přímo ovlivněna výdrží letadel – celkovou dostupnou akumulátorovou kapacitou během doby experimentu. Většina letadel nebyla vybavena technologií umožňující zpřesnění konečné výšky přeletu nad mikrofonem, jako je např. RTK (Real Time Kinematic).
- b) Limitace spojené s parametry měření. V případě intravilánu nebyly (z legislativních důvodů) realizovány lety letadel s posádkou na palubě a současně nebyly v intravilánu testovány UA ve výšce nad 40 m AGL (v případě UA se jedná o časovou náročnost zajišťování provozních oprávnění ze strany regulátora a v případě GA letadel standardně povolenou minimální výšku letu nad městy). Vše z důvodu značné složitosti a náročnosti schvalovacího procesu.
- c) Součástí experimentu nebylo měření akustického výkonu $A L_{WA}$.

4) Výsledky

4.1) Měření v extravilánu – letadla GA

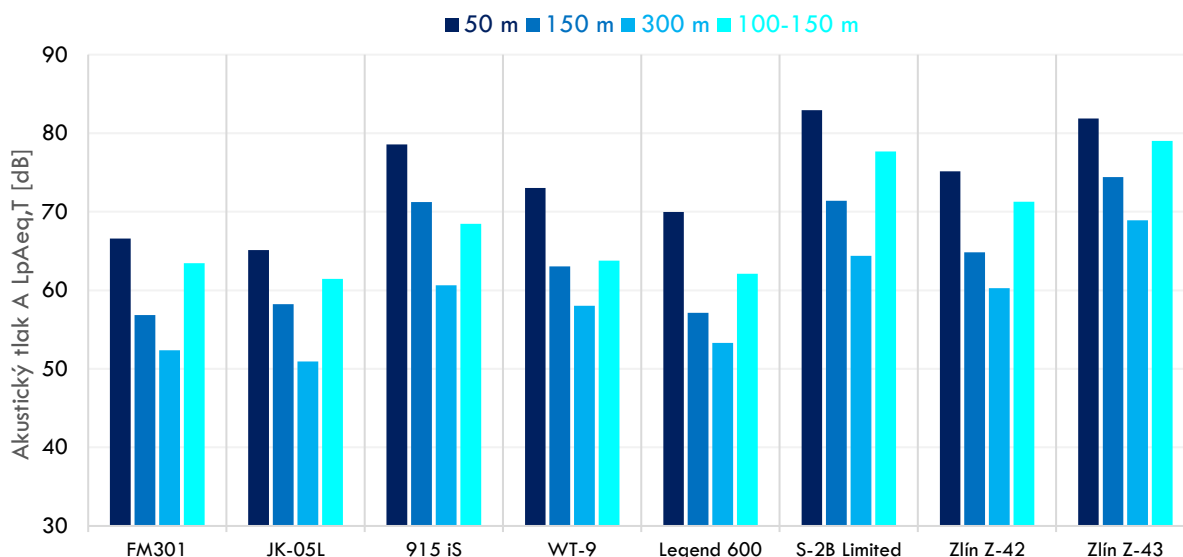
Jelikož se nejedná o podobná letadla co do konstrukce, zejména však maximální vzletové hmotnosti (MTOM), je vhodné poskytnout srovnání výše uvedených letadel právě z hlediska této hmotnosti. Obrázek 7 ukazuje maximální vzletovou hmotnost letadel GA měřených v rámci experimentu, která jsou na horizontální ose řazena od letadel s nejnižší až po ta s nejvyšší vzletovou hmotností. Za nejlehčí letadlo lze považovat FM301 a JK-05L s udávanými 450 kg. Naopak nejtěžším letadlem je Z-43 s 950 kg MTOM.



Obrázek 7: MTOM měřených letadel GA

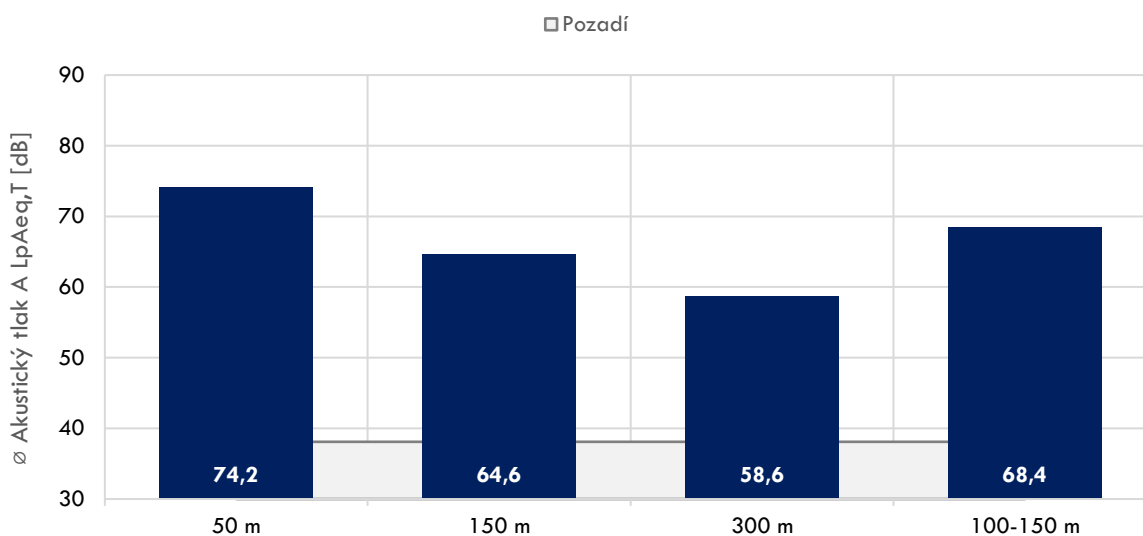
Měření hladiny akustického tlaku $A L_{pAeq, T}$ letadel s posádkou na palubě poskytlo výsledky prezentující hodnotu této veličiny v případě průletů především ve výškách 50, 150 a 300 m AGL⁵. Tyto výsledky jsou zobrazeny na Obrázku 8. Dále byl měřen manévr, ve kterém došlo ke stoupání pod maximálním výkonem ze 100 do 150 m AGL. Průlety byly provedené v prostředí, které je tímto dokumentem souhrnně označováno jako extravilán. Jak zobrazuje Obrázek 8, při letu ve výšce 50 m bylo mezi měřenými letadly nejtišší JK-05L s hodnotou 65,1 dB. Na opačné straně spektra se pro tuto výšku nachází S1C s naměřenou hodnotou 82,9 dB. Ten ovšem nebyl letadlem s největší měřenou energetickou složkou hluku ve výšce 150 m, kde vykázal největší hodnotu Z-43 (74,4 dB). Nejtišší letadlo GA ve výšce 150 m byl FM301 s projevem dosahujícím necelých 56,8 dB. Pro 300 m byla naměřena nejnižší hodnota pro JK-05L (50,9 dB) a naopak nejvyšší hodnota u Z-43 (68,9 dB). Při manévru mezi výškami 100 až 150 m bylo nejtišší letadlo JK-05L (61,5 dB) a nejhluchnější opět Z-43 (79 dB). V rámci realizace měření byla po celou dobu měřena hodnota pozadí 34,8 dB.

⁵ V kapitole dále všechny jednotky výšky uváděny v AGL.



Obrázek 8: Měření akustického tlaku letadel GA (extravilán)

Naměřené hodnoty akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$ letadel s posádkou se pohybují v intervalu 50-85 dB. Průměrnou velikost akustického tlaku měřených letadel GA v dané výšce ilustruje Obrázek 9. Velikost hlukové složky klesá se zvyšující se výškou přeletu. Na základě vyhodnocení dat lze konstatovat, že provozní mód, ve kterém došlo ke stoupání do 150 m pod plným výkonem, téměř koresponduje s hlukovým projevem letadla letícího právě v této výšce. Rozdíl těchto hodnot představují zhruba 4 dB.



Obrázek 9: Průměrný akustický tlak letadel GA

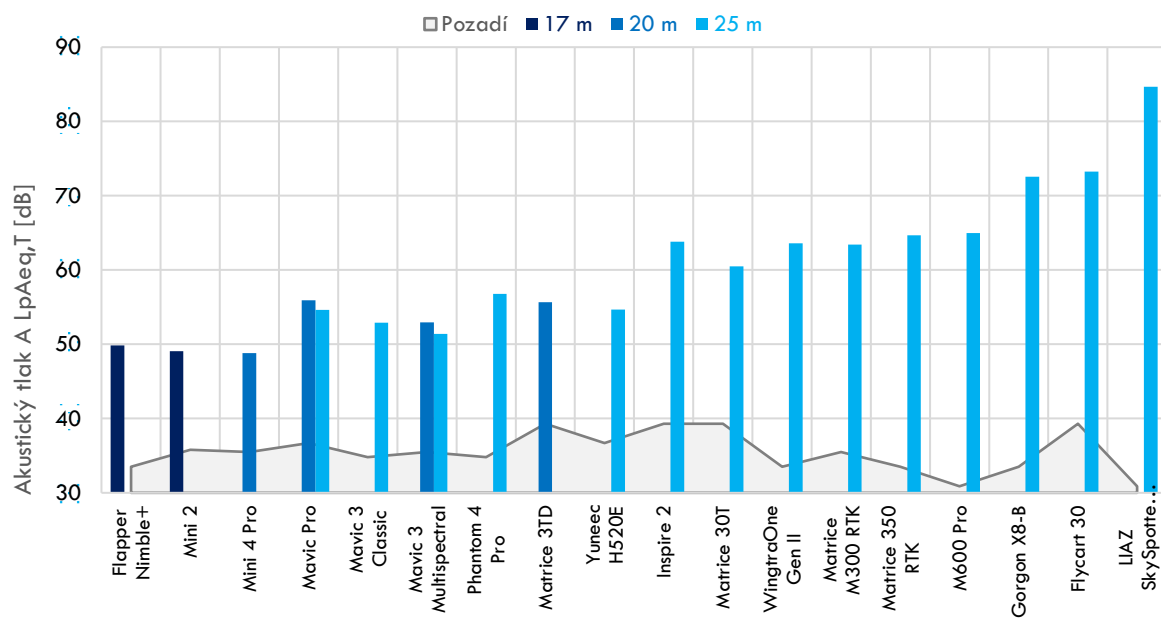
Měření letadel GA umožňovalo z důvodů konstrukce letadel užitých při měření pouze sledování hlukové složky při dopředném letu v různě definovaných výškách. Dále došlo k měření UA, které bylo rozděleno do měření v intravilánu a extravilánu.

4.2) Měření v extravilánu – vis UA

Měření UA v extravilánu bylo koncipováno ve 2 režimech: měření ve visu a měření při přeletu. Měření ve visu se týká letadel jejichž konstrukce tento typ letu dovoluje a zároveň jsou splněny podmínky pro toto měření. Pro přijetí měření musí být letadlo stabilizováno ve stacionárním letu přímo

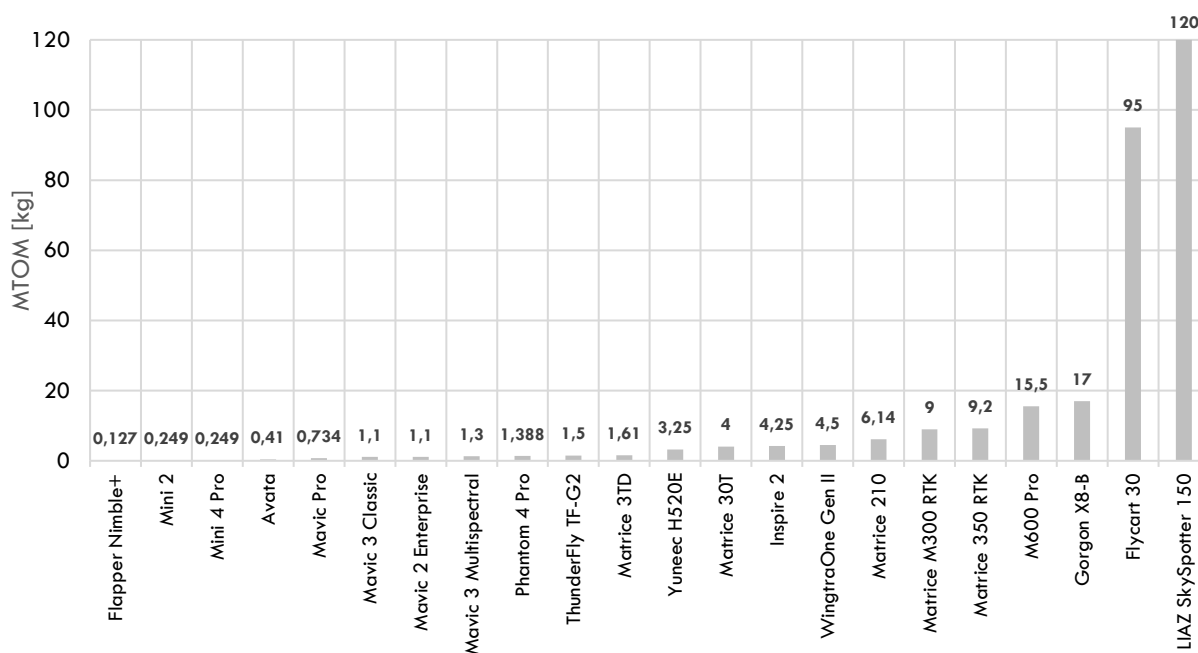
nad referenčním bodem měření hluku v referenční výšce 25 m, kde je uvažována výška mezi zemí a těžištěm UA. Současně s tím je sledována maximální přípustná odchylka od tohoto bodu – 8°, variace výšky maximálně 1 m s délkou měření 30 s (viz Obrázek 2). Tato výška může být snížena až na 15 m (metodika EASA připouští až 12 m) tak, aby současně byla splněna podmínka minimálního rozdílu mezi měřeným akustickým tlakem letadla a zvukovým projevem pozadí o velikosti 15 dB.

Obrázek 10 prezentuje data měření UA v režimu visu. Na horizontální ose jsou tato bezpilotní letadla seřazena na základě hmotnosti (MTOM). Pro celkový kontext měření je vyobrazený graf doplněn o pole zobrazující velikost hlukové složky pozadí, měřené během experimentu.



Obrázek 10: Měření akustického tlaku UA ve visu (extravilán)

Obrázek 10 popisuje výsledky měření u bezpilotních letadel, jejichž projev byl v souladu s metodikou měřitelný, a to ve výškách 17, 20 a 25 m. V tomto výběru lze za nejtichší UA považovat DJI Mavic Mini 4 Pro (48,8 dB ve výšce 20 m), DJI Mavic Mini 2 (49,1 dB ve výšce 17 m) a Flapper Nimble+ (49,9 dB ve výšce 17 m). Ve výšce 20 m bylo dále měřeno letadlo DJI Mavic 3 Multispectral (53 dB), DJI Matrice 3TD (55,6 dB) a DJI Mavic Pro (55,9 dB). Ve výšce 25 m bylo měřeno nejvíce UA v režimu visu. Z této množiny letadel vyšel jako nejtichší DJI Mavic 3 Multispectral (51,4 dB), za nejhlasitější UA lze na základě měření považovat vrtulník LIAZ SkySpotter 150 (84,7 dB). Vzhledem k podílu MTOM na celkovém hlukovém projevu letadel v daném srovnání je na Obrázku 11 zobrazen průběh MTOM měřených bezpilotních letadel.



Obrázek 11: MTOM měřených UA

Před popisem nejtišších UA je nutné poznamenat, že Obrázek 10 neobsahuje datový popis hlukových hodnot všech UA, které byly pro měření uvažovány. Pro větší přehlednost nebyly graficky interpretovány naměřené hodnoty následujících letadel (viz Tabulka 8).

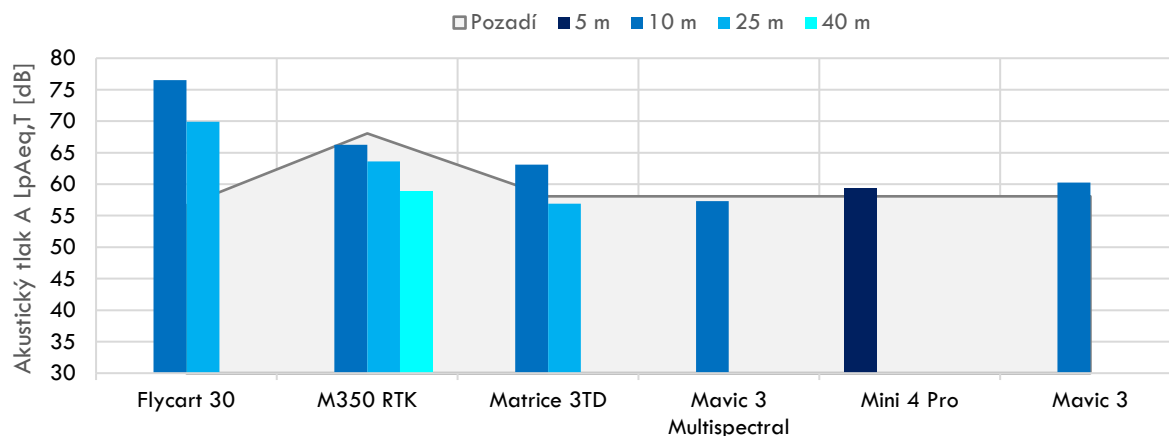
Tabulka 8: Hladina akustického tlaku UA A $L_{pAeq,T}$ [dB] (intravilán)

UA / Výška	15 m	50 m	80 m	120 m	Pozadí (dB)
Flapper Nimble+	53,6	-	-	-	33,5
Mini 4 Pro	51,5	-	-	-	35,5
Avata	-	-	-	-	35,8
Mavic 2 Enterprise	57,4	-	-	-	35,5
Wingtra Gen 2	-	53	-	-	33,5
Matrice 210	-	56,7	55,1	48,9	35,5

Měření ve visu v extravilánu umožňovalo měřit hlukovou složku UA s minimální složkou pozadí. Pro vzájemné srovnání bylo měřeno šest vybraných UA také v intravilánu. Výběr těchto UA zohledňoval technické možnosti experimentu i škálu bezpilotních letadel, která mají rozdílnou MTOM a možnosti využití.

4.3) Měření v intravilánu – vis UA

Měření v intravilánu vykazovalo očekávanou vysokou hodnotu hluku měřeného pozadí, která se pohybovala v intervalu od 56,67 do 68,06 dB. Její hodnota se projevila do počtu měření u jednotlivých letadel. Jak ukazuje Obrázek 12, některé UA byly měřeny ve 3 výškách a u bezpilotních letadel, kde dosahovala hladina akustického tlaku A $L_{pAeq,T}$ stejné či dokonce nižší hodnoty než pozadí, bylo další měření hluku letadel bezpředmětné. Nejvíce měření bylo realizováno ve výšce 10 m, kde vykázal největší hodnoty akustického tlaku UA Flycart 30 (76,52 dB) a naopak nejnižší Mavic 3 Multispectral (57,32 dB), který byl naměřen pod hodnotou okolního hluku (pozadí) o velikosti (58,08 dB).

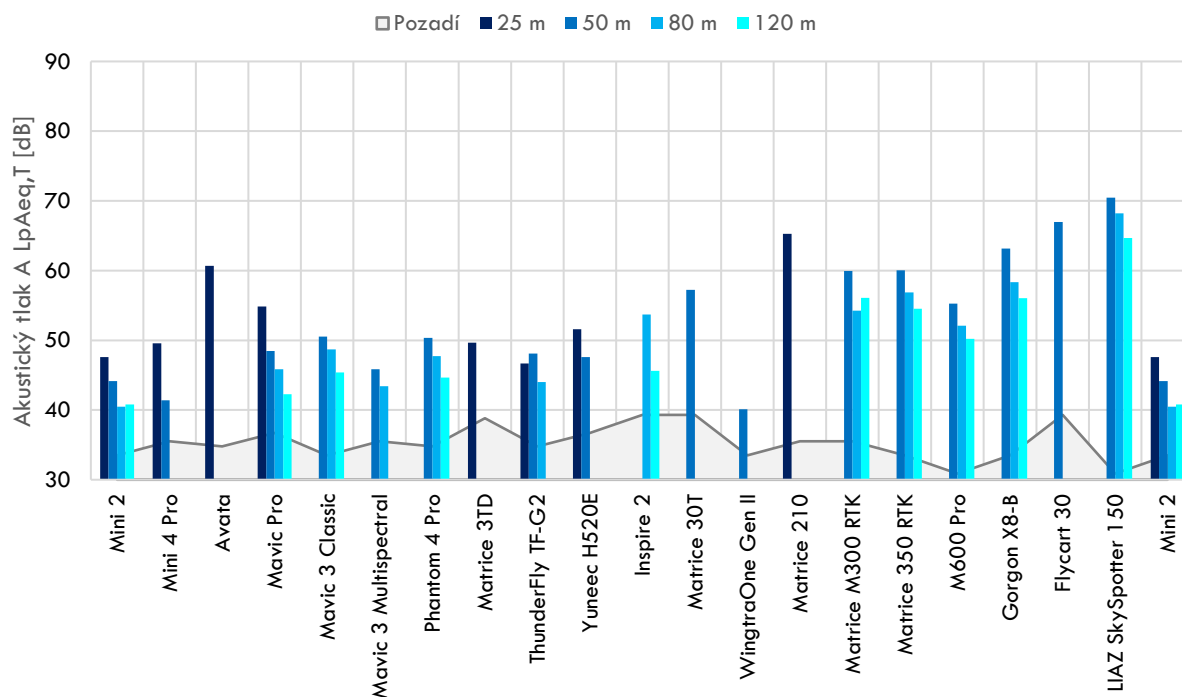


Obrázek 12: Měření akustického tlaku UA ve visu (intravilán)

Měření ve visu bylo pouze jedním ze základních typů záletů realizovaných v rámci měření. Mezi další patřil průlet UA nad měřicím zařízením, který byl realizován pouze v extravilánu (stejně jako měření GA). Pro účely interpretace výsledků záletů v extravilánu rozlišujeme měření UA a modelů jako dvě rozličné typologie letadel řízených na dálku.

4.4) Měření v extravilánu – přelet UA

Měření přeletu se týká všech bezpilotních letadel užitých pro měření, jelikož je tento typ měření považován za stěžejní. Dle metodiky EASA je referenční hodnota výšky pro měření 50 m. Z důvodů minimálního rozdílu hodnoty akustického tlaku prolétávajícího letadla oproti pozadí pak může být tato výška v závislosti na jednotlivých UA měněna – v intervalu od 15 do 300 m. Obrázek 13 ilustruje vybraná měření ve výškách 25, 50, 80 a 120 m.

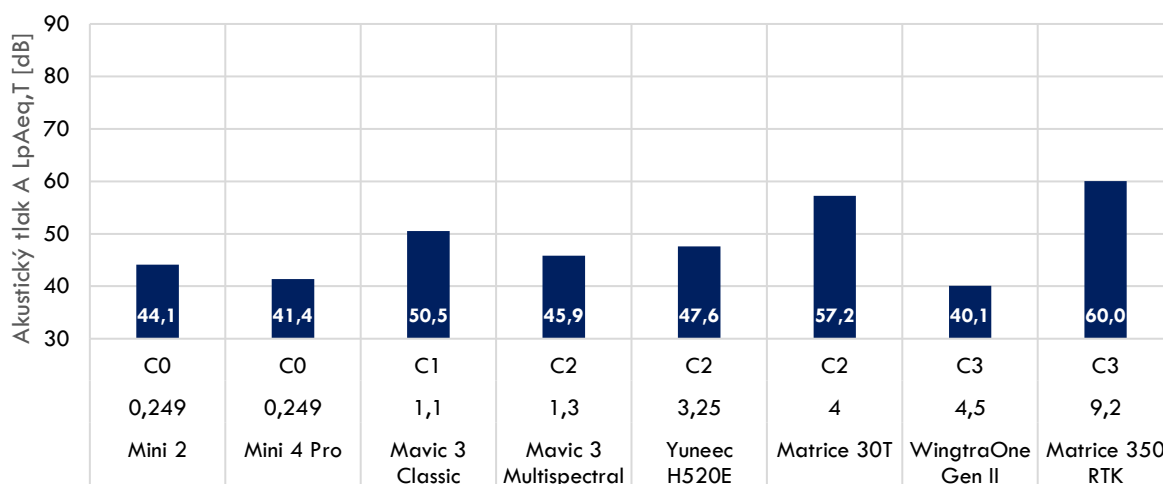


Obrázek 13: Měření akustického tlaku přeletu UA (extravilán)

Obrázek 13 zobrazuje hodnoty akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$ při visu UA ve výškách 25 m, 50 m, 80 m a 120 m. Napříč výsledky lze sledovat, že celkově nejnižším letadlem, nebudeme-li uvažovat Wingtra Gen 2, je DJI Mini 2. Na opačné straně spektra se pak nachází LIAZ SkySpotter 150. Pro výšku 25 m

byl nejnižším UA vírník ThunderFly TF-G2 s naměřenou hodnotou 44 dB. Nejhlasiťjší projev byl v této výšce naměřen u Matrice 210. U každé z jednotlivých výšek lze porovnávat pouze UA, které byly v dané výšce měřeny. Tím nepředpokládáme, že z měřeného vzorku je pro výšku 25 m UA Matrice 210 nejhlasitější. Naopak předpokládáme, že je nejhlasitější mezi měřeným vzorkem pro tuto výšku tak, jak rozlišují jednotlivé barvy sloupců grafu. Ve výšce 50 m byl (po Wingtra Gen 2) nejméně hlasitým UA DJI Mini 4 Pro a nejhlasitější naopak LIAZ SkySpotter 150. Pro výšku 80 m lze za nejnižší UA považovat DJI Mini 2 a nejhlasitější opět LIAZ SkySpotter 150. Tento závěr platí také pro výšku 120 m.

Legislativa definuje třídy bezpilotních letadel – kategorizace, které určují technické, provozní nebo právní vlastnosti UA na základě určitých kritérií. Drony v jednotlivých kategoriích jsou před uvedením na evropský trh označeny štítky třídy. Tyto štítky pomáhají rozdělit UA do tříd podle jejich schopností, hmotnosti, výkonu nebo způsobu použití. V některých případech se vztahují i na legislativní požadavky, jako jsou pravidla pro provoz a bezpečnost. Pokud bychom z měřeného vzorku UA, které byly měřeny při průletu, identifikovali ta letadla, která jsou výrobcem označena štítkem příslušné třídy, poskytlo by nám to srovnání, které ilustruje Obrázek 14. V něm jsou srovnány jednotlivé UA na horizontální ose na základě MTOM a (také) od ní odvozené třídy.



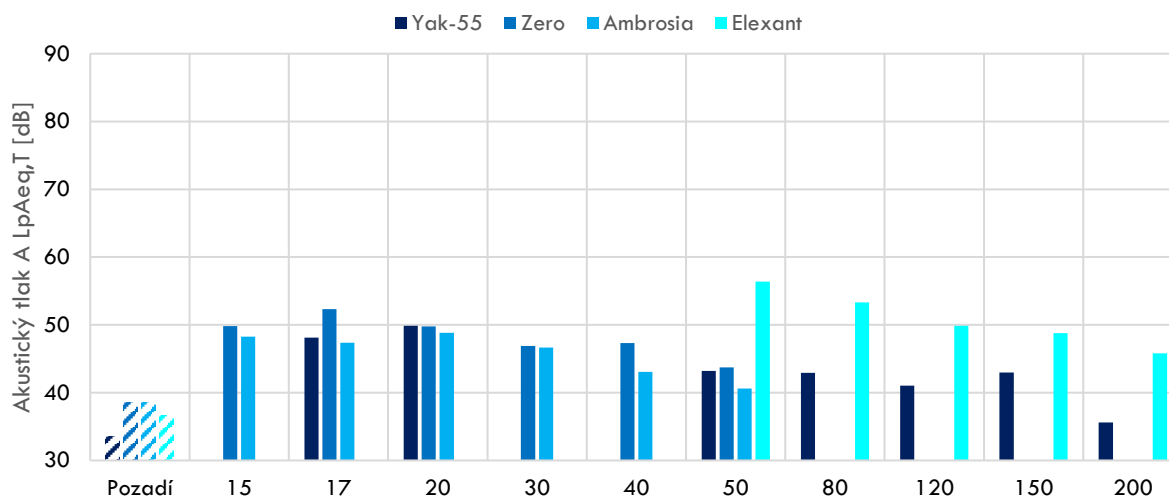
Obrázek 14: Třídy měřených UA

Mezi nejlehčí měřené UA patří Mini 2 a Mini 4 Pro, které spadají do třídy C0. Nejnižší UA spadají do tříd C3 a C0. Ve třídě C3 byl naměřen také nejvyšší akustický tlak $A L_{pAeq,T}$ u sledovaného vzorku, a to u Matrice 350 RTK (60 dB). Analýza UA je vhodná k porovnání také s dalším typem dálkově řízených letadel, který byl předmětem měření v extravilánu – modelů letadel. Všechny naměřené hodnoty splňují limity uvedené na štítkách třídy dronů na evropském trhu, dle přílohy 1 nařízení [10].

4.5) Měření v extravilánu – přelet modelů

V experimentu byly měřeny 4 modely letadel typu letoun. Jejich MTOM se pohybuje od 0,5 do 5 kg. Všechny modely, které se podařilo zajistit k měření, byly konstrukce letoun s elektricky poháněnou pohonnou jednotkou. Zvukový projev letadel za letu byl pro různá letadla měřen v různých výškách,

ve výškách 15, 17, 20, 30, 40, 50, 80, 120, 150 a 200 m. Jednotlivé výsledky jsou chronologicky dle výšek seřazeny do skupin barevně odlišených sloupců.



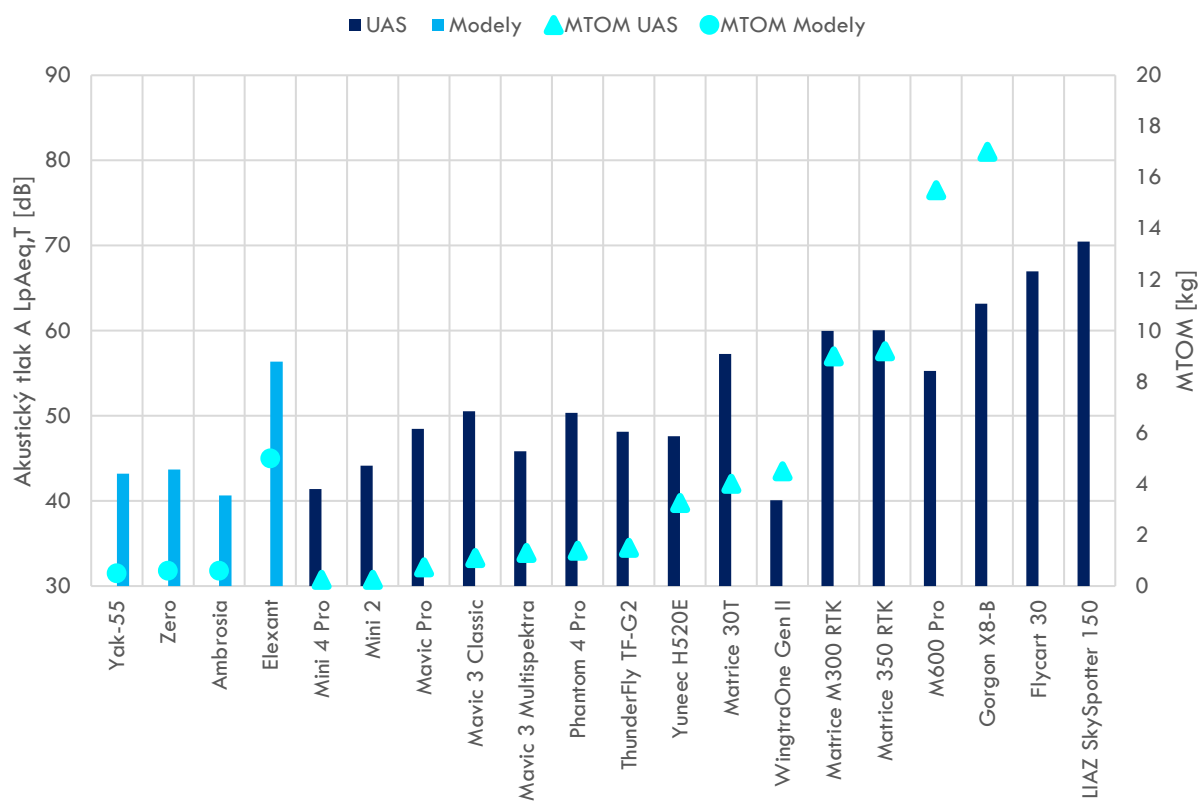
Obrázek 15: Měření akustického tlaku přeletu modelů (extravilán)

Modely s označením Zero (0,6 kg MTOM) a Ambrosia (0,6 kg MTOM) byly měřeny ve výše uvedených výškách od 15 do 50 m. Výsledky vykazují lineárně klesající charakter od 52 do 47 dB ve výškách do 20 m a od 47 po 41 dB ve výškách do 50 m. Ačkoliv je Yak-55 (0,5 kg MTOM) nejlehčím z měřených letadel, vykazuje nejvýše naměřenou hlukovou emisi v 17 m, a to 52,3 dB. Lze však předpokládat, že i ve výškách, ve kterých nebyl další z modelů (Elexant) měřen, by vykázal nejvyšší akustický tlak mezi modely. To podporují nejvyšší akustické tlaky v 50 m a výše v porovnání s ostatními hodnotami naměřenými u modelu Elexant (5 kg MTOM), který produkoval v 50 m hlukovou emisi o velikosti 56,4 dB.

Výše uvedené výsledky popisují vzájemné srovnání jednotlivých letadel v rámci své skupiny (GA, UA, model) a prostředí (intravilán, extravilán) s kontextem MTOM. Pro prolnutí dosavadních výsledků napříč definovanými skupinami a prostředí je vhodné zaměřit se na vzájemné porovnání skupin letadel.

4.6) Srovnání výsledků

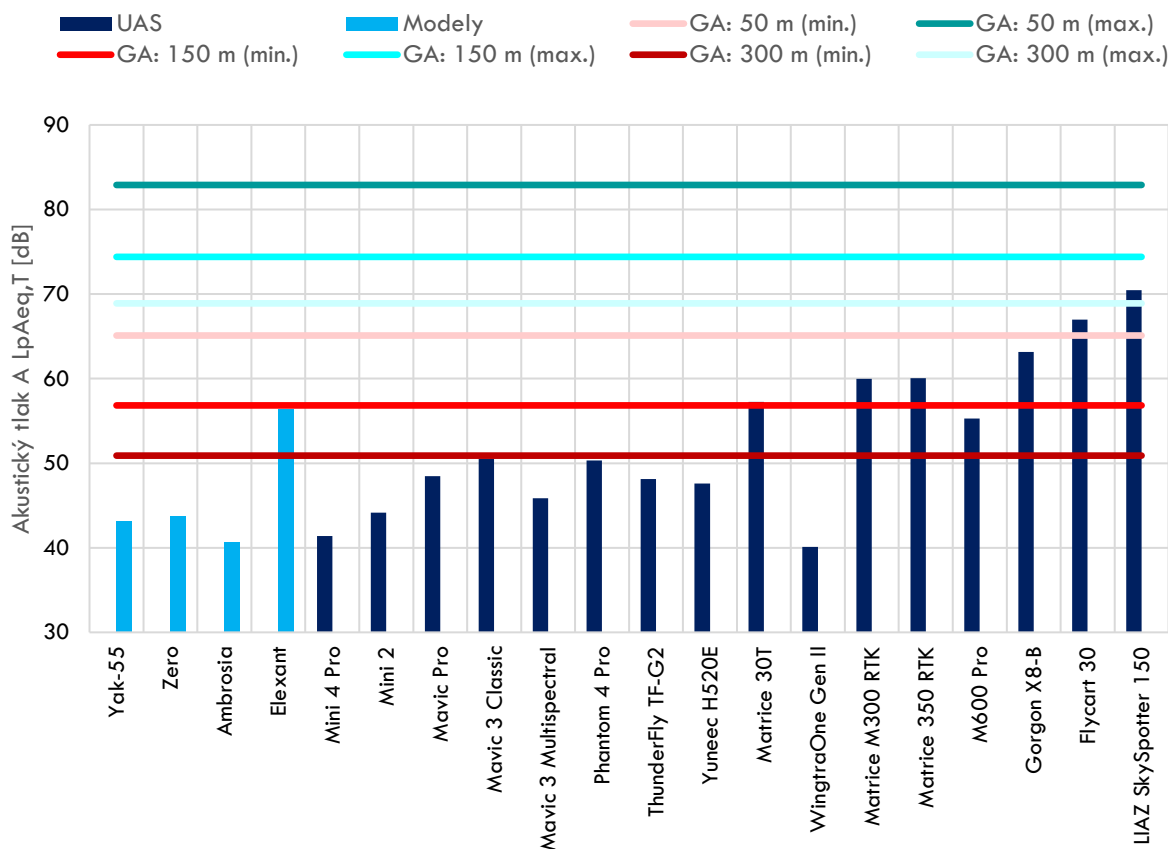
Na Obrázku 16 je graficky interpretováno srovnání modelů letadel a UA s indikací MTOM jednotlivých strojů. Až na výjimky jsou všechny UA typu koptéra a modely jsou všechny typu letoun. Jedná se o měření při průletu nad měřícím zařízením v 50 m AGL. Většina letadel se pohybuje v rozmezí 40 až 50 dB měřeného akustického tlaku $A L_{pAeq,T}$. Nejtíší stroj ze všech měřených dálkově řízených letadel je WingtraOne GEN II s naměřenou hodnotou 40,1 dB. GEN II má rovněž nejlepší poměr hmotnosti a naměřené hlukové emise. Druhý nejtíší stroj je model Ambrosia se 40,63 dB. Nejvyšší akustický tlak o hodnotě 70 dB byl naměřen u UA LIAZ SkySpotter 150.



Obrázek 16: Měření akustického tlaku přeletů UA a modelů (extravilán) v 50 m⁶

Podobné srovnání nabízí srovnání dálkově řízených letadel (UA a modely) s letadly GA. Obrázek 17 nabízí porovnání naměřených hodnot akustického tlaku $L_{pAeq,T}$ dálkově řízených letadel v 50 m (svislá řada dat uspořádaných do sloupců) s minimálními a maximálními naměřenými hodnotami letadel GA ve výškách 50, 150 a 300 m (vodorovná řada dat uspořádaná do přímeček).

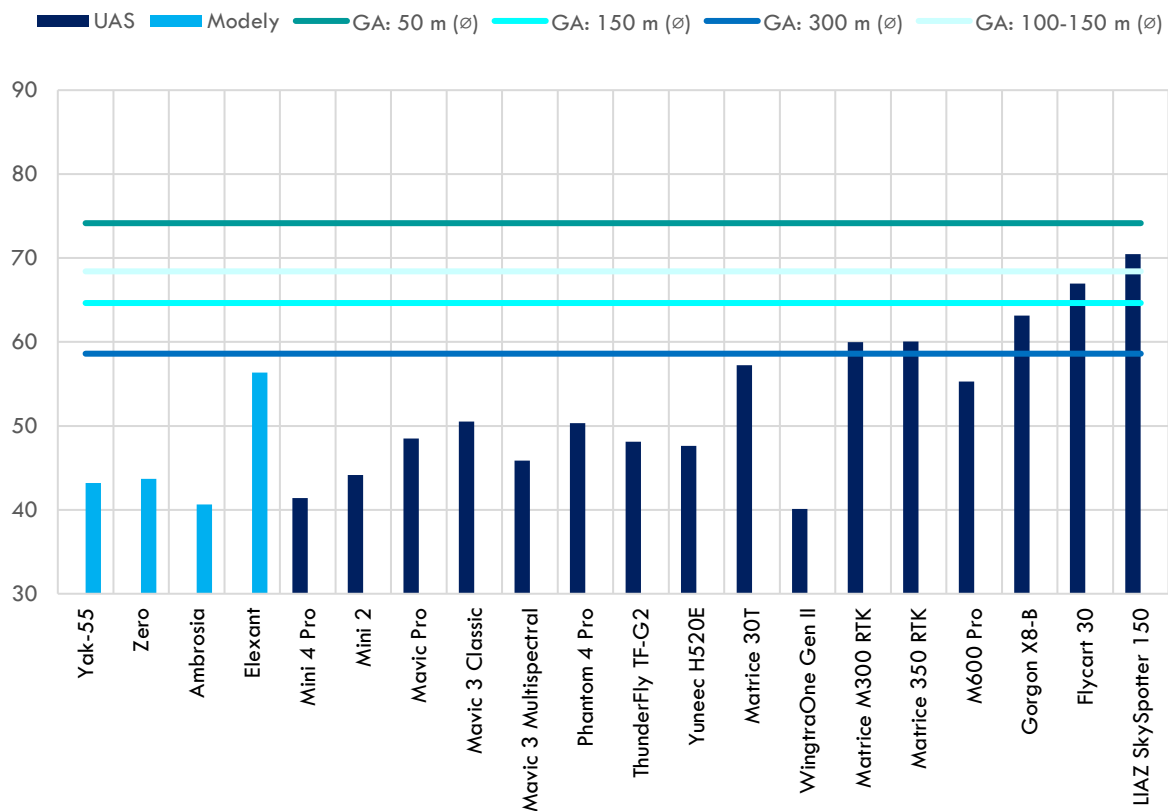
⁶ Pozn.: MTOM u letadla Flycart 30, resp. LIAZ SkySpotter, není vzhledem k měřítku pravé svislé osy grafu vykreslena (95, resp. 120 kg).



Obrázek 17: Akustický tlak UA a modelů měřených v 50 m a GA (extravilán) měřených v 50, 150 a 300 m

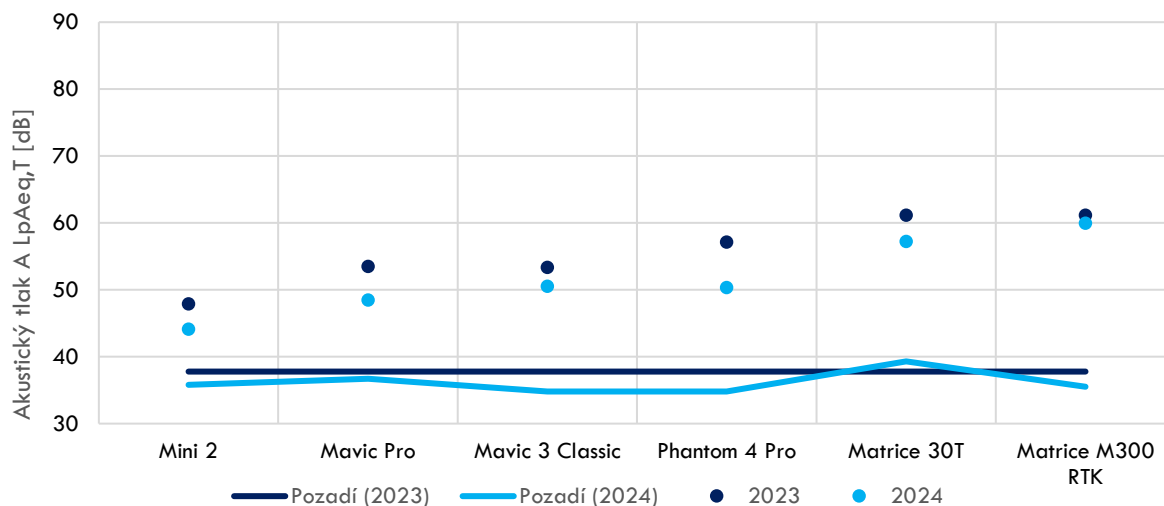
Data ukazují, že nejnižší hluková emise letadel GA, tedy minimum pro 300 m, o velikosti 50,9 dB, byla naměřena pro Z-43. Let tohoto letadla v této výšce přibližně hlukově odpovídá letu DJI Mavic 3 Classic, případně Phantom 4 Pro, v 50 m. Letadlo Elexant, které bylo při měření v 50 m to s největší hlukovou emisí, je po boku DJI M30T stejně hlasité jako Legend 600, tedy letadlo GA s nejnižší hlukovou emisí z měřeného vzorku při přeletech ve 150 m. Pro letadla GA, která jsou nejtíšší v 50 m (JK-05L se 65,1 dB) a nejhlasitější ve 300 m (Z-43, 68,9 dB) platí srovnání s UA s nejvyšší hlukovou emisí – DJI Flycart 30 (67 dB) a LIAZ SkySpotter 150 (70,5 dB) naměřených v 50 m. Stroje GA s nejvyšším naměřeným akustickým tlakem ve 150 m (Z-43, 74,4 dB) a 50 m (S1C, 82,9 dB) disponovaly vyšší akustickou emisí než kterékoliv jiné dálkově řízené letadlo. Mezi nejtíšším dálkově řízeným letadlem a nejtíšším letadlem GA je rozdíl bezmála 10 dB. Naopak, rozdíl mezi nejhlasitějším UA a letadlem GA je necelých 15 dB. Právě u osmi dálkově řízených letadel z dvaceti bylo naměřeno vyššího akustického tlaku nežli u nejtíššího letadla GA vůbec (JK-05L), u kterého je udávána MTOM 400 kg. Většina těchto dálkově řízených letadel je těžších než 3,5 kg, ovšem rozpětí sahá až do 120 kg MTOM.

Podobné srovnání nabízí obrázek 18, který taktéž poskytuje informace o průměrném akustickém tlaku UA a modelů měřených v 50 m. Oproti předchozímu obrázku však tyto hodnoty porovnává nikoliv s minimálními a maximálními hodnotami pro jednotlivé výšky, nýbrž jejich průměry. Pro výšku 50 m je průměrná hodnota akustického tlaku 74,2 dB, pro výšku 150 m 64,6 dB a pro výšku 300 m 58,6 dB. Dále byla měřena také hodnota stoupání ze 100 do 150 m pod plným výkonem pohonné jednotky, u kterého byla naměřena hodnota 68,4 dB.



Obrázek 18: Akustický tlak UA a modelů měřených v 50 m a průměrný akustický tlak GA (extravilán) měřených v 50, 150 a 300 m

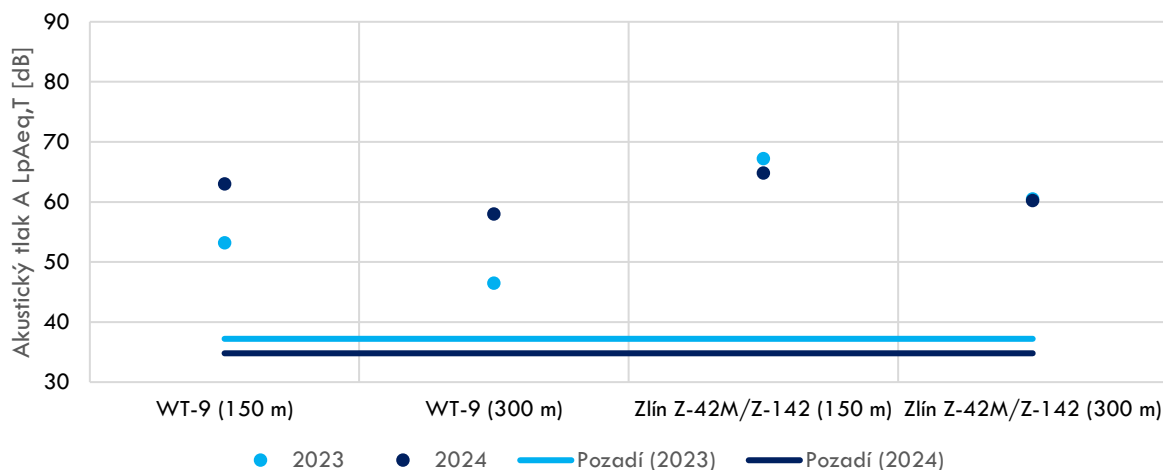
Do srovnání jsou zařazeny také výsledky měření z roku 2023. Při srovnání rozdílů naměřených hodnot (režim visu) $L_{pAeq,T}$ mezi náhodně vybranými, aktuálně používanými a běžně dostupnými UA, můžeme identifikovat rozdíly od 1 až po 7 dB, jak ilustruje Obrázek 19. Grafická prezentace hodnot naměřených s ročním odstupem reflektuje také rozdílnost hluku okolního pozadí, který byl proměnlivý.



Obrázek 19: Meziroční srovnání akustického tlaku UA ve visu (extravilán)

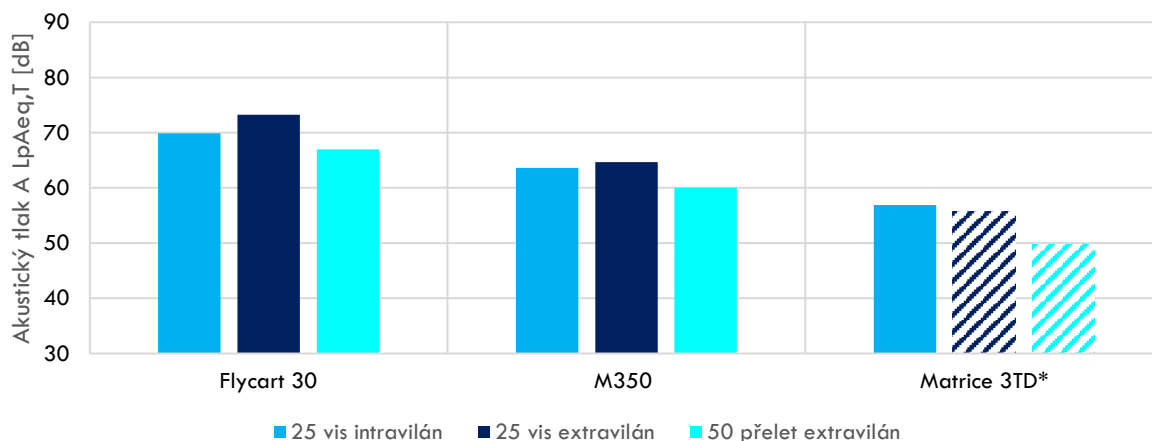
Podobné srovnání lze ukázat také na výsledcích napříč lety 2023 a 2024 u letadel GA, kde dochází k rozdílnosti měření akustického tlaku do velikosti až 12 dB. To na Obrázku 20 demonstruje příklad letadla WT-9 Dynamic GT. Je však nutné zdůraznit, že v minulém měření byl testován přibližně 10 let

starý model s původním motorem Rotax 912 o výkonu kolem 100 koní a maximální vzletovou hmotností (MTOW) 450 kg, zatímco v roce 2024 byl měřen nejnovější model 7. generace s motorem Rotax 915iS o výkonu kolem 150 koní a MTOW 600 kg. Tento výrazný nárůst výkonu a hmotnosti se nepochybně odrazil i na vyšších naměřených hodnotách akustického tlaku. Naopak u letadla Z-42M/Z-142 bylo v meziročním měření odečteno stejných hodnot (60 dB).



Obrázek 20: Meziroční srovnání vybraných letadel GA (extravilán)

Vzhledem k pestrosti prostředí, ve kterém bylo měření uskutečněno, se nabízí také srovnání napříč měřeními letadel v extravilánu a intravilánu, kde se očekává působení okolních vlivů na hluk pozadí, a tedy i vyšší předpokládanou akustickou emisi téhož letadla. Toto srovnání je ilustrováno obrázkem 21.



Obrázek 21: Srovnání měření UA v intravilánu a extravilánu
* Přerušovaná výplň sloupců indikuje hodnotu naměřenou ve 20 m

Z textu výše vyplývá, že výsledky měření ukazují nejen rozmanitost hlukových emisí mezi jednotlivými typy letadel, ale také významný vliv kontextu měření, jako je výška přeletu, prostředí (extravilán/intravilán) a měnící se hlukové pozadí. Tyto faktory zdůrazňují potřebu širšího kontextu pro interpretaci akustických dat, což otevírá prostor pro hlubší diskusi o metodologických přístupech a praktických aplikacích získaných výsledků. Následující kapitola proto hlouběji diskutuje výsledky v širším kontextu jejich využití, včetně zohlednění limitací a možností navrhovaných přístupů k měření hlukových emisí.

5) Diskuze

Letadla GA byla v rámci průletů nad mikrofonem měřena v extravilánu. Ačkoliv se na první pohled může jednat o typově podobná letadla (malá sportovní letadla), jedná se o stroje s odlišnou konstrukcí, pohonnou jednotkou i způsobem, kterým vyvozují vztlak. To se projevilo také na výsledcích, ve kterých při přeletech vykazala různá letadla ve stejné výšce rozdíl v naměřeném akustickém tlaku téměř 20 dB. Mezi hlavní zdroje hlukové emise v letadle lze řadit pohonnou jednotku a její přidružené charakteristiky, ať už se jedná o vrtule pístového motoru, případně jeho objem a způsob, jakým je řešen výfukový systém. Mezi nejtišší letadla s posádkou, která byla zařazena do experimentu, patří 400kilogramové motorové rogallo FM301 Stream a letoun JK-05L Junior. Průměrný nárůst akustického tlaku v extravilánu v porovnání mezi výškami 300 a 150 m představuje u letadel GA rozdíl zhruba 15 %.

Výsledky nabízí srovnání dvou letadel, která byla měřena v roce 2023 i 2024. U vybraných měření, která disponovala v jádru identickou metodikou i měřicí technikou, evidujeme rozdíl až 12 dB. To je značný rozdíl, který může na první pohled vzbudit otázky správnosti nastavené metodiky měření či vybraných zařízení. Vzhledem k prokazatelně správné kalibraci měřícího mikrofonu se předpokládá, že rozdíl v měření hodnot vzniká vlivem několika aspektů měření. Za prvé, meziroční srovnání poskytuje vzhled do měření, u kterých, vzhledem k odlišnosti lokalit jejich realizace nejsou identické podmínky okolí (např. počasí či výška travnatého porostu v okolí). Při měření v roce 2023 navíc nebylo aplikováno metod pro verifikaci či korekci pravé výšky přeletu letadla a mohly tak být interpretovány hodnoty, u nichž byla výška neúmyslně zkreslena. Dále je nutné pamatovat na rozdíly v pohonných jednotkách stejných typů letadel (např. Z-142 vyráběn v různých verzích s různými pohonnými jednotkami od výrobců Avia/Lom Praha či Lycoming). I přes to výsledky poskytují vzhled do velikosti hlukové emise letadel GA různých konstrukcí, která jsou využívána v rámci aeroklubového létání v ČR. Většina těchto letadel ve 150 m vykazuje hlukovou emisi korespondující úrovní mírného (hlasitý hovor) až intenzivnějšího hluku (rušná komunikace).

Při prolnutí dat měřených nejen u výše uvedených letadel s posádkou na palubě, ale také těch bezpilotních, dojde k zajímavému srovnání hlučnosti obou typů letadel. Data ilustrují, že dopředu letící letadla GA, která byla naměřena s nejnižšími hodnotami akustického tlaku ve výšce 150 a 300 m, vyvozují podobnou hlukovou emisi jako zhruba polovina měřeného vzorku UA a modelů, které byly měřeny ve výšce 50 m. Při uvažování letu letadla s posádkou, u kterého byla naměřena nejnižší hodnota akustického tlaku při letu ve výšce 300 m AGL platí, že akustický výkon právě 12 z 20 UA a modelů zůstává na nižší úrovni i při měření v 50 m. Z vybraných UA je tedy dvanáct výrazně tišších, a to již v malých výškách, srovnatelných s výškami okolních překážek (porost, budovy). Tyto výsledky naznačují, že při určitém zohlednění výšky letu může být akustický dopad letadel GA srovnatelný s UA, což by mohlo mít pozitivní vliv na regulace provozu v oblastech citlivých na hluk, kdy by bylo možné nalézt řešení, které bude zároveň podporující rozvoj využití UAS. Zároveň je nutné podotknout, že tišší polovina měřených UA spadá do kategorie uživatelských UA, které jsou hojně (řádově čteněji, než zhruba čtvrtina nejhlučnějších UA v testu) využívány širokou veřejností. I při letu v nižší výšce než GA, s rozdílem 100 až 250 m, dokážou tyto UA výrazně snížit hlukovou emisi. Na druhou stranu je hlubší zvuk pístových motorů lidskému uchu obecně příjemnější než vysokofrekvenční hluk vrtule UA, protože lidský sluch je evolučně přizpůsoben tak, aby lépe snášel nižší frekvence. Zvuky v nízkofrekvenčním pásmu, typicky mezi 20 Hz a 250 Hz, se často vyskytují v přírodě, například ve větru nebo ve zvuku vzdáleného hromu, a proto jsou lidským uchem vnímány jako méně rušivé. Naopak vysokofrekvenční zvuky, jako je bzučení vrtulí UA (v pásmu od 500 Hz do několika kHz), jsou ostré, pronikavé a mohou připomínat poplachové signály nebo hmyz, což může u některých lidí vyvolávat nepříjemné pocity či stres. Navíc pístové motory mají více harmonických složek, které vytvářejí bohatší a vyváženější zvukové spektrum, zatímco vrtule UA produkují zvuk s výraznými špičkami ve vysokých frekvencích, jež jsou často monotónní a pro lidské ucho obtížně ignorovatelné. Tento kontrast ve vnímání zvuku má

praktické dopady například na plánování letových tras nebo konstrukci UA, které by měly zohledňovat akustický komfort. V úvodu dokumentu jsou také představeny výsledky studie amerického ministerstva dopravy, které doplňují hodnoty u letadel GA naměřených tímto experimentem. Ukazují, že letadla do 5 700 kg MTOM, mohou vykazovat vyšší hodnoty (nad 70 dB) hluku ve 300 m AGL, především pokud se v kontextu udávané MTOM zaměříme také na vrtulníky, které se dle naměřených hodnot v citovaném dokumentu při přepočtu akustického tlaku na MTOM jeví jako hlučnější.

Mezi UA a modely byly nejnižší ty s konstrukcí typu letoun či samokřídlo. Dále byly nejnižší UA s nejnižší MTOM. Měření v 50 m poukázaly na relativně nízké hodnoty akustické emise pohybující se okolo 40 dB. To je úroveň hluku, která koresponduje s velmi mírným hlukem (obytné místnosti) a jen mírně nad změřenou úrovní hluku okolního prostředí v extravilánu (max. 39 dB). Na druhé straně bylo díky měření vysoce pokročilých UA konstrukce vrtulník, s označením LIAZ SkySpotter 150, dokázáno, že těžké bezpilotní letadlo dokáže být svými charakteristikami akustického tlaku srovnatelné i s těžšími letadly GA, což je však dáno především odlišností konstrukce (v měření nebyly zahrnuty vrtulníky s pilotem na palubě nebo proudové letouny GA, jejichž četnost ve vzdušném prostoru je stále větší, než nejhlučnější měřené UA značky LIAZ). To poukazuje na pokročilost technologií aplikovaných u moderních UA, které mohou díky inovacím v designu pohonných jednotek a aerodynamice překlenout tradiční limity spojené s hlučností. Současně se ukazuje, že konstrukční typ hraje klíčovou roli ve výsledné akustické emisi, což otevírá prostor pro optimalizaci návrhu nejen s ohledem na výkon, ale i na akustický dopad. Tato zjištění mohou být zásadní například při regulaci provozu UA v hustě obydlených oblastech nebo při plánování jejich využití v citlivých prostředích, jako jsou přírodní rezervace či noční provoz ve městech, kde by bylo možné limitovat provoz UA právě na úrovni emitovaného akustického tlaku. Dále bylo realizováno několik měření v městském prostředí (intravilánu), které poskytuje alespoň základní výsledky pro přehled a srovnání rozdílů mezi projevem daného letadla v rušnějším prostředí. Měření u modelů letadel (typu letoun s elektrickým pohonem) poukázalo na závislost výsledného akustického tlaku a MTOM letadla. Půlkilogramové modely vykázaly uspokojujivé výsledky okolo hranice 45 dB srovnatelné s nejnižšími, byť někdy o něco lehčími UA (DJI řady Mavic). Model o MTOM 5 kg je naopak o více než 10 dB hlasitější a dosahuje obdobné akustické emise jako průmyslové UA (DJI řady Matrice).

V rámci této zprávy byly stanoveny tři hypotézy, které zkoumají vztah akustické emise letadel s legislativním rámcem, ale také například předchozí verzí této zprávy z roku 2023.



- I. Všechna UA měřená v experimentu dokážou generovat menší akustickou emisi při letech ve výšce 50 m, než letadla s posádkou na palubě (měřená v experimentu), letící v nejnižší minimální výšce letu dle použitelného předpisu (150 m).

Pro posouzení hypotézy je uvažováno porovnání hodnot UA ve výšce 50 m a GA ve 150 a 300 m. U GA je navíc rozlišeno, zda se jedná o průměr hodnot (všechna naměřená GA v dané výšce), případně hodnoty nejnižšího či nejhlasitějšího v dané výšce. Při porovnání hodnot UA a průměrné hodnoty GA ve 150 m je evidentní, že vyšší hodnotu akustického tlaku vykázaly pouze Flycart 30 a SkySpotter 150. Při porovnání UA s nejnižším naměřeným GA ve 150 m (FM301) bylo hlučnějších 5 UA. Naopak u nejhlasitějšího naměřeného zástupce GA ve 150 m (Z-43) nebyla naměřena hodnota u UA, která by tuto hranici překonala. Vzhledem k šířce palety UA letadel v experimentu, obsahující také atypické průmyslové UA Flycart 30 a SkySpotter 150, je nutné konstatovat, že jsou právě tyto 2 UA hlasitější, nežli letadlo GA ve výšce 150 m. Z pohledu průměrovaných naměřených hodnot GA lze tuto hypotézu zamítnout (o 0,1 dB). To platí také z pohledu nejnižší naměřené hodnoty GA. Pokud bychom do této hypotézy uvažovali nejhlasitější hodnotu GA v této výšce, lze tuto hypotézu potvrdit.

Zajímavé je také srovnání nejhlasitějšího UA ve 120 m, kde je pro SkySpotter 150 naměřená hodnota 64,7 dB a pro průměr akustického tlaku GA ve výšce 150 m hodnota 64,6 dB. Nejtišší letadlo GA vykázalo v této výšce akustický tlak o hodnotě 56,8 dB a nejhlasitější 74,4 dB.



- II. S rostoucí třídou UA (dle nař. (EU) 2019/947) vždy roste velikost akustického tlaku při letu za stejných podmínek.

Na základě naměřených dat lze sledovat, že rostoucí třída (a tedy MTOM) není přímo úměrná rostoucímu akustickému tlaku $L_{pAeq,T}$, který byl předmětem měření. To lze sledovat u několika vybraných párů UA, které disponují štítkem. Např.: DJI Mavic 3 Classic (C1) a DJI Mavic 3 Multispectral (C2), nebo DJI Matrice 30T (C2) a WingtraOne Gen II (C3). Hypotézu lze zamítnout.



- III. UA s nejvyšším akustickým tlakem v 50 m nebude hlučnější, než letadlo GA, které mělo nejvyšší akustický tlak naměřený ve 150 m.

Obrázek 17 poskytuje přehled srovnání naměřených hodnot ve srovnání GA a UA, vč. modelů dálkově řízených letadel. UA LIAZ SkySpotter 150, konstrukce vrtulník, vykázal hodnotu 70,5 dB. Oproti tomu bylo u Z-43 naměřeno ve 150 m 74,4 dB, tedy nejvíce v rámci letadel GA v této výšce. Na základě toho lze tuto hypotézu potvrdit.

6) Závěr

Provedená zpráva představila zhodnocení výsledků měření hluku z provozu UA, dálkově řízených modelů letadel a některých letadel GA (všeobecného letectví). Měření záměrně zahrnovalo jak běžné, uživatelsky dostupné UA, tak technické UA pro využití např. v průmyslových či armádních aplikacích, které jsou prakticky nejhlasitější vyráběné bezpilotní stroje této kategorie. Zastoupení pilotovaných letadel představuje mix letadel GA, která disponují 1-4 místy k sezení (s většinou z kategorie SLZ) a nedisponují proudovým motorem ani nezahrnují koncepci vrtulník, což jsou oproti výběru UA zmírňující okolnosti. Vybraná letadla použitá při měření disponovala rozličnými konstrukcemi a rozdílným způsobem, kterým vyvozují vztlak na nosných plochách. Tato zpráva vzájemně porovnávala letadla a jejich vyvozovaný hluk a na základě testování hypotéz vyvozuje příslušné závěry ve vztahu k celkovému hluku, který je touto dopravou emitován směrem k zemi. Navzdory inherentním omezením spojeným s dostupností letové aktivity a místními specifiky měření (měření na neřízeném letišti) byl získán platný vzorek akustického tlaku a výkonu. Měření byla provedena na bezpilotních letadlech, která jsou, až na výjimky v podobě Flycart 30 a SkySpotter 150 (nejhlasitější UA), v současnosti na trhu a běžně používaná širokou veřejností. Tato měření byla porovnána v kontextu akustického tlaku generovaného letouny s posádkou na palubě. Analýza také zohlednila různé typologie letadel a umístění měřicího zařízení. Naměřená data byla graficky prezentována a diskutována pro ověření platnosti nastavených hypotéz.

Výsledky měření akustických emisí letadel GA, UA a modelů nabízejí komplexní pohled na hlukovou zátěž generovanou různými typy letadel. Získaná data odhalují klíčové faktory, které ovlivňují hlučnost, jako je konstrukce, pohonná jednotka či provozní výška letu, a zároveň potvrzují význam metodiky a podmínek měření při interpretaci naměřených hodnot. Při pohledu na výsledky je nutné rozlišovat mezi typologií UA i GA, kdy jsou generalizovaně porovnáвана nejtišší letadla GA (6 z 8 spadá do kategorie SLZ – sportovní létající zařízení, např. rogallo) s nejhlasitějšími UA (např. SkySpotter 150), schopnými plnit náročné provozní scénáře. V tomto ohledu mohou některá zjištění o srovnatelnosti hlučnosti některých UA a modelů s letadly GA naznačovat potenciál pro technologické inovace a optimalizaci s ohledem na hlukovou regulaci v citlivých oblastech. Tato analýza tak poskytuje užitečný rámec pro další výzkum, ať již v oblasti legislativního zakotvení provozu UA, nebo při hledání cest, jak minimalizovat akustický dopad leteckého provozu.

Došlo k naměření vzorku akustického tlaku a výkonu, který byl vyvozován bezpilotními letadly aktuálně dostupnými na trhu, z velké většiny využívanými širokou, ale také odbornou veřejností. Ten byl navíc porovnan s kontextem akustického tlaku vyvozovaného letadly s posádkou na palubě. Při měření byly rozlišovány typologie letadel a také umístění měřicího zařízení. Výsledky ukázaly, že většina (15 z 20) měřených UA a modelů letadel je při letu ve výšce 50 m tišších, než veškerý měřený provoz letadel s posádkou na palubě v nejvyšší (hlukově nejpříznivější) výšce 300 m. Nejtišší UA a modely letadel korespondují s hranicí hluku okolo 40 až 45 dB, která je v kontextu rozsahu lidského sluchu poměrně dobře snesitelná a hlukově koresponduje s běžným rozhovorem v místnosti. Zpráva poskytuje vhléd do výsledků, které jsou odlišné jak pro extravilán, tak intravilán. Všechny hodnoty vycházely z pravidla rozdílu měřené hodnoty od pozadí okolního prostředí, a to o velikosti 15 dB. Všechna měření byla provedena v souladu s metodickými pravidly definovanými ve výše citovaných metodikách, zejména pak dodržení minimálního rozdílu měřené hodnoty akustického tlaku o 15 a více decibelů od pozadí okolního prostředí.

Hlavní přínos zprávy spočívá v popisu míry akustické emise vyvozované bezpilotními letadly na základě výšky i hmotnosti, včetně jejich komparace ve vztahu k pilotovaným letadlům. To může pomoci při správném nastavení provozních pravidel pro UA či modelů dálkově řízených letadel v oblastech, kde je nutné zvažovat případnou hlukovou zátěž a kde dnes UA mohou být neadekvátně limitovány,

příčemž stanovením určité minimální výšky přeletu by nedošlo k větší hlukové zátěži, než kterou tam dnes emitují běžná letadla s posádkou na palubě.

Pro další výzkum a možnost komplexního hodnocení problematiky by bylo vhodné zkoumat vnímání dané hodnoty akustického tlaku v závislosti na emitovaném frekvenčním spektru, a to ze strany osob i zvířat. Ačkoliv je úvodní část dokumentu zaměřena i na kontext strojů takové konstrukce, rozšíření studie by do budoucna mělo zahrnout i detailnější pohled na vrtulníky s posádkou na palubě (např. R22 a EC135 jako zástupce strojů, které se dnes používají pro různé činnosti, kde letoun není vhodný) a srovnat je s UA, které mohou mnoho činností vykonat s nižší hlukovou zátěží, a proto by mohly být nasazeny i v oblastech, kde by provoz vrtulníku nebyl přijatelný.

Je nezbytné uznat omezení této zprávy. Dostupnost údajů o letové aktivitě a specifické podmínky měření představovaly určité problémy. Metodika byla nastavena na základě podmínek stanovených EASA, která může ve vybraných aspektech odrážet jiné údaje, než byly sledovány touto zprávou. To může mít za příčinu nižší míru naměřených dat (letadel ve více výškových úrovních), avšak s vyšší přesností (využití digitálního fotografického škálování). Naměřený vzorek akustického tlaku i přes to poskytuje cenné poznatky o emisích hluku letadel GA a UA v reálných scénářích a po boku zprávy z roku 2023 doplňuje rozsah naměřených dat pro komplexnější statistiku, se kterou lze dále pracovat. Tato zjištění přispívají k pochopení akustického dopadu provozu UA. Budoucí výzkum v této oblasti by se i přesto měl zaměřit na další rozšiřování velikosti vzorku a zahrnovat širší škálu typů UA a provozních scénářů. Kromě toho by vyšetřování vnímání a obtěžování hluku UA širokou veřejností poskytlo komplexnější pochopení celkového dopadu. Podobné zprávy do budoucna jistě mohou akcelarovat vývoj účinných předpisů pro řešení akustických výzev spojených s rostoucím používáním UA tak, aby došlo k uvolnění potenciálu přidané hodnoty plynoucí z provozu UA a zároveň došlo k eliminaci negativních vlivů spojených s hlukovou emisí.

Závěrem lze říci, že tato zpráva přispívá k rostoucímu množství znalostí o emisích hluku UA a jejich srovnání s pilotovanými letadly. Výsledky zdůrazňují potenciál UA zmírňovat hladiny hluku ve vyšších výškách nad zemí, což indikuje předpoklady pro provoz šetrný k životnímu prostředí. Pochopením a řešením akustických aspektů provozu UA můžeme podporovat udržitelnou integraci UA do našeho vzdušného prostoru a zároveň minimalizovat jejich dopad na společnost a životní prostředí.

Reference

- [1] POTUŽNÍKOVÁ, Dana. Posouzení vlivu hluku na veřejné zdraví. 2009 [online]. nedatováno. Dostupné z: http://www.nerwy.cz/www/eia_rwy_09/p_20_vlivy_na_verejne_zdravi/hluk/pvz+rwy_hluk_final_v3.pdf
- [2] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [3] BRÜEL & KJÆR. Prezentační leták výrobce zařízení. In: . B.m.
- [4] HAVRÁNEK, Jiří. *Hluk a zdraví*. 1. nedatováno. ISBN 80-201-0020-2.
- [5] PARLAMENT ČESKÉ REPUBLIKY. *Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-258>
- [6] VLÁDA ČESKÉ REPUBLIKY. *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-272>
- [7] ANSI. *Standardization Roadmap for Unmanned Aircraft Systems, Versio* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.ansi.org/standards-coordination/collaboratives-activities/unmanned-aircraft-systems-collaborative>
- [8] SCHÄFFER, Beat, Reto PIEREN, Kurt HEUTSCHI, Jean Marc WUNDERLI a Stefan BECKER. Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans—A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, **18**(11), 5940. ISSN 1660-4601. Dostupné z: [doi:10.3390/ijerph18115940](https://doi.org/10.3390/ijerph18115940)
- [9] EVROPSKÝ PARLAMENT a RADA EVROPSKÉ UNIE. *Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 ze dne 4. července 2018 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví, kterým se mění nařízení (ES) č. 2111/2005, (ES) č. 1008/2008, (EU) č. 996/2010, (EU) č. 376/2014 a směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/30/EU a 2014/53/EU a kterým se zrušuje nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 552/2004 a (ES) č. 216/2008 a nařízení Rady (EHS) č. 3922/91 (Text s významem pro EHP)* [online]. 2018 [vid. 2021-08-13]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02014R0376-20180911>
- [10] EVROPSKÁ KOMISE. *Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945 ze dne 12. března 2019, o bezpilotních systémech a o provozatelích bezpilotních systémů ze třetích zemí* [online]. 2019 [vid. 2021-08-13]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0945-20200809>
- [11] EVROPSKÁ KOMISE. *Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel (Text s významem pro EHP)* [online]. 2019 [vid. 2021-08-13]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0947-20220404>
- [12] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACE. *ČSN EN ISO 3744 Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou*. 2010
- [13] *Recommended method for computing noise contours around airports*. Second edition. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2018. ISBN 978-92-9258-360-6.
- [14] LAU, Michael C. *Aircraft source noise measurement studies: summary of measurement, data and analysis*. Washington D.C., Springfield, Va.: Research and Development Service, U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration; Available through the National Technical Information Service, 2010. ISBN 978-1-4944-9597-8.

- [15] EASA. *Guidelines on Noise Measurement of Unmanned Aircraft Systems Lighter than 600 kg Operating in the Specific Category (Low and Medium Risk)*. 2023
- [16] SAE INTERNATIONAL. *AIR902A - Determination of Distance from Ground Observer to Aircraft for Acoustic Tests*. 2022
- [17] DRONEANALYST. *2021 Drone Market Sector Report*. 2021
- [18] FRENCH, Sally. DJI market share: here's exactly how rapidly it has grown in just a few years. *The Drone Girl* [online]. 18. září 2018 [vid. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.thedronegirl.com/2018/09/18/dji-market-share/>
- [19] EASA. *Guidelines on Noise Measurement of Unmanned Aircraft Systems Lighter than 600 kg Operating in the Specific Category (Low and Medium Risk) | EASA* [online]. 11. září 2023 [vid. 2025-01-09]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/guidelines-noise-measurement-unmanned-aircraft>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ilustrace principu měření	11
Obrázek 2: A) Pomyslná geometrie pro akustický test, B) Základní geometrie fotografického škálování, obojí vycházející z [16], C) Zobrazení přijatelných hranic letu při měření průletu, D) Zobrazení přijatelných hranic letu při měření ve visu [19] (vše graficky upraveno)	12
Obrázek 3: Podíl světového trhu dílčích výrobců UAS [17]	13
Obrázek 4: Podíl prodeje individuálních modelových řad výrobce DJI [18]	14
Obrázek 5: Oblasti měření (zdroj mapových podkladů: www.google.com)	17
Obrázek 6: Meteorologická obálka pro korekci vlivu atmosférické absorpce [15].....	17
Obrázek 7: MTOM měřených letadel GA.....	19
Obrázek 8: Měření akustického tlaku letadel GA (extravilán).....	20
Obrázek 9: Průměrný akustický tlak letadel GA.....	20
Obrázek 10: Měření akustického tlaku UA ve visu (extravilán)	21
Obrázek 11: MTOM měřených UA.....	22
Obrázek 12: Měření akustického tlaku UA ve visu (intravilán)	23
Obrázek 13: Měření akustického tlaku přeletu UA (extravilán)	23
Obrázek 14: Třídy měřených UA	24
Obrázek 15: Měření akustického tlaku přeletu modelů (extravilán).....	25
Obrázek 16: Měření akustického tlaku přeletů UA a modelů (extravilán) v 50 m.....	26
Obrázek 17: Akustický tlak UA a modelů měřených v 50 m a GA (extravilán) měřených v 50, 150 a 300 m	27
Obrázek 18: Akustický tlak UA a modelů měřených v 50 m a průměrný akustický tlak GA (extravilán) měřených v 50, 150 a 300 m.....	28
Obrázek 19: Meziroční srovnání akustického tlaku UA ve visu (extravilán)	28
Obrázek 20: Meziroční srovnání vybraných letadel GA (extravilán)	29
Obrázek 21: Srovnání měření UA v intravilánu a extravilánu * Přerušovaná výplň sloupců indikuje hodnotu naměřenou ve 20 m.....	29

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých hladin hluku [2, 3].....	7
Tabulka 2: Hygienické limity hluku pro exteriér.....	8
Tabulka 3: Hodnoty hluku GA [14]	9

Tabulka 4: Letadlový park měření (UA), elektropohon	15
Tabulka 5: Letadlový park měření (dálkově řízené modely, elektropohon).....	15
Tabulka 6: Letadlový park měření (GA letadla, spalovací pístový motor).....	16
Tabulka 7: Měřicí aparát.....	16
Tabulka 8: Hladina akustického tlaku UA A LpAeq,T [dB] (intravilán)	22

Přílohy

Příloha 1: Extrahovaná naměřená data

Hladina akustického tlaku A LpAeq,T [dB] – vis, extravilán										
Letadlo	MTOM	Pozadí	15 m	17 m	20 m	25 m	40 m	50 m	80 m	120 m
Flapper Nimble+	0,127	33,5	53,6	49,9	-	-	-	-	-	-
Mini 2	0,249	35,8	-	49,1	-	-	-	-	-	-
Mini 4 Pro	0,249	35,5	51,5	-	48,8	-	-	-	-	-
Avata	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mavic Pro	0,734	36,7	-	-	55,9	54,6	-	-	-	-
Mavic 3 Classic	1,1	34,8	-	-	-	52,9	-	-	-	-
Mavic 2 Enterprise	1,1	35,5	57,4	-	-	-	-	-	-	-
Mavic 3 Multispectral	1,3	35,5	-	-	53,0	-	-	-	-	-
Phantom 4 Pro	1,388	34,8	-	-	-	56,8	-	-	-	-
Matrice 3TD	1,5	39,3	-	-	-	-	-	-	-	-
ThunderFly TF-G2	1,61	33,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Yuneec H520E RTK	3,25	36,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Inspire 2	4	39,3	-	-	-	63,8	-	-	-	-
Matrice 30T	4,25	39,3	-	-	-	60,5	-	-	-	-
WingtraOne Gen II	4,5	33,5	-	-	-	63,6	-	53,0	-	-
Matrice 210	6,14	35,5	-	-	-	-	-	56,7	55,1	48,9
Matrice M300 RTK	9	35,5	-	-	-	63,4	-	-	-	-
Matrice 350 RTK	9,2	33,5	-	-	-	64,7	-	-	-	-
M600 Pro	15,5	30,9	-	-	-	65,0	-	-	-	-
Gorgon X8-B	17	33,5	-	-	-	72,6	-	-	-	-
Flycart 30	95	39,3	-	-	-	73,3	-	-	-	-
LIAZ SkySpotter 150	120	30,9	-	-	-	84,7	-	-	-	-

Hladina akustického tlaku A LpAeq,T [dB] – přelet, extravilán															
Letadlo	MTOM	Pozadí	15	17	20	25	30	40	50	80	120	150	200	250	300
Flapper Nimble+	0,127	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mini 2	0,249	33,49	-	49,1	-	47,6	-	-	44,1	40,5	40,8	-	-	-	-
Mini 4 Pro	0,249	35,5	-	46,3	-	49,6	-	-	41,4	-	-	-	-	-	-
Avata	0,41	34,8	-	-	-	60,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mavic Pro	0,734	36,7	-	56,8	57,1	54,9	-	-	48,5	45,8	42,3	-	-	-	-
Mavic 3 Classic	1,1	33,5	-	-	-	-	-	-	50,5	48,7	45,4	44,6	41,0	41,7	-
Mavic 2 Enterprise	1,1	34,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mavic 3 Multispectral	1,3	35,5	-	52,1	-	-	-	-	45,9	43,4	-	-	-	-	-
Phantom 4 Pro	1,388	34,8	-	-	-	-	-	-	50,3	47,8	44,7	43,6	42,7	41,9	41,3
Matrice 3TD	1,5	38,8	54,8	-	46,9	49,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ThunderFly TF-G2	1,61	34,8	-	-	-	46,7	-	-	48,1	44,0	-	-	-	-	-
Yuneec H520E RTK	3,25	36,7	-	-	-	51,6	-	-	47,6	-	-	-	-	-	-
Inspire 2	4	39,3	-	-	-	-	-	56,3	-	53,7	45,6	-	-	-	-
Matrice 30T	4,25	39,3	-	-	-	-	-	63,0	57,2	-	-	-	-	-	-
WingtraOne Gen II	4,5	33,5	-	-	-	-	-	-	40,1	-	-	-	-	-	-
Matrice 210	6,14	35,5	-	-	-	65,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Matrice M300 RTK	9	35,5	-	-	-	-	-	-	60,0	54,3	56,1	-	-	-	-
Matrice 350 RTK	9,2	33,5	-	-	-	-	-	-	60,0	56,9	54,5	-	-	-	-
M600 Pro	15,5	30,9	-	-	-	-	-	-	55,3	52,1	50,2	47,1	45,8	43,0	-
Gorgon X8-B	17	33,5	-	-	-	-	-	-	63,2	58,3	56,1	55,3	52,4	50,7	-
Flycart 30	95	39,3	-	-	-	-	-	-	67,0	-	-	-	-	-	-
LIAZ SkySpotter 150	120	30,9	-	-	-	-	-	-	70,5	68,2	64,7	-	-	-	-

Hladina akustického tlaku A LpAeq,T [dB] – vis, intravilán					Pozadí				
Letadlo	5 m	10 m	25 m	40 m	5 m	10 m	25 m	40 m	∅
Flycart 30	-	76,5	69,9	-	-	56,7	56,7	-	56,7
M350 RTK	-	66,3	63,6	58,9	-	68,1	68,1	68,1	68,1
Matrice 3TD	-	63,1	56,9	-	-	58,1	58,1	-	58,1
Mavic 3 Multispectral	-	57,3	-	-	-	58,1	-	-	58,1
Mini 4 Pro	59,3	-	-	-	58,1	-	-	-	58,1
Mavic 3	-	60,2	-	-	-	58,1	-	-	58,1

Hladina akustického tlaku A LpAeq,T [dB] – přelet, extravilán (modely)												
Letadlo	MTOM	Pozadí	15	17	20	30	40	50	80	120	150	200
Yak-55	0,5	33,5	-	48,1	49,9	-	-	43,2	42,9	41,0	43,0	35,6
Zero	0,6	38,5	49,8	52,3	49,8	46,9	47,3	43,7	-	-	-	-
Ambrosia	0,6	38,5	48,2	47,4	48,8	46,7	43,1	40,6	-	-	-	-
Elexant	5	36,7	-	-	-	-	-	56,4	53,3	49,9	48,8	45,8

Hladina akustického tlaku A LpAeq,T [dB] – přelet, extravilán (GA)							
Letadlo	MTOM	BCK	40	50	150	300	100-150
FM301	450	38,1	-	66,6	56,8	52,4	63,5
JK-05L	450	34,8	-	65,1	58,2	50,9	61,5
S1C	544	34,8	-	82,9	71,4	64,4	77,7
915 iS	600	34,8	-	78,6	71,3	60,6	68,5
WT-9	600	34,8	71,9	73,0	63,0	58,0	63,8
Legend 600	600	34,8	-	70,0	57,2	53,3	62,1
Zlín Z-142	1050	-	-	75,2	64,8	60,3	71,3
Zlín Z-43	1100	-	-	81,9	74,4	68,9	79,0

Příloha 2: Fotodokumentace letadel GA

