

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE



Česká
zemědělská
univerzita
v Praze

Vliv osobních automobilů s elektrickým pohonem na snížení hluku
z dopravy

Impact of electric vehicles on traffic noise reduction

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Keken, Ph.D.

Diplomant: Bc. Martin Opekar

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Opekar

Regionální environmentální správa

Název práce

Vliv osobních automobilů s elektrickým pohonem na snížení hluku z dopravy

Název anglicky

Impact of electric vehicles on traffic noise reduction

Cíle práce

Cílem diplomové práce je ověřit potenciál elektromobility ve vztahu k jejímu vlivu na snížení hlukové zátěže působené silniční automobilovou dopravou.

Metodika

V rámci experimentální části DP bude na vzorku automobilů s elektrickým i konvenčním spalovacím pohonem provedeno přímé měření jejich vnější hlučnosti pro jízdní rychlosti odpovídající městskému provozu i situaci mimo město. Z naměřených dat bude pomocí výpočtů odhadnut vliv zastoupení elektromobilů v dopravním proudu na snížení jeho hlučnosti ve vztahu k okolí pozemní komunikace. Experimentům bude předcházet rešeršní část shrnující současný stav poznání v oblasti dopravní akustiky, relevantní metodiky měření hluku či související hlukově-dopravní experimenty.

Doporučený rozsah práce

cca 50 stran textu plus přílohy

Klíčová slova

životní prostředí, hladina akustického tlaku, elektromobil, měření hluku z dopravy

Doporučené zdroje informací

Cesbron J., Bianchetti S., Pallas M., Le Bellec A., Gary V., Klein P., 2021: Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. De Gruyter Noise Mapping 8/1. P. 217-227.

Hua X., Thomas A., Shultis K., 2021. Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. Science Progress Vol. 104(1). P. 1–11.

Liberko M., 2004: Hluk v prostředí: problematika a řešení. Ministerstvo životního prostředí, Praha, 25 s.

MZd, 2017: Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. Věstník MZd 11/2017. S. 2–35.

Verheijen E., Jabben J., 2010: Effect of electric cars on traffic noise and safety. National institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 2010. 29 s.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Keken, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 21. 2. 2022

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Vliv osobních automobilů s elektrickým pohonem na snížení hluku z dopravy“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno ve shodě s podmínkami GDPR.

V Praze dne 28. 3. 2023

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Zdeňku Kekenovi, Ph.D., za jeho ochotu, cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval po celou dobu tvorby mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaromíru Žákovi a Ing. Michalu Němcovi ze společnosti ŠKODA AUTO a.s., za poskytnutí vozového parku a zkušebního polygonu a společnosti SQZ, s.r.o., za zapůjčení zvukoměrné techniky a jmenovitě Ing. Ireně Duškové a Ing. Darině Opekarové za cenné rady v oblasti akustiky a měření hluku z dopravy.

Abstrakt

Hluk z dopravy je jedním z významných faktorů negativně ovlivňujících životní prostředí. Tato práce se zabývá porovnáním hlučnosti prudce se rozvíjejícího odvětví elektroautomobilů ve srovnání s konvenčními vozy se spalovacím pohonem. Bylo provedeno párové měření vnější hlučnosti pro dílčí kategorie od nejmenších automobilů po kompaktní vozy až střední třídu/SUV. Každá třída byla zastoupena jedním ELE a jedním ICE automobilem. Vlastnímu hlukovému experimentu předcházela literární rešerše, zaměřená na základy akustiky a vliv zvuku na člověka a volně žijící živočichy. Dále byly shrnuty stávající poznatky o vzniku hluku z dopravy, elektromobilitu nevyjímaje, což společně s rešerší souvisejících metod měření dopravního hluku poskytuje teoretický základ pro vlastní metodiku DP. Měření vnější hlučnosti z projíždějících automobilů bylo provedeno na třech testovacích dráhách v polygonu spol. ŠKODA AUTO a.s., z jejíhož aktuálního rejstříku vyráběných vozů pocházely i automobily, u kterých bylo provedeno experimentální měření. Rozsah rychlostí jízdy, za kterých bylo provedeno měření hluku, byl zvolen od 30 km/h až do dálničních rychlostí, pro pokrytí jízdních situací ve městech i extravilánu. Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu, a byl situován ve dvou různých výškách nad povrchem zkušební dráhy. Porovnáním změřených dat bylo zjištěno, že hlučnost elektroautomobilů byla v celém rychlostním pásmu nižší až o 1,3 dB pouze u kategorie kompaktních osobních vozů, zatímco celkové výsledky při energetickém zprůměrování všech kategorií prokázaly nižší hlučnost ELE vozidel pouze v rychlosti 30 km/h. Na výsledné hladiny hluku během průjezdů měla významně vyšší vliv obrusná vrstva vozovky, na které probíhalo testování, než pohon automobilu.

klíčová slova: životní prostředí, hladina akustického tlaku, elektromobil, měření hluku z dopravy

Abstract

Traffic noise is one of the major harmful sources that impact environment. This thesis is concerned with the comparison of the noise level of the rapidly developing electric vehicles sector compared to cars with internal combustion engine. Noise measurement of external vehicle noise was focused on three subcategories, including small cars, medium cars and large/SUV cars, with each subcategory represented by one EV and one ICE car. Preliminary summary includes basic knowledge of acoustics and its impact on humans and animals. Furthermore, the existing knowledge about the traffic noise, including electric vehicles, was summarized. Together with summary of related traffic noise measurement methods, it provides a theoretical basis for methodology of this diploma thesis. The measurements of external car noise were performed using pass-by method, and were held on three test tracks belonging to ŠKODA AUTO company. Cars of the same manufacturer were chosen for noise measurements, all of them being contemporary in production. The range of driving speeds was chosen from 30 km/h up to highway speeds, to cover both urban and extra-urban driving situations. The microphone was located at standard position 7,5 m from the middle of the lane center, in two different heights above the road surface. By comparing the measured data, it was found out that the noise level of EV was lower in the subcategory of medium cars, the reduction was up to 1,3 dB. Averaged overall results of all subcategories proved lower noise level of ELE vehicles only at speed 30 km/h. The choice of road pavement proved as more effective noise reduction measure, having far more significant impact on noise levels than type of car propulsion.

key words: environment, sound pressure level, electric vehicle, traffic noise measurement

Obsah DP

1. ÚVOD	1
2. CÍLE PRÁCE.....	3
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	4
3.1. Základy fyzikální akustiky a vnímání zvuku	4
3.1.1. Vznik a šíření hluku	4
3.1.2. Lidské vnímání zvuku a váhové filtry	5
3.1.3. Vliv hluku na volně žijící živočichy	8
3.2. Hluk ze silniční automobilové dopravy.....	10
3.2.1. Vznik dopravního hluku	10
3.2.2. Vnější akustika elektroautomobilů	13
3.2.3. Hluková legislativa v ČR.....	18
3.3. Snižování hlukové zátěže a vliv povrchů vozovek	20
3.4. Metodiky měření hluku ze silniční dopravy	28
3.4.1. Metodika měření hluku ze silniční dopravy v ČR	28
3.4.2. Metodika měření hluku pro certifikaci vozidel v EU	32
3.4.3. Měření indexů povrchů vozovek dle ČSN ISO 11819-1	32
3.4.4. Měření vlivu povrchu vozovek metodou CPX	34
4. METODIKA	36
4.1. Úvod do metodiky použité v rámci DP	36
4.2. Metodika měření hlučnosti vozidel a výpočetní řešení	37
4.3. Charakteristika studijního území.....	39
4.4. Popis vozidel použitých v rámci experimentu	41
5. VÝSLEDKY PRÁCE	43
5.1. Měření hladin akustického tlaku A	43
5.2. Výpočetní řešení	45
6. DISKUSE	48
7. ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE	55
8. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
9. PŘÍLOHY	63
9.1. Obrázky, grafy a fotografie	63
9.2. Tabulky	66

Seznam obrázků, grafů a fotografií

Obrázek 1: Křivky hladin stejné hlasitosti.....	5
Obrázek 2: Útlumová charakteristika filtru A.....	6
Obrázek 3: Mechanismus vzniku hluku pneumatiky.....	11
Obrázek 4: Závislost mezi převažujícím hlukem a rychlostí.....	13
Obrázek 5: Rozdíl hlučnosti automobilů v závislosti na jejich pohonu.....	14
Obrázek 6: Celkové snížení hlučnosti, 100% elektromobily vs. 100% ICE.....	15
Obrázek 7: Porovnání hlučnosti – Citroen Berlingo (ELE vs. ICE).....	16
Obrázek 8: Porovnání hlučnosti – Nissan Leaf a VW Golf (ELE).....	16
Obrázek 9: Vliv snížení intenzity dopravy na hladinu akustického tlaku.....	21
Obrázek 10: Závislost snížení hlučnosti povrchu vozovky na její pórovitosti.....	23
Obrázek 11: Struktura porézních asfaltů.....	23
Obrázek 12: Srovnání hlučnosti povrchů SMA a SMA NH.....	26
Obrázek 13: Srovnání hlučnosti povrchu Viaphone před a po čistění.....	26
Obrázek 14: Mapa testovacího polygonu Úhelnice.....	39
Obrázek 15: Detail povrchu zkušební dráhy – certifikovaný povrch.....	63
Obrázek 16: Detail povrchu zkušební dráhy – hrubý povrch.....	63
Obrázek 17: Detail povrchu zkušební dráhy – dlažební kostky.....	64
Obrázek 18: Grafické znázornění umístění měřících mikrofónů.....	64
Obrázek 19: Průběh spektra L_{ZFmax} , Škoda Citigo, certifikovaný povrch.....	65
Obrázek 20: Průběh spektra L_{ZFmax} , Škoda Octavia, certifikovaný povrch.....	65
Obrázek 21: Průběh spektra L_{ZFmax} , Škoda Kodiq a Enyaq, cert. povrch.....	66

Seznam tabulek

Tabulka 1: Výsledky měření L_{Amax} elektroautomobilů na různém povrchu vozovky.....	18
Tabulka 2: Hygienické limity pro hluk ze silniční dopravy.....	20
Tabulka 3: Snížení hlučnosti povrchu vozovek v závislosti na typu jejího povrchu.....	24
Tabulka 4: Snížení hlučnosti povrchu vozovek v závislosti na typu jejího povrchu.....	24
Tabulka 5: Doporučená minimální délka měření hluku ze silniční dopravy.....	30
Tabulka 6: Dílčí kategorie – segment A.....	41
Tabulka 7: Dílčí kategorie – segment C.....	42
Tabulka 8: Dílčí kategorie – segment D/J.....	42
Tabulka 9: Výsledky měření hluku L_{Amax} – certifikovaný povrch.....	44
Tabulka 10: Výsledky měření hluku L_{Amax} – hrubý povrch.....	45
Tabulka 11: Výsledky měření hluku L_{Amax} – dlažební kostky.....	45
Tabulka 12: Vypočtené hladiny expozice L_{AE} – certifikovaný povrch.....	46
Tabulka 13: Vypočtené hladiny expozice L_{AE} – hrubý povrch.....	46
Tabulka 14: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – certif. povrch.....	47
Tabulka 15: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,8h}$ (noční doba) – certif. povrch.....	47
Tabulka 16: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – hrubý povrch.....	47
Tabulka 17: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,8h}$ (noční doba) – hrubý povrch.....	47
Tabulka 18: Porovnání výsledků měření L_{Amax} – segment A.....	50
Tabulka 19: Porovnání výsledků měření L_{Amax} – segment C.....	50
Tabulka 20: Porovnání výsledků měření L_{Amax} – segment D/J.....	51
Tabulka 21: Porovnání ekvivalentních hladin $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – certif. povrch.....	51
Tabulka 22: Porovnání ekvivalentních hladin $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – hrubý povrch.....	52
Tabulka 23: Porovnání výsledků měření L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV vč. AVAS, certifikovaný povrch.....	53
Tabulka 24: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo 1,0 MPI, certifikovaný povrch.....	66
Tabulka 25: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo iV, certifikovaný povrch.....	67
Tabulka 26: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo 1,0 MPI, hrubý povrch.....	67
Tabulka 27: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo iV, hrubý povrch.....	68
Tabulka 28: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia 1,5 TSI, certif. povrch.....	68

Tabulka 29: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV, certifikovaný povrch	69
Tabulka 30: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia 1,5 TSI, hrubý povrch	69
Tabulka 31: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV, hrubý povrch	70
Tabulka 32: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Kodiaq 2,0 TSI, certifikovaný povrch	70
Tabulka 33: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Enyaq iV, certifikovaný povrch	71
Tabulka 34: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Kodiaq 2,0 TSI, hrubý povrch	71
Tabulka 35: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Enyaq iV, hrubý povrch	72
Tabulka 36: Naměřené hodnoty L_{Amax} , všechna vozidla, dlažební kostky	72
Tabulka 37: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Citigo 1,0 MPI	73
Tabulka 38: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Citigo iV	74
Tabulka 39: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Octavia 1,5 TSI	75
Tabulka 40: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Octavia iV PHEV	76
Tabulka 41: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Kodiaq 2,0 TSI	77
Tabulka 42: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Enyaq iV	78
Tabulka 43: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV vč. AVAS, certifikovaný povrch	79
Tabulka 44: Otáčky motoru a zařazený převodový stupeň, ICE vozidla	79

Seznam použitých zkratk a symbolů

AVAS		zdroje výstražného zvuku (acoustic vehicle alerting system)
CPX		měření vlivu povrchů vozovek metodou malé vzdálenosti (close-proximity)
ELE, EV		kategorie vozidel s elektrickým motorem (electric vehicle)
f	[Hz]	frekvence (kmitočet) zvukového vlnění
ICE		kategorie vozidel se spalovacím motorem (internal combustion engines)
L_{AE}	[dB]	hladina expozice zvuku
$L_{Aeq,i}$	[dB]	dílčí hladina akustického tlaku každé měřené periody
$L_{Aeq,T}$	[dB]	ekvivalentní hladina akustického tlaku A [dB] (vážená filtrem A) odpovídající časovému intervalu T
L_{Amax}	[dB]	maximální hladina akustického tlaku A (vážená filtrem A)
L_p	[dB]	hladina akustického tlaku
L_{veh}	[dB]	hladina akustického tlaku vozidla
p	[Pa]	komplexní hodnota akustického tlaku
PHS		protihluková stěna/clona
RPDI		roční průměrná denní intenzita dopravy
SMA		asfaltový koberec mastixový (stone mastic asphalt)
SMA LA (NH)		asfaltový koberec mastixový nízkohlučný (Lärmarm)
SPB		měření vlivu povrchů vozovek – statistická metoda při průjezdu
SPBI	[dB]	statistický index při průjezdu (statistical pass-by index)
ΔT_i	[s]	trvání každé měřené periody

1. ÚVOD

Ačkoliv elektrický pohon v oblasti silniční automobilové dopravy existuje již od jejích prvopočátků, větší pozornosti se mu dostává až v posledních letech. Evropská unie je prostorem, kde v souvislosti s cílem již v roce 2035 zbavit veškeré osobní automobily emisí ekvivalentu oxidu uhličitého, probíhá očekávání přechodu na elektrovozy (Evropská komise ©2022), jakožto nástupce automobilů se spalovacím motorem. Silniční doprava má celou řadu negativních dopadů na životní prostředí, od zmíněného vypouštění skleníkových plynů a jiných polutantů do ovzduší, přes kolize s živočichy po působení hlukem, které je nosným tématem této DP. V souvislosti s elektromobilitou se stále více zkoumá její vliv na hlukovou zátěž působenou dopravou ve srovnání s konvenčními automobily se spalovacím motorem. Vozy vybavené elektrickým motorem se přirozeně zdají být jejich tišší alternativou. Především v nízkých rychlostech, kde hluk z elektromotoru začíná od nevýznamných hodnot, a zároveň se ještě neprojevují ostatní hlukově-emisní složky automobilu, jako je zejména hluk vznikající odvalováním pneumatik (Verheijen et Jabben, 2010; Campello-Vicente et al., 2017).

Vědecký výzkum zaměřený na vnější akustiku ELE vozidel reprezentuje celá řada článků (Křivánek et Huzlík, 2012; Stahlfest et al., 2015; Campello-Vicente et al., 2017; Ögren et al., 2018; Cesbron et al., 2021). Od prací rešeršního typu, které poskytují akustická data z širšího spektra experimentů, po akustická měření s detailními hlukovými daty pro jednotlivá vozidla, různé rychlosti a povrchy pozemních komunikací, na kterých bylo měření provedeno. Existuje však minimum prací, které by dávaly do souvislosti všechny zmíněné faktory, které ovlivňují výsledné hladiny hluku, a zároveň by se současně zaměřovaly na přímé měření hlučnosti obou zástupců, jak elektroautomobilů, tak vozidel se spalovacím ICE pohonem. Vnější hluk při průjezdu je v první řadě ovlivněn rychlostí průjezdu, kdy je dominantní složka hluku motoru postupně převyšována hlukem pneumatik úměrně se zvyšující se rychlostí. Hluk spalovacího motoru úzce souvisí s jeho otáčkami. Akustické emise pneumatik zásadně ovlivňuje druh obrusné vrstvy, po které probíhá jejich odvalování. Měření vnější hlučnosti působené průjezdem automobilu se obvykle zaměřuje na maximální hladiny akustického tlaku $A_{L_{max}}$, odečítané z hlukoměru umístěného ve vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu a umístěného ve výšce 1,2 m nad povrchem vozovky (ČSN ISO 11819-1). Odečet probíhá pro nejhlučnější jednu vteřinu průjezdu, což umožňuje snadnou komparaci dat, ale chybí vypovídající schopnost s přesahem na vliv na životní prostředí, zejména na celkové rušení hlukem z dopravy za určitý časový interval, což popisuje veličina ekvivalentní

hladina akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$ (ČSN ISO 1996-1 a -2; NV 272/2011 Sb.; MZd, 2017).

V reakci na uvedenou problematiku je v rámci této experimentální DP věnována pozornost tomu, aby srovnávací měření hluku z elektroaut i konvenčních vozidel proběhlo za stejných podmínek, na jízdnicích dráhách o různém povrchu a na dostatečném vzorku automobilů. Tyto podmínky poskytla ŠKODA AUTO a.s. na svém zkušebním polygonu u Úhelnic, kde byl realizován experiment za použití celkem šesti automobilů v jízdnicích rychlostech typických pro intravilán, od 30 km/h, v úzkých intervalech až po dálniční rychlost. Měření hluku zachycuje obě významné veličiny, jak L_{Amax} zejména pro přímé srovnání hlučnosti mezi jednotlivými vozy (ČSN ISO 11819-1) i pro porovnání s obdobnými experimenty, tak i měření L_{Aeq} při průjezdu. Z ekvivalentních hladin jsou výpočtově stanoveny hladiny expozice zvuku L_{AE} pro jednotlivé průjezdy, z kterých je dále spočtena $L_{Aeq,T}$ pro referenční bod v předepsané vzdálenosti od pozemní komunikace (MŽP, 1996; MZd, 2017), od nulového zastoupení elektroautomobilů po dopravní proud tvořený 100 % kategorií ELE.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem práce je ověřit potenciál elektromobility ve vztahu k jejímu vlivu na snížení hlukové zátěže působené silniční automobilovou dopravou. V rámci experimentální části DP bude na vzorku automobilů s elektrickým i konvenčním spalovacím pohonem provedeno přímé měření jejich vnější hlučnosti pro jízdní situaci odpovídající rychlostem od městského provozu po jízdu na rychlostních komunikacích a dálnicích.

Z naměřených dat bude pomocí výpočtů odhadnut vliv zastoupení elektromobilů v dopravním proudu na snížení jeho hlučnosti ve vztahu k okolí pozemní komunikace. Experimentům bude předcházet rešeršní část shrnující relevantní metodiku měření, rovněž jako současný stav poznání v oblasti dopravní akustiky či obdobné experimenty, což umožní výsledky experimentů zasadit do širších souvislostí.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1. Základy fyzikální akustiky a vnímání zvuku

3.1.1. Vznik a šíření hluku

Slyšitelný zvuk je působený mechanickým kmitáním pružného média (Nový, 2009). Zvuk se v plynném, kapalném i pevném prostředí šíří formou akustického vlnění, které je neodmyslitelně spojeno s přenosem akustické energie. Zatímco se zvuková vlna pohybuje v prostoru, jednotlivé částice se ve sledovaném prostředí nepřesouvají, ale oscilují kolem svých rovnovážných poloh. U přenosu zvuku v plynech a kapalinách se vyskytuje jenom podélné akustické vlnění, kdy je směr kmitů rovnoběžný se směrem šíření vlnění. V případě elastických materiálů se vlnění přenáší i příčně, v kolmici na směr postupu zvukové vlny. Rychlost šíření akustické vlny ve vzduchu má v závislosti na jeho teplotě hodnotu kolem 340 m/s a postupuje ve směru vlnoploch. Ty jsou specifické tím, že všechny body jedné vlnoplochy jsou v právě shodném akustickém stavu. Kolmice na vlnoplochu je nazývána akustickým paprskem (Nový, 2009).

Zvukové vlny ve vzduchu jsou dále charakterizovány změnou statické hodnoty atmosférického tlaku (Smetana, 1998). To je dáno postupující zvukovou vlnou, kdy se v souvislosti s vychylováním částic, tj. změnou vzdálenosti mezi jednotlivými částicemi, zároveň mění i hustota prostředí. Proměnná složka tlaku je nazývána akustický tlak vyjádřený v jednotkách tlaku [Pa]. Početem kmitů hmotného bodu prostředí za jednu sekundu je definována frekvence (kmitočet) f [Hz] zvukového vlnění (Nový, 2009).

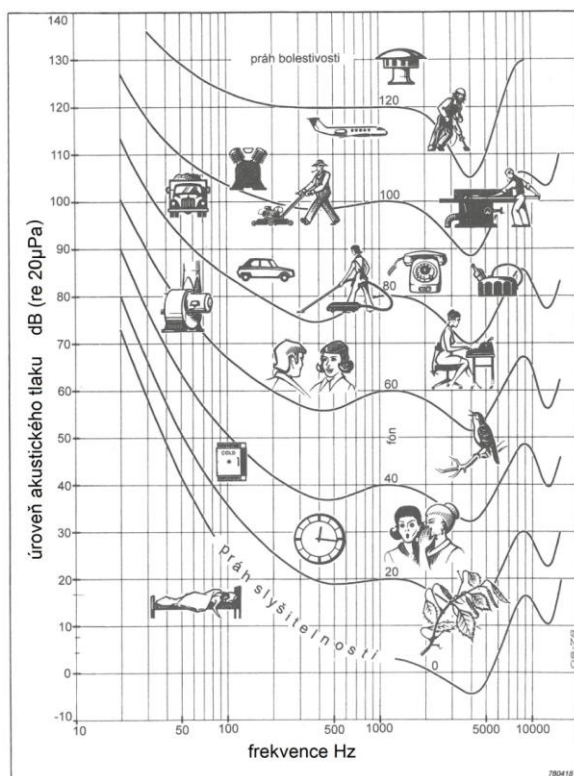
Slyšitelný rozsah akustického tlaku leží od deseti tisíc Pa (práh slyšení) až po tisíce Pa (akustické trauma). Akustický tlak se obvykle vztahuje k referenční hodnotě a je vyjádřen v logaritmické stupnici, což dále souvisí se skutečností, že se sluchový vjem řídí podle logaritmického zákona (Smetana, 1998). V tomto zápise se jedná o hladinu akustického tlaku L_p [dB], která je základní veličinou v oblasti měření hluku. Každé navýšení hladiny akustického tlaku L_p o 3 dB značí dvojnásobek akustické energie. Zvýšení L_p o 10 dB znamená nárůst energie o desetinásobek. Uvedené přepočty jsou zásadní pro hodnocení změn akustické zátěže. Pokud se hluk šíří ve volném poli z bodového zdroje, s dvojnásobným nárůstem vzdálenosti od zdroje bude hladina akustického tlaku L_p nižší o 6 dB.

Reálné zvuky vyskytující se v životním prostředí jsou tvořeny z mnoha dílčích signálů o různých frekvencích [Hz], nikoliv akustickým signálem o jediném kmitočtu (Nový, 2009). Složením akustických veličin v celém souboru kmitočtového rozsahu je definováno (akustické) spektrum. Zástupcem spojitého spektra, kdy je daná akustická veličina spojitě rozložena v celém frekvenčním rozsahu, je např. dopravní hluk.

3.1.2. Lidské vnímání zvuku a váhové filtry

Akustický tlak vyvolává ve sluchovém orgánu odezvu ve formě zvukového vjemu (Smetana, 1998), který je pro každého jedince individuální podle jeho fyziologické závislosti mezi objektivně měřitelnou hladinou akustického tlaku a vnímanou hlasitostí. Zvukový vjem je subjektivní, ale obecně platí, že citlivost na zvukový signál klesá s rostoucím věkem. Frekvenční charakteristika vnímání zvuků je nelineární, v oblasti nízkých kmitočtů přibližně do 100 Hz má lidský sluchový orgán minimální citlivost. Se zvyšující se frekvencí zvukového signálu odezva postupně roste, s maximální citlivostí na zvuky o frekvenci 4000 Hz, a dále vjem opět klesá. Tuto závislost ilustrují křivky hladin stejné hlasitosti (obrázek 1), které zachycují vždy stejný zvukový vjem v závislosti na hladině akustického tlaku zvukového signálu a jeho frekvenci (Smetana, 1998).

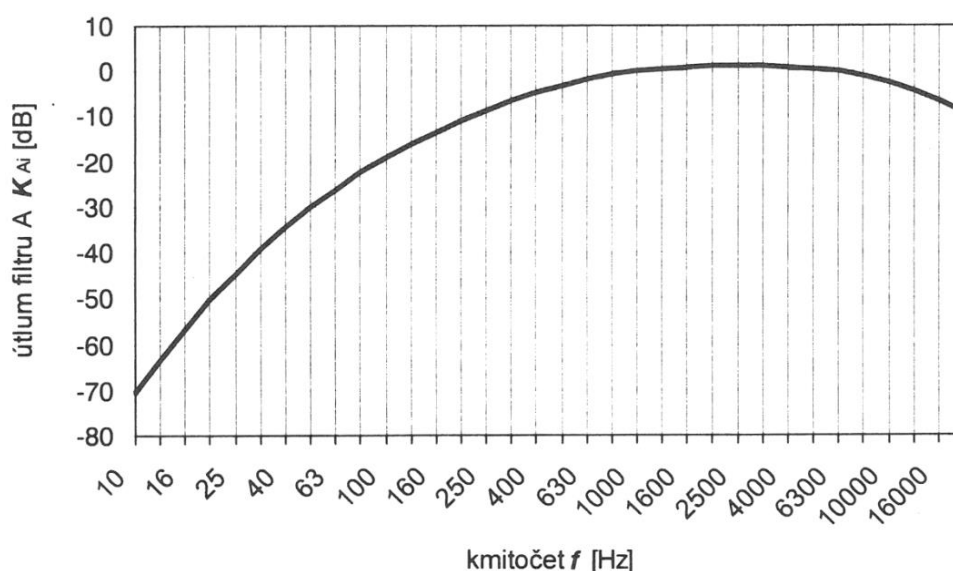
Obrázek 1: Křivky hladin stejné hlasitosti.



zdroj: Smetana, 1998

Z důvodu, že sluchové orgány mají v závislosti na frekvenci akustického signálu odlišnou reakci, jsou zvukové analyzátoři doplněny váhovým filtrem A (Nový, 2009). Váhový filtr A koriguje změřenou neváženou hladinu akustického tlaku v jednotlivých celých oktávových i dílčích třetinooktávových pásmech. Mezinárodní standardizovaná korekční charakteristika váhového filtru A je odvozena od křivek stejné hlasitosti, které je ale nekopíruje úplně přesně. Opravné hodnoty váhového filtru A jsou uvedeny na obrázku 2, přičemž nejmarkantnější jsou na nízkých kmitočtech, protože se jedná oblast, kde má lidské ucho nejnižší citlivost na vnímání zvuku. Korekce zde nabývá záporných hodnot. Na frekvencích od 1000 Hz až do 5000 Hz váhový filtr A ke změřeným neváženým hladinám akustického tlaku naopak přičítá korekční činitel o kladných hodnotách (Nový, 2009).

Obrázek 2: Útlumová charakteristika filtru A.



zdroj: Nový, 2009

V rámci hodnocení akustické zátěže je důležitá doba působení zvuku a jeho časový průběh. V běžném prostředí se zvukový signál obvykle mění s časem individuálně pro každý zdroj hluku. Aby bylo možné tyto rozdílné zvukové jevy hodnotit, byla zavedena ekvivalentní hladina akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$ [dB] (vážená filtrem A). Jedná se o veličinu, která vyjadřuje myšlenou ustálenou hladinu akustického tlaku, která má na lidský zvukový vjem shodný účinek jako jiný proměnlivý zvukový signál působící po určitou dobu (Nový, 2009). V komunálním prostředí, ale i v oblasti hluku na pracovním prostředí je standardní veličinou pro hodnocení hlukové zátěže. V českém i mezinárodním prostředí jsou v ekvivalentní hladině $L_{Aeq,T}$ vyjádřeny limitní hodnoty, ať už v technických normách nebo v platných legislativních předpisech (den Boer et Schroten, 2007; NV 272/2011 Sb.; U.S. Department of Transportation, 2011).

Zvukový signál může mít významný vliv na poškození sluchového aparátu, ať už z důvodu jednorázové hlukové události o vysoké akustické energii, nebo při dlouhodobé expozici i řádově nižším hladinám. Pod pojmem hluk zároveň v širších souvislostech rozumíme jakékoliv možné nežádoucí zvukové signály, které jsou obtěžující nebo mají negativní zdravotní účinky (Liberko, 2004). Hluk je jedním z významných faktorů ovlivňující kvalitu životního prostředí (Hellmuth et al., 2016). Liberko (2004) definuje specifické hlukové účinky těmi, které mají přímý vliv na poškození zvukovodu. Druhou kategorií jsou nespecifické hlukové účinky, které zasahují do ostatních zdravotních aspektů nebo ovlivňují lidskou psychiku. Zde se významně projevuje právě druhá jmenovaná kategorie, vlivem od nízkých, podprahových hodnot s následnou stresovou reakcí. Nejvýznamnější účinky hluku na člověka lze shrnout následovně:

- Poškození sluchového orgánu. Nejčastěji je spojováno s dlouhodobou expozicí hluku na pracovišti, ale může být způsobeno i v mimopracovní sféře. Nový (2009) v této souvislosti zmiňuje prokázané zhoršení sluchu mladší generace v důsledku vzestupného trendu poslechu hlasité reprodukováné hudby ze sluchátek.
- Zhoršení řečové komunikace – maskování a překrývání řeči jinými zvukovými signály.
- Nepříznivé ovlivnění spánku, nedostatek spánku nebo změna spánkového režimu v důsledku rušení hlukem má negativní vliv na psychiku, od změn nálad po rozmrzelost, a je průvodním jevem pro zhoršení dýchání, srdeční činnosti nebo zvýšení krevního tlaku.
- Ovlivnění kardiovaskulárního systému a psychofyzilogické účinky hluku (Vaverka et al., 1998; ČSN ISO 1999; Liberko, 2004; den Boer et Schroten, 2007; Řiháček, 2007; Máca et al., 2012; VÚBP, 2016; Peeters et van Blokland, 2018).

Z bližšího rozboru negativních účinků hluku je patrný význam snižování dopravního hluku na kvalitu lidského života. Snižování či zvýšení hluku je v důsledku logaritmického zákona, který popisuje lidské vnímání zvuku, rozpoznatelné až od změny hladiny akustického tlaku od 1 dB, a to pouze pro hudebně cvičené jedince. Až energeticky významnější změny kolem 3 dB, tj. dvojnásobný akustický tlak, jsou rozpoznatelné i pro většinu ostatní populace (Hellmuth et al., 2016).

3.1.3. Vliv hluku na volně žijící živočichy

Význam škodlivosti hluku nekončí jenom u jeho vlivu na člověka samotného. Vystavování živočichů antropogenním zdrojům hluku, zejména hluku z dopravy, má přímý negativní vliv jak na jejich fyziologii, tak i vzorce chování (den Boer et Schroten, 2007; Opekar, 2020). Stresové reakce na hluk mohou vyvolat paniku, v jejímž důsledku živočichové opouští svá původní stanoviště a zároveň se zhoršují jejich reprodukční schopnosti. Dochází k úbytku hmotnosti, vyčerpání a narušení přirozeného vývoje organismů.

U bezobratlých byl prokázán vliv hluku na některé druhy blanokřídlého hmyzu. Např. včela medonosná (*Apis mellifera*) se při expozici převyšující řádově 100 dB může úplně zastavit na několik desítek minut (Kasello et Tyson, 2004), ale vzhledem k obvyklým hladinám akustického tlaku v okolí komunikací se prakticky nejedná o významný zásah do ekosystémové funkce opylování. Zatímco Nový (2009) pro hluk z kolejové dopravy uvádí hladinu akustické tlaku až 92 dB, dlouhodobé výzkumy hluku v okolí dálnic hovoří nejčastěji o hodnotách akustického tlaku kolem 80 dB (Fiedler, 2019). Obecně lze pro hluk z dopravy ve vztahu k bezobratlým konstatovat, že nemá významný vliv ani pro jejich druhovou skladbu a výskyt, a to ani v případě edafonu (Kasello et Tyson, 2004).

Běžný dopravní hluk nemá zásadní význam ani pro aquatické ekosystémy a v nich žijící ryby a obojživelníky. Kasello et Tyson (2004) popisují rušení některých druhů suchozemských žab, např. blatnice americké (*Scaphiopus couchii*) v důsledku průjezdu motocyklů. Nevhodné načasování těchto hlukových událostí má za následek opouštění zimních úkrytů, což bylo popsáno i u plazů (ještěrky rodu *Uma scoparia*). Obecně především u obojživelníků představuje dopravní infrastruktura problém spíše z hlediska překonávání těchto překážek během období migrace, který je spojen s mortalitou (Kasello et Tyson, 2004; Keken et al., 2011) a prokazatelným snížením denzity populací až do vzdálenosti 1000 m od silnice.

V případě avifauny je vliv antropogenního hluku přímo determinován skutečností, že kromě vizuální komunikace je u ptáků významně zastoupena komunikace pomocí zvukových signálů. Jejich funkčnost je podmíněna dostatečným odstupem od hluku pozadí. Kasello et Tyson (2004) uvádí pro pěvce čeledi vrbcovití (*Passeridae*) a špačkovití (*Sturnidae*) minimální odstup 18-20 dB na kmitočtech mezi 2 a 5 kHz, tak aby byly rozpoznatelné vlastní signály od zpěvu jiných druhů. Ačkoliv se liší jednotlivé charakteristiky pro ptactvo obývající lesní

a polní ekosystémy (Kaselloo, 2006; Keken et al., 2011), obecně jsou jako potenciálně škodlivé považovány hodnoty hladin hluku nad 50 dB(A) (Kaselloo, 2006), což je mimochodem základní limitní hodnota pro hluk ze silniční dopravy v ČR (NV 272/2011 Sb.) Významně snížený výskyt hnízdění je patrný do vzdálenosti přibližně 1000 m od silnic (Kaselloo, 2006). Dopravní infrastruktura se rovněž negativně podepisuje na mortalitě ptactva, ať už v důsledku nárazů do prosklených protihlukových clon (Kušta, 2011) nebo v důsledku kolizí zejména na víceprroudých silničních komunikacích (Keken et al., 2011; Keken, 2014).

Vliv dopravního hluku na savce je vhodné uvést studiem chování netopýrů, kteří jsou v důsledku závislosti na echolokaci v tomto ohledu zvláště zranitelní, a zároveň je jejich rozšíření obecně považováno za jeden z bioindikátorů kvality životního prostředí (Finch et al., 2020). Jako klíčová je zde uváděna vzdálenost nejméně do 20 m od pozemní komunikace, ve které byla prokázána averzivní reakce netopýrů v důsledku zvukového šumu působeného silniční dopravou, což vede k významně negativnímu vlivu na potravní ekologii netopýrů. Finch et al. (2020) v této souvislosti předpokládají snížení rušení netopýrů dopravním hlukem v důsledku přechodu na elektroautomobily, ale pouze v oblastech s rychlostí provozu do 75 km/h, neboť ve vyšších rychlostech převažuje hluk pneumatik a efekt nižšího akustického projevu elektromotoru je tak upozaděn.

Jak významné může být nahrazení automobilů se spalovacím motorem právě elektromobily, přibližuje experiment (Yosef et al., 2021), který zacílil na měření vzdálenosti volně žijících živočichů od pohybujících se vozidel, ve které již dochází k jejich rušení. Experiment proběhl v oblasti nízkých rychlostí průjezdu (20 km/h) a zaměřil se na několik druhů savců z čeledí jelenovití, turovití a kočkovití, a dále na řádově desítky druhů ptactva. Původní průměrná útěková vzdálenost u savců (6 m od zdroje hluku) se výměnou konvenčních automobilů za vozidla s elektrickým pohonem snížila přibližně na polovinu. V případě avifauny nebylo zjištěno významných rozdílů, ale autoři studie (Yosef et al., 2021) zdůrazňují fakt, že měření proběhlo za ideálních podmínek, totiž za konstantní rychlosti vozidel, ale ve skutečnosti předpokládají ještě vyšší míru rušení živočichů hlukem ze spalovacích motorů zejména během akcelerace vozu v důsledku zvýšených otáček motoru.

Výzkum vlivu antropogenního hluku na živočichy se často zaměřuje na rozdílnou druhovou toleranci vůči hluku, která má za následek odlišnou změnu chování jednotlivých zástupců v pastevně-kořistním potravním řetězci, velké savce a šelmy nevyjímaje. Expozice hlukem z dopravy u predátorů obvykle vede ke

zvýšené bdělosti a snížení hledání potravy, což má za následek emigraci z daného prostředí a v konečném důsledku zvýšení početnosti jejich kořisti (Shannon et al., 2014; Plesník, 2017). Hovoříme pak o efektu konkurenčního uvolnění v důsledku lidského vyrušení, který může vést jednak k přemnožení kořisti a s tím související zvýšenou aktivitou kořisti, jako je např. spásání vegetace. Již zmíněná odlišná reakce různých druhů na hluk má dále za následek nahrazení původního predátora jiným druhem, který má odlišnou ekologickou niku, a naopak je schopen predace i v hlukově zatíženém prostředí.

3.2. Hluk ze silniční automobilové dopravy

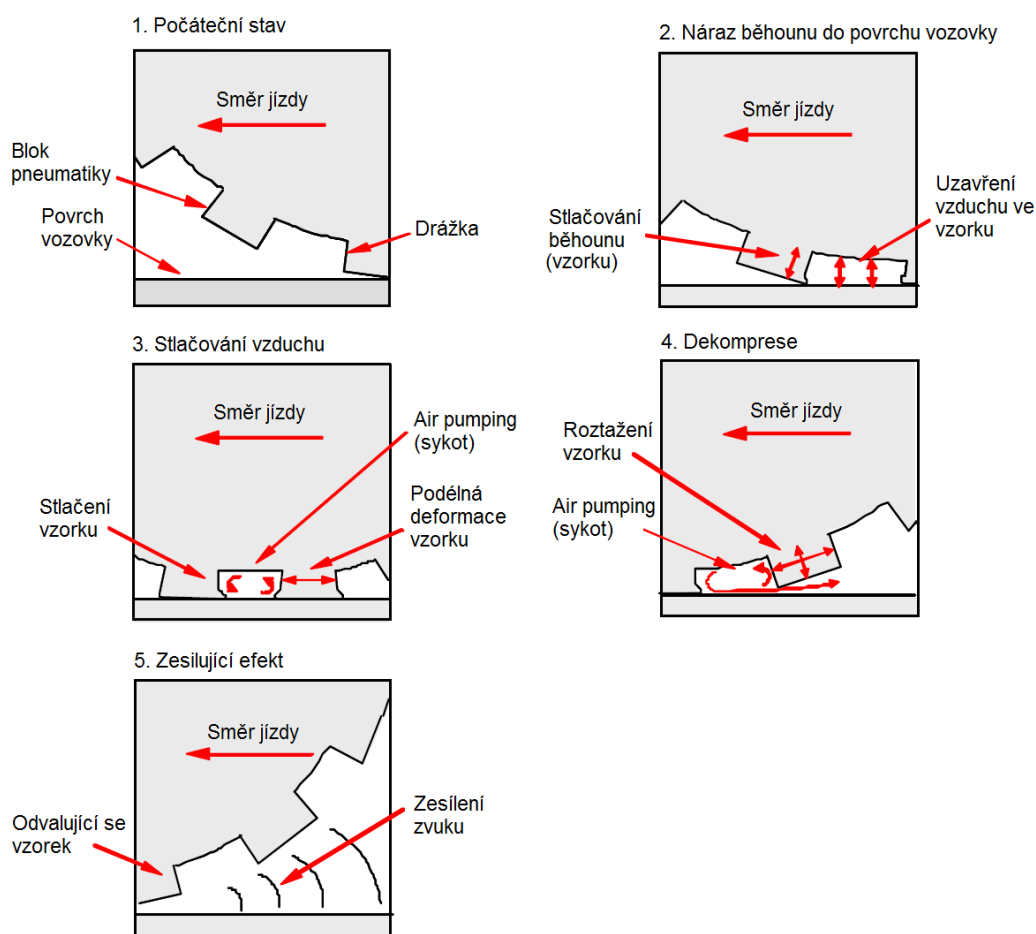
3.2.1. Vznik dopravního hluku

Dopravní hluk je tvořen součtem všech dílčích akustických emisí vozidel sledovaného dopravního proudu (Morgan, 2006). Tyto emise jsou působeny interakcí rotující pneumatiky s povrchem vozovky, hlukem pohonné jednotky a aerodynamickými procesy při obtékání vzduchu kolem automobilu (Sandberg, 2001; Morgan, 2006). Hluk motoru vyjadřuje veškerý zvuk, který je emitován pohonnou jednotkou, převodovkou, převody, řazením, brzdami, výfukovým potrubím i vezeným nákladem (Morgan, 2006; Křivánek, 2017).

Hluk interakce pneumatiky s vozovkou představuje komplexní soubor zvukových signálů, které jsou generovány odvalováním běhounu pneumatiky po obrušné vrstvě pozemní komunikace. Odborné zdroje v anglickém jazyce hluk pneumatik označují jako tyre/road noise (Sandberg, 2001; Morgan, 2006), popř. rolling noise (Ögren et al., 2018). V česky psaných literárních zdrojích lze najít různé označení, kromě zmíněného hluku interakce pneumatiky s vozovkou je to např. hluk styku pneumatika/vozovka nebo hluk od pneumatik (Křivánek, 2012 až 2019). V rámci této DP je dále používáno jednotné označení hluk pneumatik. Jeho vznik lze vysvětlit níže uvedenými fyzikálními jevy (Morgan, 2006; den Boer et Schroten, 2007; Křivánek et Huzlík, 2012):

- nárazy a otřesy působené změnou interakčních sil mezi běhounem pneumatiky a povrchem vozovky;
- aerodynamické procesy mezi běhounem pneumatiky a povrchem vozovky a v běhounu / vzorku pneumatiky;
- přilnavost a drobné pohyby gumového povrchu vzorku pneumatiky.

Obrázek 3: Mechanismus vzniku hluku pneumatiky.



zdroj: Opekar, 2020 ex. Morgan, 2006

Náraz běhounu do povrchové vrstvy vozovky vygeneruje otřes (obrázek 3), který se dále přenáší do kostry pneumatiky a má za následek rozvibrování běhounu. Hluk je následně emitován do okolního prostředí. Současně je stlačován vzduch uzavřený v mezerách ve vzorku pneumatiky. Dalším rotací pneumatiky se vzorek pneumatiky posouvá mimo přímý styk s povrchem obrusné vrstvy vozovky a následuje prudká dekomprese, kdy se stlačený vzduch uvolní z mezery ve vzorku do okolí. Uvedený proces se nazývá air-pumping (Morgan, 2006), do českého jazyka překládaný sykot. Vlivem otáčení pneumatiky se mimo kontaktní zónu s povrchem vozovky přesune dříve stlačený blok vzorku pneumatiky a nabude tak původního rozměru, čímž vznikají další otřesy. Všechny popsané hlukové emise jsou nakonec zesíleny v důsledku kónického geometrického tvaru, který vytváří pneumatika umístěná na rovině povrchu vozovky, což v principu připomíná kónickou část megafonu (den Boer et Schrotten, 2007). Z hlediska energie akustických emisí ve vztahu k frekvenčnímu průběhu dopravního hluku jsou dominantní složky hluku pneumatiky tvořené pásmem pod 1000 Hz, kde převládá hluk působený otřesy

a nárazy. Ve zbývajícím frekvenčním pásmu nad 1000 Hz je hluk emitován stlačením a následnou dekompresí vzduchu (Morgan, 2006).

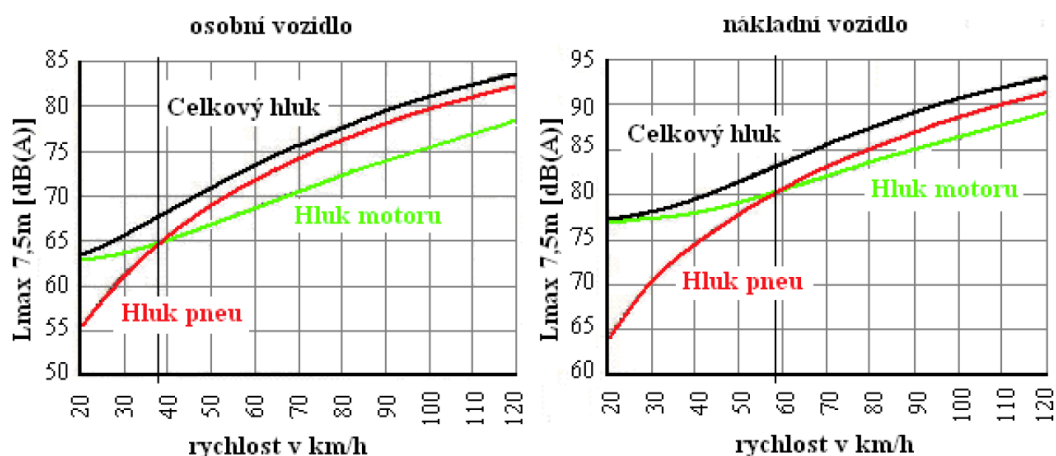
Nejvýznamnější faktory, které ovlivňují výsledné akustické emise z provozu automobilu, jsou rychlost jízdy, výkon motoru, režim práce pohonné jednotky (otáčky motoru), povětrnostní podmínky a technický stav vozidla (Nový, 2009). Při snaze o snižování hluku z dopravy se těžiště pozornosti obrací na rychlost jízdy vozidla a stav obrusné vrstvy pozemní komunikace, které lze nejsnadněji ovlivnit bez ohledu na stav vozového parku nebo jeho průměrné stáří. V návaznosti na uvedené fyzikální procesy je klíčovým předpokladem pro snížení hluku pneumatiky stav obrusné vrstvy vozovky a její pórovitost, jako primární předpoklad pro snížení hluku pneumatiky (den Boer et Schroten, 2007). Hlavní jmenovatele, které nejvíce ovlivňují hlučnost působenou provozem automobilů, lze shrnout následovně (Křivánek et al., 2019a):

- intenzita dopravního provozu jeho složení;
- rychlost dopravního proudu;
- povrch pozemní komunikace.

Je zřejmé, že další snižování dopravního hluku oproti současnému stavu lze provést změnou rychlosti a redukcí intenzity dopravního provozu nebo změnou skladby dopravního proudu, zejména omezením kategorie nákladních automobilů, které mají významný na celkovou hlukovou zátěž působenou silniční automobilovou dopravou (Nový, 2009). Veškeré popsané změny včetně stupňujících se požadavků na hlukové emise automobilů uváděných do provozu však s sebou nesou celou řadu negativních socioekonomických aspektů, od vyšší pořizovací ceny automobilů po finanční ztráty v důsledku delšího času stráveného na cestách.

Růst hladiny akustického tlaku ICE automobilů v závislosti na stoupající rychlosti může mít lineární charakter (Nový, 2009), podle jiného zdroje podléhá logaritmické závislosti (Sandberg, 2001). Přesnější vyjádření této závislosti přináší oddělené měření hluku pneumatik a hluku motoru znázorněné na obrázku 4 (Křivánek et Huzlík, 2012). V nižších rychlostech do 40 km/h v kategorii osobních vozidel převažuje hluk motoru, u nákladních vozidel až do 60 km/h. Ve vyšších rychlostech převažuje hluk pneumatik.

Obrázek 4: Závislost mezi převažujícím hlukem a rychlostí.



zdroj: Křivánek et Huzlík, 2012

Dřívější měření hluku v sedmdesátých letech 20. století, kdy se objevily první rozsáhlé výzkumné programy zaměřené na dopravní hluk, uvažovaly limitní hodnotu rychlosti, od které převažuje hluk pneumatik, mezi 50 a 70 km/h (Sandberg, 2001). O dvě dekády později se tato zlomová rychlost u osobních automobilů snížila na 40 až 50 km/h, na začátku nového tisíciletí pak pod 40 km/h (Křivánek et Huzlík, 2012). Klesající rychlost, od které převládá hluk pneumatik, souvisí s postupnou obměnou a modernizací vozového parku, resp. snižujícími se akustickými emisemi ICE pohonných jednotek (Ládyš, 2019; MZd, 2019). Do budoucna lze předpokládat, že se tento trend dále prohloubí, protože u ELE automobilů je hluk pneumatik převažující již od 20 km/h (Křivánek, 2019). Vlivem současných politických rozhodnutí v souvislosti s přechodem na bezemisní dopravu obměna vozového parku zaznamená daleko rychlejší dynamiku, než tomu bylo dosud. Evropská komise (2022) stanovila, že v roce 2035 mají být všechny nově registrované osobní i dodávkové automobily úplně bezemisní, myšleno v produkci ekvivalentu oxidu uhličitého, což se mimo jiné opírá o stoupající produkční schopnosti průmyslu v oblasti výroby elektroautomobilů a jejich akumulátorů.

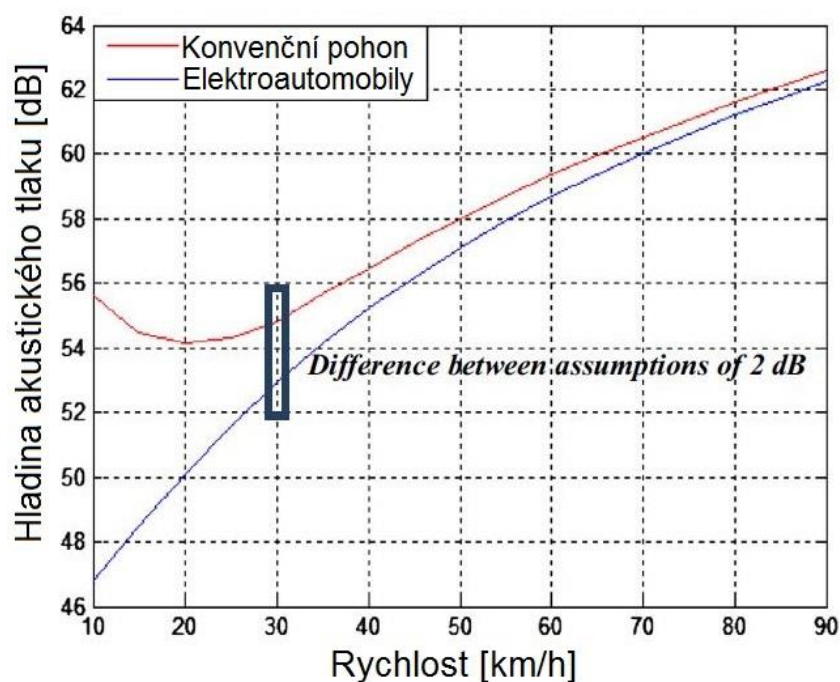
3.2.2. Vnější akustika elektroautomobilů

V předchozí části byl vysvětlen vznik venkovního hluku u konvenčních automobilů, přičemž byly dány do souvislosti dvě základní složky, které nejvýznamněji ovlivňují celkový venkovní hluk vozidla, a to hluk motoru a pneumatik, obojí rostoucí se zvyšující se rychlostí automobilu. Přírůstek aerodynamického hluku v rámci této DP není uvažován, neboť je dominantní až při rychlostech kolem 200 km/h, tj. vysoko nad běžnou cestovní rychlostí silničních vozidel (Křivánek

et Huzlík, 2012), mimo zvolený rychlostní interval v rámci experimentu DP. Z hlediska porovnání hluku elektroaut a konvenčních vozidel se spalovacím motorem je významný rozdíl především u složky hluku působené motorem. Hluk pneumatik může být vyšší, pokud je elektromobil v rámci stejné kategorie automobilů osazen pneumatikami o větších rozměrech v důsledku jeho vyšší pohotovostní hmotnosti. Vzorek elektromobilů použitý pro hluková měření v rámci této DP, blíže popsany v metodické části, vykazoval vyšší hmotnost v důsledku vezeného akumulátoru ve všech kategoriích kromě segmentu C (Škoda Auto a.s., 2020a – 2020e), jak v šířce pneumatik, tak v jejich průměru.

Na rozdíl od spalovacích agregátů, emitujících hluk i při nulové rychlosti v důsledku volnoběžných otáček motoru, má hluk elektromobilu v závislosti na rychlosti lineárně se zvyšující charakter (Campello-Vicente et al., 2017), patrný zejména v nízkých rychlostech. Simulace (obrázek 5) zobrazuje rozdílné hladiny celkového hluku elektroaut a konvenčních vozidel v závislosti na rychlosti. V případě aut se spalovacím motorem je v rychlostech do 30 km/h vnější hluk téměř shodný, bez ohledu na to, jestli se automobil pohybuje rychlostí 10 či 30 km/h. Oproti tomu u elektromobilů se hluk v této rychlostní oblasti zvyšuje po přímce, jejíž začátek – v nulové rychlosti – bychom na ose y hledali na neslyšitelné hodnotě hluku pozadí.

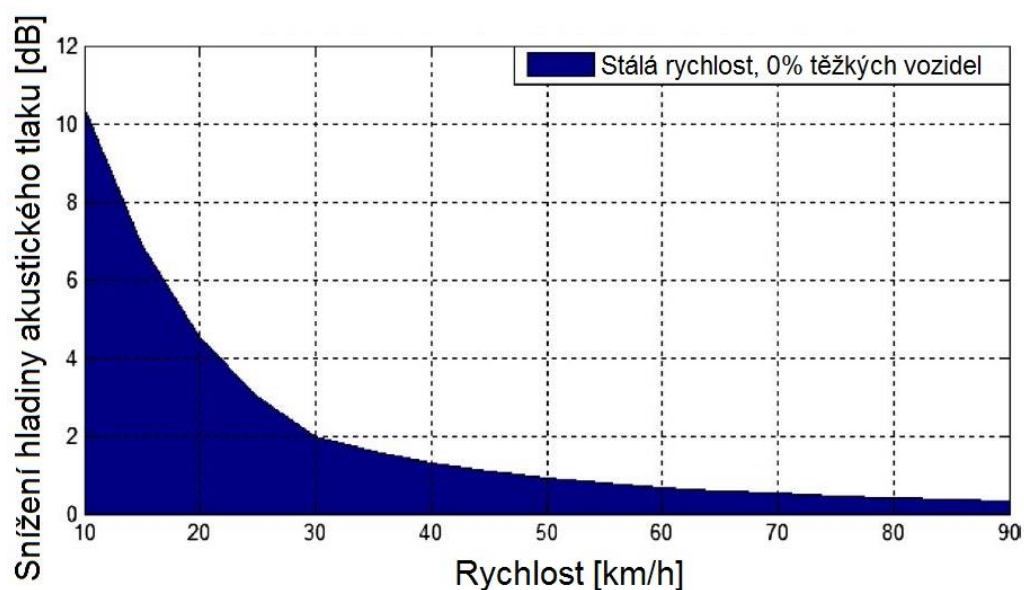
Obrázek 5: Rozdíl hlučnosti automobilů v závislosti na jejich pohonu.



zdroj: Campello-Vicente et al., 2017

Se zvyšující se rychlostí pozorujeme podobný tvar křivek vnější hlučnosti vozidel obou kategorií (obrázek 5), což plně koresponduje s předchozím zjištěním (obrázek 4), protože se jedná o oblast, kde nad hlukem motoru začíná převažovat hluk pneumatik. Na rozdíl od hluku motoru lze považovat hluk pneumatik vozidel za podobný pro obě kategorie, v mírný neprospěch ELE automobilů v důsledku zmíněných hmotnostních rozdílů. Vliv elektromobility na celkové hlukové emise vozu je nejvýznamnější v nízkých rychlostech a se vzrůstající rychlostí klesá na významu (Verheijen et Jabben, 2010; Campello-Vicente et al., 2017), což graficky znázorňuje následující obrázek:

Obrázek 6: Celkové snížení hlučnosti, 100% elektromobily vs. 100% ICE.



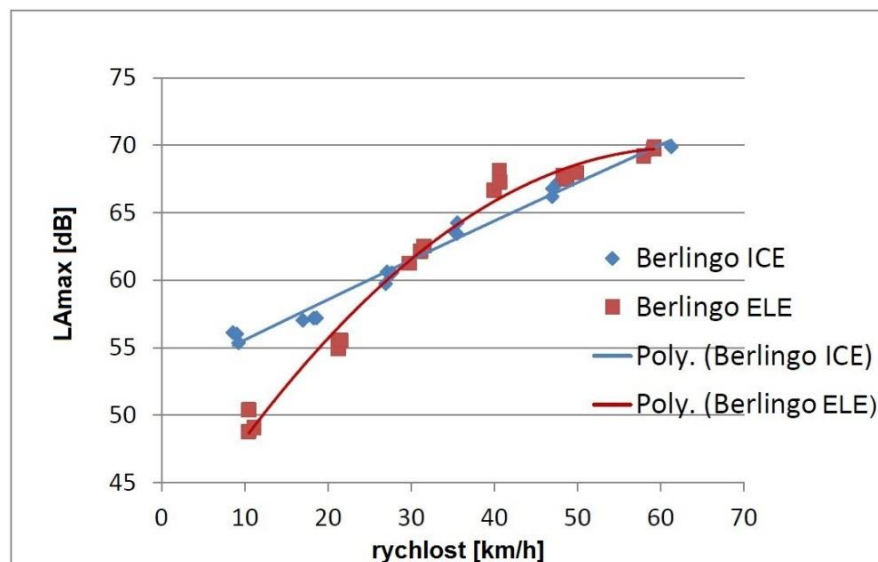
zdroj: Campello-Vicente et al., 2017

Křivánek a Huzlík (2012) uvádějí pro vozidla s elektrickým pohonem a rychlost 30 km/h v průměru o 2,7 dB nižší akustické emise než u kategorie ICE, přičemž ve vyšších rychlostech kolem 110 km/h se jedná už jen o nevýznamný rozdíl, celkový hluk je zde nižší pouze o 0,4 dB. Verheijen et Jabben (2010) zmiňují hlavní význam pro snížení hlukové zátěže vlivem zapojení ELE vozidel do dopravního proudu pro rychlostní pásmo do 50 km/h včetně, s průměrnou redukcí hluku o 1 až 3 dB. Napříč odbornou literaturou panuje shoda, že snížení celkového hluku elektromobilů je patrné pouze v nízkých rychlostech, protože ve vyšších rychlostech převažuje hluk pneumatik (Ögren et al., 2018).

Párové měření (Stahlfest et al., 2015) provedené v Dánsku porovnává hlučnost vždy dvou automobilů, jednoho s elektrickým a druhého se spalovacím

pohonem. Mikrofon byl umístěn na stativu ve výšce 1,2 m, ve vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu. Bylo provedeno měření hlučnosti vozu shodného továrního označení Citroen Berlingo v ICE a ELE variantě, jehož výsledky jsou znázorněny graficky:

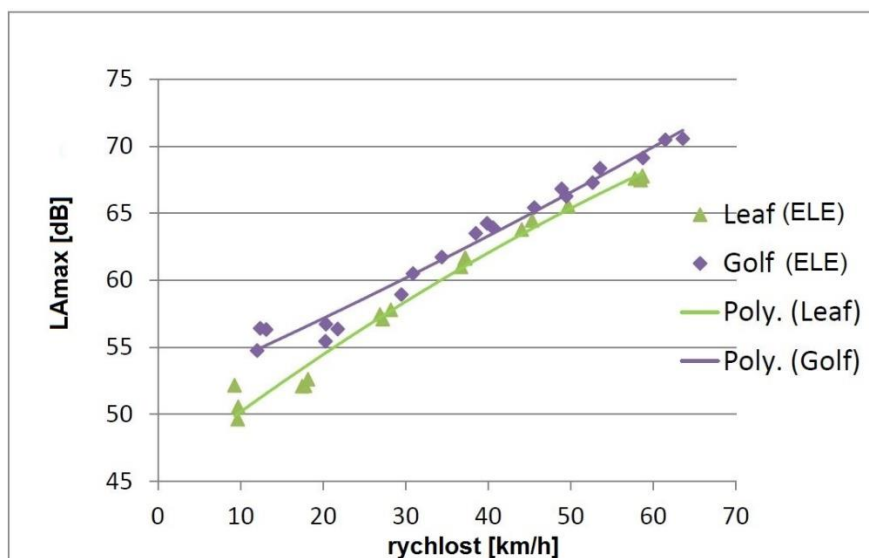
Obrázek 7: Porovnání hlučnosti – Citroen Berlingo (ELE vs. ICE).



zdroj: Stahlfest et al., 2015

V oblastech nízkých rychlostí kolem 10 km/h bylo snížení hlučnosti ve prospěch elektromobilu až 5 dB, se vzrůstající rychlostí se rozdíly vyrovnaly při rychlosti 30 km/h, až při vyšších rychlostech začala převažovat hlučnost automobilu s elektrickým pohonem (obrázek 7).

Obrázek 8: Porovnání hlučnosti – Nissan Leaf a VW Golf (ELE).



zdroj: Stahlfest et al., 2015

Lineární nárůst hlučnosti elektroautomobilů, po přímce, je zřejmý z obrázku 8. Z důvodu nízké hlučnosti elektrických vozidel i vozidel s hybridním elektrickým pohonem v nízkých rychlostech jsou tyto vozy na nejen území EU povinně opatřovány zařízením AVAS (Nařízení EP a rady EU č. 540/2014), ale např. i ve Spojených státech (Pardo-Ferreira et. al, 2020). Jedná se o nepřerušovaný zvuk určený k informování zranitelných účastníků silničního provozu o tom, že je vozidlo v provozu. Zařízení musí automaticky fungovat od minimálního rozsahu rychlosti do zhruba 20 km/h a mělo by znít podobně jako vozidlo se spalovacím motorem. Zatímco podle původního uvedeného Nařízení (2014) mohlo být zařízení AVAS během jízdy volitelné, resp. vybavené tlačítkem, které umožňuje jeho vypnutí, později se jeho použití u všech elektrických i hybridních vozidel stalo povinné (Nařízení komise ze dne 7. března 2019, kterým se mění nařízení EP a Rady EU č. 540/2014).

Bez ohledu na použitý pohon automobilů jejich hlučnost postupně klesá v důsledku neustálé modernizace a průběžné obměny vozového parku (Ládyš, 2019; MZd, 2019). Z toho vyplývá nutnost u experimentů a konkrétních testovaných vozidel uvádět i rok uvedení do provozu, aby data byla plně komparativní. Předchozí uvedené experimenty kromě toho neuváděly hladiny akustického tlaku pro jednotlivá vozidla a rychlosti průjezdu. Novějšího francouzský článek (Cesbron et al., 2021) shrnul hlučnost z průjezdu na vzorku elektroautomobilů vyrobených po roce 2016. Měření bylo realizováno na různých obrusných vrstvách:

Tabulka 1: Výsledky měření L_{Amax} elektroautomobilů na různém povrchu vozovky.

Tovární označení	Rok uvedení do provozu	L_{Amax} [dB] ve vzdálenosti 7,5 m (rychlost 50 km/h)					
		porézní asfaltový koberec (PA) 0/6	asfaltobeton (DAC) 0/10	asfaltový koberec mastixový (SMA) 0/10	tenký asfaltobeton (VTAC) 0/6	tenký asfaltobeton (VTAC) 0/4	tenký asfaltobeton (VTAC) 0/8
Peugeot e-208	2020	61,6	64,2	65,0	62,3	58,7	61,6
Renault ZOE	2016	63,6	66,0	66,6	63,9	61,5	64,2
BMW i3	2018	61,4	64,0	65,0	61,5	59,3	62,0
Nissan LEAF	2019	62,9	65,0	66,0	62,7	61,3	64,3
Tesla Model 3	2019	63,1	66,2	67,0	64,0	60,1	63,0

zdroj: Cesbron et al., 2021

Předchozí uvedený výzkum se týkal vnější akustiky elektroautomobilů. V souvislosti se snížením hlukových emisí působených pohonnou jednotkou, resp. nahrazením původního spalovacího motoru elektrickým motorem, se výzkum obrací i na akustiku uvnitř vozu (Hua et al., 2021). Hluk, který byl dříve maskován spalovacím ústrojím, se ukazuje jako rušivý pro osádku automobilu. Nabývá tak na významu potlačení zvuků generovaných uvnitř vozu, např. od vzduchotechniky vozu a jeho chlazení. Odhlučnění zavěšení kol má současně význam i pro vnější akustiku, neboť hluk z pneumatik je u elektroautomobilů při vyšších rychlostech považován za dominantní. Nepříjemný vysokofrekvenční zvuk a celkovou hlučnost elektromotoru lze omezit použitím ložisek s přísnou výrobní tolerancí.

3.2.3. Hluková legislativa v ČR

Eliminace negativního vlivu hluku na životní prostředí je v České republice, podobně jako v jiných vyspělých státech, vymáhána rozsáhlým legislativním opatřením. Zastřešující právní předpis představuje zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, v platném znění (dále jen zákon), který mimo jiné definuje prostory, na které se protihluková ochrana vztahuje. V návaznosti na zákon jsou limitní hodnoty pro hluk určeny prováděcím právním předpisem, kterým je nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, v platném znění (dále jen nařízení vlády). Zde jsou zároveň blíže popsány jednotlivé zdroje hluku a časové intervaly, ke kterým se vztahují limitní ekvivalentní hladiny akustického tlaku.

Uvedená hluková legislativa je cílena na ochranu veřejného zdraví, která zahrnuje dvě odlišné oblasti, komunální a pracovní prostředí. Komunální hluk značí ty zdroje, kde dochází k interakci s hlukem ve vztahu k pobytovým místům, zejména v zastavěném prostředí a chráněné obytné zástavbě. Typickým zástupcem komunálního hluku jsou jednak průmyslové zdroje, od menších provozoven a výroben po továrny (tzv. stacionární zdroje definované nařízením vlády, § 2), a dále hluk z dopravy, ať už kolejové, letecké nebo silniční automobilové, či vnitrozemské vodní plavby. Vyjmenované zdroje hluku jako hlasové projevy zvířat a lidí nebo hluk z venkovní hudební produkce jsou z národní protihlukové legislativy vyňaty, ale mohou být korigovány pomocí místních vyhlášek na úrovni obcí.

Prostory v komunálním prostředí, na které se vztahuje ochrana před hlukem, definuje § 30 zákona:

- Chráněný vnitřní prostor stavby: pobytové místnosti ve školách, zdravotnických zařízeních a obytné místnosti ve všech stavbách (bytové a rodinné domy).
- Chráněný venkovní prostor stavby označuje prostor do 2 m před oknem chráněného vnitřního prostoru stavby, resp. přesněji před částí obvodového pláště, který je významný pro pronikání hluku dovnitř obytných a pobytových místností zvenčí. Ve znění § 2 nařízení vlády je prostorem významným pro pronikání hluku dovnitř míněný prostor před okny, pokud danou místnost nelze větrat jinak. Pokud je nutná hygienická výměna vzduchu v místnosti realizována nuceně, jinak než otevřenými okny, např. přes vnitřní ventilační výdechy, prostor před okny obytné místnosti není chráněný.
- Chráněný venkovní prostor značí nezastavěné pozemky, které jsou užívány k rekreaci, lázeňské péči a výuce, s výjimkou lesních a zemědělských pozemků.

Dle § 11 a § 12 nařízení vlády je pro všechny uvedené chráněné prostory ukazatelem hluku z dopravy ekvivalentní hladina akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ za celý časový interval v denní době (6:00 až 22:00) a noční době (22:00 až 6:00). Hygienické limity pro hluk z automobilové dopravy se různí podle korekcí přihlížejících k druhu chráněného prostoru, třídě pozemní komunikace a denní či noční době, přičítaných k základní limitní hladině $L_{Aeq,T} = 50$ dB. Např. pro novou pozemní komunikaci nebo nově vybudovanou obytnou zástavbu podél původní vozovky platí u zástavby následující limity pro hluk z dopravy:

Tabulka 2: Hygienické limity pro hluk ze silniční dopravy.

Korekce podle druhu komunikace a chráněného prostoru	Hodnota hygienického limitu [dB]	
	$L_{Aeq,16h}$ (denní doba)	$L_{Aeq,8h}$ (noční doba)
Základní hladina akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$	50	50
Korekce pro noční dobu	-	-10
Korekce pro chráněný venkovní prostor ostatních staveb a hluk z dopravy na silnicích I. a II. třídy a místních komunikací I. a II. třídy	+10	+10
Výsledná hodnota hygienického limitu	60	50

zdroj: NV 272/2011 Sb.

Výsledkem měření hluku je hodnota určujícího ukazatele, v daném případě ekvivalentní hladina akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$ pro denní a noční dobu, doplněná o nejistotu měření, čímž se prohlašuje, že na určité n-procentní hladině pravděpodobnosti leží skutečná hodnota hluku v rozmezí hodnoty $L_{Aeq,T} \pm$ nejistota měření U . Hodnocení splnění či nesplnění právního stavu zjednodušuje článek 7.2 platného metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí (MZd, 2017). S hygienickým limitem se porovnává výsledná naměřená hodnota po odečtení nejistoty měření, která v případě, že je menší nebo rovna limitu, znamená jeho dodržení. V opačném případě se jedná o překročení hygienického limitu, tj. naplnění protiprávního stavu. Porovnání umožňuje pouze dvě možnosti, dodržení nebo nedodržení limitu, což dozorujícím orgánům ochrany veřejného zdraví (krajským hygienickým stanicím) ulehčuje hodnocení v případě, kdy se limitní hodnota nachází v pásmu nejistoty měření výsledné hodnoty. V oblasti hluku v pracovním prostředí by hodnota určujícího ukazatele hluku včetně pásma nejistoty měření ležící na limitní hodnotě znamenala nehodnotitelnou situaci.

3.3. Snižování hlukové zátěže a vliv povrchů vozovek

Hlavním důvodem pro snižování hluku je jeho negativní vliv na člověka, popř. volně žijící živočichy. Celý řetězec ovlivnění hlukem lze zapsat následovně: zdroj hluku – přenos zvukového signálu prostředím – hluková imise – vliv hluku na organismus (den Boer et Schrotten, 2007), což implikuje dvě možné strategie snižování dopravního hluku. U silniční automobilové dopravy může být snížení hlukové zátěže u koncového uživatele dosaženo následujícími metodami (den Boer et Schrotten, 2007; Bendtsen, 2009):

a) potlačení hluku u zdroje:

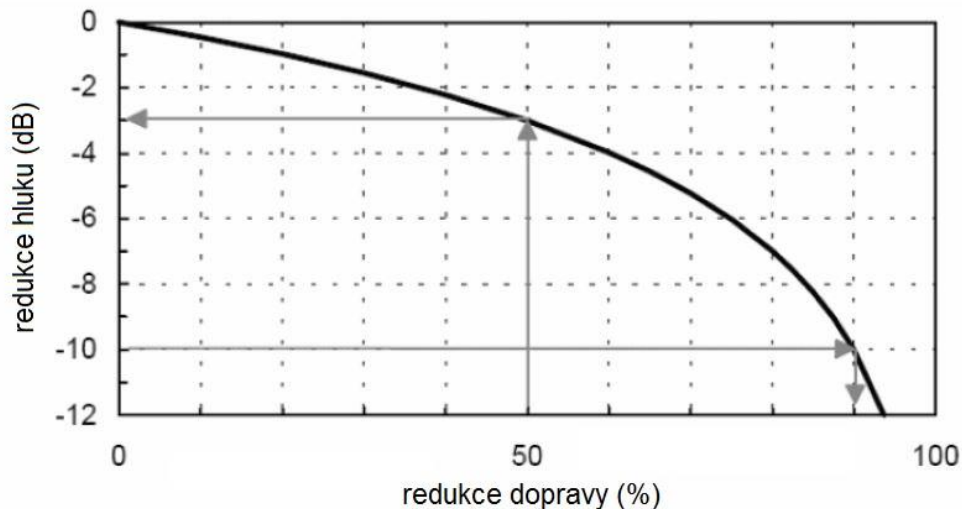
- dopravně-organizační metody:
 - redukce počtu projíždějících vozidel;
 - snížení rychlosti dopravního proudu;
- technické metody:
 - snížení akustických emisí působených průjezdem vozidla (hluk motoru, hluk pneumatiky, popř. ve vyšších rychlostech aerodynamický hluk);
 - snížení hlukových vlastností vozovek (význam především na hluk pneumatik a v omezené míře i na hluk motoru);

b) snížení přenosu hluku prostředím:

- nárůst vzdálenosti zdroj hluku – koncový uživatel;
- navýšení neprůzvučnosti:
 - bariér ve venkovním prostředí (protihlukové clony/stěny);
 - obvodového pláště budovy včetně fasádních prvků a oken.

Potlačení hluku u zdroje redukcí počtu projíždějících vozidel vychází z fyzikálního vztahu mezi akustickou energií zdroje a hladinou akustického tlaku A (Smetana, 1998). Snížením intenzity dopravy na polovinu lze dosáhnout poklesu hladiny akustického tlaku o 3 dB (Ládyš et al., 2019). Realizací obchvatů obcí za současné redukce počtu projíždějících automobilů o 90 % může být dosaženo snížení hlukové zátěže až o 10 dB. Vztah redukce hluku na snížení intenzity dopravy je zřejmý z obrázku 9:

Obrázek 9: Vliv snížení intenzity dopravy na hladinu akustického tlaku.



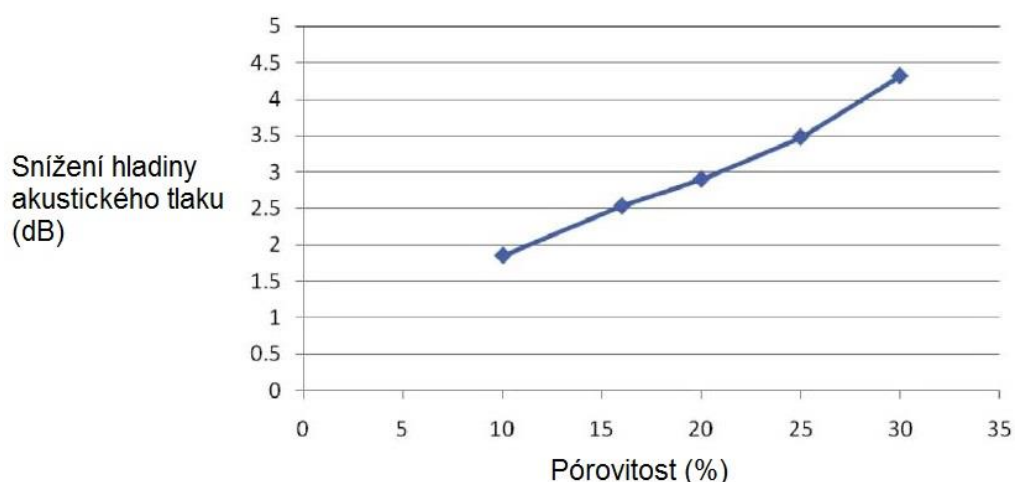
zdroj: Ládyš et al., 2019

Závislost mezi hlukem působeným silniční dopravou a rychlostí vozidel je uvedena na obrázku č. 4. Účinnost protihlukového opatření ve formě snižování rychlosti je striktně podmíněna plynulostí provozu a neagresivním chováním řidičů (Ládyš et al., 2019). V praxi se kromě základního stanovení rychlostních limitů svislým dopravním značením využívá doplňujících forem vymáhání dodržování předepsané rychlosti jízdy ve formě úsekového měření, zpomalování vozidel příčnými pruhy a retardéry nebo umělým zúžením vozovky. Jedná se o metody, které mohou mít další pozitivní vliv na snížení nehodovosti a ochranu zranitelných účastníků silničního provozu, ale nesou s sebou i ekonomické ztráty v důsledku zvýšení doby strávené na cestách.

Odborné zdroje (Liu et al., 2016; Vaitkus et al., 2016; Ögren et al., 2018) obracejí pozornost k vlivu obrusných vrstev na hlukové emise působené dopravou s hlavním zaměřením na porézní asfaltové směsi se sníženou hlučností. Zatímco optimalizací pneumatik, tj. snížením jejich hlukově-emisních charakteristik, lze u osobních aut dosáhnout snížení celkového hluku z dopravy o 1 až 2 dB, resp. 2 dB u aut nákladních, použití porézních obrusných vrstev přináší snížení hluku až 8 dB u osobních automobilů a 4 dB u větších nákladních aut (Praticò et Anfosso-Lédée, 2012). Nespornou výhodou je okamžitý efekt po realizaci pokládky nového asfaltového koberce, zatímco optimalizace hlukových emisí pneumatik se projevuje až v dlouhodobém horizontu průběžnou obměnou vozového parku a nemá lokální efekt.

Princip nízkohlučných obrusných vrstev je založen na absorpci hluku pomocí volných pórů v povrchové vrstvě vozovky. Zvukové vlny, působené ať už interakcí pneumatiky s vozovkou nebo i hlukem motoru, dále putují do volného prostoru (pórů) krytu vozovky, kde dochází k jejich pohlcení (Van Keulen et Duškov, 2005). Původně přitom aplikace porézních asfaltových vrstev byla prováděna za účelem efektivnějšího odvádění srážkových vod z povrchu pozemní komunikace pro výsledné vylepšení protismykových vlastností vozovky. Poměr objemu volného vzduchového prostoru vůči celkovému objemu svrchní obrusné vrstvy (pórovitost) má zásadní vliv na emisní charakteristiky vozovky. Snížení hluku v závislosti na pórovitosti má téměř lineární průběh (obrázek 10):

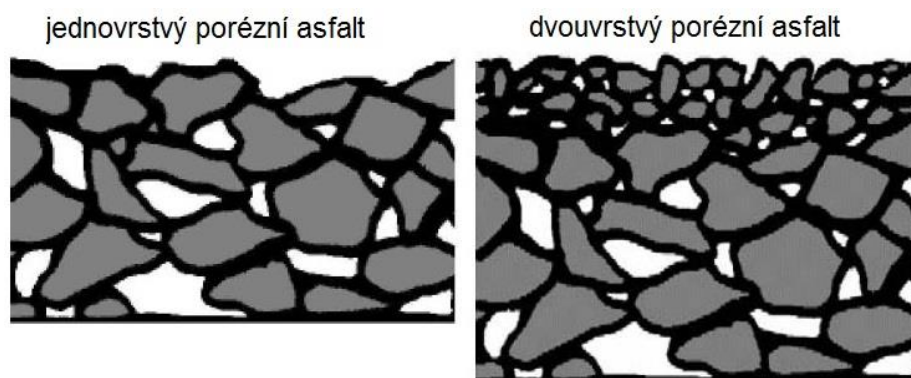
Obrázek 10: Závislost snížení hlučnosti povrchu vozovky na její pórovitosti.



zdroj: Liu et al., 2016

Receptury asfaltových směsí se sníženou hlučností používané na veřejných pozemních komunikacích ve Spojených státech mají hodnoty pórovitosti od 15 % do 19 %. Na území EU nebo Japonska je dosahováno vyšších hodnot, 20-30% (Freitas et al., 2009; Praticò et Anfosso-Lédée, 2012). Pro srovnání u běžných mastixových koberců činí pórovitost 3-6% (Van Keulen et Duškov, 2005). Aby měla porézní vrstva kýžený protihlukový efekt, musí její tloušťka dosahovat 5 cm. Další modifikaci představují dvouvrstvé porézní asfaltové směsi tvořené dvěma vrstvami o různé pórovitosti. Spodní vrstva o tloušťce 4,5 cm je chráněna tenkou svrchní vrstvou (2,5 cm), která je tvořena jemnějším kamenivem (Van Keulen et Duškov, 2005). Svrchní vrstva zde figuruje především jako filtr proti vnášení hrubých nečistot do spodní vrstvy. Struktura porézních asfaltových směsí je znázorněna v obrázku 11:

Obrázek 11: Struktura porézních asfaltů.



zdroj: Van Keulen et Duškov, 2005

Pro shrnutí dosavadního výzkumu vlivu asfaltových směsí se sníženou hlučností na snížení hluku z dopravy je vhodné dát do souvislosti experimenty prováděné podle stejné metodiky měření. Jednou z nich je měření statistického indexu SPBI při průjezdu, které je blíže popsána v samostatné kapitole 3.4.3 této DP. Starší dánský experiment (Van Keulen et Duškov, 2005) shrnutý v tabulce 3 udává průměrné snížení hluku, resp. indexu SPBI, po výměně původní asfaltobetonové obrusné vrstvy pozemní komunikace za nový povrch vozovky se sníženou hlučností.

Tabulka 3: Snížení hlučnosti povrchu vozovek v závislosti na typu jejího povrchu.

Nový povrch vozovky	Změna SPBI [dB] po výměně původního asfaltobetonového povrchu vozovky				
	osobní automobily			těžká vozidla	
	rychlost (km/h)				
	50	80	110	50	85
SMA 0/6	-1,1	-2,1	-2,8	-0,8	-0,6
Jednovrstvý porézní asfalt	+0,2	-2,0	-3,5	-2,0	-4,3
Dvouvrstvý porézní asfalt	-3,7	-4,9	-5,7	-4,6	-6,5

zdroj: Van Keulen et Duškov, 2005

Liu et al. (2016) provedli sérii měření hlučnosti povrchu dálnic v oblasti městských aglomerací Šanghaje a Nankingu v Číně. Zde se zaměřili na hlukovou efektivitu aplikace porézních asfaltových povrchů vůči původním asfaltobetonovým krytům. Průměrné snížení akustického tlaku A ve vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4: Snížení hlučnosti povrchu vozovek v závislosti na typu jejího povrchu.

Nový povrch vozovky	Změna SPBI [dB] po výměně původního asfaltobetonového povrchu vozovky	
	všechna vozidla	
	rychlost (km/h)	
	50	80
Porézní asfalty	-3,3	-3,6

zdroj: Liu et al., 2016

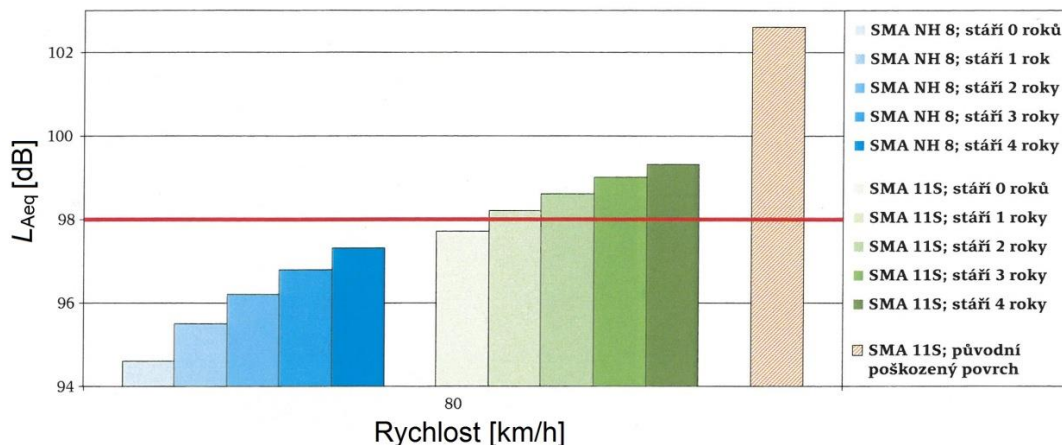
Opekar (2020) v lokalitě Praha-Slivenec prokázal, že pokud se mastixovým protihlukovým kobercem nahradí původní, značně opotřeбенý povrch vozovky (8 let starý asfaltobeton), dojde ještě k významnějšímu snížení hlukově emisních

charakteristik povrchu vozovky. Index SPBI se v daném případě snížil o 5,8 dB. Hodnocení účinnosti nízkohlučných obrusných vrstev může vést k nesprávným závěrům, pokud se porovnávají experimenty provedené podle různých metodik. Van Keulen et Duškov (2005) a Liu et al. (2016) uváděli hlukově-emisní parametry vyjádřené indexem SPBI, měřeném ve vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu. Jedná se o technické měření, které nemá přímou vypovídající hodnotu ve vztahu k hlukové zátěži obyvatel žijících v zástavbě podél pozemní komunikace, protože vzdálenost fasády od vozovky může být různá. Česká metodika měření hluku z dopravy je primárně zaměřena na hygienická měření hluku, tj. posouzení imisní akustické zátěže dopadající na chráněnou fasádu, hodnocenou za určitý časový interval (NV 272/2011 Sb.). Rozsáhlejší zprávy a studie z Francie, která je jedním z lídrů v aplikaci obrusných vrstev se sníženou hlučností, poskytují další informace o redukci hlukové zátěže v okolí pozemních komunikací (Fiedler, 2019), tj. nejsou zde sledovány pouze změny akustických vlastností povrchů vozovek, ale i související snížení hluku v okolní zástavbě. V této souvislosti Ládyš et al. (2019) uvádí při použití nízkohlučných asfaltových směsí snížení hlukové imise v zástavbě o 3 dB vůči oblastem, kde je povrch komunikace tvořen běžným mastixovým kobercem. Ve zmíněné lokalitě Praha-Slivenec (Opekar, 2020) bylo dosaženo snížení imisní akustické zátěže u zástavby v rozmezí 3,5 až 4,7 dB. Je patrné, že změna hlučnosti u zástavby obvykle dosahuje nižších hodnot, než změna indexu SPBI příslušné pozemní komunikace, u níž se sledovaná zástavba nachází. Poslední běžně uváděný akustický parametr hlučnosti povrchů vozovek vychází z měření pomocí metody krátkých vzdáleností CPX, která je popsána v samostatné kapitole této DP.

Dosud popsané snížení hlučnosti po aplikaci obrusných vrstev se sníženou hlučností se týkalo změn hluku změřených přímo po pokládce nových povrchů vozovek. Akustické parametry silničních povrchů ale mají značně proměnlivou časovou dynamiku v řádu asi deseti let, hlavním důvodem je postupné zanášení pórů prachovými částicemi v souvislosti se zimní údržbou a znečištěním vozidel (Křivánek et al., 2016), které může být do jisté míry vyvažováno pravidelným strojním čištěním nebo i přirozeným samočištěním za pomoci dešťových srážek. Samočisticí efekt je ale podmíněn rychlostí projíždějících vozidel vyšší než 70 km/h a má tudíž význam zejména u mimoměstských pozemních komunikací (Křivánek et al., 2016; ČVUT, 2017). Postupné zhoršování akustických parametrů vozovek v důsledku nevratného zaplnění mezer bylo předmětem měření v rámci několika studií (Křivánek et al., 2019a; Křivánek et al., 2019b) a je patrné z obrázku 12. U mastixového asfaltového koberce se sníženou hlučností SMA NH 8 pozorujeme

každoroční zhoršení přibližně o 0,5 dB, měřeno metodou CPX. U experimentu provedeného metodou SPB (Opekar, 2020) se hlučnost SMA NH koberce po roce od realizace zvýšila o 1,0 dB.

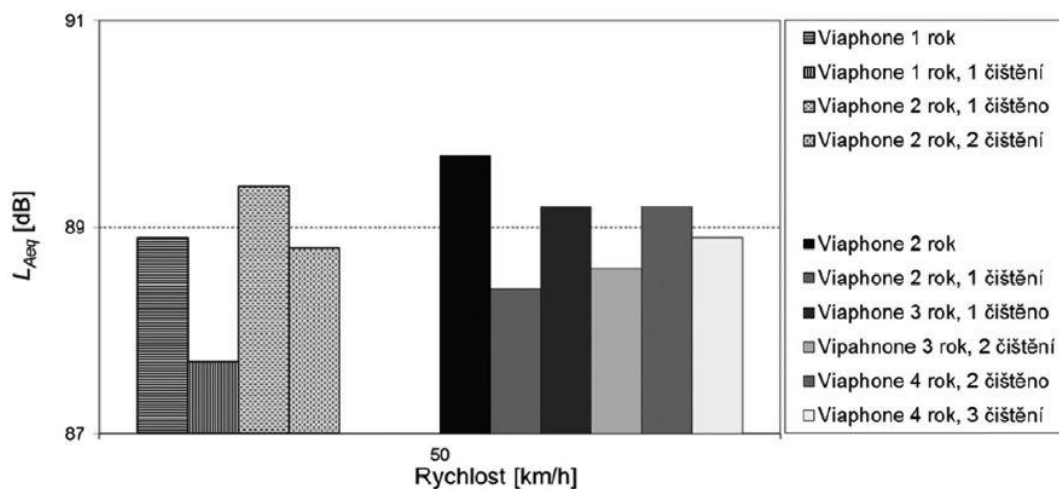
Obrázek 12: Srovnání hlučnosti povrchů SMA a SMA NH.



zdroj: Křivánek et al., 2019a

Předchozí pozorování je vhodné doplnit dalším výzkumem, kdy byla v intervalu 12 měsíců měřena hlučnost porézní obrusné vrstvy vždy před a po strojním čištění (Křivánek et al., 2016) metodou měření CPX. Po prvním čištění se sice dosáhlo snížení hlučnosti v rozmezí 0,9 až 1,4 dB, ale již po čtyřech letech od pokládky se ani při opakovaném čištění nedosáhlo hodnot z prvního roku od realizace, což je způsobeno nevratnými strukturálními změnami v povrchové vrstvě vozovky (obrázek 13).

Obrázek 13: Srovnání hlučnosti povrchu Viaphone před a po čištění.



zdroj: Křivánek et al., 2016

Pokud nemůže být hluk potlačen u zdroje, je preferováno snížení přenosu hluku prostředím pomocí bariér ve venkovním prostředí (den Boer et Schroten, 2007). Oproti předchozím uvedeným metodám snižování dopravního hluku je realizace stavby protihlukových stěn podmíněna stavebně-technickým uspořádáním vozovky a jejího okolí, které jejich použití významně omezují zejména v zastavěném území městských aglomerací, z důvodu zástavby umístěné přímo u pozemních komunikací nebo přerušením linií křižovatkami, vjezdy do budov a přítomností přechodů pro chodce. Další obtíže v rámci staveb PHS nastávají, pokud je okolní zástavba umístěna v kopcovitém terénu nad úrovní vozovky, kdy vyvstává potřeba projektovat neúměrně vysoké clony, tak aby chráněné budovy ležely v jejich akustickém stínu (Ögren et al., 2018). Při projektování protihlukových clon v extravilánu je nutné zohlednit jejich vliv na stávající krajinný ráz. Neubergová et Vašica (2013) uvádí na jedné straně evokaci klidu v souvislosti horizontálními liniemi clon, ale i navození napětí a pohybu pro jejich vertikální linie. Veřejností může být negativně hodnocen i zhoršený výhled z dopravních prostředků, zejména v případě cestování vlakem.

Pokud však zmíněná specifika protihlukových stěn uvedeme do souvislosti s předchozími zmíněnými protihlukovými opatřeními, zejména s aplikací porézních asfaltových vrstev se sníženou hlučností, zjišťujeme pro PHS jejich vyšší účinnost na snížení hlukové zátěže. V kontextu postupného nevratného zanášení pórů SMA NH obrusných vrstev (Křivánek et al., 2019a) má snížení přenosu hluku prostředí pomocí bariér časově trvalejší charakter. Ládyš et al. (2019) pro clony uvádějí lokální účinek na snížení hluku ve vztahu k okolní obytné zástavbě až o 15 dB, zatímco aplikace nízkohlučných asfaltových směsí podle stejného zdroje způsobí snížení jenom o 3 dB. Zahraniční zdroje jsou v tomto ohledu střízlivější, den Boer et Schroten (2007) uvádí účinnost PHS na snížení hlukové zátěže v rozmezí 3 až 6 dB, Sandberg (2001) zmiňuje rozpětí hodnot redukce od 5 do 12 dB s průměrným snížením o 7 dB. V lokalitě Praha-Slivenec (Opekar, 2020) stavba PHS snížila hlukovou zátěž u zástavby podél ulice Strakonická o 8,1 dB, což koresponduje s posledně jmenovaným zdrojem.

3.4. Metodiky měření hluku ze silniční dopravy

3.4.1. Metodika měření hluku ze silniční dopravy v ČR

Základním cílem měření hluku z dopravy je zjištění jeho vlivu na celkovou akustickou situaci v posuzované lokalitě (Kozák, 1998), ať už se jedná o podklad pro hodnocení stávající akustické situace, projektování změn dopravních tras, navrhování protihlukových opatření a jejich následné ověřovací měření. Metodika měření hluku z dopravy v České republice je harmonizována s mezinárodními technickými standardy ISO 1996-1 a -2 implementací těchto norem Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ČSN ISO 1996-1 a -2). Technické normy tvoří základ pro národní předpisy, které je dále upřesňují.

Navazující metodika měření hluku silniční dopravy (MŽP, 1996) uvádí doporučenou dobu měření hluku z dopravy a minimální časový interval měření, bez významnějších změn aplikovaný do současnosti. Postupně byly publikovány další metodické návody (MZd, 2002; MZd, 2010), ale nežádoucí stav, kdy dopravní hluk bylo možné měřit a interpretovat podle několika současně platných předpisů sjednotil až metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí z roku 2017 (MZd, 2017), (dále jen metodický návod). Zde jsou v návaznosti na technické požadavky na měření hluku (ČSN ISO 1996-1 a -2) uvedeny měřicí postupy reflektující českou protihlukovou legislativu v kontextu posledních novelizací (Zákon č. 258/2000 Sb., NV 272/2011 Sb.). Legislativní rámec doplňuje Odborné doporučení pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí (NRL pro komunální hluk, 2018). V následujících bodech je uvedeno shrnutí uvedených technických norem a metodik měření:

- **Požadavky na přístrojové vybavení**

Použijí se měřicí přístroje třídy přesnosti I., vyhovující požadavku ČSN EN 61672-1 / ČSN IEC 651 a pásmové filtry přesnosti I., které splňují požadavky ČSN EN 61260-1. Vždy před začátkem a po ukončení měření se provádí provozní justace (kalibrace) celého řetězce použité zvukoměrné techniky pomocí akustického etalonu – kalibrátoru.

- **Strategie a postup měření**

Strategie měření představuje souhrn základních přístupů k provedení měření. Cílem je získání správných a reprodukovatelných hodnot hluku působeného sledovaným zdrojem. Je nutné identifikovat zdroj hluku včetně jeho provozních podmínek, polohu posuzovaného prostoru vůči zdroji a případné omezující vlivy (např. roční doba a meteorologické podmínky při měření).

- **Umístění mikrofonu**

Při hygienických měření ve vztahu k chráněnému venkovnímu prostoru staveb se mikrofon umísťuje přednostně ve vzdálenosti do 2,0 m před oknem obytné zástavby, resp. chráněné fasády, ve výšce 1,5 m nad úroveň podlahy příslušného podlaží. V případě nezastavěného území se referenční místo měření umístí do vzdálenosti 7,5 m od středu jízdního pruhu ve výšce $3,0 \pm 0,2$ m nad povrchem.

- **Určující ukazatele hluku**

Určující ukazatel hluku je vyjádřen hladinou akustického tlaku [dB] za použití váhové funkce A nebo C a dynamické charakteristiky Fast (Rychle). Pro proměnný hluk (z dopravy) je určujícím ukazatelem ekvivalentní hladina akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$. Použije se váhových filtrů A se středními frekvencemi 20 Hz až 20 kHz.

- **Neakustické údaje**

Zjišťují se atmosférické podmínky při měření (rychlost a směr větru), topografické situování místa měření vůči zdroji hluku a dále intenzita, skladba a rychlost dopravního proudu.

- **Doba měření**

Hluk z dopravy na pozemních komunikacích se přednostně měří v pracovní dny úterý až čtvrtek, měsíce březen až červen, a září až říjen. Měření mimo doporučenou dobu je možné, pokud jsou splněny předepsané meteorologické podmínky. Minimální délka dopravního průzkumu je uvedena v tabulce 5.

Tabulka 5: Doporučená minimální délka měření hluku ze silniční dopravy.

Intenzita provozu [vozidla/ 24h]	Denní doba		Noční doba	
	Doba T [h]	Délka t [min]	Doba T [h]	Délka t [min]
< 720	8:00-14:00 14:00-22:00	480	22:00-6:00	480
720-2400	8:00-12:00 13:00-17:00	120	22:00-6:00	480
2401-12 000	8:00-12:00 13:00-17:00	60	22:00-6:00 4:00-6:00	120
>12 001	7:00-12:00 13:00-17:00	30	22:00-6:00 4:00-6:00	120

zdroj: MZd, 2017

- **Zpracování výsledků**

Určujícím ukazatelem hluku ze silniční dopravy je ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro hodnotící intervaly v denní době od 6:00 do 22:00 ($L_{Aeq,16h}$) a noční době od 22:00 až 6:00 ($L_{Aeq,8h}$). Výsledek měření v tomto zápise neposkytuje bližší informace o změnách hladin hluku v průběhu času, ale je energetickým průměrem za celý interval, který se spočte podle vztahu uvedeného v ČSN ISO 1996-2:

Rovnice 1: Výpočet výsledné hodnoty hladiny akustického tlaku

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \log \frac{\sum_i^N \Delta T_i \times 10^{0,1L_{Aeq,i}}}{\sum_i \Delta T_i} \text{ dB}$$

kde

ΔT_i je trvání každé měřené periody;

$L_{Aeq,i}$ dílčí hladina akustického tlaku každé měřené periody (resp. $L_{Amax,i}$ v případě průměrování maximálních hladin akustického tlaku A a L_{AE} u průměrování hladin expozice zvuku)

V případě měření zvukového signálu, jenž je tvořen jednotlivými dílčími hlukovými událostmi, u dopravního hluku reprezentovanými průjezdy vozidel, se výsledná hodnota hluku spočte z hladiny expozice jednotlivých událostí L_{AE} (NRL pro komunální hluk, 2018):

Rovnice 2: Výpočet hladiny expozice zvuku L_{AE}

$$L_{AE} = L_{Aeq,T} + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ dB}$$

kde

T_0 je doba v sekundách, ke které se vztahuje hodnocení hluku (doba průjezdu vozidla);

T je referenční časový interval 1 s.

Pokud jsou známy počty hlukových událostí n_i expozic charakteristických N typů hlukových událostí (počty průjezdů určitých kategorií silničních vozidel), je možno postupovat podle vztahu (NRL pro komunální hluk, 2018):

Rovnice 3: Výpočet výsledné hodnoty hladiny akustického tlaku z L_{AE}

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \log\left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N (n_i \times 10^{0,1L_{AE,i}})\right) \text{ dB}$$

kde

T je doba v sekundách, ke které se vztahuje hodnocení hluku;

n_i je počet hlukových událostí i-té kategorie;

N je počet typů sledovaných hlukových událostí;

L_{AE} je charakteristická expozice zvuku každého typu hlukové události.

- **Normování dat**

Intenzity silniční dopravy se významně mění v závislosti na denní nebo noční době (Bartoš et Martolos, 2012), a zároveň se liší i průběh dopravy v jednotlivých dnech v rámci jednoho týdne, resp. v jednotlivých měsících v roce. Uvedené doporučené měsíce pro měření hluku z dopravy pak vycházejí z ročních variací intenzit dopravy podle přílohy 5, TP 189 (Bartoš et Martolos, 2012). Normování dat na referenční podmínky metodickým návodem (MZd, 2017) není explicitně vyžadováno, podobně jako tomu je u normování dat podle aktuálních klimatických podmínek během měření, ačkoliv dostupná literatura (Smetana, 1998) uvádí možnosti přepočtu na shodné meteorologické podmínky (ČSN ISO 3891; ICAO, 2017).

- **Přesnost měření**

Přesnost měření je ovlivněna třídou přesnosti použité zvukoměrné aparatury, dobou měření a meteorologickými podmínkami během měření. Nejistota měření $U \pm 2,0$ dB pro požitou zvukoměrnou aparaturu třídy přesnosti I. byla stanovena podle metodiky měření hluku silniční dopravy (MŽP, 1996; SZÚ, 2003), čímž se

prohlašuje, že se skutečná hodnota hluku nachází v rozmezí hodnoty $L_{Aeq,T} \pm$ nejistota měření U , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %.

3.4.2. Metodika měření hluku pro certifikaci vozidel v EU

Před vznikem EU harmonizovala rozdílné národní požadavky týkající se přípustných hladin hluku motorových vozidel směrnice Rady EHS 70/157/EHS (1970), která byla zrušena v souvislosti se zavedením nařízení EP a Rady EU č. 540/2014. Účelem obou uvedených předpisů bylo zejména snižování mezních hladin akustického tlaku vozidel, přičemž nařízení EP č. 540/2014 reflektuje i nové přísnější požadavky na hluk pocházející z pneumatik.

Nařízení (2014) stanoví technické požadavky pro schválení typu všech nových vozidel z hlediska jejich hladin akustického tlaku za účelem usnadnění jejich registrace, prodeje a uvádění do provozu v Unii. Metody a zařízení na měření hluku jsou uvedeny v příloze II citovaného nařízení a níže je uvedeno jejich shrnutí:

- **Požadavky na přístrojové vybavení**

Pro měření hladiny akustického tlaku se použije přesný zvukoměr splňující požadavky na přístroje přesnosti třídy 1 dle normy IEC 61672-1:2002. Použije se časové konstanty zvukoměru „rychle“ při váhové křivce A.

- **Zkušební místo a podmínky měření**

Povrch zkušební dráhy musí odpovídat technické normě ISO 10844:2011. V blízkosti mikrofону a zdroje hluku se nesmí nacházet žádné překážky, které by mohly ovlivnit akustické pole. Zkušební povrch nesmí být znečištěn či zakryt např. sněhovou pokrývkou, trávou či zeminou. Mikrofon se umísťuje ve vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu zkušební dráhy a výšce 1,2 m nad povrchem vozovky. Je odečítána maximální hladina akustického tlaku A L_{Amax} . V případě měření hluchnosti jedoucího vozidla je jeho rychlost 50 km/h. Levá a pravá strana vozidla se může měřit souběžně nebo odděleně. Počet měření není přímo předepsán, ale předchozí směrnice Rady EHS 70/157/EHS (1970) požadovala vždy čtyři měření pro levou a pravou stranu vozidla.

3.4.3. Měření indexů povrchů vozovek dle ČSN ISO 11819-1

Technická norma ČSN ISO 11819-1 uvádí postup měření a následné kvantitativní hodnocení hlukově-emisních vlastností povrchů vozovek. Je založena

na přímém měření maximálních hladin akustického tlaku L_{Amax} ve standardizované vzdálenosti od středu jízdního pruhu za souběžného měření rychlosti projíždějících vozidel. Uvedená norma je primárně určena ke klasifikaci povrchů pozemních komunikací podle jejich vlivu na výsledný hluk z dopravy, např. pro účely posouzení změn před a po pokládce nové obrusné vrstvy. V kontextu této DP má mezinárodní verze ISO 11819-1 významný přesah do souvisejících hlukových experimentů, které se zabývají hlučností vozidel v závislosti na rychlosti jízdy (Stahlfest et al., 2015; Heutschi et al., 2016; Campello-Vicente et al., 2017; Cesbron et al., 2021), neboť poskytuje návod pro navození opakovatelných, vzájemně porovnatelných akustických zkoušek napříč odbornou literaturou. Pro účely shrnutí výchozích předpokladů pro vlastní metodiku DP, dále popsanou v samostatné části 4, jsou v následujících bodech uvedeny nejdůležitější požadavky a metody dle ČSN ISO 11819-1:

- **Požadavky na přístrojové vybavení**

Použijí se měřicí přístroje třídy přesnosti I. vyhovující požadavkům ČSN IEC 651. Minimální frekvenční rozsah je 50 Hz až 10 000 Hz. Vždy před začátkem měření a po jeho ukončení se provádí provozní justace celého řetězce zvukoměrné techniky za pomoci akustického kalibrátoru.

- **Místo měření**

Mikrofon se umísťuje ve vzdálenosti 7,5 m od středu (osy) zkoušeného jízdního pruhu a ve výšce 1,2 m nad rovinou jízdního pruhu. Zkoušená část vozovky se musí na obě strany od mikrofonu rozprostírat do vzdálenosti nejméně 30 m. Volba místa měření je dále omezena dodržením podmínky, aby ve vzdálenosti do 10 m od mikrofonu neležely velké odrazivé plochy jako betonová svodidla nebo násypy, což je významný omezující faktor pro provádění této metodiky v zastavěném prostředí.

- **Kategorie vozidel**

Vozidla jsou dělena do několika kategorií podle jejich velikosti a počtu náprav. Předpokládá se, že tyto společné rysy jsou významné z hlediska hlukově-emisních charakteristik jednotlivých kategorií vozidel.

- č. 1 – osobní vozidla: osobní vozidla s výjimkou ostatních lehkých vozidel (předmětem měření v rámci experimentu DP);

- č. 2 – těžká vozidla: všechna nákladní vozidla, autobusy a autokary (dálkové autobusy) s nejméně dvěma nápravami a více jak čtyřmi koly:
 - o č. 2a – dvounápravová těžká vozidla: nákladní vozidla, autobusy a autokary s dvěma nápravami a více jak čtyřmi koly;
 - o č. 2b – vícenápravová těžká vozidla: nákladní vozidla, autobusy a autokary s více jak dvěma nápravami.

- **Princip měření a normování dat**

Měří se současně maximální hladiny akustického tlaku A statisticky významného počtu vozidel spolu s jejich rychlostí, která se měří v okamžiku, kdy vozidlo mĕjí mikrofon. Minimální počet vozidel:

- kategorie 1: 100 vozidel
- kategorie 2a: 30 vozidel
- kategorie 2b: 30 vozidel
- kategorie 2a a 2b dohromady: 80 vozidel

Uvedené počty vozidel, resp. dílčích měření maximálních hladin akustického tlaku A L_{Amax} mají vliv pouze pro kvantifikaci hlukově-emisních vlastností povrchů vozovek v reálném provozu při zjišťování statistického indexu při průjezdu SPBI. Účelem měření hlučnosti projíždějících vozidel v rámci této DP nebylo zjišťování akustických vlastností obrusných vrstev ve studijním území, ale ověření vlivu vozidel s elektrickým pohonem na snížení hlukové zátěže vůči vozidlům s konvenčním ICE pohonem. Pro experiment v rámci DP jsou z informací uvedených v technické normě ČSN ISO 11819-1 tudíž nejvýznamnější uvedené standardizované vzdálenosti a výška mikrofonu vůči poloze pozemní komunikace a princip měření v podobě zaznamenávání maximálních hladin akustického tlaku A L_{Amax} pro různé rychlosti průjezdů.

- **Neakustické údaje**

Zjišťují se atmosférické podmínky při měření – rychlost a směr větru, teplota vzduchu. Měření teploty povrchu vozovky je nepovinné.

3.4.4. Měření vlivu povrchu vozovek metodou CPX

Předchozí metody v oblasti dopravní akustiky umísťovaly mikrofon do předepsané vzdálenosti od 7,5 m od zdroje po umístění před chráněnou obytnou

zástavbou. Opačnou strategií měření v blízkosti pneumatik představuje technická norma ČSN EN ISO 11819-2 Akustika – Měření vlivu povrchů vozovek na dopravní hluk – Část 2: Metoda malé vzdálenosti. Mikrofon je v případě této zkoušky upevněn přímo v měřicím vozidle, ideálně ve vlečeném přívěsu, tak aby se omezil hluk nesouvisející s emisemi generovanými sledovanou pneumatikou. Kvůli vzájemné porovnatelnosti a opakovatelnosti měření metodou CPX je vyžadováno použití přesně definovaného typu referenční pneumatiky. Hladiny akustického tlaku jsou měřeny minimálně dvěma mikrofony, umístěnými v těsné blízkosti pneumatiky, což v původní verzi normy v anglickém jazyce definovalo i název pro metodiku CPX – close-proximity. Výslednou veličinou je hladina CPX L_{CPX} [dB] pro konkrétní referenční rychlost. Zejména ve srovnání s metodou měření SPB vyniká výhoda v možnosti měření v celé délce sledovaného úseku a zároveň na výsledky hladin L_{CPX} nemá vliv aktuální složení dopravního proudu na posuzované pozemní komunikaci (Adams et al., 2006; Haider et al., 2012; Křivánek et al., 2017). Měření metodikou CPX zároveň není tolik omezeno přítomností odrazivých ploch podél vozovky, jako u měření hlučnosti povrchů dle ČSN ISO 11819-1.

4. METODIKA

4.1. Úvod do metodiky použité v rámci DP

Jedná se o experimentální DP, kdy byla přímým měřením hladin akustického tlaku zjišťována vnější hlučnost vybraného vzorku automobilů. Pro měření byly použity jak automobily s konvenčním spalovacím motorem, tak pro porovnání i elektromobily. Vozidla použitá v rámci experimentu byla zvolena s ohledem na to, aby pokrývala nejběžnější zastoupení osobních automobilů na veřejných pozemních komunikacích, od nejmenších vozidel (segment A), po kompaktní automobily nižší střední třídy (segment C), až po střední třídu, resp. SUV vozidla (segment D/J). Klasifikace vozidel vychází z rozhodnutí Evropské komise (1999). V každé dílčí kategorii byl vždy jeden z vozů se spalovacím motorem a druhý s elektrickým pohonem, v rámci každé třídy se jednalo o párové měření. Tam, kde to bylo možné, byly v rámci dílčí kategorie zvoleny automobily přímo stejného továrního označení, pouze s jiným pohonem. Celkem se experimentu zúčastnilo 6 různých osobních automobilů, přičemž všechny byly od výrobce ŠKODA AUTO a.s., který je zároveň poskytl pro účely experimentálních měření v rámci této DP, a to včetně profesionálních testovacích řidičů. Bližší popis vozidel je uveden v části 4.4 této DP. Vzhledem ke skutečnosti, že nákladní automobily s elektrickým pohonem v době zpracování DP nebyly součástí běžného provozu, netýkala se jich ani experimentální část DP.

Současně s měřením hladin akustického tlaku byly zaznamenávány i jiné údaje, významné z hlediska hlukových emisí projíždějících automobilů. Jedná se především o rychlost vozidla. Měření bylo prováděno při rychlostech běžných v městském provozu (30 km/h, 50 km/h a 80 km/h), a dále i ve vyšších rychlostech typických pro extravilán (100 km/h, 130 km/h, popř. nižší, pokud vozidlo nedosahovalo maximální rychlosti 130 km/h). Rychlost byla testovacími řidiči odečítána z tachometru při každém jednotlivém průjezdu. Protože k experimentu byla použita konkrétní vozidla procházející i jinými továrními zkouškami, byla tachometrová rychlost nastavena tak, aby ukazovala skutečnou rychlost, nikoliv vyšší, jak je tomu u běžných automobilů uváděným na trh. Dále byly zaznamenávány mikroklimatické údaje, jako je např. teplota vzduchu a vlhkost vzduchu.

Protože jsou v reálném provozu zastoupeny různé obrusné vrstvy pozemních komunikací, bylo v rámci experimentu přistoupeno k měření hlučnosti při

průjezdu automobilů po různých silničních površích. Zároveň, jak je patrné z rešeršní části této DP, vliv povrchu má zásadní význam pro hluk z pneumatik, a tudíž i pro celkovou hlučnost vozu. Celý experiment se odehrál na zkušebním polygonu ŠKODA AUTO a.s., u obce Úhelnice ve středočeském kraji, kde byly pro experiment zvoleny dráhy s certifikovaným povrchem, hrubším povrchem a dlažebními kostkami. Bližší popis zkušebního polygonu je uveden v části 4.3 této DP. V rámci experimentu bylo zakázáno provádět jakoukoliv fotodokumentaci pokusu z důvodu průmyslového utajení. Jedinou výjimkou zde tvořila možnost fotografování dílčích detailů povrchů vozovky.

4.2. Metodika měření hlučnosti vozidel a výpočetní řešení

Cílem této DP bylo porovnat vnější hlučnost vozidel podle jejich typu pohonu (ICE / elektrický), resp. ověřit vliv použití elektromobilů na snížení hlukové zátěže působené silniční automobilovou dopravou. Běžně používané metodiky pro měření hluku ze silniční dopravy, vycházející jak z normativních, tak legislativních požadavků, byly shrnuty v rešeršní části této DP. Aby bylo možné přesně porovnat hlukové rozdíly mezi jednotlivými typy pohonů, byly průjezdy vozidel měřeny odděleně, vždy za konstantní vzdálenosti mikrofону od zdroje. Je zřejmé, že není možné použít přímo požadavky českého metodického návodu pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí (MZd, 2017), který vychází z technických norem ČSN ISO 1996-1 a -2, neboť popsání metodiky jsou primárně zaměřeny na měření hluku v běžném provozu a měřicí aparatura se tak umísťuje před okna nejbližší obytné zátavby. Cílem je zjištění hlukově-ímisních parametrů a ochrana zdraví obyvatel před hlukem v konkrétním místě.

Z hlediska opakovatelnosti měření a robustní vzájemné porovnatelnosti výsledků měření byl měřicí mikrofón umístěn vždy v konstantní vzdálenosti od zdroje a shodné výšce nad povrchem vozovky. Většina obdobných experimentů v ČR i zahraničí (Křivánek et Huzlík, 2012; Stahlfest et al., 2015; Cesbron et al., 2021), kdy cílem měření je zjištění vnější hlučnosti vozidla, umísťuje mikrofón do vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu, do výšky 1,2 m nad povrchem, což vychází z mezinárodní technické normy (ČSN ISO 11819-1). Měřenou veličinou je maximální hladina akustického tlaku $A_{L_{max}}$ [dB]. Jako doplňující údaj v souvislosti na přesah do měření hlukově-ímisní zátěže, byl další mikrofón umístěn do výšky 3,0 m nad povrchem vozovky, při stejné vzdálenosti 7,5 m od středu vozovky (MŽP, 1996), kdy měřenou veličinou je ekvivalentní hladina akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ [dB]. Mikrofón byl umístěn po obou stranách, vlevo i vpravo vůči ose

jízdního pruhu, neboť zejména v důsledku stranově nesymetrického umístění výfuku by jednostranné měření nepostihlo možné odlišné hlukové emise na obou stranách vozidla. Automobily během experimentu projížděly po rovině, konstantní rychlostí, rovnoměrně přímočarým pohybem, tj. bez akcelerace nebo decelerace.

Sběr dat probíhal pomocí jednotlivých samostatných náměrů pro každý průjezd automobilu, obvykle v počtu 4 za sebou jdoucích náměrů pro každou jízdní situaci (rychlost, typ vozu, povrch jízdní dráhy) s umístěním mikrofону po obou stranách. Výsledky měření byly ukládány do paměti zvukoměrů pro pozdější zpracování v tabulkovém procesoru Excel. Pomocí časově váženého energetického průměrování (rovnice 1) byly nejprve vypočteny průměrné hladiny akustického tlaku $A_{L_{max}}$ pro umístění vlevo a vpravo od směru jízdy, a dále byly pomocí uvedené rovnice spočteny celkové průměrné hladiny pro každou individuální jízdní situaci pro jejich další porovnání.

V další fázi byly pro každou jízdní situaci vypočteny v tabulkovém procesoru Excel hladiny expozice zvuku L_{AE} nejprve pro jednotlivé průjezdy, a poté pro každou kategorii vozidla a druh povrchu zkušební dráhy (rovnice 2). Uvedený postup umožňuje výpočet ekvivalentní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ v lokalitě, pokud jsou známy počty průjezdů vozidel za hodnocený časový interval – 16 hodin v denní době a 8 hodin v noční době (rovnice 3). Primárním cílem nebylo zhodnocení hlukové zátěže ve studijním území, tj. na zkušebním polygonu, ale aplikace dat na libovolnou lokalitu nacházející se v okolí pozemní komunikace. Byl zvolen referenční počet průjezdů:

- segment A: $n_i = 1000$ automobilů v denní době a $n_i = 100$ automobilů v noční době;
- segment C: $n_i = 1000$ automobilů v denní době a $n_i = 100$ automobilů v noční době;
- segment D/J: $n_i = 1000$ automobilů v denní době a $n_i = 100$ automobilů v noční době;

a to pro 3 varianty různého poměrného zastoupení automobilů:

- 100% ICE – všechna vozidla v provozu se spalovacím motorem;
- 50% ICE, 50% ELE – shodné zastoupení od obou druhů pohonu;
- 100% ELE – všechna vozidla v provozu s elektrickým motorem.

Na rozdíl od měření maximálních hladin akustického tlaku $A L_{Amax}$, které se zaměřilo na nejvyšší hladiny během průjezdu, zvolený postup výpočtů $L_{Aeq,T}$ umožňuje porovnat hlukovou zátěž působenou hlukem z dopravy za určitý časový interval, který byl s ohledem metodiku měření a hlukovou legislativu v ČR (NV 272/2011 Sb.; MZd, 2017) zvolen od 6:00 do 22:00 v denní době a od 22:00 do 6:00 pro noční dobu.

4.3. Charakteristika studijního území

Testovací polygon spol. ŠKODA AUTO a.s., na kterém bylo provedeno měření hlučnosti vozidel, je umístěn východně od Mladé Boleslavi v katastrálním území Úhelnice. Z důvodu průmyslového utajení uvedená společnost neuvádí bližší technické údaje polygonu. Z volně dostupných mapových zdrojů (obrázek 14) je patrné, že polygon disponuje hlavní dráhou, o JZ-SV orientaci, jejíž délka je 3 km. Průměrná nadmořská výška je zde 240 m n. m., přičemž hlavní dráha leží v téměř dokonalé rovině (výškový profil začátek vs. konec polygonu je 2 m).

Obrázek 14: Mapa testovacího polygonu Úhelnice.



zdroj: www.mapy.cz (upravil Opekar, 2022)

Ačkoliv měření hlučnosti vozidel proběhlo výlučně na uvedeném polygonu, celkově lze dotčené území zobecnit na libovolnou oblast zasaženou hlukem ze silniční automobilové dopravy. V pravém slova smyslu se nejedná o zjišťování parametrů majících význam pro samotné studijní území, ale o sběr dat týkajících se dopravního hluku, které lze aplikovat univerzálně kdekoliv. Z důvodu významného vlivu povrchů vozovek na celkovou hlukovou zátěž působenou provozem automobilů byla v rámci experimentu věnována pozornost tomu, aby měřením bylo obsaženo více druhů obrusných vrstev. Od certifikovaného povrchu, který se svými vlastnostmi blíží nově pokládaným mastixovým kobercům ve městech či na dálnicích. Hrubý asfaltový koberec naproti tomu vizuálně odpovídá opotřebeným pozemním komunikacím. Konečně dlažební kostky slouží pro porovnání jízdních situací např. v historických centrech měst, čemuž byla i uzpůsobena rychlost průjezdů na tomto povrchu (do 50 km/h).

Měření hlučnosti z provozu všech vozidel použitých v rámci experimentu proběhlo na jízdních dráhách o následujících obrusných vrstvách:

- certifikovaný (hladký) asfaltový koberec, vizuálně bez opotřebení, stejnorodý-homogenní, maximální velikost zrna do 8 mm;
- hrubý asfaltový koberec, vizuálně bez opotřebení, stejnorodý-homogenní, maximální velikost zrna do 15 mm;
- dlažební kostky, vizuálně bez významnějšího opotřebení, zásyp jemným štěrkem, se střední délkou kostky do 100 mm.

Stav a detaily povrchů jsou patrné z fotodokumentace (obrázky 15 až 17) v příloze DP. Certifikovaná zkušební dráha splňuje požadavky ČSN ISO 10844 (2015):

- příčný sklon je menší než 1 %;
- podélný sklon je menší než 0,5 %;
- povrch je tvořen hutným asfaltovým povrchem o maximální tloušťce zrna do 8 mm;
- obrusná vrstva je větší nebo rovna 30 mm.
- pórovitost leží v rozmezí 3-5 %, nejsou použity žádné pružné materiály jako pryž nebo polyuretan. V kontextu kapitoly 3.3. této DP se nejedná o povrch vozovky se sníženou hlučností.

Testovací dráhy vyhovují požadavku (ČSN ISO 11819-1) na délku zkoušené části vozovky – byla dodržena podmínka, aby se na obě strany od mikrofonu zkoušený povrch rozprostíral nejméně do vzdálenosti 30 m. V lokalitě polygonu se rovněž nevyskytovaly odrazivé plochy, které by mohly ovlivnit výsledky měření hluku.

4.4. Popis vozidel použitých v rámci experimentu

Tabulka 6: Dílčí kategorie – segment A.

Pohon	Spalovací (ICE)	Elektrický
Tovární označení	Škoda Citigo 1,0 MPI MQ	Škoda Citigo-e iV
Motorizace a výkon pohonné jednotky	zážehový motor o objemu 1,0 l, 44 kW	elektromotor, 61 kW
Převodovka	pětistupňová, manuální	jednostupňová
Typ, rozměr a hlučnost pneumatik	Continental ContiEcoContact 175/65 R14 82T (letní), 70 dB	Continental ContiEcoContact 185/50 R16 81H (letní), 70 dB
Pohotovostní hmotnost [kg]	934	1235
Stav tachometru [km]	93	935
Rok výroby	2020	2020

Tabulka 7: Dílčí kategorie – segment C.

Pohon	Spalovací (ICE)	Elektrický
Tovární označení	Škoda Octavia Combi eTEC 1,5 TSI	Škoda Octavia iV PHEV (pozn. hybridní pohon)
Motorizace a výkon pohonné jednotky	zážehový motor o objemu 1,5 l, s přeplňováním, 110 kW	zážehový motor o objemu 1,4 l, s přeplňováním, 110 kW (během měření vypnuto) + elektromotor, 85 kW (použit během měření)
Převodovka	sedmistupňová, automatická DSG	šestistupňová, automatická DSG
Typ, rozměr a hlučnost pneumatik	Goodyear EfficientGrip Performance 205/60 R16 92V (letní), 69 dB	Goodyear EfficientGrip Performance 205/60 R16 92V (letní), 69 dB
Pohotovostní hmotnost [kg]	1383	1608
Stav tachometru [km]	2236	6312
Rok výroby	2020	2020

Tabulka 8: Dílčí kategorie – segment D/J.

Pohon	Spalovací (ICE)	Elektrický
Tovární označení	Škoda Kodiaq 2,0 TSI DSG 4x4	Škoda Enyaq iV 60
Motorizace a výkon pohonné jednotky	zážehový motor o objemu 2,0 l, s přeplňováním, 140 kW	elektromotor, 132 kW
Převodovka	sedmistupňová, automatická DSG	jednostupňová
Typ, rozměr a hlučnost pneumatik	Pirelli Scorpion 235/55 R18 100V (letní), 67 dB	Bridgestone Turanza 235/55 R19 101T (letní), 71 dB
Pohotovostní hmotnost [kg]	1722	1917
Stav tachometru [km]	4475	759
Rok výroby	2020	2020

zdroje: Škoda Auto a.s., 2020a – 2020e

5. VÝSLEDKY PRÁCE

5.1. Měření hladin akustického tlaku A

- Datum měření: 2. 9. 2021
- Doba měření: 10:00 – 18:00
- Povaha hluku: proměnný
- Stav povrchu vozovky: celistvý, bez poškození, bez předchozích srážek.
- Podmínky prostředí: beze srážek, jasno
 - teplota vzduchu: 21,8 – 32,9 °C;
 - atmosférický tlak: 997,0 – 1000,7 hPa;
 - vlhkost vzduchu: 24,4 – 50,4 %;
 - směr a rychlost větru: JV, do 3,5 m/s.
- Použitá zvukoměrná aparatura (třída přesnosti I.):
 - akustický analyzátor B&K typ 2250, měřicí mikrofon B&K typ 4189;
 - akustický analyzátor B&K typ 2250-G4, měřicí mikrofon B&K typ 4189;
 - akustický analyzátor B&K typ 2270, měřicí mikrofon B&K typ 4189;
 - akustický kalibrátor B&K typ 4231;
 - zvukoměrná aparatura s platným ověřením/kalibrací na ČMI, OI Praha byla justována vždy bezprostředně před zahájením vlastních měření a dále po jejich ukončení pomocí etalonu – akustického kalibrátoru B&K 4231.
- Ostatní použité vybavení: stativy, mikrofonní prodlužovací kabely, kryty proti větru, laserový dálkoměr Leica Disto D2, digitální termohydrobarometr Commeter C4130, digitální termohygrobarometr EXTECH RHT35, digitální anemometr lopatkový Vane, ruční radiostanice Cobra.
- Hladina hluku pozadí během měření: 31,4 až 41,2 dB.
- Zařízení AVAS bylo během měření deaktivováno kromě cíleného měření jeho hlučnosti (tabulka 43 v příloze DP).

Každý mikrofon byl umístěn na stativu a byl opatřen krytem proti větru. Mikrofony byly orientovány směrem ke zdroji hluku. Kolmá vzdálenost mikrofonů od středu jízdního pruhu byla 7,5 m. Koordinační situace měření je patrná z obrázku 18 v příloze DP. Výška mikrofonu na povrchem:

- 1,2 m ... měření maximálních hladin akustického tlaku A L_{Amax} (ČSN ISO 11819-1)
- 3,0 m ... měření ekvivalentních hladin akustického tlaku A L_{Aeq} (MŽP, 1996)

Byla použita váhová funkce A se středními frekvencemi 20 Hz až 20 kHz a dynamická charakteristika Fast (rychle). Interval vzorkování byl 1 s. Výsledky měření byly ukládány do paměti přístroje pro pozdější zpracování v tabulkovém procesoru Excel. V případě měření maximálních hladin akustického tlaku A L_{Amax} byla přednostně zaznamenávána nejvyšší změřená hladina během každého dílčího průjezdu $L_{Amax,i}$. Pomocí časově váženého energetického průměrování (rovnice 1) byly z jednotlivých průjezdů vypočteny nejprve energeticky průměrné hladiny L_{Amax} pro orientaci mikrofonu vlevo a vpravo od směru jízdy vozidel a dále výsledné energeticky průměrné hladiny. Výsledky měření hluku včetně dílčích náměrů $L_{Amax,i}$ jsou uvedeny v příloze DP v tabulkách 24 až 36.

Tabulka 9: Výsledky měření hluku L_{Amax} – certifikovaný povrch

Certifikovaný povrch		Rychlost [km/h]						
		L_{Amax} [dB]						
Vůz (segment)	Pohon	30	50	80	100	110	130	150
Citigo (A)	ICE	56,2	62,0	67,8	71,5	73,3	x	x
	ELE	56,6	62,2	69,6	73,5	75,6	x	x
Octavia (C)	ICE	56,5	62,6	68,4	71,6	x	75,6	x
	ELE	55,8	62,5	68,6	71,8	x	75,7	x
Kodiaq (D/J)	ICE	56,0	61,5	67,9	71,3	x	75,3	77,7
Enyaq (D/J)	ELE	55,4	62,6	70,7	73,5	x	77,7	80,2

Tabulka 10: Výsledky měření hluku L_{Amax} – hrubý povrch

Hrubý povrch		Rychlost [km/h]						
		L_{Amax} [dB]						
Vůz (segment)	Pohon	30	50	80	100	110	130	150
Citigo (A)	ICE	60,5	68,1	76,1	79,2	80,4	x	x
	ELE	60,2	68,7	77,4	81,2	82,7	x	x
Octavia (C)	ICE	63,1	71,4	79,7	83,3	x	87,6	x
	ELE	62,3	70,9	79,2	82,7	x	86,3	x
Kodiaq (D/J)	ICE	61,5	70,0	78,6	82,7	x	87,0	x
Enyaq (D/J)	ELE	62,3	71,6	79,4	83,4	x	87,4	x

Tabulka 11: Výsledky měření hluku L_{Amax} – dlažební kostky

Dlažební kostky		Rychlost [km/h]						
		L_{Amax} [dB]						
Vůz (segment)	Pohon	30	50					
Citigo (A)	ICE	61,5	70,4					
	ELE	61,7	70,1					
Octavia (C)	ICE	64,2	72,8					
	ELE	63,6	72,3					
Kodiaq (D/J)	ICE	63,7	72,6					
Enyaq (D/J)	ELE	63,9	72,9					

5.2. Výpočetní řešení

Vstupní data – dílčí hladiny expozice zvuku L_{AE} pro jednotlivé průjezdy vozidel (tabulky 37 až 42 v příloze DP) byly spočteny pomocí rovnice 2. Odtud byly dále pomocí rovnice 1 spočteny výsledné, energeticky zprůměrované hladiny expozice zvuku pro jednotlivé vozy:

Tabulka 12: Vypočtené hladiny expozice L_{AE} – certifikovaný povrch

Certifikovaný povrch		Rychlost [km/h]						
		L_{AE} [dB]						
Vůz (segment)	Pohon	30	50	80	100	110	130	150
Citigo (A)	ICE	59,6	64,0	69,1	72,3	74,0	x	x
	ELE	60,1	65,5	71,3	74,4	75,9	x	x
Octavia (C)	ICE	60,5	65,1	70,0	72,3	x	74,9	x
	ELE	59,7	65,3	70,0	72,3	x	75,2	x
Kodiaq (D/J)	ICE	60,8	64,7	69,8	71,8	x	74,9	x
Enyaq (D/J)	ELE	60,6	66,2	72,0	74,2	x	77,3	x

Tabulka 13: Vypočtené hladiny expozice L_{AE} – hrubý povrch

Hrubý povrch		Rychlost [km/h]						
		L_{AE} [dB]						
Vůz (segment)	Pohon	30	50	80	100	110	130	150
Citigo (A)	ICE	65,5	70,1	77,1	80,4	81,3	x	x
	ELE	66,1	72,5	79,2	82,4	83,8	x	x
Octavia (C)	ICE	67,0	73,6	80,4	83,6	x	87,5	x
	ELE	67,1	73,6	80,4	83,6	x	87,4	x
Kodiaq (D/J)	ICE	65,9	72,9	80,1	83,8	x	86,9	x
Enyaq (D/J)	ELE	66,7	74,2	80,8	84,2	x	87,8	x

Modelová situace popsaná v metodice DP předpokládá myšlenou lokalitu, po které projíždějí vozidla, jejichž akustická data týkající se vnější akustiky při průjezdu byla získána v rámci experimentu DP. Místo měření bylo umístěno v referenční vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu a ve výšce mikrofону 3,0 m nad povrchem vozovky (MŽP, 1996). Ekvivalentní hladiny akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ v místě příjmu byly spočteny z hladin expozice zvuku L_{AE} (rovnice 3). Výpočty byly provedeny pro následující obrusné vrstvy:

- certifikovaný (hladký) asfaltový povrch, který zastupuje lokalitu po rekonstrukci pozemní komunikace s novou obrusnou vrstvou vozovky;
- hrubý asfaltový povrch, který reprezentuje opotřeбенý povrch pozemní komunikace.

Tabulka 14: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – certif. povrch

Certifikovaný povrch	Rychlost [km/h]				
	$L_{Aeq,16h}$ denní doba 06:00-22:00 [dB]				
Zastoupení druhu pohonu	30	50	80	100	110-130
100% ICE	47,3	51,6	56,6	59,1	61,6
50% ICE, 50% ELE	47,2	52,1	57,4	60,0	62,4
100% ELE	47,1	52,6	58,1	60,7	63,2

Tabulka 15: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,8h}$ (noční doba) – certif. povrch

Certifikovaný povrch	Rychlost [km/h]				
	$L_{Aeq,8h}$ noční doba 22:00-06:00 [dB]				
Zastoupení druhu pohonu	30	50	80	100	110-130
100% ICE	40,5	44,8	49,8	52,3	54,8
50% ICE, 50% ELE	40,4	45,4	50,7	53,2	55,7
100% ELE	40,3	45,8	51,3	53,9	56,4

Tabulka 16: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – hrubý povrch

Hrubý povrch	Rychlost [km/h]				
	$L_{Aeq,16h}$ denní doba 06:00-22:00 [dB]				
Zastoupení druhu pohonu	30	50	80	100	110-130
100% ICE	53,1	59,4	66,4	69,8	72,9
50% ICE, 50% ELE	53,4	59,9	66,8	70,0	73,3
100% ELE	53,6	60,4	67,1	70,3	73,6

Tabulka 17: Vypočtené ekvivalentní hladiny $L_{Aeq,8h}$ (noční doba) – hrubý povrch

Hrubý povrch	Rychlost [km/h]				
	$L_{Aeq,8h}$ noční doba 22:00-06:00 [dB]				
Zastoupení druhu pohonu	30	50	80	100	110-130
100% ICE	46,4	52,6	59,6	63,0	66,2
50% ICE, 50% ELE	46,6	53,2	60,0	63,3	66,5
100% ELE	46,8	53,7	60,3	63,5	66,8

6. DISKUSE

Hluk z průjezdu automobilu je vždy tvořen součtem dvou rozdílných složek, hluku motoru a hluku pneumatiky, přičemž obě složky rostou se zvyšující se rychlostí vozidla. Výslednou měřenou veličinou je celková hladina akustického tlaku A v místě mikrofону, tvořená uvedenými složkami, které nejde běžnými technickými prostředky kvantifikovat odděleně. V rámci experimentu bylo provedeno měření hluku z průjezdu automobilů o dvou odlišných typech pohonu, elektrického a spalovacího motoru. Zároveň byly shodné jízdní situace prováděny na různých druzích obrusné vrstvy.

Hlukové emise z prostoru pohonné jednotky nejsou přímo závislé na druhu povrchu, po kterém vozidlo projíždí. Tato složka hluku je pro konkrétní automobil a rychlostní interval shodná pro všechna provedená měření na různých zkušebních drahách. Zvuková vlna emitovaná motorem či obecně převodovkou nebo i výfukem se dále odráží od povrchu vozovky a teprve po odrazu dochází k měření akustického tlaku v definované vzdálenosti 7,5 m od osy jízdního pruhu. Hluk z motoru je proto závislý i na povrchové vrstvě zkušební dráhy, protože každá má odlišnou schopnost hluk absorbovat a odrážet. Z hlediska hluku motoru mohou dále vznikat odchylky např. rozdílnými otáčkami motoru nebo jiným zařazeným rychlostním stupněm při konkrétní rychlosti. Další odchylku může vnést rozdíl skutečné rychlosti při průjezdu vs. referenční rychlosti, nebo nesprávný způsob jízdy ve smyslu akcelerace či decelerace při míjení mikrofону. Všechny tyto faktory byly při experimentu maximálně potlačeny. Z měření hluku byly vyloučeny všechny náměry, kdy byl řidičem zaznamenán nestandardní průjezd. Nejčastěji se jednalo o nesprávnou rychlost jízdy či příliš vysoké otáčky motoru v důsledku náhlého podřazení automatické převodovky. Řazení bylo ponecháno automaticce DSG převodovky, z testovaných aut disponovala manuálním řízením pouze Škoda Citigo.

Experiment byl prováděn tak, aby jízdní podmínky na všech zkušebních drahách probíhaly shodně. Otáčky spalovacích motorů jsou blíže uvedeny v tabulce 44 v příloze DP. Pokud pro konkrétní rychlost automatika vozu zvolila jiný než uvedený převodový stupeň, bylo měření ze souboru hodnocených dat vyřazeno. Za zdůraznění stojí relativně nízké otáčky motoru a současně zařazený vysoký rychlostní stupeň v celém rychlostním pásmu, v kterém byl experiment proveden, což souvisí s továrním nastavením automatiky DSG převodovky na co nejnižší měrnou spotřebu pohonných hmot. Při rovnoměrně přímočarému pohybu nejsou kladeny příliš vysoké nároky na aktuální výkon motoru, ostatně průjezd vozidel

probíhal po rovině. V případě elektroaut nejsou otáčky uváděny, protože automobily jsou opatřeny jednostupňovými převodovkami, a otáčky rostou vždy lineárně s rychlostí automobilu a nejsou předmětem zobrazovaných dat na displeji vozidla.

Teoretické východisko na základě literární rešerše předpokládá u hluku pneumatik významnější vliv povrchu zkušebních drah, než tomu bylo na hluk motoru (den Boer et Schroten, 2007). Testovací dráhy byly celkem tři, s certifikovaným povrchem, hrubým povrchem a s dlažebními kostkami. Prvotním srovnáním výsledků měření zjišťujeme, že je to právě druh obrusné vrstvy, který měl na výsledné hladiny akustického tlaku největší vliv. Rozdíly v měření mezi kategoriemi spalovacích a elektrických motorů jsou významně nižší (do 2,8 dB), než při porovnání těch samých vozidel na různých testovacích dráhách (rozdíly 4 až 10 dB). Pokud výsledky experimentu porovnáme s jinými zahraničními výzkumy (Van Keulen et Duškov, 2005; Liu et al., 2016, Cesbron et al., 2021), zjišťujeme, že z hlediska vlivu povrchů komunikace dosahujeme horní hranice dříve popsaných rozdílů.

V kategorii malých vozidel (Škoda Citigo) zjišťujeme, že vůz vybavený elektrickým motorem byl na certifikované dráze hlučnější v celém rychlostním rozsahu (tabulka 18). Na hrubém povrchu pozorujeme nevýznamné snížení hlučnosti ve prospěch elektroautomobilu pouze v rychlosti 30 km/h. Výsledky experimentu jsou tak v protikladu s teoretickým východiskem (Campello-Vicente et al., 2017), které předpokládá nižší hladiny hluku pro elektroautomobily v celém rychlostním pásmu, zejména pak v nižších rychlostech, kde se tolik neprojevují akustické emise pneumatiky, ale pouze hluk motoru (Křivánek et Huzlík, 2012). Rozdíly oproti literatuře lze vysvětlit jednak tím, že v experimentu byla použita novější vozidla, přičemž s obměnou vozového parku hlučnost vozu klesá (Ládyš, 2019; MZd, 2019). Dále je patrný významný rozdíl pohotovostní hmotnosti, 301 kg v neprospěch ELE varianty a s tím souvisejících širších pneumatik (tabulka 6), což koresponduje s tím, že elektrické Citigo bylo významně hlučnější až ve vyšších rychlostech od 80 km/h včetně.

Tabulka 18: Porovnání výsledků měření L_{Amax} – segment A

Kategorie: segment A (Citigo)	Rychlost [km/h]						
	Rozdíl hlučnosti ELE vs. ICE L_{Amax} [dB]						
Povrch:	30	50	80	100	110	130	150
certifikovaný	+0,4	+0,2	+1,8	+2,0	+2,3	x	x
hrubý	-0,3	+0,6	+1,3	+2,0	+2,3	x	x
dlažeb. kostky	+0,2	-0,3	x	x	x	x	x

Oproti tomu u kategorie nižší střední třídy (segment C), zastoupené vozem Škoda Octavia, bylo na všech testovacích dráhách použito automobilu se shodným typem pneumatiky o stejné velikosti (tabulka 7). Rozdíl je opět v hmotnosti, která u vozu s elektrickým (hybridním) pohonem byla o více než 200 kg vyšší než u ICE vozidla. Vnější hlučnost vozidla během průjezdu se zde přibližuje teorii (Campello-Vicente et al., 2017), od nejvýznamnějšího rozdílu hladin akustického tlaku ve prospěch elektroaut v nízkých rychlostech po zanedbatelné rozdíly ve vyšších rychlostech (tabulka 19). Ačkoliv Škoda Octavia ve své hybridní verzi může jako pohonné ústrojí použít výlučně jenom spalovací motor nebo pouze elektromotor, a mohla by tak sloužit pro měření hlučnosti ICE i ELE pohonu, čímž by hmotnost vozu byla shodná u obou pohonů, nebylo této možnosti zvoleno. Důvodem je, že při jízdě na spalovací motor je současně nabíjen akumulátor, což by oproti čistě spalovací verzi při shodné rychlosti vyvolávalo vyšší nároky na aktuální výkon TSI spalovací jednotky.

Tabulka 19: Porovnání výsledků měření L_{Amax} – segment C

Kategorie: segment C (Octavia)	Rychlost [km/h]						
	Rozdíl hlučnosti ELE vs. ICE L_{Amax} [dB]						
Povrch:	30	50	80	100	110	130	150
certifikovaný	-0,7	-0,1	+0,2	+0,2	x	+0,1	x
hrubý	-0,8	-0,5	-0,5	-0,6	x	-1,3	x
dlažeb. kostky	-0,6	-0,5	x	x	x	x	x

Poslední hodnocenou kategorií segmentu D/J zastupovala Škoda Kodiaq a Škoda Enyaq. Elelektroautomobil byl podobně jako u předchozí kategorie o 200 kg těžší. Pneumatiky osazené z tovární výroby byly v neprospěch ELE vozu, o větším průměru i vyšší hlučnosti (tabulka 8). Ačkoliv elektroautomobil ve vzdálenosti 7,5 m

od osy jízdního pruhu působil větší zátěží akustickým tlakem v celém rychlostním pásmu (tabulka 20), jedná se o jediné párové měření, které plně koresponduje s teoretickým východiskem (Křivánek et Huzlík, 2012), podle kterého se nejvyšší rozdíly měly projevit na jízdní dráze o nejnižší hlučnosti, neboť na hrubším povrchu je dominantní hluk pneumatik.

Tabulka 20: Porovnání výsledků měření L_{Amax} – segment D/J

Kategorie: segment D/J (Kodiaq/Enyaq)	Rychlost [km/h]						
	Rozdíl hlučnosti ELE vs. ICE L_{Amax} [dB]						
Povrch:	30	50	80	100	110	130	150
certifikovaný	-0,6	+1,1	+2,8	+2,2	x	+2,4	+2,5
hrubý	+0,8	+1,6	+0,8	+0,7	x	+0,4	x
dlažeb. kostky	+0,2	+0,3	x	x	x	x	x

Uvedené maximální hladiny akustického tlaku A L_{Amax} představují vždy hodnotu pro nejhluchnější jednu sekundu během průjezdu a slouží pro porovnání hlučnosti z průjezdu automobilů dle mezinárodní technické normy (ČSN ISO 11819-1). V návaznosti na citovanou normu lze hlavní prezentaci výsledků u odborné literatury (Stahlfest et al., 2015; Campello-Vicente et al., 2017; Cesbron et al., 2021) najít opět v podobě hladin L_{Amax} , při výšce mikrofону 1,2 m nad zemí. Z hlediska posouzení akustické zátěže působené hlukem z dopravy se hodnotí ekvivalentní hladina akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$ (ČSN ISO 1996-1 a -2; NV 272/2011 Sb.). Pokud není známé rozmístění obytné zástavby, vůči které se hluk posuzuje, umisťuje se referenční místo příjmu do vzdálenosti 7,5 m od osy vozovky a do výšky 3,0 m nad povrch terénu (MŽP, 1996). Dosazením dat získaných v rámci experimentu DP do myšlené lokality, na které je demonstrován vliv elektroautomobilů na změnu hlukové zátěže, nebylo jejich zapojením do dopravního proudu zjištěno snížení hluku z dopravy.

Tabulka 21: Porovnání ekvivalentních hladin $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – certif. povrch

Certifikovaný povrch	Rychlost [km/h]				
	$L_{Aeq,16h}$ [dB]				
Zastoupení druhu pohonu	30	50	80	100	110-130
100% ICE	referenční hladina 0,0				
50% ICE, 50% ELE	-0,1	+0,5	+0,8	+0,9	+0,8
100% ELE	-0,2	+1,0	+1,5	+1,6	+1,6

Dostupná literatura zabývající se vnější hlučností elektromobilů obvykle neudává jejich hlukové parametry L_{AE} ani ekvivalentní hladiny L_{Aeq} , ale zaměřuje se zejména na maximální hladiny L_{Amax} (Křivánek et Huzlík, 2012; Stahlfest et al., 2015; Campello-Vicente et al., 2017). Porovnáním výsledků experimentu DP zjišťujeme, že všechny zmíněné hlukové charakteristiky mají podobný trend a jsou tak vzájemně porovnatelné. Změna hlučnosti dopravního proudu v závislosti na druhu pohonu automobilu popsána v experimentální části DP je ve shodě s experimentem (Stahlfest et al., 2015). Na intervalu rychlostí, kde se oba experimenty překrývají (přibližně 30 až 80 km/h), je popisována stejná hluková zátěž ELE/ICE při spodním intervalu rychlosti automobilu, dále s rostoucí rychlostí vyšší hlučnost elektroautomobilů.

Tabulka 22: Porovnání ekvivalentních hladin $L_{Aeq,16h}$ (denní doba) – hrubý povrch

Hrubý povrch	Rychlost [km/h]				
Zastoupení druhu pohonu	$L_{Aeq,16h}$ [dB] [dB]				
	30	50	80	100	110-130
100% ICE	referenční hladina 0,0				
50% ICE, 50% ELE	+0,3	+0,5	+0,4	+0,2	+0,4
100% ELE	+0,5	+1,0	+0,7	+0,5	+0,7

Podobný trend s literaturou (Křivánek et Huzlík, 2012; Campello-Vicente et al., 2017) lze najít opět u nižší rychlosti, 30 km/h, kde se nejméně projevuje zvuk pneumatik, a je tak patrné snížení až o 0,2 dB při dopravním proudu tvořeném ze 100% elektroautomobilů vůči dopravě působené pouze vozy s konvenčním spalovacím motorem. Na druhou stranu citované zdroje pro rychlost 30 km/h udávají snížení o 2,0 až 2,7 dB ve prospěch ELE automobilů, což je více, než prokázal experiment DP, a navíc shodně udávají snížení hlučnosti i ve vyšších rychlostech, byť minimální, protože se jedná o pásmo, kde převažuje hluk pneumatik. Ve skutečném provozu na veřejných pozemních komunikacích bude dále hluk ELE automobilů v nejnižších rychlostech do 20 km/h ovlivněn zařízením AVAS (Nařízení EP a rady EU č. 540/2014). Pro účely experimentu DP bylo provedeno porovnání celkové vnější hlučnosti automobilu s aktivovaným i deaktivovaným zdrojem výstražného hluku. Zde je patrné nevhodné, pouze jednostranné akustické působení na levou stranu od směru jízdy, směrem do vozovky, nikoliv směrem ke zranitelným účastníkům silničního provozu. Vlevo od automobilu je při chodu zařízení AVAS hlučnost automobilu téměř o 6 dB vyšší, což z pohledu energie zvukové vlny znamená její čtyřnásobek (Smetana, 1998), tedy dostatečný rozdíl k zaznamenání

lidským sluchovým orgánem. Naopak napravo od automobilu je rozdíl pouze 1,2 dB, který zaznamená jenom jedinec s citlivějším sluchem (Hellmuth et al., 2016).

Tabulka 23: Porovnání výsledků měření L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV vč. AVAS, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Octavia PHEV		Pohon	ELE
Povrch	certifikovaný		Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m
Rychlost [km/h]	20 pozn.: bez AVAS		20 pozn.: vč. AVAS	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P
Výsledná L_{Amax} [dB]	49,9	50,0	55,8	51,2
	49,9		54,0	

Dále je nutné porovnat dobu, kdy se uvedené experimenty odehrály, tj. k jaké generaci automobilů se vážou, v kontextu s tím, že se v průběhu času, ruku v ruce s technickým pokrokem či zpřísňujícími se požadavky, snižuje i hluk automobilů s konvenčním pohonem (Ládyš, 2019; MZd, 2019). Nejlépe je to patrné srovnáním s dánským měřením hluku (Stahlfest et al., 2015), kde je hlučnost pro kategorii spalovacích aut asi o 5 dB vyšší, než u srovnatelných automobilů použitých v rámci experimentu DP, které byly vyrobeny v roce 2020. Porovnáním s výsledky této DP lze odvodit, že hluk ICE automobilů se postupně snižuje, čímž se zároveň snižují rozdíly mezi oběma sledovanými kategoriemi ICE a ELE, protože hlučnost elektroautomobilů v čase klesá méně. Dále to dokládá měření provedené na vzorku ELE vozů počínaje rokem výroby 2016 (Cesbron et al., 2021), jejichž akustické parametry jsou téměř shodné s novějšími elektromobily použitými v rámci experimentu DP. Obecně lze na základě výsledků DP porovnáním s literaturou konstatovat (Verheijen et Jabben, 2010), že čím starší je publikace porovnávající hlučnost ELE a ICE vozidel, tím větší je rozdíl mezi oběma sledovanými kategoriemi ve prospěch elektromobility.

Dalším z faktorů ovlivňující interpretaci výsledků experimentu DP je nejistota měření, která je při použití I. třídy přesnosti zvukoměrů a měření hluku z dopravy $U = \pm 2$ dB (MŽP, 1996; SZÚ, 2003). Dílčí nejistota daná měřicími přístroji je za použití zvukoměrné aparatury třídy přesnosti I. $u_i = 0,7$ dB (SZÚ, 2003). Je zřejmé, že zjištěné rozdíly mezi hlučností jednotlivých vozidel částečně leží v pásmu nejistoty měření.

Prezentovaná akustická data byla v souladu s mezinárodními postupy (ČSN ISO 11819-1, ČSN ISO 1996-1 a -2) vážena váhovým filtrem A, který koriguje naměřené hodnoty podle jejich frekvenčního průběhu tak, aby uváděná hladina akustického signálu co nejlépe odpovídala tomu, jak je rušivá pro lidský sluch (Nový, 2009). Korekce váhového filtru A je nejvýznamnější v oblasti nízkých frekvencí. Skutečná energie zvukového signálu je vyšší, než jsou uváděné hodnoty L_{Aeq} a L_{Amax} , zvláště leží-li dominantní složky zvuku na kmitočtu pod 250 Hz, což je patrné z obrázku 2. Každý testovaný automobil vykazoval odlišnou frekvenční charakteristiku, přičemž nejvýznamnější trendy jsou zachyceny na obrázcích 19 až 21 v příloze DP. Uváděné spektrum zvukového signálu je bez korekce váhového filtru. U elektromobilů byla maxima frekvenčního průběhu zaznamenána na kmitočtech od 250 Hz do 800 Hz, zatímco u konvenčních vozů v oblasti 50 Hz až 100 Hz, tj. dominantní zvukové složky ICE vozidel se nacházejí v oblasti spektra, kde váhový filtr A odečítá až 40 dB. Naproti tomu u kategorie ELE se špičky objevují v oblasti, kde je odečet řádově nižší, kolem 10 dB. Význam váhového filtru nelze opomenout, protože primární motivací u měření hlukové zátěže je vždy vliv zvuku na lidský, resp. jakýkoliv jiný organismus (den Boer et Schroten, 2007), ale porovnávali bychom-li jenom nevážená hluková data, vyznělo by celkové srovnání hlučnosti ICE a ELE automobilů odlišně.

7. ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE

Provedený experiment objasnil rozdíly mezi hlučností ELE a ICE automobilů v rychlostech jízdy od 30 km/h až po 110-150 km/h, tj. v rychlostním intervalu, který pokrývá obvyklou cestovní rychlost od zastavěného prostředí po extravilán. V běžném prostředí je akustická zátěž z dopravního proudu ovlivněna dílčími hlukovými parametry každého projíždějícího automobilu, kterých na pozemních komunikacích jezdí řádově stovky různých továrních typů, navíc s odlišnou dobou jejich výroby. Pro experiment v rámci DP bylo s ohledem na rozsah práce a dostupné technické prostředky zvolen zástupný vzorek osobních automobilů od nejmenších vozidel po střední třídu/SUV. Všechna použitá vozidla byla vyrobena v roce 2020 a byla od shodného výrobce ŠKODA Auto a.s., tj. představují shodnou generaci vozidel a díky tuzemskému výrobcovi i vhodně zvolený vzorek automobilů s přihlédnutím na jejich zastoupení v běžném vozovém parku v ČR i jinde na území EU.

S ohledem na významnou roli obrusných vrstev na výsledné hladiny hluku z projíždějících vozidel bylo měření hlučnosti realizováno na třech odlišných jízdnicích dráhách, od certifikovaného asfaltového koberce, přes hrubý asfaltový koberec až po dlažební kostky. Přínos této DP spočívá mimo jiné v prokázání, že u současné generace automobilů má na hlučnost při průjezdu významně větší vliv druh obrusné vrstvy než typ pohonné jednotky. Celkově se vliv elektromobilů na snížení hluku v okolí pozemní komunikace neprokázal, kromě kategorie nižší střední třídy (segment C), kde bylo patrné snížení maximálních hladin akustického tlaku $A_{L_{Amax}}$ v celém rychlostním rozsahu ve prospěch Škody Octavia s elektromotorem ve srovnání s její verzí s motorem spalovacím. Následnými výpočty z dílčích náměrů během jednotlivých průjezdů byla odhadnuta ekvivalentní hladina akustického tlaku $A_{L_{Aeq,T}}$ v referenčním bodě u pozemní komunikace, pro dopravní proud s nulovým zastoupením elektroautomobilů, po dopravu zastoupenou pouze ELE kategorií. V tomto případě se projevilo energetické průměrování, neboť simulovaný dopravní proud byl tvořen shodným počtem od každého zástupce segmentu A, C a D/J. Na certifikované obrusné vrstvě se vyšší zapojení ELE vozidel do dopravního proudu při rychlosti 30 km/h projevilo snížením hlukové zátěže v denní i noční době, v ostatních případech byl hluk elektroautomobilů vyšší.

Výsledky této DP porovnáním napříč odbornou literaturou dokládají, že zkoumané automobily se spalovacím motorem, vyrobené v roce 2020, vykazují nižší akustické emise než srovnatelné vozy o stejném druhu pohonu, ale staršího

továrního data výroby. Dřívější experimenty zároveň při srovnání hlučnosti ELE a ICE vozidel zaznamenaly významnější snížení hlučnosti ve prospěch elektromobilů, než bylo zjištěno v rámci této DP, což mimo jiné souvisí s tím, že předcházející generace konvenčních vozů se spalovacím motorem byly hlučnější než ty současné. Oproti tomu vnější akustické parametry elektroautomobilů zůstávají podobné bez ohledu na jejich rok výroby, konstatováno opět na základě srovnání výsledků DP se staršími zahraničními experimenty. Při vyšších rychlostech narůstá význam hluku pneumatik, na který nemá pohon vozidla přímý vliv. Zároveň vyšší hmotnost elektromobilů ve srovnání ICE automobily v důsledku vezeného akumulátoru klade vyšší nároky na rozměry pneumatik, což má za následek vyšší akustické emise při odvalování pneumatik, patrné zejména ve vysokých rychlostech. Je zřejmé, že budoucí technický vývoj ELE automobilů, kterým by bylo dosaženo redukce jejich hmotnosti, by významně přispěl i k dalšímu snížení hlukové zátěže ze silniční automobilové dopravy.

Komplexnější srovnání by přinesl experiment, ve kterém by bylo zastoupeno větší množství automobilů různých výrobců a dat výroby, což je zadání nad rámec běžného rozsahu DP. Pro další výzkum akustiky v oblasti silniční automobilové dopravy lze doporučit se v rámci experimentů zaměřit i na jízdní situace při akceleraci a decelaci. Experiment DP byl z důvodu opakovatelnosti měření a shodných jízdních podmínek prováděn za konstantní rychlosti. Zejména měření hluku při zrychlování automobilu v nižších rychlostech, kde se tolik neprojevuje hluk pneumatik, ale pouze pohonné jednotky, by mohlo přinést nové poznatky na vliv elektromobility na snížení hlukové zátěže ve městech. Obtížné se zde jeví zejména zasazení do kontextu běžně dostupných hlukově-dopravních podkladů, protože pro dílčí komunikace se uvádí obvykle jenom průměrná rychlost dopravního proudu a způsob akcelerace je individuální pro každý styl jízdy. S ohledem na zvyšující se zastoupení elektrického pohonu i pro kategorie jiných než osobních automobilů, lze dále doporučit výzkum hlučnosti ELE dodávkových a nákladních vozů, poté co se stanou běžnou součástí dopravního proudu na pozemních komunikacích.

8. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

Odborné publikace

- Adams G., Kamst F., Pugh S., Claughton D., 2006: Dynamic Measurement of Tyre/Road Noise. 29th Australasian Transport Research Forum. 12 s.
- Bendtsen H., 2009: Highway noise abatement – Planning tools and Danish examples. Danish Road Institute, Copenhagen, 55 s.
- Campello-Vicente H., Peral-Orts R., Campillo-Davo N., Velasco-Sanchez E., 2017: The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics* 116 (2017). P. 59–64.
- Cesbron J., Bianchetti S., Pallas M., Le Bellec A., Gary V., Klein P., 2021: Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. *De Gruyter Noise Mapp.* 8/2021. P. 217-227.
- Den Boer E., Schroten A., 2007: Traffic noise reduction in Europe. CE Delft, Delft, 64 s.
- Fiedler J., 2019: Hluk od dopravy a nové druhy směsí do obrusné vrstvy – poznatky z Francie. *Silnice + mosty* 3/2019. S. 10–12.
- Finch D., Schofield H., Mathews F., 2020: Traffic noise playback reduces the activity and feeding behaviour of free-living bats. *Environmental Pollution Volume* 263, Part B, P. 1–7.
- Freitas E., Pereira P., de Picado-Santos L., Santos, A., 2009. Traffic noise changes due to water on porous and dense asphalt surfaces. *Road Materials and Pavement Design*, 10/3. P. 587–607.
- Haider M., Conter M., Wehr R., 2012: Tyre/road noise at low speeds. *Internoise* 08/2012. 8 s.
- Hellmuth T., Potužníková D., Junek P., Fiala Z., 2016: Obtěžování hlukem: zdravotní problém nebo akustický komfort? *Hygiena* 61/1. S. 33–35.
- Heutschi K., Bühlmann E., Oertli. J., 2016: Options for reducing noise from roads and railway lines. *Transportation Research Part A* 94. P. 308–322.
- Hua X., Thomas A., Shultis K., 2021. Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress* Vol. 104(1). P. 1–11.
- Kaseloo P., 2006: Synthesis of noise effects on wildlife populations. *Proceedings of the 2005 International Conference on Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh. P. 33–35.
- Kaseloo P., Tyson K., 2004: Synthesis of Noise Effects on Wildlife Populations. Report No. FHWA-HEP-06-016. Department of Biology, State University Virginia, Petersburg. 75 s.
- Keken Z., Ježek M., Kušta T., 2011: Vliv silnic a silniční dopravy na životní prostředí a definování plochy přímého impaktu. *Acta Pruhoniciana* 99, S. 183–188.

- Kozák J., 1998: Metodika měření hluku ze silniční dopravy. In Smetana C., 1998: Hluk a vibrace měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha, 188 s.
- Křivánek V., Stryk J., Jedlička J., 2016: Čištění nízkohlučných povrchů vozovek a změna jejich hlučnosti na území ČR sledovaná metodou CPX. Hygiena 61/4. S. 152–156.
- Křivánek V., Marková P., Valentin J., 2018: Hlučnost povrchů pozemních komunikací a jejich akustická charakterizace metodou CPX dle technických podmínek TP 259. Akustika 30/2018. S. 64–73.
- Křivánek V., Potužníková D., Valentin J., 2019a: Hodnocení hlučnosti obrusných vrstev asfaltových vozovek – uplatnění postupu dle TP 259. Silnice + mosty 1/2019. S. 28–31.
- Křivánek V., Marková P., Effenberger K., 2019b: Dlouhodobá změna hlučnosti povrchů pozemních komunikací a jejich hodnocení. Hygiena 64(1), S. 5–9.
- Liberko M., 2004: Hluk v prostředí: problematika a řešení. Ministerstvo životního prostředí, Praha, 25 s.
- Liu M., Huang X., Xue G., 2016: Effects of double layer porous asphalt pavement of urban stress on noise reduction. International Journal of Sustainable Built Environment 5. P. 183–196.
- Morgan P., 2006: Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces. FEHRL Report 2006/02, Brusel. 318 s.
- Neubergová K., Vašica D., 2013: Protihlukové stěny v naší krajině. In. Drobilová L. (ed.): Venkovská krajina 2013. Sborník z 11. ročníku mezinárodní mezioborové konference konané 17.–19. května 2013 v Hostětíně. S. 109–114.
- Nový, R., 2009: Hluk a chvění. České vysoké učení technické, Praha, 400 s.
- Ögren M., Molnár P., Barregard L., 2018: Road traffic noise abatement scenarios in Gothenburg 2015 – 2035. Environmental research 164. P. 516–521.
- Pardo-Ferreira M., Rubio-Romeroa J., Galindo-Reyesb F., Lopez-Arquillosa F., 2020: Work-related road safety: The impact of the low noise levels produced by electric vehicles according to experienced drivers. Safety Science 121 (2020). P. 580–588.
- Peeters B., van Blokland G., 2018: Decision and cost/benefit methods for noise abatement measures in Europe. M+P raadgevende ingenieurs BV, Vught, 70 s.
- Plesník J., 2017: Hluk ohrožuje přírodu v amerických chráněných územích. Ochrana přírody 4/2017. S. 3–5.
- Praticò F., Anfosso-Lédée F., 2012: Trends And Issues In Mitigating Traffic Noise Through Quiet Pavements. Procedia – Social and Behavioral Sciences 53. P. 203–212.
- Řiháček T., 2007: Rozmrzelost z hluku: Konceptualizace a prediktory psychosociální povahy. Československá psychologie 51/2. S. 117–128.

- Sandberg U., 2001: Tyre/road noise – Myths and realities. VTI Särtryck 345/2001. P. 1–22.
- Shannon G., Angeloni L., Wittemyer G., Fristrup K., 2014: Road traffic noise modifies behaviour of a keystone species. *Animal Behaviour* 94. P. 135-141.
- Smetana C., 1998: Hluk a vibrace měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha, 188 s.
- Stahlfest R., Skov H., Molle Iversen L., 2015. Noise from electric vehicles – Measurements. Danish Road Directorate, Copenhagen, 37 s.
- Vaitkus A., Vorobjovas V., Andriejauskas T., 2016: Traffic/road noise mitigation under modified asphalt pavements. *Transportation Research Procedia* 14. P. 2698 – 2703.
- Van Keulen W., Duškov M., 2005: Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise. IPG, Delft. 106 s.
- Vaverka J., Kozel V., Ládyš. L., Liberko M., Chybík J., 1998: Stavební fyzika 1. Urbanistická, stavební a prostorová akustika. Vysoké učení v Brně, 343 s.
- Verheijen E., Jabben J., 2010: Effect of electric cars on traffic noise and safety. National institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 2010. 29 s.
- Yosef R., Kumbhojkar S., Sharma S., Morelli F., 2021: Electric vehicles minimize disturbance to mammals. *European Journal of Wildlife Research* 2021. P. 67–74.

Legislativní zdroje a normy

- ČSN ISO 10844: Akustika – Specifikace zkušebních drah pro měření hluku vyzařovaného silničními vozidly a jejich pneumatikami. Český normalizační institut, Praha, 2015. 48 s.
- ČSN ISO 11819-1: Akustika – Měření vlivu povrchů vozovek na dopravní hluk – Část 1: Statistická metoda při průjezdu. Český normalizační institut, Praha, 2000. 28 s.
- ČSN ISO 11819-2: Akustika – Měření vlivu povrchů vozovek na dopravní hluk – Část 2: Metoda malé vzdálenosti. Český normalizační institut, Praha, 2018. 64 s.
- ČSN ISO 1996-1: Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí – Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení. Český normalizační institut, Praha, 2017. 48 s.
- ČSN ISO 1996-2: Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí – Část 2: Určování hladin akustického tlaku. Český normalizační institut, Praha, 2018. 57 s.
- ČSN ISO 1999: Akustika – Odhad ztráty sluchu vlivem hluku. Český normalizační institut, Praha, 2014. 24 s.
- ČSN ISO 3891: Akustika – Postup pro popis leteckého hluku vnímaného na zemi. Český normalizační institut, Praha, 1994. 40 s.

- International Civil Aviation Organization, 2017: Annex 16. Environmental Protection. ICAO, Montréal, 2017, 224 s.
- Rozhodnutí Komise ze dne 17. března 1999. Řízení o spojení čl. 6 odst. 1 písm. b).
- Nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č. 540/2014 ze dne 16. dubna 2014 o hladině akustického tlaku motorových vozidel a náhradních systémů tlumení hluku a o změně směrnice 2007/46/ES a o zrušení směrnice 70/157/EHS.
- Nařízení Komise v přenesené pravomoci EU ze dne 7. března 2019, kterým se mění nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č. 540/2014 o hladině akustického tlaku motorových vozidel a náhradních systémů tlumení hluku.
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/46/ES ze dne 5. září 2007 kterou se stanoví rámec pro schvalování motorových vozidel a jejich přípojných vozidel, jakož i systémů, konstrukčních částí a samostatných technických celků určených pro tato vozidla.
- Směrnice Rady EHS 70/157/EHS ze dne 6. února 1970 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se přípustné hladiny akustického tlaku a výfukového systému motorových vozidel.
- Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, v platném znění.
- Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, v platném znění.

Ostatní zdroje

- Bartoš L., Martolos J., 2012: TP 189 – stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích. EDIP s.r.o., 76 s.
- ČVUT, 2017: Technické podmínky – TP 259 Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností. ČVUT, Praha, 26 s.
- Keken Z., 2014: Hodnocení vlivu silniční infrastruktury na životní prostředí. ČZU, FŽP, Praha, 188 s. (disertační práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.
- Kušta T., 2011: Posouzení vlivu pozemních komunikací na mortalitu a migraci velkých savců. ČZU, FLD, Praha. 181 s. (disertační práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.
- Křivánek V., Huzlík J., 2012: Provoz, údržba a opravy silničních vozidel. Část II. Hluk z dopravy a stanovení koncentrací znečišťujících látek v ovzduší. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava/Univerzita Pardubice. 65 s.
- Křivánek V., Marková P., Stryk J., Jedlička J., Špička L., Effenberger K., 2017: Dlouhodobé hodnocení hlučnosti povrchů vozovek – Certifikovaná metoda. Centrum dopravního výzkumu, Brno, 2017. 52 s.
- Ládyš. L., 2019: Výpočet hluku z automobilové dopravy. Manuál 2018. Ekola Group s.r.o., Praha, 2019. 100 s.

- Ládyš L., Matoušek A., Blahník P., Matoušek P., Rejha V., Bartošová L., 2019: Akční hlukový plán pro hlavní pozemní komunikace ve správě ŘSD – 3. kolo. Středočeský kraj a aglomerace Praha. EKOLA group, spol. s r.o. Praha, 2019. 80 s.
- Máca V., Urban J., Melichar J., Křivánek V., 2012: Metodika oceňování hluku z dopravy. Univerzita Karlova v Praze – Centrum pro otázky životního prostředí, Praha, 28 s.
- MZd, 2002: Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. Věstník MZd 1/2002.
- MZd, 2010: Metodický návod pro hodnocení hluku v chráněném venkovním prostoru staveb. Č.j. : 62545/2010-OVZ-32.3-1. 11. 2010.
- MZd, 2017: Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. Věstník MZd 11/2017. S. 2–35.
- MZd, 2019: Metodické usměrnění pro zajištění jednotného postupu orgánů ochrany veřejného zdraví a zdravotních ústavů při posuzování, resp. realizaci výpočtů hluku z automobilové dopravy. Č.j.: MZDR 39345/2019/OVZ. 09. 2019.
- MŽP, 1996: Metodika měření hluku silniční dopravy. Zpravodaj MŽP 3/1996. S. 14–16.
- Národní referenční laboratoř pro komunální hluk, 2018: Odborné doporučení pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě, Ústí nad Orlicí. 33 s.
- Opekar M., 2020: Ověření účinnosti protihlukových opatření v silniční dopravě. ČZU, FŽP, Praha. 81 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.
- Státní zdravotní ústav, 2003: Autorizační návod AN 10/03. Odhad nejistoty výsledků fyzikálních měření. SZÚ, Praha, 14 s.
- Škoda Auto a.s., 2020a: Katalog Škoda Citigo. Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, 60 s.
- Škoda Auto a.s., 2020b: Katalog Škoda Citigo iV. Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, 4 s.
- Škoda Auto a.s., 2020c: Katalog Škoda Octavia. Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, 76 s.
- Škoda Auto a.s., 2020d: Katalog Škoda Kodyaq. Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, 81 s.
- Škoda Auto a.s., 2020e: Katalog Škoda Enyaq iV. Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, 74 s.
- U.S. Department of Transportation, 2011: Highway Traffic Noise: Analysis and Abatement Guidance. FHWA-HEP-10-025. USDOT, Washington D.C., 75 s.
- Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2016: Nebezpečný hluk. VÚBP, Praha, 22 s.

Internetové zdroje:

- Evropská komise, ©2022: Zero emission vehicles: first 'Fit for 55' deal will end the sale of new CO₂ emitting cars in Europe by 2035. Press release IP/22/6462 (online) [cit. 2022.12.27], dostupné z <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6462>.

9. PŘÍLOHY

9.1. Obrázky, grafy a fotografie

Obrázek 15: Detail povrchu zkušební dráhy – certifikovaný povrch



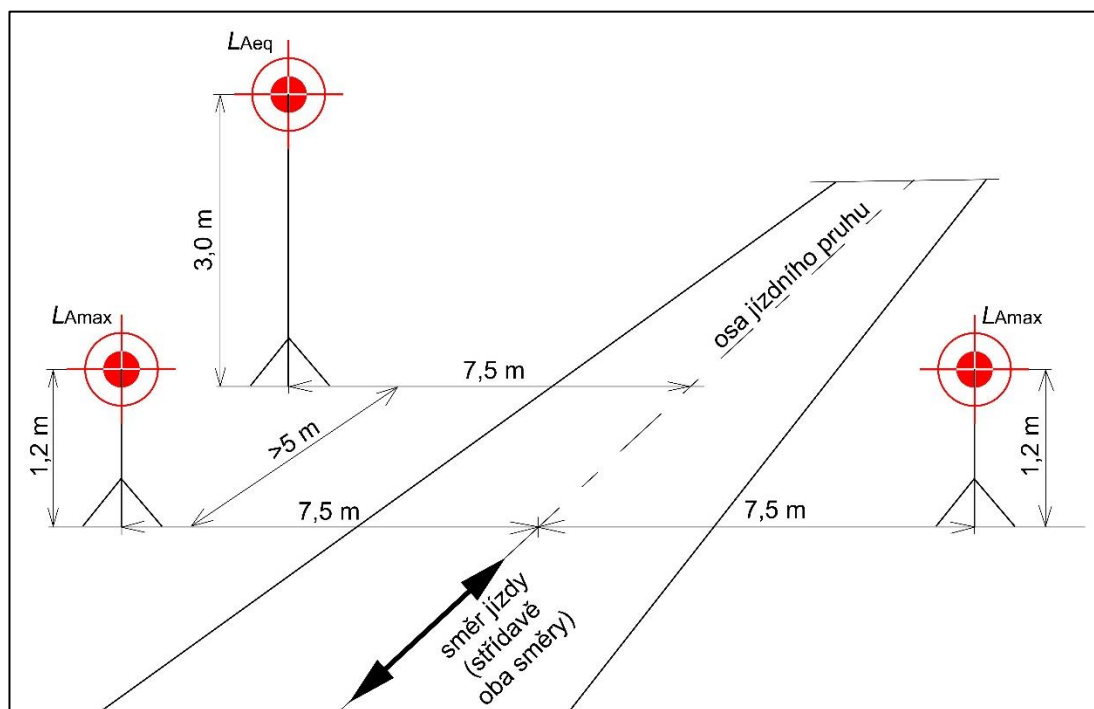
Obrázek 16: Detail povrchu zkušební dráhy – hrubý povrch



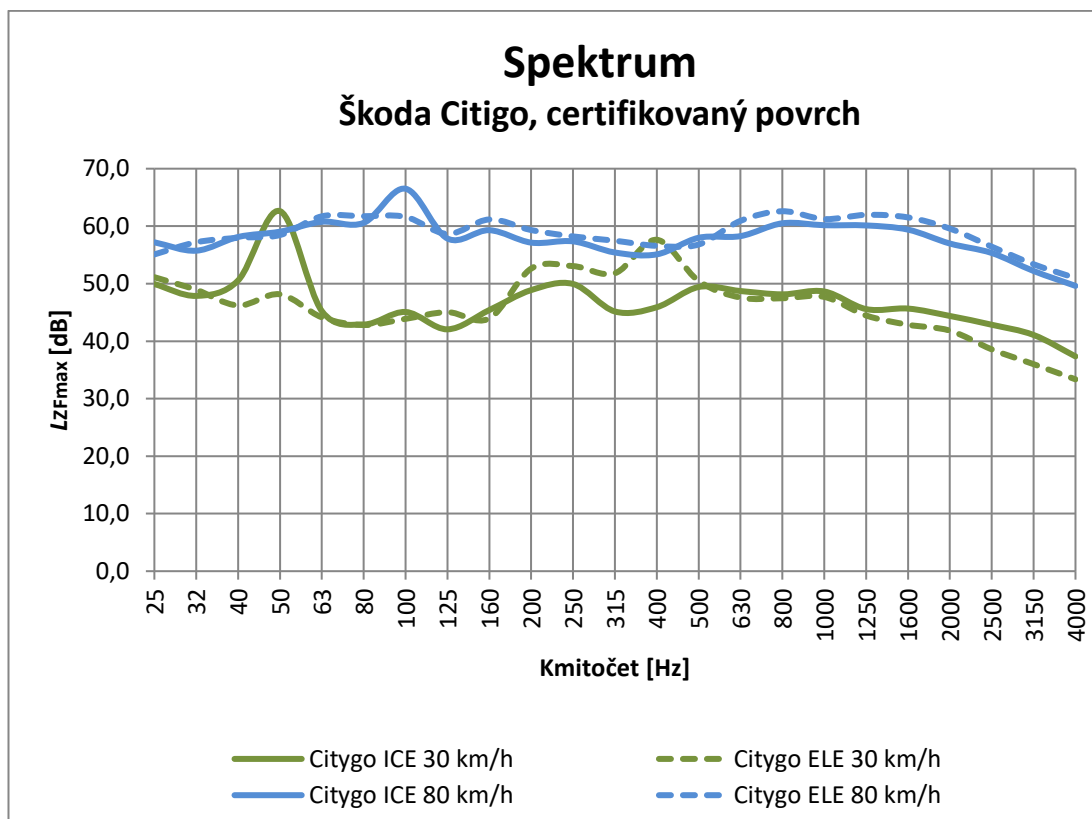
Obrázek 17: Detail povrchu zkušební dráhy – dlažební kostky



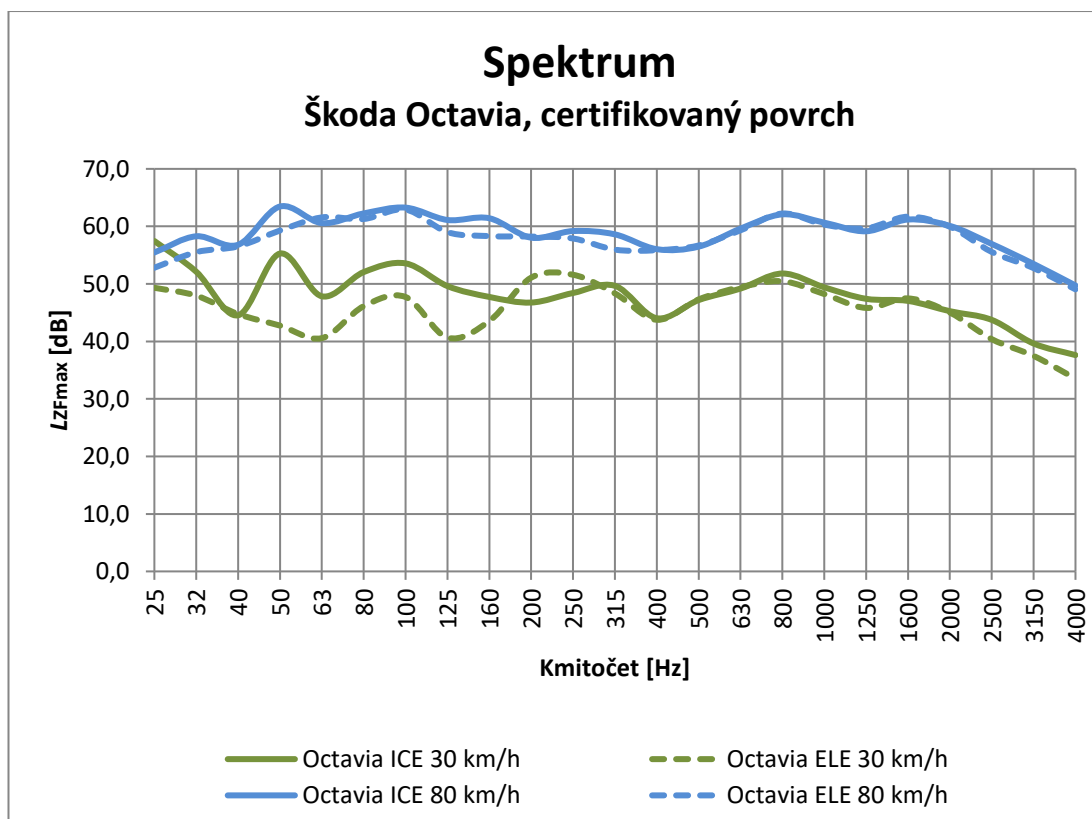
Obrázek 18: Grafické znázornění umístění měřících mikrofónů



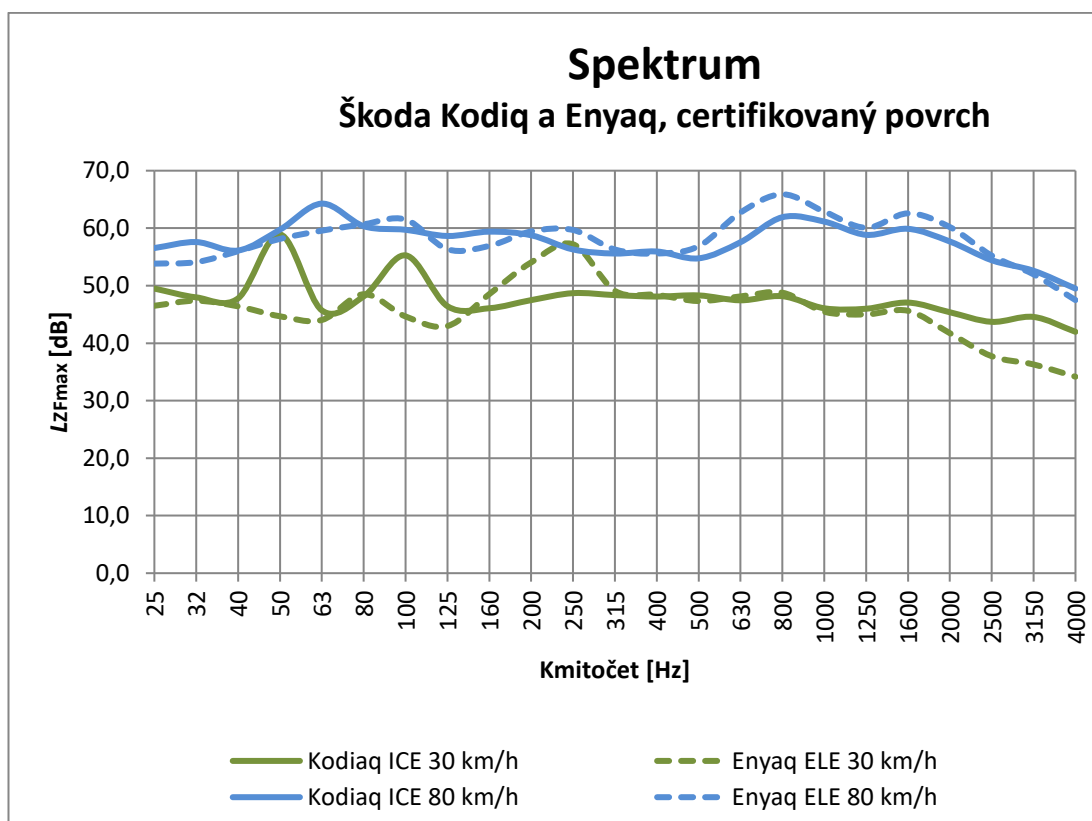
Obrázek 19: Průběh spektra L_{ZFmax} , Škoda Citigo, certifikovaný povrch



Obrázek 20: Průběh spektra L_{ZFmax} , Škoda Octavia, certifikovaný povrch



Obrázek 21: Průběh spektra L_{ZFmax} , Škoda Kodiq a Enyaq, cert. povrch



9.2. Tabulky

Tabulka 24: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo 1,0 MPI, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Citigo 1,0 MPI				Pohon		ICE (spalovací)			
Povrch	certifikovaný				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m			
Čas	15:47-16:05									
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		110	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	55,8	55,4	60,9	62,3	67,6	67,9	71,6	71,4	72,7	73,1
	56,4	58,8	62,7	61,3	68,1	67,7	71,5	71,8	73,6	72,9
	55,9	55,3	61,9	62,0	67,7	67,5	71,1	71,2	73,7	73,9
	56,1	55,0	62,0	62,3	67,7	68,2	71,8	71,8	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	56,1	56,4	61,9	62,0	67,8	67,8	71,5	71,6	73,4	73,3
	56,2		62,0		67,8		71,5		73,3	

Tabulka 25: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo iV, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Citigo iV				Pohon		elektrický			
Povrch	certifikovaný				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m			
Čas	15:47-16:05									
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		110	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	57,1	55,7	62,1	62,4	69,6	69,2	73,6	73,4	75,0	75,6
	56,7	56,5	62,4	61,8	69,2	69,8	72,8	73,8	75,2	76,3
	57,6	55,7	62,4	61,7	69,6	69,5	73,1	73,9	75,1	76,2
	56,9	56,1	62,2	62,3	69,7	69,8	73,4	73,9	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	57,1	56,0	62,3	62,1	69,5	69,6	73,1	73,8	75,1	76,0
	56,6		62,2		69,6		73,5		75,6	

Tabulka 26: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo 1,0 MPI, hrubý povrch

Vůz	Škoda Citigo 1,0 MPI				Pohon		ICE (spalovací)			
Povrch	hrubý				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m			
Čas	12:58-13:19									
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		110	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	60,8	61,3	67,1	67,6	76,6	75,8	79,0	79,5	80,6	80,0
	61,2	61,2	68,9	69,0	76,1	75,5	79,7	79,8	80,5	80,4
	59,7	60,0	67,6	67,6	76,5	75,6	79,3	77,3	x	x
	59,5	60,2	68,3	68,4	75,9	76,3	79,5	79,4	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	60,4	60,7	68,0	68,2	76,3	75,8	79,4	79,1	80,6	80,2
	60,5		68,1		76,1		79,2		80,4	

Tabulka 27: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Citigo iV, hrubý povrch

Vůz	Škoda Citigo iV				Pohon		elektrický			
Povrch	hrubý				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m			
Čas	14:39-14:53									
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		110	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	60,2	61,2	68,4	69,0	77,6	77,2	81,3	81,1	82,9	82,4
	60,0	60,3	68,4	69,4	77,3	77,1	80,8	80,5	x	x
	59,6	59,9	68,3	68,8	77,3	77,7	81,5	81,7	x	x
	60,2	60,4	68,3	69,2	x	x	x	x	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	60,0	60,5	68,4	69,1	77,4	77,3	81,2	81,1	82,9	82,4
	60,2		68,7		77,4		81,2		82,7	

Tabulka 28: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia 1,5 TSI, certif. povrch

Vůz	Škoda Octavia 1,5 TSI				Pohon		ICE (spalovací)			
Povrch	certifikovaný				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m			
Čas	10:30-11:03									
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	57,0	56,5	63,2	62,4	68,7	68,5	71,9	71,6	75,2	75,6
	56,8	55,7	62,7	62,8	68,5	67,9	71,7	71,3	76,0	75,4
	56,2	57,1	62,7	62,8	68,5	68,9	71,7	71,5	x	x
	56,8	55,3	62,6	61,7	68,4	67,5	71,0	71,9	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	56,7	56,2	62,8	62,4	68,5	68,2	71,6	71,6	75,6	75,5
	56,5		62,6		68,4		71,6		75,6	

Tabulka 29: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Octavia PHEV				Pohon	elektrický					
Povrch	certifikovaný				Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas	16:38-16:54										
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130		
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	
$L_{Amax,i}$ [dB]	55,4	55,8	62,6	62,3	68,9	68,5	71,6	71,8	75,0	74,7	
	55,8	55,9	62,4	62,6	68,5	68,4	71,9	72,2	76,1	76,7	
	56,2	55,5	62,7	62,3	68,9	68,7	71,7	71,6	x	x	
	55,7	55,7	62,5	62,6	68,3	68,7	71,9	71,6	x	x	
Výsledná L_{Amax} [dB]	55,8	55,7	62,6	62,5	68,7	68,6	71,8	71,8	75,6	75,8	
	55,8		62,5		68,6		71,8		75,7		

Tabulka 30: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia 1,5 TSI, hrubý povrch

Vůz	Škoda Octavia 1,5 TSI				Pohon	ICE (spalovací)					
Povrch	hrubý				Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas	11:41-12:07										
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130		
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	
$L_{Amax,i}$ [dB]	62,9	x	71,3	x	79,2	x	83,4	x	87,6	x	
	63,7	x	71,1	x	80,0	x	83,0	x	x	x	
	62,7	x	71,4	x	79,3	x	83,4	x	x	x	
	63,0	x	71,6	x	80,3	x	83,2	x	x	x	
Výsledná L_{Amax} [dB]	63,1	x	71,4	x	79,7	x	83,3	x	87,6	x	
	63,1		71,4		79,7		83,3		87,6		

Tabulka 31: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV, hrubý povrch

Vůz	Škoda Octavia PHEV				Pohon	elektrický					
Povrch	hrubý				Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas	14:16-14:34										
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130		
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	
$L_{Amax,i}$ [dB]	62,7	61,9	70,9	70,6	79,0	78,8	83,1	82,0	87,0	85,5	
	62,4	62,8	70,6	71,3	79,9	78,8	82,6	82,9	x	x	
	62,0	62,0	71,3	70,7	79,9	78,6	83,3	82,1	x	x	
	x	62,5	x	x	x	x	82,9	82,4	x	x	
Výsledná L_{Amax} [dB]	62,4	62,3	70,9	70,9	79,6	78,7	83,0	82,4	87,0	85,5	
	62,3		70,9		79,2		82,7		86,3		

Tabulka 32: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Kodiaq 2,0 TSI, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Kodiaq 2,0 TSI				Pohon	ICE (spalovací)						
Povrch	certifikovaný				Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m						
Čas	16:10-16:35											
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130		150	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	54,8	56,4	61,5	61,4	67,6	68,2	71,2	71,1	75,6	75,2	77,8	77,5
	55,4	57,1	61,6	61,4	67,8	68,2	71,6	71,0	75,1	74,7	x	x
	55,4	56,3	61,7	61,5	67,6	68,1	71,5	71,2	75,8	75,2	x	x
	55,5	56,6	61,7	61,2	66,7	68,6	x	x	x	x	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	55,3	56,6	61,6	61,4	67,4	68,3	71,4	71,1	75,5	75,0	77,8	77,5
	56,0		61,5		67,9		71,3		75,3		77,7	

Tabulka 33: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Enyaq iV, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Enyaq iV 60				Pohon	elektrický							
Povrch	certifikovaný				Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m							
Čas	16:10-16:35												
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130		150		
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	
$L_{Amax,i}$ [dB]	54,8	55,3	62,3	63,3	70,2	70,3	73,2	73,2	77,7	77,2	80,3	80,0	
	55,4	55,5	62,6	62,8	71,5	70,5	73,5	73,5	77,9	77,8	x	x	
	55,7	55,3	62,4	62,6	70,7	70,6	73,7	74,0	78,1	77,6	x	x	
	55,5	55,6	62,4	62,7	70,9	71,0	x	x	x	x	x	x	
Výsledná L_{Amax} [dB]	55,4	55,4	62,4	62,9	70,9	70,6	73,5	73,6	77,9	77,5	80,3	80,0	
	55,4		62,6		70,7		73,5		77,7		80,2		

Tabulka 34: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Kodiaq 2,0 TSI, hrubý povrch

Vůz	Škoda Kodiaq 2,0 TSI				Pohon	ICE (spalovací)							
Povrch	hrubý				Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m							
Čas	13:26-13:49												
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130				
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P			
$L_{Amax,i}$ [dB]	61,2	61,8	69,7	69,9	78,5	77,6	83,2	82,6	87,3	86,4			
	61,1	61,4	69,5	69,4	78,2	77,2	82,3	82,1	87,6	86,8			
	61,4	61,6	70,6	70,6	78,9	78,7	83,4	82,5	x	x			
	61,2	62,2	x	x	79,7	79,3	x	x	x	x			
Výsledná L_{Amax} [dB]	61,2	61,8	70,0	70,0	78,9	78,3	83,0	82,4	87,5	86,6			
	61,5		70,0		78,6		82,7		87,0				

Tabulka 35: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Enyaq iV, hrubý povrch

Vůz	Škoda Enyaq iV				Pohon		elektrický			
Povrch	hrubý				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m			
Čas	13:54-14:12									
Rychlost [km/h]	30		50		80		100		130	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	62,2	63,1	70,5	71,6	79,8	79,3	84,0	83,0	87,7	87,4
	61,6	62,2	71,4	71,7	79,4	79,7	83,5	83,3	88,3	85,7
	62,8	62,5	71,4	71,6	79,5	78,9	83,8	82,8	x	x
	62,0	62,2	72,2	72,5	x	x	x	x	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	62,2	62,5	71,4	71,9	79,6	79,3	83,8	83,0	88,0	86,6
	62,3		71,6		79,4		83,4		87,4	

Tabulka 36: Naměřené hodnoty L_{Amax} , všechna vozidla, dlažební kostky

Povrch	dlažební kostky				Umístění mikrofonu		výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas	12:29-12:52, 15:00-15:11											
Vůz	Škoda Citigo 1,0 MPI		Škoda Citigo iV		Škoda Octavia 1,5 TSI		Škoda Octavia PHEV		Škoda Kodiaq 2,0 TSI		Škoda Enyaq iV 60	
Pohon	ICE		elektrický		ICE		elektrický		ICE		elektrický	
Rychlost [km/h]	30	50	30	50	30	50	30	50	30	50	30	50
$L_{Amax,i}$ [dB]	61,3	69,8	62,1	70,7	64,1	72,5	63,5	72,5	63,8	72,5	63,9	73,2
	61,8	70,2	61,5	69,6	64,2	73,4	63,5	72,0	63,9	72,6	64,0	72,6
	61,5	71,1	61,4	70,0	64,4	72,4	63,7	72,4	63,5	72,6	63,9	72,9
	x	x	x	x	x	x	x	x	63,5	x	x	x
Výsledná L_{Amax} [dB]	61,5	70,4	61,7	70,1	64,2	72,8	63,6	72,3	63,7	72,6	63,9	72,9

Tabulka 37: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Citigo 1,0 MPI

Vůz		Škoda Citigo 1,0 MPI						Pohon		ICE (spalovací)					
Povrch		certifikovaný						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		15:47-16:05													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			110			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
49,5	10	59,5	53,8	9	63,4	58,0	13	69,2	61,1	13	72,2	61,8	16	73,9	
48,6	13	59,7	53,2	13	64,3	58,5	11	68,9	60,2	16	72,2	61,7	17	74,0	
49,1	11	59,5	53,5	12	64,3	57,6	15	69,4	60,9	14	72,3	x	x	x	
49,6	10	59,6	53,6	11	64,0	58,1	12	68,9	61,6	12	72,3	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]		59,6	Výsledná L_{AE} [dB]		64,0	Výsledná L_{AE} [dB]		69,1	Výsledná L_{AE} [dB]		72,3	Výsledná L_{AE} [dB]		74,0	
Povrch		hrubý						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		12:58-13:20													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			110			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
54,7	11	65,1	58,0	14	69,5	65,0	16	77,1	68,3	16	80,3	68,2	20	81,3	
56,0	14	67,4	59,6	13	70,7	65,1	15	76,9	69,2	16	81,2	x	x	x	
53,3	12	64,1	58,7	14	70,1	65,4	15	77,1	67,7	17	80,0	x	x	x	
53,0	14	64,5	x	x	x	64,9	17	77,2	68,8	13	80,0	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]		65,5	Výsledná L_{AE} [dB]		70,1	Výsledná L_{AE} [dB]		77,1	Výsledná L_{AE} [dB]		80,4	Výsledná L_{AE} [dB]		81,3	

Tabulka 38: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Citigo iV

Vůz	Škoda Citigo iV						Pohon	elektrický						
Povrch	certifikovaný						Umístění mikrofonu	výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m						
Čas	15:47-16:05													
Rychlost [km/h]														
30			50			80			100			110		
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]
50,3	9	59,8	55,6	10	65,6	59,9	13	71,0	63,4	13	74,5	64,2	14	75,7
50,1	10	60,1	55,4	10	65,4	61,0	12	71,8	62,9	14	74,4	64,7	14	76,2
49,9	11	60,3	54,8	12	65,6	60,7	11	71,1	62,7	15	74,4	64,5	13	75,7
50,7	9	60,2	55,1	11	65,5	60,6	12	71,4	62,9	14	74,3	x	x	x
Výsledná L_{AE} [dB]	60,1		Výsledná L_{AE} [dB]	65,5		Výsledná L_{AE} [dB]	71,3		Výsledná L_{AE} [dB]	74,4		Výsledná L_{AE} [dB]	75,9	
Povrch	hrubý						Umístění mikrofonu	výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m						
Čas	14:38-14:53													
Rychlost [km/h]														
30			50			80			100			110		
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]
56,6	12	67,4	60,6	15	72,4	67,8	14	79,3	71,3	13	82,4	71,5	17	83,8
53,7	14	65,1	61,2	12	72,0	67,6	14	79,1	71,1	13	82,2	x	x	x
54,6	12	65,3	61,8	14	73,3	68,2	13	79,3	71,0	15	82,7	x	x	x
x	x	x	60,3	15	72,1	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Výsledná L_{AE} [dB]	66,1		Výsledná L_{AE} [dB]	72,5		Výsledná L_{AE} [dB]	79,2		Výsledná L_{AE} [dB]	82,4		Výsledná L_{AE} [dB]	83,8	

Tabulka 39: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Octavia 1,5 TSI

Vůz		Škoda Octavia 1,5 TSI						Pohon		ICE (spalovací)					
Povrch		certifikovaný						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		10:35-10:55													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
49,8	12	60,6	53,9	14	65,3	57,8	16	69,9	60,4	16	72,5	62,7	17	75,1	
50,0	11	60,4	53,9	13	65,0	57,8	16	69,9	60,4	16	72,5	63,1	15	74,9	
48,9	12	59,7	54,3	12	65,1	58,5	15	70,2	60,2	15	71,9	62,5	17	74,8	
50,5	12	61,3	54,6	11	65,0	57,9	16	69,9	59,9	17	72,2	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]	60,5		Výsledná L_{AE} [dB]	65,1		Výsledná L_{AE} [dB]	70,0		Výsledná L_{AE} [dB]	72,3		Výsledná L_{AE} [dB]	74,9		
Povrch		hrubý						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		11:41-12:07													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
55,3	15	67,0	61,8	15	73,6	67,9	17	80,2	70,3	21	83,5	74,2	21	87,5	
57,1	11	67,6	61,8	16	73,8	69,0	14	80,4	71,1	17	83,4	x	x	x	
54,6	16	66,6	61,5	16	73,5	68,1	17	80,4	70,9	18	83,4	x	x	x	
55,3	14	66,7	62,1	14	73,6	68,4	16	80,4	71,9	16	84,0	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]	67,0		Výsledná L_{AE} [dB]	73,6		Výsledná L_{AE} [dB]	80,4		Výsledná L_{AE} [dB]	83,6		Výsledná L_{AE} [dB]	87,5		

Tabulka 40: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Octavia iV PHEV

Vůz		Škoda Octavia iV PHEV						Pohon		elektrický					
Povrch		certifikovaný						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		16:39-16:54													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
50,2	9	59,7	54,0	14	65,4	58,2	15	69,9	59,5	19	72,3	62,2	19	75,0	
49,6	10	59,6	54,1	13	65,3	59,0	13	70,1	61,3	12	72,1	63,9	14	75,3	
50,1	9	59,6	54,5	11	64,9	58,0	16	70,1	60,8	14	72,2	x	x	x	
50,5	9	60,0	54,2	13	65,4	58,9	13	70,0	60,1	17	72,4	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]	59,7		Výsledná L_{AE} [dB]	65,3		Výsledná L_{AE} [dB]	70,0		Výsledná L_{AE} [dB]	72,3		Výsledná L_{AE} [dB]	75,2		
Povrch		hrubý						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		14:16-14:34													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
56,1	13	67,3	62,0	15	73,7	67,8	18	80,4	72,1	16	84,1	74,2	21	87,4	
56,3	11	66,7	61,1	18	73,7	68,8	14	80,3	71,2	17	83,5	x	x	x	
55,7	14	67,2	62,1	14	73,5	68,2	17	80,5	70,5	20	83,5	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	70,8	18	83,4	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]	67,1		Výsledná L_{AE} [dB]	73,6		Výsledná L_{AE} [dB]	80,4		Výsledná L_{AE} [dB]	83,6		Výsledná L_{AE} [dB]	87,4		

Tabulka 41: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Kodiaq 2,0 TSI

Vůz		Škoda Kodiaq 2,0 TSI						Pohon		ICE (spalovací)					
Povrch		certifikovaný						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		16:12-16:35													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
50,6	12	61,4	53,2	14	64,7	58,2	15	69,9	59,7	15	71,5	62,7	18	75,2	
50,2	11	60,6	53,5	14	64,9	59,0	12	69,8	59,6	17	71,9	61,9	17	74,2	
50,1	11	60,5	53,6	13	64,8	58,0	16	70,0	59,6	17	71,9	63,0	17	75,3	
50,3	11	60,7	53,7	12	64,5	57,7	15	69,5	x	x	x	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]	60,8		Výsledná L_{AE} [dB]	64,7		Výsledná L_{AE} [dB]	69,8		Výsledná L_{AE} [dB]	71,8		Výsledná L_{AE} [dB]	74,9		
Povrch		hrubý						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		13:25-13:50													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
55,3	11	65,7	60,3	19	73,0	66,9	19	79,7	70,7	20	83,7	73,7	21	86,9	
54,5	14	66,0	60,9	15	72,7	67,4	18	79,9	71,2	18	83,8	73,8	20	86,8	
54,7	13	65,8	60,5	18	73,1	68,3	16	80,3	70,9	20	83,9	x	x	x	
54,5	14	65,9	x	x	x	68,0	18	80,5	x	x	x	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]	65,9		Výsledná L_{AE} [dB]	72,9		Výsledná L_{AE} [dB]	80,1		Výsledná L_{AE} [dB]	83,8		Výsledná L_{AE} [dB]	86,9		

Tabulka 42: Výpočet L_{AE} z naměřených hodnot L_{Aeq} , Škoda Enyaq iV

Vůz		Škoda Enyaq iV						Pohon		elektrický					
Povrch		certifikovaný						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		16:12-16:35													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
50,7	9	60,3	55,1	12	65,9	60,1	16	72,1	62,4	15	74,2	65,6	15	77,3	
50,0	12	60,8	55,1	13	66,3	60,4	14	71,9	63,3	12	74,1	65,3	16	77,3	
50,6	10	60,6	54,8	13	66,0	61,0	13	72,1	63,4	12	74,2	65,2	16	77,3	
50,6	10	60,6	55,4	13	66,5	60,2	15	71,9	x	x	x	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]		60,6	Výsledná L_{AE} [dB]		66,2	Výsledná L_{AE} [dB]		72,0	Výsledná L_{AE} [dB]		74,2	Výsledná L_{AE} [dB]		77,3	
Povrch		hrubý						Umístění mikrofonu		výška: 3,0 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m					
Čas		13:53-14:12													
Rychlost [km/h]															
30			50			80			100			130			
L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	L_{Aeq} [dB]	t [s]	L_{AE} [dB]	
55,7	12	66,5	62,3	15	74,1	68,6	17	80,9	72,0	16	84,0	74,2	21	87,5	
55,9	12	66,7	61,4	19	74,2	68,6	16	80,6	71,8	17	84,1	75,7	17	88,0	
55,3	14	66,8	61,2	19	74,0	69,0	16	81,0	72,2	17	84,6	x	x	x	
x	x	x	61,9	18	74,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Výsledná L_{AE} [dB]		66,7	Výsledná L_{AE} [dB]		74,2	Výsledná L_{AE} [dB]		80,8	Výsledná L_{AE} [dB]		84,2	Výsledná L_{AE} [dB]		87,8	

Tabulka 43: Naměřené hodnoty L_{Amax} , Škoda Octavia PHEV vč. AVAS, certifikovaný povrch

Vůz	Škoda Octavia PHEV		Pohon	elektrický
Povrch	certifikovaný		Umístění mikrofonu	výška: 1,2 m nad povrchem vzdálenost: 7,5 m
Čas	16:57-17:05			
Rychlost [km/h]	20 pozn.: bez AVAS		20 pozn.: vč. AVAS	
Umístění mikrofonu	L	P	L	P
$L_{Amax,i}$ [dB]	49,3	50,0	55,8	51,3
	50,4	49,9	55,7	51,0
Výsledná L_{Amax} [dB]	49,9	50,0	55,8	51,2
	49,9		54,0	

Tabulka 44: Otáčky motoru a zařazený převodový stupeň, ICE vozidla

Vůz / rychlost [km/h]	Otáčky [min⁻¹] (převodový stupeň)						
	30	50	80	100	110	130	150
Škoda Citigo 1,0 MPI	1970 (2)	2000 (3)	2000 (5)	2500 (5)	2850 (5)	x	x
Škoda Octavia 1,5 TSI	1650 (3)	1920 (5)	1500 (7)	1950 (7)	x	2450 (7)	x
Škoda Kodiaq 2,0 TSI	1430 (3)	1670 (4)	1450 (7)	1700 (7)	x	2130 (7)	2500 (7)