Ing. Jan KRÁLÍČEK [1), 2)]
Ing. Miroslav KUČERA, PhD.[1)]
Ing. Jiří KRÁLÍČEK [2)]

[1)] ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí
[2)] AKUSTPROJEKT s.r.o., Praha

Dimenzování zvukové izolace celoprosklené fasády

Designing of the Sound Insulation of the Fully Glazed Facade

Recenzent
Ing. Ladislav Mička

Článek pojednává o realizaci projektu administrativní budovy, kde před dokončením stavby došlo ke změně způsobu užívání části budovy. Vybrané prostory budou sloužit jako lékařské ordinace, na které jsou však (oproti kancelářím) kladeny vyšší nároky na ochranu před hlukem, a tedy i vyšší nároky na zvukovou izolaci navržené prosklené fasády. V rámci projektu bylo nutné zjistit, zda původně projektovaná fasáda je z hlediska hygienických limitů hluku pro vnitřní prostory použitelná i pro lékařské ordinace, nebo bude nutné zvukovou izolaci fasády zesílit. Úskalím při řešení byl fakt, že se budova nachází v oblasti s nadlimitním hlukem od dopravy, vyvolaným provozem na čtyřproudé komunikaci a přilehlé železnici. Z těchto důvodů byl pro tyto potřeby vytvořen výpočetní model šíření hluku od dopravy z venkovního prostředí dovnitř, na základě neprůzvučnosti navržené fasády a hlukového zatížení od dopravy. Následně bylo provedeno kontrolní měření hluku na stavbě a v rámci Mock-upu (vzorové místnosti) byl ověřen účinek navržených úprav. Součástí této práce je i podrobné srovnání vypočítaných hodnot s hodnotami měřenými po realizaci díla ke kolaudaci.
Klíčová slova: *neprůzvučnost fasády, hluk od dopravy, lékařské ordinace, měření hluku*

This paper deals with an office building project where one part of the building was changed to a clinic as a project modification before its finalization. However, the medical offices are in a noise protected indoor space where the hygienic noise limits are stricter. This leads to the higher standards of the facade, than originally designed. Due to traffic noise, there is a high noise level in the area for the office building, so it was necessary to develop the simulation of the outdoor noise and then to verify the sound insulation of the fully glazed facade or develop potential improvements in the construction. The mock-up was built for the verification of the model and the final results were confirmed by measurements for the buildings approval.
Keywords: *sound insulation of the facade, calculation of the traffic noise, operating theatres, noise measurement*

ÚVOD

Častým konceptem veřejných budov je v současnosti železobetonový skelet opláštěný modulovými fasádními prvky. Pro dosažení maximálního prosvětlení budovy a pro moderní architektonickou podobu budovy bývá modulová fasáda z větší části prosklená. Problémem je omezená schopnost zvukové izolace prosklených konstrukcí při zachování finanční dostupnosti výrobku. V případě běžně navrhovaných administrativních budov je možné plnit hygienické limity hluku od dopravy i v hlukově exponovanějších oblastech. U obytných budov je umísťování staveb z pohledu zvukové izolace již náročnější, jelikož jsou stanoveny požadavky na tzv. chráněný venkovní prostor staveb a na chráněný vnitřní prostor staveb s hygienickým limitem ekvivalentní hladiny akustického tlaku A $L_{Aeq,16h}$ = 40 dB pro den (16 hodin dne) a $L_{Aeq,8h}$ = 30 dB pro noc (8 hodin noci) od dopravy. Přesto je z pohledu současných právních předpisů [1] obytná stavba v hlukově nadlimitním prostředí možná při zajištění nuceného větrání a dostatečné zvukové izolace budovy. Nucené větrání přináší další úskalí z hlediska generovaného hluku, jelikož se jedná o trvalý zdroj zvuku. Je nutné dostatečně zatlumit ventilátor tlumiči hluku a zvolit přiměřené rychlosti proudění vzduchu na koncových vyústkách, kde při nadměrné rychlosti proudění vzniká významný aerodynamický hluk, který lze jen obtížně tlumit [2], [3].

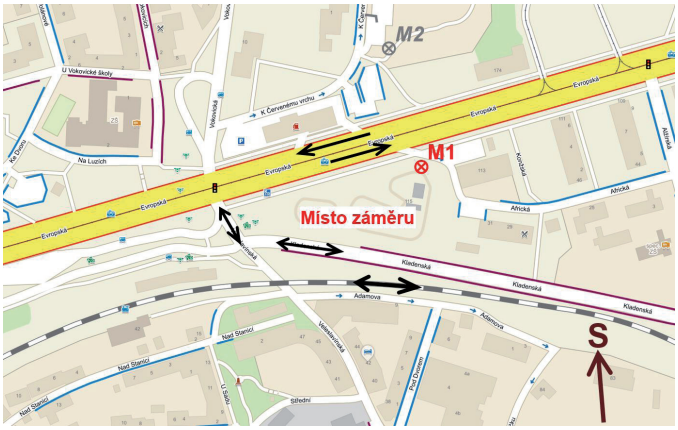
Proto, pokud je to možné, umísťuje se většina obytných budov dále od významných zdrojů hluku. Nicméně existují stavby s přísnějšími požadavky na hygienický limit hluku než u obytných budov, u kterých je pro investora žádoucí umístění na viditelném, dobře přístupném, avšak hlukově exponovaném místě. Takovými budovami jsou např. lékařské ordinace, u nichž platí hygienický limit dle [1] $L_{Aeq,8h}$ = 35 dB pro 8hodinovou pracovní směnu od dopravy, tedy o 5 dB přísnější limit než u obytných místností pro den.

V případě návrhu fasády jsou přísné hlukové limity známou veličinou, kterou lze v rámci projektu zohlednit. Avšak zpřísnění požadavků na hluk v průběhu rozestavěného projektu je značný problém, který nelze jednoduše vyřešit a vyžaduje složitá měření a simulace. Tento článek ukazuje zkušenosti s řešením právě takové situace, neboť s ohledem na délku výstavby běžně dochází k tomu, že prostory změní již nasmlouvaného nájemce, a je nutné najít řešení.

Zadáním projektu proto bylo zhodnotit, za jakých podmínek lze připustit v jedné části již rozestavěné administrativní budovy vytvoření lékařské ordinace s tím, aby byl v prostorech ordinací dodržen hygienický limit hluku od dopravy, přičemž do venkovní podoby konstrukčních prvků fasády již nebylo možné zasahovat (vyjma volby prosklení). Pro tyto potřeby byl vytvořen řetězec měření a simulací, jejichž výsledkem je hlukové zatížení vnitřního prostoru ordinací při použití stávající a nově modifikované fasády. Výsledky simulací byly ověřeny na vzorové ordinaci i při konečné kolaudaci objektu.

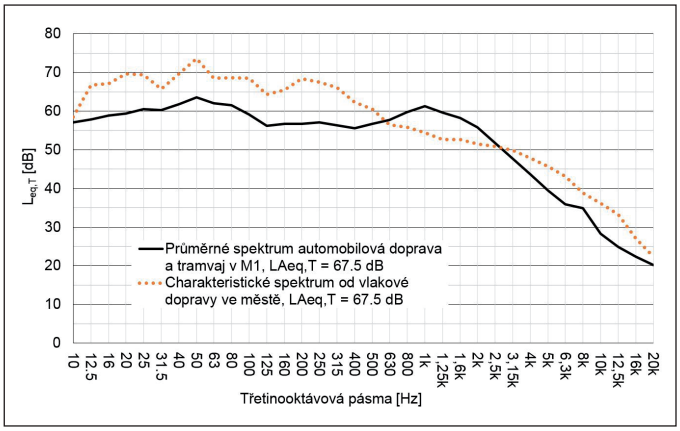
ZADÁNÍ A POSTUP ŘEŠENÍ

Předmětem záměru byla změna využití původně administrativních prostor na lékařské ordinace. Ze severní strany je budova exponována hlukem z provozu na čtyřproudé komunikaci s tramvajovým pásem uprostřed jízdních pruhů a z jižní strany železniční tratí. Zvuková izolace prosklené části fasády pro administrativní budovu byla již stanovena na váženou laboratorní vzduchovou neprůzvučnost R_w (C, C_{tr}) = 39 (-1,-6) dB, kde C je faktor přizpůsobení spektru pro vyšší frekvence a C_{tr} je faktor přizpůsobení spektru pro nižší frekvence (použití u městského hluku). Vliv rámu a plných částí se však musel ještě ověřit měřením. Do této fasády bylo možné vložit prosklení s neprůzvučností R_w (C, C_{tr}) = 46 (-2,-6) dB, což je nejvyšší ne-



Obr. 1 Situace měření hluku od dopravy pro ověření modelu

Fig. 1 Situation of traffic noise measurement for model verification



Obr. 2 Porovnání průměrných spekter změřených v M1 od silniční dopravy s tramvají a od vlaku (průměr naměřených spekter vlaku [4])

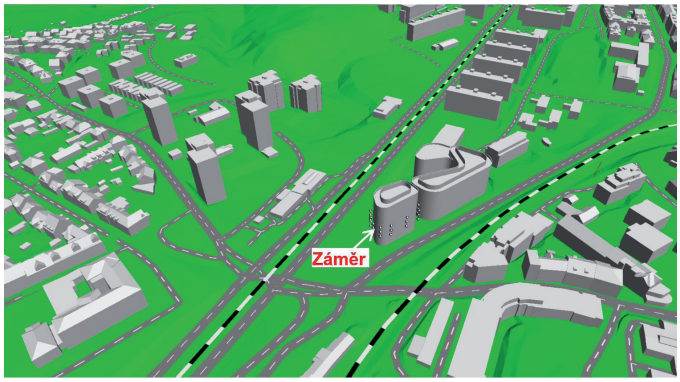
Fig. 2 Comparison of average spectra measured in M1 from road transport with tram and from train (average of measured train spectra [4])

průzvučnost, která v rámci navržené fasády mohla být použita. Cílem bylo zjistit hlukové zatížení prostoru ordinací po výměně prosklení a ověřit, zda ekvivalentní hladina akustického tlaku A splní hygienický limit [1] pro hluk od dopravy ve výši $L_{Aeq,8h}$ = 35 dB po dobu užívání ordinací.

HLUKOVÉ ZATÍŽENÍ FASÁDY BUDOVY

Jako první v postupu řešení bylo nutné provést ověřovací měření hluku v místech u dominantního zdroje hluku (komunikace). V době realizace měření byla stavba budovy již v pokročilé fázi, a nebylo tudíž možné provést měření hluku od dopravy po celou 24hodinovou dobu bez ovlivnění hlukem ze stavební činnosti. Situace měření je znázorněna na obr. 1. Měření hluku v bodě M1 probíhalo 6 m nad terénem, bod M2 je další kontrolní bod, také 6 m nad terénem, pro účely ověření modelu.

Z výsledků průměrných ekvivalentních hladin akustického tlaku je zajímavé zejména spektrum, viz obr. 2. Zde je znázorněno porovnání změřeného spektra v bodě M1 (černá čára) a dále charakteristické spektrum hluku od vlaku (tečkovaná oranžová čára), a to pro stejnou celkovou hodnotu $L_{Aeq,T}$ = 67,5 dB. Dle porovnání spekter na obr. 2 je patrné výrazné zastoupení hluku vlaku v nízkých frekvencích, které je obtížné tlumit. Připomeňme, že fasáda vykazuje nízký faktor přizpůsobení spektru C_{tr} = -6 dB, který vypovídá o omezené schopnosti fasády tlumit nízké frekvence. Spektrum silničního hluku zjištěné měřením v bodě M1 je zastoupené jak v nízkých frekvencích, tak i v oblasti kolem 1000 až 1250 Hz. Jak se



Obr. 3 Západní 3D pohled výpočetního modelu Cadna A

Fig. 3 West 3D view of Cadna A computational model

později ukáže, je právě oblast kolem 800 až 1000 Hz pro prosklenou část fasády tzv. koincidenční oblastí, kde fasáda hluk příliš netlumí. Bod M2 (6 m nad terénem), znázorněný šedou barvou na obr. 1, byl převzat z jiného měření pro kontrolu správnosti výpočetního modelu.

Následně byl vytvořen výpočetní model v softwaru Cadna A. Dopravní data byla použita od Technické zprávy komunikací hl. m. Prahy (TSK) a Správy železniční dopravní cesty (SŽDC). Na obr. 3 je znázorněn 3D pohled výpočetního modelu. Objekty a terén byly převzaty z podkladu [5] a následně upraveny pro výpočetní model Cadna A. Jednotlivé komunikace jsou zadány jako liniové zdroje.

Ověření modelu se provedlo dosazením dopravních dat zjištěných při měření. Jednotlivé rozdíly mezi měřením a výpočtem byly korigovány tak, aby se pohybovaly v úrovni nejistoty, viz tab. 1. Korekce výpočtu se prováděla změnou rychlosti vozidel, drsnosti povrchu vozovek, popř. jinou korekcí. Výpočet byl nastaven tak, aby byl v toleranci s měřením zejména v denní době, kdy budou ordinace v provozu.

Tab. 1 Porovnání vypočítaných a naměřených hodnot $L_{Aeq,T}$ pro ověření modelu

Tab. 1 Comparison of calculated and measured values of $L_{Aeq,T}$ for model verification

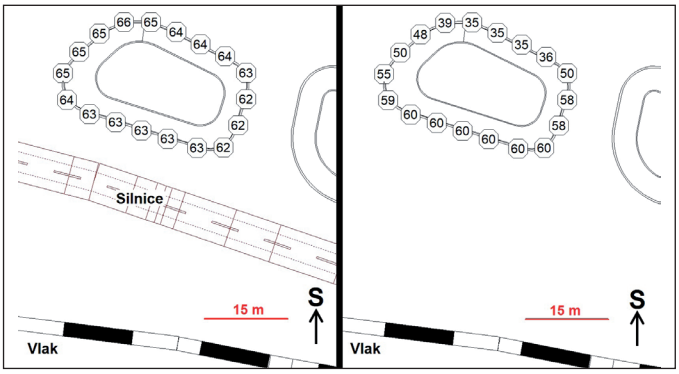
Měřicí bod	Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A od hluku z dopravy			
	Výpočet		Měření	
	DEN $L_{Aeq,16h}$	NOC $L_{Aeq,8h}$	DEN $L_{Aeq,16h}$	NOC $L_{Aeq,8h}$
M1	**68,2** ± 2,0	**63,4** ± 2,0	**68,0** ± 1,8	-
M2	61,4 ± 2,0	56,4 ± 2,0	61,1 ± 1,8	58,0 ± 1,8

Z ověřeného výpočetního modelu byl následně dopočítán hluk dopadající na fasádu v místě budoucích ordinací. Hlukové zatížení bylo vypočítáno jednak pro celkový hluk (obr. 4 vlevo), tedy stejný jako při měření, ale také pro hluk šířený pouze od železniční tratě jižně od záměru (obr. 4 vpravo), jelikož byly obavy, že právě jižní strana objektu bude hůře tlumit kvůli nízkým frekvencím hluku šířeného z provozu na železnici. Bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota $L_{Aeq,16h}$ od dopravy bude v severozápadním rohu dosahovat úrovně 66 dB dopadajícího zvuku. Hluk vyvolaný pouze od železnice je v úrovni $L_{Aeq,16h}$ = 60 dB. Železniční hluk v tomto případě není dominantním zdrojem. Nicméně frekvenční složení tohoto typu zvuku, viz oranžové tečkované spektrum na obr. 2, bude zahrnuto do detailního modelu šíření zvuku přes fasádu dovnitř. Venkovní hluk je složen ze dvou typů charakteristických spekter – silniční a železniční doprava, viz charakteristická spektra na obr. 2 [4].

Tab. 2 Rozbor vzduchové neprůzvučnosti měřeného vzorku fasády v CSI

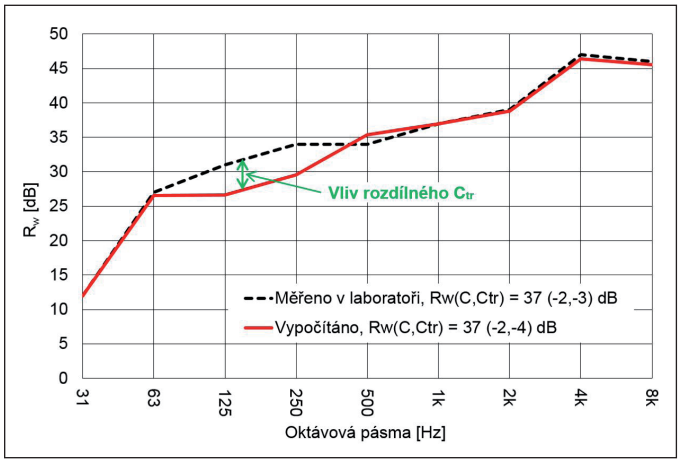
Tab. 2 Analysis of the sound reduction index of the facade sample measured at CSI

Oktávová pásma [Hz]	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	R_w (C, C_{tr}) [dB]
Změřený prvek se sklem R_w (C, C_{tr}) = 39 (-1,-6) dB	**12**	**27**	**31**	**34**	**34**	**37**	**39**	**47**	**46**	**37 (-2,-3)**
Sklo s parametrem R_w (C, C_{tr}) = 39 (-1,-6) dB, (vypočítáno v soft. Insul 9.0)	12	24	23	26	36	45	45	50	50	39 (-2,-6)
Neprůzvučnost rámu a plných částí fasády	12	30	36	38	35	35	37	45	44	36 (0,0)
Vypočítané R_w měřeného prvku	**12**	**27**	**27**	**30**	**35**	**37**	**39**	**46**	**46**	**37 (-2,-4)**



Obr. 4 Hlukové zatížení fasády budovy v části plánovaných ordinací: od celkové dopravy (vlevo); pouze od železnice (vpravo); hodnoty $L_{aeq,16h}$ dopadajícího zvuku na fasádu

Fig. 4 Noise load of building facade in the part of planned medical offices: from total traffic (left); only from railroad (right); $L_{aeq,16h}$ values of the incident sound on the facade



Obr. 5 Porovnání křivek vzduchové neprůzvučnosti R změřeného prvku fasády v CSI a vypočítaných hodnot fasády na základě předpokládaných a vypočítaných hodnot vzduchové neprůzvučnosti prosklení

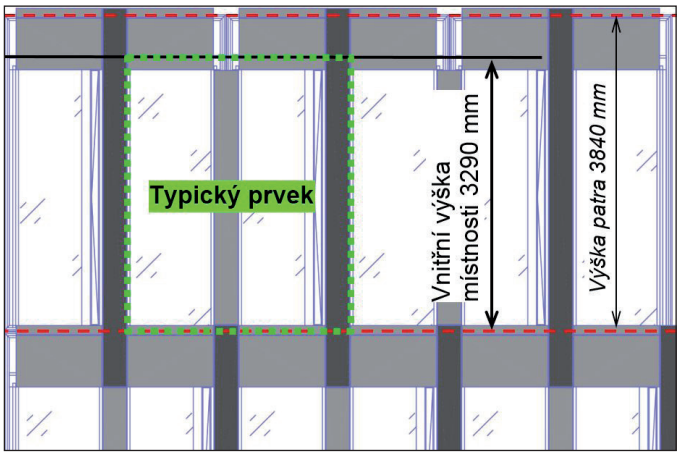
Fig. 5 Comparison of curves of sound reduction index R of the facade element measured at CSI and calculated values of the facade based on assumed and calculated values of glazing sound reduction index

VZDUCHOVÁ NEPRŮZVUČNOST FASÁDY – VLIV RÁMU

Pro administrativní budovu byla stanovena fasáda s prosklením R_w (C, C_{tr}) = 39 (-1,-6) dB, které bylo vloženo do modulu – rám a otevírací plná část. V takovém složení byla hodnota R_w modulu změřena v laboratoři Centra stavebního inženýrství (CSI). Měřený prvek měl ale jiné rozměry než skutečný modul montovaný na stavbě. Plocha zkoušeného vzorku byla 8,8 m^2, z toho plocha prosklené části byla pouze 3,5 m^2, plocha zbylé plné konstrukce (tedy tepelněizolační část fasády a rám oken, mimo vyzděné konstrukce v laboratoři) činila 5,3 m^2. Měření se provádělo za účelem zjištění vlivu rámu a plných částí. U použitého skla byla bohužel známa pouze celková hodnota R_w (C, C_{tr}), nikoliv spektrální hodnoty, které jsou potřebné pro výpočet. Bylo tedy nutné na základě konstrukce prosklení a celkové hodnoty R_w spektrální hodnoty vzduchové neprůzvučnosti R dopočítat, a to jak pro prosklení, tak pro vliv plných částí. Cílem bylo zjistit vliv rámu a plných částí, viz tab. 2. Výsledkem měření v CSI zkoušeného prvku byla vzduchová neprůzvučnost R_w (C, C_{tr}) = 37 (-2,-3) dB. Na obr. 5 je znázorněno porovnání vzduchové neprůzvučnosti skutečně změřeného prvku v CSI a celkové neprůzvučnosti dopočítaného prvku složeného z prosklení a plné části. Hodnoty vzduchových neprůzvučností R_w jsou téměř shodné. Drobných rozdílů ve frekvenčním průběhu je dosahováno kvůli rozdílným faktorům přizpůsobení spektra C_{tr}, což je chyba výpočtu. Dílčí neprůzvučnost plných částí fasády (tedy rám + otevírka) byla vypočítána na R_w (C, C_{tr}) = 36 (0,0) dB.

STANOVENÍ VZDUCHOVÉ NEPRŮZVUČNOSTI FASÁDY PRO VÝPOČETNÍ MODEL

Skutečná fasáda je modulová, složená ze stejných dílů, viz obr. 6. Pro ordinace je použito prosklení vykazující vyšší vzduchovou neprůzvučnost



Obr. 6 Pohled na složení modulové fasády pro budovu v části ordinací, prosklené konstrukce

Fig. 6 View of the composition of the modular facade for the building in the part of medical offices, glazed constructions

R_w (C, C_{tr}) = 46 (-2,-6) dB. Plocha dvou sousedních modulů vedle sebe (typický prvek je na obr. 6 ohraničen zeleně), s otevírkou a bez ní, představuje dohromady cca 10,3 m^2. Z toho plocha prosklené části je cca 5,3 m^2 a plocha plné konstrukce (tepelněizolační část fasády a rám oken) je cca 5 m^2. Pro výslednou váženou stavební neprůzvučnost R'_w typického prvku bylo uvažováno, že vlivem montáže poklesne vzduchová neprůzvučnost na stavbě o 2 dB, viz tab. 3.

Tab. 3 Rozbor vzduchové neprůzvučnosti typického prvku modulové fasády

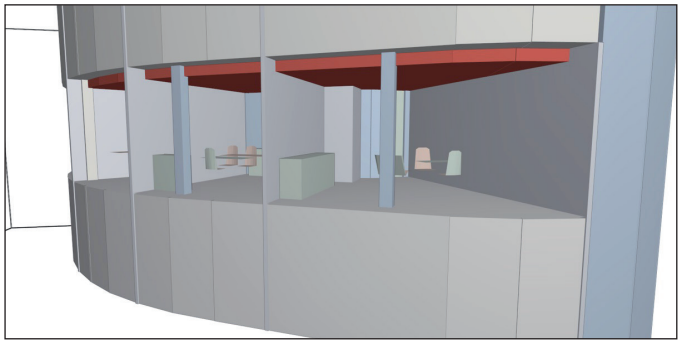
Tab. 3 Analysis of the sound reduction index of a typical modular facade element

Oktávová pásma [Hz]	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	R_w (C, C_{tr}) [dB]
Neprůzvučnost rámu a plných částí fasády	12	30	36	38	35	35	37	45	44	36 (0,0)
Sklo s parametrem R_w (C, C_{tr}) = 46 (-2,-6) dB, (vypočítáno v soft. Insul 9.0)	13	29	28	34	45	50	55	64	64	46 (-2,-6)
Vypočítané R_w typického prvku fasády se sklem R_w (C, C_{tr}) = 46 (-2,-6) dB, plocha prosklení 61 %, plocha plných částí 39 %	13	29	30	35	38	39	41	49	48	40 (-1,-2)
Výsledná zvuková izolace R'_w (parametr pro model)	**11**	**27**	**28**	**33**	**36**	**37**	**39**	**47**	**46**	**R'_w = 38**

Po montáži typického fasádního prvku s prosklením R_w (C, C_{tr}) = 46 (-2,-6) dB lze očekávat výslednou stavební neprůzvučnost fasády jako celku v úrovni R'_w = 38 dB se spektrem útlumu dle tab. 3, poslední řádek.

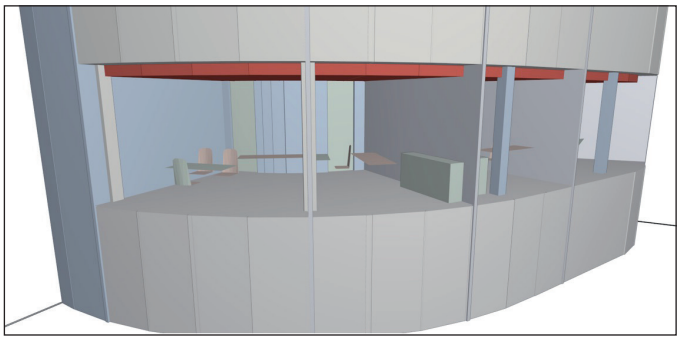
VÝPOČETNÍ MODEL HLUKU ŠÍŘENÉHO DOVNITŘ Z VENKU PŘES FASÁDU

Pro výpočet byly vybrány prostory ordinací, situované v hlukově nejexponovanějším podlaží (4. NP), umístěné v severozápadním rohu objektu, orientované směrem k dominantnímu zdroji hluku. S ohledem na časovou náročnost řešení byl výpočet proveden pouze v oktávových pásmech ve frekvenčním rozsahu 31,5 až 8000 Hz a pouze v nejhorším místě ordinací (chyby, které zjednodušení vyvolalo, jsou popsány dále v textu). Výpočet byl proveden v softwaru Cadna R. Ve výpočtu byly zohledněny pohltivosti navržených povrchů ve vnitřních prostorách ordinací, tvary a rozměry místností a neprůzvučnost fasády objektu. Konstrukce stěn místností jsou z hladkých sádrokartonových (SDK) desek opatřených nátěrem. Podlahu tvoří akusticky tvrdé linoleum. Strop ordinací je osazen zvukopohltivým podhledem (významně ovlivňuje úroveň zvuku uvnitř ordinací). Ve výpočtu byl uvažován podhled Ecophon Hygiene Clinic E 15, s mezerou 200 mm od stropní železobetonové konstrukce. Do výpočtu byl dále zahrnut běžný kancelářský nábytek ze dřeva, kancelářské žid-



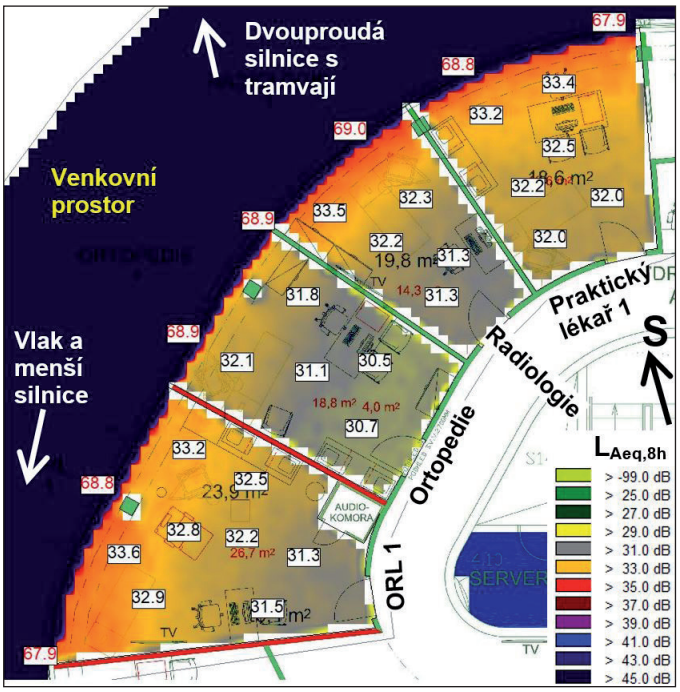
Obr. 7 Jižní 3D pohled do výpočetního modelu

Fig. 7 South 3D view of the computational model



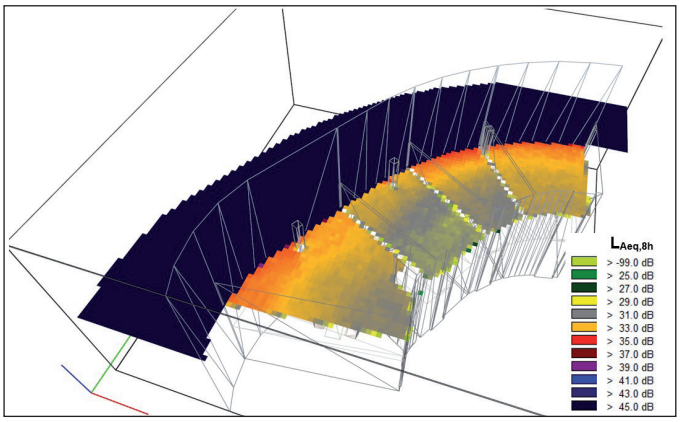
Obr. 8 Severozápadní 3D pohled do výpočetního modelu

Fig. 8 North 3D view of the computational model



Obr. 9 Hlukové zatížení vnitřních prostor ordinací v SZ rohu, hluková pásma $L_{Aeq,T}$ v úrovni 1,7 m nad podlahou

Fig. 9 Noise load of interior spaces of medical offices in NW corner, noise zones $L_{Aeq,T}$ T at the height of 1.7 m above the floor



Obr. 10 Jižní 3D pohled do modelu s hlukovými pásmy ve výšce 1,7 m nad podlahou

Fig. 10 South 3D view of the model with noise zones at the height of 1.7 m above the floor

le (polstrované pouze z jedné strany), čalouněná lůžka a dřevěné stoly. Na obr. 7 a 8 je zobrazen 3D pohled přes fasádu do počítaných prostor ordinací.

Hlukové zatížení fasády ordinací bylo pro účely simulace nahrazeno plošnými zdroji hluku, předsazenými před fasádou, vytvářejícími akustické pole odpovídající zatížení dle obr. 4 vlevo. Výsledná hluková mapa zobrazující rozložení hlukové zátěže v prostorech ordinací je znázorněna na obr. 9. Na obr. 10 je zobrazena hluková mapa ve 3D pohledu zakreslená do modelu ordinací. Souhrnné výsledky výpočtu hluku $L_{Aeq,8h}$ v jednotlivých sledovaných prostorech jsou uvedeny v tab. 4. Jako výsledná ekvivalentní hladina akustického tlaku A v nejexponovanějších ordinacích byla zjištěna hodnota $L_{Aeq,8h}$ = 33 dB.

Tab. 4 Souhrnné výsledky výpočtu hluku v ordinacích od automobilové, tramvajové a železniční dopravy

Tab. 4 Summary results of noise calculation in medical offices from vehicular, tram and railroad traffic

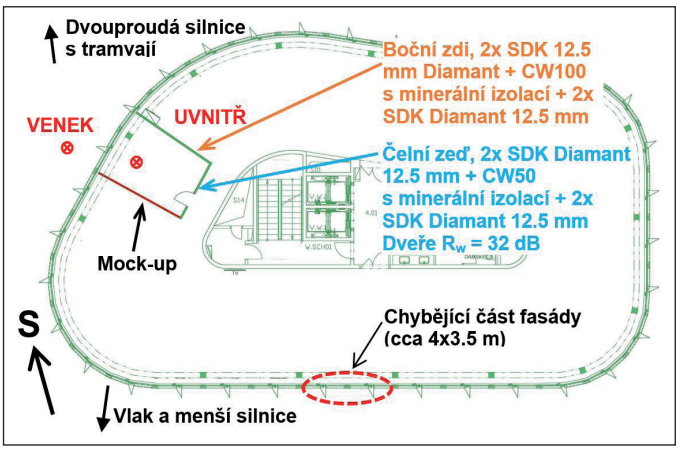
Sledovaný vnitřní prostor	**Hluk od dopravy šířící se dovnitř vzduchem na základě neprůzvučnosti fasády NEJEXPONOVANĚJŠÍ FASÁDA Průměrné hodnoty $L_{Aeq,8h}$ [dB] po prostoru**
PRAKTICKÝ LÉKAŘ 1	32,6
RADIOLOGIE 1	32,2
ORTOPEDIE 1	31,3
ORL 1	32,6
Finální výsledek	**$L_{Aeq,8h}$ = 33 ± 2 dB**

Pozn.: Pro stanovení průměru vnitřních hladin hluku byl použit logaritmický průměr.

OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ HLUKU V RÁMCI MOCK-UP ŘEŠENÍ

Během výstavby objektů byl zřízen Mock-up pro ověření vypočítaných parametrů od dopravy. Fasáda v rámci záměru však nebyla zcela dokončená. Pro účely zkušebního měření byla fasáda přetažená přes jedno patro dolů a nahoru vůči Mock-upu ve 4. NP. Byla vytvořena jedna z ordinací v SZ rohu. Součástí této ordinace byla dutinová podlaha a zvukopohltivý podhled. Prostor byl bez nábytku a větrání (VZT). Schéma měření a Mock-upu je zobrazeno na obr. 11. V patře vybudovaného Mock-upu chyběla část fasády na jižní straně pro manipulaci s materiálem. Tento otvor zůstal otevřený po dobu měření hluku.

Vzhledem ke stavbě nebylo možné měřit v době reálného provozu ordinací. Měření probíhalo mimo špičku v čase 20.00 až 22.00 h. Změřené hodnoty byly následně přepočteny na časové období dopravní špičky, kdy je předpokládán provoz ordinací (viz * označené výsledky v tab. 5). Obecně byly výsledky měření v Mock-upu o něco vyšší. Důvodem byly nedokončené fasády v celém domě a dále otevřený otvor ve fasádě v patře Mock-upu, což způsobilo vytvoření vedlejších cest šíření zvuku. V tab. 5 jsou uvedeny souhrnné výsledky měření v Mock-upu.



Obr. 11 Schéma měření hluku v rámci Mock-upu

Fig. 11 Scheme of the noise measurement within the Mock-up

Tab. 5 Souhrnné výsledky měření hluku v Mock-upu od dopravy

Tab. 5 Summary result of the traffic noise measurement in the Mock-up

	Ekvivalentní hladina akustického tlaku *A* [dB]			
	Časový úsek dne 20.00 až 22.00 h		**8 nejhlučnějších po sobě následujících hodin dne, čas 6.30 až 14.30 h**	
	VENEK $L_{Aeq,T}$ dopadající zvuk	VNITŘEK $L_{Aeq,T}$	VENEK $L_{Aeq,8h}$ dopadající zvuk	VNITŘEK $L_{Aeq,8h}$
MĚŘENÍ, MOCK-UP	63,9	33,1	66,4*	35,6*
VÝPOČET	-	-	65,8	33,0

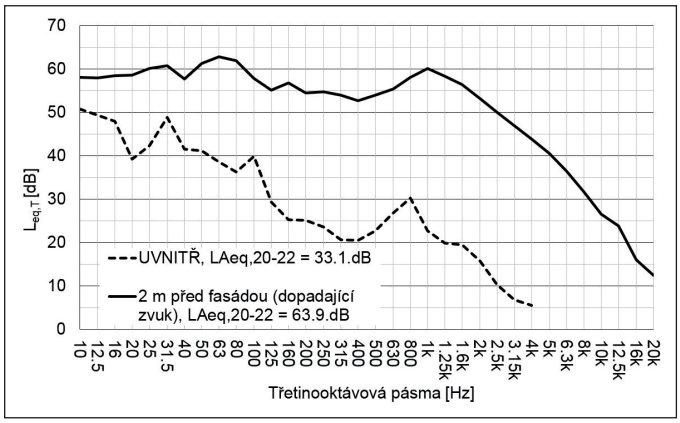
** Změřené hodnoty byly přepočteny na časové období dopravní špičky, kdy je předpokládán provoz ordinací.*

Z výsledků porovnání spekter na obr. 12 je názorný extrém na 800 Hz ve vnitřním prostoru (čárkovaná čára). Fasáda v této oblasti vykazuje pravděpodobně koincidenci, a hluk proto netlumí v úzké frekvenční oblasti. Při porovnání útlumů původní fasády změřené v CSI a útlumu fasády již namontované na stavbě je patrné, že v oblasti kolem 800 Hz má fasáda v obou případech propad, viz obr. 13.

Fasáda instalovaná na stavbě kopíruje fasádu původně měřenou v CSI. Celkově je však na tom lepší fasáda se sklem R_w (C, C_{tr}) = 46 (-2,-6) dB útlumově hůře, jelikož se jedná o zabudovaný prvek na stavbě, kde dochází navíc k vedlejším cestám oproti měření v laboratoři CSI.

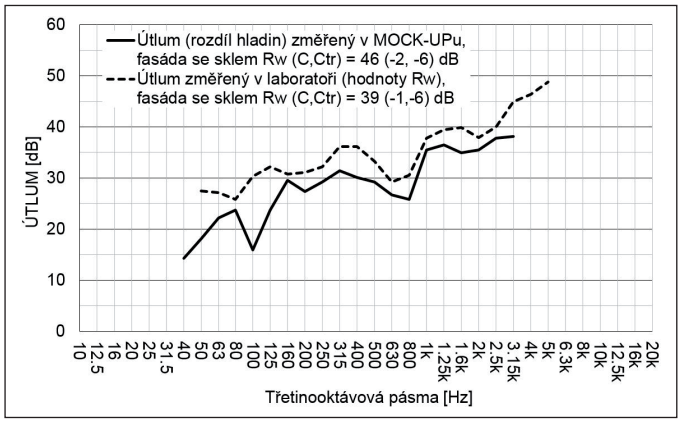
ZÁVĚR

Na základě požadavku změny stavby před dokončením, kdy se běžné kanceláře měly nahradit přísně chráněnými prostory lékařských ordinací, byl vytvořen řetězec měření a simulací, vedoucí k návrhu akustických opatření na fasádě a v interiéru (zvukopohltivý podhled), za účelem splnění přísného hygienického limitu hluku v ordinacích ve výši $L_{Aeq,8h}$ = 35 dB. V rámci výpočtu bylo stanoveno, že je nutné po-



Obr. 12 Třetinooktávová spektra $L_{eq,T}$ z měření venku 2 m před fasádou a uvnitř v Mock-upu

Fig. 12 Third-octave spectrum $L_{eq,T}$, from exterior measurement 2 m in front of the facade and inside the Mock-up



Obr. 13 Porovnání vzduchové neprůzvučnosti fasády v Mock-upu (plná čára – – rozdíl hladin přepočítaný na vzduchovou neprůzvučnost) a změřený prvek v CSI (čárkovaná čára).

Fig. 13 Comparison of sound reduction index of a facade in the Mock-up (full line – difference in levels converted to sound reduction index) and the element measured at CSI (dashed line)

užít fasádu s prosklením o vyšší hodnotě vzduchové neprůzvučnosti $R_w\,(C,\,C_{tr})$ = 46 (-2,-6) dB, i za cenu toho, že nedojde k výraznějšímu snížení hluku, jelikož plné části fasády, které tvoří nezanedbatelnou část plochy, nebylo již možné měnit. Vzhledem k tomu, že konstrukční změny fasády jsou velmi nákladné (zvláště v případech, kdy je v rámci změny vyžadován vyšší požadavek na vzduchovou neprůzvučnost), byla pro účely zkoušek vytvořena zkušební místnost, tzv. Mock-up. V rámci Mock-upu během realizace stavby bylo zjištěno, že hluk uvnitř ordinací je v úrovni hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,8h}$ = 35,6 dB. Výsledky byly ovlivněny vedlejšími cestami šíření zvuku (nedokončená fasáda v celém objektu nebo šíření hluku směrem k Mock-upu stavebním otvorem ve fasádě pro manipulaci s materiálem). Předpokladem tedy bylo, že po realizaci objektu a všech výplní ve fasádách dojde k poklesu hluku v ordinacích pod hyg. limit $L_{Aeq,8h}$ = 35 dB.

Výsledné kolaudační měření potvrdilo předpoklady. Výsledná hodnota hluku v nejexponovanější ordinaci v SZ rohu budovy směrem k dominantnímu zdroji (komunikaci) byla změřena pro 8 souvislých nejhlučnějších hodin dne v úrovni $L_{Aeq,8h}$ = 35,1 dB. Po odečtení nejistoty ve smyslu hodnocení dle současných předpisů je s limitem srovnávána hodnota $L_{Aeq,8h}$ = 33,1 dB. Kolaudační měření probíhalo za provozu vzduchotechniky pro zajištění větrání místností. Hygienický limit $L_{Aeq,8h}$ = 35 dB byl tedy splněn dle požadavků podkladu [1] pro osmihodinovou pracovní směnu se zajištěním větrání pracovišť.

Oproti vypočítaným hodnotám jsou výsledky kolaudačního měření o něco vyšší. Dle výpočtu bylo předpokládáno zatížení od dopravy ve vnitřním prostoru ordinací SZ rohu budovy v úrovni $L_{Aeq,8h}$ = 33 dB, skutečně naměřená hodnota je o cca 2 dB vyšší. Částečně to způsobuje provoz VZT pro zajištění větrání. Ovšem významným činitelem je právě způsob zadání do výpočetního modelu. Vstupní data měření jsou v zásadě v třetinooktávových spektrech, naopak výpočty v modelech jsou převedeny do hrubšího „měřítka“ oktávových pásem. Vesměs se jedná o standardní postup, jelikož jde o zjednodušení a urychlení výpočtu. Navíc dle obdobných simulací [6] je výpočet dostačující i v oktávových pásmech. Útlum překážkou nebo stíněním objektu je frekvenčně závislý, ale nemění se skokově.

Problém může nastat u útlumu zvuku vlivem zvukové izolace (neprůzvučnosti) konstrukce. Tento výpočet je totiž složitější zejména pro vícevrstvé, sendvičové konstrukce s dutinami, jako je modulová prosklená fasáda. Taková konstrukce totiž vykazuje dva základní poklesy útlumu hluku, tzv. oblast rezonanční frekvence a oblast koincidence. V těchto frekvenčních oblastech sendvičové konstrukce typu dvojitého nebo trojitého zasklení netlumí, nebo tlumí velice špatně, viz obr. 13. Popisovaný pokles útlumu hluku v oblasti kolem 800 Hz na obr. 13, tzv. koincidence, by byl mnohem hlubší, pokud by prosklení fasády neobsahovalo speciální vrstvy fólií (tzv. Stratophone), které fungují jako vibroizolační vrstva na tenkém plechu. Danou vrstvu skla omezují ve svém kmitání a tím snižují propad útlumu hluku.

Pokud se použije výpočet v oktávách, může lehce dojít k tomu, že se zmíněný propad v oblasti kolem 800 Hz vyhladí a nebude tak markantní (viz obr. 5, kde propad není znát). Následně dojde k tomu, že konstrukce tlumí lépe, než jak je tomu ve skutečnosti. Právě k tomu došlo v našem výpočtu. Všimněme si spektra zdroje zvuku před fasádou, viz obr. 2 a 12, kde je významně zastoupen hluk v oblasti kolem 1000 Hz, tedy právě v oblasti, kde zvolená fasáda nedosahuje takového útlumu. Zatížení fasády hlukem, u kterého dominantní frekvence korespondují s koincidenčními frekvencemi fasády, vyvolává kombinaci nepříznivých jevů, které ve výsledku vedou ke zvýšení hluku uvnitř ordinací (viz nárůst akustického tlaku na frekvenci 800 Hz na obr. 12).

Zjednodušení výpočtu zkreslilo v tomto případě výsledné hodnoty o cca 2 dB. Jedná se sice o malé, ale v této problematice zásadní rozdíly. Mnohem přesnější, výpočtově avšak náročnější je provádět výpočty v třetinooktávových spektrech, a to jak při zadávání zvukové izolace konstrukčních prvků, tak při práci s hlukem jako takovým. Tímto způsobem se lze významně přiblížit reálným výsledkům měření. Zjednodušené výpočty je možné provádět, ale je vždy nutné opatrně přistupovat k danému prvku a případně danou zvukovou izolaci korekcemi ponížit.

Kontakt na autora: jan.kralicek@fs.cvut.cz

Poděkování: Prezentované výsledky výzkumu byly podpořeny grantem SGS16/212/OHK2/3T/12 – Modelování, řízení a navrhování zařízení techniky prostředí. Děkujeme také společnosti AKUSTPROJEKT s.r.o. za poskytnuté údaje z databáze akustických studií.

Použité zdroje:

[1] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací – změna: 241/2018 Sb., účinnost od listopadu 2018.

[2] KRÁLÍČEK, J., KUČERA, M. Experimental evaluation of aerodynamic noise and fluctuations of turbulent flow over a terminal diffuser of a ventilation system. In: *The 25th International Congress on Sound and Vibration.* Hiroshima, Japan, 2018. ISSN 2329-3675. ISBN 978-83-7880-552-6.

[3] KRÁLÍČEK, J., KUČERA, M. Simulace aerodynamického hluku lopatky a válce. In: *Conference collection IBPSA.* Brno, Czech Republic 2016. ISBN 978-80-270-0772-1.

[4] KRÁLÍČEK, J., KRÁLÍČEK, J. ml. *Databáze zakázek akustických studií a posudků firmy AKUSTPROJEKT s.r.o.* 2018.

[5] Institut plánování a rozvoje hl. m. Prahy. *Otevřená data geoportal Praha* [online]. 2018. Dostupné z: http://www.geoportalpraha.cz/cs/opendata

[6] KRÁLÍČEK, J., KUČERA, M., KRÁLÍČEK J. Acoustic design of noise protection and noise mapping for heat pumps in the courtyard of a residential building. In: *The 25th International Congress on Sound and Vibration.* Hiroshima, Japan, 2018. ISSN 2329-3675. ISBN 978-83-7880-552-6.

Kampaň zaměřená na úsporu energie

V USA probíhá od roku 2016 kampaň zaměřená na úsporu energie pomocí pokročilé analýzy měřených dat (Smart Energy Analytics Campaign). V rámci této kampaně jsou průběžně vyhodnocovány dosažené úspory a sdíleny příklady dobré praxe. Průběžně jsou také oceňovány úspěšné projekty, které jsou odborné veřejnosti podrobně představeny. Veškeré dokumenty jsou volně dostupné na adrese uvedené níže. Aktuálně je zapojeno přes 80 institucí a řádově tisíce budov. Dosavadní výsledky ukazují, že díky analýze dat a následným akcím, z analýzy plynoucích, lze uspořit v průměru 7 % energie.

Zdroj: https://smart-energy-analytics.org *(JŠ)*