



**UNIVERZITNÍ
CENTRUM
ENERGETICKY
EFEKTIVNÍCH BUDOV
ČVUT V PRAZE**

Akustika hal se střešními perforovanými trapézovými plechy v systémových střešních skladbách ISOVER ROOF ACOUSTIC

souhrnná zpráva

Ing. Jiří Nováček, Ph.D.

12. března 2020

Obsah

Úvod	2
Objemové a tvarové řešení vzorové haly	3
Zvuková pohltivost vnitřních povrchů	3
Zdroje zvuku	6
Doba dozvuku	7
Hladina akustického tlaku A	8
Jednolodní hala – plný trapézový plech	9
Jednolodní hala – perforovaný trapézový plech, varianta č. 1	11
Jednolodní hala – perforovaný trapézový plech, varianta č. 2	13
Závěr	15
Podklady	15

Úvod

Předmětem této zprávy je výpočtové stanovení vlivu perforovaných trapézových plechů v systémových střešních skladbách ISOVER ROOF ACOUSTIC na prostorovou akustiku průmyslových halových objektů, zejména na zkrácení doby dozvuku a snížení hladiny akustického tlaku z provozu zdrojů hluku. K tomuto účelu byl vytvořen akustický model „typické“ jednolodní haly s ocelovou nosnou konstrukcí a lehkým opláštěním. Akustické výpočty byly provedeny ve specializovaném softwaru ODEON Combined verze 14 a doplněny predikcemi dle běžně používaných výpočtových metod.

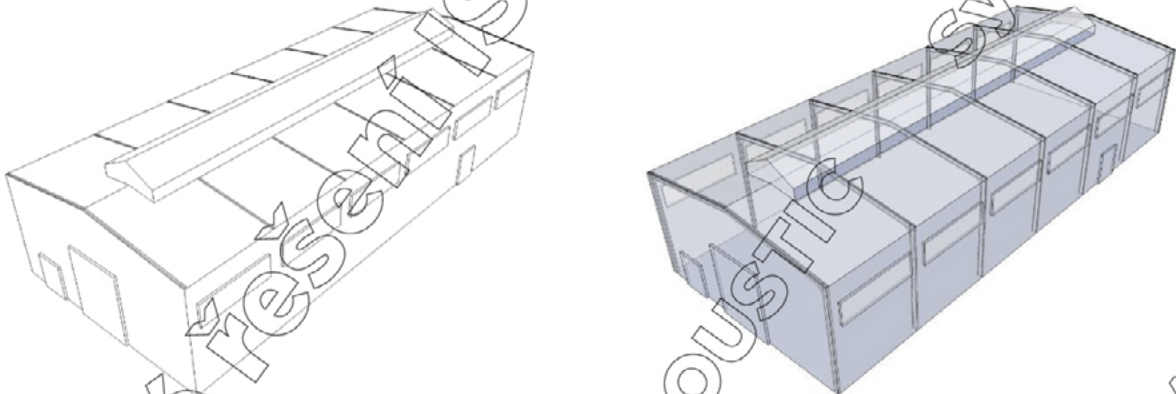
Objemové a tvarové řešení vzorové haly

Nejprve byl vytvořen trojrozměrný model haly, který byl následně importován do softwaru ODEON. Hala je navržena jako jednoduší, s obdélníkovým půdorysem (15 x 36 m) a sedlovou střechou. Výška haly je 7,5 m u okapu a 8,5 m ve hřebeni. Nosnou konstrukci haly tvoří ocelové rámy svařované z profilů tvaru I v osové vzdálenosti 6 m. Stěny haly tvoří sendvičové panely s tepelněizolačním jádrem a opláštěním z ocelového plechu (typ Kingspan). Skladba střechy byla namodelována ve třech variantách:

- plný trapézový plech TR 150/280/0,75, PE fólie 0,2 mm, Isover T tl. 120 mm, Isover S tl. 60 mm, fólie SIKAPLAN tl. 1,5 mm,
- 1 – perforovaný trapézový plech TR 150/280/0,75, geotextilie, výplně TR plechu z MW Fassil, PE fólie 0,2 mm, Isover T tl. 120 mm, Isover S tl. 60 mm, fólie SIKAPLAN tl. 1,5 mm,
- 2 - perforovaný trapézový plech TR 150/280/0,75, PE fólie 0,2 mm, Isover T tl. 120 mm, Isover S tl. 60 mm, fólie SIKAPLAN tl. 1,5 mm.

Składby střechy se navzájem liší především spodními vrstvami orientovanými do prostoru haly. V první variantě byl trapézový plech plný, ve druhé perforovaný a vyplněný klny z minerálních vláken, ve třetí perforovaný bez pohltivé výplně.

Podlaha haly je betonová. V obou delších stěnách jsou umístěna okna o rozměrech 1,5 x 5 m (celkem 12 oken). Ve hřebeni střechy se nachází pásový světlík. Pro úplnost jsou ve dvou stěnách umístěna vrata a venkovní dveře (bez bližší specifikace).



Obrázek 1 – 3D model jednoduší haly

Zvuková pohltivost vnitřních povrchů

Zvuková pohltivost vnitřních povrchů závisí na frekvenci a obvykle se vyjadřuje hodnotami činitele zvukové pohltivosti α (-) v oktávních pásmech nejméně v rozsahu od 125 Hz do 4 000 Hz. Pro běžné stavební povrchy jsou tyto hodnoty uváděny v odborné literatuře, u výrobků určených pro pohlcování zvuku bývají obsahem technické dokumentace.

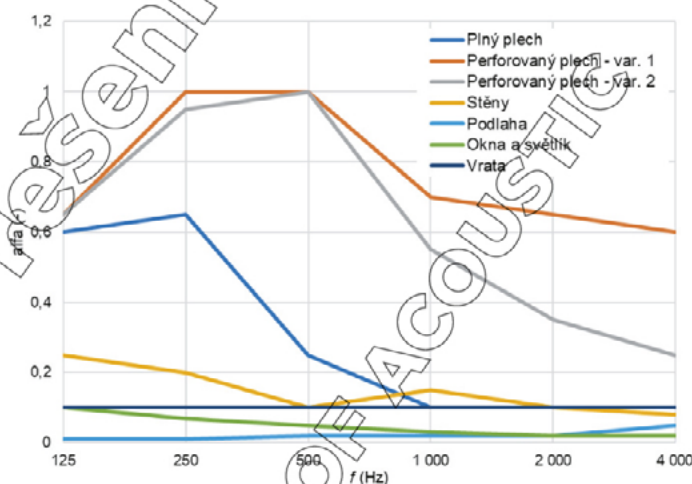
Pro akustické výpočty byly použity hodnoty činitelů zvukové pohltivosti z materiálové knihovny programu ODEON a z podkladů výrobců stavebních materiálů, viz tabulka 1.

Tabulka 1 – Činitelé zvukové pohltivosti α (-) vnitřních povrchů haly

Povrch	f (Hz)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Střecha – plný trapézový plech TR 150/280/0,75 ¹	0,60	0,65	0,25	0,10	0,10	0,10
Střecha – perforovaný trapézový plech TR 150/280/0,75, var. 1 ¹	0,65	1,00	1,00	0,70	0,65	0,60
Střecha – perforovaný trapézový plech TR 150/280/0,75, var. 2 ¹	0,65	0,95	1,00	0,55	0,35	0,25
Stěny – sendvičový panel s opláštěním z ocelového plechu ²	0,25	0,20	0,10	0,15	0,10	0,08
Podlaha – hladký beton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Okna a světlík	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02
Vrata – pohltivost 10 %	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Nosné ocelové prvky – pohltivost 2 %	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

¹Protokol č. 207/17 o zkoušce stanovení činitele zvukové pohltivosti v dozukové místnosti ploché střechy z trapézového plechu s izolací Isover, CSI a. s., 2017

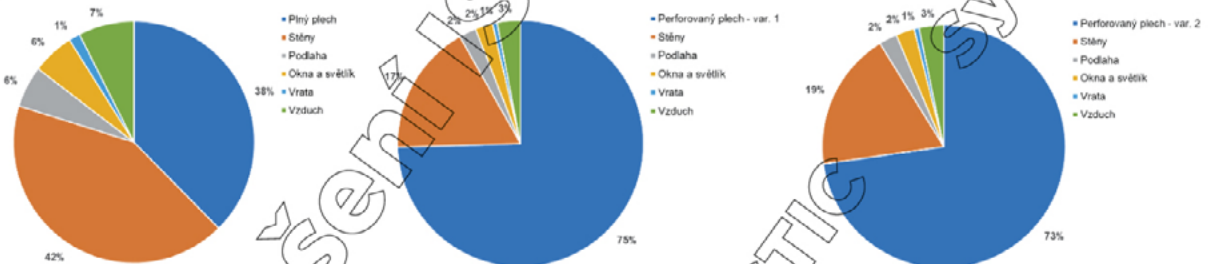
²Acoustic Performance Guide, Insulated roof, wall and facade systems, společnosti Kingspan (6/2005)



Obrázek 2 – Činitelé zvukové pohltivosti α (-) vnitřních povrchů haly

Tabulka 2 – Ekvivalentní pohltivé plochy A (m^2) vnitřních povrchů haly

Povrch	Plocha (m^2)	f (Hz)					
		125	250	500	1 000	2 000	4 000
Střecha – plný trapézový plech	427	256	278	107	43	43	43
Střecha – perforovaný trapézový plech, var. 1	427	278	427	427	299	278	256
Střecha – perforovaný trapézový plech, var. 2	427	278	406	427	235	149	107
Stěny	672	168	134	67	101	67	54
Podlaha	549	5	5	11	11	11	27
Okna a světlík	280	28	20	14	8	6	6
Vrata	30	3	3	3	3	3	3
Pohltivost zvuku ve vzduchu	-	1,8	5,3	10,8	18,9	41,1	125,2
Celkem – plný plech	2 388	462	445	213	185	171	258
Celkem – var. 1	2 388	484	595	533	441	405	471
Celkem – var. 2	2 388	484	573	533	377	277	322

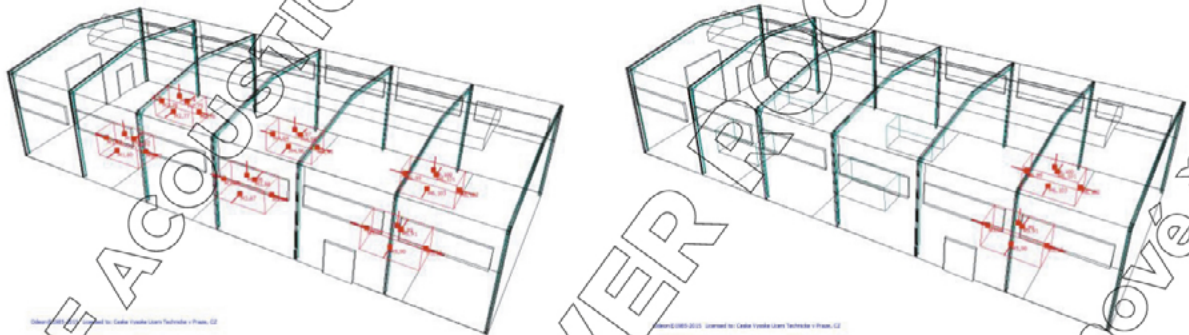

Obrázek 3 – Podíl jednotlivých povrchů na celkové pohltivosti haly, průměr pro oktávová pásma 500 Hz a 1 000 Hz, zleva: plný trapézový plech, perforovaný trapézový plech - var. 1, perforovaný trapézový plech – var. 2

 Obestavěný objem haly je 4 423 m^3 .

Zdroje zvuku

V hale bylo uvažováno celkem šest identických zdrojů zvuku, každý s hladinou akustického výkonu A, $L_{WA} = 90$ dB. Výpočty šíření zvuku byly provedeny pro dva provozní stavy, kdy současně běží všech šest zdrojů zvuku nebo jen dva z nich. Protože reálné průmyslové zdroje hluku v halových objektech většinou tvoří strojní zařízení větších rozměrů, v akustickém modelu byly tyto zdroje namodelovány jako boxy o rozměrech 2 m x 4 m x 2 m (š x d x v), které vyzařují hluk ze čtyř bočních povrchů a jednoho horního. Díky tomuto přístupu je ve výpočtech zahrnut i vliv zdrojů na zmenšení vnitřního objemu haly.

Zdroje zvuku byly rozmístěny rovnoměrně na podlaze haly, jak je naznačeno na obrázku 4.

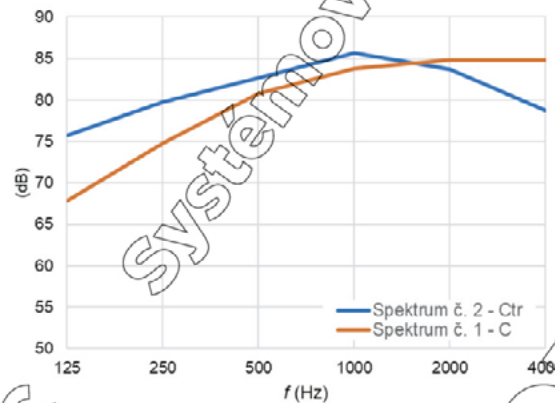


Obrázek 4 – Akustický model haly se znázorněním zdrojů zvuku

Frekvenční spektrum zdrojů zvuku bylo převzato z ČSN EN ISO 717-1 dle faktorů přizpůsobení spektru C (spektrum č. 1 – provozovny emitující zejména hluk středních a vyšších kmitočtů) a C_r (spektrum č. 2 – provozovny emitující zejména hluk nízkých a středních kmitočtů). Hladiny akustického výkonu zdrojů zvuku vážené funkcí A jsou v závislosti na frekvenci uvedeny v tabulce 3 a znázorněny na obrázku 5.

Tabulka 3 – Hladiny akustického výkonu zdrojů zvuku

Povrch	L_w vážená funkcí A (dB)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Spektrum č. 1 – faktor C	67,8	74,8	80,8	83,8	84,8	84,8
Spektrum č. 2 – faktor C_r	75,7	79,7	82,7	85,7	83,7	78,7



Obrázek 5 – Hladiny akustického výkonu L_w (dB) vážené funkcí A

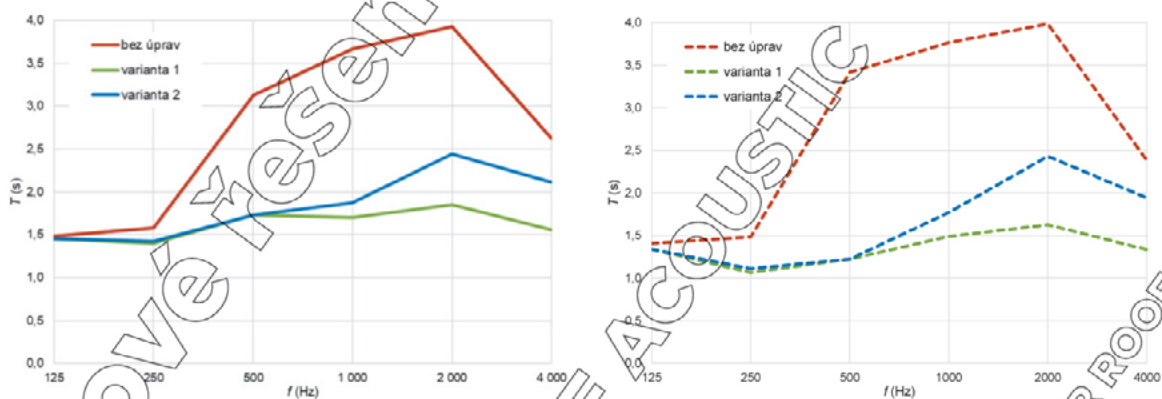
Doba dozvuku

Doba dozvuku haly závisí na jejích rozměrech, zejména vnitřním objemu, tvaru, množství zvukové pohltivosti vč. jejího rozmístění atp.

Výpočet doby dozvuku byl proveden softwarem ODEON a ručně podle Eyringova vzorce, uvedeného v ČSN 73 0525:

$$T = 0,163 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m) + 4mV} \quad (1)$$

kde V (m^3) je objem uzavřeného prostoru, S (m^2) plocha vnitřních povrchů, α_m (-) střední činitel zvukové pohltivosti a m (m^{-1}) činitel útlumu zvuku při šíření ve vzduchu.



Obrázek 6 – Doba dozvuku T (s), vlevo: ODEON, vpravo: Eyring

Tabulka 4 – Doba dozvuku vypočtená softwarem ODEON

Varianta	Doba dozvuku T (s)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Plný trapézový plech	1,48	1,58	3,13	3,67	3,93	2,62
Děrovaný trapéz. plech – var. 1	1,45	1,40	1,73	1,70	1,85	1,56
Děrovaný trapéz. plech – var. 2	1,45	1,42	1,73	1,87	2,44	2,11

Tabulka 5 – Doba dozvuku podle Eyringova vzorce

Varianta	Doba dozvuku T (s)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Plný trapézový plech	1,41	1,48	3,42	3,77	3,99	2,38
Děrovaný trapéz. plech – var. 1	1,34	1,06	1,22	1,49	1,63	1,33
Děrovaný trapéz. plech – var. 2	1,34	1,11	1,22	1,77	2,43	1,94

Z výsledků uvedených v tabulkách 4 a 5 vyplývá, že doba dozvuku haly s perforovaným trapézovým plechem (ve variantě 1 i 2) vypočtená podle Eyringova vztahu je obecně kratší než doba dozvuku stanovená programem ODEON. Je to dáno tím, že počítačový model zohledňuje vliv rozmístění pohltivých povrchů na prostorovou akustiku, zatímco ruční výpočet vychází z předpokladu rovnoměrně rozložené pohltivosti. Umístění perforovaného plechu výhradně na střechu a ponechání odrazivých stěn vede k prodloužení skutečné doby dozvuku v porovnání s predikovanými hodnotami. Lepšího výsledku by bylo dosaženo, kdyby část pohltivosti byla umístěna také na stěny.

Hladina akustického tlaku A

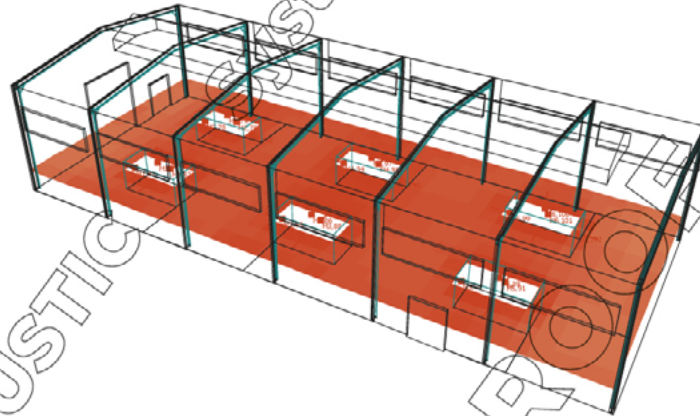
Hladina akustického tlaku A v hale se mění s počtem a vlastnostmi zdrojů zvuku, jejich umístěním, vzdáleností od místa příjmu, množstvím zvukové pohltivosti, atp. Pokud je vzdálenost mezi zdrojem zvuku a místem příjmu větší než dozvuková vzdálenost, pak lze v poli odražených vln vypočítat hladinu akustického tlaku podle vztahu:

$$L = L_w + 10 \lg \left[\frac{4(1 - \alpha_m)}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m) + 4mV} \right] \quad (2)$$

kde L_w (dB) je hladina akustického výkonu zdroje zvuku.

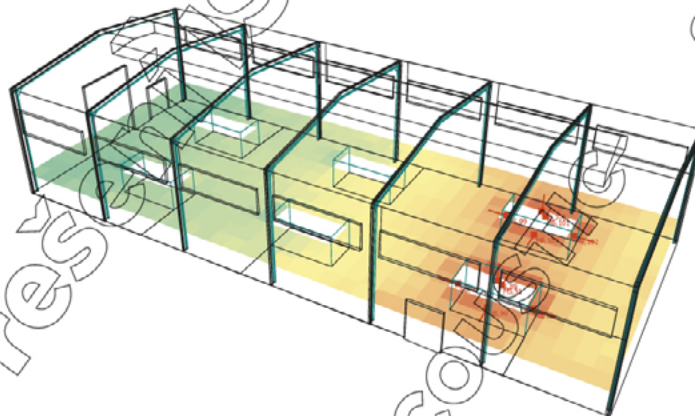
Výsledky výpočtů dle tohoto vzorce jsou uvedeny kurzívou v následujících obrázcích spolu s výsledky simulačních výpočtů programem ODEON. Přestože oba postupy poskytují podobné hodnoty, ruční výpočet vede obecně k mírně nižším hodnotám, zejména ve variantě s více zdroji. Rozdíl je způsoben především zanedbáním vlivu přímého zvukového pole v ručním výpočtu a skutečného rozmístění pohltivých povrchů.

Jednolodní hala – plný trapezový plech



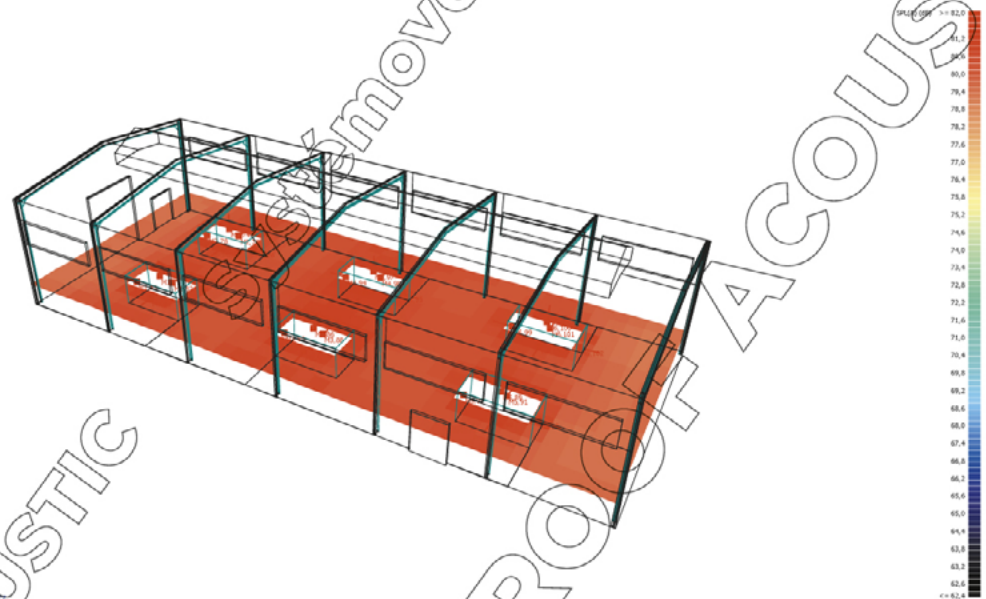
080001989-2015 Licensed to: Celexa s.r.o. (www.celexa.cz) - Praha, CZ

Obrázek 7 – Hladiny akustického tlaku A , L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 6 zdrojů zvuku,
průměrná hodnota 80,4 dB (80,1 dB)



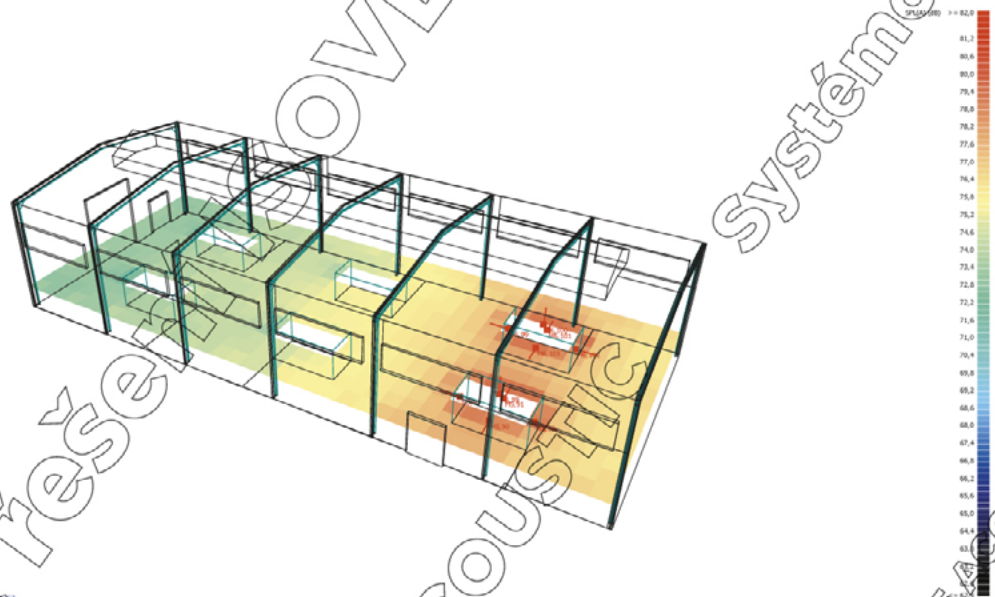
080001989-2015 Licensed to: Celexa s.r.o. (www.celexa.cz) - Praha, CZ

Obrázek 8 – Hladiny akustického tlaku A , L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 2 zdroje zvuku,
průměrná hodnota 75,3 dB (75,3 dB)



OWAC1989-015 Licensed to: České vysoké učení technické v Praze s.r.o.

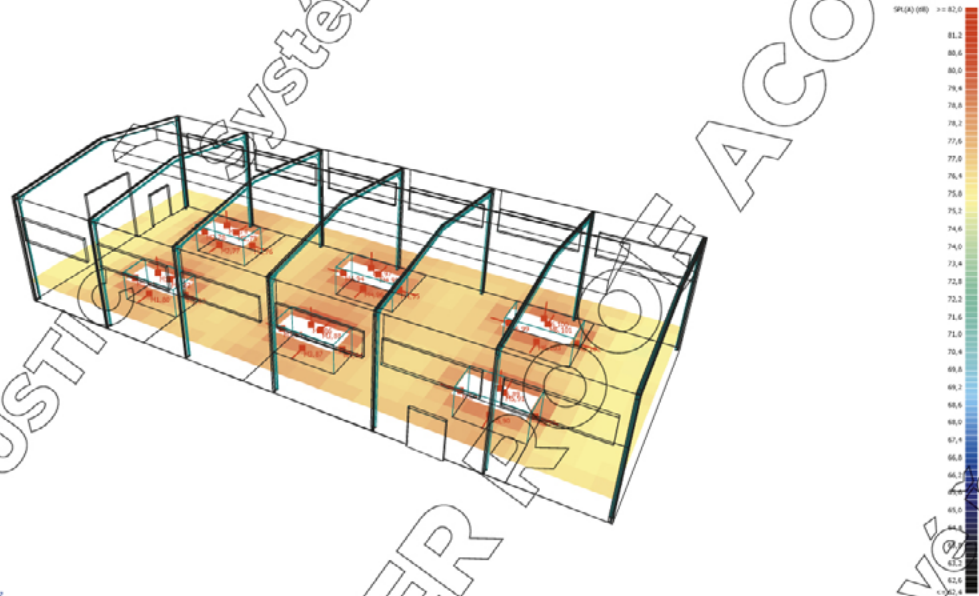
Obrázek 9 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 2 a 6 zdrojů zvuku, průměrná hodnota 80,4 dB (80,1 dB)



OWAC1989-015 Licensed to: České vysoké učení technické v Praze s.r.o.

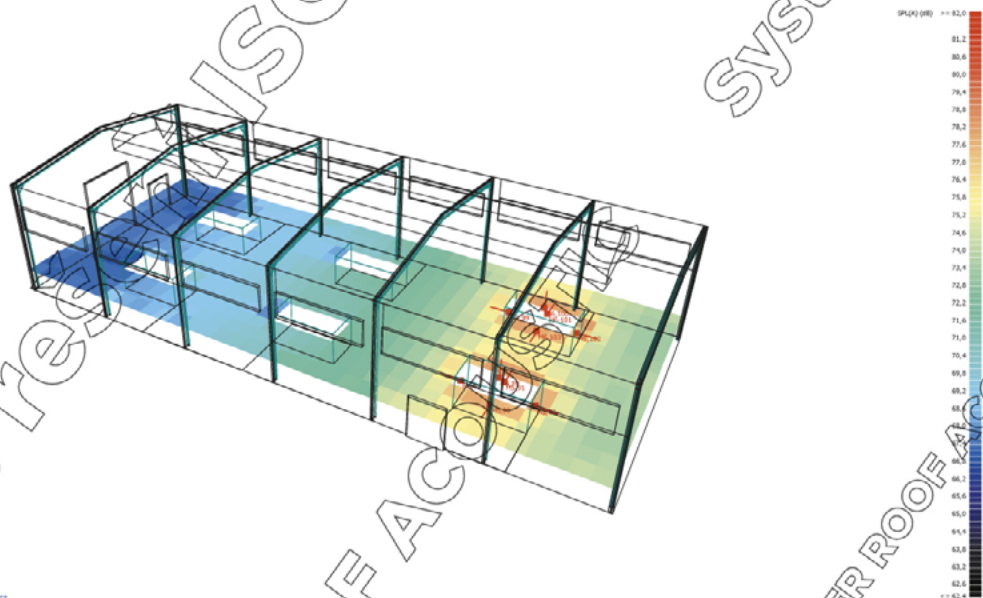
Obrázek 10 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 2 a 2 zdroje zvuku, průměrná hodnota 75,4 dB (75,4 dB)

Jednolodní hala – perforovaný trapézový plech, varianta č. 1



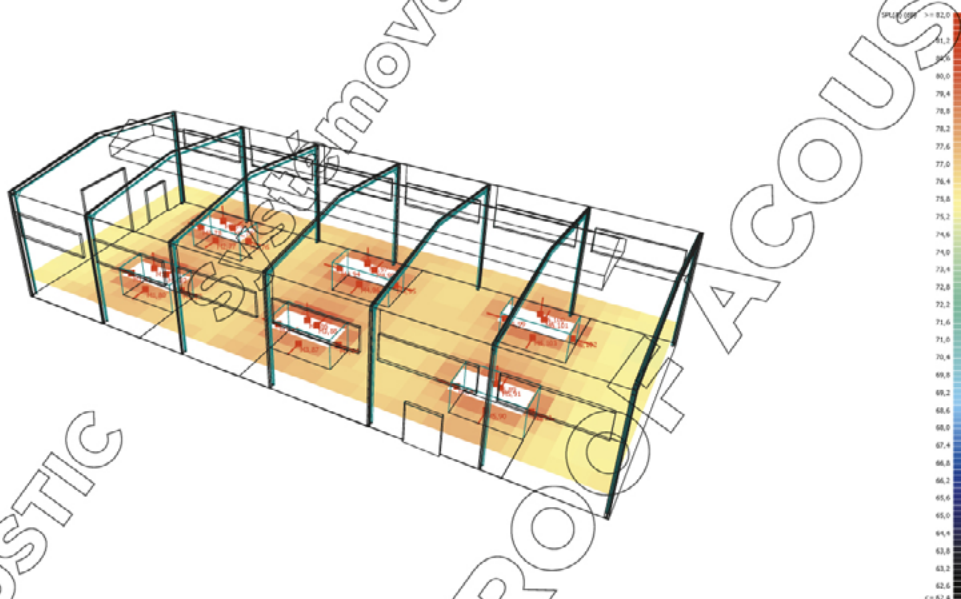
Obrazek1185-2015. Licenced to: ČVUT Vysoké školy Technické v Praze, CZ

Obrázek 11 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 6 zdrojů zvuku, průměrná hodnota 77,1 dB (76,0 dB)



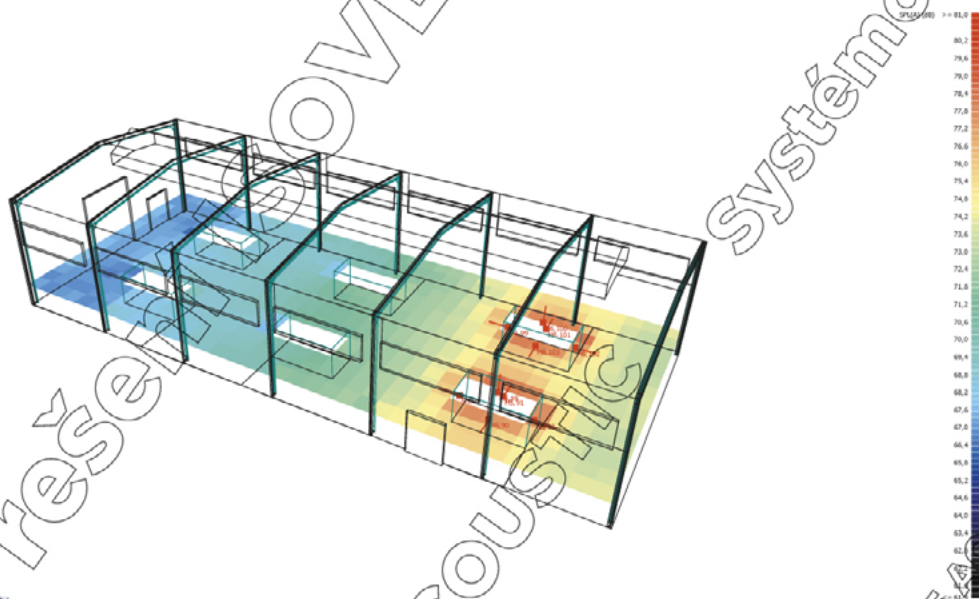
Obrazek1185-2015. Licenced to: ČVUT Vysoké školy Technické v Praze, CZ

Obrázek 12 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 2 zdroje zvuku, průměrná hodnota 71,4 dB (71,2 dB)



OWRC1989-015 Licensed to: Cadek Vysoké učení technické v Praze, s.r.o.

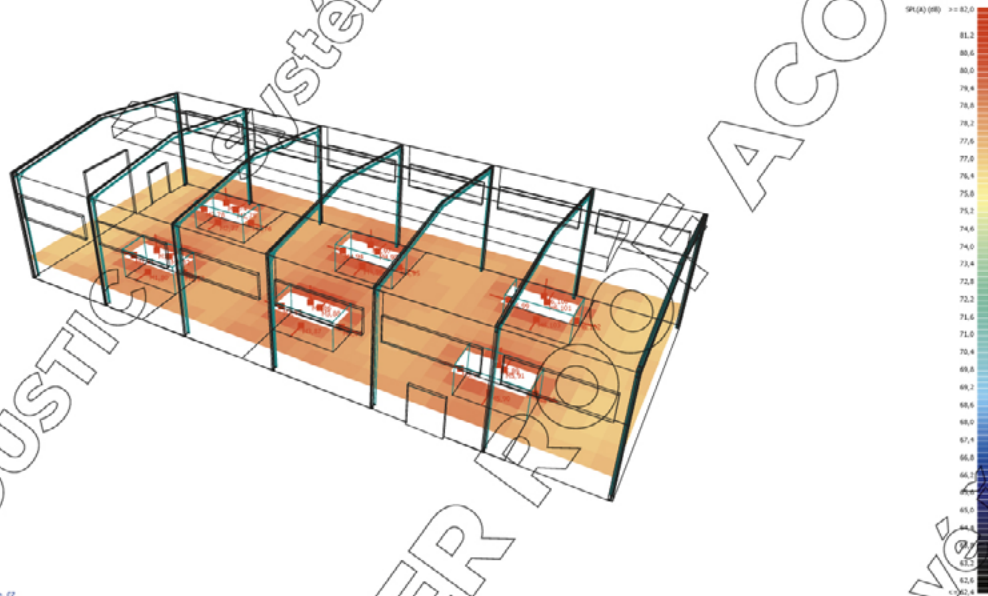
Obrázek 13 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 2 a 6 zdrojů zvuku, průměrná hodnota 77,0 dB (75,9 dB)



OWRC1989-015 Licensed to: Cadek Vysoké učení technické v Praze, s.r.o.

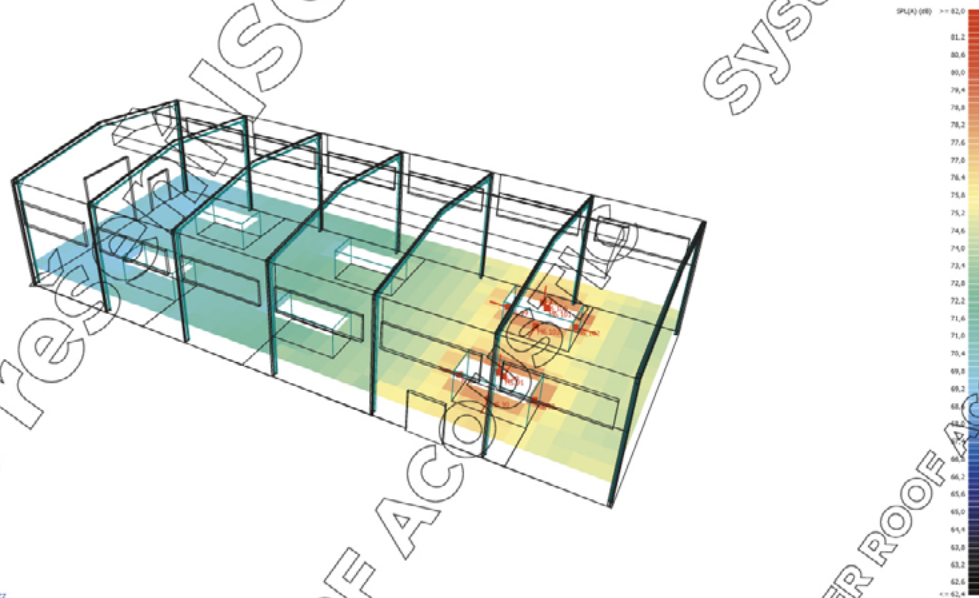
Obrázek 14 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 2 a 2 zdroje zvuku, průměrná hodnota 71,2 dB (71,1 dB)

Jednolodní hala – perforovaný trapézový plech, varianta č. 2



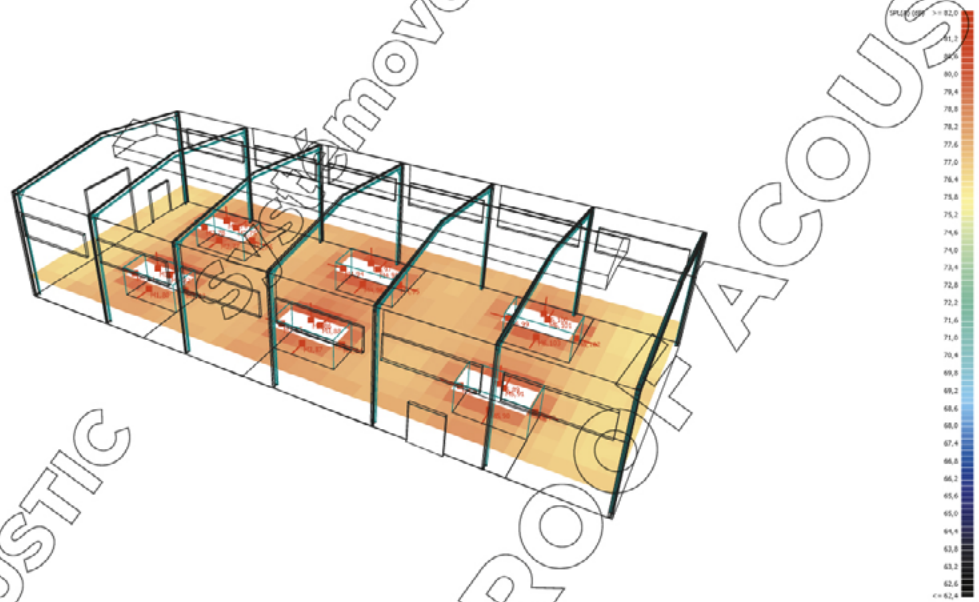
Obrazek 15 - Hladiny akustického tlaku L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 6 zdrojů zvuku, průměrná hodnota 78,2 dB (77,5 dB)

Obrazek 15 – Hladiny akustického tlaku A , L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 6 zdrojů zvuku, průměrná hodnota 78,2 dB (77,5 dB)



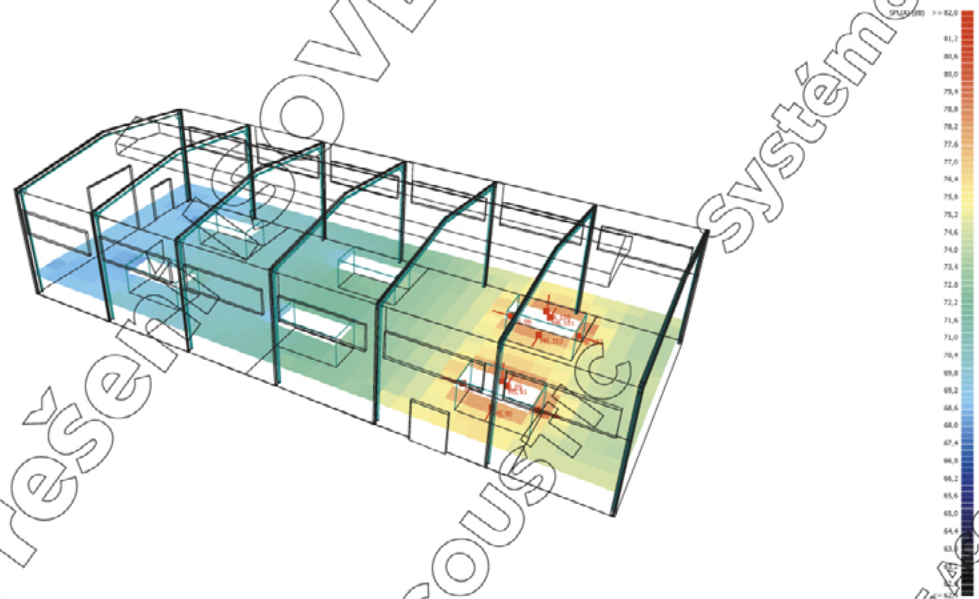
Obrazek 16 - Hladiny akustického tlaku L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 2 zdroje zvuku, průměrná hodnota 72,8 dB (72,8 dB)

Obrazek 16 – Hladiny akustického tlaku A , L_A (dB) pro spektrum č. 1 a 2 zdroje zvuku, průměrná hodnota 72,8 dB (72,8 dB)



OWRC1989-015 Licensed to: Cadek Vysoká škola technická - ČVUT v Praze

Obrázek 17 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 2 a 6 zdrojů zvuku, průměrná hodnota 77,8 dB (77,0 dB)



OWRC1989-015 Licensed to: Cadek Vysoká škola technická - ČVUT v Praze

Obrázek 18 – Hladiny akustického tlaku A, L_A (dB) pro spektrum č. 2 a 2 zdroje zvuku, průměrná hodnota 72,3 dB (72,2 dB)

Závěr

Použití perforovaného trapézového plechu ve skladbě střechy má výrazný vliv na prostorovou akustiku haly. Doba dozvuku haly s perforovaným trapézovým plechem je přibližně poloviční oproti běžnému řešení s plným plechem ($T = 3,42$ s – plný plech, 1,72 s – perforovaný plech var. 1, 1,80 s – perforovaný plech var. 2; průměrné hodnoty pro oktávová pásma 500 Hz a 1 000 Hz). Obecně platí, že kratší doba dozvuku přispívá ke srozumitelnosti řeči (např. při komunikaci zaměstnanců na pracovišti, služebním nebo bezpečnostním hlášení apod.). Pro srovnání, ČSN 73 0527 doporučuje pro haly se sportovním využitím dobu dozvuku 1,6 s (vztaženo k vnitřnímu objemu 4 423 m³). Vypočtená doba dozvuku haly s perforovaným trapézovým plechem je velmi blízká této hodnotě, což v hale zajišťuje optimální akustické podmínky.

Perforovaný plech dále přispívá ke snížení hluku v hale (s výjimkou míst v těsné blízkosti zdrojů zvuku). Z výsledků výpočtů je zřejmé, že výsledky pro obě frekvenční spektra zdrojů zvuku jsou obdobné, zatímco vliv počtu současně běžících zdrojů není zanedbatelný. Pro variantu 1 bylo dosaženo průměrné snížení hladiny akustického tlaku A o **3,3 dB** (6 zdrojů), resp. o **4,0 dB** (2 zdroje). Pro variantu 2 je průměrně snížení hladiny L_A o **2,4 dB** (6 zdrojů) a **2,8 dB** (2 zdroje). Pokles o 3 dB zjednodušeně odpovídá fiktivnímu snížení počtu běžících zdrojů zvuku o 50%, resp. rozdíl 4 dB o 60%.

Podklady

- [1] ČSN 73 0525 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady
- [2] ČSN 73 0527 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely
- [3] ČSN EN ISO 717-1 Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách - Část 1: Vzduchová neprůzvučnost
- [4] Protokol o zkoušce č. 207/17 Stanovení činitele zvukové pohltivosti plochých střech z trapézového plechu s izolací Isover, CSI a. s., 2017
- [5] Ploché střechy, technická informace společnosti Isover, č. 6-19-3, 32 str.
- [6] Manuál programu ODEON, verze 14 Combined
- [7] Acoustic Performance Guide, Insulated Roof, Wall and Facade Systems, UK, CI/SfB (37), Hh2, June 2005
- [8] Fernández Otero, L. A., Sobreira Seoane, M. A., González Cespón, J. L., Vilán, J. A., Prediction of noise levels in closed industrial plants, Internoise 2013, Innsbruck
- [9] Probst, W., Calculation of sound in workrooms to support noise control and acoustic optimization, Internoise 2017, Hong-Kong
- [10] Rindel, J., H., Christensen, C. L., Odeon, a design tool for noise control in indoor environments, Conference paper: Noise at Work 2007, Lille
- [11] www.isover.cz