



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ POKROČILÝCH ZDICÍCH PRVKŮ PRO AKUSTICKÉ ZDIVO

DEVELOPMENT OF ADVANCED MASONRY BLOCKS FOR ACOUSTIC MASONRY
CONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Klára Šnoplová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Klára Šnoplová
Název	Vývoj pokročilých zdicích prvků pro akustické zdivo
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNÝ, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] Vaverka, J.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] ČSN EN 1745 Zdivo a výrobky pro zdivo - Metody stanovení návrhových tepelných hodnot
- [5] ČSN 73 0532 Akustika. Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách. Požadavky
- [6] R.J.M. Craik, R. Wilson, Sound transmission through masonry cavity walls, Journal of Sound and Vibration, Volume 179, Issue 1, 1995, Pages 79-96, ISSN 0022-460X,
- [7] Emeritus A.W Hendry, Masonry walls: materials and construction, Construction and Building Materials, Volume 15, Issue 8, 2001, Pages 323-330, ISSN 0950-0618

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce se bude zabývat vývojem nového akustického zdiva pro zděné dělicí konstrukce. Cílem bude navrhnout inovovaný (nebo zcela nový) systém pro zděné konstrukce z keramických zdících tvarovek tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší vzduchové neprůzvučnosti a zároveň zjednodušení systému výstavby. V daném případě by měl být systém použitelný především v oblasti mezibytových příček. V rámci bakalářské práce navrhne bakalářka (na základě provedené rešerše literatury i průzkumu trhu) systém zdiva sestávající se jednak z inovovaných (nových) tvarovek, a dále také bude navržena nová technologie výstavby akustické dělicí konstrukce z těchto tvarovek. Proveditelnost navrženého systému bude ověřena na zmenšeném modelu vyrobeném pomocí 3D tisku. (Rozsah práce 40-50 stran)

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem chování zvuku v oblasti dělicích konstrukcí, zejména mezibytových příček, hodnocením konstrukcí z hlediska akusticko-izolačních vlastností a výrobou keramiky obecně a akustických zdicích prvků. Na základě rešerše literatury a průzkumu trhu byly navrženy nové způsoby řešení akusticko-izolačního zdiva včetně výstavby. Proveditelnost výstavby byla ověřena na zmenšeném modelu vytvořeném pomocí 3D tisku. Vybraný zdicí prvek byl dále rozpracován do různých rozměrových modulů, které byly porovnány na základě hmotností jednotlivých prvků a na základě množství spár. Dále byly upravovány míry vylehčení prvků, aby bylo dosaženo co nejvyšších hodnot plošné hmotnosti zdiva a tím co nejvyšší vzduchové neprůzvučnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

zvuk, ochrana proti hluku, akustika, vzduchová neprůzvučnost, keramika, zdivo, zdicí prvek

ABSTRACT

This thesis deals with study of sound behaviour in the field of partition structures, especially inter-residential partitions, evaluation of structures in terms of acoustic insulation properties and the production of ceramics in general and acoustic masonry elements. Based on a literature search and market research, new ways of solving acoustic-insulating masonry, including construction, were proposed. The feasibility of construction was verified on a small-scale model created using 3D printing. The selected masonry element was further developed into various dimensional modules, which were compared on the basis of the weights of the individual elements and on the basis of the number of joints. Furthermore, the levels of lightening of the elements were adjusted in order to achieve the highest possible values of the basis weight of the masonry and thus the highest possible airborne sound insulation.

KEYWORDS

sound, noise protection, acoustics, airborne sound insulation, ceramics, masonry, masonry unit

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Klára Šnoplová *Vývoj pokročilých zdicích prvků pro akustické zdivo*. Brno, 2019. 61 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav
technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vývoj pokročilých zdicích prvků pro akustické zdivo* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Klára Šnoplová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph. D. za rady, připomínky a podněty při vypracování bakalářské práce.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Vítězslavu Novákovi za pomoc při realizaci praktické části.

V neposlední řadě děkuji rodině za podporu při studiu a nezbytné zázemí a Ladislavu Lidmilovi za cenné připomínky a nekonečnou ochotu.

OBSAH

TEORETICKÁ ČÁST	9
1. ÚVOD	9
2. AKUSTIKA	10
2.1. VZTAH MEZI AKUSTICKÝMI A MECHANICKÝMI VLASTNOSTMI	10
2.2. ZVUK	11
2.2.1. Šíření zvuku v uzavřeném prostoru	11
2.2.2. Odraz zvuku	11
2.3. HLUK	11
2.3.1. Ochrana proti hluku	11
3. HODNOCENÍ KONSTRUKCÍ Z HLEDISKA AKUSTICKO-IZOLAČNÍCH VLASTNOSTÍ	12
3.1. HLUK VE STAVBÁCH PRO BYDLENÍ A VE STAVBÁCH OBČANSKÉHO VYBAVENÍ	12
3.1.1. Akustický tlak	12
3.1.2. Intenzita zvuku	13
3.1.3. Hladina akustického tlaku a hladina intenzity zvuku	13
3.2. NEPRŮZVUČNOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ	14
3.2.1. Posuzování konstrukcí na základě neprůzvučnosti	15
3.2.2. Vzduchová neprůzvučnost	16
4. KERAMIKA	20
4.1. VÝROBA	20
4.1.1. SUROVINY	20
4.1.2. VYTVÁŘENÍ Z PLASTICKÉHO TĚSTA	20
4.1.3. SUŠENÍ	21
4.1.4. VÝPAL	21
4.2. AKUSTICKÉ ZDICÍ PRVKY	21
4.2.1. Vzduchová neprůzvučnost stěn z akustických zdicích prvků	21
4.2.2. Vnitřní dělicí konstrukce	21
PRAKTICKÁ ČÁST	23
5. CÍL	23
6. METODIKA	23
7. PRŮZKUM TRHU V OBLASTI AKUSTICKÉHO ZDIVA PRO MEZIBYTOVÉ PŘÍČKY	25
7.1. ZÁVĚR	30
8. PLASTY PRO 3D TISK	31
9. NÁVRH NOVÉHO AKUSTICKO-IZOLAČNÍHO ZDIVA	32
9.1. ZHODNOCENÍ VARIANT	37
10. VARIANTA 3 – ŘEŠENÍ OZUBŮ	38
11. ROZMĚROVÉ MODULY ZDICÍCH PRVKŮ	40
11.1. MODULOVÉ VARIANTY	41
11.1.1. Varianty vycházející z ozubů 2	41
11.1.2. Varianty vycházející z ozubů 3	44
11.1.3. Vyhodnocení modulových variant	47
11.2. POROVNÁNÍ ROZMĚROVÝCH MODULŮ	49
11.3. ÚPRAVY MÍRY VYLEHČENÍ	49
11.3.1. Výpočet vzduchové neprůzvučnosti vybraných rozměrových modulů	51
11.4. VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÝCH MODULŮ	53
12. ZÁVĚR	56
ZDROJE	58
SEZNAMY	60

TEORETICKÁ ČÁST

1. ÚVOD

Ochrana lidského zdraví před nepříznivými účinky hluku je jedním z klíčových témat dnešní doby, a to nejen v oblasti dopravních staveb, ale také v oblasti občanské výstavby. Z hlediska stavební akustiky jsou důležité vlastnosti jak vnitřních dělicích konstrukcí, tak i obálky budovy. [1]

Kromě akusticko-izolační funkce však musí konstrukce zároveň splňovat i další požadavky, jmenovitě jsou to mechanická odolnost a stabilita, požární bezpečnost, ochrana zdraví a životního prostředí, bezpečnost při užívání a úspora energie a tepelná ochrana. S tím nám může pomoci i vhodně zvolený materiál a výrobek z něj (konstrukční prvek). Tyto požadavky jsou stanoveny Stavebním zákonem a jeho prováděcím předpisem (Vyhláška o technických požadavcích na stavby). [2] [3]

Vhodná volba materiálu tvoří základ každé stavby. Například beton, který by dle normy ČSN 73 0532 splňoval požadavky na vzduchovou neprůzvučnost mezi místnostmi ($R'_w = 53 \text{ dB}$), by musel mít tloušťku asi 150 mm, aby však zároveň plnil i tepelně izolační funkci, měl by mít tloušťku minimálně 1,5 m (dle ČSN 73 0540), což je nereálné. [4] [5]

V České republice dochází k migraci obyvatel z klidných vesnic do rušných měst, což způsobuje rostoucí ceny bytů. Z toho důvodu vznikají cenově dostupnější malé byty oddělené pouze mezibytovými příčkami. Jelikož nemají nosnou funkci, pouze funkci dělicí, nemusí na rozdíl od nosných stěn dosahovat tak vysokých hodnot objemové, a tedy i plošné hmotnosti, na které závisí vzduchová neprůzvučnost. Jednotlivé byty potom nejsou dostatečně odhlučňeny. Je proto potřeba vytvořit mezibytové příčky s dostatečnou vzduchovou neprůzvučností.

Z hlediska akusticko-izolačních vlastností lze konstrukci hodnotit z pohledu normy ČSN 73 0532 Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky, dle které klasifikujeme stěnu na základě hodnot vzduchové neprůzvučnosti. Na druhé straně Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací ve znění pozdějších předpisů hodnotí konstrukci podle rozdílu akustických tlaků před a za konstrukcí. Máme tedy 2 různé způsoby, jak konstrukci akusticko-izolačně hodnotit. [1] [4]

Dalším důvodem pro vývoj cihel se stále zvyšujícími se akusticko-izolačními vlastnostmi je zvyšování požadavků normy.

Cílem práce je navrhnout keramickou zdicí tvarovku pro mezibytové příčky s co největší vzduchovou neprůzvučností při zachování dobrých tepelně izolačních vlastností a zjednodušit a zrychlit technologii výstavby, což bude ověřeno na zmenšeném modelu vyrobeném pomocí 3D tisku. Bude navrženo více možností zlepšení akusticko-izolačních vlastností, některé z nich budou dále zpracovány, aby dosahovaly co nejvyšších hodnot vzduchové neprůzvučnosti.

2. AKUSTIKA

Akustika je věda zabývající se mechanickým kmitáním a vlněním v pružném prostředí. Dělí se na:

- elektroakustiku
- fyzikální akustiku
- hudební akustiku
- psychoakustiku
- technickou akustiku zahrnující stavební akustiku, která se dále dělí na:
 - akustiku stavebních konstrukcí
 - prostorovou akustiku
 - urbanistickou akustiku
 - akustiku výstavby sídel
 - a další odvětví [6]

2.1. VZTAH MEZI AKUSTICKÝMI A MECHANICKÝMI VLASTNOSTMI

Při zkoumání poškození konstrukcí se nejdříve posuzují vizuálně. Vizuálním posouzením šířky a hloubky trhlin však nemohou být zkoumány mikrotrhliny, které mohou časem vést až k destrukci celé konstrukce. Problém je hlavně s historickými budovami, kde je destruktivní zkoušení velmi problematické. Historické zděné konstrukce jsou často náchylné k poškození při statickém, cyklickém a dynamickém namáhání. Podle chování zvuku v konstrukci lze posoudit stav této konstrukce, mohlo by tedy časem jít o novou nedestruktivní metodu. Při této metodě dochází k detekci hromadění poškození ve zdivu. Šlo by tak předvídat destrukci celé konstrukce. [7] [8] [9]

Jedná se o metodu akustické emise, kdy je do konstrukce na jedné straně vysílán zvuk o určité frekvenci a na druhé straně byly zkoumány charakteristiky zvuku procházejícího konstrukcí (akustická energie, amplituda, frekvence). Výsledky studií ukazují, že změny v akustických parametrech by mohly odrážet stav kvalitativního poškození konstrukce. Metoda zkoumání akustické emise by v budoucnu měla být použitelná při zkoumání šíření trhlin v různých materiálech – kovy, kompozity, beton, horniny, žárovzdorné materiály, zdivo atd. Touto metodou lze také předpovídat poškození betonu dotvarováním. [7] [8] [9] [10]

Podle studií by měla být tato metoda schopna poskytovat klíčové informace o mechanickém chování zdiva. Chování vzorků z pálených cihel při akustickém zkoumání při zatížení může poskytnout užitečné informace o jejich pevnosti, struktuře a technikách slinování používaných při výrobě cihel, obkladů a podobných výrobků. Přijímané vlny však mohou být zkresleny heterogenitou materiálu, která může ovlivnit přesnost při zkoumání poškození konstrukce. Metoda tedy ještě není zcela připravená na použití v praxi, ale je značně zdokonalována pro budoucí uplatnění. [7] [8] [9] [10]

2.2. ZVUK

Zvuk je definován jako mechanické vlnění pružného prostředí s frekvenčním rozsahem 16 Hz až 20 kHz (kmitočtové pásmo slyšitelnosti lidského ucha) vyvolávající sluchový vjem.

Rovnice popisující čistý tón má tvar:

$$u = u_{max} \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi)$$

$$\omega = 2\pi f$$

u ...okamžitá výchylka [m]

u_{max} ...maximální výchylka [m]

ω ...úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

τ ...čas [s]

φ ...úhel [rad]

π ...Ludolfovo číslo [-]

f ...frekvence [Hz] [6] [11]

2.2.1. Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

Uzavřeným prostorem je prostor ohraničený plochami, které mají akustické vlastnosti. Na šíření zvuku v uzavřeném prostoru má vliv akustická energie, geometrie tohoto prostoru a v neposlední řadě stav zvukového pole. Akustickou izolaci lze využít pro snížení přenosu akustické energie mezi místnostmi jedné budovy. [12]

2.2.2. Odraz zvuku

Zvukové vlny se od stěn odrážejí podle Fermanova principu, který říká, že zvuk se šíří vždy tou nejkratší cestou a nejrychleji od zdroje k příjemci. Touto nejkratší cestou je vždy ta, kde úhel dopadu je roven úhlu odrazu zvuku. Pokud plocha není rovná (hladká), dochází k difuznímu odrazu, což není nic jiného než rozptýl odraženého vlnění. K difuznímu odrazu dochází v případě, že rozměr nerovnosti povrchu stěny je přibližně stejně velký (řádově) jako délka vlny zvuku, který na ni dopadá. [12]

2.3. HLUK

Hlukem je nežádoucí zvuk s rušivým nebo obtěžujícím charakterem, který může mít škodlivé účinky bez ohledu na intenzitu. Lze ho také definovat jako zvuk poškozující člověka. [11] [13]

2.3.1. Ochrana proti hluku

Limitní hygienické imisní hodnoty hluku jsou uvedeny v *Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací č. 502/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů*. Za nejvyšší přípustnou hodnotu hluku a vibrací je považována hodnota zdravotně zdůvodněná určená pro pobyt osob z hlediska ochrany zdraví těchto osob před nepříznivým účinkem hluku anebo vibrací. [1]

3. HODNOCENÍ KONSTRUKCÍ Z HLEDISKA AKUSTICKO-IZOLAČNÍCH VLASTNOSTÍ

3.1. HLUK VE STAVBÁCH PRO BYDLENÍ A VE STAVBÁCH OBČANSKÉHO VYBAVENÍ

Pro prostory staveb pro bydlení a staveb občanského vybavení (dále jen stavby) je hluk vystižen pomocí maximální hladiny akustického tlaku L_{pAmax} a pomocí ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,T}$, která je vyjádřena pro 8 nejhlučnějších hodin ve dne a nejhlučnější hodinu v noci.

V případě hluku pocházejícího z venkovního prostředí dovnitř konstrukce je dána nejvyšší přípustná ekvivalentní hladina akustického tlaku A , a to sečtením základní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,T} = 40 \text{ dB}$ a korekce, která bere v potaz využití prostor a denní dobu.

Pro situaci, kdy má hluk zdroj uvnitř budovy, je stanovována nejvyšší přípustná hladina akustického tlaku A , která vznikne přičtením korekce, která, jako v případě hluku se zdrojem mimo budovu, bere v potaz denní dobu a využití prostor, k základní maximální hladině $L_{pAmax} = 40 \text{ dB}$.

Dále je také nařízením vlády č. 502/2000 Sb. předepsána nejvyšší doba dozvuku, a to pro školní učebny a společenské místnosti určené předškolním dětem hodnota 0,6 s, pro haly a chodby škol a zdravotnické stavby 1,0 s. [12]

3.1.1. Akustický tlak

Celkový tlak je tvořen statickým atmosférickým tlakem p_s [Pa] a okamžitým akustickým tlakem p_t [Pa]. Akustický tlak se tedy vypočítá jako rozdíl mezi celkovým tlakem p a statickým atmosférickým tlakem p_s . Lidské ucho je schopné vnímat akustický tlak pouze v určitém rozsahu, který je závislý na frekvenci zvuku. Dolní hranici tohoto rozsahu nazýváme práh slyšitelnosti (prahový akustický tlak), jehož hodnota pro $f = 1000 \text{ Hz}$ nabývá hodnoty $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Díky průběhu akustického tlaku, který je periodický, je zaveden pojem efektivní akustický tlak p_{ef} [Pa] a jeho střední hodnota \bar{p} [Pa]. Akustický tlak p uvádí molekuly prostředí do kmitavého pohybu, jehož akustická rychlost c závisí na samotném tlaku a na vnitřním odporu akustického prostředí – akustický vlnový odpor prostředí z [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], který se vypočítá jako součin objemové hmotnosti prostředí ρ a rychlosti zvuku v daném prostředí c :

$$z = \rho \cdot c = \frac{p}{v}$$

ρ ...objemová hmotnost prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c ...rychlost zvuku v daném prostředí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

p ...akustický tlak [Pa]

v ...akustická rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [12]

3.1.2. Intenzita zvuku

Zdroj zvuku můžeme zidealizovat na bodový zvukový zdroj, jehož určující vlastnosti jsou poloha a akustický výkon P . V praxi si lze šíření zvuku představit jako šíření kulových vln z bodového zdroje. Intenzitu zvuku I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] lze vypočítat jako poměr zvukového výkonu P [W] k ploše S [m^2], zvukový výkon P působí na plochu S kolmo na směr zvukové vlny. Z toho vyplývá, že se vzrůstající vzdáleností r [m] od zdroje zvuku se plocha akustické vlnoplochy S [m^2] zvětšuje a intenzita zvuku I klesá, a to podle vztahu:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

r ...vzdálenost od bodového akustického zdroje [m]

Intenzita zvuku může být též vyjádřena na základě efektivního akustického tlaku:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{z_0} = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c_0}$$

p_{ef} ...efektivní akustický tlak [Pa]

ρ ...objemové hmotnost vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

c_0 ...rychlost šíření zvuku ve vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Spojením těchto dvou vztahů dostaneme nový vzorec na výpočet akustického výkonu P [W]:

$$P = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c_0} \cdot S = I \cdot S$$

Běžně se jako plocha S [m^2] bere pro určitou vzdálenost r [m] povrch koule (polokoule), tzn. vlnoplochy v dané vzdálenosti od zdroje:

$$P = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c_0} \quad [12]$$

3.1.3. Hladina akustického tlaku a hladina intenzity zvuku

Pro přehlednost hodnot akustického tlaku a intenzity zvuku byla zavedena hladina akustického tlaku L_p [dB] a hladina intenzity zvuku L_I [dB], která je dána jako poměr mezi skutečnou intenzitou zvuku a smluvenou hranicí intenzity zvuku $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ při $f = 1000 \text{ Hz}$. Hladinu intenzity zvuku L_I lze spočítat podle vztahu:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Hladinu akustického tlaku L_p lze spočítat obdobně jako:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$$

p_0 ...prahový (referenční) akustický tlak [Pa]; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ [12]

3.2. NEPRŮZVUČNOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Neprůzvučnost stavebních konstrukcí lze chápat jako schopnost těchto konstrukcí přenášet zvukovou energii v zeslabené míře. Dělí se podle podmínek, během nichž se měření provádí, a to na:

- laboratorní neprůzvučnost, kdy se měření uskutečňuje za ideálních podmínek podle norem, zároveň zde nesmí být vliv parazitních účinků na výsledky měření v průběhu celého měření
- stavební neprůzvučnost, kdy akustické vlastnosti jsou prošetřovány na konstrukci „in-situ“, současně jsou formulovány únikové cesty akustické energie

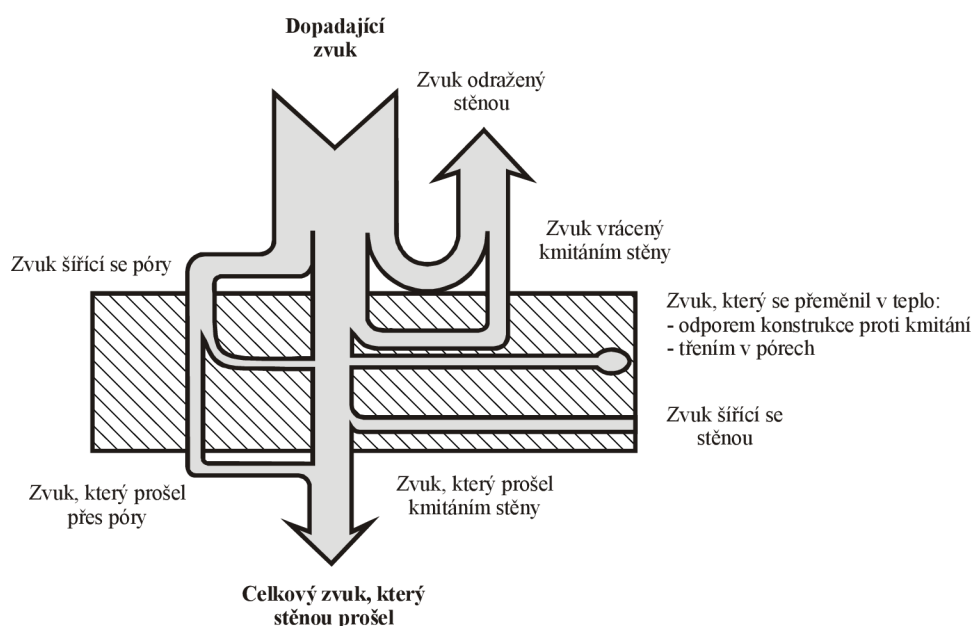
Zvuk je posuzován pouze ve zvukoizolační oblasti, do které spadá zvuk s frekvencí od 100 Hz do 3150 Hz, ostatní frekvence nemají výrazný vliv na člověka, protože nevnikají do konstrukce se stejnou intenzitou, čímž se snižuje vliv zvuku na zdraví člověka.

Dále dělíme zvuk dle prostředí, ve kterém se zvuk šíří, a dle zdroje na:

- vzduchovou neprůzvučnost, kdy jde o neprůzvučnost proti zvuku šířícímu se vzduchem
- kročejovou neprůzvučnost, kdy se zvuk šíří vibracemi konstrukce (kročejový hluk), původem tohoto zvuku je náraz předmětu na konstrukci nebo šíření vibrací z jiných konstrukcí spojených s posuzovanou konstrukcí

Když zvuk dopadá na konstrukci, dochází k následujícím jevům:

- část zvukové energie se odrazí od konstrukce – odražená zvuková vlna má 2 části:
 - zvuk odražený od povrchu konstrukce
 - zvuk vyzářený zpět kmitáním konstrukce
- část zvukové energie zůstane v dělicí konstrukci – ta sestává ze:
 - zvukové energie, jež se přetvoří na teplo třením a stlačováním vzduchu v pórech (aktivní odpor stavební konstrukce proti pronikání zvuku)
 - zvukové energie, jež se promění na teplo odporem konstrukce proti rozkmitu (pasivní odpor stavební konstrukce proti pronikání zvuku)
- část zvukové energie pronikne přes konstrukci, která je složena ze:
 - zvukové složky, která proniká póry
 - zvukové složky vyzářené dělicí konstrukcí kmitáním



Obr. 1 schéma prostupu zvuku dělicí konstrukcí [12]

Zvuk pronikající skrz dělicí konstrukci do uzavřeného prostoru se v tomto prostoru rozptýlí. Povrchy stěn pohltí část zvukové energie, zbytek této energie má vliv na zvýšení hladiny zvuku v uzavřeném prostoru. [12]

3.2.1. Posuzování konstrukcí na základě neprůzvučnosti

Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi v budovách musí dosahovat minimálních hodnot dle ČSN 73 0532. Mohou být též použity změřené či vypočítané laboratorní hodnoty neprůzvučnosti R_w s nutností přepočtu na stavební váženou neprůzvučnost R'_w .

Konstrukce se posuzují na základě těchto veličin:

- vážená stavební neprůzvučnost R'_w , jež platí pro místnosti, které mají společnou plochu stěny, příčky nebo stropu
- vážená laboratorní neprůzvučnost R_w , která platí pro vnitřní dveře
- vážený normalizovaný rozdíl hladin $D_{nT,w}$, který se vztahuje na místnosti, jež nemají společnou dělicí konstrukci

Pro přepočet mezi laboratorní neprůzvučností R_w a váženou stavební neprůzvučností lze použít vztah:

$$R'_w = R_w - k_1$$

k_1 ...korekce podle vedlejších cest šíření zvuku (v případě homogenních plošných konstrukcí z klasických materiálů nabývá korekce hodnoty $k_1 = 2$) [4] [12]

Tab. 1 požadavky na zvukovou izolaci mezi místnostmi v budovách [4]

chráněný prostor (místnost příjmu zvuku)					
řádek	hlučný prostor (místnost zdroje zvuku)	požadavky na zvukovou izolaci			
		stropy		stěny	dveře
		$R'_{w, D_{nT,w}}$ [dB]	$L'_{n,w, L'_{nT,w}}$ [dB]	$R'_{w, D_{nT,w}}$ [dB]	R_w [dB]
A. bytové domy, rodinné domy – nejméně jedna obytná místnost bytu					
1	všechny ostatní obytné místnosti téhož bytu	47	63	42	27
B. bytové domy – obytné místnosti bytu					
2	všechny místnosti druhých bytů, včetně příslušenství	53	55	53	-
		52	58	52	
3	společné prostory domu (schodiště, chodby, terasy, kočárkárny, sušárny, sklípky apod.)	52	55	52	32 37
4	průjezdy, podjezdy, garáže, průchody, podchody	57	48	57	-
5	místnosti s technickým zařízením domu (výměňikové stanice, kotelny, strojovny výtahů, strojovny VZT, prádelny apod.) s hlukem: $L_{A,max} \leq 80$ dB 80 dB < $L_{A,max} \leq 85$ dB	57	48	57	-
		62	48	62	
6	provozovny s hlukem $L_{A,max} \leq 80$ dB: s provozem nejvýše do 22:00 hod. s provozem i po 22:00 hod.	57	53	57	-
		62	48	62	
7	provozovny s hlukem 85 dB < $L_{A,max} \leq 95$ dB s provozem i po 22:00 hod.	72	38	-	-

3.2.2. Vzduchová neprůzvučnost

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti R [dB] se odvíjí od vlastností dělicí konstrukce a lze ho vypočítat jako rozdíl hladiny akustického tlaku L_d [dB] dopadajícího na konstrukci z vnější strany a hladiny akustického tlaku v bezprostřední blízkosti vnitřního povrchu konstrukce L_p [dB]. Je tedy dán vztahem:

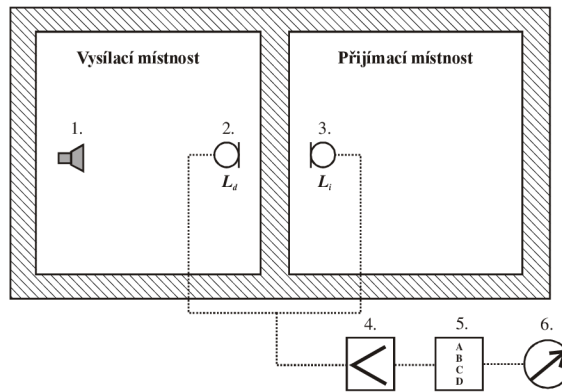
$$R = L_d - L_p$$

Musíme ale brát v potaz fakt, že hladina akustického tlaku u povrchu konstrukce přijímací místnosti se nerovná hladině akustického tlaku zvuku propuštěného konstrukcí z důvodu pohlcení zvuku stěnami přijímací místnosti. Je tedy potřeba vztah upravit:

$$R = L_d - L_p + 10 \cdot \log \frac{S_S}{A}$$

S_S ...povrch stěn v přijímací místnosti [m²]

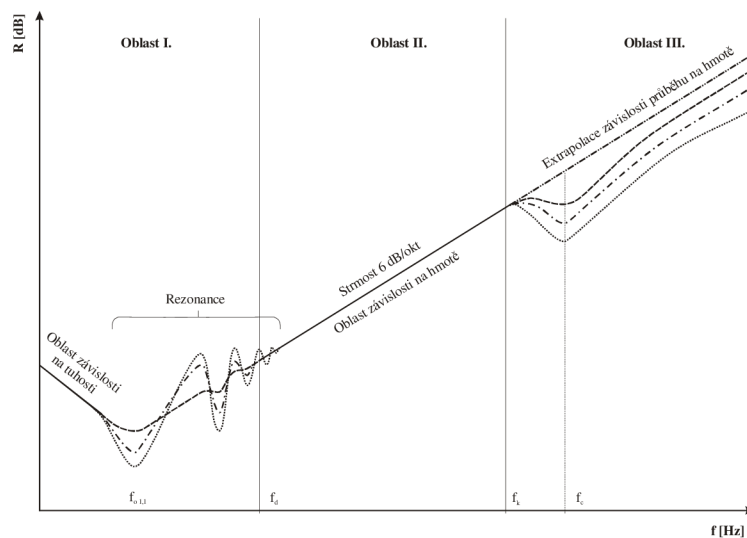
A ...pohltivost uzavřeného prostoru [m²] [12]



Obr. 2 stanovení vzduchové neprůzvučnosti [12]

- Neprůzvučnost jednoduché stěny

Za jednoduchou stěnu lze považovat takovou stěnu, která má malou tloušťku, dosahuje stejnorodých vlastností a je neprodyšná.



Obr. 3 závislost vzduchové neprůzvučnosti jednoduché stěny na frekvenci [12]

(legenda: čárkovaná čára – malé tlumení, tečkovaná čára – střední tlumení, plná čára – velké tlumení)

Z grafu lze rozeznat tyto oblasti:

I. oblast je oblastí rezonancí, kde vzduchová neprůzvučnost nabývá nízkých hodnot a je závislá na tuhosti stěny.

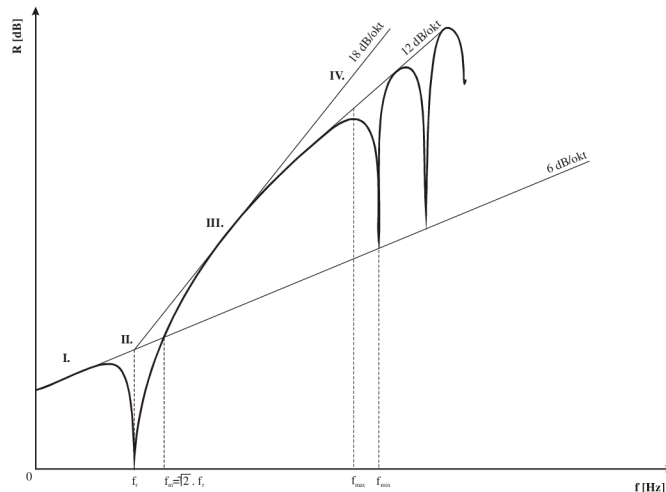
II. oblast se nazývá oblastí setrvačné hmoty, kde se stěna chová akusticky ideálně. Hodnoty neprůzvučnosti rostou velikostí 6 dB/oktáva.

III. oblast je tzv. oblast koincidence, kde dochází k výraznému poklesu zvukové neprůzvučnosti z důvodu rostoucí ohybové tuhosti stěny.

Závislost vzduchové neprůzvučnosti jednoduché stěny na její plošné hmotnosti je zjevná, avšak zvětšení tloušťky stěny a tím zvýšení její plošné hmotnosti není přímo úměrné růstu vzduchové neprůzvučnosti R konstrukce, dojde pouze ke zvýšení ceny a zmenšení vnitřního prostoru. Materiál má vliv pouze na II. oblast. [12]

- Neprůzvučnost dvojité stěny

Dvojitá stěna je složena ze dvou dílčích stěn oddělených vzduchovou mezerou (dutinou). Dvojitě stěny dosahují vyšších hodnot neprůzvučnosti v porovnání s jednoduchými stěnami, jelikož vliv na neprůzvučnost zde má nejen plošná hmotnost jednotlivých prvků, ale i sériové sčítání útlumových vlastností vrstev stěny včetně vzduchu v mezerách. Vrstvy dvojité stěny nesmí být spolu mechanicky spojené, neboť by došlo k přerušení akustické izolace dvojité stěny a stěna by se akusticky chovala jako jednoduchá, tudíž by nebyly využity její akustické vlastnosti.



Obr. 4 závislost vzduchové neprůzvučnosti dvojité stěny na frekvenci [12]

Z grafu jsou patrné tyto oblasti:

- I. oblast – oblast nízkých kmitočtů
- II. oblast – oblast rezonance
- III. oblast – oblast frekvence vyšší než mezní
- IV. oblast – oblast stojatých vln [12]

- Měření vzduchové neprůzvučnosti mezi místnostmi

Výsledky, které získáme laboratorní metodou, lze použít jak při návrhu prvků a konstrukcí, tak při teoretickém stanovení stavební neprůzvučnosti. Měření probíhá ve zvukových komorách, kde je vyloučené šíření zvuku bočními cestami. Vzhledem k měřeným prvkům se doporučuje minimální objem místnosti v komoře 50 m^3 a minimální plocha příčky/stěny asi 10 m^2 .

Výsledky metody měření stavební neprůzvučnosti se používají pro návrh hodnocení zvukově izolačních vlastností stavby. Měřicí místnosti by měly mít objem minimálně 30 m^3 , vzdálenost protilehlých stěn má být alespoň 2,5 m.

Tyto metody se liší v podmínkách měření a zohlednění šíření zvuku vedlejšími cestami. Měření probíhá v třetinooktávovém pásmu v rozsahu frekvencí 100 Hz až 3150 Hz. Samotné měření je složeno ze 3 fází:

1. umístění zdroje zvuku (reproduktoru) do zdrojové místnosti, kde je pomocí mikrofону zvukoměru měřena hladina L_1 [dB]
2. přemístění mikrofónu do přijímací místnosti, kde je měřena hladina L_2 [dB]

3. umístění zdroje zvuku a mikrofonu do přijímací místnosti, kde je měřena doba dozvuku T_2 [s]

Měření je nutné provádět ve více polohách mikrofonu, do výpočtu se použije průměr energetický (pro hladiny), nebo aritmetický (pro dobu dozvuku). Vyhodnocení se provede stanovením vážené neprůzvučnosti R_w [dB] z hodnot neprůzvučnosti R [dB] v třetinooktávnových pásmech:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_2} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{6,13 \cdot S \cdot T_2}{V_2}$$

L_1 a L_2 ...průměrné hladiny akustického tlaku v přijímací a vysílací místnosti [dB]

S ...plocha měřeného dělicího prvku [m^2]

A_2 ...celková zvuková pohltivost přijímací místnosti [m^2]

T_2 ...doba dozvuku přijímací místnosti [s]

V_2 ...objem přijímací místnosti [m^3] [14][15]

- Výpočet vzduchové neprůzvučnosti mezi místnostmi

V případě působení akustického tlaku p'_1 v prostoru před stěnou potom platí, že $p'_1 = 2p_1$, kde p_1 je tlak, který působí na stěnu (dochází zde ke zdvojení z důvodu odrazu), a působení akustického tlaku p_2 za stěnou, lze napsat ohybovou rovnici, která má vektorové vyjádření:

$$p'_1 - p_2 = i\omega m' v$$

p'_1 ...akustický tlak působící na stěnu [Pa]

p_2 ...akustický tlak za stěnou [Pa]

$i\omega m'$...reaktivní odpor stěny

v ...akustická rychlost hmotné částice stěny

Vyřešením uvedené rovnice získáme jinou rovnici ve tvaru:

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 = 1 + \left(\frac{\omega m' \cos \vartheta}{2z}\right)^2$$

Dále platí:

$$R = 10 \log \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^2 = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\omega m' \cos \vartheta}{2z}\right)^2\right) = 20 \log \frac{\omega m' \cos \vartheta}{2z}$$

Dosazením za $\omega = 2\pi f$ a $z = c\gamma$ vznikne rovnice v podobě:

$$R = 20 \log \frac{2\pi f m' \cos \vartheta}{2c\gamma}$$

Praktický difuzní dopad zvukových vln na stěnu je uváděn v rozsahu $\vartheta \in [0; 78]^\circ$, pro akustický vlnový odpor vzduchu platí $z_0 = c_0\rho \approx 400 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$, lze tedy vyjádřit:

$$R = 20 \log \int_0^{78^\circ} \frac{2\pi f m' \cos \vartheta}{2c_0\rho} d\vartheta = 20 \log m' + 20 \log f - 47,5 = 20 \log m' f - 47,5$$

Tento vztah je nazýván hmotový zákon, podle kterého dochází ke zvýšení neprůzvučnosti stěny o 6 dB jak při zdvojnásobení plošné hmotnosti m' , tak při zvýšení frekvence f o oktávu.

Pro dvojitou stěnu platí hmotový zákon ve tvaru:

$$R = 20 \log(m'_1 + m'_2)f - 47,5 \text{ [12]}$$

4. KERAMIKA

Keramika je pevná anorganická polykrystalická látka vyrobená keramickým výrobním způsobem z minerálních surovin s převládající složkou jílových minerálů, vytvarovaná a poté vypálená na vysokou teplotu (zpravidla větší než 900 °C). Díky výpalu dojde ke zpevnění a vytvoří se mikrostruktura střepu. Postup výroby začíná u surovin, ze kterých se vytvaruje výlisek (ten má již tvar budoucího výrobku), poté se vysuší a následně vypálí na teplotu nižší, než je teplota tání, čímž dojde ke zpevnění a získání požadovaných technických parametrů. Mezi základní vlastnosti patří vysoká chemická odolnost, trvanlivost a křehkost. [16]

4.1. VÝROBA

4.1.1. SUROVINY

Keramické suroviny se dělí na plastické (po rozdělení s vodou mají schopnost se tvarovat) a neplastické (dle funkce se dělí na ostřiva, taviva a lehčiva). Mezi plastické suroviny patří kaolín (surový, plavený), jílové zeminy, cihlářské zeminy, halloysit, bentonit. Ostřiva v syrovém stavu snižují plastičnost těsta, výpalem pomáhají vytvořit hutný střep. Patří sem hlavně suroviny obsahující křemík (křemen, křemenec, křemenný písek). Taviva se podílí na tvorbě taveniny, snížení teploty slinutí a tání, případně zmenšení intervalu mezi slinutím a táním. Jako taviva se nejčastěji používají živce (sodný, draselný, vápenatý). Lehčiva se používají pro snížení objemové hmotnosti střepu. Dělí se na lehčiva přímá (při výpalu vyhoří – dřevěné piliny, korková drť, uhelný prach, popílek, pěnový polystyren apod.) a nepřímá (mají nízkou objemovou hmotnost (křemelina, škvára, expandovaný perlit aj.). [16]

4.1.2. VYTVÁŘENÍ Z PLASTICKÉHO TĚSTA

Jedná se o nejstarší způsob vytváření keramických výrobků, který se dodnes hojně používá. Plastické těsto musí mít obsah vody v rozsahu 15-25 %. Kromě tohoto způsobu vytváření existuje i lisování ze suché drobenky (vlhkost 0-15 %) a lití licí břečky (vlhkost 30-40 %).

Vytváření z plastického těsta se dělí na 4 technologické varianty v závislosti na působení vnějších sil na plastické těsto v technickém zařízení, a to na vytváření:

- tažením, které probíhá na šnekovém lisu (jsou to například cihlářské zdicí tvarovky, kanalizační trouby, výrobky pro elektrokemiku atd.)
- vytáčením, popř. válcováním (takto se vytvářejí rotačně symetrické výrobky)
- ražením neboli přelisováním (ražená krytina, kachle apod.)
- stříkáním, což se používá velmi zřídka kvůli svému specifickému použití

Aby mohlo být těsto takto zpracováno, musí mít vlastnost zvanou plastičnost nebo také tvárnost. Tato vlastnost se vyskytuje pouze u pevných látek a vyznačuje se změnou tvaru vlivem vnějších sil bez toho, aby došlo k porušení celistvosti této látky (vzniku trhlinek). Pokud má dojít ke změně tvaru, musí působící síly překročit mez toku plastického těsta, jež nabývá hodnot 10 až 100 kPa

v závislosti na obsahu vlhkosti. Dostatečná pevnost v tahu plastického těsta zajišťuje potlačení vzniku trhlin. [16]

4.1.3. SUŠENÍ

Sušením rozumíme proces, kdy dochází k odstranění, nebo alespoň výraznému snížení vlhkosti vylisku vlivem působení tepla. Změnou vlhkosti dojde ke změně stavu látky (výsušku). To se projeví v mikrostruktuře a ve vlastnostech. Vysušením dojde ke ztrátě schopnosti přetváření a vylisek přejde do pevného stavu s výrazně vyšší pevností. Odstraňováním vody se částice přiblíží. [16]

4.1.4. VÝPAL

Výpalem získá vylisek jiné strukturní uspořádání, čímž získá technické a technologické vlastnosti, které jsou potřeba pro jeho budoucí aplikaci. Dochází ke zpevnění výrobku, ten má také stabilní tvar, jinou barvu a odolnost proti povětrnosti a řadě agresivních látek. Výpalem chceme dosáhnout požadavků na výrobky stavební keramiky (např. pevnost v tlaku, objemová hmotnost, tepelná vodivost, mrazuvzdornost, barva střepe aj.). [16]

4.2. AKUSTICKÉ ZDICÍ PRVKY

4.2.1. Vzduchová neprůzvučnost stěn z akustických zdicích prvků

Samotné broušené cihly dosahují nižších hodnot vážené vzduchové neprůzvučnosti asi o 1-2 dB, což závisí na tloušťce konstrukce.

Zvýšení vzduchové neprůzvučnosti je způsobeno zvýšením plošné hmotnosti stěny, kterou tvoří hmotnost vlastních cihel, hmotnost spojovacího prostředku a omítek. Pokud je zdění prováděno na klasickou maltu, tvoří plošnou hmotnost stěny i objemová hmotnost zdicí malty. Pokud jsou tedy cihly zděné na maltu pro tenké spáry (broušené cihly), dosahují nižších hodnot vzduchové neprůzvučnosti než cihly na klasickou zdicí maltu, protože plošná hmotnost zdiva je nižší.

Z toho se dá tedy usuzovat, že broušené akustické cihly nelze hodnotit jako vhodné pro výstavbu jednovrstvých konstrukcí mezibytových stěn.

Materiál omítek také ovlivňuje plošnou hmotnost stěny a tím i vzduchovou neprůzvučnost. Sádrové omítky (objemová hmotnost asi $900-1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tl. asi 10 mm) zhoršují vzduchovou neprůzvučnost v porovnání s vápenocementovými omítkami (objemová hmotnost asi $1450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tl. asi 15 mm) asi o 1 dB. [17]

4.2.2. Vnitřní dělicí konstrukce

I když stačí splnit minimální požadavky na stavební váženou vzduchovou neprůzvučnost R'_w vnitřních příček, je možné dopřát uživatelům pohodlí využitím kvalitních akustických materiálů. Příkladem mohou být mezibytové příčky, které splňují požadavky normy ČSN 73 0532 Akustika – Ochrana hluku v budovách a

posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky, ale vyšší hodnoty by byly vítaným komfortem.

Vedle samotné stěny je potřeba zohlednit oslabení ve stěně nebo okolní konstrukci včetně napojení a navázání použitím korekce k_1 , která laboratorní vzduchovou neprůzvučnost převádí na stavební vzduchovou neprůzvučnost.

Dále může dojít k vynechání omítky na jedné straně konstrukce, což může mít za následek snížení vzduchové neprůzvučnosti asi o 2 dB, což je závislé na konkrétním konstrukčním řešení. [17]

PRAKTICKÁ ČÁST

5. CÍL

Cílem práce je navržení inovovaného nebo nového systému zděné konstrukce z keramických zdicích tvarovek za účelem dosažení co nejvyšších hodnot vzduchové neprůzvučnosti a zároveň nalézt vhodný způsob výstavby. Systém by měl být použitelný především v oblasti mezibytových příček. Na základě provedené rešerše literatury a průzkumu trhu bude navržen systém zdiva sestávající z inovovaných/nových tvarovek, pro tento systém bude navržena technologie výstavby. Proveditelnost navrženého systému bude ověřena na zmenšeném modelu vyrobeném pomocí 3D tisku.

6. METODIKA

V teoretické části bakalářské práce byla provedena rešerše literatury, bylo zjišťováno chování zvuku obecně a v oblasti dělicích konstrukcí.

Na to bude navazovat v praktické části průzkum trhu, jehož cílem je nalézt existující způsoby řešení akustických dělicích konstrukcí. Na základě tohoto průzkumu budou zhodnoceny cesty výroby akustických zdicích prvků.

Po zhodnocení trendů v oblasti použití akustických cihel, které vyplynou z rešerše literatury a průzkumu trhu, bude navrženo několik variant zdicích prvků, jejichž cílem je zlepšit akusticko-izolační vlastnosti konstrukce. Bude následovat zhodnocení předpokládaných akusticko-izolačních vlastností, případně dalších vlastností, na které jsou kladeny nároky (tepelně izolační vlastnosti, hmotnost zdicích prvků, rozměry prvků atd.), na jejichž základě bude vybrána jedna varianta, která bude dále rozvinuta.

Vybraná varianta bude rozpracována do různých rozměrových modulů, jejichž cílem je v první řadě zvýšení vzduchové neprůzvučnosti dělicí konstrukce a dále pak zjednodušení výstavby a její urychlení, což bude hodnoceno na základě manipulovatelnosti (hmotnost a rozměry jednotlivých prvků), množství spár (počet a délka) a dalších faktorů (vše bude ověřeno na zmenšeném modelu z 3D tisku).


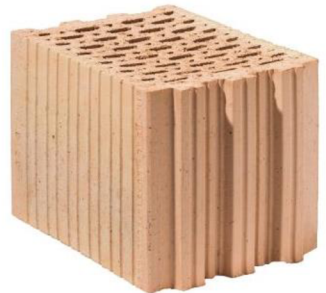

Z důvodu složitosti ověření akustických vlastností na fyzikálním modelu bude posouzení zlepšení těchto vlastností provedeno pomocí normy ČSN EN ISO 12354-1, díky které na základě plošné hmotnosti zdiva bude vypočítána vzduchová neprůzvučnost konstrukce. Pokud bude potřeba, prvky budou dále upravovány (např. míra vylehčení), aby bylo dosaženo optimálního řešení.





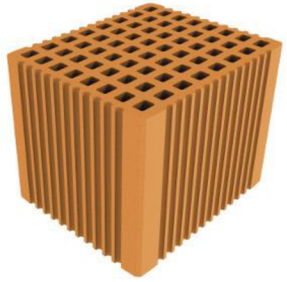




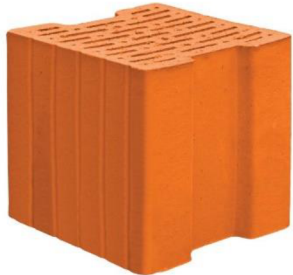


7. PRŮZKUM TRHU V OBLASTI AKUSTICKÉHO ZDIVA PRO MEZIBYTOVÉ PŘÍČKY

Pro průzkum trhu byli vybráni výrobci zdiva z celosvětového trhu, jmenovitě Wienerberger, Heluz, Leier, Schlagmann, Pezinské tehelne, BRITTERM, UNIPOR, Thermopor, Danesi, FORNACI DCB, LEIPFINGER-BADER, T2D, Grupo Díaz Redondo a Erbersdobler – Ecoton/Evoton. Byly vybrány zdicí prvky pro jednovrstvé mezibytové příčky tloušťky 240–250 mm, případně další zajímavé zdicí prvky jiných tlouštěk. Cílem je nalézt způsoby dosažení co nejvyšších hodnot vzduchové neprůzvučnosti.

Tab. 2 průzkum trhu

výrobce/výrobek	tloušťka [mm]	neprůzvučnost [dB]	hmotnost prvku [kg]	obrázek
Wienerberger [18]				
Porotherm 25 AKU SYM	250	57	20,7	
Porotherm 25 AKU Z	250	56	20,6	
Porotherm 25 AKU Z Profi	250	53	21,0	

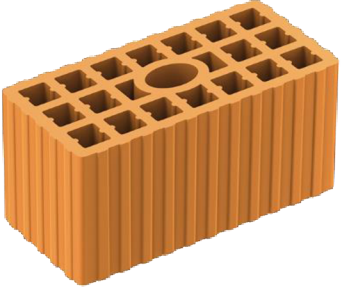
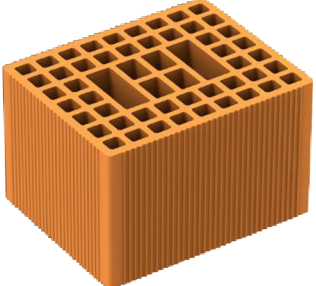
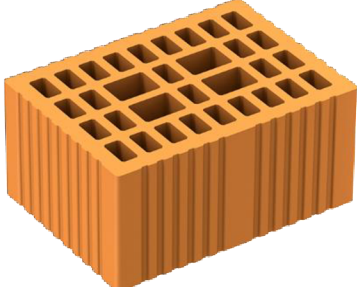
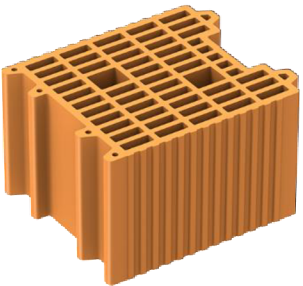
Porotherm 25 AKU Z Profi Dryfix	250	52	21,0	
Heluz [19]				
AKU 25 zalévaná broušená	250	57	15,8	
AKU 25	250	55	21,7	
AKU KOMPAKT 21	210	57	14,3	
Leier [20]				
Leiertherm 25/30 AKU 238	250/300	55	19,0	

Schlagmann [21]				
POROTON®-S-Sz	240	62,8	neuveдено	
POROTON®-S-Mz®-Blockziegel	240	60	neuveдено	
Pezinské tehelne [22]				
TermoBRIK TD 250 PD Akustik nebrúsená	250	59	15,0	
TermoBRIK TD 240 PD Akustik PLUS nebrúsená	240	55	20,5	
BRITTERM [23]				
25 AKA	250	55	24,0	
UNIPOR [24]				
Podle výrobového sortimentu akustické zdicí prvky nevyrábí.				

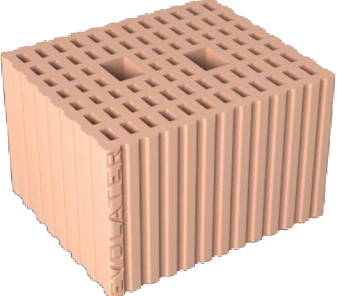
Thermopor [25]


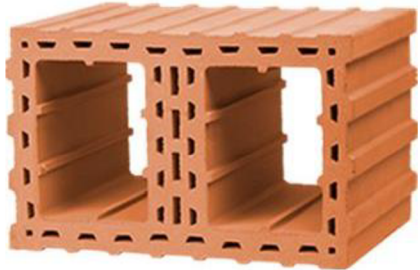
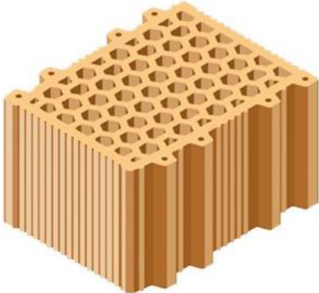
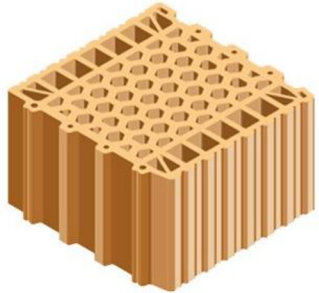

Podle výrobního sortimentu nevyrábí akustické zdicí prvky, nabízí dutinové tvarovky, jejichž neprůzvučnost je odvozována na základě hodnot plošné hmotnosti.

Danesi [26]

Doppio UNI 12.12.25	250	49	3,1	
Isomuro F50 25.19.30	250	52	11,7	
Blocco Svizzero 18.12.25	250	50	4,5	
Poroton P800 25.19.30 inc.25	250	50	11,7	

FORNACI DCB [27]

Evolater Acustico 25x30x19 ZS	250	57	15,2	
----------------------------------	-----	----	------	--

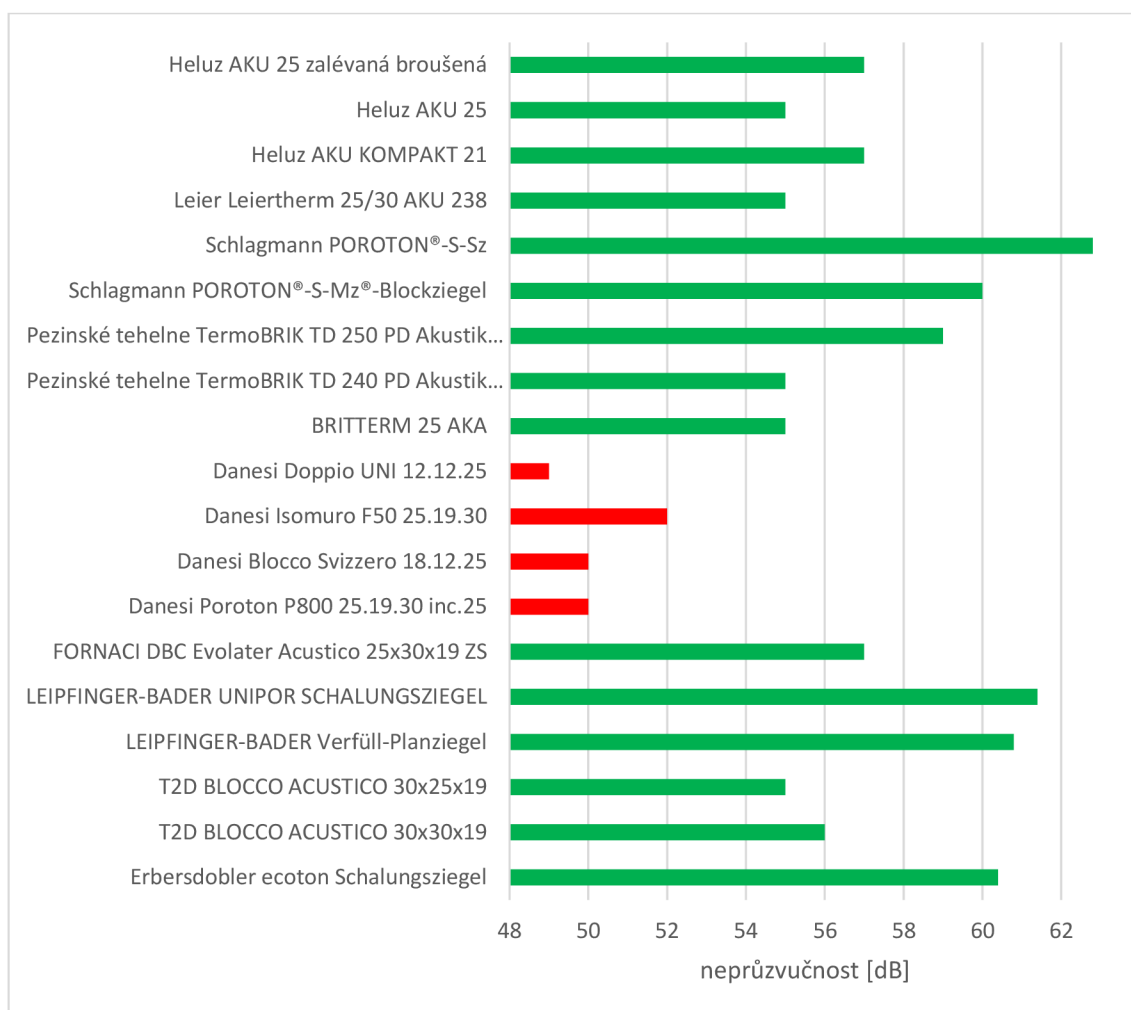
LEIPFINGER-BADER (součást UNIPOR) [28]				
UNIPOR SCHALUNGSZIEGEL	240	61,4	neuveveno	
Verfüll-Planziegel	240	60,8	neuveveno	
T2D (součást Porotonu) [29]				
BLOCCO ACUSTICO 30x25x19	250	55	14,0	
BLOCCO ACUSTICO 30x30x19	300	56	15,5	
Grupo Díaz Redondo [30]				
Akustické parametry neuvádí ani u výrobků, které jsou vedené jako akustické.				
Erbersdobler – Ecoton/Evoton [31]				
ecoton Schalungsziegel	240	60,4	12,7	

7.1. ZÁVĚR

Z provedeného průzkumu trhu lze usuzovat na 4 cesty výroby akustických zdicích prvků:

- 1) **dvojitá stěna** – výrobek Heluz AKU KOMPAKT 21
- 2) **maliformátové zdivo podobné CPP s nízkou mírou vylehčení** – výrobek Schlagmann POROTON®-S-Mz®-Blockziegel
- 3) **děrované zdicí prvky** – výrobky firem Wienerberger, Heluz, Leier, Pezinské tehelne, BRITTERM, Danesi, FORNACI DCB, LEIPFINGER-BADER a T2D.
- 4) **tvárovky pro ztracené bednění** – výrobky firem Schlagmann, LEIPFINGER-BADER a Erbersdobler – Ecoton/Evoton

Maloformátové zdivo je v jistém smyslu krokem zpět, jelikož se od klasických cihel plných pálených postupně přešlo k děrovaným cihlám. Tvarovky pro ztracené bednění nejsou vhodné z pohledu prodejce keramických zdicích prvků, jelikož tím prodá méně svého výrobku. Dvojitá stěna má větší tloušťku a tím ubírá vnitřní prostor bytu a je složitější na výstavbu. Z průzkumu tedy vyplývá, že děrované zdicí prvky jsou nejlepším řešením v oblasti akusticko-izolačních prvků.



*Graf 1 grafické vyhodnocení průzkumu trhu
(pozn. zelená barva – zdicí prvky s neprůzvučností nad 53 dB, červená barva – zdicí prvky s neprůzvučností pod 53 dB)*

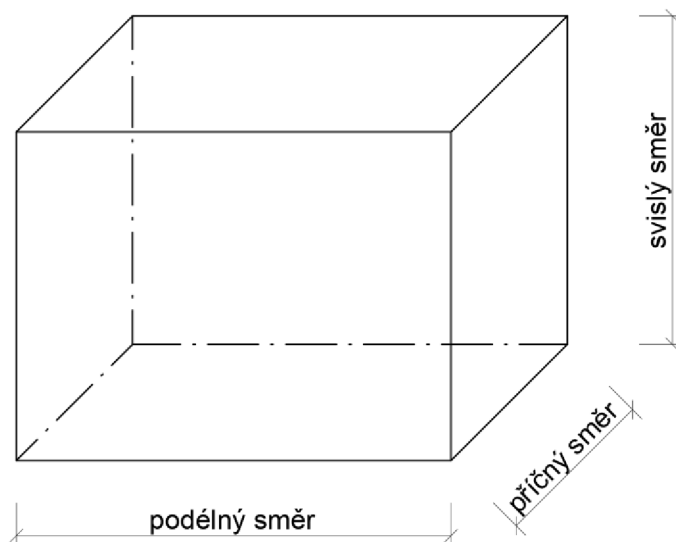
8. PLASTY PRO 3D TISK

Pro 3D tisk byl hledán optimální materiál, který by se nejvíce blížil parametry cihelnému střepe. Cihelný zdicí prvek má modul pružnosti v tahu a tlaku 6,5 GPa. Této hodnotě jsou nejbližší 4 GPa materiálu PLA, proto budou zkušební cihly zhotoveny z tohoto materiálu. Tento materiál je křehký, ale pevný stejně jako cihly, též proto by vybrán jako náhrada keramiky. Pokud by tedy byly zkoumány mechanické vlastnosti, lze chování zdicích prvků odvozovat od chování modelů

Tab. 3 tabulka porovnání vlastností plastů pro 3D tisk [32]

vlastnost/plast	PLA	ABS	PET-G
teplota trysky [°C]	180-230	210-250	220-260
teplota podložky [°C]	20-60	80-110	60-90
tisková podložka	nepovinná	povinná	doporučuje se
komora při tisku	nepovinná	doporučuje se	nepovinná
přilnutí první vrstvy	dobré	drobné problémy	drobné problémy
výpary	skoro žádné	silné	silné
absorbce vlhkosti	ano	ano	ano
Youngův modul [GPa]	3,5	2,4	2,2
modul pružnosti [GPa]	4	2,2	1,9
pevnost v ohybu [MPa]	80	65	64
poměr pevnosti ku hmotnosti [kN·m·kg ⁻¹]	40	31-80	42
pevnost v tahu [MPa]	110	37-110	53
odolnost proti nárazu [J·m ⁻¹]	-	70-370	77
tvrdost Rockwell R	-	94	108
teplota skelného přechodu [°C]	60	105	81
deformace při teplotě [°C]	65	100	70
teplota tání [°C]	160	-	140
tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	1800	1470	1200
tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,13	0,17	0,29
tepelná difuzivita [m ² ·s ⁻¹]	0,058	0,12	0,19

9. NÁVRH NOVÉHO AKUSTICKO-IZOLAČNÍHO ZDIVA



Obr. 5 názvy směrů zdicích prvků

Bylo navrženo celkem 16 variant zdicích prvků pro nové akustické zdivo, při jejichž návrhu byl brán v potaz předcházející průzkum trhu a možnosti výroby navržených cihel. Tyto varianty byly porovnány mezi sebou navzájem a s existujícími výrobky na trhu na základě způsobu řešení akusticko-izolačních vlastností a následně byla vybrána nejperspektivnější varianta, která byla dále detailněji rozpracována.

VARIANTA 1a

Tvarovka v příčném směru rozdělena na 3 stejné části, každá dále rozdělena i podélně, toto podélné dělení odsazeno do 1/3 rozměru. Otvory vyplněny vlnou a vzduchem, v podélném směru stejná výplň, na krajích vlna.

očekávání: Vlna utlumí šíření zvuku stěnou a také zlepší tepelně izolační vlastnosti, vzduchová mezera uvnitř vytvoří pružnou vrstvu, která však není plně izolovaná.

VARIANTA 1b

Tvarovka v příčném směru rozdělena na 3 stejné části, každá dále rozdělena i podélně, toto podélné dělení odsazeno do 1/3 rozměru. Otvory vyplněny vlnou a vzduchem, v podélném směru rozdílná výplň, ve větších otvorech vlna, v menších vzduch.

očekávání: Vlna utlumí šíření zvuku stěnou a také zlepší tepelně izolační vlastnosti, vzduchové mezery uvnitř vytvoří nespojitou pružnou vrstvu.

VARIANTA 1c

Tvarovka v příčném směru rozdělena na 3 stejné části, každá dále rozdělena i podélně, toto podélné dělení odsazeno do 1/3 rozměru. Otvory vyplněny vlnou a vzduchem, v podélném směru rozdílná výplň, ve větších otvorech vzduch, v menších vlna.

očekávání: Vlna utlumí šíření zvuku stěnou a také zlepšit tepelně izolační vlastnosti, vzduchové mezery uvnitř vytvoří nespojitou pružnou vrstvu.

VARIANTA 2

Dutá cihla v příčném směru rozdělená přepážkou, okolo které je na obě vnější strany kapsa naplněná vlnou.

očekávání: Vlna utlumí šíření zvuku stěnou a také zlepšit tepelně izolační vlastnosti, vzduchové mezery uvnitř vytvoří pružné vrstvy.

VARIANTA 3

Perforovaná cihla s podélnou spárou s nerovným povrchem pro zvětšení plochy, která přenáší/pohlcuje zvuk. Tato varianta bude dále rozpracována v upravené verzi.

očekávání: Děrovaná cihla by měla mít lepší akustické vlastnosti než tvarovka, vzduchová mezera vytvoří pružnou vrstvu.

VARIANTA 4

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s nerovnými podélnými vnitřními povrchy pro zvětšení plochy přenášejí/pohlcující zvuk.

očekávání: Vzduchová kapsa uvnitř utlumí zvuk, nerovný vnitřní povrch obvodových stěn zvětší povrch tlumící zvuk.

VARIANTA 5a

Dutá tvarovka tvořená obvodovými stěnami a podélnou přepážkou uprostřed. Všechny podélné vnitřní povrchy jsou nerovné z důvodu zvětšení plochy přenášejí/pohlcující zvuk, otvory vyplněné vlnou.

očekávání: Vlna utlumí zvuk a zlepšit tepelně izolační vlastnosti stěny, nerovné povrchy lépe tlumí zvuk.

VARIANTA 5b

Dutá tvarovka tvořená obvodovými stěnami a podélnou přepážkou uprostřed. Všechny podélné vnitřní povrchy jsou nerovné z důvodu zvětšení plochy přenášejí/pohlcující zvuk, otvory vyplněné vzduchem.

očekávání: Nerovné povrchy lépe utlumí zvuk, vzduchové mezery vytvoří pružné vrstvy.

VARIANTA 6

Perforovaná cihla, střep je pórovitý. Pórovitý střep lze kombinovat i s jinými variantami.

očekávání: Pórovitost střepu zlepšit jeho akustické vlastnosti (zvětší se vnitřní povrch cihly a tím povrch pohlcující zvuk).

VARIANTA 7

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s nerovnými podélnými vnitřními povrchy pro zvětšení plochy přenášející/pohlcující zvuk. Podélné vnitřní povrchy pokryty tenkou vrstvou vlny kopírující tvar cihly.

očekávání: Vzduchová kapsa uvnitř utlumí zvuk, nerovný vnitřní povrch obvodových stěn zvětší povrch, který tlumí zvuk, vrstva vlny zvýší pohltivost zvuku.

VARIANTA 8a

Dutá tvarovka tvořená obvodovými stěnami a podélnou přepážkou uprostřed, jejíž povrch je nerovný pro zvětšení plochy přenášející/pohlcující zvuk, otvory s výplní.

očekávání: Nerovné povrchy lépe utlumí zvuk, výplň volena tak, aby měla co nejlepší akustické vlastnosti.

VARIANTA 8b

Dutá tvarovka tvořená obvodovými stěnami a podélnou přepážkou uprostřed, jejíž povrch je nerovný pro zvětšení plochy přenášející/pohlcující zvuk, otvory vyplněny vzduchem.

očekávání: Nerovné povrchy lépe utlumí zvuk, vzduchové mezery vytvoří pružné vrstvy.

VARIANTA 9

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami vyplněná PUR.

očekávání: PUR má dobré akustické vlastnosti, proto se předpokládají i u cihly.

VARIANTA 10a

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s malými akustickými tělesy z polyuretanu na vnitřních podélných stěnách.

očekávání: Vzduchová kapsa uvnitř utlumí vzduch, akustická tělesa zlepšují akustické vlastnosti cihly.

VARIANTA 10b

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s velkými akustickými tělesy z polyuretanu na vnitřních podélných stěnách.

očekávání: Vzduchová kapsa uvnitř utlumí vzduch, akustická tělesa zlepšují akustické vlastnosti cihly.

VARIANTA 11

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s vhodně zvolenou výplní (dřevobeton/pilinobeton, polystyren-kvádr nebo kuličky, sklobeton, keramzitobeton, polystyrenbeton, pěnobeton atd.).

očekávání: Vhodně zvolená výplň zlepšuje akustické vlastnosti cihly.

VARIANTA 12

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s kartonem obaleným asfaltovou fólií ve tvaru příhradové konstrukce uprostřed cihly.

očekávání: Vzduchové mezery mezi kartonem a stěnou cihly vytvoří pružné vrstvy, asfaltová fólie zvýší pohltivost zvuku cihly.

VARIANTA 13

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami s asfaltovým pásem ve tvaru příhradové konstrukce uprostřed cihly.

očekávání: Vzduchové mezery mezi asfaltovým pásem a stěnou cihly vytvoří pružné vrstvy, asfaltový pás zlepšit pohltivost zvuku cihly.

VARIANTA 14

Perforovaná cihla, střep je na povrchu plně slinutý. Plně slinutý střep na povrchu lze kombinovat i s jinými variantami.

očekávání: Slinutý povrch střepu výrazně zvýší odrazivost zvuku a tím zabrání šíření zvuku do prostoru za cihlou.

VARIANTA 15

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami, vyplněná zmačkaným papírem pro zvětšení povrchu pohlcujícího zvuk.

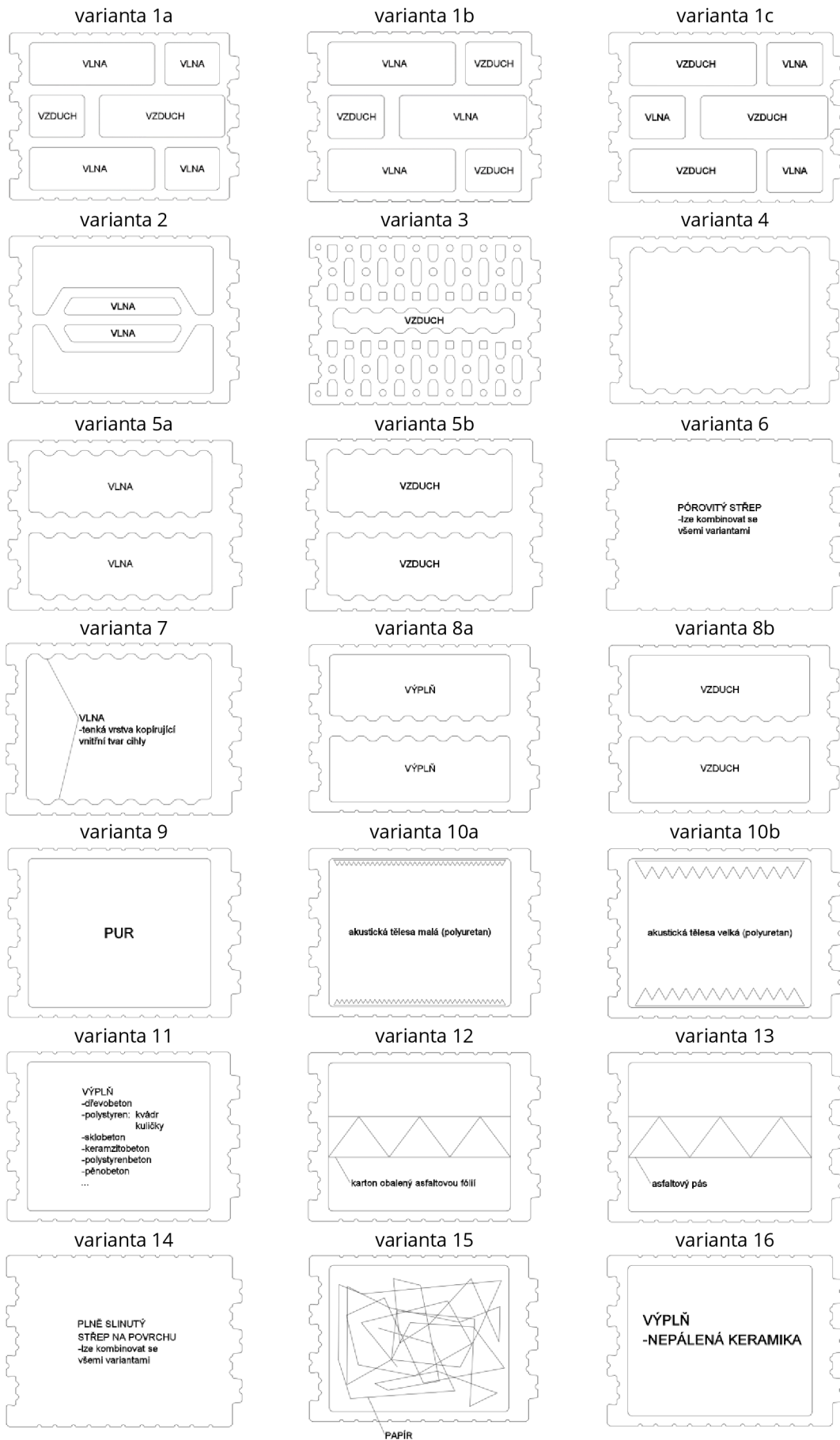
očekávání: Vzduchová kapsa uvnitř utlumí vzduch, použitím papíru se zvětší povrch pohlcující zvuk.

VARIANTA 16

Dutá tvarovka tvořená pouze obvodovými stěnami, vyplněná nepálenou keramikou.

očekávání: Nepálená keramika by měla mít lepší akustické vlastnosti než vypálený střep.

Tab. 4 grafické znázornění variant



9.1. ZHODNOCENÍ VARIANT

Bylo vytvořeno 16 variant akusticko-izolačních zdicích prvků. Na základě předpokládaného chování těchto prvků (chování mechanické a akusticko-izolační) byly varianty zhodnoceny.

- Varianty tvořené tvarovkou vyplněnou nenosnou výplní bez vnitřních výztuh (varianty 4, 7, 9, 10a, 10b, 11, 12, 13 a 15) byly shledány jako neproveditelné, protože by došlo ke zhroucení stěn z nich postavených.
- U variant 5a, 5b, 8a a 8b též hrozí zborcení, jelikož chybí vyztužení v příčném směru.
- Do variant 1a, 1b, 1c a 2 by nebylo možné vložit vlnu, která měla mít akusticko-izolační vlastnosti, protože vkládání vlny by bylo příliš pracné, ne-li nemožné.
- Slinutého střepu na povrchu cihly (varianta 14) nelze dosáhnout, jelikož by došlo ke slinutí celého střepu, proto byla tato varianta vyhodnocena jako neproveditelná.
- U varianty 16 tvořené tvarovkou bez vnitřních výztuh opět hrozí zřícení, navíc nepálená keramika by mohla mít problém s objemovými změnami vlivem vlhkosti.
- Varianta 6 by nejspíše neměla lepší akusticko-izolační vlastnosti než cihly existující, jelikož pórovitost střepu nemá výrazný vliv na akusticko-izolační vlastnosti.
- **Varianta 3 byla vyhodnocena jako přínosná. Vychází z ní myšlenka rozdělení cihly v podélném směru a tím vytvoření dvojité stěny, která má lepší akusticko-izolační vlastnosti. Zároveň by se tím mohla vyřešit otázka zjednodušení výstavby, jelikož cihla s poloviční tloušťkou by mohla mít větší podélný nebo svislý rozměr při zachování stejné hmotnosti prvku, čímž by se urychlila výstavba. Při návrhu spojení cihel ve dvojistou stěnu byla navržena možnost ozubů. Následně byl řešen jejich tvar, aby byla proveditelná výstavba zdi z těchto cihel i vytvoření samotné cihly.**

10. VARIANTA 3 – ŘEŠENÍ OZUBŮ

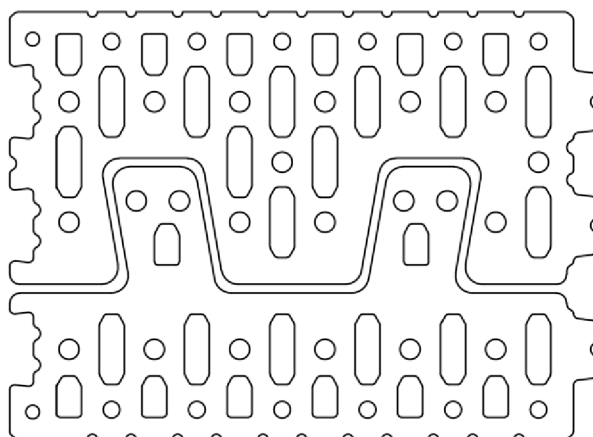
Na základě vybrané varianty 3, která rozděluje zdicí prvek na dva v příčném směru, byly navrženy ozuby, které mají za úkol spojit prvky ve zdivo jako celek.

OZUBY 1

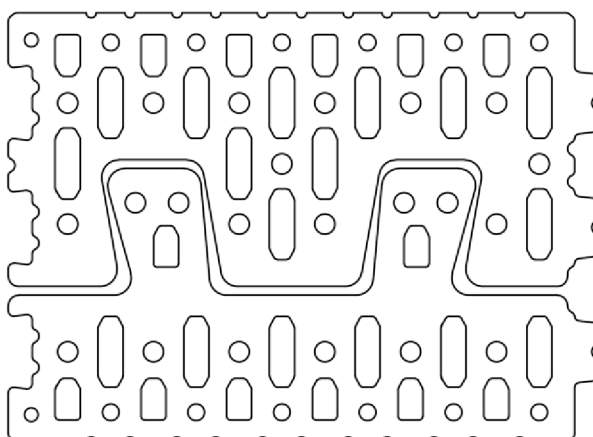
- asymetrické cihly, na jedné straně umístěna „pera“, na druhé „drážky“
- ozuby nakloněné od sebe, aby při rozevírání stěny nedošlo k oddělení cihel



Obr. 6 varianta ozubů 1 – detail



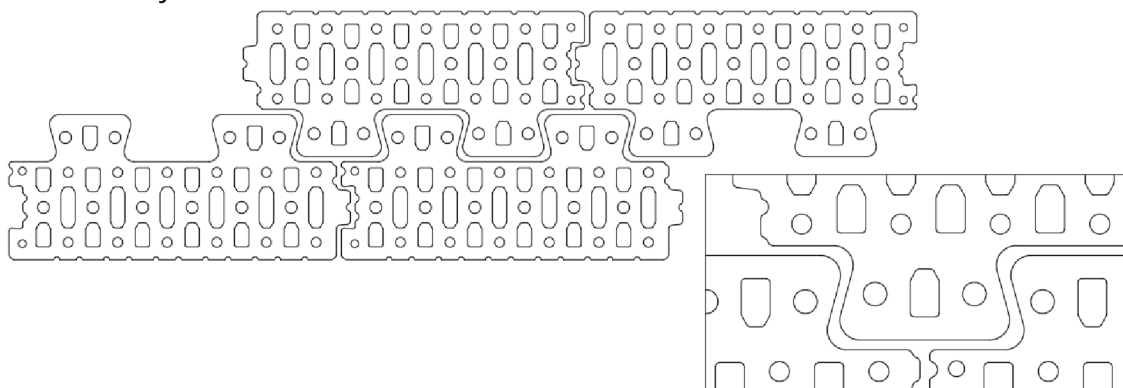
Obr. 7 varianta ozubů 1



Obr. 8 varianta ozubů 1 – rozšiřující se ozuby

OZUBY 2

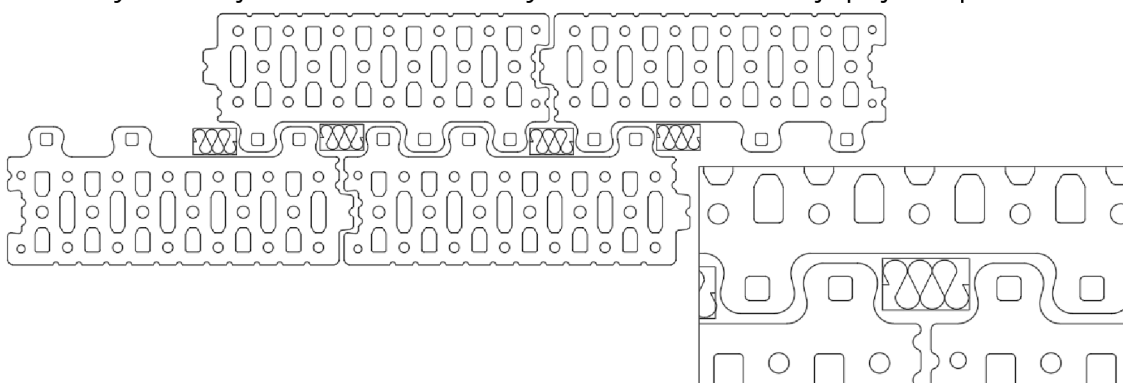
- symetrické cihly se dvěma výrazně se rozšiřujícími ozuby směrem dovnitř stěny



Obr. 9 varianta ozubů 2 vč. detailu styku 3 cihel

OZUBY 3

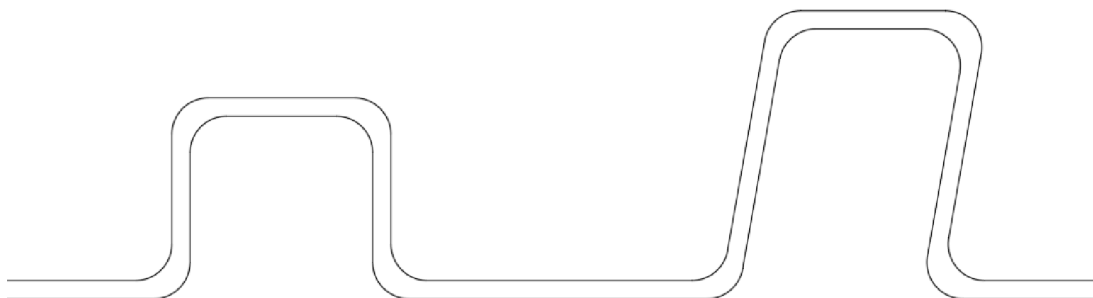
- symetrické cihly se čtyřmi mírně se rozšiřujícími ozuby směrem dovnitř stěny
- vynechán jeden ozub v místě styku tří cihel, místo nějž přijde tepelná izolace



Obr. 10 varianta ozubů 3 vč. detailu styku 3 cihel

OZUBY 4

- střídají se čtvercové ozuby, které zamezují podélnému posunu, a zešíkmené obdélníkové ozuby zamezující příčnému rozdělení stěny



Obr. 11 varianta ozubů 4 - detail

11. ROZMĚROVÉ MODULY ZDICÍCH PRVKŮ

Z variant ozubů byly vybrány ozuby 2 a 3, které byly rozpracovány do různých modulových verzí, které mají vést ke zjednodušení výstavby.

Rozdělením cihly na 2 části, které mají přibližně poloviční hmotnost než cihla původní, je možné zvětšovat rozměry při zachování nebo snížení hmotnosti a tím urychlit výstavbu.

Pro vyhodnocení byl vybrán výrobek firmy Wienerberger (Porotherm 25 AKU Z Profi Dryfix), jehož laboratorní vzduchová neprůzvučnost činí 52 dB.

Původní cihla má koordinační rozměry 333x250x250 mm ≈ šířka x výška x tloušťka, do 1 m² se tedy vejdu 3 cihly v podélném směru a 4 cihly ve svislém směru. V těchto směrech byly také upravovány moduly.



Obr. 12 původní cihla – Porotherm 25 AKU Z Profi Dryfix [18]

Tab. 5 přehled rozměrů a značení rozměrových modulů zdicích prvků

ozn.	počet ozubů	rozměry základní		rozměry koordinační		značka
		délka [mm]	výška [mm]	délka [mm]	výška [mm]	
1.0.0	-	330	249	333	250	■
2.0.0	2	330	249	333	250	●
2.1.1	2	330	332	333	333	●
2.1.2	2	330	499	333	500	●
2.1.3	2	330	374	333	375	●
2.2.1	2	497	249	500	250	●
2.2.2	2	372	249	375	250	●
3.0.0	3	330	249	333	250	▲
3.1.1	3	330	332	333	333	▲
3.1.2	3	330	499	333	500	▲
3.1.3	3	330	374	333	375	▲
3.2.1	3	497	249	500	250	▲
3.2.2	3	372	249	375	250	▲

11.1. MODULOVÉ VARIANTY

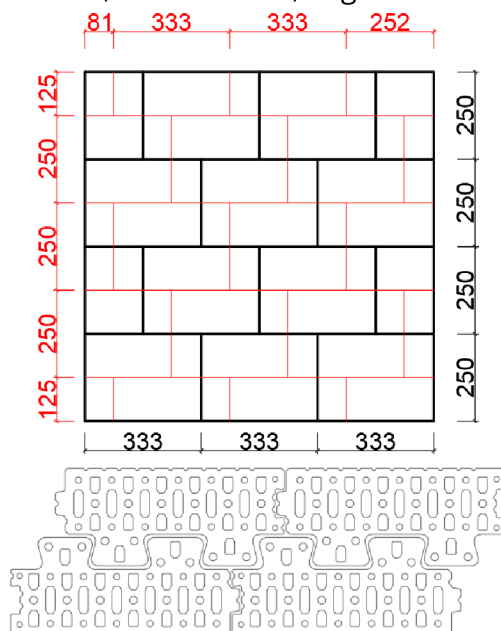
11.1.1. Varianty vycházející z ozubů 2

Pozn.: Ve výřezu 1x1 m je vždy červeně naznačena druhá řada.

VARIANTA 2.0.0

2 ozuby bez úpravy modulu

rozměry 333x250x125 mm, hmotnost 10,0 kg

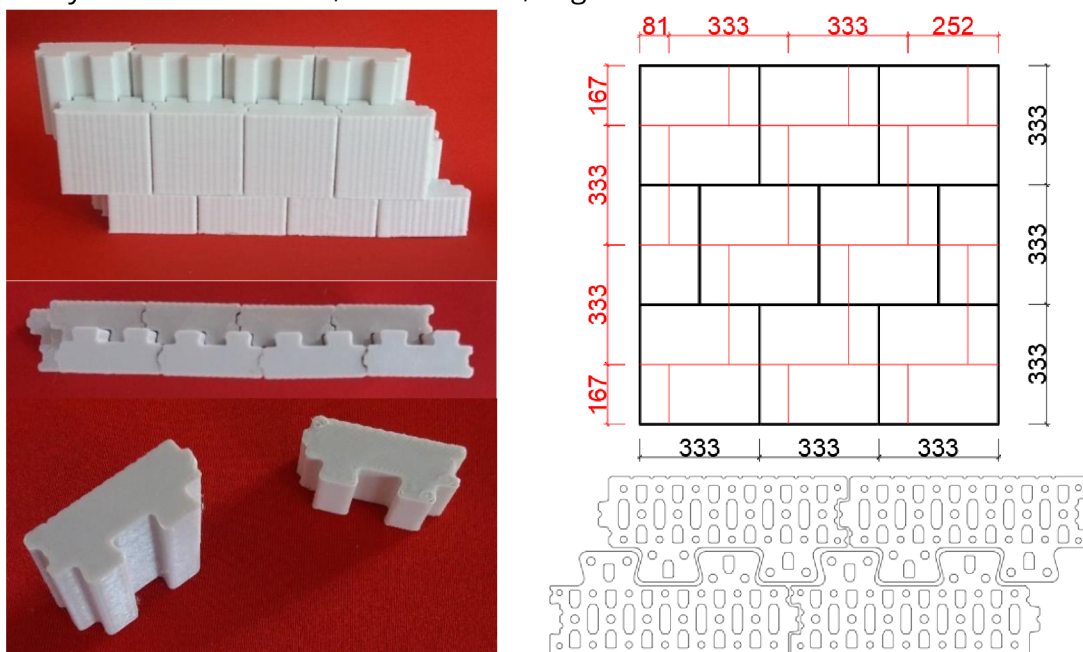


Obr. 13 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.0.0

VARIANTA 2.1.1

Úpravou svislého rozměru cihly se 2 ozuby vznikla varianta 2.1.1 (3 cihly do metru výšky).

rozměry 333x333x125 mm, hmotnost 13,4 kg

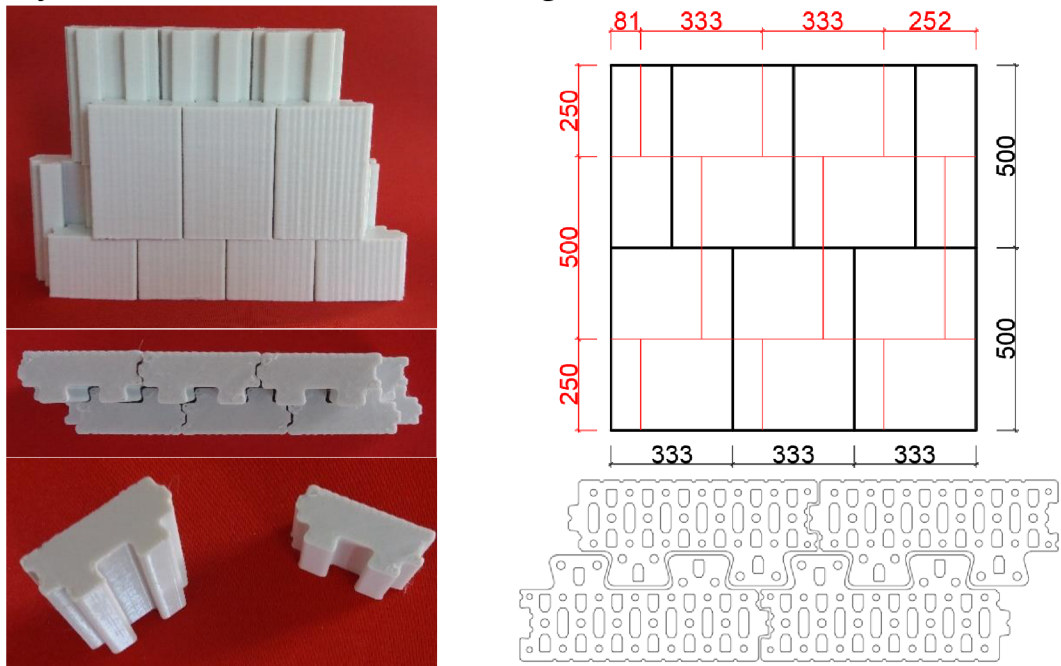


Obr. 14 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.1.1

VARIANTA 2.1.2

Úpravou svislého rozměru cihly se 2 ozuby vznikla varianta 2.1.2 (2 cihly do metru výšky).

rozměry 333x500x125 mm, hmotnost 20,1 kg

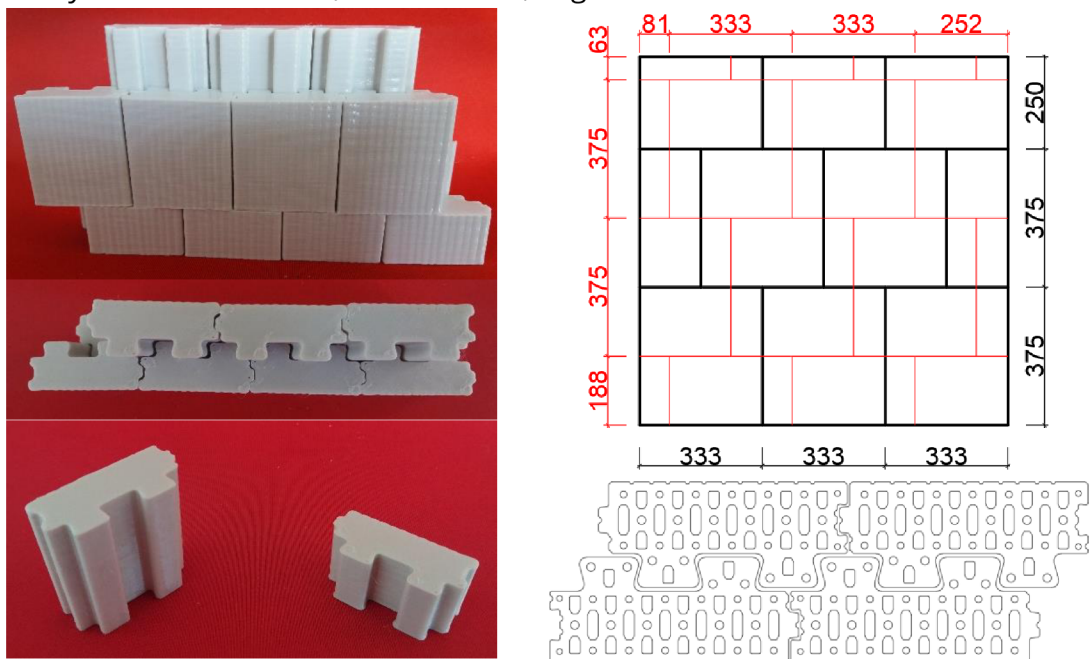


Obr. 15 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.1.2

VARIANTA 2.1.3

Úpravou svislého rozměru cihly se 2 ozuby vznikla varianta 2.1.3 (2 a 2/3 cihly do metru výšky neboli 4 cihly do 1,5 metru výšky).

rozměry 333x375x125 mm, hmotnost 15,1 kg

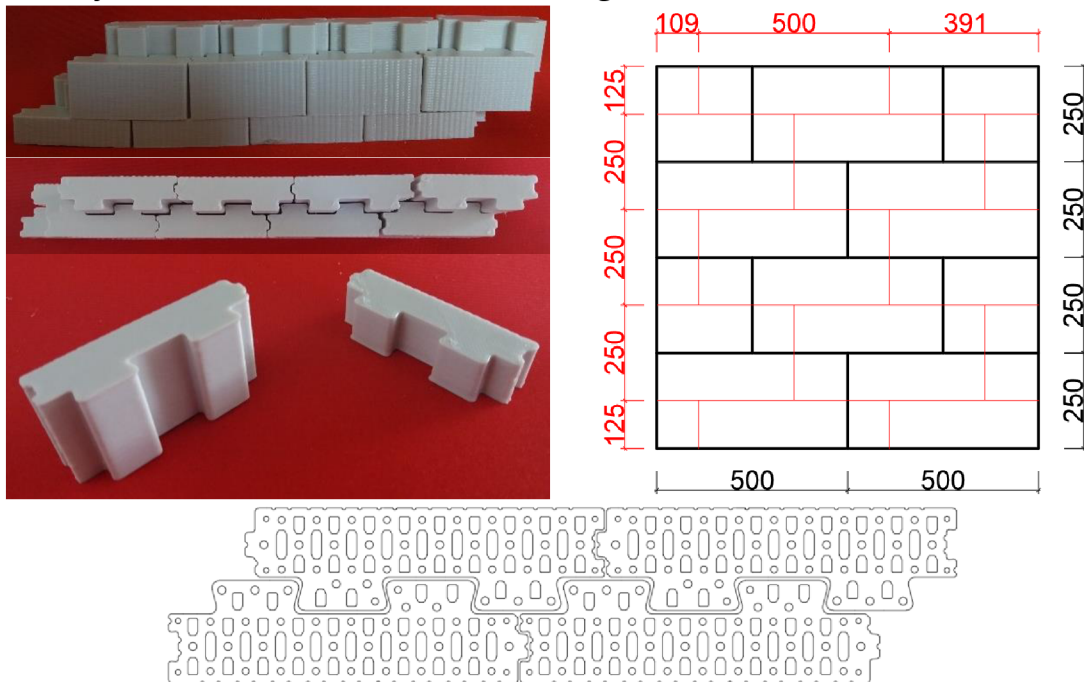


Obr. 16 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.1.3

VARIANTA 2.2.1

V podélném směru byly rozměry cihly se 2 ozuby upraveny na variantu 2.2.1 (2 cihly do metru šířky).

rozměry 500x250x125 mm, hmotnost 15,2 kg

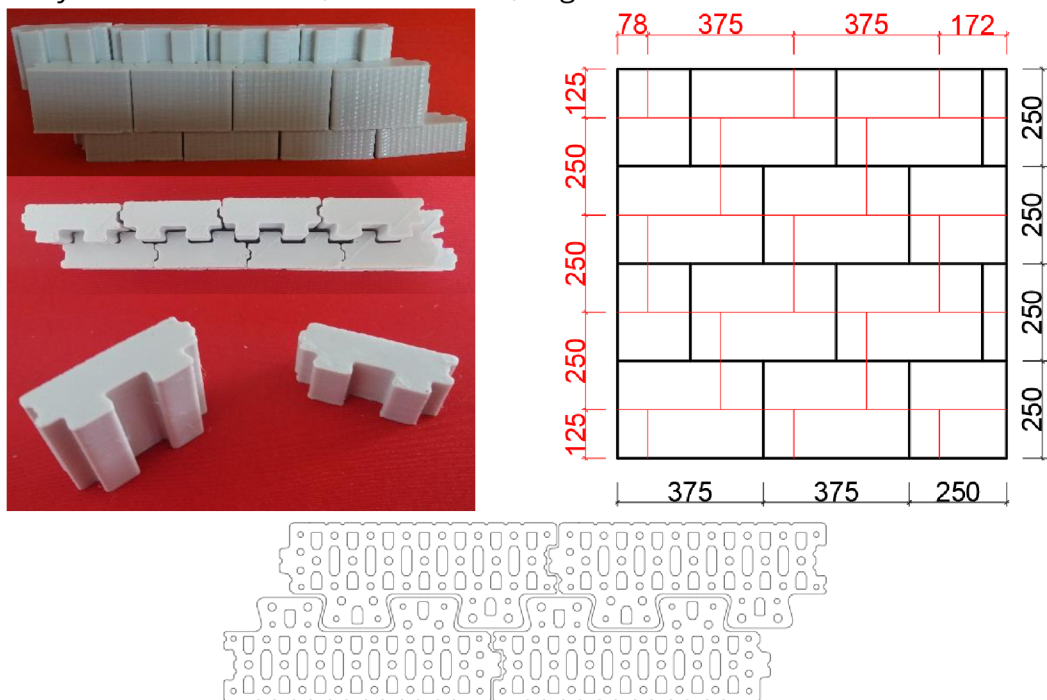


Obr. 17 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.2.1

VARIANTA 2.2.2

V podélném směru byly rozměry cihly se 2 ozuby upraveny na variantu 2.2.2 (2 a 2/3 cihly do metru šířky neboli 4 cihly do 1,5 metru šířky).

rozměry 375x250x125 mm, hmotnost 11,3 kg



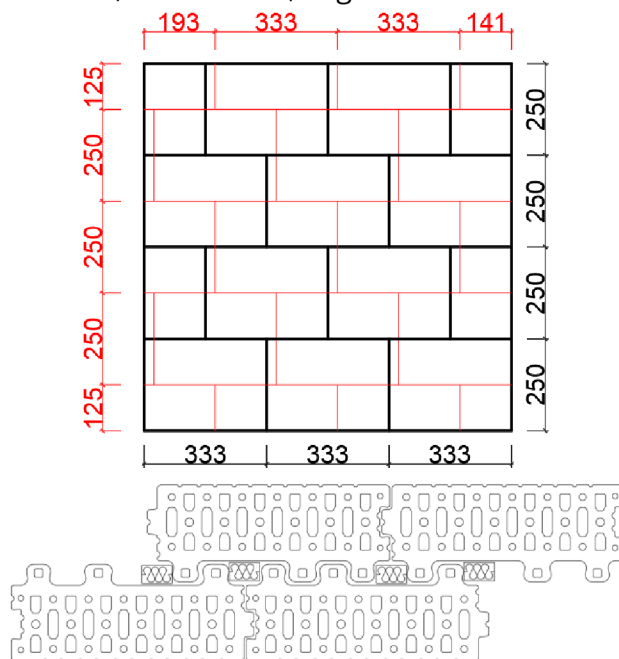
Obr. 18 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.2.2

11.1.2. Varianty vycházející z ozubů 3

VARIANTA 3.0.0

3 ozuby bez modulové úpravy

rozměry 333x250x125 mm, hmotnost 9,7 kg

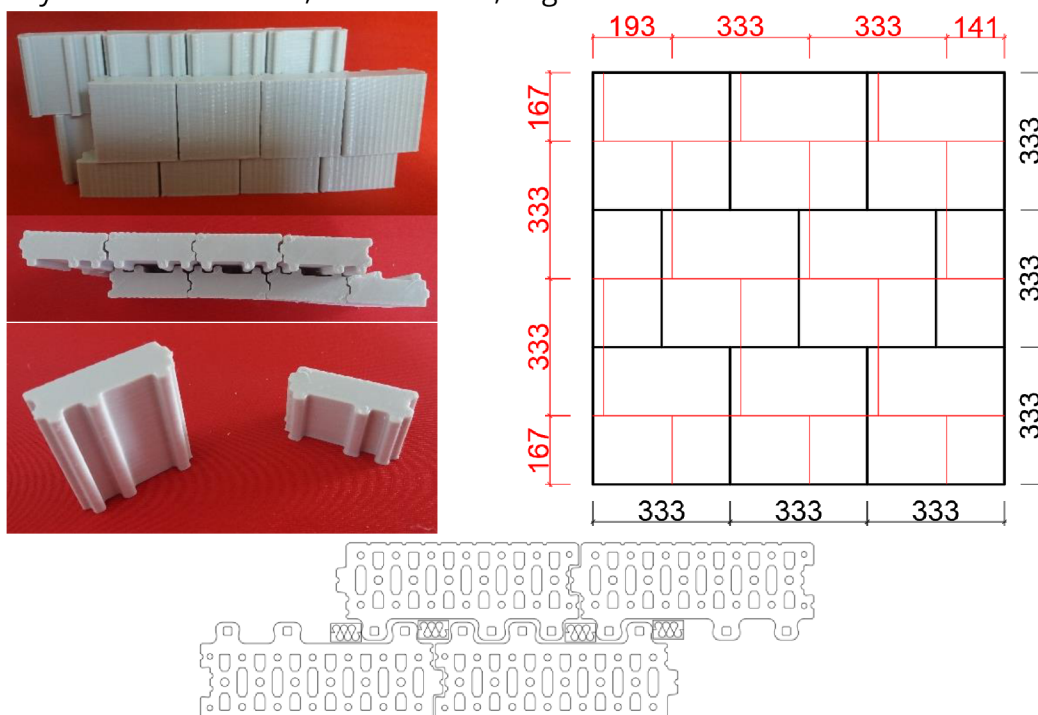


Obr. 19 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.0.0

VARIANTA 3.1.1

Úpravou svislého rozměru cihly se 3 ozuby vznikla varianta 3.1.1 (3 cihly do metru výšky).

rozměry 333x333x125 mm, hmotnost 12,9 kg

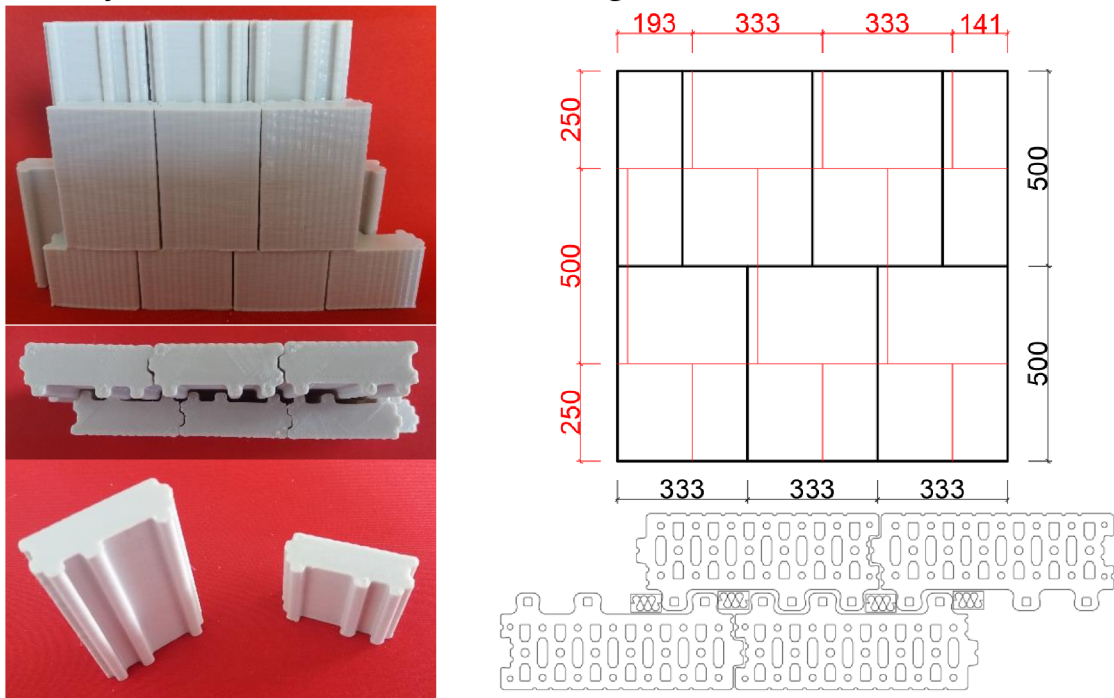


Obr. 20 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.1.1

VARIANTA 3.1.2

Úpravou svislého rozměru cihly se 3 ozuby vznikla varianta 3.1.2 (2 cihly do metru výšky).

rozměry 333x500x125 mm, hmotnost 19,4 kg

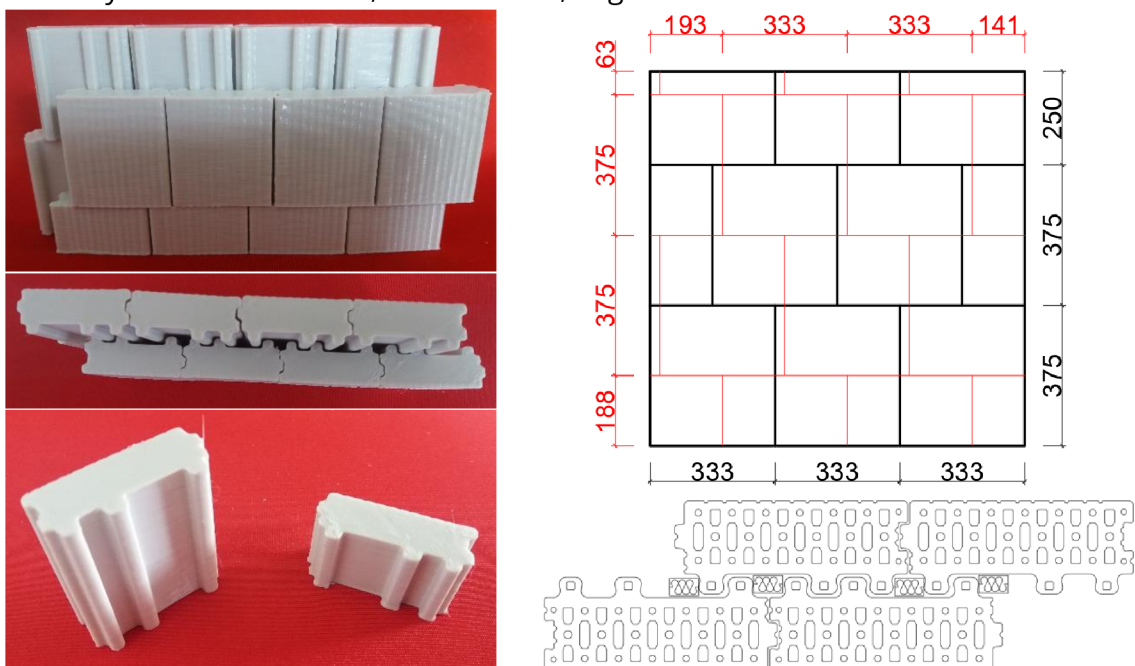


Obr. 21 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.1.2

VARIANTA 3.1.3

Úpravou svislého rozměru cihly se 3 ozuby vznikla varianta 3.1.3 (2 a 2/3 cihly do metru výšky neboli 4 cihly do 1,5 metru výšky).

rozměry 333x375x125 mm, hmotnost 14,6 kg

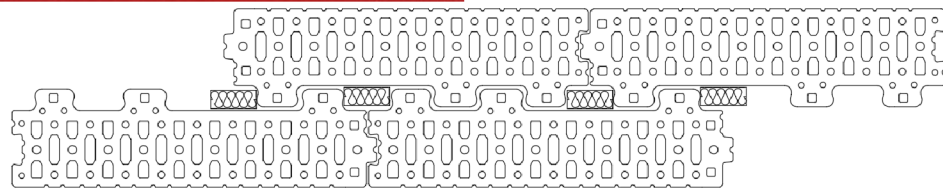
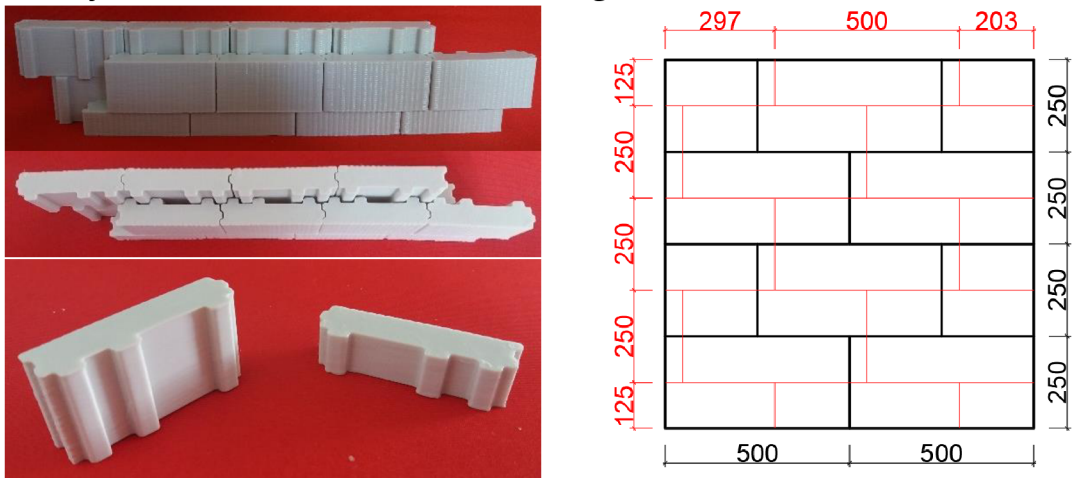


Obr. 22 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.1.3

VARIANTA 3.2.1

V podélném směru byly rozměry cihly se 3 ozuby upraveny na variantu 3.2.1 (2 cihly do metru šířky).

rozměry 500x250x125 mm, hmotnost 14,7 kg

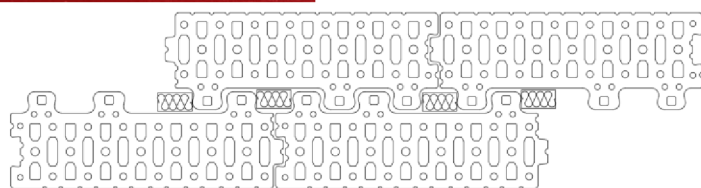
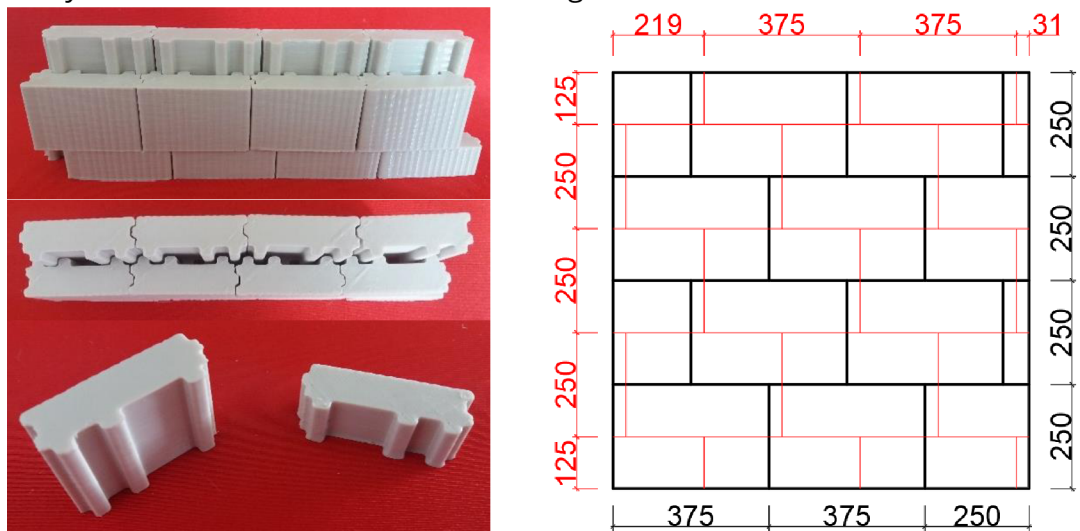


Obr. 23 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.2.1

VARIANTA 3.2.2

V podélném směru byly rozměry cihly se 3 ozuby upraveny na variantu 3.2.2 (2 a 2/3 cihly do metru šířky neboli 4 cihly do 1,5 metru šířky).

rozměry 375x250x125 mm, hmotnost 11,0 kg



Obr. 24 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.2.2

11.1.3. Vyhodnocení modulových variant

Proveditelnost jednotlivých modulových variant byla ověřena na modelech vytvořených pomocí 3D tiskárny. Modely byly vytisknuty v měřítku 1:6. Byly zkoušeny možnosti výstavby a uchopitelnost jednotlivých zdicích prvků. Zdicí prvky byly uvažovány jako broušené, bylo tedy počítáno se styčnou spárou 1 mm. Základní podélné rozměry jsou o 3 mm kratší než rozměry koordinační, svislé rozměry jsou pak kratší o již zmíněný 1 mm.

11.1.3.1. Porovnání na základě hmotností

Tab. 6 tabulka hmotností prvků a objemových hmotností zdiva rozměrových modulů

ozn.	délka [mm]	výška [mm]	objemová hmotnost střepeu [kg·m ⁻³]	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]
1.0.0	330	249	1500	20,8	249,7	1000
2.0.0	330	249	1500	10,0	240,6	960
2.1.1	330	332	1500	13,4	240,6	960
2.1.2	330	499	1500	20,1	241,1	960
2.1.3	330	374	1500	15,1	240,9	960
2.2.1	497	249	1500	15,2	243,2	970
2.2.2	372	249	1500	11,3	241,7	970
3.0.0	330	249	1500	9,7	232,8	930
3.1.1	330	332	1500	12,9	232,8	930
3.1.2	330	499	1500	19,4	233,3	930
3.1.3	330	374	1500	14,6	233,1	930
3.2.1	497	249	1500	14,7	235,4	940
3.2.2	372	249	1500	11,0	233,8	940

Z hlediska hmotností jednotlivých zdicích prvků vychází nejlépe varianty upravující šířku prvku na 375 mm z původních 333 mm (koordinační rozměry), tzn. varianty 2.2.2 a 3.2.2, které dosahují hmotností 11,3 kg a 11,0 kg, mají tedy značnou rezervu v případě snižování děrování.

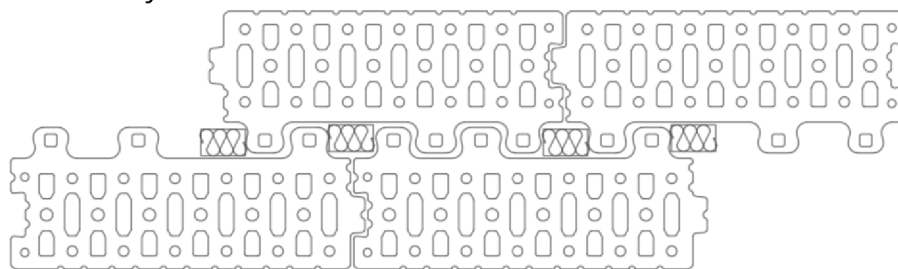
11.1.3.2. Porovnání na základě množství spár

Tab. 7 tabulka spár

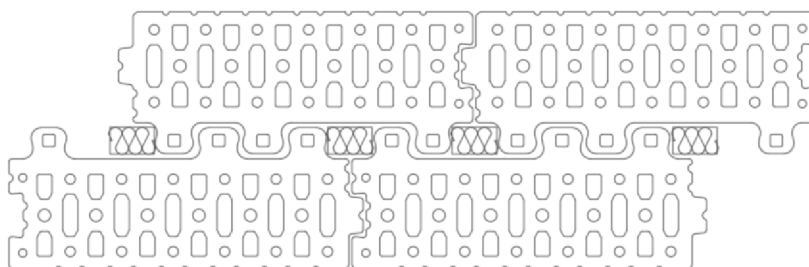
ozn.	šířka [mm]	výška [mm]	spáry ložné		spáry styčné		celkem spár [m]
			počet	délka [m]	počet	délka [m]	
1.0.0	330	249	4	4	12	3	7
2.0.0	330	249	4	4	12	3	7
2.1.1	330	332	3	3	9	3	6
2.1.2	330	499	2	2	6	3	5
2.1.3	330	374	2,7	2,7	8	3	5,7
2.2.1	497	249	4	4	8	2	6
2.2.2	372	249	4	4	10,7	2,7	6,7
3.0.0	330	249	4	4	12	3	7
3.1.1	330	332	3	3	9	3	6

3.1.2	330	499	2	2	6	3	5
3.1.3	330	374	2,7	2,7	8	3	5,7
3.2.1	497	249	4	4	8	2	6
3.2.2	372	249	4	4	10,7	2,7	6,7

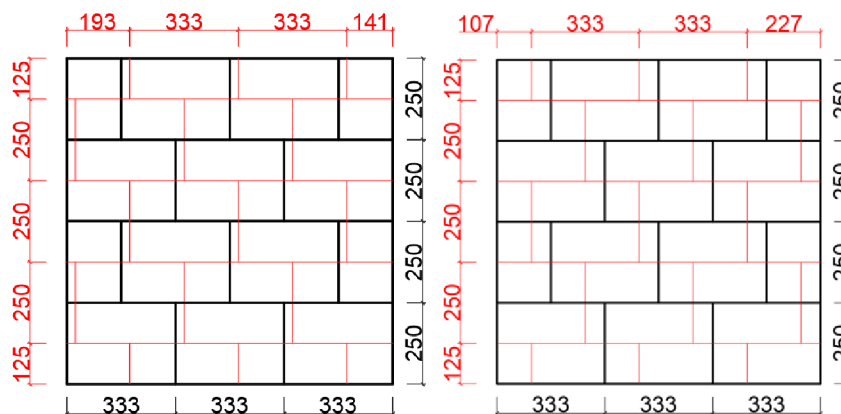
Z pohledu množství spár mezi zdicími prvky (porovnáváno na výřezu 1x1 m) vychází nejlépe varianty upravující výšku prvku na 500 mm z původních 250 mm (koordinační rozměr), tzn. varianty 2.1.1 a 3.1.2, které mají délku ložných spár 2 m ve výřezu 1x1 m a styčných spár 3 m ve výřezu 1x1 m (celkem tedy 5 m spár). Průchozí spáry, tzn. ty, které jdou skrz celou tloušťku zdi, zde nejsou žádné, jelikož ložné spáry jsou posunuté o polovinu výšky prvku a styčné se nestýkají, protože prvky nejsou vůči sobě posunuté o polovinu (v tom případě by průchozí spáry byly přesně polovina délky styčných spár), ale o jinou délku díky tvaru ozubů. V případě variant vycházejících z ozubů 3 jsou ale styčné spáry blízko u sebe, protože styčná spára je blízko poloviny protilehlého prvku, bylo by tedy potřeba přeuspořádat ozuby, aby byly styčné spáry dál od sebe, čehož by šlo dosáhnout výměnou ozubu uprostřed a mezery/izolace.



Obr. 25 ozuby 3 s původním rozložením ozubů



Obr. 26 ozuby 3 s upraveným rozložením ozubů



Obr. 27 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m varianty ozuby 3 s původním a upraveným rozložením ozubů

11.2. POROVNÁNÍ ROZMĚROVÝCH MODULŮ

Tyto rozměrové moduly mají podobné hodnoty plošných hmotností jako prvek, z kterého vycházejí, nedošlo by tedy k výraznému zlepšení akusticky izolačních vlastností. Aby mohlo být dosaženo dobrých hodnot vzduchové neprůzvučnosti, bylo by potřeba zvýšit plošnou hmotnost jednotlivých prvků a tím celého zdiva. Jelikož jednotlivé prvky výrazným snížením své tloušťky dosahují i výrazně nižších hmotností, lze snižovat jejich míru vylehčení. Tím dojde ke zvýšení plošné hmotnosti a tím vzduchové neprůzvučnosti.

11.3. ÚPRAVY MÍRY VYLEHČENÍ

Všechny rozměrové moduly zdících prvků byly z původního vylehčení upraveny tak, aby dosáhly co nejvyšších hodnot plošné hmotnosti a tím co nejvyšších hodnot neprůzvučnosti. Původní vylehčení 32 % bylo postupně snižováno na 25 %, 20 %, 15 %, 10 %, 5 % a 0 %, tedy bez vylehčení.

Tab. 8 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva s vylehčením neupraveným (32 %) a 25 %

ozn.	vylehčení neupravené (32 %)			vylehčení 25 %		
	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]
1.0.0	20,8	249,7	1000	22,8	273,8	1100
2.0.0	10,0	240,6	960	11,1	265,4	1060
2.1.1	13,4	240,6	960	14,7	265,4	1060
2.1.2	20,1	241,1	960	22,2	265,9	1060
2.1.3	15,1	240,9	960	16,6	265,7	1060
2.2.1	15,2	243,2	970	16,8	268,3	1070
2.2.2	11,3	241,7	970	12,5	266,6	1070
3.0.0	9,7	232,8	930	10,7	256,8	1030
3.1.1	12,9	232,8	930	14,3	256,8	1030
3.1.2	19,4	233,3	930	21,4	257,3	1030
3.1.3	14,6	233,1	930	16,1	257,1	1030
3.2.1	14,7	235,4	940	16,2	259,7	1040
3.2.2	11,0	233,8	940	12,1	257,9	1030

Tab. 9 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva s vylehčením 20 % a 15 %

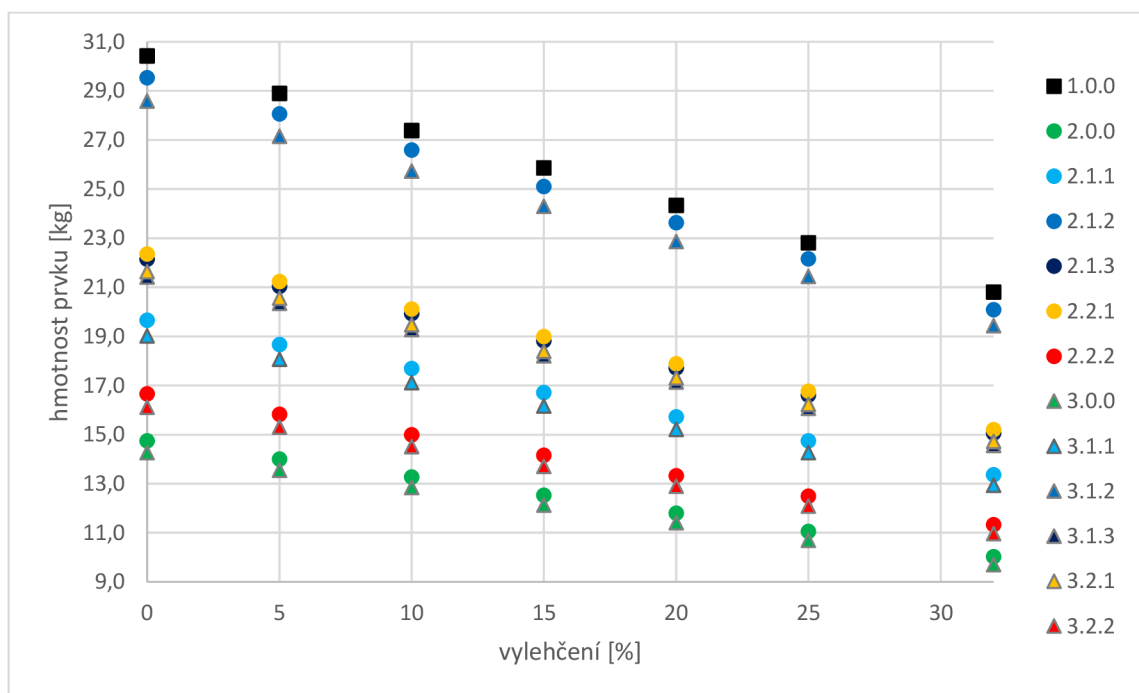
ozn.	vylehčení 20 %			vylehčení 15 %		
	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]
1.0.0	24,3	292,1	1170	25,9	310,3	1240
2.0.0	11,8	283,1	1130	12,5	300,8	1200
2.1.1	15,7	283,1	1130	16,7	300,8	1200
2.1.2	23,6	283,6	1130	25,1	301,4	1210
2.1.3	17,7	283,4	1130	18,8	301,2	1200
2.2.1	17,9	286,1	1140	19,0	304,0	1220
2.2.2	13,3	284,3	1140	14,2	302,1	1210
3.0.0	11,4	273,9	1100	12,1	291,0	1160
3.1.1	15,2	273,9	1100	16,2	291,0	1160
3.1.2	22,9	274,4	1100	24,3	291,6	1170
3.1.3	17,1	274,2	1100	18,2	291,4	1170
3.2.1	17,3	277,0	1110	18,4	294,3	1180
3.2.2	12,9	275,1	1100	13,7	292,3	1170

Tab. 10 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva s vylehčením 10 % a 5 %

ozn.	vylehčení 10 %			vylehčení 5 %		
	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]
1.0.0	27,4	328,6	1310	28,9	346,8	1390
2.0.0	13,3	318,5	1270	14,0	336,1	1340
2.1.1	17,7	318,5	1270	18,7	336,1	1340
2.1.2	26,6	319,1	1280	28,1	336,8	1350
2.1.3	19,9	318,9	1280	21,0	336,6	1350
2.2.1	20,1	321,9	1290	21,2	339,8	1360
2.2.2	15,0	319,9	1280	15,8	337,6	1350
3.0.0	12,8	308,1	1230	13,6	325,2	1300
3.1.1	17,1	308,1	1230	18,1	325,2	1300
3.1.2	25,7	308,7	1230	27,2	325,9	1300
3.1.3	19,3	308,5	1230	20,4	325,7	1300
3.2.1	19,5	311,6	1250	20,6	328,9	1320
3.2.2	14,5	309,5	1240	15,3	326,6	1310

Tab. 11 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva bez vylehčení (vylehčení 0 %)

ozn.	vylehčení 0 %		
	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost prvku [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]
1.0.0	30,4	365,1	1460
2.0.0	14,7	353,8	1420
2.1.1	19,7	353,8	1420
2.1.2	29,5	354,5	1420
2.1.3	22,1	354,3	1420
2.2.1	22,4	357,7	1430
2.2.2	16,7	355,4	1420
3.0.0	14,3	342,4	1370
3.1.1	19,0	342,4	1370
3.1.2	28,6	343,0	1370
3.1.3	21,4	342,8	1370
3.2.1	21,6	346,2	1380
3.2.2	16,1	343,8	1380



Graf 2 závislost hmotnosti prvku na vylehčení

11.3.1. Výpočet vzduchové neprůzvučnosti vybraných rozměrových modulů

Výpočet laboratorní vzduchové neprůzvučnosti vychází z ČSN EN ISO 12354-1, konkrétně ze vztahu pro plošnou hmotnost alespoň 150 kg·m⁻²:

$$R_w = 40,0 \cdot \log(m'/m'_0) - 45,0$$

m' ...plošná hmotnost [kg·m⁻²]

m'_0 ...referenční plošná hmotnost [kg·m⁻²] ($m'_0 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) [33]

Tab. 12 modulové varianty s různými mírami vylehčení seřazené vzestupně podle plošné hmotnosti prvku s vyloučením prvků nad 21,0 kg (tučně výchozí zdicí prvek)

ozn.	vylehčení [%]	hmotnost prvku [kg]	plošná hmotnost zdiva [kg·m ⁻²]	objemová hmotnost zdiva [kg·m ⁻³]	neprůzvučnost [dB]
3.0.0	32	9,7	232,8	930	49,7
3.1.1	32	12,9	232,8	930	49,7
3.1.3	32	14,6	233,1	930	49,7
3.1.2	32	19,4	233,3	930	49,7
3.2.2	32	11,0	233,8	940	49,8
3.2.1	32	14,7	235,4	940	49,9
2.0.0	32	10,0	240,6	960	50,3
2.1.1	32	13,4	240,6	960	50,3
2.1.3	32	15,1	240,9	960	50,3
2.1.2	32	20,1	241,1	960	50,3
2.2.2	32	11,3	241,7	970	50,3
2.2.1	32	15,2	243,2	970	50,4
1.0.0	32	20,8	249,7	1000	50,9
3.0.0	25	10,7	256,8	1030	51,4
3.1.1	25	14,3	256,8	1030	51,4
3.1.3	25	16,1	257,1	1030	51,4
3.2.2	25	12,1	257,9	1030	51,5
3.2.1	25	16,2	259,7	1040	51,6
2.0.0	25	11,1	265,4	1060	52,0
2.1.1	25	14,7	265,4	1060	52,0
2.1.3	25	16,6	265,7	1060	52,0
2.2.2	25	12,5	266,6	1070	52,0
2.2.1	25	16,8	268,3	1070	52,1
3.0.0	20	11,4	273,9	1100	52,5
3.1.1	20	15,2	273,9	1100	52,5
3.1.3	20	17,1	274,2	1100	52,5
3.2.2	20	12,9	275,1	1100	52,6
3.2.1	20	17,3	277,0	1110	52,7
2.0.0	20	11,8	283,1	1130	53,1
2.1.1	20	15,7	283,1	1130	53,1
2.1.3	20	17,7	283,4	1130	53,1
2.2.2	20	13,3	284,3	1140	53,2
2.2.1	20	17,9	286,1	1140	53,3
3.0.0	15	12,1	291,0	1160	53,6
3.1.1	15	16,2	291,0	1160	53,6
3.1.3	15	18,2	291,4	1170	53,6
3.2.2	15	13,7	292,3	1170	53,6
3.2.1	15	18,4	294,3	1180	53,8
2.0.0	15	12,5	300,8	1200	54,1

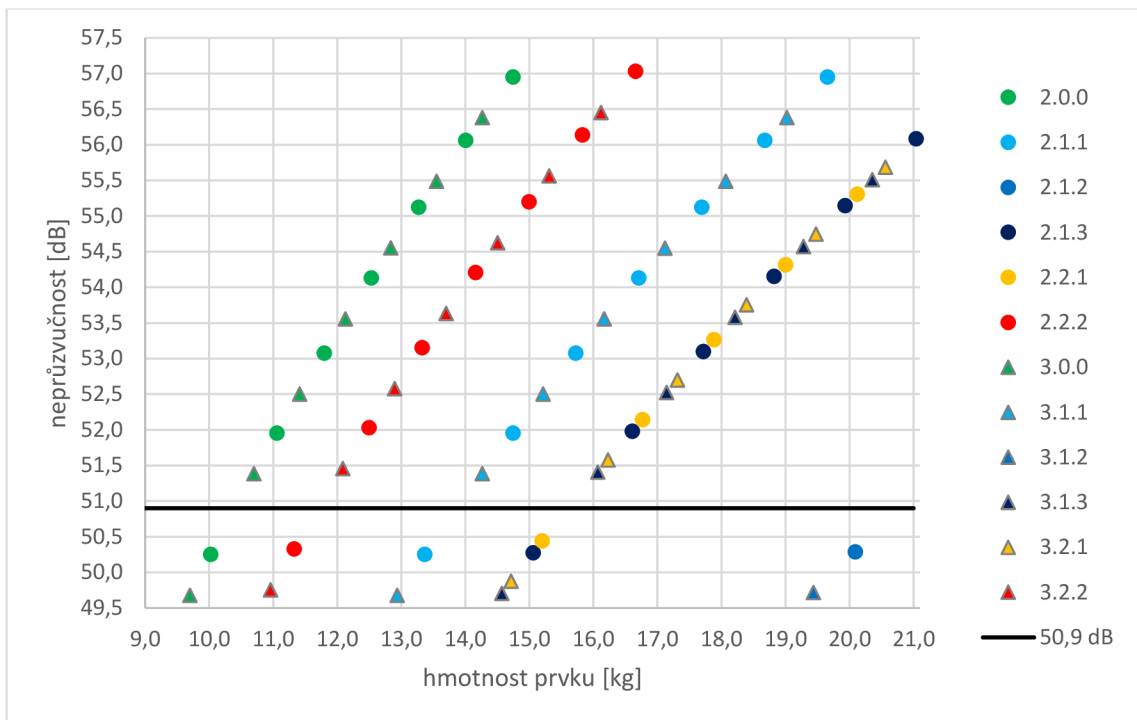
2.1.1	15	16,7	300,8	1200	54,1
2.1.3	15	18,8	301,2	1200	54,2
2.2.2	15	14,2	302,1	1210	54,2
2.2.1	15	19,0	304,0	1220	54,3
3.0.0	10	12,8	308,1	1230	54,5
3.1.1	10	17,1	308,1	1230	54,5
3.1.3	10	19,3	308,5	1230	54,6
3.2.2	10	14,5	309,5	1240	54,6
3.2.1	10	19,5	311,6	1250	54,7
2.0.0	10	13,3	318,5	1270	55,1
2.1.1	10	17,7	318,5	1270	55,1
2.1.3	10	19,9	318,9	1280	55,1
2.2.2	10	15,0	319,9	1280	55,2
2.2.1	10	20,1	321,9	1290	55,3
3.0.0	5	13,6	325,2	1300	55,5
3.1.1	5	18,1	325,2	1300	55,5
3.1.3	5	20,4	325,7	1300	55,5
3.2.2	5	15,3	326,6	1310	55,6
3.2.1	5	20,6	328,9	1320	55,7
2.1.1	5	18,7	336,1	1340	56,1
2.0.0	5	14,0	336,1	1340	56,1
2.1.3	5	21,0	336,6	1350	56,1
2.2.2	5	15,8	337,6	1350	56,1
3.0.0	0	14,3	342,4	1370	56,4
3.1.1	0	19,0	342,4	1370	56,4
3.2.2	0	16,1	343,8	1380	56,5
2.0.0	0	14,7	353,8	1420	57,0
2.1.1	0	19,7	353,8	1420	57,0
2.2.2	0	16,7	355,4	1420	57,0

11.4. VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÝCH MODULŮ

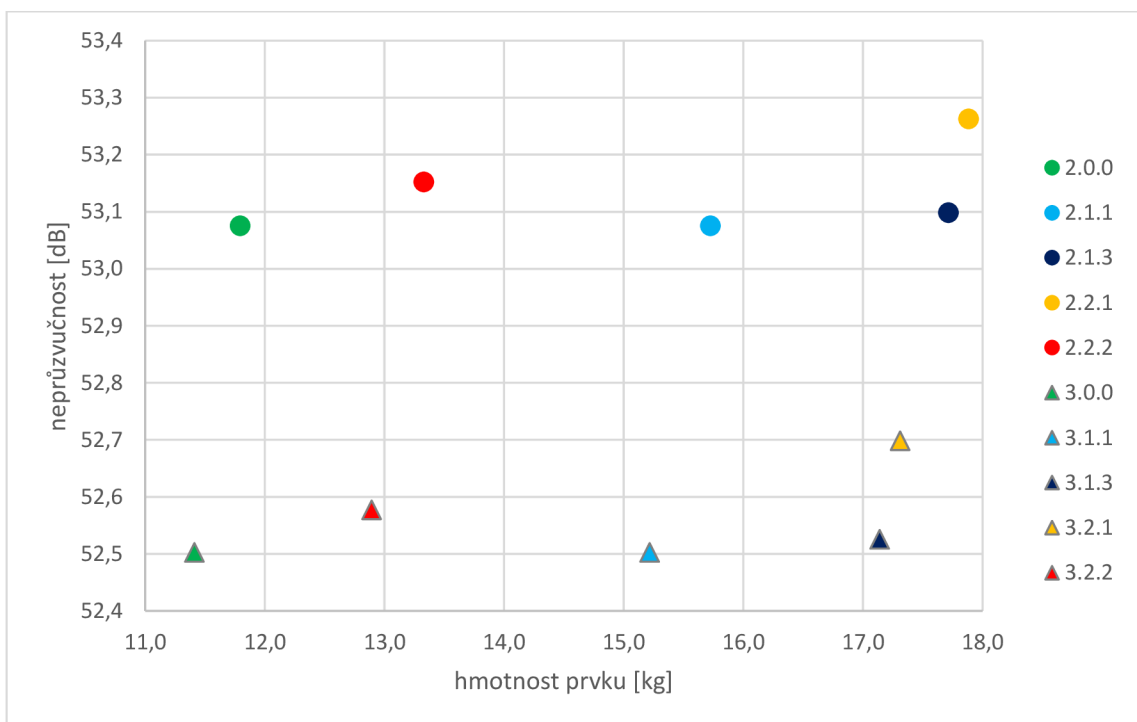
Vypočítaná neprůzvučnost (50,9 dB) odpovídá hodnotě, kterou udává výrobce (52 dB), pokud odečteme předpokládaný vliv omítek a malty (předpoklad přibližně 51 dB).

Vylehčení pod 20 % není z technologického hlediska (sušení, výpal) možné, je tedy třeba počítat s vylehčením 20 % a více. Hodnoty neprůzvučnosti pro vylehčení menší než 20 % byly vypočítány pro teoretické porovnání.

Je potřeba vzít v potaz spáry, jelikož by mohly zhoršovat akusticko-izolační vlastnosti. Z tohoto hlediska nejlépe vychází prvky 2.1.2 a 3.1.2 s 5 m spár (2 m ložných a 3 m styčných spár) a prvky 2.1.3 a 3.1.3, které mají 5,7 m spár (z toho 2,7 m ložných a 3 m styčných), nejhůře pak vycházejí prvky bez úpravy rozměrového modulu – 2.0.0 a 3.0.0 se 7 m spár (4 m ložných a 3 m styčných).

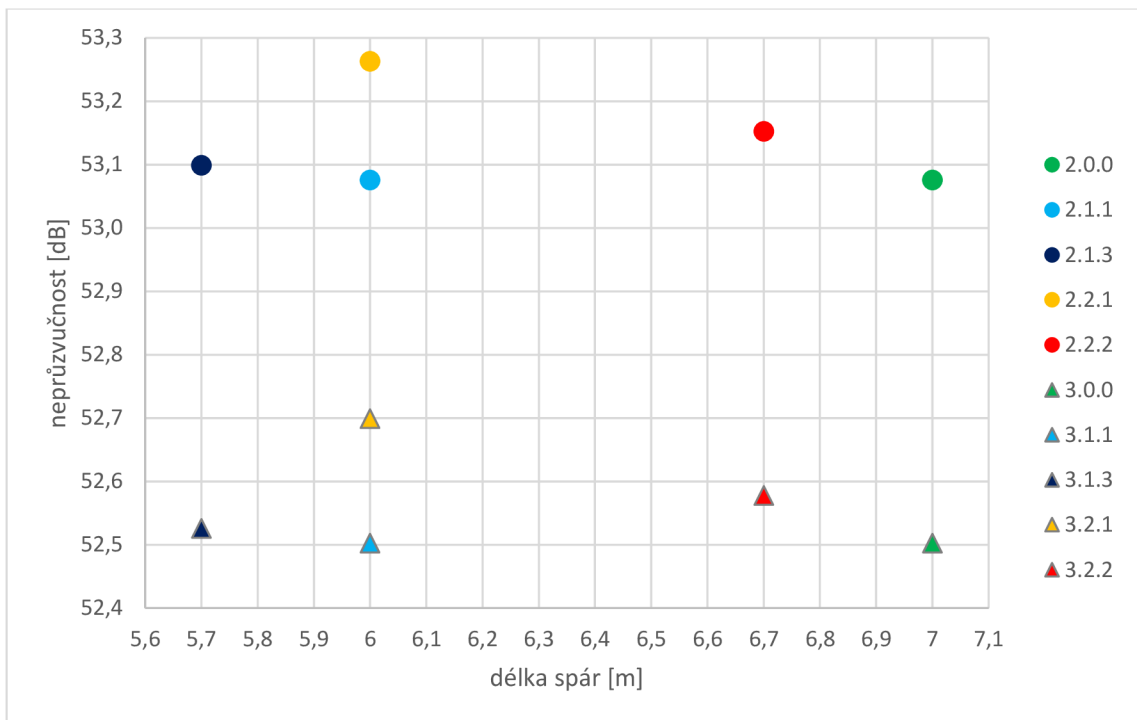


Graf 3 závislost neprůzvučnosti na hmotnosti prvku s hranicí 50,9 dB (neprůzvučnost výchozího zdícího prvku)



Graf 4 zobrazení neprůzvučnosti podle hmotnosti prvku pro prvky s hmotností do 21,0 kg a vylehčením 20 %

Vyšších hodnot neprůzvučnosti dosahují rozměrové moduly se dvěma ozuby, protože varianty se třemi ozuby mají jeden ozub vynechaný, což snižuje jejich plošnou hmotnost a tím neprůzvučnost. Zároveň však nemají výrazně vyšší hmotnost, hodnotím tedy variantu se dvěma ozuby jako lepší.



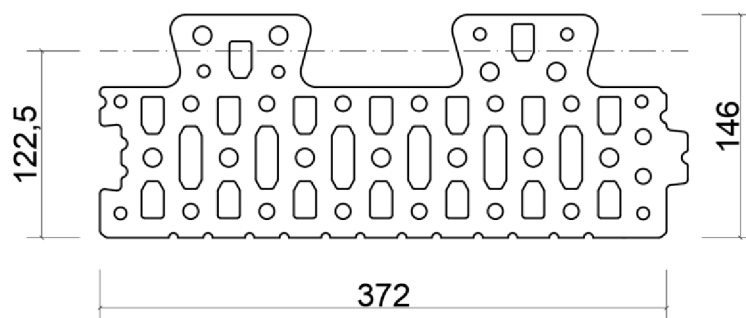
Graf 5 zobrazení neprůzvučnosti rozměrových modulů podle délky spár pro prvky s hmotností do 21,0 kg a vylehčením 20 %

Nejlépe vychází varianty 2.2.1, 2.2.2, 2.1.3 a 2.1.1 s vylehčením 20 %, jejichž neprůzvučnosti dosahují hodnot nad 53 dB. Jedná se o zdící prvky se 2 ozuby. Pokud vezmeme v potaz i množství, resp. délku spár (ložných i styčných), je na tom z výše zmíněných rozměrových modulů nejlépe varianty 2.1.3, která má celkem 5,7 m spár (2,7 m ložných, 3 m styčných).

12. ZÁVĚR

V teoretické části byla provedena rešerše literatury, která spolu s průzkumem trhu vedla k návržení nového systému zdicích tvarovek. Z toho důvodu byla navržena nová technologie výstavby akustické dělicí konstrukce.

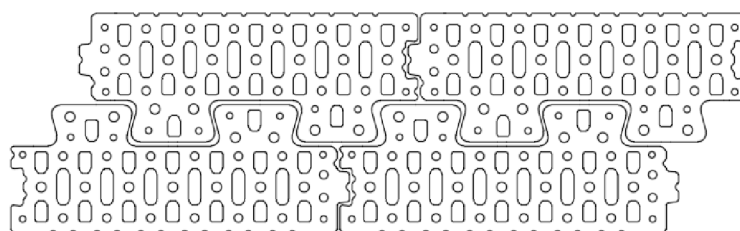
Při porovnání podle všech hledisek, která byla v této práci hodnocena (neprůzvučnost, hmotnost prvku, délka spár, nejvyšší možné vylehčení), vychází nejlépe rozměrový modul 2.2.2 s vylehčením 20 % (délka 372 mm, výška 249 mm, neprůzvučnost 53,2 dB, hmotnost prvku 13,3 kg, délka spár 6,7 m).



Obr. 28 okótovaný půdorys zdicího prvku rozměrového modulu 2.2.2

V porovnání s výchozím zdicím prvkem (Porotherm 25 AKU Z Profi Dryfix) došlo k výraznému zlepšení akusticko-izolačních vlastností. Prvky byly porovnávány na základě vypočítaných hodnot laboratorní vzduchové neprůzvučnosti. Oproti 50,9 dB se lze při 20% vylehčení dostat až na 53,3 dB, což je rozdíl 2,4 dB. S omítkami můžeme dosáhnout neprůzvučnosti 54,3 dB.

Svou konstrukcí může tento zdicí prvek připomínat výrobek AKU KOMPAKT 21 firmy Heluz, avšak v případě výrobku Heluz se jedná z hlediska akusticko-izolačních vlastností o dvojitou stěnu. Prvek představený v této práci přináší úplně novou technologii výstavby, která je jednodušší oproti klasickému zdění, protože prvky mají větší rozměry a výstavba je tím urychlena.

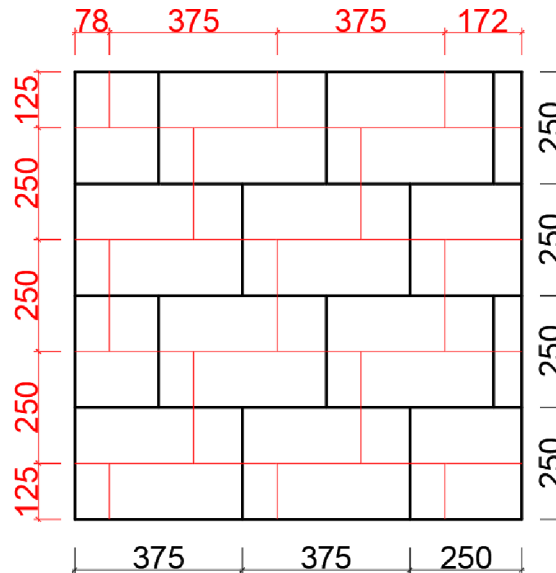


Obr. 29 schéma skládání zdicích prvků rozměrového modulu 2.2.2

Kdybychom porovnali tento zdicí prvek s klasickou cihlou plnou pálenou, která díky své vysoké plošné hmotnosti dosahuje vysokých hodnot vzduchové neprůzvučnosti (57 dB při tloušťce stěny 300 mm), můžeme dosáhnout nepatrně nižších hodnot, avšak při výrazně rychlejší a jednodušší výstavbě.

Proveditelnost výstavby těchto prvků byla ověřena pomocí modelů z 3D tiskárny. Prvky se 2 ozuby se skládaly bez problému a neměly tendenci se

rozpojovat, ale v praxi by mohlo být obtížné zvedat prvky vysoko nad hlavu, jelikož tyto prvky do sebe musí být zasunuty shora. Prvky se 3 ozuby měly tendenci se rozpojovat, což by na stavbě šlo vyřešit vhodně zvoleným spojovacím materiálem (malta, zdicí pěna).



Obr. 30 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m rozměrového modulu 2.2.2

Protože se prvky překrývají v podélném i svislém směru, bylo by nutné vyrábět prvky poloviční výšky a šířky, případně tuto skutečnost vyřešit jiným způsobem (dělení cihel na stavbě).

Výraznou nevýhodou tohoto způsobu výstavby je nutnost vyřešit napojení dvou kolmých stěn.

V této práci jde o zcela nový směr v oblasti akusticko-izolačního zdiva, o novou myšlenku, která bude dále rozvíjena. Jelikož se jedná o bakalářskou práci, nelze plně vyřešit všechny problémy týkající se návrhu nového zdicího prvku, avšak jedná se o dobrou startovní pozici pro budoucí práce.

ZDROJE

- [1] ČESKO. Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací ve znění pozdějších předpisů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 6. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-241/zneni-20181109>
- [2] ČESKO. Zákon č. 183/2006 Sb. Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) ve znění pozdějších předpisů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 18. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183/zneni-20200312>
- [3] ČESKO. Vyhláška č. 268/2009 Sb., Vyhláška o technických požadavcích na stavby ve znění pozdějších předpisů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 6. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-323/zneni-20171019>
- [4] ČSN 73 0532 *Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [5] ČSN 73 0540–2 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [6] ŠTASTNÍK, Stanislav. *Izolační materiály*. [přednáška] Brno. zimní semestr 2019/2020
- [7] WU, Yanqi, Shengli LI a Dongwei WANG. Characteristic analysis of acoustic emission signals of masonry specimens under uniaxial compression test. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 196, 637-648 [cit. 14.4.2020]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.148. ISSN 0950-0618
- [8] SHETTY, Naveen, Georgios LIVITSANOS, Nathalie VAN ROY, Dimitrios G AGGELIS, Danny VAN HEMELRIJCK, Martine WEVERs a Els VERSTRYNGE. Quantification of progressive structural integrity loss in masonry with Acoustic Emission-based damage classification. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2019, 194, 192-204 [cit. 14.4.2020]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.215. ISSN 0950-0618
- [9] VERSTRYNGE, Els, Luc SCHUEREMANS, Dionys VAN GEMERT a Martine WEVERs. Monitoring and predicting masonry's creep failure with the acoustic emission technique. *NDT and E International* [online]. Elsevier, 2009, 42(6), 518-523 [cit. 14.4.2020]. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.03.001. ISSN 0963-8695
- [10] PAPARGYRIS, A.D, R.G COOKE, S.A PAPARGYRI a A.I BOTIS. The acoustic behaviour of bricks in relation to their mechanical behaviour. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2001, 15(7), 361-369 [cit. 14.4.2020]. DOI: 10.1016/S0950-0618(01)00007-1. ISSN 0950-0618
- [11] *Ústav fyziky a materiálového inženýrství, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická* [online]. [cit. 1.3.2020]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf

- [12] ŠŤASTNÍK, Stanislav a Jiří ZACH. *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*. Brno: CERM, 2002, 209 stran: ilustrace. ISBN 80-214-2117-7
- [13] *WikiSkripta* [online]. [cit. 2.3.2020]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Hluk>
- [14] HALAHYJA, Martin a kolektiv. *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*. Bratislava: Alfa, 1985, 752 stran: ilustrace.
- [15] KAŇKA, Jan. *Akustika stavebních objektů*. Brno: Era, 2009, 145 stran: tabulky, grafy. ISBN 978-80-7366-140-3
- [16] PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Brno: CERM, 2002, 287 stran: ilustrace. ISBN 80-7204-234-3
- [17] *Cihlářský svaz Čech a Moravy* [online] [cit. 4.3.2020]. Dostupné z: https://www.cscm.cz/rubriky/pro-odborniky/konstrukce-z-brousenych-akusticky-ch-cihel-porotherm-aku-profi-akusticke-vlastnosti-zdiva_3948.html
- [18] *Wienerberger* [online]. [cit. 13.3.2020] Dostupné z: <https://www.wienerberger.cz/>
- [19] *Heluz* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.heluz.cz/>
- [20] *Leier.sk* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <http://www.leier.sk/leiertherm-25-30-aku-238>
- [21] *SCHLAGMANN POROTON®* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.schlagmann.de/de/Home>
- [22] *PEZINSKÉ TEHELNE – PANELÁREŇ, a.s.* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.pezinske-tehelne.sk/>
- [23] *BRITTERM* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.britterm.sk/>
- [24] *UNIPOR* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.unipor.de/>
- [25] *THERMOPOR®* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <http://thermopor.de/>
- [26] *DANESI* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.danesilaterizi.it/>
- [27] *FORNACI DCB, LATERIZI BRANELLA* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <http://www.fornacidcb.it/>
- [28] *LEIPFINGER-BADER Ziegelwerke* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.leipfinger-bader.de/>
- [29] *T2D* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://t2d.it/>
- [30] *grupo d'iaz redondo* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <http://www.grupodiazredondo.com/en/index.html>
- [31] *ERBERSDOBLER* [online]. [cit. 13.3.2020]. Dostupné z: <https://www.erbersdobler-ziegel.de/>
- [32] *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 8.10.2019]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [33] ČSN EN ISO 12354-1 *Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi*. Praha: Český normalizační institut, 2018.

SEZNAMY

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 schéma prostupu zvuku dělicí konstrukcí [12]	15
Obr. 2 stanovení vzduchové neprůzvučnosti [12]	17
Obr. 3 závislost vzduchové neprůzvučnosti jednoduché stěny na frekvenci [12] ...	17
Obr. 4 závislost vzduchové neprůzvučnosti dvojité stěny na frekvenci [12]	18
Obr. 5 názvy směrů zdicích prvků	32
Obr. 6 varianta ozubů 1 – detail	38
Obr. 7 varianta ozubů 1	38
Obr. 8 varianta ozubů 1 – rozšiřující se ozuby	38
Obr. 9 varianta ozubů 2 vč. detailu styku 3 cihel	39
Obr. 10 varianta ozubů 3 vč. detailu styku 3 cihel	39
Obr. 11 varianta ozubů 4 – detail	39
Obr. 12 původní cihla – Porotherm 25 AKU Z Profi Dryfix [18].....	40
Obr. 13 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.0.0	41
Obr. 14 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.1.1	41
Obr. 15 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.1.2	42
Obr. 16 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.1.3	42
Obr. 17 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.2.1	43
Obr. 18 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 2.2.2	43
Obr. 19 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.0.0	44
Obr. 20 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.1.1	44
Obr. 21 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.1.2	45
Obr. 22 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.1.3	45
Obr. 23 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.2.1	46
Obr. 24 fotky z 3D tisku, uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m a půdorys varianty 3.2.2	46
Obr. 25 ozuby 3 s původním rozložením ozubů	48
Obr. 26 ozuby 3 s upraveným rozložením ozubů	48
Obr. 27 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m varianty ozuby 3 s původním a upraveným rozložením ozubů	48
Obr. 28 okótovaný půdorys zdicího prvku rozměrového modulu 2.2.2	56
Obr. 29 schéma skládání zdicích prvků rozměrového modulu 2.2.2	56

Obr. 30 uspořádání prvků ve výřezu 1x1 m rozměrového modulu 2.2.2..... 57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 požadavky na zvukovou izolaci mezi místnostmi v budovách [4].....	16
Tab. 2 průzkum trhu.....	25
Tab. 3 tabulka porovnání vlastností plastů pro 3D tisk [32]	31
Tab. 4 grafické znázornění variant	36
Tab. 5 přehled rozměrů a značení rozměrových modulů zdicích prvků.....	40
Tab. 6 tabulka hmotností prvků a objemových hmotností zdiva rozměrových modulů.....	47
Tab. 7 tabulka spár	47
Tab. 8 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva s vylehčením neupraveným (32 %) a 25 %	49
Tab. 9 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva s vylehčením 20 % a 15 %	50
Tab. 10 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva s vylehčením 10 % a 5 %	50
Tab. 11 hmotnosti, plošné hmotnosti prvků a objemové hmotnosti zdiva bez vylehčení (vylehčení 0 %).....	51
Tab. 12 modulové varianty s různými mírami vylehčení seřazené vzestupně podle plošné hmotnosti prvku s vyloučením prvků nad 21,0 kg (tučně výchozí zdicí prvek).....	52

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 grafické vyhodnocení průzkumu trhu	30
Graf 2 závislost hmotnosti prvku na vylehčení	51
Graf 3 závislost neprůzvučnosti na hmotnosti prvku s hranicí 50,9 dB (neprůzvučnost výchozího zdicího prvku).....	54
Graf 4 zobrazení neprůzvučnosti podle hmotnosti prvku pro prvky s hmotností do 21,0 kg a vylehčením 20 %	54
Graf 5 zobrazení neprůzvučnosti rozměrových modulů podle délky spár pro prvky s hmotností do 21,0 kg a vylehčením 20 %.....	55