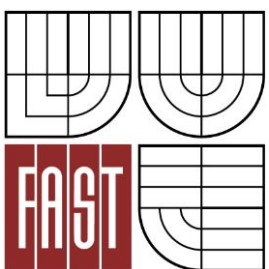




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A  
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

## VÝVOJ POKROČILÝCH ZDICÍCH PRVKŮ PRO NÍZKOENERGETICKÉ A PASIVNÍ STAVBY

DEVELOPMENT OF ADVANCED MASONRY COMPONENTS FOR LOW ENERGY AND  
PASSIVE BUILDINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. JAN KALINA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Jan Kalina
<b>Název</b>	Vývoj pokročilých zděných prvků pro nízkoenergetické a pasivní stavby
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Jiří Zach, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2015
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka,  
CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

### Podklady a literatura

- [1] Pytlík, P, Vlastnosti a užití stavebních výrobků, VUTIUM, Brno 1998
- [2] Matoušek, M., Lehké stavební látky II, SNTL, Praha 1985
- [3] Šťastník, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály, CERM, Brno 2002
- [4] Šťastník, S., Zach, J., Zkoušení izolačních materiálů, CERM, Brno 2002
- [5] SOKOLÁŘ, R. Speciální keramika - cihlářství. Speciální keramika - Cihlářství. Brno: VUT v Brně, 2007.
- [6] Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks, edited by F. Pacheco-Torgal, P.B. Lourenço J.A. Labrincha and S. Kumar P. Chindaprasirt, Woodhead Publishing, Oxford, 2015, ISBN 9781782423058
- [7] Emeritus A.W Hendry, Masonry walls: materials and construction, Construction and Building Materials, Volume 15, Issue 8, December 2001, Pages 323-330, ISSN 0950-0618

### Zásady pro vypracování

Diplomová práce se bude zabývat vývojem zdicích prvků pro obvodové pláště určených pro výstavbu konstrukcí v nízkoenergetickém a pasivním standardu. Bude se jednat o keramické zdicí tvarovky s integrovanou tepelně izolační výplní. V daném případě se bude jednat o tvarovky s velkorozměrovými dutinami. Cílem práce bude vývoj zdicích prvků (návrh tepelně izolační výplně, způsobu aplikace izolantu a technologie výstavby zděné konstrukce) s velmi nízkou ekvivalentní hodnotou součinitele tepelné vodivosti nižší než  $0,08 \text{ [W/(m.K)]}$  ve vysušeném stavu. Dále pak bude snahou vyvinout systém s jednoduchou výstavbou a s dobrými mechanickými vlastnostmi. Preferovány budou suché způsoby výstavby. Výsledky laboratorních měření budou v závěru práce prakticky ověřeny na fragmentech reálných konstrukcí.

### Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

Ing. Jiří Zach, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

**Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou dalšího možného využití PUR pěny ve stavebnictví, především při výstavbě zděných konstrukcí s integrovanou tepelnou izolací u nízkoenergetických a pasivních staveb.

V praktické části diplomové práce je popsána samotná výroba zkušebních vzorků vybraných PUR pěn a zkoušky, které se na vzorcích provedly. Cílem bylo vybrat PUR pěnu s nejlepšími vlastnostmi, která by se hodila jako integrovaná tepelná izolace do zděných konstrukcí. V závěru práce byla vybrána nejlepší pěna. Pomocí této pěny byly zhotoveny fragmenty zdiva, na kterých byly provedeny statické zkoušky.

**Klíčová slova**

PUR pěna, izolační materiály, zdící prvek, nízkoenergetické domy, pasivní domy.

**Abstract**

Diploma thesis deals with issue of another possible application of PUR foam in the building, especially during the construction of the masonry structures with the integrated thermal isolator in the low-energy and the passive buildings.

The practical part shows the production of the test sample of selected PUR foams and the trials that were performed on the samples. The aim of the thesis was choosing of the PUR foam with the best attributes which would be suitable as an integrated thermal isolator into masonry structures. In the conclusion there was chosen the best foam from which the masonry fragments were made. The static tests were performed on these fragments.

**Keywords**

PUR foam, isolation materials, masonry element, low-energy buildings, passive buildings.

### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Jan Kalina *Vývoj pokročilých zdících prvků pro nízkoenergetické a pasivní stavby*. Brno, 2015. 76 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2016

.....  
podpis autora  
Bc. Jan Kalina

### **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D., za vedení, poskytnuté rady a věnovaný čas při zpracování.

## Obsah

1	ÚVOD .....	10
2	TEORETICKÁ ČÁST .....	11
2.1	Energetické požadavky na budovy .....	11
2.1.1	Součinitel prostupu tepla .....	11
2.1.2	Nejnižší vnitřní povrchová teplota.....	12
2.2	Nízkoenergetické a pasivní domy .....	13
2.3	Rozdělení obvodových konstrukcí .....	16
2.4	Dělení zdících prvků .....	16
2.4.1	Pálené zdící prvky .....	16
2.4.2	Vápenopískové zdící prvky.....	18
2.4.3	Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem.....	18
2.4.4	Pórobetonové tvárnice .....	19
2.4.5	Zdící prvky z umělého kamene.....	19
2.4.6	Zdící prvky z přírodního kamene .....	19
2.5	Zdící prvky s integrovanou tepelnou izolací.....	20
2.5.1	Keramické tvarovky s různými druhy tepelně izolačních materiálů.....	21
2.5.2	Ostatní zdící prvky s integrovanou tepelnou izolací .....	25
2.5.3	Způsoby zdění.....	26
2.6	Tepelné izolace.....	28
2.6.1	Tepelné izolace z neobnovitelných zdrojů .....	28
2.6.2	Tepelné izolace z obnovitelných zdrojů.....	34
2.6.3	Souhrn tepelněizolačních materiálů .....	38
3	PRAKTICKÁ ČÁST .....	39
3.1	Metodika řešení .....	39
3.2	Prováděné zkoušky a měření .....	40
3.3	Postup zkoušek .....	40
3.3.1	Stanovení lineárních rozměrů.....	40
3.3.2	Stanovení tloušťky.....	41
3.3.3	Stanovení objemové hmotnosti .....	41
3.3.4	Stanovení pevnosti v tlaku tepelně izolačních výrobků .....	42
3.3.5	Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	44
3.3.6	Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření .....	44



3.3.7	Pevnost v tahu za ohybu .....	45
3.3.8	Počáteční pevnost zdiva ve smyku .....	46
3.3.9	Stanovení tepelných vlastností keramických tvarovek .....	46
3.4	Použité PUR pěny .....	47
3.4.1	Tvorba vzorků z PUR pěn .....	48
3.5	Zkoušky a měření .....	49
3.5.1	Měření lineárních rozměrů, tloušťky a stanovení objemové hmotnosti	49
3.5.2	Stanovení pevnosti v tlaku tepelně izolačních výrobků .....	51
3.5.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	53
3.5.4	Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření .....	55
3.6	Vyhodnocení .....	57
3.7	Způsob aplikace PUR pěny a zdění .....	60
3.8	Zkoušky zdiva vypěněného PUR pěnou .....	60
3.8.1	Stanovení pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve svislé poloze .....	61
3.8.2	Stanovení pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve vodorovné poloze .....	63
3.8.3	Stanovení počáteční pevnosti zdiva ve smyku .....	65
3.8.4	Stanovení tepelných vlastností keramických tvarovek vyplněných PUR pěnou	65
4	ZÁVĚR .....	68
	Použitá literatura .....	71
	Seznam obrázků .....	75
	Seznam grafů .....	76
	Seznam tabulek .....	76
	Seznam zkratk .....	77

## 1 ÚVOD

Diplomová práce pojednává o dalším možném využití PUR pěny v oblasti zdících prvků. Jednak v oblasti výroby zdících prvků tak i v následné výstavbě zdiva.

Posledních několik let je ve stavebnictví zaměřen směr na nízkoenergetické a pasivní stavby, které mají co nejnižší energetické ztráty a jsou velmi příznivé k životnímu prostředí, proto je kladen velký důraz na tepelně izolační vlastnosti zdiva obvodových konstrukcí spojenou s co nejjednodušší výstavbou.

PUR pěna, která byla poprvé vytvořena ve 30. letech 20. století, se už dávno nepoužívá jen v letectví či se nevyrábí jen jako molitan či pěna k zatěsnění spár nebo otvorů. V dnešní době má PUR pěna široký záběr využití především ve stavebnictví. Na trhu můžeme nalézt např. systém Porotherm Dryfix, který umožňuje využití PUR pěny místo zdící malty či lepidel při zdění z broušených cihel. Při použití PUR pěny je možné dosáhnout, jak výborných tepelně izolačních vlastností zděných obvodových konstrukcí, tak i velmi jednoduché výstavby samotné konstrukce.

U samotných keramických tvarovek docházelo u jejich vývoje k vytváření širší tvarovky, aby se zlepšily tepelně izolační vlastnosti. Trendem posledních let je aplikace izolantu do dutin keramických tvarovek. Dutiny zdících prvků i druhy použitých izolantů jsou rozmanité. Můžeme najít materiály izolantů přírodní až po uměle vytvořené člověkem.

Hledání ideálního izolantu, jako integrované tepelné izolace je velmi důležité. PUR pěna, která má velmi nízký součinitel tepelné vodivosti, snadno se dokáže přizpůsobit různým tvarům a vyplnit je, je pro toto využití ideální.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Energetické požadavky na budovy

Navrhování budov souvisí s dodržováním vyhlášek a vládních zákonů, v nichž jsou definovány omezující kritéria pro potřebné množství energie nebo povolené emise škodlivin při spalování paliv.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady – 2010/31/EU, která je v účinnosti od 9. 7. 2010, jedná o energetické náročnosti budov, která je pro většinu členských zemí povinná od roku 2010. V České republice je implementována tato vyhláška v rámci: Zákon 406/2000 Sb. – Zákon o hospodaření s energií ve znění pozdějších předpisů, včetně vyhlášky „O energetické náročnosti budov“ č. 78/2013 Sb. Na tepelnou ochranu budov se vztahují dále mimo požadavků v rámci Zákona 406/2000 také požadavky Vyhlášky 268/2009 ve znění pozdějších předpisů, přičemž oba legislativní předpisy požadují v oblasti tepelné ochrany budov splnění požadavků dle ČSN 73 0540-2.

Podle ČSN 73 0540-2 je pro zajištění prevence před vznikem tepelně technických vad u staveb zapotřebí dodržení tepelně technických požadavků. Dále pak norma ČSN 73 0540-2 definuje požadavky na ochranu zdraví, zdravých životních podmínek, tepelnou pohodu uživatelů a nízkou hodnotu energetické náročnosti. Nadále norma ČSN 73 0540-2 definuje požadavky v oblasti šíření tepla konstrukcí, tepelné stability místnosti, šíření vzduchu konstrukcí a budovou a šíření vlhkosti konstrukcí.

Nejdůležitějšími parametry u šíření tepla zděných konstrukcí je nejnižší vnitřní povrchová teplota a součinitel prostupu tepla [2].

#### 2.1.1 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla se značí  $U$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]. Jedná se o celkovou výměnu tepla v ustáleném stavu mezi dvěma navzájem odlišnými prostředími, které jsou odděleny stavební konstrukcí o daném tepelném odporu  $R$  [2].

$$U = \frac{1}{R}$$

U...součinitel prostupu tepla [W/(m<sup>2</sup>·K)]

R...odpor konstrukce při prostupu tepla [(m<sup>2</sup>·K)/W] [2].

Budovy, které jsou vytápěné a mají navrhovanou relativní vlhkost vnitřního vzduchu  $\varphi_i \leq 60$  %. Tyto budovy musí dle normy ČSN 73 0540-2 mít součinitel prostupu tepla U, který splňuje:

$$U \leq U_N$$

$U_N$  ... vyžadovaná hodnota součinitele prostupu tepla [W/(m<sup>2</sup>·K)] viz tabulka č. 3, která se nachází v normě ČSN 73 0540-2 [2].

### 2.1.2 Nejnižší vnitřní povrchová teplota

Stavební konstrukce a styky mezi stavebními konstrukcemi, kde v prostorách s relativní vlhkostí vnitřního vzduchu jsou menší nebo rovny 60 %, musí při navrhovaných podmínkách v zimním období vykazovat v každém místě teplotní faktor  $f_{RSI}$  [-];[2].

Podle vztahu:

$$f_{RSI} \geq f_{RSI,N}$$

Stanovení teplotního faktoru:

$$f_{RSI} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_{ai} - \theta_e} = 1 - \frac{\theta_{ai} - \theta_{si}}{\theta_{ai} - \theta_e}$$

$$f_{RSI,N} = f_{RSI,cr}$$

kde:

$f_{RSI,cr}$  ... kritický teplotní faktor vnitřního povrchu

$\theta_e$  ..... návrhová teplota vnějšího vzduchu [°C]

$\theta_{si}$  ..... návrhová nejnižší vnitřní povrchová teplota [°C]

$\theta_{ai}$  .....návrhová teplota vnitřního vzduchu [°C].

Místnosti, kde je relativní vlhkost větší než 60 %, musí splňovat požadavky v oblasti vnitřní povrchové teploty, které jsou uvedeny výše. K tomu musí být zajištěn a zabráněn vnik a následný růst plísní jiným způsobem než pomocí uvedené požadované vnitřní povrchové teploty [2].

Rovnice pro kritický teplotní faktor vnitřního povrchu:

$$f_{Rsi,cr} = 1 - \frac{237,3 + 2,1\theta_{ai}}{\theta_{ai} - \theta_{ex}} * \frac{1}{1,1 - \frac{17,269}{\ln\left(\frac{\varphi_{i,r}}{\varphi_{si,cr}}\right)}}$$

kde:

$f_{Rsi,cr}$  ... kritický teplotní faktor vnitřního povrchu [-]

$\theta_{ai}$  ..... návrhová teplota vnitřního vzduchu [°C]

$\theta_{ex}$  ..... návrhová teplota vnějšího vzduchu [°C]

$\varphi_{i,r}$  ..... relativní vlhkost vnitřního vzduchu pro stanovení požadavku na nejnižší povrchovou teplotu konstrukce [%]

$\varphi_{si,cr}$  ... .kritická vnitřní povrchová vlhkost [80 %]

Pozn:  $\varphi_{si,cr}$  neplatí u výplní otvorů [2]

## 2.2 Nízkoenergetické a pasivní domy

Dle ČSN 73 0540-2 čl. A.2.2. se snažíme budovy navrhovat tak, aby zajišťovaly tepelnou ochranu a měly nízkou potřebu tepla na vytápění v souladu s normovými hodnotami. Rozhodujícím parametrem jsou konečné energetické vlastnosti budovy jako celku, za dodržení všech předpisů a požadavků na tepelnou ochranu pro jednotlivé konstrukce nebo celou budovu.

Postupem času má být dosaženo stavu, kdy budou jednotlivé novostavby realizovány jako budovy s nulovou energetickou náročností nebo blízké k takové úrovni. Efektivní cestou k dosažení takových cílů jsou stavební řešení s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění a dalších energetických potřeb (příprava teplé vody, chlazení, elektrická energie pro užívání budovy, elektrické spotřebiče, elektrická energie potřebná k provozu technického zařízení budovy). Mezi další

kroky patří přednostní volba energetických zdrojů s velmi nízkým faktorem energetické přeměny (přepočtení energie na vstupu do budovy na množství energie primární k tomu účelu uvolněné) a dále použití systémů, které produkují energii z obnovitelných zdrojů v jejím bezprostředním okolí nebo v budově a jsou nezávislé na současné potřebě budovy [2].

Pasivní dům je budova, která je energeticky účinná a pohodlná. Pasivní domy umožňují úsporu energie na vytápění a chlazení až o 90 %. Pasivní domy používají méně než 1,5 l oleje nebo 1,5 m<sup>3</sup> plynu k vytopení 1 m<sup>2</sup> obytné plochy za rok, což je podstatně méně než u nízkoenergetických budov.

Pasivní domy efektivně využívají slunce, vnitřní zdroje tepla a rekuperací tepla. V teplejších měsících pasivní domy využívají techniku pasivního chlazení, jakým je například strategické stínování. Pasivní domy jsou oceňovány pro vysokou úroveň pohodlí, které nabízejí. Vnitřní povrchové teploty se odlišují málo od vnitřní teploty vzduchu a to i vzhledem k extrémním venkovním teplotám. Speciální okna a plášť budovy se skládá z vysoce izolované střešní a stropní konstrukce stejně jako z vysoce izolované vnější stěny, jež se snaží udržet požadované teplo uvnitř nebo nežádoucí teplo vně budovy.

Ventilační systém dodává nepřetržitě čerstvý vzduch, což je vynikající pro kvalitu ovzduší bez nepříjemného průvanu. Vysoce účinná rekuperační jednotka umožňuje teplo, které je obsaženo v odpadním vzduchu, aby mohlo být znovu použito [3].

Pasivní dům ročně spotřebuje max. 15 kilowatthodin na 1 m<sup>2</sup> vytápěné plochy. U běžného rodinného domu o podlahové ploše kolem 120 m<sup>2</sup>, to dělá 1800 kilowatthodin. Pro vytopení místnosti o velikosti 20 m<sup>2</sup> postačí 200 wattů, pro porovnání tepelný výkon stolního počítače je 250 wattů a tepelný výkon člověka v klidu je 80 wattů.

Mezivývojovým stupněm vedoucím k pasivnímu domu byly nízkoenergetické domy. Pro dosažení standardu je hraniční hodnota 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a) měrné potřeby tepla na vytápění. Nízkoenergetický dům má v podstatě podobné komponenty jako pasivní dům, ale v menší míře. Nízkoenergetický dům vyžaduje oproti

pasivnímu domu rozsáhlejší otopný systém a větší zdroj tepla. Podle uznávaných standardů musí pasivní domy splňovat několik požadavků:

- **maximální měrná roční potřeba tepla** – na vytápění je 15 kWh/(m<sup>2</sup>·a).
- **celková potřeba primární energie** – celková energie, která má být použita pro všechny domácí systémy (topení, horká voda, domácí elektrické spotřebiče) nesmí překročit 120 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Primární energie je spotřebované množství energie při výrobě daného zdroje. Dává nám celkový pohled na spotřebu podle zvoleného zdroje.
- **neprůvzdušnost obálky budovy n<sub>50</sub>** – využívá se tlaková zkouška, kdy se nesmí překročit hodnota (0,6<sup>-1</sup>/h), při podtlaku nebo přetlaku 50 Pa se za hodinu nesmí netěsnostmi vyměnit více než 60 % vnitřního objemu vzduchu v obálce [4].

Domy běžné v 70. – 80. letech	Současná novostavba	Nízkoenergetický dům	Pasivní dům	Nulový dům, dům s přebytkem tepla
<b>Charakteristika</b>				
zastaralá otopná soustava, zdroj tepla je velkým zdrojem emisí, větrá se pouhým otevřením oken, nezateplené, špatně izolující konstrukce, přetápí se	klasické vytápění pomocí plynového kotle vysokého výkonu, větrání otevřením oken, konstrukce na úrovni požadavků normy	otopná soustava o nižším výkonu, využití obnovitelných zdrojů, dobře zateplené konstrukce, řízené větrání	řízené větrání s rekuperací tepla, vynikající parametry tepelné izolace, velmi těsné konstrukce	parametry min. na úrovni pasivního domu, velká plocha fotovoltaických panelů
<b>Potřeba tepla na vytápění [kWh/(m<sup>2</sup>·a)]</b>				
většinou nad 200	80 - 140	méně než 50	méně než 15	méně než 5

Tabulka č. 1 – Přehled energetické náročnosti budov [4]

## 2.3 Rozdělení obvodových konstrukcí

Obvodové konstrukce lze rozdělit podle různých pohledů. Lze konstrukce např. rozdělit na stěnový systém, kde je nosná konstrukce tvořena stěnami. Pak skeletový systém, kde je nosná konstrukce tvořena tyčovými prvky nebo může být rozdělena na konstrukce prefabrikované, které jsou realizovány na místě. Dalším možným kritériem pro rozdělení stavebních konstrukcí může být použitý stavební materiál. Podle něj můžeme stavby rozdělit na zděné (z pálených cihel, vápenopískových cihel, atd.), panelové z železobetonových nebo dřevěných panelů, monolitické z betonu, ocelové nebo na dřevěné srubové či trámové [1]. Dále se budu zaměřovat pouze na zděné konstrukce.

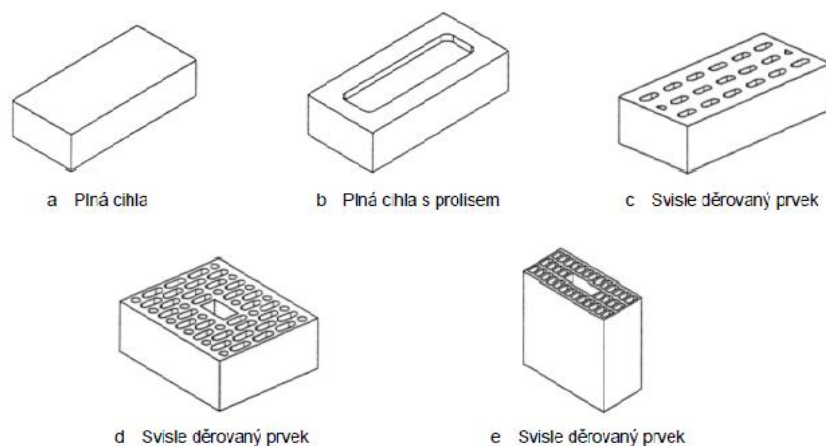
## 2.4 Dělení zdících prvků

### 2.4.1 Pálené zdící prvky

Norma ČSN EN 771-1 Pálené zdící prvky pojednává o produktech cihlářského průmyslu a jejich rozdělení ve stavební konstrukci.

Pálené zdící prvky lze rozdělit na 2 skupiny:

- skupina prvků HD:
  - a) Prvky s objemovou hmotností, která je větší než  $1000 \text{ kg/m}^3$  – používají se v chráněném zdivu
  - b) Ostatní pálené zdící prvky – používají se v nechráněném zdivu [20]

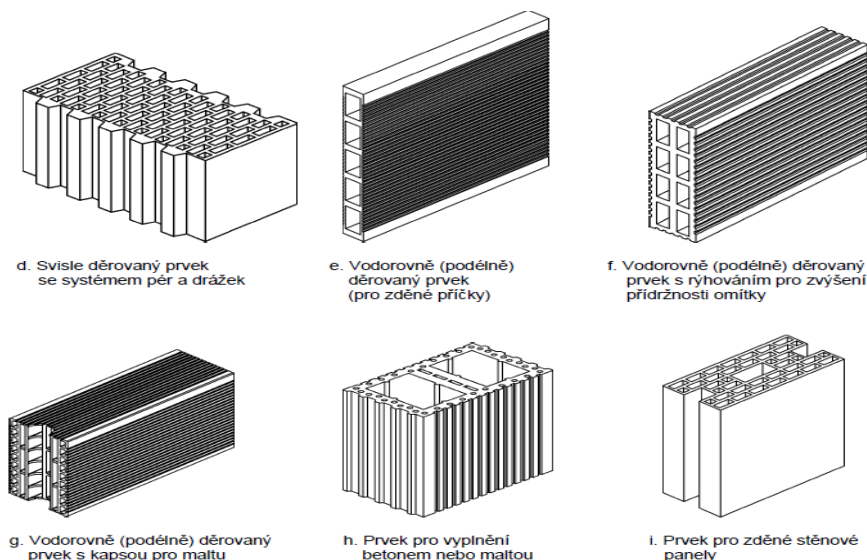


Obrázek č. 1 – Zdící prvky HD [21]



- skupina prvků LD:

Jedná se o prvky s objemovou hmotností, která je menší než  $1000 \text{ kg/m}^3$  – tyto prvky se používají v chráněném zdivu [20].



Obrázek č. 2 – Zdící prvky LD [21]

### Využití pálených zdících prvků

Podle normy ČSN EN 771-1 mají pálené zdící prvky široký způsob využití. Každý způsob využití požaduje, aby byly specifikovány jednotlivé úrovně vlastností pálených zdících prvků. Výčet způsobu využití:

- Obyčejné zdivo:** Jedná se o zdivo použité vně nebo uvnitř budovy, které může být nosné nebo nikoli. Není požadován atraktivní vzhled.
- Omítané zdivo:** Zdivo, které může být použito vně nebo uvnitř budovy. Zdivo bývá opatřeno vnitřní nebo venkovní omítkou.
- Chráněné zdivo:** Zdivo chráněné proti pronikání vody, které je nosné či nikoli. Jedná se o zdivo vnějších stěn, které je ochráněno obkladem, vrstvou omítky nebo to bývá vnitřní stěna nebo vnitřní svislá vrstva dutinové stěny.
- Neomítané (rezné, lícové):** Používá se vně nebo uvnitř budovy, které je nosné či nikoli. Požaduje se u něj atraktivní vzhled. K jeho zdění se používá běžná technologie s úpravou maltových spár, která musí být v souladu s použitými zdícími prvky.

- e) **Zdivo pro inženýrské stavby:** Zdivo používané v inženýrských stavbách např. opěrných zdech, drenážních soustavách apod. Použité zdící prvky mají vysokou úroveň pevnosti v tlaku, trvanlivosti a nízkou úroveň nasákavosti.
- f) **Tepelné izolační zdivo:** Do této skupiny patří zdivo s tepelněizolační funkcí vnější stěny nebo zdivo, které významně přispívá k plnění této funkce. Zdivo je vyrobeno z vysoce děravých pálených zdících prvků, které může být nosné či nikoli.
- g) **Zdivo nosných konstrukcí:** Používá se vně nebo uvnitř budovy. Zdivo bývá namáháno kromě účinků vlastní tíhy i účinky dalších zatížení. Zdivo může být obyčejné, omítané, lícové nebo zdivo pro inženýrské stavby. Zdivo nosných konstrukcí bývá odolné proti účinkům zemětřesení.

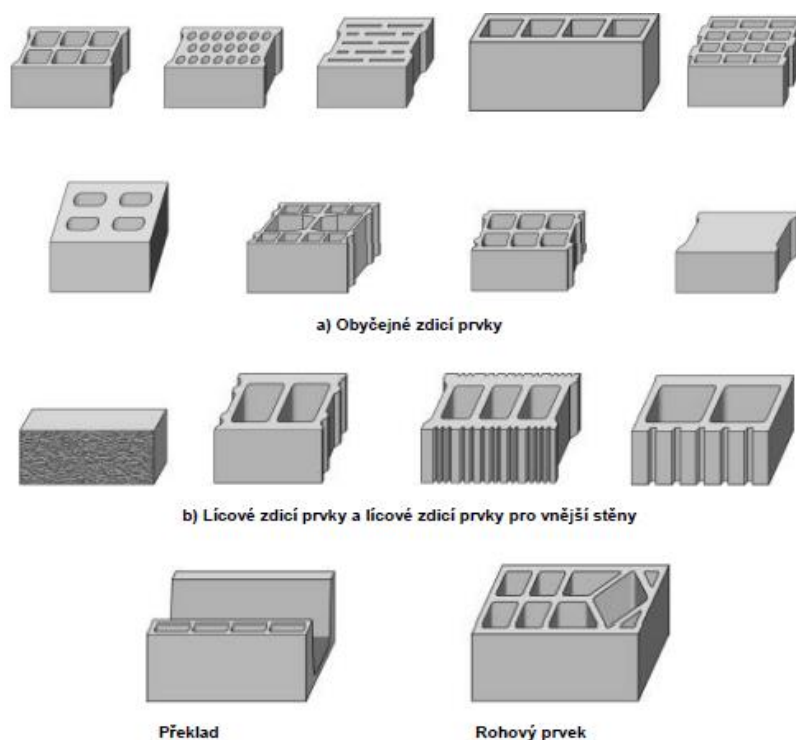
Pálené zdící prvky musí mít dostatečnou odolnost vůči účinkům prostředí, aby se zachovala jejich konstrukční a provozní celistvost budovy [21].

#### 2.4.2 Vápenopískové zdící prvky

Dle ČSN EN 771-2 Vápenopískové zdící prvky se vyrábějí ze směsi přírodních křemičitých materiálů (písků, nedrceného nebo drceného křemičitého šterku nebo horniny či jejich směsi) a vápna. Jednotlivé zdící prvky se vytvrzují vysokotlakou párou. Výroba zdících prvků z jiných směsí křemičitých materiálů je dovolena, pokud tyto materiály nemají negativní dopad na vlastnosti zdících prvků. Výskyt daného materiálu musí být deklarován [22].

#### 2.4.3 Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem

Betonové tvárnice s pórovitým nebo hutným kamenivem se používají pro většinu druhů stěn včetně dutinových, pro příčky, pro vnější vrstvy komínů, podzemní stěny nebo opěrné zdi. Betonové tvárnice mohou být určeny k ochraně proti ohni nebo mohou plnit funkci zvukové či tepelné izolace [20].



Obrázek č. 3 – Příkladů tvarů různých betonových tvárnic [23]

#### 2.4.4 Pórobetonové tvárnice

Podle ČSN EN 771-4 Pórobetonové tvárnice probíhá jejich výroba za použití pojiv, jako je vápno nebo cement, spolu s jemným silikátovým materiálem, vodou a látkou vytvářející póry. Tvárnice jsou vytvrzovány v autoklávech vysokotlakou parou. Nejdříve jsou suroviny společně promíseny a následně nality do forem. Ve formě směs nabyde na objemu a získá tvar desky. V následném procesu je deska nařezána na tvárnice daných rozměrů, které se poté vytvrzují [24].

#### 2.4.5 Zdící prvky z umělého kamene

Zdící prvky z umělého kamene jsou určeny pro nechráněné zdivo nenosných a nosných konstrukcí inženýrských a pozemních staveb nebo jako režné zdivo. Zdivo ze zdících prvků z umělého kamene může zastávat funkci zvukové nebo tepelné izolace nebo může plnit funkci ochrany proti ohni [20].

#### 2.4.6 Zdící prvky z přírodního kamene

Přírodní kámen, který patří mezi přírodní produkty, se získává těžbou v lomech nebo dolech. Kámen se dále upravuje a zpracovává do podoby zdících prvků. Za přírodní kámen považujeme následující materiály:

- a) **Metamorfované horniny:** Vznikly přeměnou hornin za působení tlaku a tepla. Řadí se sem např. rula, mramor, břidlice nebo kvarcit.
- b) **Magmatické horniny:** Vznikly ochlazením a tuhnutím magmatu, např. granit, diorit, čedič a porfyr.
- c) **Sedimentární horniny:** Vznikly usazováním a následným zpevněním anorganických a organických částic. Řadí se sem pískovec, vápenec či travertin [25].

## 2.5 Zdicí prvky s integrovanou tepelnou izolací

Poslední roky se na trhu objevují zdicí prvky se zabudovanou tepelnou izolací. V kapitole bude uveden výčet nejpoužívanějších či nejznámějších zdicích prvků s integrovanou tepelnou izolací.

Zdicí prvky s integrovanou tepelnou izolací jsou známé celkem dlouhou dobu. Ze zdicích prvků vynikají cihelné výrobky z pálené hlíny. U těchto zdicích prvků umožňuje technologie výroby optimalizovat geometrii výrobku tak, aby zdicí prvek dosahoval nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Přidáním izolace do dutin mělo za následek výrazné zvýšení tepelněizolačních vlastností.

Izolační materiál umístěný do dutin cihelných prvků má značný přínos. Jeden z nejdůležitějších je snížení součinitele prostupu tepla  $U$ . To má za důsledek snížení potřeby tepla na vytápění budov [26].

U kombinace děrovaných cihel a integrovaného izolačního materiálu se uplatňují dva postupy. Jedná se o kombinaci:

- pálený cihlářský výrobek s velkým počtem malých dutin, které jsou vyplněny izolačním materiálem
- pálený cihlářský výrobek s malým počtem velkých dutin, které jsou vyplněny izolačním materiálem

V současnosti se jako izolační materiál nejvíce používá minerální vlna ve formě desek, které jsou rozřezány do tvaru velkých dutin či v granulátové formě pro vyplnění malých dutin. Další izolační materiály jsou perlit nebo expandovaný polystyrén. U cihelných výrobků, které jsou plněny expandovaným perlitem nebo

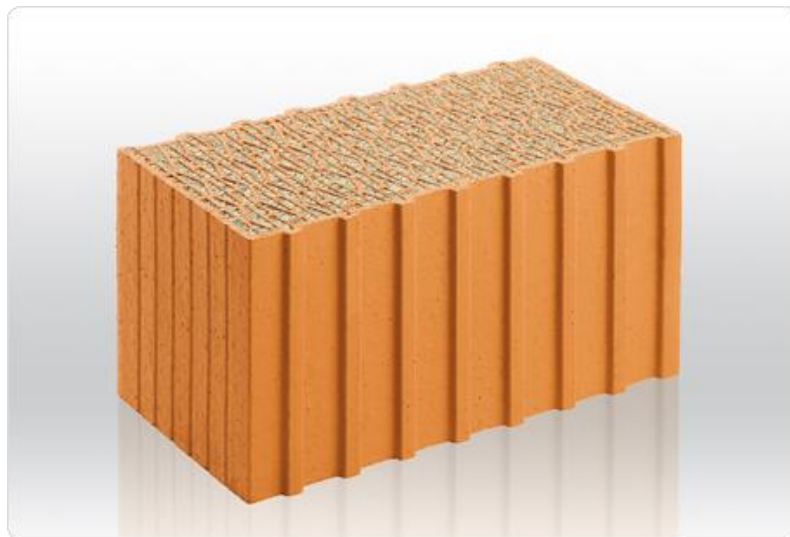
minerální vlnou je výhoda požární odolnosti konstrukce a výborné hodnoty vzduchové neprůzvučnosti [27].

### 2.5.1 Keramické tvarovky s různými druhy tepelně izolačních materiálů



Obrázek č. 4 – Cihelné výrobky s různými druhy integrované tepelné izolace [27]

Jako první bych se rád zmínil o keramické tvarovce CORISO, která má malé dutiny a jsou vyplněny ovčí vlnou. Keramickou tvarovku vyrábí např. německá firma UNIPOR.



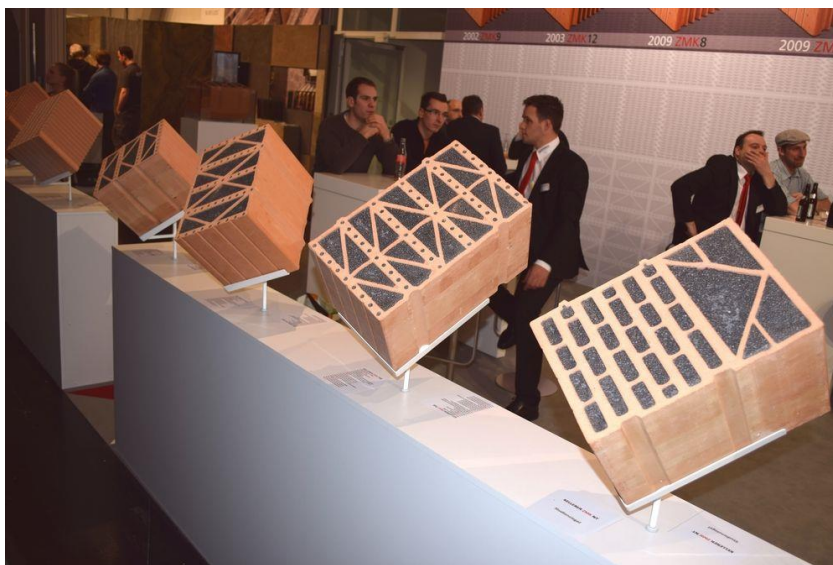
Obrázek č. 5 – Keramická tvarovka s malými dutinami plněné ovčí vlnou [28]

Dále bych se rád zmínil o keramické tvarovce s velkými dutinami, u které je použita jako integrovaná tepelná izolace perlit. Jedná se např. o výrobek Poroton T7-P, který byl představen na Bau Mníchov 2015 [29].



Obrázek č. 6 – Keramická tvarovka plněná perlitem [29]

Začátkem letošního roku byla na stavebním veletrhu Bau Mníchov 2015 představena keramická tvarovka vyplněna šedým polystyrenem od firmy Kellerer Ziegelsysteme. Tato tvarovka má rozdílnou strukturu tepelně izolační výplně a žebér na straně exteriéru a interiéru [29].



Obrázek č. 7 – Keramická tvarovka plněná šedým polystyrenem [29]

V posledních letech asi nejznámější keramickou tvarovkou plněnou integrovanou tepelnou izolací je keramická tvarovka s velkými dutinami, které jsou vyplněny minerální vatou. Tuto keramickou tvarovku vyrábí např. firma Porotherm, kde se jedná o cihly Porotherm T Profi.



Obrázek č. 8 – Keramická tvarovka plněná minerální vatou [30]

Další velmi rozšířená keramická tvarovka s integrovanou tepelnou izolací, kterou tvoří polystyren, vyrábí např. firma Heluz. Jedná se o keramickou tvarovku s malými dutinami vyplněné polystyrenem.



Obrázek č. 9 – Keramická tvarovka plněná polystyrenem [31]



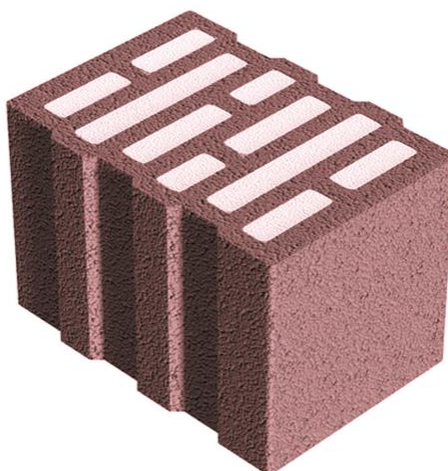
### 2.5.2 Ostatní zdící prvky s integrovanou tepelnou izolací

Jako první bych uvedl tvarovku Durisol, která je vyráběna ze dřevní štěpky (90 % objemu), ke které se přidává voda, cement a další komponenty. Ve tvarovce je použita jako integrovaná tepelná izolace grafitová izolace Neopor o tloušťce 17,5 cm [32].



Obrázek č. 10 – Tvarovka Durisol vyplněna grafitovou izolací [32]

Dále bych se rád zmínil o tvarovce Liapor KSL, kterou vyrábí firma Liapor. Jedná se o tvarovku vyrobenou z lehkého betonu, ve které je použit jako integrovaná tepelná izolace materiál na minerální bázi [33].



Obrázek č. 11 – Tvarovka z lehkého betonu vyplněná materiálem na minerální bázi [33]

Jako poslední bych zmínil betonovou tvarovku, která je plněna Geolyth pěnou. Jedná se o pěnu na minerální bázi. Tato tvarovka je vyráběna v Rakousku [34].



Obrázek č. 12 – Betonová tvarovka vyplněná Geolyth – minerální pěnou [34]

### 2.5.3 Způsoby zdění

Způsoby zdění můžeme rozdělit na několik skupin. Jednotlivé druhy zdění se liší:

- spojovacím materiálem (malta, kladení na sucho)
- druhem zdících prvků (přírodní nebo umělý materiál)

Dále se zaměřím na způsoby zdění z broušených keramických tvarovek.

#### 2.5.3.1 Zdění na tenkou spáru

Od druhé vrstvy broušených keramických tvarovek se zdí pomocí malty pro tenké spáry. Dodává se speciálně s keramickými tvarovkami. Malta se nanáší pouze na žebra keramických tvarovek. Nanášení se provádí dvěma způsoby [35]:

- a) malta se nanáší pomocí nanášecího válce
- b) keramická tvarovka se namáčí do malty



Obrázek č. 13 – Malta nanášená pomocí nanášecího válce [36]

### 2.5.3.2 Zdění na celoplošnou tenkou spáru

Malta určená pro celoplošnou tenkou spáru je nanášena ve vrstvě cca 3 mm. Malta tím lépe dokáže vyrovnat nerovnosti mezi jednotlivými keramickými tvarovkami. Následně je keramická tvarovka uložena do lože a stlačena. Tím je dosažena konečná tloušťka malty mezi jednotlivými keramickými tvarovkami 1 mm.

Malta se nanáší pomocí nanášecího válce podobnému válci, který se používá k nanášení malty předchozím způsobem. Dosahuje se až o 30 % vyšších pevností v tlaku zdiva při použití této malty [35]

### 2.5.3.3 Zdění na PUR pěnu

Jedná se o zdění keramických broušených tvarovek bez použití malty, která je nahrazena polyuretanovou pěnou např. metoda DRYFIX. Touto metodou lze zdit i v zimním období do teploty  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tepelné mosty, které vznikají v ložných spárách, jsou díky této metodě eliminovány. Po 20 minutách lze u zdiva prokázat velmi pevné slepení a dochází k vysokým pevnostem [37].



Obrázek č. 14 – Zdění na PUR pěnu [37]

## 2.6 Tepelné izolace

U pasivních a nízkoenergetických domů mají rozhodující podíl v objemu zabudovaného materiálu tepelné izolace. Jednotlivé druhy tepelné izolace se často od sebe odlišují jen jiným číselným označením, ale diametrálně odlišný může být jejich povolený způsob aplikace.

Když sestavíme základní parametry ideální tepelné izolace, dopracujeme se k materiálu, který má vysokou specifickou tepelnou kapacitu, nízkou tepelnou vodivost a vysokou hustotu. Tepelná izolace se může dělit podle několika způsobů. Jedním z nich je rozdělení izolace z neobnovitelných (nejčastěji anorganických) a obnovitelných (organických) zdrojů. Většina výrobků se zároveň využívá jako izolace proti hluku (izolace akustické).

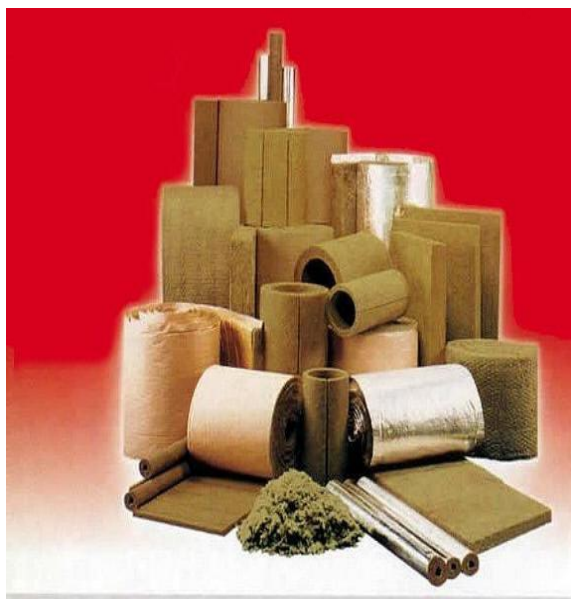
### 2.6.1 Tepelné izolace z neobnovitelných zdrojů

Mezi tepelné izolace z neobnovitelných zdrojů se řadí polystyren, minerální vlna, skelná vata, PUR pěny a pěnové sklo. Málokdy se můžeme setkat s výrobky například z pěnového polyetylénu nebo z fenolické pěny [5].

### 2.6.1.1 Minerální vlna

Je tradiční a nejrozšířenější tepelná izolace. K jeho výrobě se jako surovina používá čedič, diabas, brikety z recyklované kamenné vlny. Následně se rozemletá směs taví při teplotě okolo 1600 °C. Roztavená hmota prochází rozvláknovací částí, kde jsou vytvořeny vlákna. Na vlákna se rozprašují drobné kapičky pojiva, které na vláknech vytváří tenký film. Z koksové kotelny je přiváděn pod tlakem horký vzduch o teplotě cca 600 °C do tvrdící komory, kde dochází k vytvrzování pojiva. Pojivo je složeno ze škrobu s příměsí formaldehydu. Poté následuje formátovací linka, kde dochází k řezání desek dle požadovaných rozměrů.

Hmotnost izolovaných desek ovlivňuje počet ukládaných vrstev. Každý výrobek má svojí specifickou recepturu. Maximální dosahovaná tloušťka desek je 330 mm. Určené výrobky jsou baleny do balíků ve formě rolí, desek či rohoží s ochranným polyetylenovým obalem [5].



Obrázek č. 15 – Minerální vlna [6]

Formátování na stavbě se provádí pomocí běžné pily. Vlna je nasákavá, proto u výrobce dochází k hydrofobizaci výrobku. Tato aplikace má pouze krátkodobý účinek. Vlna je schopná za 24 hodin přijmout až 1 kg vody na 1 m<sup>2</sup>. Oproti tomu je minerální vlna difuzně otevřený materiál (materiál dýchá), jehož využití je ideální pro moderní dřevostavby. Minerální vlna je nehořlavá. Dříve se malí hlodavci

minerální vlně vyhýbali, ale v současnosti se jejich zmutování potomci rádi zabydlují ve vrstvách izolace. Proto je nutné konstrukci důkladně chránit.

Hlavní dodavatelé na českém trhu jsou společnosti Isover, Knauf a Rockwool. Výroba minerální vlny spotřebovává velké množství energie. Podobným procesem se vyrábí i skelná vata [5].

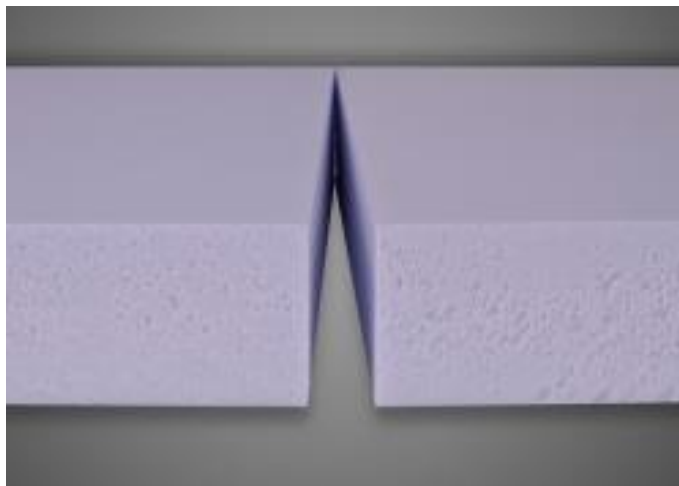
### 2.6.1.2 Polystyren

Polystyren můžeme rozdělit na pěnové (expandované) značené jako EPS a extrudované (vytlačované) polystyreny značené jako XPS. Oba tyto druhy mají stejnou vstupní surovinu, což je granulát polystyrenu. Odlišnost najdeme pouze mezi doplňkovými surovinami a rozdílnou technologií výroby. Známou kuličkovou strukturou se vyznačuje pěnový polystyren, kdežto extrudovaný polystyren uzavřenou homogenní strukturou.

Zápornou vlastností obou druhů polystyrenů je nízká odolnost vůči UV záření. Polystyren narušují ředidla a organická rozpouštědla nebo ropné produkty. Mají obdobné tepelně technické vlastnosti. Polystyren XPS má oproti polystyrenu EPS minimální nasákavost a vyšší pevnost v tlaku.

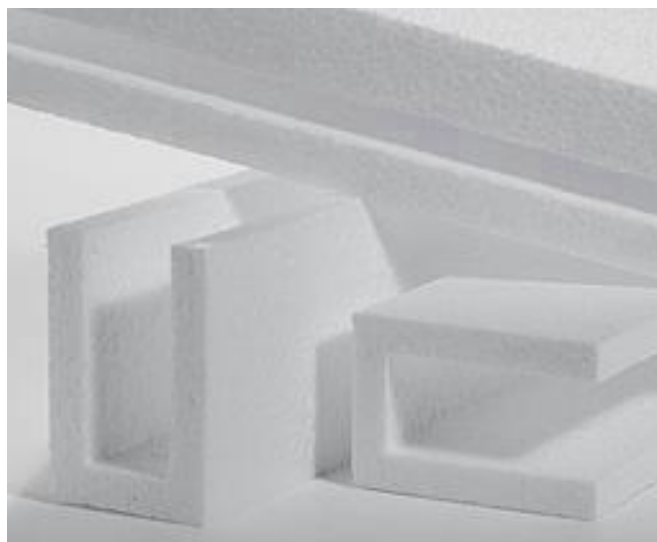
Extrudovaný polystyren je jedna z mála ekonomicky dostupných tepelných izolací, kterou můžeme dlouhodobě vystavit vlhkosti např. konstrukce střech. Avšak nesmí být trvale ponořen ve vodě. Polystyren je difuzně uzavřená tepelná izolace.

Historie vzniku extrudovaného polystyrenu sahá do roku 1940, kdy byl vyvinut pro americkou armádu. Na výrobní linku jsou dávkovány granule s příměsí doplňkových barviv a přísad. Jedna z nejdůležitějších přísad je zpomalovač hoření. Sypká směs se promísí a taví v extrudéru. V závěru extrudéru je směs napěňována hnacím plynem CO<sub>2</sub>. Vzniká tak pěnová hmota XPS, která se částečně ochladí a vytlačí na pás. Zde je kalibračními válci tvarována. Pomocí tažných válců dostává hmota tvar nekonečné desky. Ta se do určité podoby řeže a formátuje [5].



Obrázek č. 16 – Extrudovaný polystyren [7]

U pěnového polystyrenu EPS dochází k vypěňování pomocí sycené páry do forem. Nedílnou součástí je přidání retardéru hoření, aby se zajistila samozhášivost materiálu. Charakteristické zbarvení pro XPS je pastelový odstín světlé modré, fialové, zelené, růžové nebo žluté barvy. Tímto zbarvením se odlišuje na první pohled od běžného pěnového polystyrenu, který má bílou barvu. Desky dosahují maximální tloušťky 200 mm a jsou značeny potiskem nebo prolisy [5].



Obrázek č. 17 – Pěnový polystyren [9]

Extrudovaný polystyren odolává teplotám do 75 °C, oproti tomu pěnový polystyren odolává teplotám až do 85 °C. Objemová hmotnost extrudovaného polystyrenu je 25 – 45 kg/m<sup>3</sup> a pěnového polystyrenu 15 – 35 kg/m<sup>3</sup>. Formátování

je stejné jako u minerální vlny pomocí pily. Mezi nejznámější výrobce polystyrenu patří Novopol, Bachtl, Rigips nebo Styrotrade [5].



Obrázek č. 18 – Porovnání extrudovaného a pěnového polystyrenu [8]

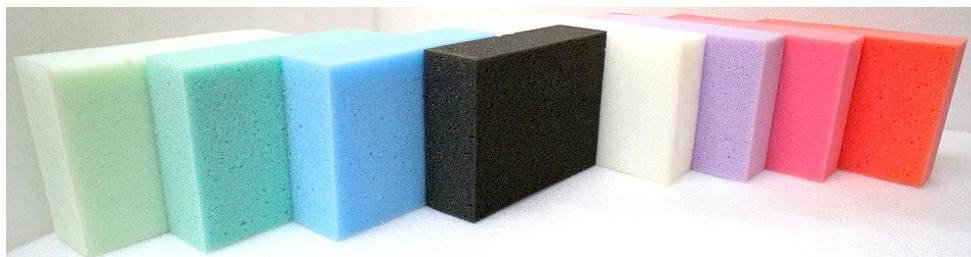
### 2.6.1.3 PUR, PIR a fenolická pěna

- **Fenolická pěna** – je vyráběna napěňováním fenolformaldehydových pryskyřic do bloků. Tyto bloky se řežou na desky a opatřují se oboustranně reflexní hliníkovou folií nebo skelným vláknem. Využívá se pro zateplení fasád. Oproti PUR a PIR materiálům má fenolická pěna lepší tepelně izolační vlastnosti i reakci na oheň. Fenolická pěna se řídí podle harmonizované normy ČSN EN 13166 ed. 2: Tepelně izolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z fenolické pěny (PF) [14].
- **PUR pěna** – k výrobě polyuretanu dal teoretický základ v roce 1937 Otto Bayer. Význam polyuretanů stoupl, když se zjistilo, že je lze vyrábět v různých tvarech – tzv. hmoty šité na míru [15].

Polyuretanová pěna se dělí na dva druhy: tvrdá a měkká. Měkká pěna je široce známá jako molitan. Pro stavebnictví se používá tvrdá polyuretanová pěna – její zkrácené označení je PUR pěna. Má široké uplatnění např. jako výplň v detailech konstrukcí nebo izolace spár atd. Pěnu lze aplikovat litím nebo nástřikem. Pěna se dokáže přizpůsobit i složitým tvarům povrchů, jelikož na povrchu ulpívá. Pro polyuretanovou pěnu platí normalizovaná norma ČSN EN 14315: Tepelně izolační výrobky pro budovy – Výrobky ze stříkané tvrdé polyurethanové (PUR) a polyisokyanurátové (PIR) pěny [14]. Poslední zveřejněné studie z Ceresana prognózují, že bude celosvětová



poptávka po PUR pění nadále stoupat během příštích několika let. Mezinárodní institut pro výzkum trhu předpovídá vzrůst globální poptávky po PUR pění v průměru o 4,5 % ročně [16].



Obrázek č. 19 – Molitan – měkká polyuretanová pěna [17]

- **Polyisokyanurátová pěna PIR** – vytváří se kombinací isokyanurátových a uretanových vazeb. Materiál je velmi obdobný polyuretanu, ale PIR má menší tepelnou vodivost, ale vyšší pevnost v tlaku (PIR 170 kPa, PUR 100 kPa). Aplikace se provádí litím či stříkáním do dutin nebo na povrch. O polyisokyanurátové pění pojednává stejná harmonizovaná norma jako pro PUR pěnu [14].
- **PUR a PIR desky** – polyisokyanurátová i polyuretanová pěna se kromě stříkání a lití používá i pro výrobu desek. Desky se využívají pro izolaci stěn, podlah a střech. Dané výrobky se posuzují podle harmonizované normy  
ČSN EN 13165 ed. 2: Tepelněizolační výrobky pro budovy – Průmyslově vyráběné výrobky z tvrdé polyurethanové pěny (PU).

#### 2.6.1.4 Pěnové sklo

Vznik pěnového skla se datuje do šedesátých let minulého století. Jedno z možných složení je písek, recyklované sklo, vápno, dolomit a stopové množství uhlíku. Směs se umístí do ocelových forem a v pecích se zahřeje na cca 1000 °C. Vlivem oxidace uhlíku, který se přemění na CO<sub>2</sub>, má za následek napěnění směsi a po ochlazení se vytvoří uzavřená „bublínková“ struktura s tenkými stěnami.

Pěnové sklo je tvarově stálé, nehořlavé, vodotěsné, parotěsné, odolné vůči biologickému napadení, kyselinám a šetrné k životnímu prostředí. Pěnové sklo má velkou životnost, avšak je citlivé na mráz. Vzniklý ledový vodní film dokáže

způsobit rozpad skleněných buněk. Může se dodávat např. v černých deskách nebo cihlách. Formátovat ho lze pomocí běžné pily. Je velmi křehké. Musí se dávat pozor na otláčení hran.

Jeho použití v energeticky úsporných stavbách nejčastěji najdeme mezi vrchní zděnou stavbou a základy domu, kde slouží k přerušení tepelného mostu. Pěnové sklo se spojuje pomocí malty, ideálně asfaltovou zálivkou, která zajišťuje požadovanou vzduchotěsnost vrstvy. Pěnové sklo se vyrábí v různých třídách únosnosti.

Můžeme se setkat s formou granulovaného kameniva, které je z úlomků pěnového skla. Používá se jako tepelná izolace v podsypu spodní stavby. Jedno z nejčastějších označení je např. Technopor. Vrstva pěnového skla se důsledně chrání před zvodněním použitím drenáží [5].



Obrázek č. 20 – Granulované pěnové sklo [10]

### 2.6.2 Tepelné izolace z obnovitelných zdrojů

V současné době jsou tepelné izolace na bázi obnovitelných zdrojů zastoupeny celulórou, ovčí vlnou, dřevovláknitými izolacemi a tepelnými izolacemi ze zemědělsky pěstovaných rostlin (len, průmyslové konopí, sláma, korek, kokos a rákos).

V minulosti se na našem území jako tepelná izolace nejčastěji používala: sláma, seno nebo lišejníky. Těmito izolacím byla přizpůsobena koncepce staveb, kde výše zmíněné materiály byly obvykle využity v chladném období jako výplň v podkroví. Jsou zaznamenány i vycpávky spár mechem u roubených staveb.

Tyto materiály jsou vedlejším produktem, mají minimální emise CO<sub>2</sub> a hlavně se jedná o účelné hospodaření s odpady. Obvykle jsou pro vodní páry propustné a dokáží nahromadit limitované množství vzdušné vlhkosti, které následně postupně uvolňují v suchém období. Dále mají zvukově izolační vlastnosti. Nevýhodou těchto materiálů je jejich rychlá degradace (biologická koroze), pokud jsou dlouhodobě vystaveny ve vlhkém prostředí [5].

### 2.6.2.1 Dřevovláknité izolace

Jedná se o izolant z obnovitelných zdrojů (dřevité hmoty), který se vyrábí průmyslově. Výroba probíhá rozvlákněním borového nebo smrkového dřeva, touto cestou se vyrábí měkké nebo tepelně izolační desky. Postup výroby můžeme rozdělit na suchý a mokrý.

Mokrý postup probíhá: vláknitá směs s přísadami je přiváděna k odvodňovacímu zařízení, kde dochází k přeměně na vlhký vláknitý koberec. Následně dojde k přidání hydrofobizačních přísad (přírodní pryskyřice, parafin nebo bitumen). Po odvodnění je koberec formátován na desky a zavezen do sušárny, kde se upravuje jeho vlhkost.

U suchého výrobního procesu se vysuší dřevitá směs a přidají se přísady (jako u mokrého procesu, navíc se přidává vodní sklo, latex nebo boráty). Vláknitý koberec je aktivován horkým vzduchem, poté ochlazen a naformátován. Desky se vyrábí o tloušťce 6 – 100 mm. Využívají se jako tepelné izolace, zvukové izolace, větrové zábrany nebo difuzně otevřené dřevovláknité desky. Spojují se na pero a drážku nebo na tupý sraz. Ukotvení je za pomoci kotev, sponek či lepením.

Dřevovláknité izolace mají srovnatelné tepelně izolační vlastnosti jako u tradičních izolačních materiálů. Avšak disponují třikrát vyšší tepelnou akumulací, která je blízká masivnímu dřevu. Tato vlastnost se projevuje obzvláště v horkém období, kdy se pozitivně projevuje velmi příjemným klimatem interiéru a je schopná naakumulované teplo předat do interiéru s časovým posunem 10 – 12 h.

Výrobky jsou zdravotně nezávadné, paropropustné s dobrou akumulací vlhkosti a následnou schopností předávání vlhkosti exteriéru jako součást difuzně otevřených konstrukčních systémů. Slouží jako přirozený pohlcovač hluku díky elastickým vláknům izolačních desek [5].



Obrázek č. 21 – Desky z dřevovláknité izolace [11]

### 2.6.2.2 Izolace z celulózy

Izolace z celulózy se vyrábí ze starého papíru pomocí rozvlákňovací turbíny o výkonu 5 – 7 t/h. Ke zvýšení odolnosti vůči plísním, škůdcům a hnilobám, nebo ke zvýšení odolnosti proti ohni se do směsi vláken přidává borax nebo kyselina boritá. Ustálená vlhkost použité izolace ve stavbách je okolo 10 %. Je i možné probarvování hmoty. Objemová hmotnost může dosahovat až  $130 \text{ kg/m}^3$ . Podobně jako u dřevěného masivu má i celulóza dobrou tepelnou akumulaci. Mezi pozitivní vlastnosti se dále řadí schopnost vázání vzdušné vlhkosti, což se pozitivně projevuje v suchém období, kdy izolace uvolňuje vlhkost do vnitřního prostředí stavby a tím zlepšuje jeho životní pohodu [5].

### 2.6.2.3 Izolace ze zemědělsky pěstovaných rostlin

- **slaměné balíky** – sláma vzniká při sklizni obilí jako vedlejší produkt. V balících je sláma slisovaná a fixovaná provázky či dráty. Takto slisovaná sláma neposkytuje žádný prostor pro hlodavce a navíc špatně hoří. V slisovaném stavu se její objemová hmotnost pohybuje okolo  $130 - 150 \text{ kg/m}^3$ . Balíky slámy je potřeba chránit před vlhkostí [5].



Obrázek č. 22 – Panely ze slaměné izolace [12]

- **technické konopí** – pěstuje se na polích, vyžaduje minimální péči a roste rychleji než dřevo. Po sklizni se rostlina vysuší a zbaví listů, následně se na lince vytřásá, rozvlákňuje, rovná, třídí, sešívá a vrství do konečné podoby. Konopná vlákna nenapadají žádní škůdci jako je hmyz či moly, jelikož vlákna neobsahují žádné bílkoviny. Výrobky se formují jako tepelně izolační desky a rohože. Je zdravotně nezávadný, protože neobsahuje žádné škodlivé láky, nedráždí dýchací ústrojí ani kůži a nevyvolává alergické reakce. Objemová hmotnost konopí se pohybuje okolo  $50 \text{ kg/m}^3$ . V České republice se vyrábí např. v Hodoníně a Kácově.



Obrázek č. 23 – Izolace z technického konopí [13]

### 2.6.3 Souhrn tepelněizolačních materiálů

V tabulce viz níže je uveden výčet tepelněizolačních materiálů, jejich objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti. Z tabulky lze vyčíst, že nejnižšího součinitele tepelné vodivosti dosahuje PUR pěna. To byl hlavní důvod zvolení PUR pěny pro použití jako integrované tepelné izolace pro praktickou část diplomové práce.

<b>Materiál</b>	<b>Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]</b>	<b>Objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</b>
Minerální vlna	0,033 – 0,050	25 - 200
Polystyren	0,030 – 0,044	10 - 40
PUR pěna	0,026 – 0,048	20 - 100
Pěnové sklo	0,038 – 0,075	110 – 250
Dřevovláknitá izolace	0,038 – 0,043	250
Mineralizovaná izolace	0,038 – 0,042	30 – 60
Sláma	0,050	90 – 135
Technické konopí	0,038 – 0,050	25 - 120

Tabulka č. 2 – Přehled tepelněizolačních materiálů a jejich vlastností [18,19]

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Pro praktickou část bylo zapotřebí vybrat vhodný izolant jako integrovanou tepelnou izolaci, který by dosahoval nejnižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti. V závěru teoretické části byla vytvořena přehledná tabulka izolantů, ze které vyplynul jako ideální izolant PUR pěna.

Po vybrání vhodného izolantu byl proveden průzkum trhu a vybrány vhodné druhy PUR pěn s ohledem na moji bakalářskou práci, na kterou diplomová práce navazuje. Vybrány byly PUR pěny, které nebyly dříve zkoušeny.

Na samotných vybraných PUR pěnách se provedly zkoušky a měření. Poté se vyhodnotily výsledky měření pomocí kvantitativního párového srovnání a vybrala se nejvhodnější PUR pěna. Její pomocí se vyzdily bloky, které se dále zkoušely na statickou odolnost.

#### 3.1 Metodika řešení

Praktická část diplomové práce byla rozdělena do několika částí:

- V první části byl proveden výběr PUR pěn veřejně dostupných na trhu v ČR, které by bylo možné uplatnit při výstavbě tepelně izolačního zdiva. Následně byly z vybraných PUR pěn vyrobeny zkušební vzorky. Zkušební vzorky se vyráběly do speciálně upravených trojforem, kde každá forma měla rozměry 200x200x38 mm. PUR pěna byla aplikována do trojformy a nechala se vytvrdnout. Poté byla přebytečná PUR pěna odřezána a vzorky byly vyjmuty z trojformy a označeny.
- Ve druhé části diplomové práce se stanovovaly na vzorcích PUR pěn základní fyzikální, mechanické a tepelně izolační vlastnosti. Po stanovení všech vlastností u všech vybraných druhů PUR pěn následovalo vyhodnocení, přičemž byla na základě multikriteriálního srovnání vybrána nejvhodnější pěna, která byla dále využita pro praktické ověření mechanických vlastností fragmentů zděných konstrukcí.
- Ve třetí části byly z velkoduťinových keramických tvarovek Porotherm 38T a vybrané PUR pěny sestaveny fragmenty konstrukcí a byly na nich stanoveny mechanické vlastnosti (počáteční pevnosti ve smyku a pevnosti

v tahu za ohybu). Dále bylo pro vybraný typ zdiva a vybranou PUR pěnu výpočtově provedeno stanovení tepelných vlastností.

### 3.2 Prováděné zkoušky a měření

Po aplikaci PUR pěn do trojforem, které byly následně odformovány, byly na zhotovených vzorcích provedeny následující zkoušky a měření:

- stanovení lineárních rozměrů dle ČSN EN 12085 (viz kapitola 3.3.1)
- stanovení tloušťky dle ČSN EN 823 (viz kapitola 3.3.2)
- stanovení objemové hmotnosti ČSN EN 1602 (viz kapitola 3.3.3)
- stanovení pevnosti v tlaku tepelně izolačních materiálů při 10% deformaci dle ČSN EN 826 (viz kapitola 3.3.4)
- stanovení součinitele tepelné vodivosti v souladu s ČSN EN 12667, dle ČSN 72 7012-3 a ISO 8301 (viz kapitola 3.3.5)
- stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření vzorků podle 12087 (viz kapitola 3.3.6)

Následně byly sestaveny fragmenty zdiva z keramických tvarovek Porotherm 38 T a vybrané PUR pěny v souladu s požadavky ČSN EN 1052-2 a ČSN 1052-3, na kterých byly provedeny následující zkoušky.

- pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 1052-2 (viz kapitola 3.3.7)
- počáteční pevnost zdiva ve smyku podle ČSN EN 1052-3 (viz kapitola 3.3.8).

Pro vybrané zdivo z tvarovek Porotherm 38 T vyplněných vybranou PUR pěnou bylo provedeno stanovení tepelných vlastností v souladu s ČSN EN 1745 (viz kapitola 3.3.9)

### 3.3 Postup zkoušek

#### 3.3.1 Stanovení lineárních rozměrů

Stanovení lineárních rozměrů vzorků bylo provedeno podle normy ČSN EN 12085: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení lineárních rozměrů zkušebních těles [38].

Stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků probíhalo pomocí posuvného měřidla, které dosahovalo požadovaného stupně přesnosti. Posuvné měřidlo se



příkládalo ke zkušebním vzorkům dotykovými plochami, nedošlo k nepřesnostem měření ve formě deformování povrchu zkoušených vzorků.

### 3.3.2 Stanovení tloušťky

Stanovení tloušťky zkušebních vzorků bylo provedeno podle normy ČSN EN 823: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky [39]. Průběh zkoušky spočívá ve změření vzdálenosti mezi referenčním, rovinným a tvrdým povrchem, na který se umístil zkušební vzorek s přítlačnou deskou. Přítlačná deska volně spočívá na horním povrchu zkušebního tělesa.

Zkušební těleso se položilo na základní desku, aby mohla být měřená plocha v dotyku se základní deskou. Následně se přítlačná deska umístila na horní povrch zkušebního vzorku při vyvinutí celkového tlaku  $250 \pm 5$  Pa nebo  $50 \pm 1,5$  Pa. Naměřená tloušťka zkušebního tělesa byla v milimetrech.

### 3.3.3 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno podle normy ČSN EN 1602: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení objemové hmotnosti [40]. Po naměření lineárních rozměrů zkušebních těles (viz kapitola 3.3.1 a tloušťky viz kapitola 3.3.2) se zjistila hmotnost zkušebních těles. Všechny tyto hodnoty se dosadili do vzorce určeného pro výpočet objemové hmotnosti  $\rho_v$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Podle vzorce se objemová hmotnost stanoví jako podíl hmotnosti a objemu zkušebního tělesa:

$$\rho_v = \frac{m}{V}$$

kde:

$\rho_v$  ... objemová hmotnost zkušebního vzorku [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V$  ... objem zkušebního vzorku [ $\text{m}^3$ ]

$m$  ... hmotnost zkušebního vzorku [kg] [40].

### 3.3.4 Stanovení pevnosti v tlaku tepelně izolačních výrobků

Stanovení pevnosti v tlaku tepelně izolačních výrobků bylo provedeno podle normy ČSN EN 826: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Zkouška tlakem [41]. Na zkušební vzorek ve tvaru kvádrů působila tlaková síla danou rychlostí kolmo na větší rovnoběžné povrchy pravoúhlého zkušební vzorku. Po ukončení zkoušky se stanovila maximální síla, kterou přenesl zkušební vzorek. Pokud maximální hodnota síly odpovídala deformaci, která je menší než 10 %, byla síla označena jako pevnost v tlaku. Poté se udávala příslušná deformace. Když nebylo zjištěno žádné porušení vzorku před dosažením 10% deformace, mohlo se vypočítat napětí v tlaku při 10% deformaci. Výsledná hodnota se označila jako napětí v tlaku při 10% deformaci.

Plochy zkušební tělesa, které byly tlačeny, se umístily centricky mezi rovnoběžné desky zatěžovacího stroje. Na začátku se zkušební těleso zatížilo počátečním tlakem  $250 \pm 10$  Pa. Zkušební lis stlačuje pohyblivé desky zatěžovacího stroje konstantní rychlostí, která je 0,1 d za minutu, kde d znamená tloušťku vzorku v milimetrech. Zatěžování pokračovalo až do dosažení meze tečení. Tím byla stanovena pevnost v tlaku. Docílilo se poměrného stlačení 10 %, tím pádem se následně mohlo určit napětí v tlaku při 10% deformaci.

Modul pružnosti v tlaku E [kPa] se určil podle vzorce:

$$E = \sigma_e \frac{d_0}{X_e}$$

s

$$\sigma_e = \frac{10^3 * F_e}{A_0}$$

kde:

E ... modul pružnosti v tlaku [kPa]

$X_e$  ... přetvoření při síle  $F_e$  [mm]

$F_e$  ... síla na konci zóny smluvní elastické deformace [mm]

$A_0$  ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm<sup>2</sup>] [41].

Poměrné stlačení  $\varepsilon_m$  v procentech se stanovilo dle:

$$\varepsilon_m = \left( \frac{X_m}{d_0} \right) * 100$$

kde:

$\varepsilon_m$  ... poměrné stlačení [%]

$d_0$  ... počáteční tloušťka zkušební vzorku [mm]

$X_m$  ... přetvoření deformace při maximální síle [mm] [41].

Pevnost v tlaku  $\sigma_m$  [kPa] vyjádříme dle vztahu:

$$\sigma_m = \frac{10^3 * F_m}{A_0}$$

kde:

$\sigma_m$  ... pevnost v tlaku [kPa]

$A_0$  ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm<sup>2</sup>]

$F_m$  ... největší síla [N] [41].

Napětí při 10% deformaci  $\sigma_{10}$  [kPa] se určilo dle:

$$\sigma_{10} = \frac{10^3 * F_{10}}{A_0}$$

kde:

$\sigma_{10}$  ... napětí při 10% deformaci [kPa]

$A_0$  ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm<sup>2</sup>]

$F_{10}$  ... síla odpovídající 10 % poměrného stlačení [N] [41].

### 3.3.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

V souladu s normou ČSN EN 12667: „Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku – Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu“, bylo provedeno měření na zkušebních vzorcích o rozměrech 200x200 mm v ustáleném stavu metodou desky dle ČSN 72 7012-3 a ISO 8301 (metoda měřidla tepelného toku) [42].

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na vzorcích kondiciovaných za standardních laboratorních podmínek při teplotě +23 °C a relativní vlhkosti 50 %. Měření byla provedena při střední teplotě +10 °C a teplotním spádu 10 K na přístroji Lasercomp FOX 200.

### 3.3.6 Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření

Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření bylo provedeno podle normy ČSN EN 12087: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření [43].

Při měření dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření byla použita metoda 2. Vzorek se kompletně ponořil do vody po dobu 28 dnů a změnila se změna hmotnosti zkušební vzorku.

Nejprve se stanovila počáteční hmotnost zkušební vzorku  $m_0$  zvážením na vahách s přesností na 0,1 g. Následně se zkušební vzorek uložil do nádoby s vodou a zatížil, aby po přidání vody zůstal vzorek celý ponořený ve vodě. Poté se dolila voda do nádoby nad horní povrch zkušební tělesa, aby výška hladiny byla

(50 ± 2) mm nad povrchem zkušební tělesa.

Zkušební vzorek byl vyjmut z nádoby po 28 dnech a nechal se okapat po dobu (10 ± 0,5) min. Vyjmutý a okapaný zkušební vzorek se zvážil a stanovila se hmotnost  $m_{28}$ . Po zvážení vzorku se vypočítala dlouhodobá nasákavost z níže uvedeného vzorce a výsledek se zaokrouhlil na 0,1 kg/m<sup>3</sup>:

$$w_{lt} = \frac{m_{28} - m_0}{V} * \frac{100}{\rho_w}$$

kde:

$w_{lt}$ .... dlouhodobá nasákavost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m_{28}$  ... hmotnost zkušební vzorku po 28 dnech úplného ponoření [kg]

$m_0$ .... počáteční hmotnost zkušební vzorku [kg]

$V$ ..... počáteční objem zkušební vzorku [ $\text{m}^3$ ]

$\rho_w$ ... hustota vody, uvažuje se hodnota 1000 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 3.3.7 Pevnost v tahu za ohybu

V souladu s normou ČSN EN 1052-2: Zkušební metody pro zdivo – Stanovení pevnosti v tahu za ohybu byla stanovena pevnost v tahu za ohybu na vytvořených fragmentech zdiva. Tělesa se zatížila čtyřbodovým ohybem ve svislé poloze. Zatěžovalo se rychlostí od 0,03  $\text{N}/\text{mm}^2$  za minutu až do 0,3  $\text{N}/\text{mm}^2$  za minutu. Následně se vypočetla pevnost v tahu za ohybu  $f_{xi}$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] podle níže uvedeného vztahu a zaokrouhlil se na nejbližší 0,01  $\text{N}/\text{mm}^2$  [44]:

$$f_{xi} = \frac{3F_{i,max}(l_1 - l_2)}{2bt_u^2}$$

kde:

$f_{xi}$  ..... pevnost v tahu za ohybu zdiva [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$F_{i,max}$  ... největší hodnota celkové zatěžovací síly zděného zkuš. fragmentu [N]

$l_1$  ..... vzdálenost vnějších podpor [mm]

$l_2$ ..... vzdálenost vnitřních podpor [mm]

$b$  ..... šířka nebo výška zkušební tělesa, která je kolmá na směr rozpětí [mm]

$t_u$  ..... šířka zdícího prvku [mm] [44].

### 3.3.8 Počáteční pevnost zdiva ve smyku

Počáteční pevnost zdiva ve smyku byla provedena podle normy ČSN EN 1052-3: Zkušební metody pro zdivo – Stanovení počáteční pevnosti zdiva ve smyku. Zkušební zděná tělesa jsou namáhána v ložné spáře či spárách. Tlak působí kolmo na ložné spáry. Rychlost zatěžování se zvyšovala rychlostí od 0,1 N/mm<sup>2</sup> za minutu až do 0,4 N/mm<sup>2</sup> za minutu. Pevnost ve smyku  $f_{voi}$  [N/mm<sup>2</sup>] se vypočítala z níže uvedeného vztahu a zaokrouhlila se na nejbližší 0,01 N/mm<sup>2</sup> [45]:

$$f_{voi} = \frac{F_{i,max}}{2A_i}$$

kde:

$f_{voi}$  ... ..pevnost ve smyku zděného zkušební tělesa [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{i,max}$  ... největší hodnota dosažená zatěžovací smykové síly zděného tělesa [N]

$A_i$  ..... plocha průřezu zkušební zděného tělesa [mm<sup>2</sup>] [45]

### 3.3.9 Stanovení tepelných vlastností keramických tvarovek

Stanovení tepelných vlastností zdiva bylo provedeno dle ČSN EN 1745: Zdivo a výrobky pro zdivo – Metody stanovení tepelných vlastností. Na základě skutečného tvaru zdících tvarovek Porotherm 38 T (firmy Wienerberger), které byly vybrány jako vhodné pro aplikaci PUR pěny, byl v programovém prostředí THERM sestaven model zdiva zatíženého účinkem teplotního pole  $\theta_1 = \theta_i = +21$  °C,  $\theta_2 = \theta_e = -15$  °C. Výpočet byl proveden v souladu s ČSN EN ISO 6946 pomocí metody konečných prvků. Ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu uvnitř dutin prvků ve směru tepelného toku (v místě styčné spáry) se stanovila v souladu s normou ČSN EN ISO 6946 [46]. Výpočtová hodnota součinitele tepelné vodivosti keramického střepu (ve vysušeném stavu) byla zvolena 0,3 W/(m·K).

### 3.4 Použité PUR pěny

Na začátku diplomové práce byl proveden průzkum trhu a následně vybrány vhodné PUR pěny. Jednalo se o PUR pěny trubičkové i pistolové od výrobců Stavoline, TKK Srpenica, Den Braven, Soudal, Ceresit, iLLbruck, Penosil, Monton, Wurth, Tytan profesional, Expert chem a Greenteq.

Pěna	Výrobce	Označení
Montážní pěna - trubičková	Stavoline	A
Protipožární pěna - trubičková	Den Braven	B
Tepelná a zvuková izolace - trubičková	Ceresit	C
Montážní pěna zimní do -10°C - trubičková	Stavoline	D
Perfekt pěna FM 350 - pistolová	iLLBRUCK	E
Montážní pěna FM 710 - dvoufázová - trubičková	iLLBRUCK	F
Pistolová pěna FM 370 - pistolová	iLLBRUCK	G
Tekapur PU pěna pistolová - pistolová	TKK	H
PURPEN PU pěna pistolová zimní -10°C - pistolová	TKK Srpenica d.d.	I
PURPEN PU pěna - pistolová	TKK Srpenica d.d.	J
Soudafoam Gun Professional 65	SOUDAL	K
Soudafoam Gun Professional 70	SOUDAL	L
Montážní pěna - pistolová	MONTON	M
WURTH PU pěna Flexi-Ral	WURTH	N
Montážní pěna WURTH Mega 70	WURTH	O
Nízkoexpanzní Perfekt pěna FM 355	iLLBRUCK	P
Pistolová pěna MAXI 750	Den Braven	R
Tytan 65 PU - pistolová	Tytan profesional	S
Expertchem	Expert Chem	T
1K zimní pistolová pěna polar XXL B2	GreenteQ	U
Pistolová pěna MEGA 70	Den Braven	V
Penosil goldgun 65 plus all season	PENOSIL	W
Penosil gun foam 65	PENOSIL	X

Tabulka č. 3 – Přehled PUR pěn

Od každého druhu PUR pěny bylo vytvořeno 9 zkušebních vzorků, na kterých se následně dělaly výše zmíněné zkoušky.

### 3.4.1 Tvorba vzorků z PUR pěn

K vytváření zkušebních vzorků PUR pěn se používala speciálně vyrobená dřevěná trojforma. Jednotlivé kóje byly odděleny přepážkami ze dřeva. Celá trojforma se upínala pomocí šroubů.

Při vytváření vzorků se postupovalo následovně. Povolily se šrouby, aby se jedna z hlavních stěn trojformy mohla odejmout. Po odejmutí jedné z hlavních stěn trojformy se nařezal filtrační papír, kterým se po navlhčení vystlaly vnitřní stěny trojformy. Toto opatření mělo dva důvody. Prvním z nich bylo snadné odformování po vytvrzení pěny. Druhá výhoda byla v navlhčení filtračního papíru, což mělo za následek, dodatečný přístup vlhkosti k aplikované PUR pěně, aby mohla lépe expandovat. Po vyplnění stěn trojformy filtračním papírem se forma sešroubovala dohromady.

Po uskutečnění všech kroků proběhlo vyplnění otvorů v trojformě PUR pěnou. Pěna se plnila do dvou třetin otvoru. PUR pěna se nechala 24 hodin naexpandovat a vytvrdnout. Po uplynutí výše uvedené doby se přebytečná pěna odstranila a po povolení šroubů se vyjmuly zkušební vzorky. Vzorky se řádně označily a byly připraveny ke zkouškám.

Od každého druhu PUR pěny bylo vytvořeno několik vzorků, které se použily na jednotlivá měření a zkoušení. Při tvorbě vzorků docházelo k různým problémům např. po odformování vzorků chyběly rohy vzorku. Může to být zapříčiněno nedokonalým naexpandováním pěny nebo je možné, že daná pěna neexpandovala do všech směrů stejně. Další problém se objevil až po několika hodinách po odformování, kdy vzorky vysychaly a docházelo k deformacím vzorků.





Obrázek č. 24 – Boční pohled na trojformu



Obrázek č. 25 – Horní pohled do trojformy

### 3.5 Zkoušky a měření

#### 3.5.1 Měření lineárních rozměrů, tloušťky a stanovení objemové hmotnosti

Měření lineárních rozměrů probíhalo podle ČSN EN 12085, měření tloušťky dle ČSN EN 823 a stanovení objemové hmotnosti podle ČSN EN 1602. Měření probíhalo na vzorcích o rozměrech 200x200x38 mm. Jejich výroba, příprava k měření a označení bylo popsáno v kapitole 3.4.1. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce. V tabulce jsou uvedeny zprůměrované hodnoty jednotlivých druhů PUR pěn.

Označení pěny	l [mm]	b [mm]	t [mm]	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]
A	200,6	199,0	39,1	26,5
B	199,9	198,8	39,1	32,2
C	200,2	198,5	38,8	29,0
D	200,2	198,5	39,3	27,1
E	200,1	198,2	39,3	24,0
F	200,3	197,2	38,1	39,2
G	200,4	197,7	39,1	21,6
H	200,1	196,8	38,5	19,9
I	200,4	197,4	40,0	17,9
J	200,2	197,0	39,5	24,8
K	198,5	196,7	39,0	19,6
L	199,5	196,7	38,4	21,8
M	199,5	196,8	38,6	22,8
N	198,3	197,1	38,3	26,0
O	199,5	197,3	39,5	21,7
P	201,5	198,3	39,4	21,8
R	199,7	198,4	39,0	21,3
S	199,8	198,4	38,6	18,6
T	200,2	197,9	39,7	25,5
U	200,0	197,8	39,0	21,6
V	199,6	197,8	39,7	24,4
W	199,8	198,0	39,8	22,2
X	199,8	197,8	39,9	22,9

Tabulka č. 4 – Přehled naměřených lineárních rozměrů PUR pěn a stanovených objemových hmotností

kde:

$l$  ..... délka zkušební vzorku [mm]

$b$  .... šířka zkušební vzorku [mm]

$t$  ..... tloušťka zkušební vzorku [mm]

$\rho_v$  ... objemová hmotnost zkušební vzorku [kg/m<sup>3</sup>].



Graf č. 1 - Přehled stanovených objemových hmotností PUR pěn

Z grafu je patrné, že vzorek s označením F má největší objemovou hmotnost ze všech ( $39,2 \text{ kg/m}^3$ ) zkoušených pěn. Naproti tomu nejmenší objemové hmotnosti dosahoval vzorek označený písmenem I ( $17,9 \text{ kg/m}^3$ ). Další vzorky, které měly nízkou objemovou hmotnost, měly označení H, K a S.

### 3.5.2 Stanovení pevnosti v tlaku tepelně izolačních výrobků

Pevnost v tlaku při 10% deformaci bylo stanoveno podle normy ČSN EN 826. Měření bylo uskutečněno na vzorcích o rozměrech 200x200x38 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže.

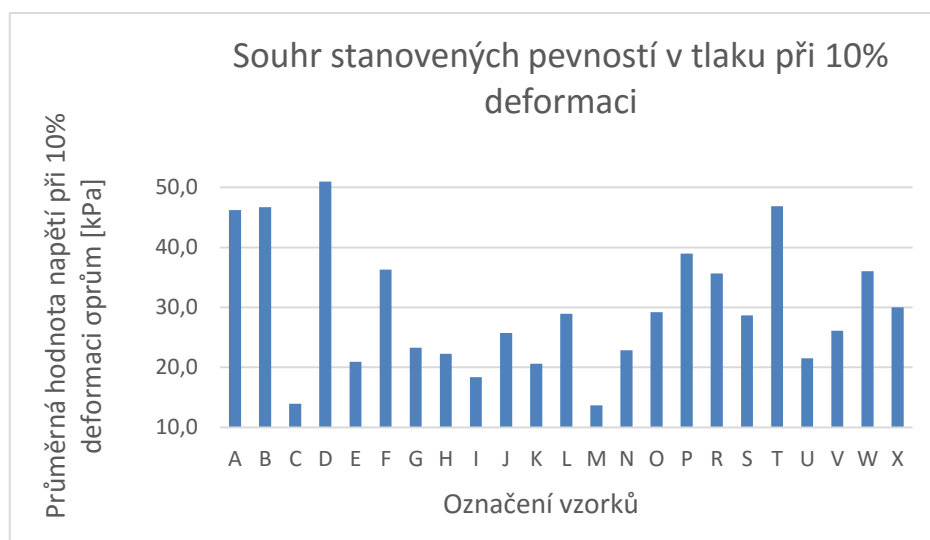
Označení pěny	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{prům}$ [kPa]
A	26,5	46,2
B	32,2	46,7
C	29,0	13,9
D	27,1	51,0
E	24,0	20,9
F	39,2	36,3
G	21,6	23,3
H	19,9	22,3
I	17,9	18,4
J	24,8	25,7
K	19,6	20,6
L	21,8	28,9
M	22,8	13,7
N	26,0	22,9
O	21,7	29,2
P	21,8	39,0
R	21,3	35,6
S	18,6	28,7
T	25,5	46,9
U	21,6	21,5
V	24,4	26,1
W	22,2	36,0
X	22,9	30,0

Tabulka č. 5 – Přehled stanovených pevností v tlaku při 10% deformaci

kde:

$\rho_v$  ..... objemová hmotnost zkušebního vzorku [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma_{prům}$  ... pevnost v tlaku při 10% deformaci [kPa].



Graf č. 2 – Přehled stanovených pevností v tlaku při 10% deformaci

Z grafu je patrné, že největších pevností v tlaku při 10% deformaci dosahoval vzorek označený písmenem D (51,0 kPa). Naopak nejnižších hodnot dosahovaly vzorky označené písmeny C a M.

### 3.5.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti proběhlo podle normy ČSN EN 12667. Stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno metodou měřidla tepelného toku podle ISO 8301 a ČSN 72 7012-3. Výsledné hodnoty měření jsou uvedeny v následující tabulce. Měření bylo provedeno na vzorcích uložených za laboratorních podmínek při teplotě 23 °C.

Označení pěny	$\lambda$			$\lambda_{průměr}$
	[W/(m·K)]			
A	0,0346	0,0371	0,0396	0,0371
B	0,0343	0,0368	0,0392	0,0368
C	-	-	-	-
D	0,0317	0,0340	0,0364	0,0340
E	0,0327	0,0350	0,0373	0,0361
F	0,0317	0,0334	0,0354	0,0344
G	0,0326	0,0348	0,0392	0,0365
H	0,0330	0,0354	0,0378	0,0366
I	-	-	-	-
J	-	-	-	-
K	0,0366	0,0382	0,0422	0,0403
L	0,0341	0,0366	0,0390	0,0377
M	0,0358	0,0384	0,0410	0,0397
N	0,0336	0,0361	0,0384	0,0372
O	0,0363	0,0387	0,0411	0,0399
P	0,0334	0,0321	0,0347	0,0334
R	0,0350	0,0356	0,0344	0,0350
S	0,0339	0,0330	0,0348	0,0339
T	0,0340	0,0347	0,0333	0,0340
U	0,0319	0,0314	0,0324	0,0319
V	-	-	-	-
W	-	-	-	-
X	0,0291	0,0310	0,0333	0,0322

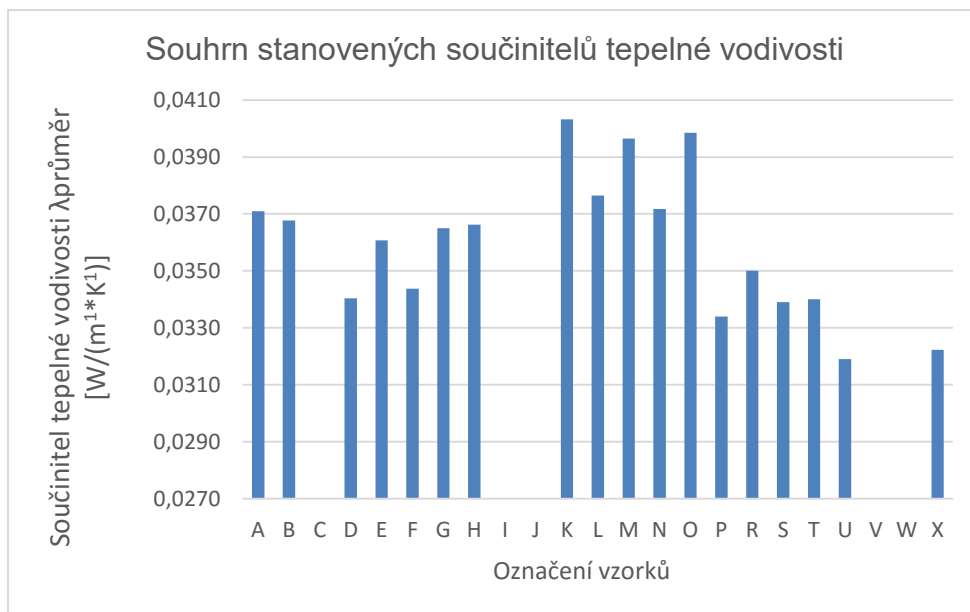
Tabulka č. 6 – Přehled naměřených součinitelů tepelné vodivosti

kde:

$\lambda$  ..... součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]

$\lambda_{průměr}$  ... průměrná hodnota souč. tepelné vodivosti [W/(m·K)].

V tabulce uvedené výše je uveden výčet naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti a průměr z naměřených hodnot. U vzorků C, I, J, V a W nebylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti, protože u nich došlo k dodatečné deformaci, která stanovení součinitele tepelné vodivosti znemožnila (tyto vzorky byly následně při vyhodnocení vyřazeny). Po naměření hodnot součinitele tepelné vodivosti se vypočetl průměr naměřených hodnot u každého vzorku.



Graf č. 3 – Přehled stanovených součinitelů tepelné vodivosti

Nejnižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti vykazoval vzorek U (0,0319 W/(m·K)), naopak nejvyšších hodnot součinitele tepelné vodivosti dosahovaly vzorky označené písmeny K, M a O.

#### 3.5.4 Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření

Podle normy ČSN EN 12087 byla stanovena dlouhodobá nasákavost. Pro stanovení se použila metoda č. 2. Nasákavost se stanovila měřením rozdílných hmotností zkušebních těles, která jsou zcela ponořena ve vodě po dobu 28 dní. Naměřené hodnoty dlouhodobé nasákavosti jsou uvedeny v následující tabulce.

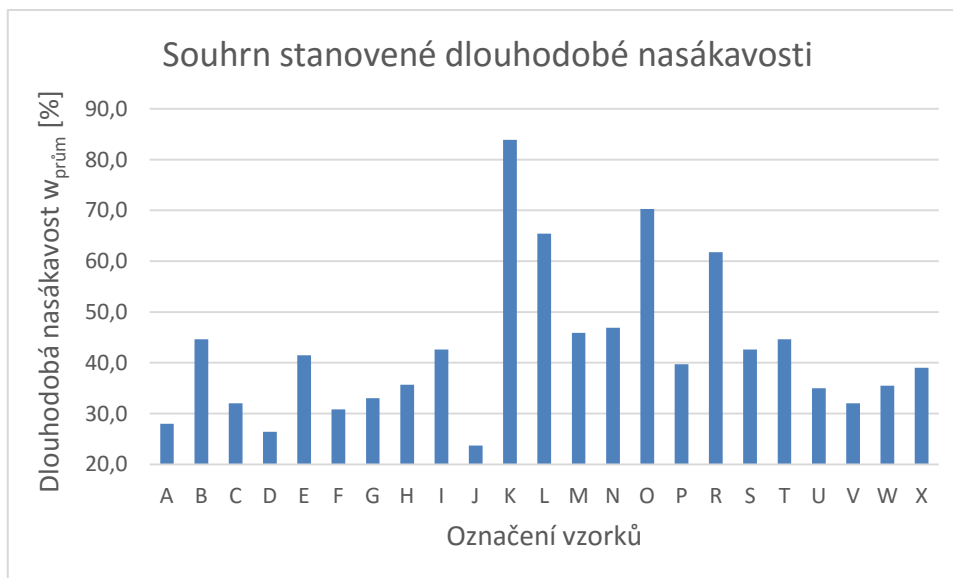
Označení pěny	$w_{\text{prům}}$ [%]
A	28,0
B	44,6
C	32,0
D	26,4
E	41,5
F	30,8
G	33,0
H	35,7
I	42,6
J	23,7
K	83,9
L	65,4
M	45,9
N	46,9
O	70,3
P	39,7
R	61,8
S	42,6
T	44,6
U	35,0
V	32,0
W	35,5
X	39,0

Tabulka č. 7 – Přehled naměřených hodnot dlouhodobé nasákavosti

kde:

$w_{\text{prům}}$  .... dlouhodobá nasákavost [%].





Graf č. 4 – Přehled stanovené dlouhodobé nasákavosti

Z grafu lze vyčíst, že nejnižší hodnoty dlouhodobé nasákavosti dosahovala pěna, která byla označena písmenem J (23,7 %). Další vzorky, které dosahovaly nízkých hodnot dlouhodobé nasákavosti, byly označeny písmeny A a D.

### 3.6 Vyhodnocení

K vyhodnocení a výběru nejlepší (nejvhodnější) pěny z vybraných PUR pěn byla využita kvantitativní metoda párového srovnání pomocí Sattihovo matice. Následně se nejlepší PUR pěna použila ke tvorbě zděných segmentů pro zkoušky podle norem ČSN EN 1052-2 a ČSN EN 1052-3.

	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{\text{průměr}}$ [W/(m·K)]	$\sigma_{\text{prům}}$ [kPa]	$w_{\text{prům}}$ [%]
<b>Optimum</b>	min	min	max	min
<b>A</b>	26,5	0,0371	46,2	28,0
<b>B</b>	32,2	0,0368	46,7	44,6
<b>C</b>	29,0	-	13,9	32,0
<b>D</b>	27,1	0,0340	51,0	26,4
<b>E</b>	24,0	0,0361	20,9	41,5
<b>F</b>	39,2	0,0344	36,3	30,8
<b>G</b>	21,6	0,0365	23,3	33,0
<b>H</b>	19,9	0,0366	22,3	35,7
<b>I</b>	17,9	-	18,4	42,6
<b>J</b>	24,8	-	25,7	23,7
<b>K</b>	19,6	0,0403	20,6	83,9
<b>L</b>	21,8	0,0377	28,9	65,4
<b>M</b>	22,8	0,0397	13,7	45,9
<b>N</b>	26,0	0,0372	22,9	46,9
<b>O</b>	21,7	0,0399	29,2	70,3
<b>P</b>	21,8	0,0334	39,0	39,7
<b>R</b>	21,3	0,0350	35,6	61,8
<b>S</b>	18,6	0,0339	28,7	42,6
<b>T</b>	25,5	0,0340	46,9	44,6
<b>U</b>	21,6	0,0319	21,5	35,0
<b>V</b>	24,4	-	26,1	32,0
<b>W</b>	22,2	-	36,0	35,5
<b>X</b>	22,9	0,0322	30,0	39,0

Tabulka č. 8 – Přehled naměřených hodnot

kde:

$\rho_v$  ..... objemová hmotnost zkušební vzorku [kg/m<sup>3</sup>]

$\lambda_{\text{Průměr}}$  ... průměrná hodnota souč. tepelné vodivosti [W/(m·K)]

$\sigma_{\text{prům}}$  ..... průměrná hodnota pevnosti v tlaku při 10% deformaci [kPa]

$w_{\text{prům}}$  .... průměrná hodnota dlouhodobé nasákavosti [%].

V tabulce č. 8 je uvedený přehled naměřených hodnot. U pěti označených písmeny C, I, J, V a W není hodnota součinitele tepelné vodivosti uvedena, jelikož nebylo možné dané vzorky změřit z důvodů deformace vzorků, tyto vzorky byly z dalšího hodnocení vyloučeny.

Vytvořil jsem Sattiho matici, kde se porovnávaly jednotlivé naměřené vlastnosti PUR pěn. Podle důležitosti naměřených vlastnosti se přiřazovala váha k jednotlivým vlastnostem.

Číslo	1	2	3	4	Si	Ri	Fi
1	1	1/3	1/2	1	0,167	0,6393	0,1314
2	3	1	4	4	48,000	2,6322	0,5409
3	2	1/4	1	2	1,000	1,0000	0,2055
4	1	1/4	1/2	1	0,125	0,5946	0,1222
<b>Suma</b>					<b>49,3</b>	<b>4,8661</b>	<b>1,0000</b>

Tabulka č. 9 – Sattiho matice

	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{\text{průměr}}$ [W/(m·K)]	$\sigma_{\text{prům}}$ [kPa]	$W_{\text{prům}}$ [%]	
<b>Fi</b>	<b>0,1314</b>	<b>0,5409</b>	<b>0,2055</b>	<b>0,1222</b>	
<b>Optimum</b>	max	min	max	min	<b>Σ</b>
<b>A</b>	5,3	20,6	17,9	11,3	55,2
<b>B</b>	8,8	22,5	18,2	8,0	57,5
<b>C</b>	6,8	-	0,1	10,5	17,5
<b>D</b>	5,7	40,6	20,6	11,7	<b>78,5</b>
<b>E</b>	3,8	27,0	4,0	8,6	43,4
<b>F</b>	13,1	38,0	12,4	10,8	74,4
<b>G</b>	2,3	24,5	5,3	10,3	42,4
<b>H</b>	1,2	23,8	4,7	9,8	39,6
<b>I</b>	0,0	-	2,6	8,4	11,0
<b>J</b>	4,3	-	6,6	12,2	23,1
<b>K</b>	1,0	0,0	3,8	0,0	4,9
<b>L</b>	2,4	16,7	8,4	3,8	31,3
<b>M</b>	3,0	3,9	0,0	7,7	14,6
<b>N</b>	5,0	20,0	5,1	7,5	37,5
<b>O</b>	2,3	2,6	8,6	2,8	16,2
<b>P</b>	2,4	44,4	13,9	9,0	69,7
<b>R</b>	2,1	34,1	12,1	4,5	52,8
<b>S</b>	0,4	41,2	8,3	8,4	58,3
<b>T</b>	4,7	40,6	18,3	8,0	71,5
<b>U</b>	2,3	54,1	4,3	9,9	70,6
<b>V</b>	4,0	-	6,8	10,5	21,4
<b>W</b>	2,7	-	12,3	9,8	24,8
<b>X</b>	3,1	52,2	9,0	9,1	73,4

Tabulka č. 10 – Výpočet a vyhodnocení

kde:

$\rho_v$  ..... objemová hmotnost zkušební vzorku [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\lambda_{\text{Průměr}}$  ... průměrná hodnota souč. tepelné vodivosti [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]

$\sigma_{\text{prům}}$  ..... průměrná hodnota pevnosti v tlaku při 10% deformaci [kPa]

$w_{\text{prům}}$  ..... průměrná hodnota dlouhodobé nasákavosti [%].

Po výpočtu se jednotlivé body sečetly. Žlutě je označena pěna, která dosáhla nejvyššího počtu bodů a byla označena za nejlepší z uvedených pěn. Jedná se o pěnu označenou písmenem D. Přesněji to je Montážní pěna zimní do ( $-10^\circ\text{C}$ ) – trubičková od výrobce Stavoline. Touto pěnou se následně vypěnily fragmenty zdiva, které se zkoušely na pevnost v tahu za ohybu a počáteční pevnost zdiva ve smyku.

### 3.7 Způsob aplikace PUR pěny a zdění

Po nastudování různých způsobů zdění pomocí keramických tvarovek s velkými dutinami v kombinaci s PUR pěnou a provedených experimentech byl vyvinut následující způsob zdění fragmentů zdiva. Příprava fragmentů k jednotlivým zkouškám probíhala vyskládáním první řady keramických tvarovek. Následně se aplikovala pěna pomocí trubičky do dvou třetin výšky dutin keramické tvarovky. Pěna naexpandovala a měla by prorůst do horní tvarovky. Na první řadu by se mezitím vyskládala druhá řada keramických tvarovek bez malty, lepidla či pěny. Poté se dutinami horní řady tvarovek aplikovala PUR pěna. Tímto velmi jednoduchým postupem se pokračovalo až do úplného zhotovení zkušebních fragmentů.

### 3.8 Zkoušky zdiva vypěněného PUR pěnou

Na fragmentech zdiva byly provedeny zkoušky v tahu za ohybu ve svislé a vodorovné poloze a počáteční pevnost zdiva ve smyku.

### 3.8.1 Stanovení pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve svislé poloze

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu ve svislé poloze bylo provedeno podle ČSN EN 1052-2. Zkouška probíhala na fragmentu zdiva o čtyřech řadách po pěti kusech v každé řadě. Fotografie tělesa a grafů s naměřenými hodnotami jsou uvedeny níže.



Obrázek č. 26 – Umístění tělesa do zkušebního přístroje



Obrázek č. 27 – Porušení zdiva při namáhání v tahu za ohybu



Obrázek č. 28 – Detail porušení

Maximální hodnota pevnosti zdiva v tahu za ohybu dle ČSN EN 1052-2 ve svislé poloze vykázala hodnotu  $0,13 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.8.2 Stanovení pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve vodorovné poloze

Stanovení pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve vodorovné poloze se provedlo podle normy ČSN EN 1052-2. Vodorovný ohyb se prováděl na vyzděném fragmentu zdiva o pěti řadách po čtyřech kusech v každé řadě. Fotografie a výsledné grafy jsou uvedeny níže.



Obrázek č. 29 – Zkoušený fragment zdiva umístěný ve zkušební přístroji



Obrázek č. 30 – Porušení zdiva



Obrázek č. 31 – Detail porušení



Stanovená maximální hodnota pevnosti zdiva v tahu za ohybu dle ČSN EN 1052-2 ve vodorovné poloze vyšla  $0,18 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.8.3 Stanovení počáteční pevnosti zdiva ve smyku

Stanovení počáteční pevnosti zdiva ve smyku proběhlo podle normy ČSN EN 1052-3. Zkouška byla provedena na vyzdřeném fragmentu zdiva.

Stanovená výsledná počáteční pevnost zdiva ve smyku dle ČSN EN 1052-3 byla  $0,43 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.8.4 Stanovení tepelných vlastností keramických tvarovek vyplněných PUR pěnou

Stanovení tepelných vlastností keramických tvarovek, které byly vyplněny PUR pěnou, bylo provedeno podle ČSN EN 1745: Zdivo a výrobky pro zdivo – Metody stanovení tepelných vlastností. Výpočet byl proveden na typickém fragmentu zdiva z tvarovek Porotherm 38 T vyplněných PUR pěnou D. (Montážní pěna zimní do  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – trubičková od výrobce Stavoline) s hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda_{23,50} = 0,0340 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Dle ČSN 73 0540-3 je u PUR pěny tato hodnota totožná s hodnotou  $\lambda_{10, \text{dry}}$ , která byla dále uvažována pro výpočet. V případě keramického střepu byla hodnota  $\lambda_{10, \text{dry}}$  zvolena  $0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Jedná se o hodnotu typickou pro cihelné střepy využívané v ČR pro výrobu tepelně izolačních tvarovek (průměrná hodnota).

<b>U</b> [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	<b>R<sub>T</sub></b> [m <sup>2</sup> /(K·W)]	<b>R</b> [m <sup>2</sup> /(K·W)]	<b>λ<sub>equ</sub></b> [W/(m·K)]
0,2084	4,7985	4,6335	0,0820

Tabulka č. 11 – Přehled vypočítaných tepelných hodnot páleného zdícího prvku POROTHERM 38 T vyplněného PUR pěnou

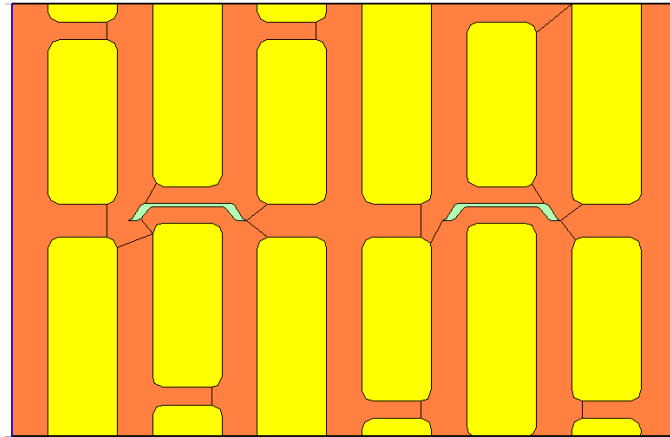
kde:

U.....součinitel prostupu tepla [W/(m<sup>2</sup>·K)]

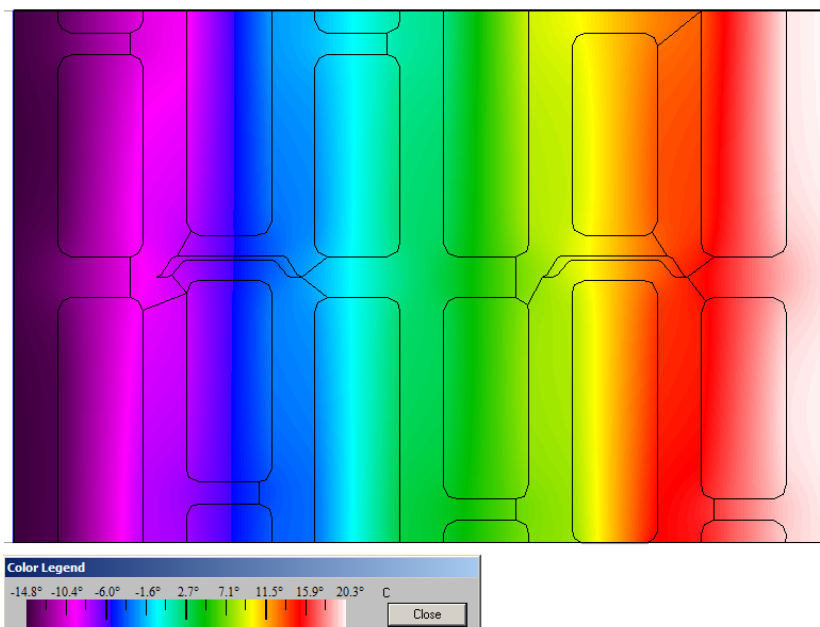
R.....odpor konstrukce [(m<sup>2</sup>·K)/W]

$R_T$ ... odpor konstrukce při prostupu tepla [ $m^2 \cdot K/W$ ]

$\lambda_{equ}$ ...ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti [ $W/(m \cdot K)$ ]



Obrázek č. 32 – Schématický náčrt výpočtového modelu páleného zdícího prvku POROTHERM 38 T vyplněného PUR pěnou (červená – cihelný střepek; žlutá – PUR pěna; zelená – vzduch)



Obrázek č. 33 – Výpočtové rozložení teplotního pole (IR zobrazení) v páleném zdícím prvku POROTHERM 38 T vyplněného PUR pěnou při okrajových podmínkách:  $\theta_1 = \theta_i = +21^\circ\text{C}$ ,  $\theta_2 = \theta_e = -15^\circ\text{C}$

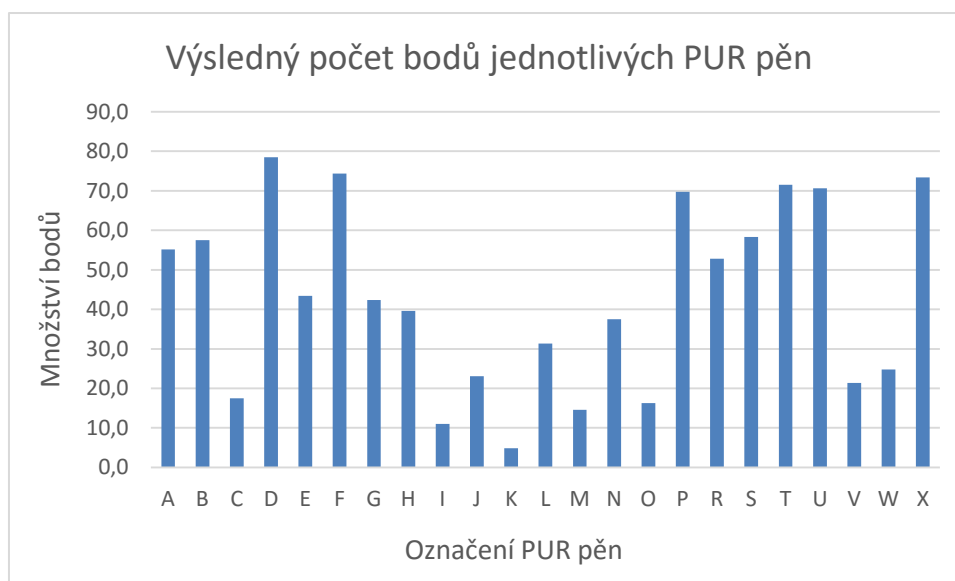
Vzhledem ke způsobu zdění na PUR pěnu je tloušťka ložné spáry blízká nule. Dále pak ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti použité polyuretanové pěny je nižší než ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti páleného zdícího prvku i ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu ve vzduchových dutinách v prvcích zdiva (i případné vzduchové dutiny v ložné spáře). Proto je možné vliv zdění na montážní PUR pěnu a vliv ložné spáry zanedbat a zdivo považovat po výšce za homogenní. Vlastnosti zdícího prvku jsou tedy totožné, jako vlastnosti zdiva ve vysušeném stavu.

## 4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl vývoj zdících prvků pro obvodové pláště, které jsou určeny pro výstavbu konstrukcí v nízkoenergetickém či pasivním standardu. Jedná se o keramické tvarovky s velkými dutinami. Bylo zapotřebí vybrat vhodný tepelně izolační materiál, vyvinout způsob aplikace tepelně izolačního materiálu do zdícího prvku a technologii výstavby. Zdící prvek s aplikovanou integrovanou izolací měl dosahovat nízké ekvivalentní hodnoty součinitele tepelné vodivosti, která by byla nižší než  $0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  ve vysušeném stavu. Bylo zapotřebí vyvinout systém s jednoduchou výstavbou a dobrými mechanickými vlastnostmi. Preferovány byly suché způsoby výstavby, které byly v závěru práce vyzkoušeny na fragmentech reálných konstrukcí.

Po provedení průzkumu trhu se vybralo celkem 23 různých PUR pěn od různých výrobců. Z vybraných PUR pěn se zhotovily zkušební tělesa o rozměrech  $200 \times 200 \times 38 \text{ mm}$ , na kterých se následně prováděly zkoušky a měření. Měřily se lineární rozměry a hmotnost, z nichž se vypočítala objemová hmotnost. Hodnoty objemové hmotnosti se pohybovaly v rozmezí  $(17,9 - 39,2) \text{ kg}/\text{m}^3$ . Zkoušela se na vzorcích tepelná vodivost, dlouhodobá nasákavost a pevnost v tlaku při 10% deformaci. Tepelná vodivost u vzorků se pohybovala v rozmezí  $(0,0319 - 0,0422) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Hodnoty dlouhodobé nasákavosti byly v rozmezí  $(23,7 - 83,9) \%$ . Stanovené hodnoty napětí při 10% deformaci se pohybovaly v rozmezí  $(13,7 - 51,0) \text{ kPa}$ .

Následovalo vyhodnocení a vybrání nejvhodnější PUR pěny pro další zkoušky. K vyhodnocení nejvhodnější PUR pěny jsem použil metodu kvantitativního párového srovnání přesněji Sattiho matrici. Z vyhodnocení Sattiho matice vyšla nejlépe PUR pěna s označením písmenem D. Jedná se o Montážní zimní pěnu trubičkovou určenou až do  $(-10 \text{ }^\circ\text{C})$  od výrobce Stavoline. PUR pěna měla objemovou hmotnost  $27,1 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Dosahovala součinitele tepelné vodivosti  $0,0340 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Dále pěna měla pouze 26,4 % nasákavost a u napětí při 10% deformaci dosahovala hodnoty  $51,0 \text{ kPa}$ .



Graf č. 5 – Výsledný počet bodů získaný jednotlivými PUR pěny v Sattiho matici

Byl vyvinut způsob zdění pomocí keramických tvarovek s velkými dutinami v kombinaci s PUR pěnou. Způsob zdění spočíval, ve vyskládání první řady tvarovek. Následně se do jejich dutin aplikovala PUR pěna v tomto případě pomocí trubičky do dvou třetin výšky dutiny. Jelikož daná pěna byla v dostání pouze jako pěna trubičková nikoli pistolová. Poté se vyskládala druhá řada tvarovek a opět se vyplnily dutiny do stejné výšky jako u první řady tvarovek. Mezi tím došlo k naexpandování pěny v dolní řadě tvarovek a prorůstání pěny do horní řady. Tento způsob zdění je velmi jednoduchý a efektivní. Díky prorůstání pěny došlo ke zpevnění celého fragmentu zdiva, které se následně ověřilo zkouškami v tahu za ohybu a počáteční pevnosti zdiva ve smyku.

Pomocí této pěny se vypěnily zkušební fragmenty keramického zdiva, které se následně dále zkoušely na pevnost v tahu za ohybu a počáteční pevnost zdiva ve smyku. Dále se ještě vypěnily samostatné keramické tvarovky, na kterých se zkoušelo stanovení tepelných vlastností tvarovek.

U samostatné keramické tvarovky s velkými dutinami, která byla vypěněna PUR pěnou, se stanovila ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti. Ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti byla  $0,082 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . V porovnání s podobnou keramickou tvarovkou Porotherm 38 T, která je vyplněná minerální vlnou a má ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti  $0,077 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,

vychází hodnota lehce vyšší. Příčina vyššího ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti je z důvodu zvolení hodnoty  $\lambda_{10, dry}$  u keramického střepu  $0,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

U zkoušek fragmentů zdiva vycházela hodnota pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve svislé poloze  $0,13 \text{ N}/\text{mm}^2$  a ve vodorovné poloze  $0,18 \text{ N}/\text{mm}^2$ . V porovnání s keramickou tvarovkou Porotherm 38 T, u které se udává hodnota pevnosti zdiva v tahu za ohybu ve svislé poloze  $0,09 \text{ N}/\text{mm}^2$  a ve vodorovné poloze  $0,13 \text{ N}/\text{mm}^2$ , byla v obou případech naměřená hodnota vyšší. Z toho vyplývá, že účinek prorůstání PUR pěny tvarovkami má za následek i zpevnění celého fragmentu zdiva.

Hodnota počáteční pevnosti zdiva ve smyku byla  $0,43 \text{ N}/\text{mm}^2$ . U výše zmíněné keramické tvarovky Porotherm 38 T dosahuje hodnota počáteční pevnosti zdiva ve smyku hodnoty  $0,19 \text{ N}/\text{mm}^2$ . Naměřená hodnota u fragmentu zdiva je vyšší. Vyšší hodnotě určitě pomohlo vypěnění keramických zdících prvků PUR pěnou, která fragment zdiva zpevnila.

Z výsledků zkoušek na fragmentech zdiva a jejich porovnání s hodnotami, které udává výrobce u keramické zdící tvarovky, je patrné zlepšení vlastností. Proto využití PUR pěny jako integrované izolace do keramických tvarovek s velkými dutinami mi přijde jako velice vhodný způsob dalšího využití PUR pěny ve stavebnictví a posunutím vývoje zdících prvků s integrovanou tepelnou izolací.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Obvodové pláště energeticky úsporné výstavby (II). TZB-INFO [online]. 2015 [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4060-obvodove-plaste-energeticky-usporne-vystavby-ii>
- [2] ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. Praha: ČNI, 2011.
- [3] Passivhaus Institut [online]. 2015 [cit. 2015-10-03]. Dostupné z: <http://passivehouse.com/>
- [4] Centrum pasivního domu [online]. 2014 [cit. 2015-10-03]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/>
- [5] SMOLA, Josef. Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 352 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-2995-4.
- [6] Minerální vlna. Pacificizol [online]. 2015 [cit. 2015-10-04]. Dostupné z: <http://www.pacificizol.cz/mineralni.htm>
- [7] X-FOAM HBD 300/20mm. Spojovací zateplovací zboží [online]. 2015 [cit. 2015-10-04]. Dostupné z: [http://spojovaci-zateplovaci-zbozi.cz/detail-produktu/extrudovany-polystyren-foam/x-foam-hbd-300/860\\_x-foam-hbd-300-20mm/](http://spojovaci-zateplovaci-zbozi.cz/detail-produktu/extrudovany-polystyren-foam/x-foam-hbd-300/860_x-foam-hbd-300-20mm/)
- [8] Izolace. Nalezeno [online]. 2008 [cit. 2015-10-04]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/stavba/izolace/izolace-a-zatepleni-domu-prehled-plastovych-penovych-materialu.aspx>
- [9] Polystyren. Novopol [online]. 2014 [cit. 2015-10-04]. Dostupné z: [http://www.novopol.cz/pp\\_hr.html](http://www.novopol.cz/pp_hr.html)
- [10] Pěnosklo ve formě drti je ideálním tepelným izolantem pro spodní stavby. Dřevo a stavby [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba/izolace/2098-penosklo-ve-forme-drsti-je-idealnim-tepelnym-izolantem-pro-spodni-stavby>
- [11] Dřevovláknité desky: Izolace co hřeje i chladí. Drevostavitel [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.drevostavitel.cz/clanek/izolacni-materialy-4-dil--drevovlaknita-izolace-hreje-i-chladi>
- [12] Slamaflex. Mandalahouse [online]. 2013 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://haloo-alter-native.eu/index.php/cz/slamaflex>

- [13] Možnosti uplatnění technického konopí při výrobě tepelněizolačních materiálů, část II. A.W.A.L. [online]. 2008 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.awal.cz/index.asp?module=ActiveWeb>
- [14] Izolace PUR, PIR a fenolická pěna. Stavba TZB Info [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/299-izolace-pur-pir-a-fenolicka-pena>
- [15] DROCHYTKA, Rostislav. Plastické látky ve stavebnictví. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998, 122 s. ISBN 80-214-1148-1.
- [16] Market Study: Polyurethanes (PUR) and Isocyanates (MDI & TDI). Ceresana [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.ceresana.com/en/market-studies/plastics/pur-isocyanates>
- [17] Molitan. Calounický materiál [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.calounickymaterial.cz/kategoria/molitan-0>
- [18] Vlastosti materiálů. TZB Info [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: [http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068\\_katalog.html](http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html)
- [19] Součinitel tepelné vodivosti. Přírodní stavba [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>
- [20] Stavební materiály Keramické stavební materiály, nepálené zdicí materiály, silikátové střešní krytiny. TRINNER. [online]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/531-zcu-ma-09-zdiciprvky.pdf>
- [21] ČSN EN 771-1 ed. 2. Specifikace zdicích prvků – Část 1: Pálené zdicí prvky. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [22] ČSN EN 771-2 ed. 2. Specifikace zdicích prvků - Část 2: Vápenopískové zdicí prvky. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [23] ČSN EN 771-3 ed. 2. Specifikace zdicích prvků - Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [24] ČSN EN 771-4 ed. 2. Specifikace zdicích prvků - Část 4: Pórobetonové tvárnice. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [25] ČSN EN 771-6 ed. 2. Specifikace zdicích prvků - Část 6: Zdicí prvky z přírodního kamene. Praha: Český normalizační institut, 2011.



- [26] Ing. Pavel Heinrich. Přínosy cihel s integrovanou izolací [online]. 2015, : 1 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/10160-prinosy-cihel-s-integrovanou-izolaci>
- [27] Ing. Pavel Heinrich. Tepelně technické parametry cihel – minulost, současnost a budoucnost [online]. 2015, : 1 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/8439-tepelne-technicke-parametry-cihel-minulost-soucasnost-a-budoucnost>
- [28] UNIPOR W08 CORISO. UNIPOR [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.unipor.de/node/434>
- [29] Zateplování zdivem na Bau Mnichov 2015. TZB-INFO [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/12316-zateplovani-zdivem-na-bau-mnichov-2015>
- [30] Revoluční cihla plněná vatou. Wienerberger [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.wienerberger.cz/revolu%C4%8Dn%C3%AD-cihla-pln%C4%9Bn%C3%A1-vatou.html>
- [31] Z čeho stavět rodinný dům. Homebydlení [online]. 2014 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://homebydleni.cz/dum/stavebni-materialy/z-ceho-stavet-rodinny-dum/>
- [32] Durisol-zdivo. Durisol [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.durisol-zdivo.cz/index.php>
- [33] Broušené zdivo. Liapor [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/brousene-zdivo-kalibrovane-tvarovky-liapor#technicke-info>
- [34] GEOLYTH AS A FILLING MATERIAL FOR BRICKS AND STONES. Geolyth [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.geolyth.at/brick-fillings.aspx>
- [35] Malty pro zdění. Cihlářský svaz Čech a Moravy [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.cscm.cz/lexikon/kap10.pdf>
- [36] Zdění z broušených cihel. Bydlení [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.bydleni.cz/clanek/Zdeni-z-brousenych-cihel>
- [37] Zdění pro každé roční období. Wienerberger [online]. 2015 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: <http://www.wienerberger.cz/zd%C4%9Bn%C3%AD-pro>

- ka%C5%BEd%C3%A9-ro%C4%8Dn%C3%AD-  
obdob%C3%AD.html?lpi=1366078173952
- [38] ČSN EN 12085. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení lineárních rozměrů zkušebních těles. Praha: ČNI, 2013.
- [39] ČSN EN 823. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení tloušťky. Praha: ČNI, 2013.
- [40] ČSN EN 1602. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení objemové hmotnosti. Praha: ČNI, 2013.
- [41] ČSN EN 826. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška tlakem. Praha: ČNI, 2013.
- [42] ČSN 72 7012 – část 3: Metoda měřidla tepelného toku, metoda desky. Praha: ČNI, 2004 + ISO 8301
- [43] ČSN EN 12087. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření. Praha: ČNI, 2013.
- [44] ČSN EN 1052 -2: Zkušební metody pro zdivo - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Praha: ČNI, 2000.
- [45] ČSN EN 1052 -3: Zkušební metody pro zdivo - Část 3: Stanovení počáteční pevnosti ve smyku. Praha: ČNI, 2011.
- [46] ČSN EN 1745: Zdivo a výrobky pro zdivo - Metody stanovení tepelných vlastností. Praha: ČNI, 2012.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1 – Zdící prvky HD [21] .....	16
Obrázek č. 2 – Zdící prvky LD [21].....	17
Obrázek č. 3 – Příklady tvarů různých betonových tvárnic [23].....	19
Obrázek č. 4 – Cihelné výrobky s různými druhy integrované tepelné izolace [27] .....	21
Obrázek č. 5 – Keramická tvarovka s malými dutinami plněné ovčí vlnou [28] ....	22
Obrázek č. 6 – Keramická tvarovka plněná perlitem [29] .....	23
Obrázek č. 7 – Keramická tvarovka plněná šedým polystyrenem [29] .....	23
Obrázek č. 8 – Keramická tvarovka plněná minerální vatou [30].....	24
Obrázek č. 9 – Keramická tvarovka plněná polystyrenem [31].....	24
Obrázek č. 10 – Tvarovka Durisol vyplněna grafitovou izolací [32] .....	25
Obrázek č. 11 – Tvarovka z lehkého betonu vyplněná materiálem na minerální bázi [33].....	25
Obrázek č. 12 – Betonová tvarovka vyplněná Geolyth – minerální pěnou [34] ....	26
Obrázek č. 13 – Malta nanášená pomocí nanášecího válce [36] .....	27
Obrázek č. 14 – Zdění na PUR pěnu [37] .....	28
Obrázek č. 16 – Extrudovaný polystyren [7].....	31
Obrázek č. 17 – Pěnový polystyren [9].....	31
Obrázek č. 18 – Porovnání extrudovaného a pěnového polystyrenu [8] .....	32
Obrázek č. 19 – Molitan – měkká polyuretanová pěna [17].....	33
Obrázek č. 20 – Granulované pěnové sklo [10].....	34
Obrázek č. 21 – Desky z dřevovláknité izolace [11] .....	36
Obrázek č. 22 – Panely ze slaměné izolace [12].....	37
Obrázek č. 23 – Izolace z technického konopí [13] .....	37
Obrázek č. 24 – Boční pohled na trojformu .....	49
Obrázek č. 25 – Horní pohled do trojformy.....	49
Obrázek č. 26 – Umístění tělesa do zkušebního přístroje .....	61
Obrázek č. 27 – Porušení zdiva při namáhání v tahu za ohybu .....	62
Obrázek č. 28 – Detail porušení .....	62
Obrázek č. 29 – Zkoušený fragment zdiva umístěný ve zkušebním přístroji .....	63
Obrázek č. 30 – Porušení zdiva .....	64

Obrázek č. 31 – Detail porušení .....	64
Obrázek č. 32 – Schématický náčrt výpočtového modelu páleného zdícího prvku POROTHERM 38 T vyplněného PUR pěnou (červená – cihelný střepek; žlutá – PUR pěna; zelená – vzduch).....	66
Obrázek č. 33 – Výpočtové rozložení teplotního pole (IR zobrazení) v páleném zdícím prvku POROTHERM 38 T vyplněného PUR pěnou při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21^\circ\text{C}$ , $\theta_2 = \theta_e = -15^\circ\text{C}$ .....	66

## SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 - Přehled stanovených objemových hmotností PUR pěn.....	51
Graf č. 2 – Přehled stanovených pevností v tlaku při 10% deformaci.....	53
Graf č. 3 – Přehled stanovených součinitelů tepelné vodivosti.....	55
Graf č. 4 – Přehled stanovené dlouhodobé nasákavosti .....	57
Graf č. 5 – Výsledný počet bodů získaný jednotlivými PUR pěny v Sattiho matici .....	69

## SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 – Přehled energetické náročnosti budov [4].....	15
Tabulka č. 2 – Přehled tepelněizolačních materiálů a jejich vlastností [18,19] .....	38
Tabulka č. 3 – Přehled PUR pěn.....	47
Tabulka č. 4 – Přehled naměřených lineárních rozměrů PUR pěn a stanovených objemových hmotností .....	50
Tabulka č. 5 – Přehled stanovených pevností v tlaku při 10% deformaci.....	52
Tabulka č. 6 – Přehled naměřených součinitelů tepelné vodivosti .....	54
Tabulka č. 7 – Přehled naměřených hodnot dlouhodobé nasákavosti .....	56
Tabulka č. 8 – Přehled naměřených hodnot.....	58
Tabulka č. 9 – Sattiho matice .....	59
Tabulka č. 10 – Výpočet a vyhodnocení.....	59
Tabulka č. 11 – Přehled vypočítaných tepelných hodnot páleného zdícího prvku POROTHERM 38 T vyplněného PUR pěnou .....	65

**SEZNAM ZKRATEK**

ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
PUR	polyuretan
PIR	polyisokyanurát
EPS	expandovaný polystyren
XPS	extrudovaný polystyren
ČR	Česká republika