



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# APLIKACE TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ V KONSTRUKCI PASIVNÍCH DOMŮ

APPLICATION OF THERMAL INSULATION MATERIALS IN THE CONSTRUCTION  
OF PASSIVE HOUSES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Hana Kornelová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.

BRNO 2022



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Specializace</b>	bez specializace
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Hana Kornelová
<b>Název</b>	Aplikace tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2021
<b>Datum odevzdání</b>	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

---

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

---

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

#### PODKLADY A LITERATURA

1. NOVOTNÝ Marek, KEIM Lubomír, ŠÁLA Jiří, Svoboda Zbyněk, Tepelné izolace a stavební tepelná technika, ABF nadace pro rozvoj architektury a stavitelství, 1994
2. HUDEC, Mojmir, Pasivní rodinný dům, Grada 2008
3. NAGY, Eugen, Nízkoenergetický a energeticky pasivní dům, Jaga group, 2009.
4. SMOLA, Josef, Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů, Grada, 2011
5. HAZUCHA, Juraj, Konstrukční detaily pro pasivní a nulové domy: doporučení pro návrh a stavbu, Grada Publishing, 2016
6. Van STRAATEN, J.F., Thermal Performance of Building. Elsevier Publ.Co., 1967.
7. HALAHYJA, Martin, CHMÚRNY, Ivan, STERNOVÁ, Zuzana, Stavební tepelná technika: tepelná ochrana budov, Jaga, 1998
7. Tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech

#### ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce bude zaměřena na problematiku konstrukcí pasivních domů z pohledu materiálového řešení skladby konstrukcí. Popsány budou vlastnosti běžně používaných tepelně izolačních materiálů využívaných v oblasti pasivních domů a jejich zabudování v konstrukci včetně posouzení vhodnosti aplikace z pohledu konstrukčního řešení celého systému. Teoreticky budou popsány vybrané skladby konstrukcí se zaměřením na izolační materiály. Pozornost bude dále věnována možnostem kotvení izolačních materiálů a spolupůsobení v konstrukci s nosnými částmi konstrukce, především spolupůsobení při kotvení či na rozhraní rozdílných materiálů konstrukce. Teoreticky budou popsány a vysvětleny vlastnosti ICF systémů, což je stavební systém tvořený polystyrenovými tvarovkami, které vytváří ztracené bednění pro betonáž obvodových stěn. V praktické části bude navázáno na závěry teoretické části a budou stanoveny vybrané fyzikálně mechanické vlastnosti na různých tepelně izolačních materiálech, které jsou používány při výstavbě pasivních domů. Sledována bude například soudržnost na rozhraní dvou použitých materiálů a jejich spolupůsobení. Dále vhodnost a posouzení kotevních plastových částí v různých zabudovaných tepelně izolačních materiálech v konstrukci, se zaměřením na ICF systém, protože ne vždy se jedná o efektivní a funkční řešení systému. Vliv může mít především druh použitého tepelně izolačního materiálu, typ kotevního prvku a kotevní délka.

V diplomové práci bude provedeno hodnocení dosažených výsledků praktické části v kombinaci s teoretickými poznatky. Práce bude zpracována odpovídající a požadovanou formou, v rozsahu 60 až 80 stran.

#### STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

## ABSTRAKT

V této práci jsou popsány základní principy výstavby pasivního domu. Mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných typů tepelných izolačních materiálů a jejich vhodnost použití v konstrukci pasivních budov. Další část je věnována popisu ICF systémů. Cílem praktické části je stanovení základních fyzikálních a mechanických vlastností vybraných tepelněizolačních materiálů a jejich spolupůsobení s plastovými hmoždinkami.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Energetická náročnost budov, pasivní budova, tepelněizolační materiály, ICF systémy

## ABSTRACT

This thesis describes the basic principles of passive house construction. Mechanical and physical properties of selected types of thermal insulation materials and their suitability for use in the construction of passive buildings. The next part is devoted to the description of ICF systems. The aim of the practical part is to determine the basic physical and mechanical properties of selected thermal insulation materials and their interaction with plastic dowels

## KEYWORDS

Energy performance of buildings, passive house, thermal insulation materials, ICF systems

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Hana Kornelová *Aplikace tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů*. Brno, 2021. 101 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Aplikace tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

---

Bc. Hana Kornelová  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Aplikace tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

---

Bc. Hana Kornelová  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D., za jeho ochotu, cenné rady, užitečné připomínky, čas a hlavně trpělivost při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat všem školním pracovníkům za jejich ochotu a čas.

A hlavně mé rodině, přátelům a příteli, kteří při mně stáli a podporovali po celou dobu mého studia.

Děkuji.

# OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. CÍL PRÁCE.....	11
3. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
3.1. Základní rozdělení budov podle energetické náročnosti.....	13
3.2. Pasivní budova.....	15
3.2.1. Požadavky na pasivní budovu.....	15
3.2.2. Návrh pasivní budovy.....	15
3.2.3. Obálka pasivní budovy.....	16
3.3. Tepelně izolační materiály pro pasivní budovy.....	16
3.3.1. Základní sledované parametry.....	17
3.3.2. Rozdělení tepelně izolačních materiálů.....	19
3.3.3. Vybrané organické tepelně izolační materiály.....	20
3.3.3.1. Expandovaný pěnový polystyren.....	21
3.3.3.2. Extrudovaný pěnový polystyren.....	29
3.3.3.3. Polyuretanová izolační pěna.....	30
3.3.4. Vybrané anorganické tepelně izolační materiály.....	32
3.3.4.1. Minerální vlna.....	32
3.3.5. Kovové izolační materiály.....	33
3.3.5.1. Panely plněné plynem.....	33
3.3.5.2. Vakuový izolační panel.....	34
3.3.6. Aerogely.....	35
3.4. Zateplování obvodových konstrukcí u pasivních budov.....	36
3.4.1. Vnitřní zateplovací systém.....	37
3.4.2. Vnější zateplovací systém.....	38
3.4.2.1. Kotvení kontaktního zateplovacího systému.....	39
3.4.3. Sendvičové zdivo.....	40
3.5. ICF systémy.....	40
3.5.1. Výhody a nevýhody ICF.....	41
3.5.2. Systémy uspořádání ICF.....	42
3.5.3. Používané materiály pro výrobu ICF.....	43
3.5.4. Systém spojení ICF.....	44
3.5.5. Výstavba konstrukcí pomocí ICF.....	46
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	48
4.1. Metodika práce.....	48



4.2. I. ETAPA.....	50
4.2.1. Stávající izolant používaný v ICF.....	50
4.2.2. Výběr tepelných izolantů.....	50
4.2.3. Stanovení vybraných fyzikálních vlastností.....	52
4.2.3.1. Objemová hmotnost.....	52
4.2.3.2. Krátkodobá nasákavost.....	54
4.2.4. Stanovení vybraných mechanických vlastností.....	56
4.2.4.1. Stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu.....	56
4.2.4.2. Stanovení pevnosti v tlaku při 10% deformaci.....	60
4.2.4.3. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu.....	63
4.2.5. Shrnutí parametrů tepelných izolantů.....	66
4.3. II. ETAPA.....	67
4.3.1. Mechanické vlastnosti kotvení.....	69
4.3.1.1. Pevnost v tahu za ohybu lepeného spoje.....	69
4.3.1.2. Stanovení síly proti vytažení hmoždiny (odpor proti vytažení).....	73
4.3.1.3. Stanovení maximálního zatížení při porušení plastové spojky.....	79
4.4. III. ETAPA.....	80
4.4.1. Shrnutí.....	80
4.4.2. Návrh a úprava ICF systému.....	82
4.4.2.1. Varianta EPS 250, EPS 200.....	83
4.4.2.2. Varianta EPS 150, PERIMETR 150.....	84
4.4.2.3. Varianta PUR.....	85
4.4.3. Shrnutí úprav ICF systému.....	85
5. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	86
6. ZÁVĚR.....	90
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY.....	93
8. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	99
9. SEZNAM TABULEK.....	100
10. SEZNAM GRAFŮ.....	101
11. SEZNAM ZKRATEK.....	101

## 1. ÚVOD

Růst populace a s tím související globální oteplování vedou k prudkému nárůstu spotřeby energie. Úspora energie se tedy stala strategickým cílem celého světa, který povede k ochraně životního prostředí a zachování přírodních zdrojů. Za největšího světového spotřebitele energie a zároveň producenta emisí skleníkových plynů je považován stavební průmysl. Mezi emise stavebního průmyslu patří nejen ty, které souvisí s výrobou stavebních materiálů, ale také emise související s dopravou, zpracování materiálů, a především emise vznikající při provozu hotového stavebního díla.

Spotřeba energie v budovách na vytápění a chlazení je v mnoha zemích považována za jeden z hlavních zdrojů spotřeby energie. Z tohoto důvodu probíhá neustálé hledání vhodných alternativ k zachování energie a minimalizaci energetických ztrát. Zejména spotřeba energie obytných budov celosvětově roste přibližně o 30 % ročně. Vývoj udržitelných budov se proto stále více stává velmi důležitým úkolem a pasivní dům se ve většině zemí ukázal jako preferovaný koncept pro architekty a předmět pro výzkumníky. Pasivní budovy spotřebují až o 70–80 % méně energie na vytápění než běžné budovy, aby zajistily komfortní vnitřní podmínky, přičemž náklady na jejich výstavbu jsou pouze o 10–15 % vyšší. Dobré porozumění efektivního využití energie v pasivních budovách je tedy zásadní pro stanovení odpovídajících budoucích politik v oblasti energetiky a změny klimatu.

Koncept pasivního domu je velmi jednoduchý. Jde o maximální zamezení úniku tepla směrem do exteriéru, a přitom co nejefektivněji využít tepelné zisky, které jsou k dispozici. Na správnou funkci pasivního domu má zejména vliv odborný návrh a realizace s vysokým stupněm zateplení. Použití tepelně izolačních materiálů v bytových a komerčních stavbách je bráno jako prostředek ke snížení energetických ztrát. Kromě toho použití izolačních materiálů ve stavebnictví nakonec povede ke snížení provozních nákladů na spotřebu elektrické energie pro navrhované chlazení a vytápění. Na druhou stranu se úspory ve spotřebě elektřiny pozitivně projeví na životním prostředí snížením emisí uhlíku, které má za následek vytváření pohodlnější životní a pracovní atmosféry.

## 2. CÍL PRÁCE

V teoretické části diplomové práce je cílem shrnutí aktuální problematiky aplikace tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů, společně s detailním popisem vybraných a běžně používaných izolačních materiálů. Konkrétně by měla být pozornost věnována vlastnostem tepelných izolantů a jejich zabudování v konstrukci, dále pak systémům řešení obvodových plášťů. Měly by být popsány zateplovací systémy z pohledu materiálové skladby a možnosti kotvení tepelně izolačních materiálů. Teoreticky jsou vysvětleny a popsány vlastnosti systému Insulating Concrete Form (ICF).

V praktické části je cílem práce, na základě teoretických poznatků z předchozí části, vybrat vhodné tepelně izolační materiály pro ICF systém a stanovit na nich vybrané fyzikálně mechanické vlastnosti. Po vhodném výběru izolantů, v závislosti na stanovených základních parametrech, provést zkoušky související s možnými úpravami kotvení či hloubky zapuštění kotevního systému v izolantu.

Jedním z cílů praktické části by měl být návrh řešení ICF systému v závislosti na dosažených parametrech tepelně izolačních materiálů a kotevních prvků. Úprava ICF systému je směřována tak, aby ICF systém odolal náporu čerstvého betonu, použité tepelné izolanty by měly být běžně dostupné a z pohledu fyzikálních a mechanických vlastností vhodné.

### 3. TEORETICKÁ ČÁST

V poslední době se na řešení globálních problémů v oblasti klimatických změn a energetiky klade větší důraz než kdy jindy. Mezi hlavní témata patří především negativní působení lidské činnosti na životní prostředí. Konkrétně jde o nadměrnou spotřebu energie, spotřebu vody nebo vznik skleníkových plynů, které úzce souvisí s globálním oteplováním planety. Stavební průmysl je jednou z oblastí, kde je třeba učinit v tomhle ohledu velké změny, které by měly za následek snížení spotřeby energie, spotřeby vody a emisí skleníkových plynů.

Podle Evropské komise obytné domy, v rámci Evropské unie, spotřebovávají až 40 % celkové energie a jsou tak značným zdrojem emisí. Kvůli stoupajícímu počtu světové populace, se tento sektor stále rozrůstá. A lze tedy předpokládat zvyšování spotřeby energie. Z toho důvodu od začátku roku 2020 vstoupila v platnost Směrnice o energetické náročnosti budov z roku 2010. Ta s sebou přináší změny ve stavebním zákoně. Směrnice ve zkratce říká, že rodinné domy postavené od začátku roku 2020 musí mít o pětinu nižší spotřebu energie než rodinné domy již stojící. Měly by tedy splňovat požadavky na maximální spotřebu energie na vytápění pro domy nízkoenergetické nebo dokonce až pasivní. Požadavky na energetickou náročnost jsou uvedeny ve vyhlášce č. 264/2020 Sb., o energetické náročnosti budov. Oproti stojícím rodinným domům, bude potřeba ke splnění těchto požadavků upravit skladbu obvodové konstrukce, tedy zvolit vhodné materiály o dostatečné kvalitě a tloušťce[1–5].

Energetická náročnost budovy kvantifikuje veškeré energie spotřebované při provozu budovy – jedná se o energii na vytápění, přípravu teplé vody, chlazení, úpravu vzduchu větráním a klimatizací a energii na osvětlení [6].

K vyhodnocení energetické náročnosti budovy slouží průkaz energetické náročnosti budov (dále jen „PENB“). PENB udává energetickou náročnost stanovenou výpočtem. Výpočet zahrnuje veškeré energie vstupující do budovy a spotřebované při jejím provozu. Tedy energie na vytápění, přípravu teplé vody, chlazení, úpravu vzduchu, větráním a klimatizací a energii na osvětlení. Celkové množství roční dodané energie je děleno celkovou podlahovou plochou budovy a výsledkem je měrná roční spotřeba energie na metr čtvereční za rok – vyjádřena v kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Průkaz lze zpracovat pro jakoukoliv budovu či její ucelenou část. Podle výsledné hodnoty je budova zařazena do příslušné třídy v rozsahu A–G, jak je uvedeno v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Klasifikační třídy hodnocení energetické náročnosti budovy, měrné spotřeby energie udávány v kWh/(m<sup>2</sup>·rok) [7]

Druh budovy	Třída energetické náročnosti budovy spotřeba energie v kWh/(m <sup>2</sup> ·rok)						
	A	B	C	D	E	F	G
	Mimořádně úsporná	Velmi úsporná	Úsporná	Méně úsporná	Nehospodárná	Velmi nehospodárná	Mimořádně nehospodárná
Rodinný dům	< 51	51-97	98-142	143-191	192-240	241-286	> 286
Bytový dům	< 43	43-82	83-120	121-162	163-205	206-245	> 245
Hotel a restaurace	< 102	102-200	201-294	295-389	390-488	489-590	> 590
Administrativní	< 62	62-123	124-179	180-236	237-293	294-345	> 345
Nemocnice	< 109	109-210	211-310	311-415	416-520	521-625	> 625
Vzdělávací zařízení	< 47	47-89	90-130	131-174	175-220	221-265	> 265
Sportovní zařízení	< 53	53-102	103-145	146-194	195-245	246-297	> 297
Obchodní	< 67	67-121	122-183	184-241	242-300	301-362	> 362

Od začátku roku 2020 by na energetickém štítku rodinného domu měla být třída energetické náročnosti budovy minimálně B, tedy velmi úsporná. Domy se aktuálně pohybují v rozmezí 30–70 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Energetická náročnost pasivního domu musí být menší než 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) [1,4,7].

### 3.1. Základní rozdělení budov podle energetické náročnosti

Podle vypočtené hodnoty energetické náročnosti se budovy řadí do pěti skupin, do skupiny standardní, nízkoenergetické, pasivní, nulové a aktivní budovy.

Typické znaky pro standardní budovu jsou nízké náklady při výstavbě, větrání netěsnícími okny a produkce velkého množství emisí zastaralou otopnou soustavou. Domy bývají nejčastěji nezateplené a špatně izolované. To je důvod vysoké roční plošné spotřeby energie na vytápění, dosahuje hodnot až 210 kWh/(m<sup>2</sup>·rok).

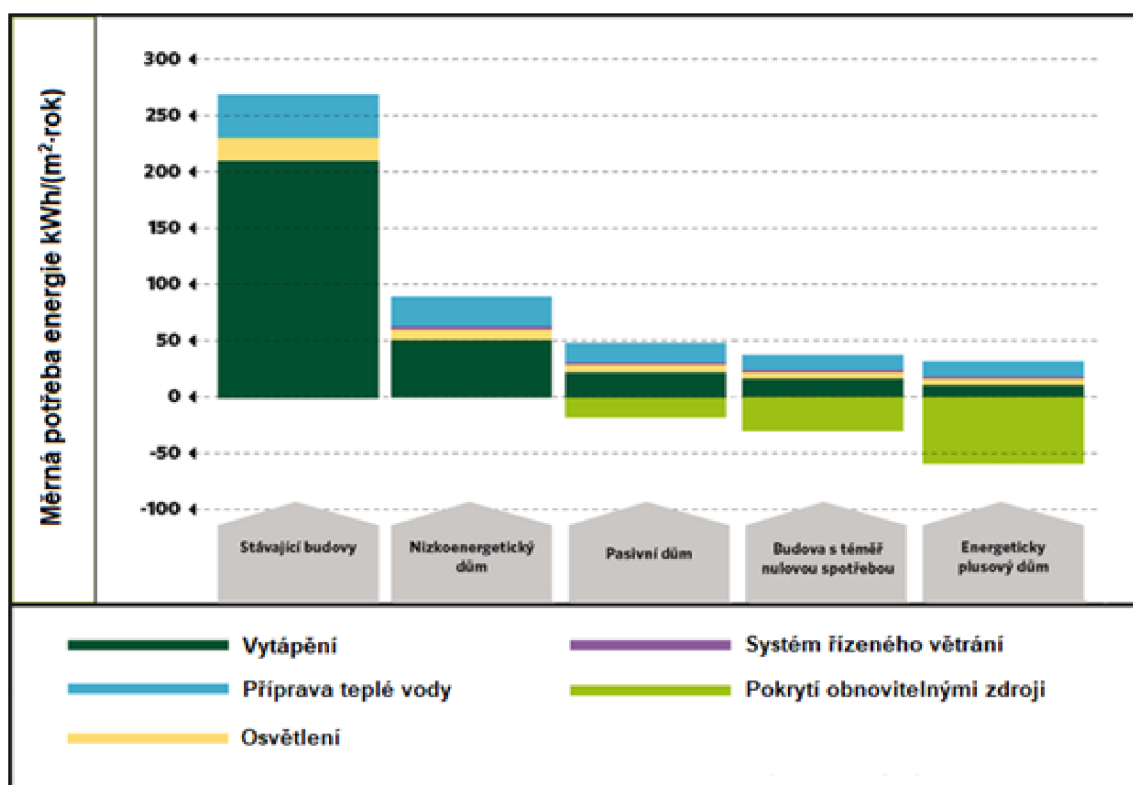
Aby budova mohla být označena za nízkoenergetickou, musí roční plošná spotřeba energie dosahovat maximálně hodnoty 50 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Měla by být postavena podle kritérií zaměřených na minimalizaci energetických ztrát. Tedy zateplení konstrukce, využívání obnovitelných zdrojů, řízené strojní větrání a otopná soustava o nižším výkonu.

Pasivní budova je přísnější formou budovy nízkoenergetické. Hodnota roční plošné spotřeby energie se musí vlézt pod 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Maximálně využívá obnovitelné zdroje energie, je kvalitně zateplená a díky řízenému strojnímu větrání zajišťuje pohodlné vnitřní klima přes celý rok, bez nutnosti otevírat okna [1,8–10].

Budova nulová se s roční spotřebou energie na vytápění musí vlézt pod 5 kWh/(m<sup>2</sup>-rok). Její parametry jsou minimálně na úrovni pasivních domů. Celková roční spotřeba energie je stejná, nebo dokonce nižší než energie přijatá z obnovitelných zdrojů. Využívá velké množství fotovoltaických panelů [1,11,12].

Budova plusová neboli aktivní, na svůj provoz nevyužívá energii získanou z fosilních paliv nebo jadernou energii. Z obnovitelných zdrojů dokáže sama vyrobit tolik energie, kolik spotřebuje, eventuálně o něco víc. Přebytky následně ukládá pro pozdější využití [1,13].

Porovnání jednotlivých typů budov z ohledu energetické náročnosti je znázorněno na obrázku č. 1. Pokles oproti standardní budově je evidentní u všech ukazatelů spotřeb energie. Největší pokles je patrný u měrné potřeby energie na vytápění, u pasivních budov až o 90 % oproti budovám standardním. Ne tak výrazný pokles je zřejmý i u ostatních ukazatelů, hlavně díky úspornějším elektrospotřebičům.



Obrázek 1: Porovnání energetické náročnosti jednotlivých typů budov [14]

## 3.2. Pasivní budova

Označení „pasivní budova“ vyplývá z principu využívání pasivních tepelných zisků v budově. Jde o vnější zisky ze slunečního záření procházejícího okny a vnitřní zisky z tepla vyzařovaného osobami a spotřebiči. Měrná potřeba energie má být menší než 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok).

Koncept pasivního domu je velmi jednoduchý. Jde o maximální zamezení úniku tepla směrem do exteriéru, a přitom co nejefektivněji využít tepelné zisky, které jsou k dispozici. Tím lze dosáhnout výrazného snížení výkonu zdroje tepla, objemu technologií i celkové závislosti objektu na dodávkách energie [1,15,16].

### 3.2.1. Požadavky na pasivní budovu

Pasivní budova musí splňovat specifické požadavky:

- měrná roční potřeba energie na vytápění je maximálně 15 kWh/(m<sup>2</sup>·rok),
- celková potřeba primární energie spojená s provozem budovy včetně domácích spotřebičů je nižší než 120 kWh/(m<sup>2</sup>·rok),
- neprůvzdušnost obálky budovy  $n_{50}$  je ověřována tlakovou zkouškou a nesmí překročit hodnotu 0,6/hod, což znamená, že při přetlaku nebo podtlaku 50 Pa se nesmí za hodinu vyměnit netěsnostmi v obálce více než 60 % vnitřního objemu vzduchu.

Po splnění všech požadavků je vydán certifikát Passivhaus Institutu, který potvrzuje pasivní standard budovy [17–19].

### 3.2.2. Návrh pasivní budovy

Vhodná orientace budovy na pozemku je velmi důležitá. Ideální pozemek by měl umožňovat nestíněné umístění domu a otočení hlavní fasády s největší prosklenou plochou od jihovýchodu přes jih po jihozápad.

Zabránit únikům tepla je podstatou návrhu a stavby pasivního domu. Při navrhování pasivního domu je zásadou jednoduchý tvar s co nejmenší plochou stěn. Důležitá je kompaktnost domu bez složitých výstupků, výčnělků a členitostí, ve kterých vznikají tepelné mosty. Z praktického hlediska je tedy nejvhodnějším a nejčastějším tvarem krychle nebo ležatý kvádr orientován delší stranou k jihu.

U pasivních domů je důležitý jejich vysoký stupeň zateplení, který zajišťuje jak tepelnou pohodu, tak vzduchotěsnou obálku budovy bez tepelných mostů. Díky vysokému stupni zateplení a nepřetržitému větracímu systému se zpětným získáváním odpadního tepla, by měly konstrukce budov zůstat suché a bez poruch [1,20,21].

### **3.2.3. Obálka pasivní budovy**

Vnější obálka pasivního domu musí být provedena vzduchotěsně a bez tepelných mostů. Je nutné, aby plynule navazovala mezi střechou, stěnami, podlahou a základy. U všech těchto konstrukcí musí být splněno kritérium pasivního domu, tj. součinitel prostupu tepla  $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Výsledkem je pak tepelná pohoda a snížení nákladů na vytápění. Ve správně navrženém a postaveném pasivním domě nevznikají tepelné mosty. Konstrukce tedy není oslabena a nedochází k úniku tepla.

Obálka pasivního domu je podstatný prvek a je tedy potřeba zvolit kvalitní a parametrově vyhovující tepelně izolační materiál. Důležité je i samotné provedení zateplení, napojení či kotvení izolantů. Pro dosažení hodnot součinitele prostupu tepla na úrovni pasivního domu je nutné zaizolovat dům tloušťkou izolantu i více než 30 cm a i na místech, které se izolují jen zřídka.

Spotřeba energie je jedním ze závažných problémů moderního života. Většina energie, kterou spotřebujeme pochází z fosilních paliv, která způsobují značné znečištění životního prostředí. Úspora energie je udržována snížením spotřeby energie v budovách. Existuje několik způsobů, jak snížit tepelné ztráty, jedním a zároveň nejčastějším z nich je použití optimální tloušťky tepelné izolace na obvodové stěny. Izolace stěn a střech může přinést úspory energie až 77 % [1,19].

### **3.3. Tepelně izolační materiály pro pasivní budovy**

Izolace v budovách je považována za jednoduchou, ale vysoce energeticky účinnou techniku, kterou lze použít v obytném, komerčním a průmyslovém sektoru. Tepelný izolant se vyznačuje vysokým tepelným odporem, který vykazuje schopnost snižovat rychlost tepelného toku. Výsledkem je, že izolace budovy je schopna udržet teplo nebo chlad v domě a zabránit tepelnému toku do okolí. Další velkou výhodou zateplení budovy je úspora nákladů. Díky většímu množství energie ušetřené aplikací izolace, než je energie potřebná k výrobě samotného izolačního materiálu. Využití tepelné izolace navíc přináší další výhody, včetně protipožární ochrany, osobního pohodlí, regulace kondenzace a regulace hluku.

Funkce tepelné izolace spočívá zpravidla na rozhraní interiéru a exteriéru, z důvodu snížení prostupu tepla, a to v obou směrech v závislosti na podmínkách a požadavcích konstrukce či budovy. Hlavním úkolem tepelné izolace je tedy po celý rok zajistit v interiéru uživatelem definované pobytové teploty, a to při nejnižší možné spotřebě energie za zimní vytápění a letní ochlazování. Tepelné izolace tvoří bariéru, která brání prostupu tepla stěnami, podlahami, stropy nebo střechami. Udržují nejen teplo v domě, ale také zabraňují přehřívání interiéru v letním období.



### 3.3.1. Základní sledované parametry

Dostupných tepelných izolací je nepřehledné množství a zvolit tu správnou pro danou budovu je obtížné. Z tohoto důvodu se na tepelných izolacích sleduje několik důležitých parametrů, které určují jejich technické vlastnosti, možnosti použití a s tím související vhodnost pro konkrétní aplikaci v konstrukci.

#### Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/(m·K)] patří k nejdůležitějším tepelně izolačním parametrům u stavebních materiálů, kterým se posuzují jejich tepelně technické vlastnosti. Charakterizuje schopnost látek vést teplo. Vyjadřuje množství tepla, které projde za ustálené teploty a času plochou, o jednotkové tloušťce při rozdílu teplot 1 K. Čím je tedy součinitel tepelné vodivosti menší, tím materiál hůře vede teplo, lépe izoluje. Problémem je, že velikost součinitele tepelné vodivosti mnohdy souvisí s objemovou hmotností, kdy se snižující se tepelnou vodivostí roste objemová hmotnost a naopak. Snahou je dosáhnout co nejnižšího součinitele tepelné vodivosti, při nejnižší objemové hmotnosti. Často je tedy hledán vzájemný kompromis a kompromis s ostatními vlastnostmi.

$$\lambda = \frac{q}{-\text{grad}(\theta)}$$

kde:

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

$q$ ...hustota tepelného toku [W/m<sup>2</sup>],

$\text{grad}(\theta)$ ...gradient teploty [K/m].

#### Objemová hmotnost

Objemová hmotnost  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] se definuje jako poměr hmotnosti tělesa ku objemu tělesa včetně póru, mezer a dutin. Tedy objem stanovený z tzv. vnějších rozměrů. Objemová hmotnost je veličina závislá na vlhkosti materiálu, kdy s rostoucí vlhkostí roste i objemová hmotnost. Při výrobě a vývoji tepelných izolantů je snaha o dosažení nejnižší objemové hmotnosti, aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování konstrukce a nebyl problém s kotvením. Se snižováním objemové hmotnosti přichází i snížení pevností. Je tedy důležité si uvědomit, co je od daného izolantu očekáváno a v jaké části konstrukce bude umístěn.

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

kde:

$\rho$ ...objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>],

$m$ ...hmotnost tělesa [kg],

$V$ ...objem tělesa [m<sup>3</sup>].

## Tepelný odpor

Tepelný odpor  $R$  [(m<sup>2</sup>·K)/W] je tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky. Udává míru odporu proti pronikání tepla. Platí, že čím je hodnota tepelného odporu vyšší, tím lépe brání prostupu tepla. V praxi jde o nalezení kompromisu mezi tloušťkou izolantu a jeho tepelnou vodivostí.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

kde:

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

$d$ ...tloušťka vrstvy [m],

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

## Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla  $U$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] určuje, k jakým tepelným ztrátám skrze danou konstrukci dochází, celkovou výměnu tepla mezi prostory oddělenými od sebe stavební konstrukcí. Vyjadřuje schopnost stavebního materiálu či celé skladby konstrukce tepelně izolovat. Čím je tato hodnota vyšší, tím horší tepelně izolační vlastnosti konstrukce má. Výrobci u svých výrobků uvádějí součinitel prostupu tepla.

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

kde:

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

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

## Třída reakce na oheň (ČSN EN 13 501–1)

Reakce na oheň je odezva výrobku na oheň, kterému je vystaven. Nynější označení „Třída reakce na oheň“ nahradilo dřívější pojem „Stupeň hořlavosti“. Z hlediska hořlavosti jsou stavební hmoty řazeny do sedmi tříd hořlavosti. Od nehořlavých výrobků A1, A2 až po výrobky F, které nelze zařadit.

## Životnost

Životnost je doba, po kterou by výrobek měl vyhovět požadavkům provozu v předpokládaných podmínkách. Vyjadřuje se zpravidla počtem roků. Základní podmínkou dlouhé životnosti je způsob a kvalita provedení s pravidelnou údržbou a úpravami. Při rychlé ztrátě životnosti, rychlém stárnutí, ztrácí materiál své izolační vlastnosti a přestává plnit svou funkci. Což je zvlášť u nízkoenergetických budov nepřijatelné.

### 3.3.2. Rozdělení tepelně izolačních materiálů

K zateplení pasivních domů lze použít mnoho typů tepelných izolací. Jednotlivé typy se od sebe liší materiálovou bází, funkcí, použitím, výrobním postupem nebo strukturou. Kromě charakteru izolantů jsou od sebe vzájemně rozlišovány i na základě jejich tepelně izolačních parametrů.

Velké množství izolačních materiálů je vyráběno na bázi polymerních materiálů, plniv a dalších přísad, tj. kompozitních materiálů. Existuje mnoho typů stavebních tepelných izolací, které v zásadě spadají pod následující základní materiály a kompozity: anorganické materiály (např. skelná a minerální vlna, strusková vlna nebo keramické produkty) a organické materiály (např. celulóza, bavlna, dřevo, polystyren, a další polymery). Mechanické vlastnosti však lze dále zlepšit nebo upravit přidáním anorganických plniv pro zvýšení pevnosti izolantu. Zvýšení pevnosti má však za následek zvýšení objemové hmotnosti, která s sebou nese vyšší součinitel tepelné vodivosti.

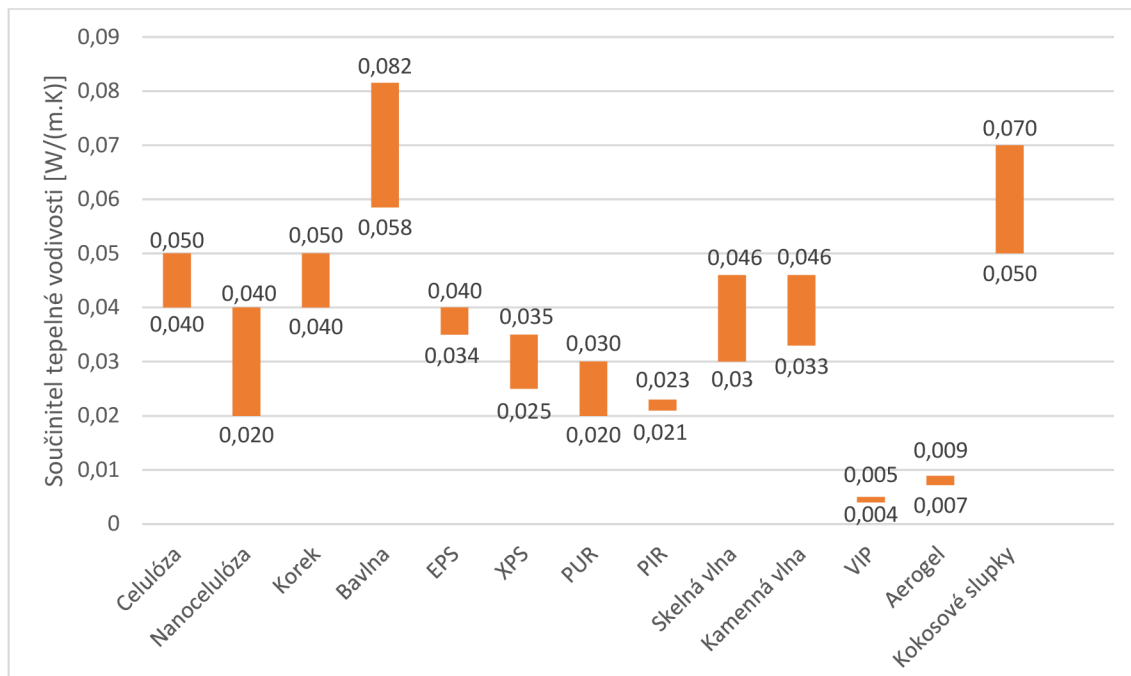
Kromě tradičních, výše zmíněných, tepelně izolačních materiálů existují nejmodernější tepelně izolační materiály, jako jsou vakuové izolační panely, plynem plněné panely a aerogely, které jsou ve fázi výzkumu a vývoje. Avšak jak tradiční, tak i nejmodernější tepelně izolační materiály trpí různými obtížemi a omezeními, jako jsou nízké mechanické vlastnosti, vysoká cena nebo toxicita. Dnešním trendem je vývoj konstrukčních materiálů s nízkou tepelnou vodivostí při zachování většiny mechanických schopností konstrukčních materiálů. Snížení nákladů na tepelně izolační materiály lze dosáhnout použitím přírodních materiálů a/nebo odpadů jako součástí hlavní matrice, což rovněž přispěje ke snížení emisí CO<sub>2</sub>.

Podle materiálové báze lze tepelné izolace rozdělit do několika skupin, viz tabulka č. 2. Dělí se na organické, anorganické, kovové materiály, materiály z odpadních materiálů a aerogely [22,23].

Tabulka 2: Zařazení tepelných izolantů do materiálových skupin [22]

IZOLAČNÍ MATERIÁLY		
Organické	vláknité	celulóza, nanocelulóza, bavlna, dřevo
	buněčné	polystyren, polyethylen, polyuretan, polyisokyanurát
Anorganické	vláknité	skelná vlna, kamenná vlna, strusková vlna
	buněčné	křemičitan vápenatý, pojený perlit
Kovové	panely plněné plynem GFP	
	vakuové izolační panely VIP	
Z odpadních materiálů	kokosové slupky, textilní odpad, gumový odpad, plastový odpad	
Aerogely		

V grafu č. 1 je zobrazeno porovnání rozptylu součinitele tepelné vodivosti vybraných tepelných izolací. Z něj vyplývá, že izolace přírodního a odpadního původu se s moderními materiály nemohou rovnat. Jejich výhodou je však jejich malý negativní vliv na životní prostředí, který je zvláště v dnešní době drží na trhu.



Graf 1: Orientační porovnání rozptylu součinitele tepelné vodivosti vybraných tepelných izolantů [22]

### 3.3.3. Vybrané organické tepelně izolační materiály

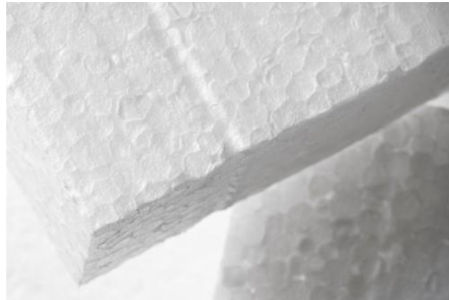
O organické izolační materiály roste zájem kvůli jejich atraktivitě. Jsou obnovitelné, recyklovatelné, netoxické, šetrné k životnímu prostředí a nevyžadují složité a energeticky náročné výrobní technologie. Vláknité organické izolační materiály pocházejí z přirozené vegetace a obnovitelných zdrojů, jako je dřevitá vlna, celulóza, expandovaná pryž, dřevitá vlákna, ovčí vlna atd.

Organické buněčné izolační materiály, díky svým vlastnostem, přírodnímu původu a ceně, jsou nejpoužívanější a na našem trhu nejdostupnější. Patří k nim expandovaný pěnový polystyren, extrudovaný pěnový polystyren, polyethylen, polyuretanová pěna, polyisokianurátová pěna atd. [22].

Dále budou uvedeny nejčastěji používané organické tepelné izolace při výstavbě pasivních domů.

### 3.3.3.1. Expandovaný pěnový polystyren

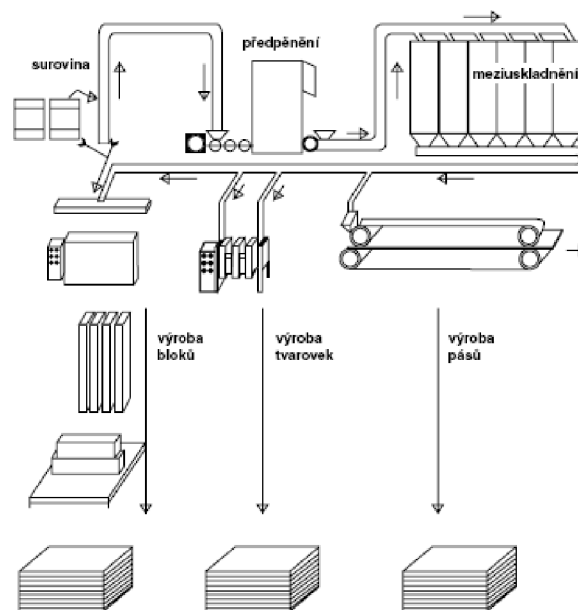
Expandovaný pěnový polystyren, známý pod zkratkou EPS (obrázek č. 2), se používá pro tepelnou a zvukovou izolaci nebo obaly. Vykazuje vynikající technické vlastnosti, jako je lehkost, všestrannost, energetická účinnost a nákladovost. Z toho důvodu se EPS hojně používá ve stavebnictví při zateplování budov.



Obrázek 2: Expandovaný pěnový polystyren [34]

Základní surovinou pro výrobu EPS je monomer styren  $C_8H_8$ , ze kterého se polymerací vyrábí zpěňovatelný polystyren ve formě perlí. Tyto perle obsahují zpravidla 6-7 % pentanu  $C_5H_{12}$  jako nadouvadla. Styren i pentan se běžně vyskytují v přírodě, pentan vzniká v zažívacích systémech zvířat nebo při rozkladu rostlinného materiálu a styren se nachází v mnoha potravinách. Pro průmyslové využití se však vyrábějí z ropy.

Výroba pěnového polystyrenu probíhá v zásadě ve třech stupních (obrázek č. 3): předpěnění, meziuskladnění a výroba bloků, desek, tvarovek, popřípadě pásů.



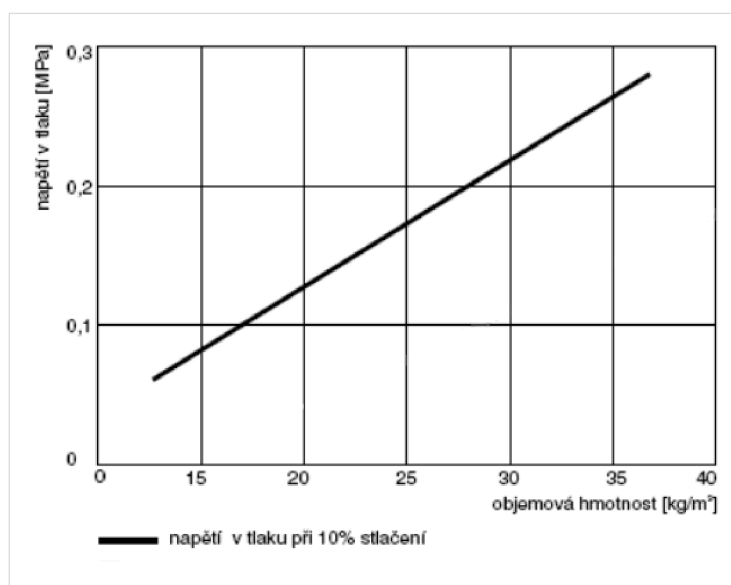
Obrázek 3: Schéma výroby expandovaného pěnového polystyrenu [24]

Zpěňovatelný polystyren se předpěňuje působením syté vodní páry v předpěňovacích zařízeních. Během tohoto procesu zvětší perle svůj objem na dvacet až padesátí násobek původního objemu a uvnitř každé perle vznikne buněčná struktura. Výsledná sytná hmotnost je dána teplotou páry a dobou jejího působení na perle. Tato sytná hmotnost musí být stejná jako požadovaná objemová hmotnost vyráběného EPS. Ta se zpravidla pohybuje mezi 10–35 kg/m<sup>3</sup> a má velký vliv na většinu vlastností konečného výrobku. Jelikož má EPS velkou roztažnost, vyrábí se tzv. stabilizovaný polystyren, který se nechá odležet na několik týdnů a po dosažení největších objemových změn se teprve začne řezat.

Meziuskladnění probíhá v provzdušňovaných silech. V čerstvě vypěněných perlích se totiž během chlazení vytvoří podtlak, způsobující vysokou citlivost perlí na mechanické poškození a znemožňující jejich bezprostřední další zpracování. Difúzí vzduchu do buněk perlí se podtlak vyrovnává, perle získávají větší mechanickou pružnost a zlepšuje se jejich další zpracovatelnost. Perle se současně i suší.

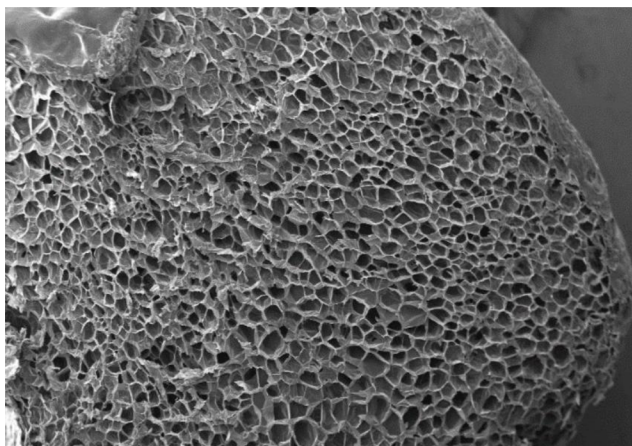
Předpěněné a vyzrálé perle se pak zpracovávají na konečné výrobky. Tepelně izolační desky se vyrábí z bloků, které jsou následně řezány na desky [1,22,24].

Expandovaný pěnový polystyren se označuje zkratkou EPS a číslem, které vyjadřuje napětí v kPa při 10% stlačení. Na trhu jsou dostupné ve formě EPS 70, EPS 100, EPS 150, EPS 200 a EPS 250. Pevnost v tlaku při 10% stlačení dosahuje 50–250 kPa a je závislá na objemové hmotnosti (obrázek č. 4. Čím vyšší objemová hmotnost, tím vyšší hutnost materiálu a tím vyšší pevnost v tlaku. Pevnost v tahu, důležitá při použití na fasádách, dosahuje až 150 kPa.



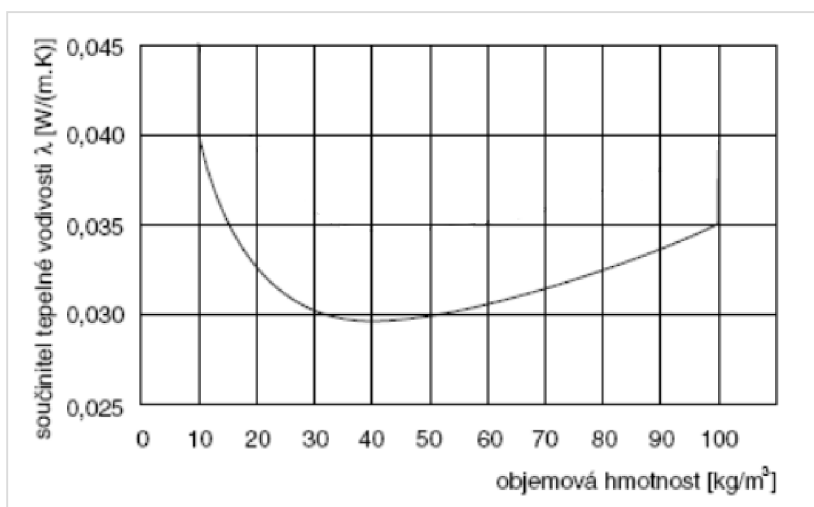
Obrázek 4: Závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti expandovaného pěnového polystyrenu [24]

Nejdůležitější vlastností EPS je nízký součinitel tepelné vodivosti, pohybuje se v rozmezí od 0,030 do 0,040 W/m·K. Takhle nízká hodnota tepelně izolačních vlastností EPS spočívá v jeho struktuře (obrázek č. 5), která je tvořena mnoha uzavřenými buňkami tvaru mnohostěnu. Tyto buňky obsahují vzduch, který má nepatrnou tepelnou vodivost. Pěnová hmota obsahuje asi 98 % vzduchu a jen 2 % polystyrenu. Vzduch v buňkách způsobuje to, že se tepelně izolační vlastnosti s postupujícím časem nezhoršují. Jak to bývá u řady jiných izolantů, které obsahují jiné plyny [29–31].



Obrázek 5: Struktura EPS pod elektronovým mikroskopem [25]

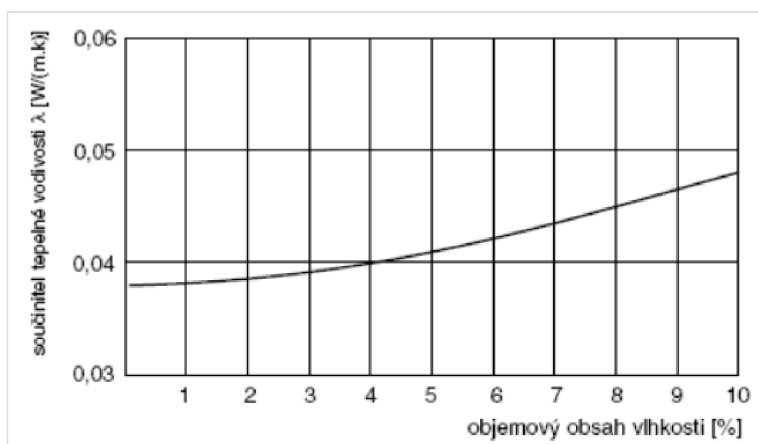
Součinitel tepelné vodivosti je však ovlivňován mimo jiné i objemovou hmotností. EPS má nejnižší tepelnou vodivost při objemové hmotnosti od 30 do 50 kg/m<sup>3</sup>, tomu odpovídá EPS 200 a EPS 250. Směrem k nižším i vyšším objemovým hmotnostem součinitel tepelné vodivosti roste, viz obrázek č. 6. Důvodem je sálavé šíření tepla.



Obrázek 6: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti expandovaného polystyrenu [24]

K zateplování budov se však používají EPS s nejnižší objemovou hmotností, a tedy vyšším součinitelem tepelné vodivosti, EPS 70 a EPS 100. Použití polystyrenů s vyšší objemovou hmotností ve výstavbě je však například u zateplené fasády neekonomické vzhledem k více než dvojnásobné ceně za materiál a nutnosti vyšší míry kotvení, nehledě na ochranu životního prostředí a surovinových zdrojů.

Na součinitel tepelné vodivosti EPS má vliv i obsah vlhkosti. S každým objemovým % obsahu vlhkosti roste součinitel tepelné vodivosti o 3–4 %, obrázek č. 7. Nasákavost při dlouhodobém ponoření nepřesahuje 5 %. Z toho je zřejmé, že i když je EPS v důsledku havárie vystavena trvalému působení vody, její tepelně izolační vlastnosti se zásadně nesníží [1,24,32].

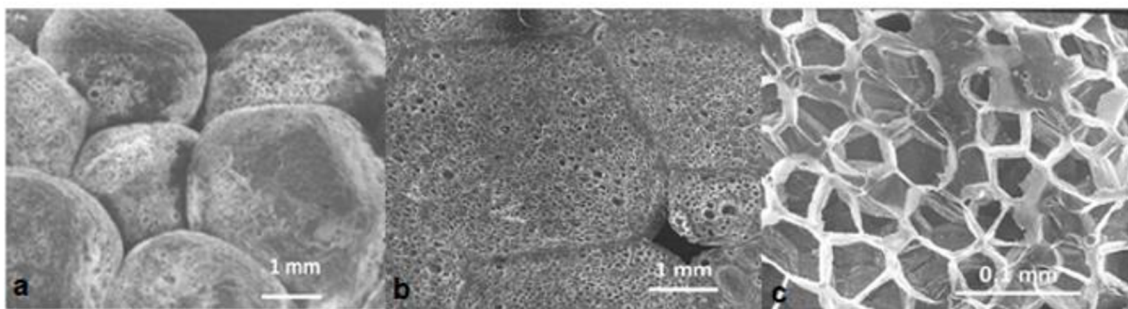


Obrázek 7: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemovém obsahu vlhkosti na expandovaného pěnového polystyrenu [24]

Při správném zacházení zůstávají vlastnosti EPS nezměněny a jeho životnost uvnitř stavebních konstrukcí je stejná jako životnost ostatních částí konstrukce. Problém nastává v momentě, kdy na nechráněné polystyrenové desky působí déle ultrafialové záření přirozeného slunečního světla. Povrchová vrstva zežloutne a degraduje. Ve stavebním průmyslu se však EPS bez krycích vrstev neužívá. Tohle působení je tedy z hlediska konečného použití nepodstatné a nemá vliv na základní fyzikální vlastnosti materiálu. Dlouhodobé skladování na slunci může však způsobit problémy s přilnavostí lepidel při výstavbě ETICS v důsledku degradace povrchu [24].

Expandovaný polystyren je lehký, bílý, pěnový materiál. Je dobrým tepelným i zvukovým izolantem. Vyznačuje se velmi nízkou objemovou hmotností od 10 do 35  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Ta je způsobena finální fází výroby, kdy kuličky polystyrenu nedolehnou zcela k sobě a zůstávají mezi nimi vzduchové póry. Lze tedy říct, že jeho pórová struktura (obrázek č. 8) není dostatečně hustá, aby zastavila přenos tepla sáláním. Má však za následek horší mechanické vlastnosti [26,71].



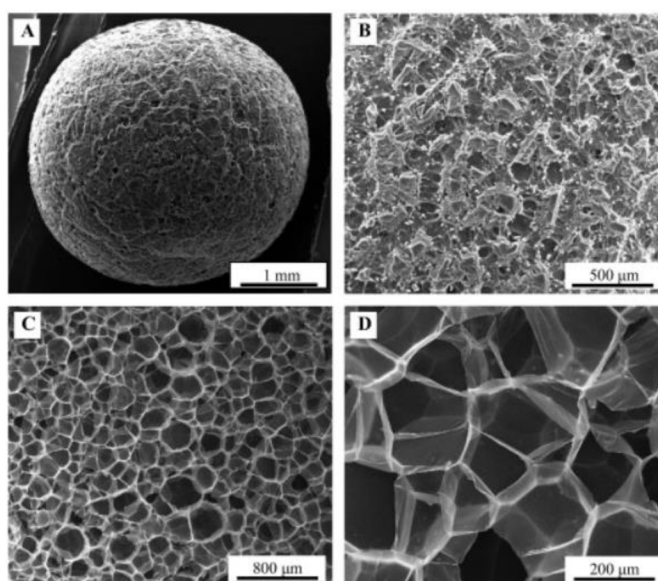


Obrázek 8: Struktura EPS perle (a); příčný řez perlí (b); uzavřené buňky (c) [26]

EPS se díky jeho ultralehké hmotnosti, nízké tepelné vodivosti a svojí minimální nepropustností využívá hojně jako recyklované lehké kamenivo při výrobě lehkých betonů a malt. Přidává se do betonu pro snížení hmotnosti a tepelné vodivosti. Studie ukázaly, že objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu, statický modul pružnosti a součinitel tepelné vodivosti klesají s rostoucí dávkou EPS ve směsi. Výsledky také ukázaly, že navrhované vyrobené plné cihly z EPS mají dostatečnou pevnost pro nenosné aplikace a mají vynikající tepelné vodivosti [72].

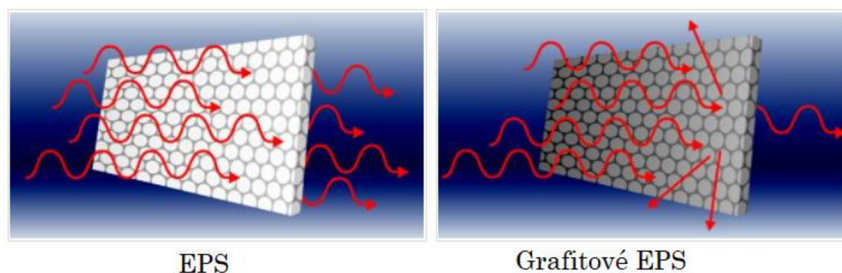
Ke zlepšení mechanických vlastností a snížení součinitele tepelné vodivosti se polystyrenová matrice obohacuje o přídavek grafitových nanočástic, které zde účinkují jako mikroskopické absorbéry a reflektory, odrážejí a pohlcují energii záření. Vkládáním polymerů do mezivrstvy grafitu roubovací reakcí vzniká grafitový expandovaný pěnový polystyren neboli šedý polystyren.

Díky nanotechnologii je možné vytvořit velmi jemné částice grafitu a současně zajistit jejich rozmístění ve vzdálenosti do 10  $\mu\text{m}$  od sebe tak, aby se navzájem nedotýkaly (obrázek č. 9).



Obrázek 9: Mikrostruktura grafitového expandovaného pěnového polystyrenu [28]

Tím se stane membrána polystyrenové vypěněné buňky obtížně prostupná pro dlouhovlnné tepelné záření (obrázek č. 10). Zároveň s tím se zvýší odrazivost prostředí z 0 % na cca 20 %, grafit v podstatě vytváří z membrán polystyrénových kuliček tepelná zrcadla. Tím, že se částice nedotýkají, nezvýší se výrazně tepelná vodivost materiálu. S běžně rozemletým grafitem by odrazivou, a přitom nevodivou mříž nebylo možné realizovat. Vzhledem k velikosti a rozmístění částic bez dotyku, se sníží sálavý transport tepla a zároveň se nezvyšuje průchod tepla vedením [35].



Obrázek 10: Průchod tepelného záření v EPS a v Grey EPS [27]

Do materiálu je přidána přísada z grafitových nanočástic, díky níž se významně snižuje sálavá složka přenosu tepla v izolačním materiálu. Jde o novou generaci EPS, která se od běžného EPS liší šedivým vzhledem (obrázek č. 11) a lepšími tepelně izolačními vlastnostmi.



Obrázek 11: Expandovaný pěnový polystyren s přídavkem grafitu [33]

Výsledkem přidání grafitových nanočástic do bílého polystyrenu je šedý expandovaný polystyrén, který při objemové hmotnosti pouhých  $15 \text{ kg/m}^3$  dosahuje součinitele tepelné vodivosti  $0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Stejnou hodnotu celkového součinitele tepelné vodivosti má běžný EPS s více než dvojnásobnou objemovou hmotností ( $35 \text{ kg/m}^3$ ). Hlavní výhodou grafitového polystyrenu je tak snížení tepelné vodivosti při zachování tloušťky izolantu. V ostatních vlastnostech se téměř shoduje s klasickým EPS [27,28].

Stejným problémem jako u bílého EPS je vliv ultrafialového záření. U šedého EPS působení slunečního záření a nepříznivých podmínek napomáhají k destruktivním procesům způsobujících geometrické změny a deformaci prvků (obrázek č. 12) [33].



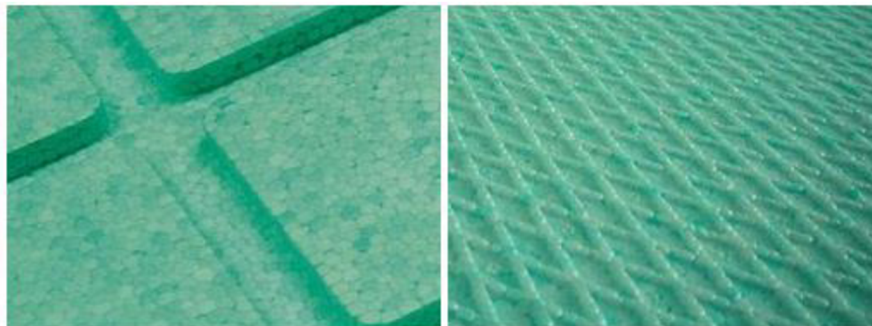
*Obrázek 12: Ztráta rozměrové stability grafitových polystyrenových desek při zateplovacích pracích [33]*

Při makroskopickém (obrázek č. 13) pozorování lze sledovat zóny tání, které mají jak lokální charakter, tj. skvrny, tak i povrchový charakter. Dochází také k deformaci a smrštění polystyrenu [33].



*Obrázek 13: Povrch grafitového polystyrenu narušený vlivem slunečního záření [33]*

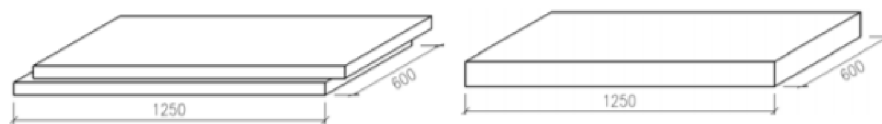
Další variantou, jak vylepšit určité vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu, je výroba tzv. perimetru. Jde o tepelně izolační desky s uzavřenou povrchovou strukturou vyráběné stejně jako klasický EPS. S tím rozdílem, že zpěňování perli zpěňovatelného polystyrenu probíhá přímo ve formách.



Obrázek 14: Profilovaný povrch Perimetru [36]

Tato technologie umožňuje intenzivnější svaření perli a tím dosažení nižší nasákavosti než u běžného bílého či šedého EPS. Dlouhodobá nasákavost se pohybuje do maximálně 3 % objemu, platí i v případě desek s oříznutými okraji. Vyznačují se vysokou mrazuvzdorností a pevností v tlaku, která dosahuje až 200 kPa při 10 % stlačení a až 250 kPa u pevnosti v tahu za ohybu. Objemová hmotnost se pohybuje od 20 do 35 kg/m<sup>3</sup>. Součinitel tepelné vodivosti vykazuje hodnoty kolem 0,035 W/(m·K). Stejně jako u klasického nebo šedého EPS, se mění v závislosti na objemové hmotnosti. S rostoucí objemovou hmotností klesá hodnota součinitele tepelné vodivosti.

Díky své nízké dlouhodobé nasákavosti jsou vhodné jako izolační vrstvy soklových částí budov, podzemních částí budov a základů, stěn a bazénů, plochých střech a teras, kde jsou konstrukce namáhány stékající a odšťikující vodou, nebo vlhkostí přilehlého pórovitého prostředí. Desky bývají opatřeny jemnou profilací pro zvýšenou přídržnost lepidel a tmelů. Vyrábějí se hladké s polodrážkou nebo s hladkou hranou (obrázek č. 15) [36].



Obrázek 15: Tvar desky Perimetru s polodrážkou (vlevo), s hladkou hranou (vpravo)

### 3.3.3.2. Extrudovaný pěnový polystyren

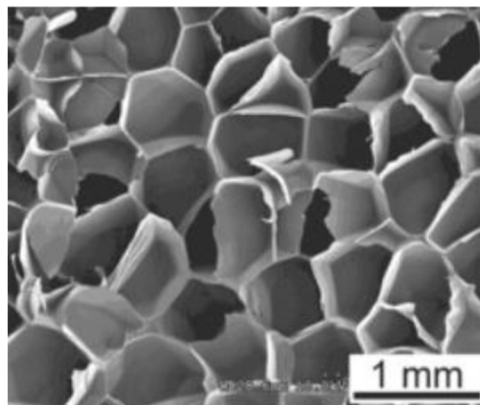
Extrudovaný pěnový polystyren, známý pod zkratkou XPS (obrázek č. 16), se používá hlavně pro tepelnou izolaci. Je nenasákavý, odolný vůči zemině a plísním, má vysokou pevnost v tlaku při 10% stlačení a především nízký součinitel tepelné vodivosti.



Obrázek 16: Extrudovaný pěnový polystyren [37]

Extrudovaný polystyren je vyráběn tzv. extruzí. Extruze je založena na vytlačování taveniny speciálního krystalového polystyrenu, současně se tato hmota sytí speciálním expanzním plynem, vzpěňovadlem, např. oxidem uhličitým  $\text{CO}_2$  nebo hexanem  $\text{C}_6\text{H}_6$ . V extrudéru se vytvoří tekutá pěna, která se protlačí přes vytvářecí ústí a zchladí v chladicí části extrudéru za sníženého tlaku. Takto vzniká extrudovaný polystyren.

Díky tomuto způsobu výroby má XPS vlastnosti, které EPS nemá. Jedná se o fyzikální vlastnosti, které staví extrudovaný polystyren do jiné roviny použití a nabízí mnoho výhod pro tepelné izolace staveb, zejména spodních staveb a míst, kde tepelná izolace přichází do styku se zeminou nebo vodou. Má uzavřenou strukturu pórů (obrázek č. 17), je tedy nenasákavý, dlouhodobá nasákavost je pod 0,5 %, a tedy i mrazuvzdorný. Je odolný vůči zemině, plísním nebo bakteriím a dokáže snést zatížení v tlaku více než 500 kPa při 10% deformaci.



Obrázek 17: Uzavřená struktura extrudovaného pěnového polystyrenu pod mikroskopem [38]

Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje mezi 0,025–0,035 W/(m·K). Mění se však s různými parametry, jako je teplota, objemová hmotnost a obsah vlhkosti. Zvýšení obsahu vlhkosti XPS od 0 % obj. do 10 % obj. vede ke zvýšení jeho tepelné vodivosti z 0,034 na 0,044 W/(m·K). Objemová hmotnost je mírně vyšší než u EPS. Pohybuje se od 30–40 kg/m<sup>3</sup>. K dalším vlastnostem XPS patří velmi dobrá mechanická odolnost, dobře snáší tlaky a nárazy. Jako každý polystyren, tak i XPS působením ultrafialového záření degraduje [22,38].

### 3.3.3.3. Polyuretanová izolační pěna

Polyuretanová izolační pěna, známá pod zkratkou PUR pěna, patří k často používaným tepelně izolačním materiálům. Polyuretanová pěna existuje ve dvou variantách, tvrdá a měkká. Nejznámější je měkká pěna, tzv. molitan, ve stavebnictví se však používá spíše tvrdá polyuretanová pěna s názvem PUR. Je známá jako polyuretanová montážní pěna, používá se k utěsnění spár v konstrukcích nebo při montáži výplňových prvků. Momentálně se více rozšiřuje PUR pěna ve variantě stříkané izolace nebo izolačních desek (obrázek č. 18).



Obrázek 18: Polyuretanová izolační deska [39]

Polyuretan vzniká vzájemnou reakcí mezi diphenyldiisocyanátu a směsí vícesytných polyéter a polyester alkoholů, aktivátorů, katalyzátorů, retardérů hoření, stabilizátorů, vody a nadouvadel (alkoholy obsahující více hydroxylových skupin). Během procesu expanze se uzavřené póry plní expanzními plyny, fluoruhlovodíky (HFC), oxidem uhličitým (CO<sub>2</sub>) nebo hexanem (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>). Vzniká uzavřená mikroskopická buněčná struktura, díky které má PUR pěna výborné tepelně izolační a hydroizolační vlastnosti.

Objemová hmotnost se odvíjí od struktury PUR pěny, tedy velikosti pórů a celkového napěnění. Pohybuje se od 30 do 100 kg/m<sup>3</sup>. S rostoucí objemovou hmotností roste pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu i pevnost v tahu, mají mezi sebou téměř lineární závislost.

Jedná se o velmi účinnou tepelnou izolaci se součinitelem tepelné vodivosti na úrovni od 0,023 do 0,030 W/(m·K). To je vynikající hodnota, za níž stojí podstatné omezení sálavého šíření tepla pěnou, velmi jemná struktura pórů a vysoká objemová hmotnost přestupových rozhraní mezi tuhými fázemi PUR a vzduchem, přes které se děje difúzní (tzn. nesálavý) prostup tepla. Součinitel tepelné vodivosti je závislý především na uzavřené pórové struktuře a objemové hmotnosti. Mění se však s teplotou, obsahem vlhkosti a objemovou hmotností pěny. Například součinitel tepelné vodivosti se zvyšujícím obsahem vlhkosti, z 0 na 10 % obj., se může zvýšit z 0,025 až na 0,046 W/(m·K). Nejnižší tepelná vodivost je při objemové hmotnosti 50 až 60 kg/m<sup>3</sup>. Se snižující i zvyšující se objemovou hmotností tepelná vodivost roste. Při 30 kg/m<sup>3</sup> nebo 100 kg/m<sup>3</sup> tepelná vodivost vzroste až na 0,030 W/(m·K).

U PUR pěn dochází ke stárnutí, spočívajícím v difúzi plynů obsažených v buňkách pěny, v důsledku čehož se zhoršují izolační vlastnosti materiálu. Pěny PUR je nutné chránit před ultrafialovým zářením [22,23,39,40].

Polyuretanová pěna bývá součástí prefabrikovaného stěnového systému. Kompozitní stěna je vyrobena z tuhé polyuretanové pěny vyztužené skelnými vlákny (PUF) a z obou stran opláštěna deskami z oxidu hořečnatého (MgO), obrázek č. 19. Hořečnaté desky jsou k polyuretanovému jádru přilepeny epoxidovými lepidly. Tuhý PUF je již důležitým materiálem ve stavebnictví. Vyztužení skelnými vlákny zlepšuje pevnost a nosnost tuhého PUF, což vede k jeho použití jako konstrukčního prvku. V poslední době se tento materiál používá i jako jádro v sendvičových konstrukcích pro podlahové a stěnové panely. Hojně se používá v rezidenční a stavební výstavbě v Číně a ve Spojených státech. Tento materiál je vysoce udržitelný, spotřebovává nízkou energii, je odolný vůči ohni, je pevný a odolný vůči plísním [70].



Obrázek 19: Tuhý PUR mezi hořečnatými deskami vyztuženými skelnými vlákny [70]

Polyisokyanurátová pěna PIR je izolační materiál tvořen kombinací uretanových a isokyanurátových vazeb. Jde o velmi podobný materiál jako známější polyuretan. Izolační materiál PIR má lepší vlastnosti, vyšší pevnost v tlaku až 170 kPa, tepelná vodivost se pohybuje mezi 0,021–0,023 W/(m·K) a objemová hmotnost 30–100 kg/m<sup>3</sup>. Aplikovat se může jak litím, tak stříkáním na povrch či do dutin [40].

### 3.3.4. Vybrané anorganické tepelně izolační materiály

Anorganické izolační materiály jsou vyrobeny z neobnovitelných zdrojů a velkého množství dostupných materiálů. Anorganické izolační materiály však obecně nabízejí vyšší tepelně izolační vlastnosti a nižší náklady při stejném tepelném výkonu. Také vykazují vyšší odolnost proti ohni a vlhkosti. Mezi často používané anorganické izolační materiály patří např. minerální vlny, perlit nebo pěnové sklo.

#### 3.3.4.1. Minerální vlna

Minerální vlna je obecný pojem zahrnující různé anorganické izolační materiály. Kamenná vlna, skelná vlna a méně častá strusková vlna, spadají pod obecný termín minerální vlna. Na obrázku č. 20 je vyobrazena kamenná a skelná vlna.



Obrázek 20: Minerální vlna - kamenná (vlevo), skelná (vpravo) [42]

Technologie výroby minerální vlny je jednoduchá. Při výrobě je vstupní surovina společně s tavidly roztavena v peci za vysoké teploty a následně vypouštěna na rozvláknující válce, které ji odstředivou silou rozvlákní na jemná vlákna v tloušťkách několika mikrometrů. Do těchto vláken je vstříkováno organické pojivo, vodoodpudivé, protiplísňové a další přísady. Vlákna obohacená o přísady jsou následně v tenkých vrstvách usazována na sběrné pásy a pokračují do vytvrzovací pece, kde se spolu s pojivem a přísadami teplem vytvrzuje. V peci dochází ke stlačení materiálu na požadovanou tloušťku a k případnému dorovnání objemové hmotnosti. Nakonec se vzniklá minerální vlna ochladí v chladicí komoře a diamantovou pilou nařeže na požadovanou velikost.



Skelná vlna se vyrábí z borosilikátového skla při teplotě kolem 1400 °C, kde se ohřátá hmota protahuje rotujícími tryskami a vytváří vlákna. Kamenná vlna se vyrábí z tavného kamene (např. dolerit, diabas) při teplotě cca 1500 °C, kde se zahřátá hmota vymršťuje z kola nebo kotouče a vytváří vlákna. Do obou minerálních vln se přidává olej a pryskyřice, aby spojily vlákna dohromady a zlepšily výsledné vlastnosti produktu.

Pokud jsou izolace z minerální vlny používány pro speciální aplikace, jako jsou například technické izolace, přichází tzv. sekundární výroba, což znamená, že na minerální izolaci se aplikuje další vrstva materiálů (papír, aluminátová fólie, drátěné pletivo, asfaltový pás atd.) nebo se dále tvarují a řežou.

Typické hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro kamennou vlnu dosahují hodnot 0,040–0,050 W/(m·K) a 0,035–0,045 W/(m·K) pro skelnou vlnu. Tepelná vodivost minerální vlny je ovlivněna především objemovou hmotností, dále teplotou a vlhkostí. Při změně vlhkosti z 0 % obj. na 10 % obj. se tepelná vodivost zvýší z 0,037 na 0,055 W/(m·K). Při nízkých objemových hmotnostech vykazuje minerální vlna vysokou průvzdušnost a řídkou strukturu vláken, s tím souvisí i vyšší hodnota tepelné vodivosti, kdy při 20 kg/m<sup>3</sup> dosahuje až cca 40 W/(m·K) a při 30 kg/m<sup>3</sup> klesne na cca 0,036 W/(m·K). Při zvyšování objemové hmotnosti se hodnota postupně snižuje, což je následkem snížení tepelného toku vlivem proudění a sálání. Tepelná vodivost je nejnižší po hodnotu cca 65 kg/m<sup>3</sup>, poté se kvůli vzrůstajícímu teplu vedením postupně zvyšuje. Kromě nízké tepelné vodivosti je minerální vlna nehořlavá a má vysokou odolnost proti poškození vlhkostí. Zachovává si své izolační vlastnosti i za mokra a nebude hořet, dokud teploty nepřekročí 1 000 °C. Na druhé straně přímý kontakt s izolací z minerální vlny může způsobit podráždění kůže a plic. Obecně tato podráždění odezní, jakmile ustane kontakt se skleněnými vlákny. Mechanické vlastnosti minerálních vln se liší podle druhu izolace a jejího použití. Napětí při 10% deformaci se pohybuje kolem 40 kPa u některých až 60 kPa. Při kontaktu se vzdušnou vlhkostí jsou většinou hydrofobizované a vykazují malou nasákavost, do 3 % [22,23,41,42].

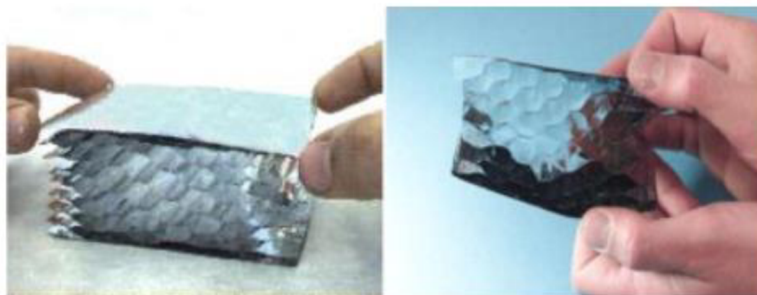
### **3.3.5. Kovové izolační materiály**

Kovové nebo metalizované reflexní membrány musí mít prostor naplněný vzduchem nebo plynem, aby byly účinné.

#### **3.3.5.1. Panely plněné plynem**

Plynem plněné panely GFP (Gas filled panel) se skládají z bariérového obalu a plynu mezi reflexními vrstvami (přepážkami). Plynem může být vzduch nebo těžší plyn pro snížení vedení.

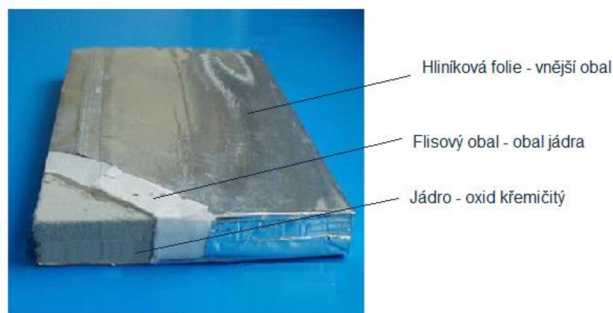
Plynem plněné panely (GFP), znázorněny na obrázku č. 21, jsou jedním z nových řešení tepelné izolace ve stavebnictví. Jsou ve fázi vývoje a experimentu, zatím jsou dostupné pouze v omezeném množství jako komerční vzorky [24].



Obrázek 21: Pohled na bariérovou fólii a strukturu přepážky uvnitř GFP [24]

### 3.3.5.2. Vakuový izolační panel

Vakuový izolační panel VIP (Vacuum insulation panel) je nyní jedním z nejslibnějších stavebních izolačních materiálů blízké budoucnosti. VIP se skládá z porézního jádra, které je tepelně utěsněno, obrázek č. 22. Jádro má otevřenou strukturu pórů, která umožňuje odvod veškerého vzduchu a vytvoření vakua. Obálka musí být vzduchotěsná a parotěsná, aby si panel udržel své tepelně izolační vlastnosti v průběhu času. Mezi nejběžněji používané materiály jádra patří skleněné vlákno, polyuretanová pěna, polystyrenová pěna, srážený oxid křemičitý, pyrogenní oxid křemičitý a aerogely.



Obrázek 22: Skladba vakuového izolačního panelu [24]

VIP vykazuje jednu z nejnižších tepelných vodivostí tepelných izolantů (až  $0,004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) a představují jedno z nejslibnějších vysoce výkonných tepelně izolačních řešení na dnešním trhu. Za hlavní výhody VIP lze považovat jeho vysokou životnost (>50 let) a jeho zmenšenou tloušťku potřebnou k dosažení daného tepelného odporu. Kromě vysokých nákladů je jednou z hlavních nevýhod VIP nevratné zvýšení tepelné vodivosti v důsledku difúze vodní páry a vzduchu přes obal do VIP jádra. VIP se vyznačují svou křehkou povahou a vyžadují ochranu proti perforaci fólie.

Proražení VIP obálky, které může být způsobeno hřebíky a podobnými předměty, způsobí zvýšení tepelné vodivosti na přibližně  $0,020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Výsledkem je, že panely nemohou být řezány pro úpravu na staveništi nebo perforovány bez velkých ztrát tepelně izolačních vlastností. Nedostatek flexibility a riziko perforace bude vždy hlavní nevýhodou použití VIP.

VIP v obecných aplikacích jsou již na trhu úspěšně používány téměř dvě desetiletí, ale pro stavební sektor stále existují výzvy, které je třeba překonat. Nedostatek certifikovaných stavebních systémů a oficiálních schválení od vládních agentur představují překážky, se kterými bude nutné se v budoucnu vypořádat [24,43–45].

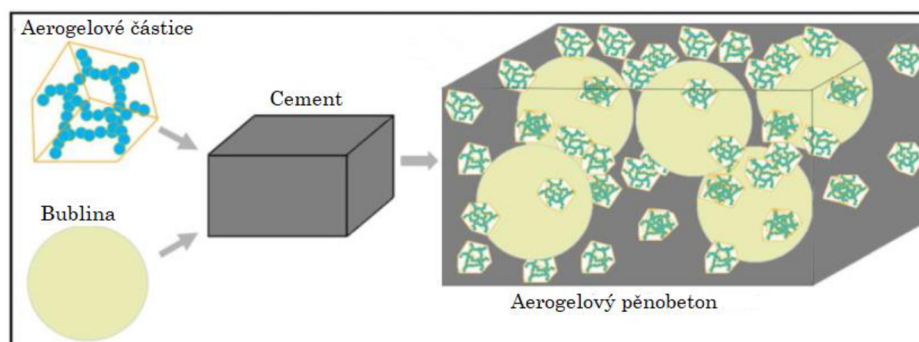
### 3.3.6. Aerogely

Aerogel je syntetický transparentní, ultralehký, vysoce porézní materiál s otevřenými buňkami, velkým vnitřním povrchem a nízkou objemovou hmotností odvozené z gelu, kde je kapalná fáze gelu nahrazena plynem. Výsledná pevná látka má skvělé vlastnosti, které jsou dány unikátní mikrostrukturou s průměrem částic  $1\text{--}20 \text{ nm}$  a průměrem pórů  $2\text{--}50 \text{ nm}$ , přičemž pórovitost může dosahovat až  $90 \%$ . Aerogel lze také použít jako jádro pro vakuové izolační panely.

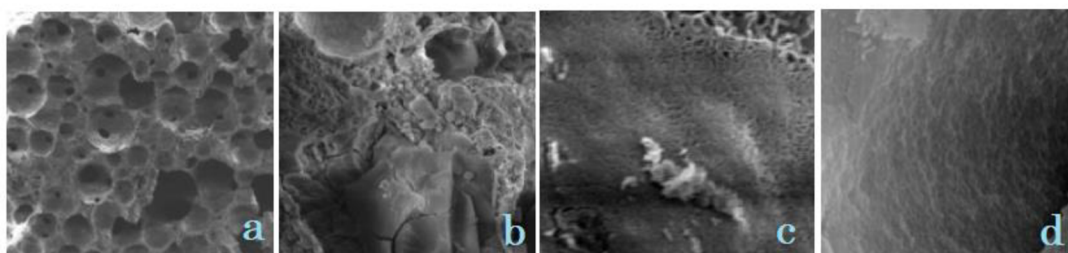
Každá unikátní vlastnost aerogelů umožňuje specifické uplatnění v jiné oblasti, především ve stavebnictví. Součinitel tepelné vodivosti dosahuje nízkých hodnot  $0,0072\text{--}0,0089 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Mimořádně nízký součinitel tepelné vodivosti, optická průhlednost a akustické vlastnosti aerogelů umožňují jeho použití v budovách, okenních tabulích, stěnách budov nebo půdách.

Na druhé straně jsou aerogely charakteristické svou zranitelností vůči vlhkosti, extrémní křehkostí a nízkou pevností v tahu. Jejich mechanické vlastnosti lze zlepšit metodami mechanického vyztužení, obvykle však na úkor zvýšení jejich objemové hmotnosti a tím i tepelné vodivosti. V současné době a ve srovnání s VIP jsou náklady na aerogelové izolátory dvojnásobné při stejném izolačním výkonu a 10 až 20krát vyšší ve srovnání s izolačními materiály, jako je EPS, PUR nebo minerální vlna. Je třeba zmínit, že aerogel patří k izolačním materiálům budoucnosti [23,24].

Přidáním superizolačních a nanoporézních aerogelů do mikroporézního pěnového betonu vzniká materiál (obrázek č. 23), který má velký potenciál pro aplikaci v zelených budovách s téměř nulovou spotřebou energie. Aerogelový pěnobeton vykazuje tepelnou vodivost  $0,049 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , v porovnání s pěnobetonem tedy o  $50 \%$  nižší. Mikrostruktura aerogelového pěnobetonu je vyobrazena na obrázku č. 24 [68,69].



Obrázek 23: Zjednodušené schéma výroby aerogelového pěnobetonu [68]

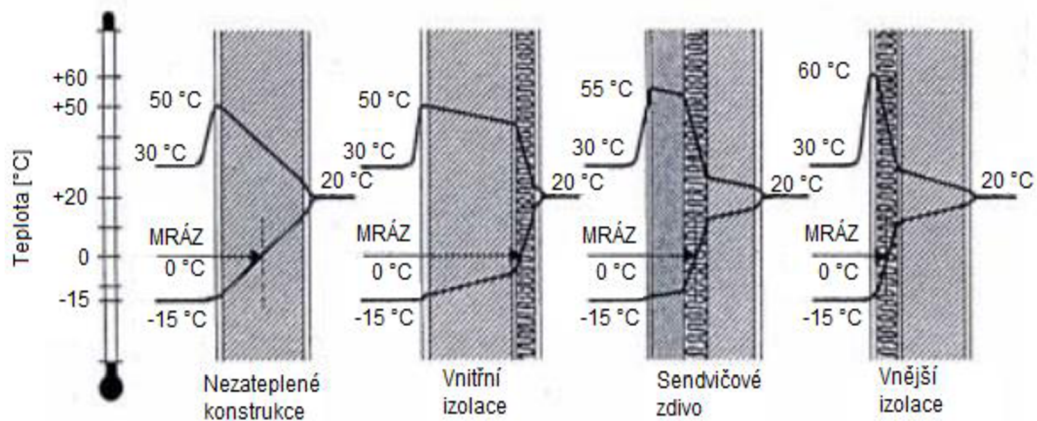


Obrázek 24: Mikrostruktura pěnobetonu (a,b); částice na bázi cementu (c); částice na bázi aerogelu (d) [68]

### 3.4. Zateplování obvodových konstrukcí u pasivních budov

Zateplení u nízkoenergetických, a především pasivních domů patří k nejdůležitějším částem konstrukce. V konstrukci pasivních domů jde o izolaci stěn, střechy, podlahy, dveří a oken, kde dochází převážně k přenosu tepla.

Obvodové stěny zaujímají při řešení tepelných zisků a ztrát v budově největší část. Z toho důvodu se na jejich zateplení klade velký důraz. Řeší se druh, tloušťka a umístění izolantu v konstrukci. Umístění izolačního materiálu v konstrukci má vliv na přechodné tepelné toky stěn budovy. Při zateplování pasivních domů se nejčastěji používá vnější izolace, z důvodu ochrany a nepromrzání zdiva. S vnitřní izolací nebo sendvičovým zdivem se u pasivních domů lze setkat jen ve výjimečných případech, důvodem je již zmíněné promrzání zdiva. Průběhy teplot v obvodových stěnách jsou znázorněny na obrázku č. 25 [1,46,47].



Obrázek 25: Průběhy teplot v obvodových stěnách pro různé typy zateplení [47]

Při výstavbě pasivních domů je možné se setkat s variantou vnitřního, a především vnějšího zateplovacího systému. U vnějšího zateplovacího systému se zpravidla jedná o kontaktní zateplovací systém, známý pod zkratkou ETICS (vnější kontaktní zateplovací systém) či variantu vnějšího zateplovacího systému s odvětrávanou mezerou. Velké oblibě se dostává sendvičovému zateplovacímu systému, speciálně tzv. ICF systému, který nabízí odlišný technologický postup při výstavbě, než je tomu u dodatečného zateplování obvodových konstrukcí. Zateplování obvodových konstrukcí u pasivních domů bude detailněji popsáno dále.

### 3.4.1. Vnitřní zateplovací systém

Vnitřní zateplovací systémy jsou nejméně rozšířené. K jejich realizaci se přistupuje při zateplení historických fasád, štítových stěn nebo při přestavbě budovy na pasivní standard. Tedy v momentě, kdy vnější zateplení není z konstrukčních nebo dispozičních důvodů možné. K pár výhodám patří možnost zaizolování jen jedné místnosti a není nutná výstavba lešení. Mezi nevýhody se řadí možnost kondenzace vlhkosti ve stěnách domu, k promrzání vnějšího zdiva a k riziku růstu plísní. Sníží se akumulační schopnost zdiva a zmenšení užité plochy místnosti. A hlavně zdivo není chráněno před promrznutím.

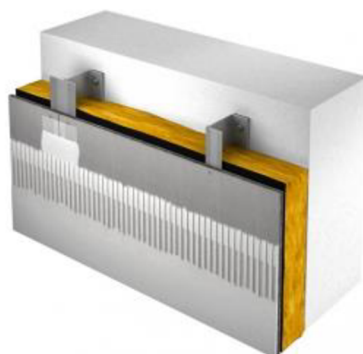
Jako izolant se nejčastěji používá EPS nebo minerální vlna. EPS se používá do kontaktních zateplovacích systémů, tento systém je podobný kontaktnímu systému ETICS používaným při vnějším zateplení. Samostatná nosná konstrukce je tvořena nosným roštem, který je ukotven na stávající konstrukci a vyplněn izolací. U tohoto systému se nejčastěji používá minerální vlna [1,73,74].

### 3.4.2. Vnější zateplovací systém

Při zateplování pasivních domů je tento systém nejvhodnější. Konstrukce nepromrzává, lépe se eliminují tepelné mosty, riziko kondenzace vlhkosti ve zdivu je minimální a zvýší se akumulační schopnost budovy. Nevýhody jsou v porovnání s již zmíněnými výhodami zanedbatelné. Patří k nim potřeba lešení, prostor kolem budovy a vyšší cenové náklady. Vnější zateplovací systém nemá funkci sanačního opatření pro železobetonové i jiné nosné konstrukce. Poruchy a vady podkladních konstrukcí musí být před prováděním zateplení sanovány.

Vnější zateplovací systém se dělí na kontaktní a zavěšený neboli provětrávaný. Vnější kontaktní zateplovací systém ETICS (external thermal insulation composite system) je nejrozšířenějším způsobem zateplení budov, hlavně u pasivních budov. Jako tepelný izolant se používá EPS 70 až EPS 150, grafitový EPS nebo minerální vlna. Většinou je nutné podklad vyrovnat, odstranit nečistoty a doplnit. Poté se nalepí a následně ukotví vybraná tepelná izolace k pevnému a jednotnému podkladu. Způsob kotvení se u různých výrobců liší. Na takto připravenou izolaci se natáhne základní vrstva stěrkové hmoty. Do ní se později vtláčí skleněná síťovina, která daný povrch zpevní. Síťovina se ještě "zakryje" další vrstvou stěrkové hmoty. Tím je základní vrstva ukončena. Konečným krokem je omítání.

Provětrávané fasády, obrázek č. 26, mají vzduchovou vrstvu mezi tepelnou izolací a fasádním obkladem, který chrání konstrukci domu před povětrnostními vlivy. Vzduchová vrstva zaručuje cirkulaci vzduchu, čímž je ze skladby provětrávané fasády odváděna vztlínající vlhkost. Vzniká tak vysoce funkční, a přitom elegantní zateplovací systém s možností dodatečných oprav. Provětrávané fasády jsou v mnoha případech zatepleny minerální vlnou umístěnou v nosném roštu. Minerální vlna na rozdíl od polystyrenu mnohem lépe propouští vodní páru, čímž je zajištěn odvod vlhkosti ze stěn [1,75-77].



Obrázek 26: Provětrávaná fasáda s kovovým roštem a izolantem z minerální vlny [79]

### 3.4.2.1. Kotvení kontaktního zatepovacího systému

Postup při zateplování pasivních domů je stejný jako při zateplování ostatních budov. Tepelná izolace se k podkladu buď jen přilepí, nebo se po přilepení ještě přikotví plastovými nebo ocelovými hmoždinkami. Záleží na výšce zateplení, druhu nosné konstrukce, typu a tloušťce izolantu. Kotvení pomocí hmoždinek tepelného izolantu není vždy nutné, pokud se zatepluje objekt do výšky 8 m a do tloušťky izolantu 200 mm. Bez hmoždinek se dá zateplovat nové zdivo z pálených nebo vápenopískových tvárnic, případně z monolitického betonu a používá se výhradně tepelná izolace z EPS, díky nízké objemové hmotnosti. Zateplení bez hmoždinek znamená zateplení bez bodových tepelných mostů, u rodinného domu tak lze ušetřit až 1200 děr do obvodové konstrukce. Neprojevuje se hydrotermický jev, nedochází k prokreslování hmoždinek [1,83].

K zateplování pomocí hmoždinek se přistupuje, pokud zatepovaná konstrukce nebo typ izolantu nevyhovuje požadavkům na lepený kontaktní systém. Mechanické kotvení tepelně izolační vrstvy hmoždinkami zajišťuje spojení nosného podkladu a tepelného izolantu, obrázek č. 27.

Návrh a posouzení upevnění ETICS je součástí projektové dokumentace, ta řeší typ a počet hmoždinek, jejich polohu vůči základní vrstvě a rozmístění v ploše izolantů a v místě jejich styků. Princip navrhování zateplení závisí na povětrnostních podmínkách, hlavně na síle vyvolané sáním větru, která je zachycena talířkem hmoždinky a přenesena rozpěrnou částí hmoždinky do podkladu.



Obrázek 27: Systém ETICS [80]

Kotevní prvky mají za následek vznik bodových tepelných mostů a tím zvyšují tepelnou vodivost izolantu. Z tohoto důvodu se hmoždinky zavrtávají hlouběji do izolantu a do vzniklé mezery se vloží zátka, z materiálu použitého izolantu. Jako tepelný izolant se nejčastěji používá EPS nižších pevností, minerální vlna nebo desky z PUR pěny. Lze však použít i novější materiály, jako je např. expandovaný korek [1,81,82].

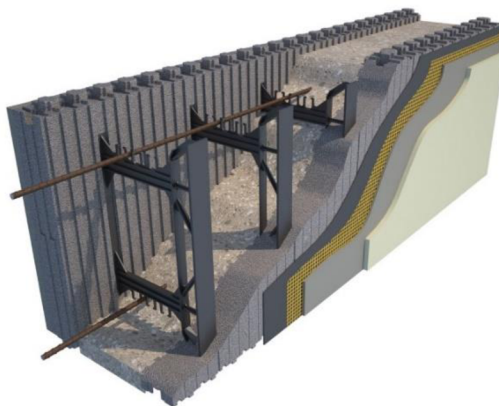
### 3.4.3. Sendvičové zdivo

Při výstavbě pasivních domů se sendvičové zdivo stává velmi oblíbené. Sendvičové zdění efektivně spojuje vlastnosti nosného zdiva a materiálů pro zateplení. V podstatě jde o jakékoli vhodné spojení stavebního materiálu a izolantu, buď je vrstva tepelné izolace obestavěna zdíciými prvky nebo o nosnou konstrukci opláštěnou z obou stran tepelným izolantem. Tento způsob výstavby zlepšuje tepelné parametry budovy. Lze kombinovat tvárnice betonu, lehkého vibrolisovaného betonu, pálených cihel či jiných materiálů s izolačním materiálem, nejčastěji s expandovaným polystyrenem nebo minerální vlnou.

Při první variantě, tedy tepelná izolace obestavěná zdíciými prvky, je sice tepelný izolant chráněn před vnějšími vlivy, dochází ale k promrzání vnější vrstvy zdiva. Při druhé variantě, tedy konstrukční jádro opláštěno tepelným izolantem, se používají kontaktní zateplovací systémy, které se připevňují na nosnou konstrukci obvodového pláště zvenčí i zevnitř. V tomto případě se eliminují tepelné mosty a nedochází k promrzání zdiva. U pasivních domů velmi žádaná varianta. Speciálním a moderním druhem sendvičového zdiva je tzv. ICF systém, jedná se o systém ztraceného bednění [1,62,78].

### 3.5. ICF systémy

Systémy ztraceného bednění tzv. ICF systémy (Insulating concrete forms) jsou strukturální stěnové panely vyrobené z litého betonového jádra a tuhého izolantu, nejčastěji bývá používán expandovaný pěnový polystyren (EPS), obrázek č. 28. Polystyren tvoří tzv. ztracené bednění, drží beton pohromadě během vytvrzování a následně po vytvrzení jej chrání. Jde o systém vhodný pro výstavbu obvodových a vnitřních stěn nízkoenergetických a pasivních domů.



Obrázek 28: ICF systém [48]

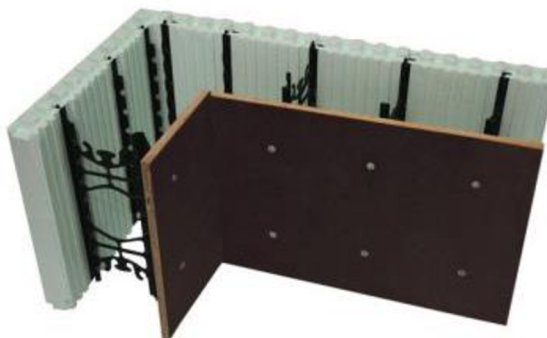


Rychlá výstavba se zvýšenou kvalitou, udržitelnými a ekologickými metodami a materiály jsou ve stavebním průmyslu velmi žádané. ICF je vyvíjející se technikou, která by mohla uspokojit současnou poptávku stavebního průmyslu. ICF je kompozit betonu a polystyrenu, který zlepšuje tepelnou izolaci a další mechanické vlastnosti budovy. Tuhé tepelné izolace drží beton pohromadě během vytvrzování a jsou trvale na místě jako součást stěnového panelu, kde zajišťují tepelnou izolaci budovy. Železobeton poskytuje konstrukční systém budovy. Aplikace ICF jsou ve stavebnictví velmi rozšířeny. Používají se na konstrukce nejen obytných budov, ale i divadel, škol a nemocnic.

### 3.5.1. Výhody a nevýhody ICF

Jednou z předností systému je rychlá a jednoduchá výstavba. Není to však jediná výhoda. Díky spojitosti a návaznosti tepelně izolačního systému výborně eliminuje tepelné mosty neboli lokální místa se zvýšeným tepelným tokem, kde dochází k vyšším tepelným ztrátám. Díky propracovanému systému v místech soklu, nadpraží a stropů nevznikají tepelné mosty, jako je tomu u tradičních stavebních systémů. Systém zaručuje úsporu energií a tím je šetrný k životnímu prostředí. Díky malé hmotnosti tvárnic je manipulace jednoduchá a výstavba rychlá. ICF systém je schopen chránit betonovou konstrukci před nízkými teplotami a vysokou vlhkostí. Tím se zvyšuje životnost budovy.

Největší nevýhodou ICF systému je to, že na vnitřní straně stěny je minimálně 50 mm tlustá vrstva polystyrenu. Ta brání betonovému jádru akumulovat teplo. Akumulací tepla do vnitřních nebo obvodových zdí lze docílit toho, že i po vypnutí topení bude budova stále vyhřátá a teplota neklesne pod určitou teplotu až po dva dny. Neschopnost akumulovat teplo může být výhodou při nutnosti rychlého vytopení vnitřního prostoru. Z toho důvodu je možné použít tvárnici, která má místo vnitřní polystyrenové vrstvy díl z cementotřískových desek, obrázek č. 29. Deska se může v konstrukci ponechat nebo po vytvrzení betonu sundat.

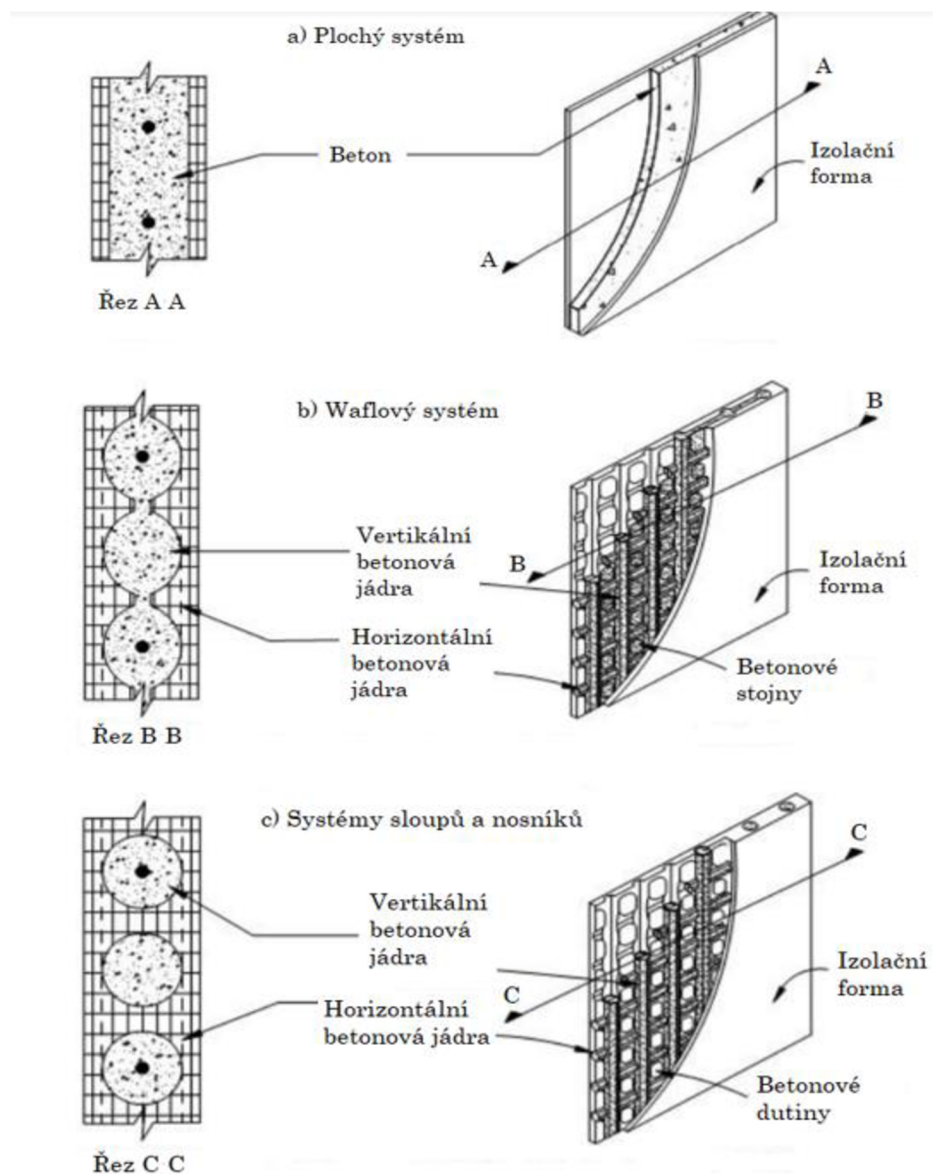


Obrázek 29: ICF systém s vnitřním dílem z cementotřískové desky [50]

Další nevýhodou je obtížné přestavování při změně dispozice domu. Například při instalaci dveří nebo oken je nutné vyříznout otvor do betonového jádra. Je nutné tedy v počáteční fázi výstavby promyslet podrobnosti.

### 3.5.2. Systémy uspořádání ICF

Systémy izolačních betonových forem se svým designem liší, obrázek č. 30. Ploché systémy poskytují souvislou tloušťku betonu jako konvenčně litá stěna. Stěna vyrobená mřížkovými systémy má vaflový vzor, kde je beton v některých bodech tlustší než v jiných, používá se vesměs při výstavbě bazénů. Systémy sloupků a nosníků mají diskrétní vodorovné a svislé betonové sloupy, které jsou zcela zapouzdřeny pěnovou izolací. U výstavby pasivních domů se používá hlavně plochý systém, kvůli bezproblémovému vyztužování, betonování a konstantní tloušťce betonu.



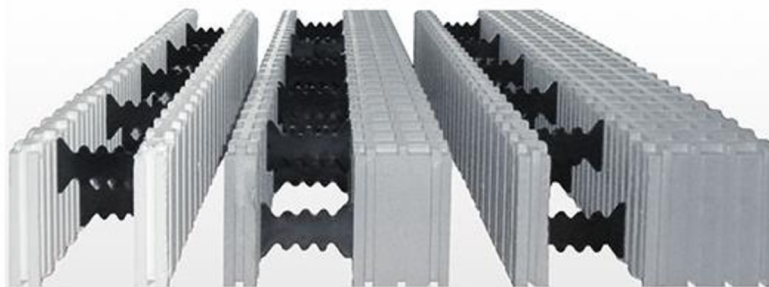
Obrázek 30: Designy ICF systémů [49]

### 3.5.3. Používané materiály pro výrobu ICF

ICF systémy jsou formy používané k držení čerstvého betonu, které zůstávají trvale na místě a poskytují izolaci pro konstrukci, kterou obklopují. Jejich historie sahá až do období po druhé světové válce, kdy se ve Švýcarsku používaly bloky upravených dřevěných vláken držených pohromadě cementem. Z těch se přes plastové pěny a pěnové bloky postupně vyvinuly dnešní ICF systémy. Různé společnosti si klasické ICF systémy přetvořily a inovovaly, aby se od sebe vzájemně odlišily a mohly mezi sebou konkurovat.

Na výrobu bočních desek se převážně používá EPS o vyšších objemových hmotnostech nebo EPS s příměsí grafitových nanočástic, které jak bylo uvedeno, má až o 15 % lepší tepelně izolační a mechanické vlastnosti v porovnání s klasickým EPS. Používá se i extrudovaný polystyren, který je pevnější, ale také dražší. Několik produktů je vyrobeno z recyklované pěny nebo dřevěných vláken.

Kvůli požadavkům na součinitel prostupu tepla a tepelný odpor jsou na trhu tvárnice dostupné v několika tloušťkách (obrázek č. 31), na vnitřní straně je nejčastěji 50 mm deska a na vnější straně 50–300 mm deska z polystyrenu. Tloušťka vnější strany se může zvýšit skládáním různých tlouštěk tvárnic za sebe, vznikají tedy polystyrenové stěny širší než 300 mm. Výrobci nabízí mnoho tvarovek pro zhotovení rohů, překladů a věnců, není tedy potřeba tvárnice zařezávat [1,53, 54].



Obrázek 31: ICF tvárnice pro vnitřní příčky (25 cm), tvárnice pro obvodové stěny (35 cm), tvárnice pro pasivní domy (45 cm) [52]

Místo EPS se jako základ stavebního systému ICF používá ztraceného bednění na bázi štěpkocementové desky s vloženou tepelnou izolací, nejčastěji expandovaný polystyren s příměsí grafitových nanočástic, obrázek č. 32, nebo expandovaný polystyren bez příměsi.

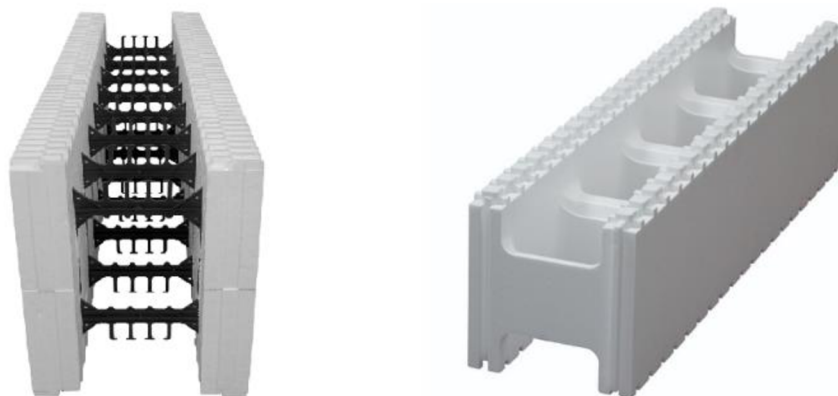
Štěpkocementová deska, jak vyplývá z názvu, se vyrábí z 89 % z dřevěné štěpky, z 9 % z cementu, který zaručuje pevnost a soudržnost desek, a ze 2 % z vodního skla, které stabilizuje desky proti vlhkosti a zajišťuje jejich odolnost proti plísním a hlodavcům.



Obrázek 32: ICF systém ze štěpkocementové desky; tvárnice (vlevo); výstavba (vpravo) [84]

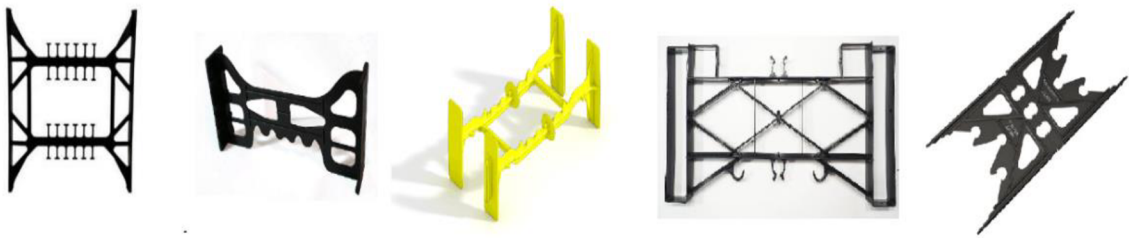
### 3.5.4. Systém spojení ICF

Dvě izolační plochy jsou od sebe odděleny buď různým typem spojek nebo samotným materiálem izolantu, obrázek č. 33. Spojení bloků musí být tak pevné, aby vydrželo prvotní tlak čerstvě nalitého betonu. Samotný spoj musí odolávat napětím vznikajícím při působení čerstvého betonu a následného dotvarování [1].



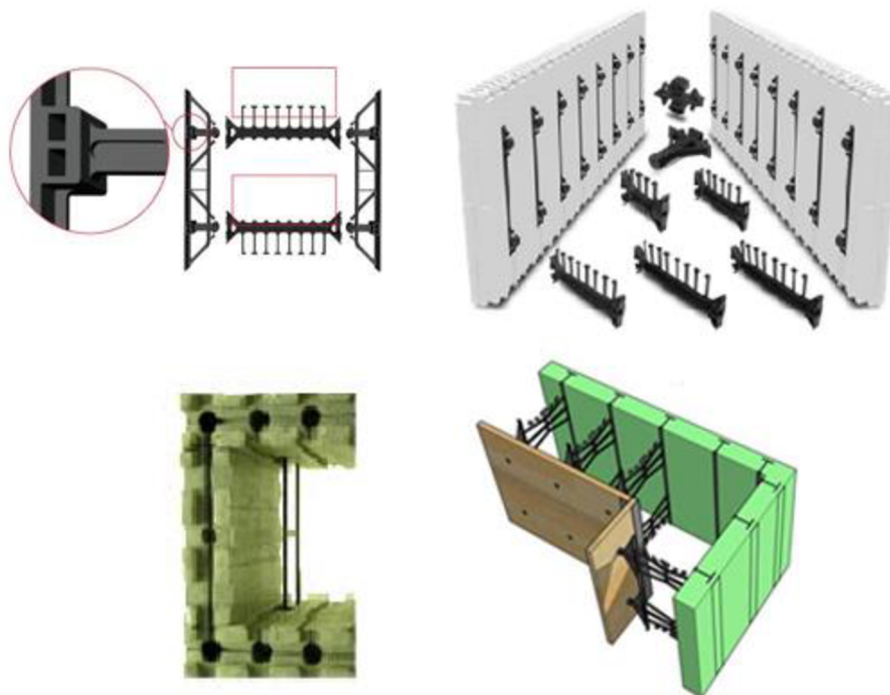
Obrázek 33: Možnosti oddělení tuhých izolantů v ICF systémech [55,56]

Spojek nabízených na trhu je obrovská variace. Bývají zapuštěny do polystyrenových bloků, kde mají spojky za úkol spojit dva bloky k sobě. Používají se vesměs plastové spojky (obrázek č. 34) díky tomu že netvoří tepelné mosty, kovové spojky se téměř nepoužívají. Některé spojky propojují i tvárnice horizontálně vzájemně mezi sebou a tím podpoří vyztužení konstrukce před vytvrzení betonu. Na trhu je velké množství spojek. Každý výrobce používá jiný typ, liší se od sebe hlavně tvarem a funkcí, jestli spojují tvárnice mezi sebou nebo ne. Ke spojení se nepoužívá žádné lepidlo, spoj je čistě mechanický.



Obrázek 34: Plastové spojky používané v ICF systémech [58–61]

Z výroby jsou v polystyrenových blocích zabudované plastové stojiny a na stavbě se na ně nasadí spojky libovolné velikosti, kterými se dá ovlivňovat tloušťka betonového jádra, obrázek č. 35 nahoře. Nebo jsou v blocích různé otvory, do kterých se spojky vsunou a tím spojí desky k sobě, obrázek č. 35 dole. Spojky jsou buď jednoduté nebo se sestavují z více kusů, vše záleží na výrobci.

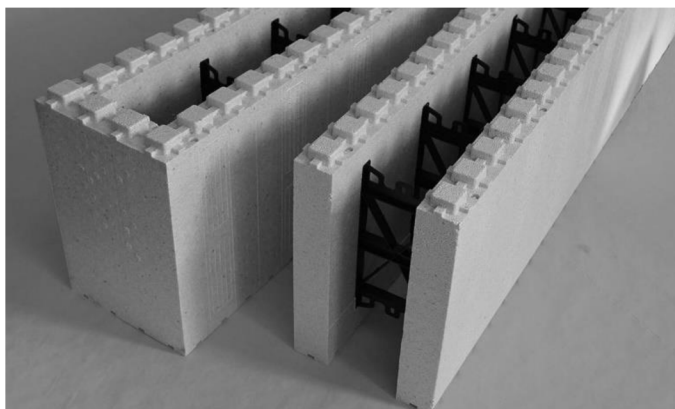


Obrázek 35: Způsob spojování ICF systémů [57,85]

Při spojování ložných spár polystyrenových tvárnic se na sebe skládají nasucho a vzájemně se propojují na stavebnicový systém, obrázek č. 36. Všechny prvky do sebe navzájem zapadají, obrázek č. 37.



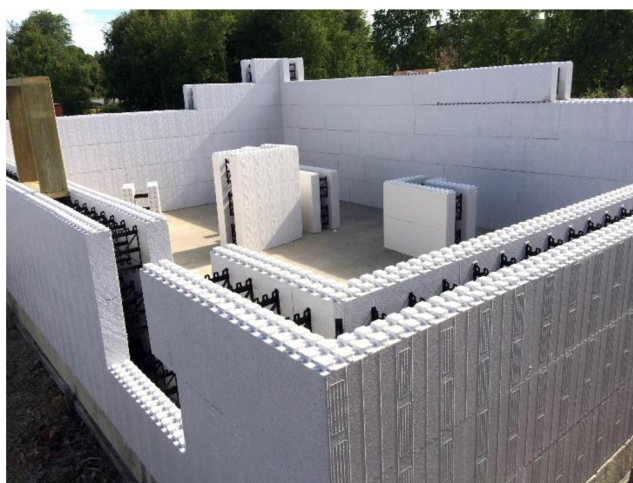
Obrázek 36: Stavebnicový systém ICF systému [51]



Obrázek 37: ICF systém – stavebnicový systém [87]

### 3.5.5. Výstavba konstrukcí pomocí ICF

Při výstavbě nevyztužené konstrukce, obrázek č. 38, někteří výrobci uvádí možnost výstavby stěny po celé její výšce naráz, zalití betonem a následné zhutnění ponorným vibrátorem. Beton však nemusí být dostatečně zhutněn a zůstávají v něm po vyzrání vzduchové bublinky. Je tedy lepší stěnu vystavět po částech a každou část zvlášť vybetonovat a zhutnit.



Obrázek 38: ICF systém ve výstavbě [86]

Při výstavbě železobetonové konstrukce se u obvodových stěn nejprve vyskládá maximálně 1,5 m vysoký systém, který se následně vyztuží a vylije betonem. Po vytvrzení betonu se vyskládá další část systému a postup se opakuje. Stěna se naráz nevyskládává po celé své výšce, kvůli kombinaci kotev a vyztužení, vibrátor se nedostane až dolů a dostatečně nezhutní betonové jádro. Kvůli stupni vyztužení a absenci vibrování se používá beton o konzistenci S3. I přes tyto postupy se občas na stavbě stává, že beton není dostatečně zhutněn a zůstávají v něm po vyžrání vzduchové dutiny.

ICF systémy se od sebe moc neliší. Rozdíl je jen v designu tvarovek izolantů, způsobu zapuštění spojek v izolantu a provedení spojky. Co se týká pracnosti při manipulaci a výstavbě, mechanických a fyzikálních vlastností jsou rozdíly minimální. Systém lze použít na stavbu různých typů budov, od sklepů, městských domů, terasových domů až po šestipodlažní bytové domy. U některých výrobců jsou dostupné i zakřivené tvarovky, ze kterých lze vystavit kruhový půdorys budovy, obrázek č. 39 [51].

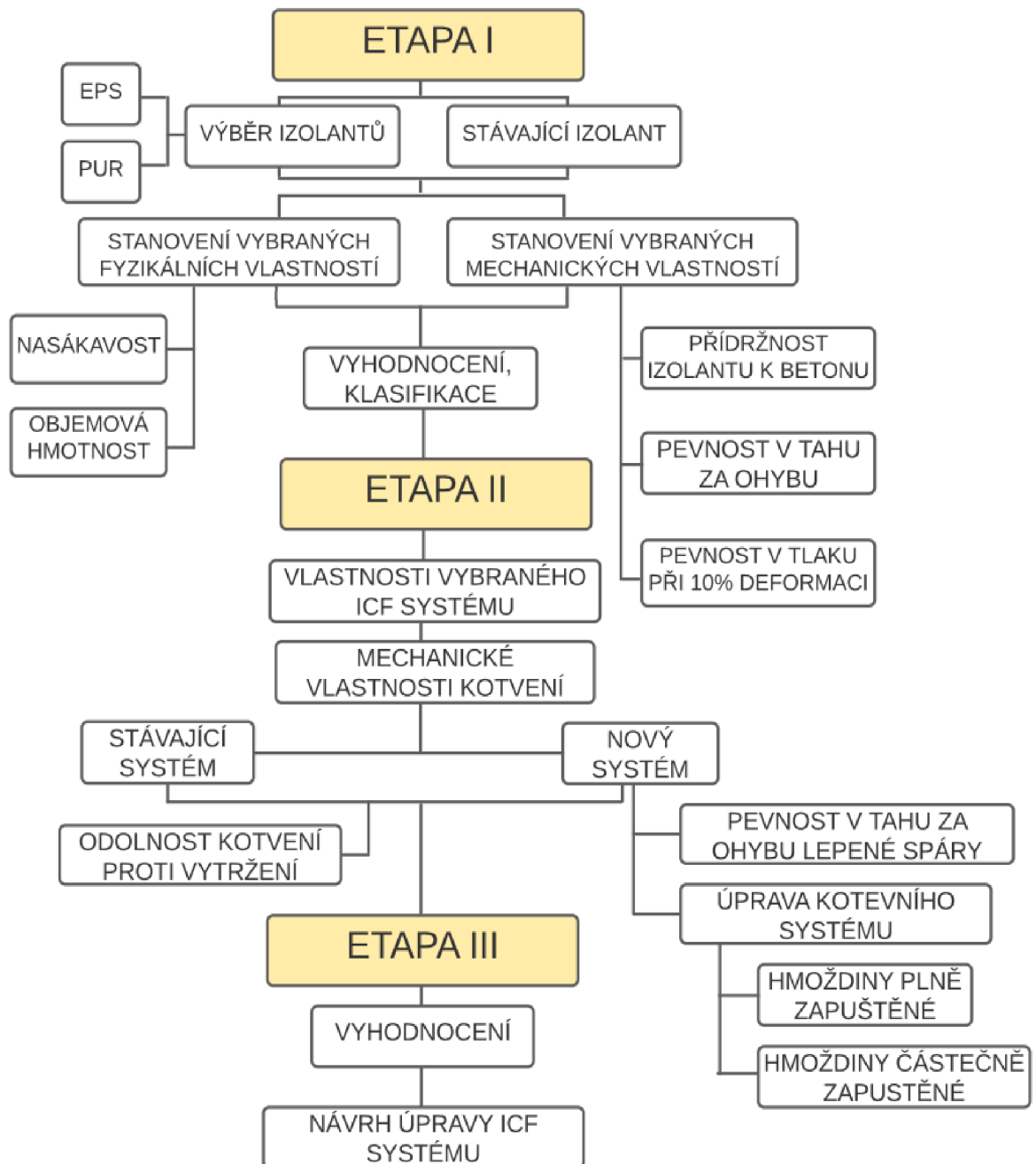


Obrázek 39: Kruhový půdorys vystavěný ze zakřivených ICF bloků [88]

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části této diplomové práce byly stanoveny vybrané fyzikálně mechanické vlastnosti na některých tepelně izolačních materiálech zmíněných v teoretické části. Následně na základě zjištěných parametrů byla navržena varianta ztraceného bednění z tepelného izolantu, inovace ICF systému. Praktická část je rozdělena na 3 dílčí etapy, které na sebe navzájem navazují. V úvodu je představena přehledná metodika jejich řešení, kde je každá z etap podrobněji popsána.

### 4.1. Metodika práce



Obrázek 40: Metodika praktické části diplomové práce



První etapa praktické části byla věnována zhodnocení poznatků o tepelných izolantech a jejich vlastnostech získaných z literární rešerše v teoretické části. Díky nim byly vybrány materiály, u kterých je předpokládána jejich vhodnost k použití do ICF systémů. Pozornost byla směřována na izolanty vyrobené z expandovaného a extrudovaného pěnového polystyrenu a polyuretanové pěny. Z důvodu jejich vhodných parametrů, dostupnosti na trhu a ceny materiálu. Na vybraných izolantech byly stanoveny vybrané fyzikální vlastnosti, jako objemová hmotnost a krátkodobá nasákavost. Zároveň byly také stanovovány vybrané mechanické vlastnosti, pevnost v tlaku při 10% deformaci, pevnost v tahu za ohybu a přídržnost k betonovému jádru. Tyto parametry posloužili pro rozhodnutí případného použití v ICF systémech a byly vybrány z důvodu vlastností souvisejících s aplikací ICF systému. Zároveň s vybranými izolanty byl zkoušen materiál aktuálně používaný v referenčním ICF systému na místě tuhé izolační desky. Na konci první etapy se výsledky jednotlivých parametrů vyhodnotily a zkoušené izolanty klasifikovaly do jednotlivých skupin.

V návaznosti na první etapu navazovala etapa druhá, v ní bylo především řešeno kotvení a spojování ICF systémů. Nejprve byla etapa věnována řešení samotné tvarovky, ze stávajícího a nově navrhnutého systému. Byl sledován jejich vzhled, systém a parametry. Dále byly zkoušeny a testovány plastové kotevní prvky, které se aktuálně používají při spojování polystyrenových bloků a hmoždiny, které mají předpoklad k použití u nového systému. Byly stanoveny mechanické vlastnosti kotvení na stávajícím systému a na nově navrhnutém systému. Na nově navrhnutém systému byla zkoušena pevnost v tahu za ohybu lepené spáry, která by mohla nahradit mechanické spojení dvou tvarovek. Odolnost proti vytržení hmoždin z izolantu bylo stanovováno jak na tvarovkách stávajícího systému, tak na izolačních deskách použitých pro výběr v nově navrhnutém systému. Zjišťování síly potřebné k vytržení hmoždin bylo zkoušeno při plném zapuštění a při částečném zapuštění. Částečné zapuštění bylo zkoušeno v několika hloubkách pro stanovení ideální hloubky hmoždiny a efektivního kotvení.

Třetí etapa praktické části byla věnována samotnému vyhodnocení výsledků zjištěných v předchozích dvou etapách. Na základě stanovených fyzikálně mechanických vlastností vybraných izolačních materiálů a mechanických vlastností kotvení byly vybrány vhodné tepelně izolační materiály, které byly následně použity k návrhu úpravy ICF systému.

## 4.2. I. ETAPA

V této etapě, jak bylo uvedeno v metodice práce, byl popsán výběr tepelných izolantů. K výběru posloužily kromě zjištěných informací v teoretické části také data z technických listů výrobků dostupných na českém trhu. Dále byly stanoveny vybrané fyzikální vlastnosti, které sloužily k upřesnění hodnot v technických listech a potřebné pro hodnocení parametrů navazující etapy. Jedná se o zjištění objemové hmotnosti výrobků a krátkodobé nasákavosti. Byly stanoveny i vybrané mechanické vlastnosti, jako pevnost v tlaku při 10% deformaci, pevnost v tahu za ohybu a přídržnost izolantu k betonovému jádru. Na základě zjištěných a vyhodnocených parametrů byly vybrané izolanty zaříděny.

### 4.2.1. Stávající izolant používaný v ICF

V ICF systémech se z velké části používá expandovaný pěnový polystyren s příměsí grafitových nanočástic, dále jen „Grey EPS“, nebo expandovaný pěnový polystyren o vyšších objemových hmotnostech, EPS 200 a EPS 250. Pro tuhle práci byl jako referenční izolant vybrán Grey EPS 200, se kterým byly vybrané izolační materiály po celou praktickou část porovnávány. Na obrázku č. 41 je výstavba domu pomocí ICF systému vyrobeného z Grey EPS 200. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce č. 2.



Obrázek 41: Výstavba domu pomocí ICF systému z Grey EPS 200

### 4.2.2. Výběr tepelných izolantů

Z velkého množství izolačních materiálů dostupných na trhu byly vybírány ty, které splňují následující požadavky. Mají minimální nasákavost, jsou na českém trhu běžně a cenově dostupné, mají nízkou tepelnou vodivost, jsou vyráběny v tuhých deskách a mají dostatečnou pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, aby odolaly tlaku čerstvého betonu při betonáži. Mají tedy předpoklad toho, že budou vhodné k použití do ICF systémů. Tyto parametry splňují izolanty vyrobené z expandovaného pěnového polystyrenu, extrudovaného pěnového polystyrenu a polyuretanu.

V tabulce č. 2 je přehled těchto izolantů a jejich důležitých parametrů. Z nich bylo několik vybraných a dále zkoušených podle metodiky práce.

Tabulka 2: Přehled vybraných tepelných izolantů dostupných na českém trhu [89–96]

	Pevnost v tlaku při 10% deformaci [kPa]	Pevnost v tahu za ohybu [kPa]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	Třída reakce na oheň	Nasákavost [%]
EPS 70	70	115	13,5-18	0,039	E	<5
EPS 100	100	150	18-23	0,037	E	<5
EPS 150	150	200	23-28	0,035	E	<5
EPS 200	200	250	28-35	0,034	E	<5
EPS 250	250	300	35-40	0,031	E	<5
Grafitový EPS 70	70	115	13,5-18	0,032	E	<5
Grafitový EPS 100	100	150	18-23	0,031	E	<5
Grafitový EPS 150	150	200	23-28	0,031	E	<5
Grafitový EPS 200 (referenční)	200	250	28-35	0,030	E	<5
EPS Perimetr 150	150	200	23-28	0,035	E	<3
EPS Perimetr 200	200	250	28-32	0,034	E	<3
XPS 250	250	200	29-36	0,032	E	<0,5
XPS 300	300	300	29-39	0,032	E	<0,5
XPS 500	500	200	33-42	0,033	E	<0,5
XPS 700	700	200	37-47	0,033	E	<0,5
PUR	150	250	32-35	0,022	E	<3

Na základě dotazů na prováděcí firmy byly vybrány izolanty, které jsou nejdostupnější, nejžádanější a nejpoužívanější. Kromě referenčního izolantu Grey EPS 200, zmíněného v předchozí kapitole, byly vybrány všechny dostupné druhy klasického expandovaného pěnového polystyrenu, tedy EPS 70, EPS 100, EPS 150, EPS 200 a EPS 250, z důvodu vzájemného porovnání. Kvůli nižší nasákavosti byl zvolen i EPS Perimetr 150. Díky odlišné struktuře a nízké nasákavosti byl vybrán i extrudovaný pěnový polystyren. Jelikož se XPS používá převážně k zateplení soklových částí budov, byl z toho důvodu zvolen jen jeden typ a to XPS 500. Jako poslední byl vybrán polyuretan, PUR. Deskám z polyuretanové pěny se dostává v poslední době velké oblibě, díky obdobným parametrům, jako má EPS, ale především přibližně o třetinu nižšímu součiniteli tepelné vodivosti. Vybrané izolanty jsou v tabulce č. 2 zvýrazněny šedou barvou a vyobrazeny na obrázku č. 42. Jejich podrobnější vlastnosti jsou popsány v teoretické části.



Obrázek 42: Vybrané tepelné izolanty

### 4.2.3. Stanovení vybraných fyzikálních vlastností

Na referenčním izolantu a vybraných izolantech, které se jeví jako vhodné pro využití v ICF systému, byly stanoveny vybrané fyzikální vlastnosti. Zkoušela se objemová hmotnost a krátkodobá nasákavost. Obě zkoušky proběhly podle níže uvedených postupů.

#### 4.2.3.1. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost tepelně izolačních výrobků pro použití ve stavebnictví se stanovila dle normy ČSN EN 1602. Samotný výpočet tohoto parametru byl stanoven dle vzorce:

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

kde je

$m$  hmotnost zkušební tělesa, v kg;

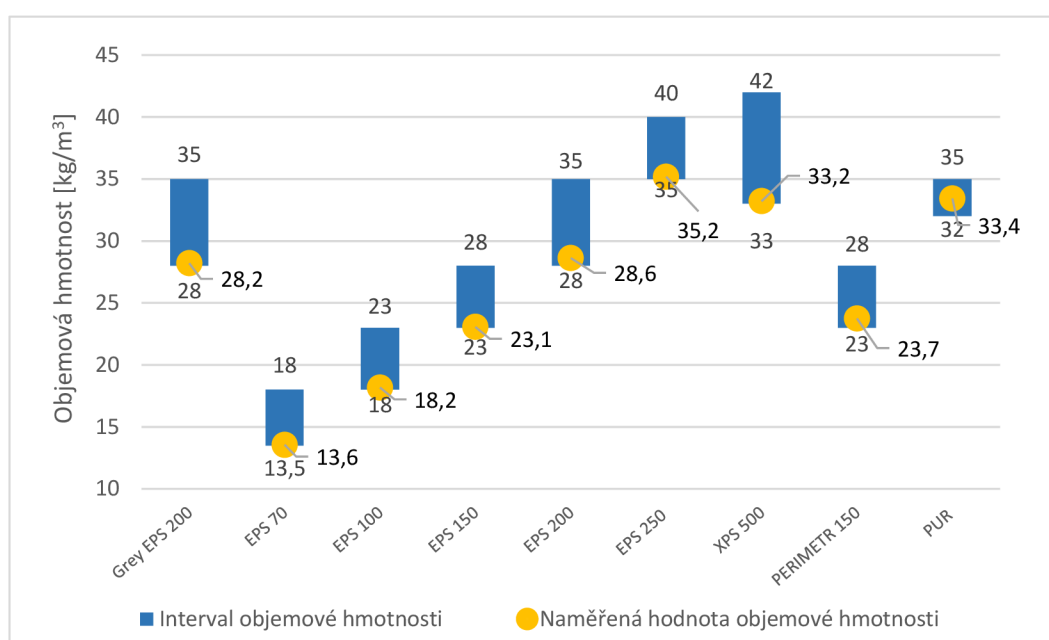
$V$  objem zkušební tělesa, v m<sup>3</sup>;

$\rho$  objemová hmotnost, kg/m<sup>3</sup> [97].

Jelikož je rozmezí celkem široké, bylo třeba si hodnotu objemové hmotnosti zpřesnit a ověřit, především pro návaznost dalších parametrů v navazující etapě. Při jejím stanovování byly od každého izolantu připraveny tři vzorky, jež byly následně změřeny a zváženy. Hodnoty dosazeny do uvedeného vzorce a z nich vypočítaná objemová hmotnost. Zprůměrované hodnoty objemových hmotností všech zkoušených vzorků jsou uvedeny v tabulce č. 3. Tyto hodnoty byly následně pro kontrolu srovnány s objemovými hmotnostmi uvedenými v technických listech. V grafu č. 2 je vyobrazeno rozmezí objemových hmotností jednotlivých izolantů zjištěných z technických listů a hodnoty změřených objemových hmotností. Z grafu č. 2 vyplývá, že objemové hmotnosti odpovídají informaci v technických listech.

Tabulka 3: Hodnoty změřených a uváděných objemových hmotností

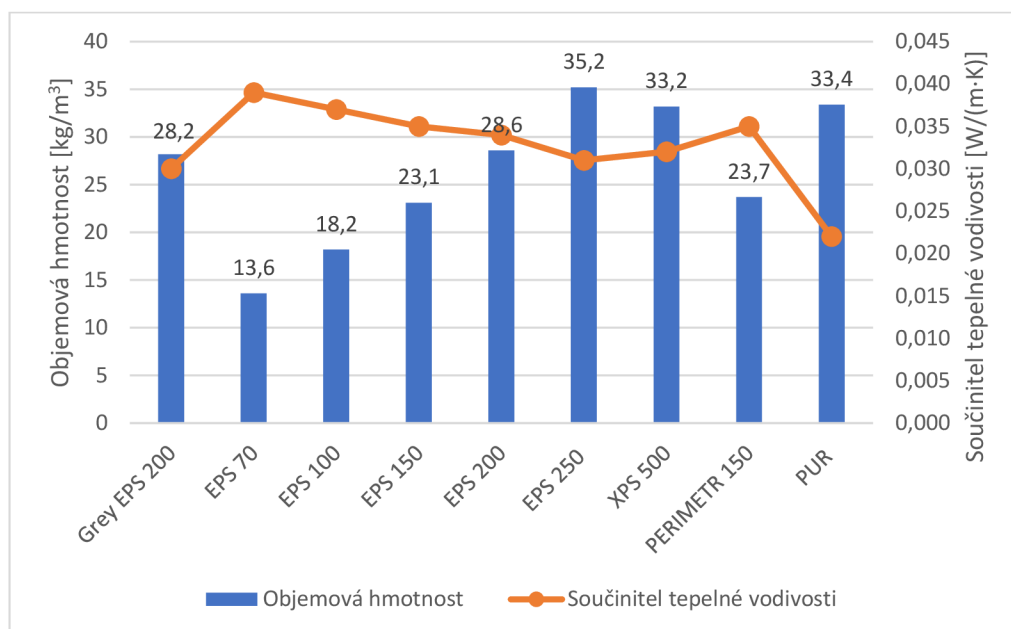
	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Naměřená	Deklarovaná výrobcem
Grey EPS 200 (referenční)	28,2	28-35
EPS 70	13,6	13,5-18
EPS 100	18,2	18-23
EPS 150	23,1	23-28
EPS 200	28,6	28-35
EPS 250	35,2	35-40
XPS 500	33,2	33-42
PERIMETR 150	23,7	23-28
PUR	33,4	32-35



Graf 2: Interval deklarovaných objemových hmotností a naměřená objemová hmotnost jednotlivých tepelných izolantů

S rostoucí objemovou hmotností roste hutnost materiálu, s tím souvisí vyšší pevnost v tlaku, v tahu za ohybu a v tahu. Roste však i pracnost a náročnost na manipulaci s materiálem. Je důležité si uvědomit i to, že s rostoucí hutností se zvyšuje potřeba použití techniky při zavrtávání různých prvků do izolantu. Například plastových hmoždinek při sestavování tvárnice do ICF systémů. V tomto případě je však nutné použít technické zařízení i u EPS 70, který má ze zkoušených izolantů nejnižší objemovou hmotnost a je tedy nejméně hutný. Velkou výhodou rostoucí objemové hmotnosti je však klesající součinitel tepelné vodivosti.

V grafu č. 3 je znázorněna objemová hmotnost společně se součinitelem tepelné vodivosti. U polystyrenových izolantů je vidět klesání součinitele tepelné vodivosti při růstu objemové hmotnosti, jak bylo popsáno v teoretické části. U polyuretanové desky je rozdíl mezi objemovou hmotností a tepelnou vodivostí mnohem intenzivnější.



Graf 3: Porovnání součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů a objemové hmotnosti

#### 4.2.3.2. Krátkodobá nasákavost

Krátkodobá nasákavost při částečném ponoření tepelněizolačních výrobků pro použití ve stavebnictví se stanovila dle normy ČSN EN ISO 29767, metoda A odkapání. Samotný výpočet tohoto parametru byl stanoven dle vzorce:

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p}$$

kde je

$m_0$  počáteční hmotnost zkušebního tělesa, v kg;

$m_{24}$  hmotnost zkušebního tělesa po 24 h částečného ponoření, v kg;

$A_p$  plocha spodního povrchu zkušebního tělesa, v m<sup>2</sup>;

$W_p$  krátkodobá nasákavost, v kg/m<sup>2</sup> [98].

Zkouška krátkodobé nasákavosti byla prováděna z toho důvodu, že desky tuhého izolantu v ICF systémech jsou v přímém kontaktu s čerstvým betonem. Bylo tedy nutné ověřit, jestli míra nasákavosti neovlivní kvalitu, objemovou hmotnost nebo soudržnost izolantu s betonovým jádrem.

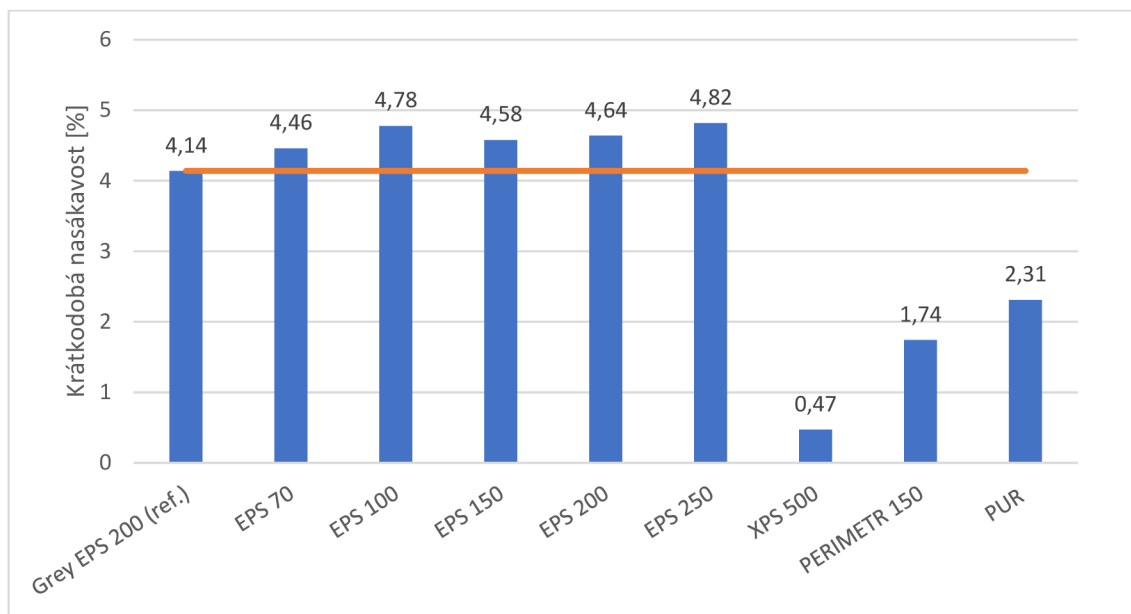
Krátkodobá nasákavost byla stanovena metodou A. Zkušební vzorky pěnového polystyrenu byly připraveny pomocí odporového drátu a vzorky polyuretanu pilou, o velikosti půdorysu 200×200 mm. Od každého izolantu byly připraveny 3 vzorky. Všechny vzorky byly změřeny, zváženy a na 24 hodin částečně ponořeny do vody. Po 24 hodinách se vzorky vytáhly, nechaly se na 10 minut okapat a zvážily. Byla vypočítána krátkodobá nasákavost v kg/m<sup>2</sup> a v %. Výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 4 a grafu č. 2.

Tabulka 4: Výsledné hodnoty krátkodobé nasákavosti v [kg/m<sup>2</sup>] a v [%] tepelných izolantů

	Krátkodobá nasákavost		Výrobce deklarovaná nasákavost
	[kg/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
Grey EPS 200 (referenční)	0,08	4,14	<5
EPS 70	0,04	4,46	<5
EPS 100	0,04	4,78	<5
EPS 150	0,07	4,58	<5
EPS 200	0,07	4,64	<5
EPS 250	0,06	4,82	<5
XPS 500	0,004	0,47	<0,5
PERIMETR 150	0,04	1,74	<3
PUR	0,03	2,31	<3

Krátkodobá nasákavost všech expandovaných polystyrenů byla podle očekávání pod 5 %. U EPS 70–EPS 250 jsou nasákavosti prakticky totožné. Referenční vzorek – Grey EPS měl nasákavost téměř o 0,5 % nižší v porovnání s klasickým EPS. EPS Perimetr dosáhl nasákavosti díky své hutnější struktuře pod 2 %. Vůbec nejnižší nasákavost ze všech vzorků měl extrudovaný polystyren, a to díky své struktuře. Jeho výsledná nasákavost se oproti deklarované hodnotě lišila v setinách procent. Desky z polyuretanové pěny nedosahovaly nasákavosti vyšší než 3 %. Výsledné hodnoty tedy odpovídaly deklarovaným hodnotám uvedených v technických listech výrobků.

Z grafu č. 4 vyplývá, že v porovnání s referenčním vzorkem, Grey EPS 200 používaným v ICF systému, z pohledu nasákavosti, byly všechny vzorky vyhovující, v grafu je znázorněno oranžovou linkou. Nasákavost měly buď nižší nebo jen o 0,5 % vyšší, což při kontaktu s čerstvým betonem nehraje významnou roli. A mohou být do ICF systému použity.



Graf 4: Krátkodobá nasákavost tepelných izolantů dle normy ČSN EN ISO 29767

#### 4.2.4. Stanovení vybraných mechanických vlastností

V této části byly stanovovány některé mechanické vlastnosti izolačních materiálů, vybraných v předchozí části. Z důvodu možného použití v ICF systémech, kde budou izolanty odolávat tlaku betonu, ve formě ztraceného bednění, byla mimo jiné pozornost věnována i rozhraní obou materiálů. Čerstvý beton bude na izolant působit velkými silami, proto byla sledována pevnost v tahu za ohybu. Současně byla sledována také pevnost v tlaku při 10% deformaci.

##### 4.2.4.1. Stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu

Stanovování přídržnosti tepelného izolantu k betonovému jádru bylo inspirováno normou ČSN 73 2577, zkouška přídržnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu. Přídržnost tepelného izolantu k betonu byla stanovena dle vzorce:

$$\sigma_{adh} = 10^3 \cdot \frac{F}{A}$$

kde je

$F$  síla potřebná k odtržení terče, v N;

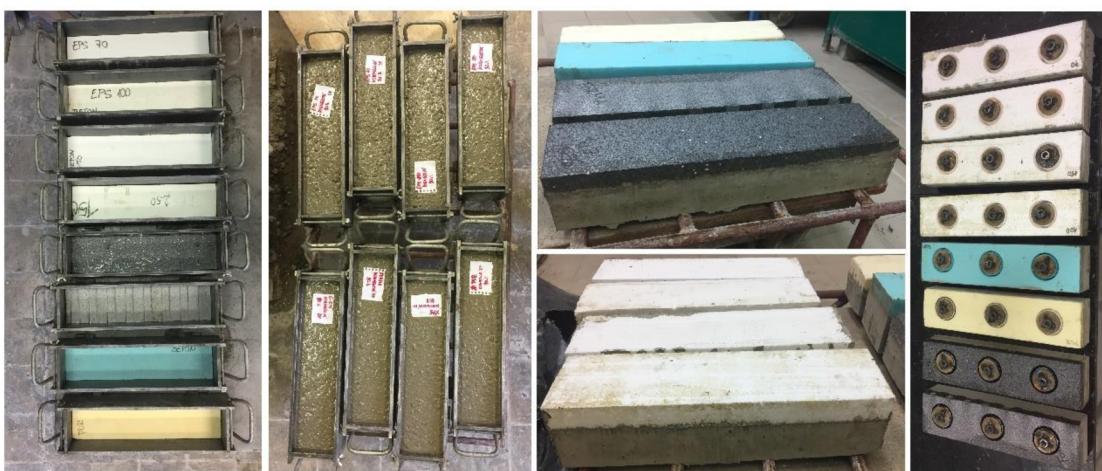
$A$  plocha terče, v mm<sup>2</sup>;

$\sigma$  přídržnost povrchové úpravy k podkladu, v kPa [101].

Jak již bylo zmíněno, v ICF systémech přichází izolační materiál do přímého kontaktu s betonovým jádrem. Aby mohl ICF systém správně plnit svou funkci, musí být systém soudržný a jednotlivé materiály se od sebe nesmí separovat. Bylo tedy vhodné zjistit soudržnost jednotlivých izolantů s betonovým jádrem.



Zkušební vzorky byly připraveny v ocelové formě 100×100×400 mm. Na dno formy byl vložen izolant, z důvodu sjednocení byla volena tloušťka 30 mm, a následně byl zalit betonem C30/37 o konzistenci S3. Tepelně izolační materiál byl do formy vždy vložen tak, aby plocha v kontaktu s betonem byla původní finální plocha izolantu provedená výrobcem. Na zkušební tělesa byly přilepeny kruhové kovové terče o průměru 50 mm. Po ztvrdnutí betonu bylo provedeno vykroužení izolantu k podkladu o průměru 50 mm dle přilepeného terče. Od každého izolantu byly takto připraveny tři terče. Lepidlo bylo voleno vzhledem k povaze izolantů a po vytvrzení byly provedeny odtrhové zkoušky – stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu. Celý výrobní cyklus je zdokumentován na obrázku č. 43 a trhací přístroj na obrázku č. 44.

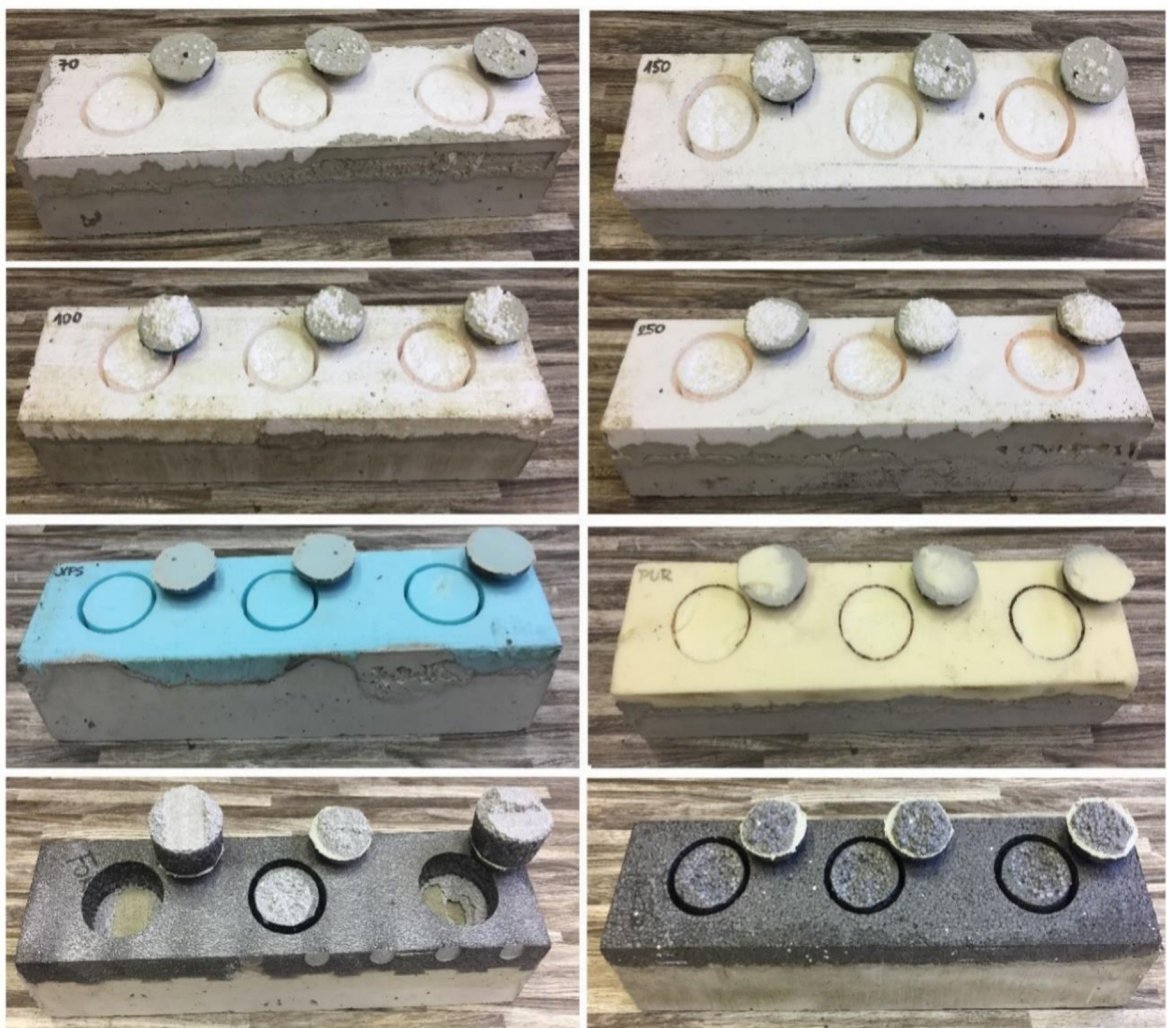


Obrázek 43: Výroba zkušebních těles pro stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu



Obrázek 44: Odtrhový přístroj pro stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu

Na obrázku č. 45 jsou snímky vzorků po stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu. U EPS 70 došlo k porušení všech vzorků na rozhraní lepidla a polystyrenu, znamená to tedy, že pevnost v tahu EPS 70 a jeho přídržnost k betonovému jádru je vyšší, než přídržnost izolantu k lepidlu. U EPS 100 došlo k odtržení z poloviny v materiálu a z druhé poloviny na rozhraní lepidla a izolantu. Přídržnost mezi lepidlem a EPS 100 je kompaktnější než u EPS 70, nemá tedy na výsledky tak velký vliv. EPS 150 dopadl v této zkoušce obdobně jako EPS 100. U EPS 250 došlo k porušení ve všech případech po celé ploše v materiálu. Znamená to tedy, že přídržnost izolantu k betonovému jádru je větší, než pevnost v tahu izolantu. Adheze lepidla k izolantu je tedy dostatečná a nemá na výsledek zkoušky žádný vliv.



Obrázek 45: Vzorky po zkoušce stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu

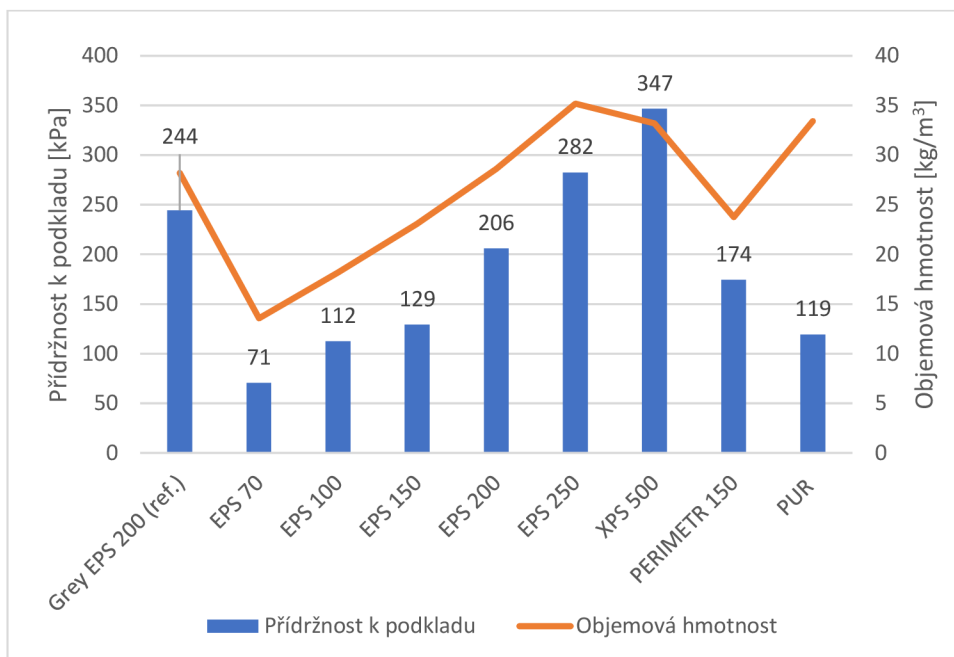
Tepelně izolační materiál XPS dosahoval vysokých pevností, k porušení došlo na rozhraní lepidla a materiálu. Pevnost v tahu materiálu a přídržnost izolantu k betonovému jádru je vyšší, než přídržnost lepidla k XPS. K porušení u vzorků PUR došlo ve všech případech z velké části v materiálu. V případě Grey EPS došlo u dvou vzorků k porušení na rozhraní betonu a materiálu, třetí vzorek se porušil v materiálu. Přídržnost Grey EPS k betonu je nižší, než pevnost v tahu materiálu. U PERIMETRU se všechny zkušební vzorky porušily po celé ploše v materiálu.

*Tabulka 5: Výsledky zkoušky přídržnosti tepelného izolantu k betonu a místa porušení*

	Síla [kN]	Přídržnost k podkladu [kPa]	Místo porušení
Grey EPS 200 (referenční)	0,1388	244	v materiálu/rozhraní izolant-beton
EPS 70	0,2206	71	v lepidle
EPS 100	0,2539	112	v lepidle/v materiálu
EPS 150	0,4042	129	v lepidle/v materiálu
EPS 200	0,5544	206	v materiálu
EPS 250	0,6807	282	v materiálu
XPS 500	0,4797	347	v lepidle
PERIMETR 150	0,3423	174	v materiálu
PUR	0,2343	119	v materiálu

V tabulce č. 5 jsou sepsány a v grafu č. 5 vyobrazeny výsledky zkoušek přídržnosti tepelného izolantu k betonu. Přídržnost izolantu k betonovému podkladu, jak lze vidět v grafu č. 5, je úměrně závislá na objemové hmotnosti. Podle očekávání dosáhl nejvyšší přídržnosti XPS následovaný EPS 250.

Grafem prochází závislost, kdy u polystyrenových izolantů s rostoucí objemovou hmotností roste i přídržnost k betonovému jádru. Podle rešerše v teoretické části je stejná závislost i u polyuretanové desky, k ověření by však bylo potřeba odzkoušet více vzorků, ty však na českém trhu nebyly k dispozici. Nevýhodou PUR je, že s docela vysokou objemovou hmotností dosahuje nízké přídržnosti, v porovnání s EPS a XPS. V tomhle ohledu nejlépe dopadlo XPS, kdy s vcelku nízkou objemovou hmotností dosahuje vysoké přídržnosti.



Graf 5: Přídržnost tepelného izolantu k betonu v porovnání s objemovou hmotností

#### 4.2.4.2. Stanovení pevnosti v tlaku při 10% deformaci

Pevnost v tlaku při 10% deformaci tepelně izolačních výrobků pro použití ve stavebnictví se stanovila dle normy ČSN EN 826. Samotný výpočet tohoto parametru byl stanoven dle vzorce:

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

kde je

$F_{10}$  síla odpovídající 10% deformaci, v N;

$A_0$  počáteční plocha průřezu zkušební tělesa, v mm<sup>2</sup>;

$\sigma_{10}$  napětí při 10% deformaci, v kPa [99].

Tuhá deska z tepelně izolačního materiálu bude za dobu své existence v ICF systému vystavena různému napětí a silám. Hlavně při působení čerstvého betonu, než si beton po vytvrzení přebere nosnou funkci. Při přenášení vlastní tíhy na izolační desky působí tlačná síla, z toho důvodu se zjišťovala pevnost v tlaku při 10% deformaci.

Od každého izolantu byly připraveny 3 zkušební vzorky. Vzorky ve tvaru hranolu byly o rozměrech 150×150 mm a tloušťce 100 mm, obrázek č. 46. Vzorky se umístily do zkušební lisu, kde se měřil průběh sil potřebných k dosažení 10% deformace nebo pevnosti v tlaku. Ze získaného grafu, závislosti síly na deformaci, bylo určeno, zda došlo při stlačování dříve k 10% deformaci nebo k porušení vzorku.

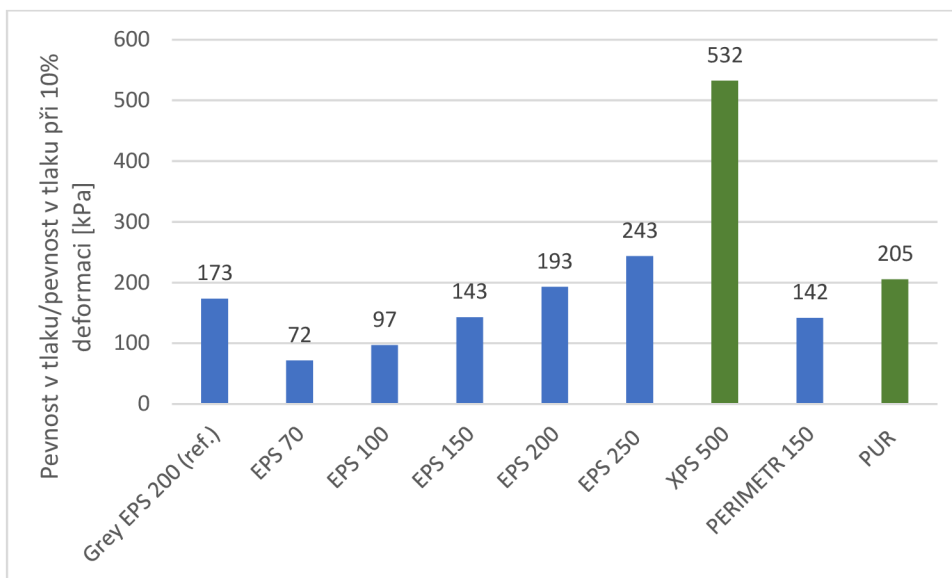


Obrázek 46: Vzorky tepelných izolantů připravené ke zkoušce pevnosti v tlaku při 10% deformaci

Tabulka 6: Hodnoty pevností v tlaku při 10% deformaci a pevností v tlaku zkoušených tepelných izolantů

	Pevnost při 10% deformaci		Pevnost v tlaku		Deklarovaná pevnost
	Síla [kN]	Pevnost [kPa]	Síla [kN]	Pevnost [kPa]	
Grey EPS 200 (referenční)	3,9	174,1	-	-	200
EPS 70	1,6	71,2	-	-	70
EPS 100	2,1	92,4	-	-	100
EPS 150	3,2	141,3	-	-	150
EPS 200	4,3	192,7	-	-	200
EPS 250	5,5	244,0	-	-	250
XPS 500	-	-	11,95	532,4	500
PERIMETR 150	3,2	144,1	-	-	150
PUR	-	-	4,7	205,3	200

V tabulce č. 6 a grafu č. 6 jsou uvedeny hodnoty pevností v tlaku při 10% deformaci nebo pevnosti v tlaku. To, která hodnota je u daného vzorku uvedena záleží na tom, který parametr byl při zatěžování dosažen jako první. Pokud byl vzorek porušen dříve, než bylo dosaženo 10% deformace uvádí se pevnost v tlaku a naopak. U všech vzorků, které jsou dostatečně pružné bylo dříve dosaženo 10% deformace (v grafu označeny modře). U XPS 500 a PUR došlo dřív k porušení vzorku, tedy k dosažení pevnosti v tlaku (v grafu označeny zeleně).



Graf 6: Pevnost v tlaku při 10% deformaci a pevnost v tlaku u vybraných tepelných izolantů

Výrobci u všech svých zkoušených izolantů deklarují minimální pevnost v tlaku při 10% deformaci. U XPS a PUR však nebylo 10% deformace dosaženo, dřív došlo k porušení vzorku. V tabulce č. 6 je srovnání změřených pevností s deklarovanými. Hodnoty zjištěných pevností však těm deklarovaným ve většině případech neodpovídaly. Liší se od sebe v průměru o 7 %. Minimální deklarované pevnosti v tlaku nebyly ověřeny.

Pevnost v tlaku při 10% deformaci u expandovaných pěnových polystyrenů souvisí s měnící se objemovou hmotností. Nejnižších pevností podle očekávání dosáhl EPS 70 a EPS 100, jejich nízká objemová hmotnost jim dosažení vyšších pevností nedovolila. EPS 150 a PERIMETR 150 dosáhly pevností téměř totožných. Odlišná technologie výroby perimetru na pevnost v tlaku nemá podstatný vliv.

Příměs grafitu do EPS nijak zvlášť neovlivňuje pevnost v tlaku, z toho důvodu Grey EPS 200 se pevností podobá EPS 200. Z expandovaných pěnových polystyrenů měl největší pevnost v tlaku EPS 250, díky své vysoké objemové hmotnosti. Všechny expandované pěnové polystyreny dosáhly dřív 10% deformace. Kvůli způsobu výroby tzv. extruzí dosáhl podle předpokladu nejvyšší pevnosti XPS 500. V porovnání s EPS 250 až dvojnásobnou hodnotu pevnosti. Tvrdá struktura XPS však nedovolila materiálu velkou deformaci, proto byl izolant dříve porušen, než došlo k 10% deformaci. Z pohledu chování materiálu při zatěžování se PUR pěna chovala stejně jako XPS. Došlo dříve k porušení než 10% deformaci, obrázek č 47.



Obrázek 47: Porušení při stanovování pevnosti v tlaku před dosažením 10% deformace PUR

#### 4.2.4.3. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu tepelně izolačních výrobků pro použití ve stavebnictví se stanovila dle normy ČSN EN 12089, metodou B. Samotný výpočet tohoto parametru se stanovil dle vzorce:

$$\sigma = 3 \cdot 10^3 \cdot \frac{F_m \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$$

kde je

- $F_m$  největší dosažená síla, v N;
- $L$  rozpětí mezi podpěrami, v mm;
- $b$  šířka zkušebního tělesa, v mm;
- $d$  tloušťka zkušebního tělesa, v mm;
- $\sigma$  pevnost v tahu za ohybu, kPa [100].

Pevnost v tahu za ohybu se zkoušela z důvodu, že při působení čerstvého betonu v ICF systému dochází k namáhání izolační desky v kolmém směru z boční strany, je tedy namáhán tahem za ohybu. Bylo potřeba zjistit hodnoty pevností a stanovit, jestli je izolant schopný odolat náporu čerstvého betonu.

Zkušební vzorky byly připraveny tvaru hranolu o rozměrech 150×550 mm a tloušťce 150 mm, obrázek č. 48. Vzorky byly umístěny do zkušebního lisu a měřila se síla potřebná k dosažení porušení izolantu, obrázek č. 49.



Obrázek 48: Zkušební vzorky tepelných izolantů pro pevnost v tahu za ohybu



Obrázek 49: Tepelné izolanty při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu; vlevo – PERIMETR, vpravo – PUR

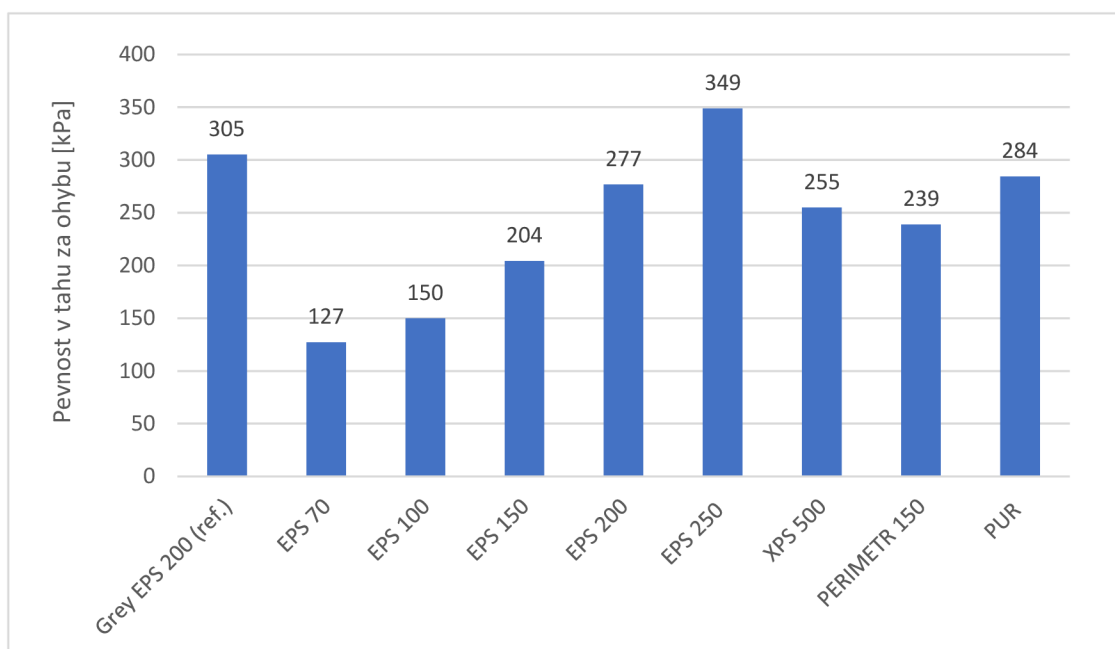
Při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu docházelo u méně hutných materiálů, jako je PUR, EPS 70 a EPS 100, před porušením ke značnému průhybu. U polystyrenových izolantů vyšší hutnosti, tedy EPS 150 a výš, před porušením k průhybu téměř nedochází. Materiály jsou tuhé a neohebné, to je u ICF systémů vítané vzhledem ke kontaktu s čerstvým betonem. Kde zvláště ve spodní části dochází k velkým tlakům.

V tabulce č. 7 jsou uvedeny pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých izolantů, síly potřebné k porušení a objemové hmotnosti izolantu. Od každého izolantu byly zkoušeny tři vzorky, výsledné hodnoty byly pak zprůměrovány a napsány do následující tabulky. S tabulkou č. 7 souvisí graf č. 7, ve kterém jsou vyobrazeny změřené pevnosti v tahu za ohybu.



Tabulka 7: Pevnosti tepelných izolantů v tahu za ohybu

	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost v tahu za ohybu [kPa]	Pevnost v tahu za ohybu deklarovaná výrobcem [kPa]
Grey EPS 200 (referenční)	28,2	0,65	305	250
EPS 70	13,6	0,25	127	115
EPS 100	18,2	0,30	150	150
EPS 150	23,1	0,43	204	200
EPS 200	28,6	0,58	277	250
EPS 250	35,2	0,73	349	300
XPS 500	33,2	0,50	255	200
PERIMETR 150	23,7	0,50	239	200
PUR	33,4	0,53	284	250



Graf 7: Pevnosti tepelných izolantů v tahu za ohybu

Z tabulky č. 7 a grafu č. 7 je zřejmé, že referenčnímu izolantu může po pevnostní stránce konkurovat jen EPS 250, ten má dokonce pevnost v tahu za ohybu o šestinu vyšší. EPS 70 kvůli své nízké objemové hmotnosti a pěnové struktuře dosahuje v porovnání s referenčním izolantem jen třetinové pevnosti. EPS 100 a EPS 150 jsou na tom velmi podobně, jen jejich pevnost je v porovnání s referenčním vzorkem poloviční. EPS o nižších objemových hmotnostech, tedy EPS 150 a nižší, nejsou tedy pro ICF moc vhodné. EPS 250 a EPS 200 jsou k použití vhodnější. PERIMETR 150 má pevnost v tahu za ohybu o šestinu nižší, k dosažení vyšší pevnosti v tahu za ohybu by bylo nutné zvolit PERIMETR o vyšší objemové hmotnosti. XPS sice dosahuje vysokých pevností v tlaku při 10% deformaci, ale pevnosti v tahu za ohybu tomu neodpovídají.

U XPS s rostoucí pevností v tlaku, pevnost v tahu za ohybu neroste jako u ostatních zkoušených izolantů. Tedy volba XPS o vyšší pevnosti v tlaku při 10% deformaci by nízkou pevnost v tahu za ohybu nevyřešil. Pevnost v tahu za ohybu u PUR se téměř shoduje s EPS 200. Je tedy pro použití z pohledu pevnosti v tahu za ohybu vhodný.

#### 4.2.5. Shrnutí parametrů tepelných izolantů

Tabulka 8: Shrnutí výsledků zkoušek z první etapy

	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Krátkodobá nasákavost [%]	Pevnost v tlaku při 10% deformaci [kPa]	Pevnost v tahu za ohybu [kPa]	Přídržnost izolantu k podkladu [kPa]
Grey EPS 200 (referenční)	28,2	4,14	173	305	244
EPS 70	13,6	4,46	72	127	71
EPS 100	18,2	4,78	97	150	112
EPS 150	23,1	4,58	145	204	129
EPS 200	28,6	4,64	188	277	206
EPS 250	35,2	4,82	243	349	282
XPS 500	33,2	0,47	532	255	347
PERIMETR 150	23,7	1,74	142	239	174
PUR	33,4	2,31	205	284	119

Kompletní přehled sledovaných fyzikálně mechanických vlastností je uveden v tabulce č. 8. Výše popsanými zkouškami došlo k ověření a zpřesnění některých parametrů deklarovaných výrobcí. Až na pevnost v tlaku při 10% deformaci se zkoušené parametry izolačních materiálů shodují s parametry uvedenými v technických listech výrobků. Pevnosti v tlaku při 10% deformaci jsou v porovnání s deklarovanými pevnostmi nižší, ale rozdíl je do 10 %. S tím, že ostatní zjištěné parametry s deklarovanými souhlasí, až na drobné neshody v pevnostech v tlaku, byly všechny vybrané izolační materiály klasifikovány tak, jak bylo uvedeno výrobcem, což je uvedeno v tabulce č. 8.

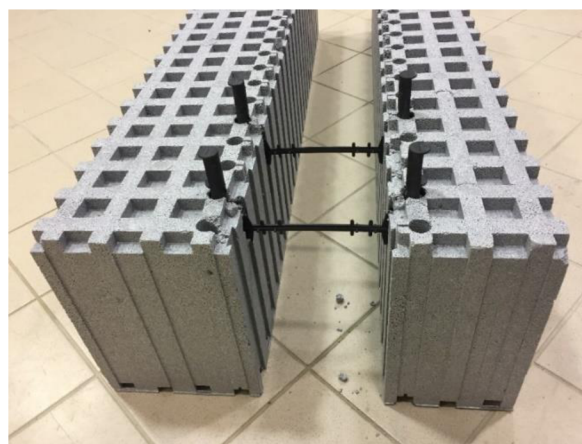
### 4.3. II. ETAPA

Druhá etapa byla věnována mechanickým vlastnostem kotvení ICF systému. Zkoušky byly prováděny na stávajícím systému i na nově navrženém systému. Byla zkoušena především odolnost hmoždin proti vytržení z izolantu, při plném a částečném zapuštění. Byl zkoušen i lepený spoj, který by mohl mezi jednotlivými tvárnici nahradit spoj mechanický. Podle těchto vyzkoušených parametrů byla ve třetí etapě navržena úprava ICF systému. Vlastnosti vybraného ICF systému

K návrhu úpravy ICF systému bylo nejprve potřeba stanovit fyzikálně mechanické parametry vybrané tvárnice ICF systému, který je běžně realizován v praxi. Byla vybrána tvárnice sestavená ze dvou polystyrenových bloků Grey EPS 200, vzájemně spojených plastovými kotvami, obrázek č. 50 a obrázek č. 51. Fyzikálně mechanické parametry polystyrenových bloků byly stanoveny v první etapě, kdy Grey EPS 200 sloužil jako referenční materiál.



Obrázek 50: Jednotlivé části ICF systému: polystyrenové bloky (vlevo), plastová kotva (vpravo)



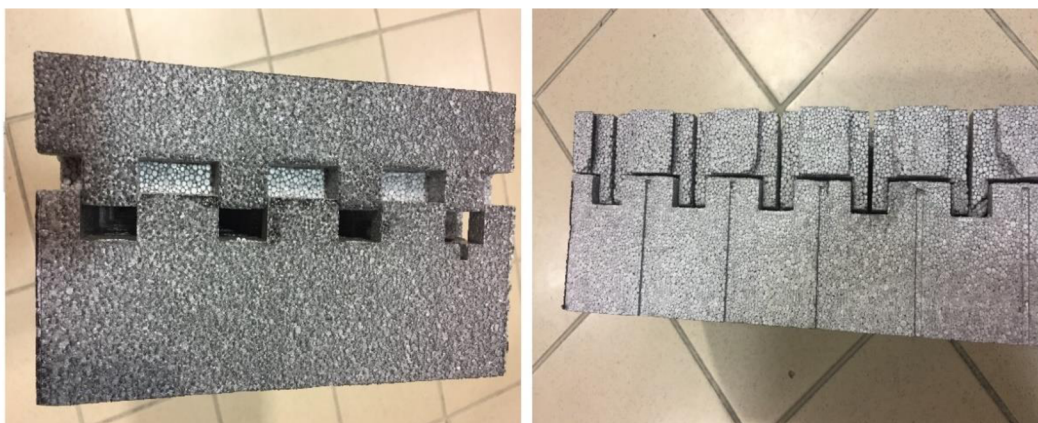
Obrázek 51: Tvárnice ICF systému – vzájemné propojení

Plastové kotvy se sestavují ze tří částí, ze dvou vertikálních částí vsunutých do otvorů tepelně izolační tvarovky a horizontální kotvy spojující tvarovky či tvarovky s bedněním, v závislosti na variantě stěny viz obrázek č. 52. Funkcí plastových spojek je spojení polystyrenových bloků do jedné tvárnice a zároveň vertikální stabilizace dvou tvárníc mezi sebou.



Obrázek 52: Plastová kotva ICF systému: stojky (vlevo), spojka (vpravo)

Dvě tvárnice mezi sebou kromě plastových spojek spojuje i mechanický spoj, který do sebe zapadá jako stavebnice, což lze vidět na obrázek č. 53. Systém se tímto způsobem propojí a stabilizuje.



Obrázek 53: Mechanický horizontální spoj ICF systému

Jako úprava ICF systému se naskytla možnost nahradit Grey EPS 200 jiným druhem izolantu zkoušeným v první etapě. Místo kotev použít plastové hmoždiny zapuštěné v izolantu a vzájemně propojené spojkami. A mechanický spoj nahradit lepeným spojem z důvodu zjednodušení tvarového požadavku na tepelně izolační blok, kdy bylo možné nahrazení pouze deskou.

### 4.3.1. Mechanické vlastnosti kotvení

K úpravě ICF podle výše zmíněného návrhu bylo potřeba stanovit vlastnosti kotvení na stávajícím systému a na nově navrhnutém systému. Na nově navrhnutém systému byla stanovena pevnost v tahu za ohybu lepeného spoje, který by mohl nahradit mechanický spoj. Odolnost proti vytržení hmoždin z izolantu byla stanovována jak na tvarovkách stávajícího systému, tak na izolačních deskách použitých v nově navrhovaném systému, aby bylo možné porovnat rozdíly z pohledu kotvení. Stanovení síly potřebné k vytržení hmoždin bylo zkoušeno při plném zapaštění i při částečném zapaštění v různých hloubkách. Nakonec byla stanovena síla potřebná k porušení plastové spojky ve stávajícím systému kotvení, který je odlišný od nově uvažovaného, kde je použití hmoždin do tepelného izolantu.

#### 4.3.1.1. Pevnost v tahu za ohybu lepeného spoje

Pevnost v tahu za ohybu tepelně izolačních výrobků pro použití ve stavebnictví se stanovila dle normy ČSN EN 12089, metodou B. Samotný výpočet tohoto parametru se stanovil dle vzorce:

$$\sigma = 3 \cdot 10^3 \cdot \frac{F_m \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$$

kde je

- $F_m$  největší dosažená síla, v N;
- $L$  rozpětí mezi podpěrami, v mm;
- $b$  šířka zkušební tělesa, v mm;
- $d$  tloušťka zkušební tělesa, v mm;
- $\sigma$  pevnost v tahu za ohybu, kPa [100].

Bloky ICF systému jsou mezi sebou vzájemně spojeny mechanickým spojem, stavebnicovým systémem v ložné spáře a systémem pero–drážka ve styčné spáře. Jinou variantou by mohl být spoj, kdy by byly bloky k sobě spojeny lepidlem. Kromě pevnosti v tahu za ohybu tepelně izolačního materiálu byla zkoušena tedy i pevnost v tahu za ohybu lepeného spoje, u PUR a EPS 250, obrázek č. 54. Jedná se o varianty, které by bylo možné použít.



Obrázek 54: Zkušební vzorky tepelných izolantů na zkoušku pevnosti v tahu za ohybu lepeného spoje

Ke slepení bylo použito dvousložkové lepidlo vhodné pro vzájemné lepení pěnových materiálů na bázi polyetheru a polyuretanu. Lepidlo je založené na vodní bázi a neobsahuje žádná rozpouštědla. Je nehořlavé a netoxické. Doba pro vytvrzení je od 0 do 30 minut. Nanáší se nástřikem na oba spojované povrchy, má vynikající tepelnou odolnost, razantní počáteční vytvrzování, vysoký obsah sušiny a vynikající vydatnost.

Zkouška proběhla podle normy ČSN EN 12089, metodou B, stejně jako zkouška na stanovení pevnosti v tahu za ohybu. S rozdílem, že zkušební hranol byl lepen ze dvou částí, které byly k sobě následně slepeny, obrázek č. 54. Po vytvrzení lepidla byl vzorek vložen do lisu tak, že zatěžovací břemeno působilo přímo na lepený spoj viz obrázek č. 55.



Obrázek 55: Působení ohybového zatížení na lepený vzorek PUR

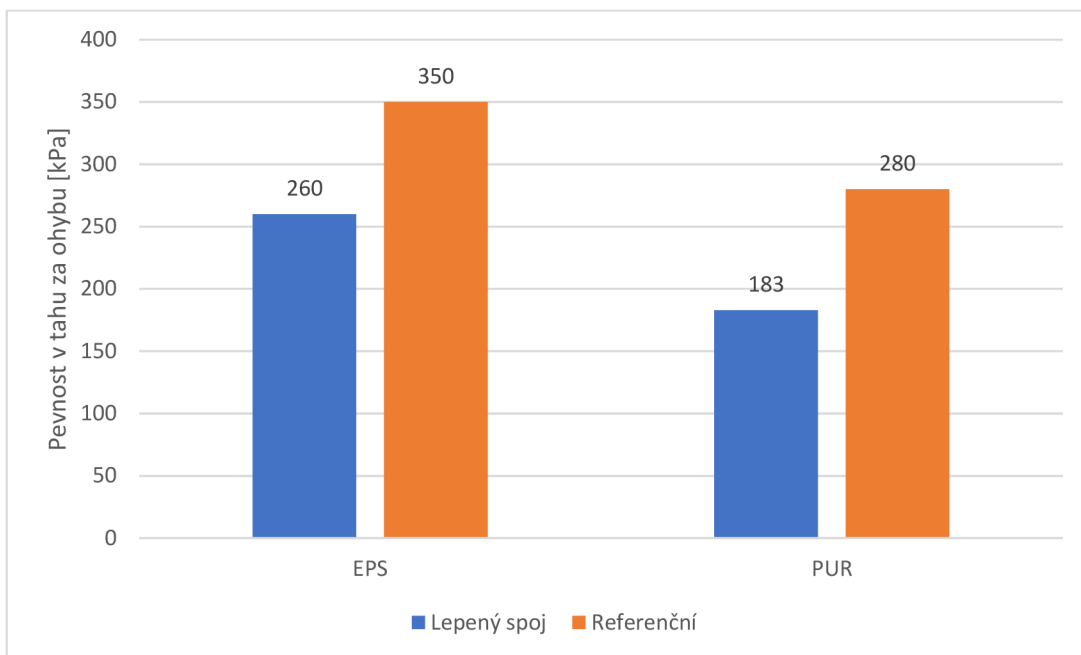


Obrázek 56: Místa porušení při působení zatěžovacího břemena při stanovení tahu za ohybu: EPS 250 (vlevo); vpravo PUR (vpravo)

V tabulce č. 9 a v grafu č. 8 jsou uvedeny a vyobrazeny zprůměrované hodnoty výsledků zkoušení pevnosti v tahu za ohybu v lepeném spoji. Byly zkoušeny tři slepené vzorky a jeden referenční, neslepený, od obou materiálů, EPS 250 a PUR. Slepený spoj u polystyrenových bloků dosáhl ve dvou případech o 20 % nižších pevností v porovnání s referenčním vzorkem. Pevnost třetího vzorku byla o skoro 40 % nižší, což mohlo být způsobeno nedostatkem lepidla. Pevnost v tahu za ohybu lepeného spoje u EPS je tedy o 30 % nižší než pevnost referenčního EPS. U pevnosti v tahu za ohybu slepených spojů u polyuretanu jsou až o 35 % nižší v porovnání s referenčním vzorkem. Lze tedy říct, že lepené spoje u EPS i u PUR snižují pevnost téměř o třetinu.

Tabulka 9: Výsledné hodnoty pevností v tahu za ohybu

	Síla [kN]	Pevnost v tahu za ohybu [kPa]	Plocha porušení v materiálu z celého lepeného spoje [%]
EPS I	0,55	280	83
EPS II	0,45	220	79
EPS III	0,55	280	72
EPS referenční	0,73	350	-
PUR I	0,4	190	12
PUR II	0,38	190	10
PUR III	0,35	170	17
PUR referenční	0,5	280	-



Graf 8: Porovnání výsledných pevností v tahu za ohybu lepeného a referenčního tepelného izolantu

V tabulce č. 9 je také v procentech uvedena plocha porušení, která při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu v materiálu nastala. U všech vzorků EPS nastal lom z více jak 70 % v materiálu, zbytek ve spoji, obrázek č. 57. Lze tedy uvažovat, že pevnost v tahu za ohybu materiálu u EPS je nižší než soudržnost izolantu a lepidla. Naopak u všech polyuretanových zkušebních vzorků došlo z velké části k lomu ve styku pojené lepidlem. V samotném materiálu se vzorek porušil v průměru z 13 %, na obrázku č. 57 je pro ilustraci znázorněn lom na spojích u varianty EPS.



Obrázek 57: Míra a místa porušení u lepených spojů EPS 250 po stanovení pevnosti v tahu za ohybu:



#### 4.3.1.2. Stanovení síly proti vytažení hmoždiny (odpor proti vytažení)

Zkouška odolnosti izolantu proti vytržení hmoždin byla inspirována normou ČSN EN 13446, Desky ze dřeva–Stanovení odporu proti vytažení spojovacích prostředků. Samotný výpočet tohoto parametru se stanovil dle vzorce:

$$f = 10^3 \cdot \frac{F_{max}}{d \cdot l_p}$$

kde je

$F_{max}$  síla potřebná k vytržení hmoždiny, v N;

$d$  průměr hmoždiny, v mm;

$l_p$  délka části hmoždiny zapuštěné v materiálu, v mm;

$f$  odpor proti vytažení, v kPa [102].

V uvažovaném návrhu úpravy ICF systému by bylo možné desky z izolačního materiálu spojovat zapuštěnými hmoždinami vzájemně spojenými plastovými spojkami. Jedná se o duté plastové hmoždiny, na obrázku č. 58, o délce 120 mm se 13 závitů. Vnitřní průměr hmoždiny má 25 mm a vnější průměr i se závitů 40 mm.



Obrázek 58: Plastové hmoždiny zkoušené k použití do ICF systému

Výhodou celoplastové hmoždiny je, že se při zavrtávání hmoždiny do izolantu nevnáší žádný kov, který by zapříčinil vznik tepelného mostu, které by ICF systému ubíraly na tepelně izolačních vlastnostech. Tím, že je hmoždina dutá dostává se do ní při zavrtávání izolační materiál a nedochází tak k vytváření dalších nehomogenit vlivem kotvení, hmoždiny jsou znázorněny na obrázku č. 59. Současně se lokálně, v místě kotvení, nesnižuje účinná tloušťka izolantu. Nevýhodou oproti referenční tvarovce, zmíněné v předchozí kapitole, je, že hmoždiny nelze do izolantu ručně vsadit, musí být použita technika.



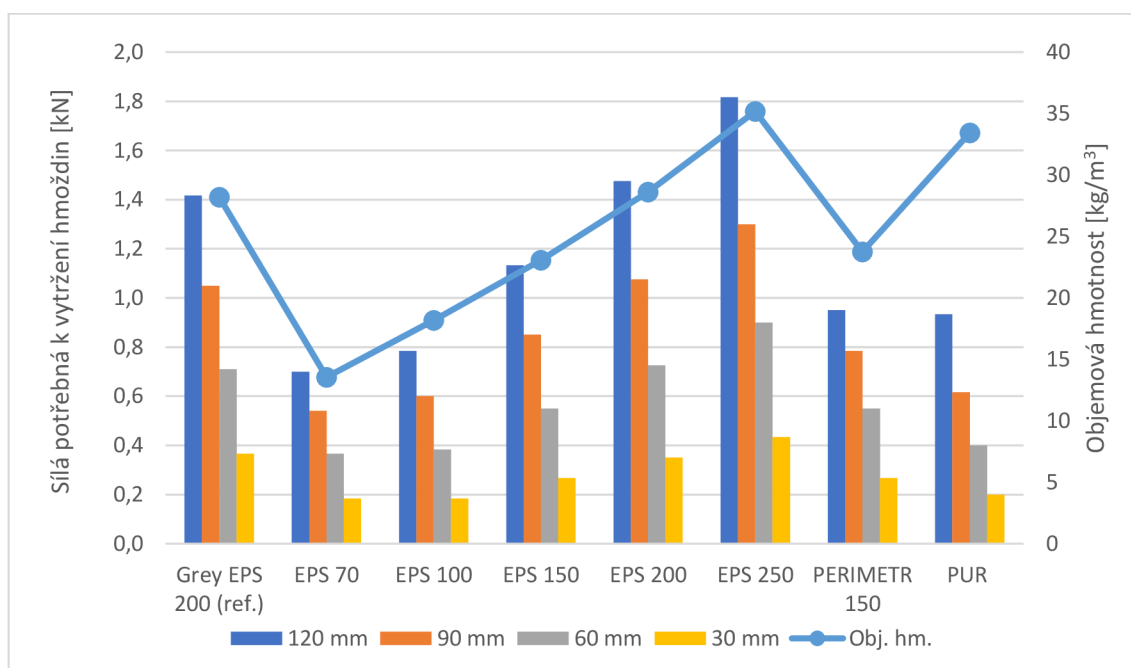
Obrázek 59: Plastová hmoždina po vytrhnutí z tepelného izolantu

V průběhu této zkoušky byla u všech vybraných izolantů stanovena odolnost proti vytržení plně zapuštěných hmoždin. V některých materiálech však plně zapuštěná hmoždina by mohla být zbytečně dlouhá, tzn. že síla potřebná k vytržení hmožдины z izolantu by byla příliš velká a k ICF systému nepotřebná. Z důvodu možného ušetření materiálu a práce při zavrtávání byly u všech vybraných izolantů zkoušeny kromě plně zapuštěných hmoždin i hmožдины o částečném zavrtání. Zavrtání bylo odstupňováno po 30 mm, zkoušky tedy byly provedeny při plném zapuštění 120 mm a při částečném zapuštění 90 mm, 60 mm a 30 mm. U každého izolantu byly zkoušeny od každé hloubky zapuštění 3 vzorky. Vzorky byly po jednom vsazovány do zkušební lisu a z nich prostým tahem vytrhávány zavrtané hmožдины. Zjištěné síly byly následně dosazeny do výše zmíněného vzorce, který zohledňuje kromě plochy hmožдины i její délku, a z něj vypočítaná odolnost izolantu proti vytržení hmožдины. V tabulce č. 10 jsou uvedeny výsledky zkoušek při stanovování odolnosti izolantu proti vytržení hmoždin.

Tabulka 10: Výsledné síly a napětí po zkoušce odolnosti izolantu proti vytržení hmoždin

	120 mm		90 mm		60 mm		30 mm	
	Síla [kN]	Napětí [kPa]	Síla [kN]	Napětí [kPa]	Síla [kN]	Napětí [kPa]	Síla [kN]	Napětí [kPa]
Grey EPS 200 (referenční)	1,42	295,1	1,05	291,7	0,71	295,8	0,37	305,6
EPS 70	0,70	145,8	0,54	150,0	0,37	152,8	0,18	152,8
EPS 100	0,78	163,2	0,60	166,7	0,38	159,7	0,18	152,8
EPS 150	1,13	236,1	0,85	236,1	0,55	229,2	0,27	222,2
EPS 200	1,48	307,3	1,08	298,6	0,73	302,1	0,35	291,7
EPS 250	1,82	378,5	1,30	361,1	0,90	375,0	0,43	361,1
PERIMETR 150	0,95	197,9	0,78	217,6	0,55	229,2	0,27	222,2
PUR	0,93	194,4	0,62	171,3	0,40	166,7	0,20	166,7

Na základě stanovených hodnot, které jsou uvedeny v tabulce č. 10, byly hodnoty vyhodnoceny a graficky znázorněny v grafu č. 9, kde jsou vidět rozdíly v silách, potřebných k vytržení hmoždin z izolačního materiálu. U všech zkoušených izolačních materiálů byly hodnoty dosažených sil rovnoměrně odstupňovány podle hloubky zapuštění. Tedy při 30mm zapuštění dosáhl izolační materiál čtvrtinové síly v porovnání s plně zapuštěnou hmoždinou. V grafu je také vyobrazena souvislost mezi silami potřebnými k vytržení hmoždiny z izolačních materiálů a jejich objemovými hmotnostmi. Podle očekávání byly dosaženy nejvyšší síly u izolačního materiálu EPS 250, následovaný referenčním vzorkem Grey EPS 200 a EPS 200, díky jejich vysoké objemové hmotnosti. Naopak nejnižších hodnot dosáhly EPS 70 a EPS 100 s nejnižší objemovou hmotností. Objemová hmotnost polyuretanové pěny téměř odpovídá objemové hmotnosti EPS 250, síly potřebné k odtržení jsou však o minimálně třetinu nižší. S rostoucí objemovou hmotností izolačního materiálu, a tedy i rostoucí pevností v tlaku, roste dle očekávání také odpor i síla proti vytržení.

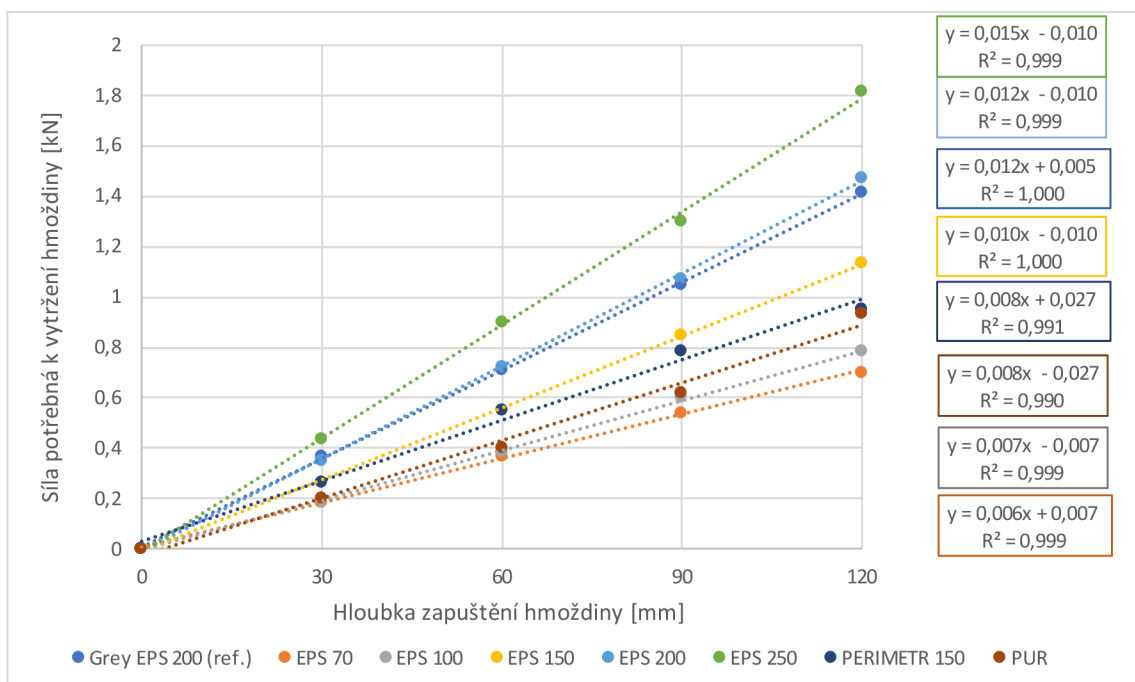


Graf 9: Síly potřebné k vytržení hmoždin z tepelného izolačního materiálu v porovnání s objemovou hmotností

Při použití materiálu s vyšší objemovou hmotností, tedy vyšší potřebnou silou, lze zvolit hmoždiny o menší délce a izolační materiál dosáhne stejného nebo dokonce vyššího odporu než materiál s objemovou hmotností nižší, u kterého bylo použito hmoždiny o větším hloubce. Například při použití EPS 250 lze použít hmoždiny při 60mm zapuštění a síly potřebné k vytržení budou větší než u některých materiálů při použití hmoždin při plném zapuštění. Nebo u PERIMETRU 150 hmoždiny o délce 60 mm dosahují sil v porovnání s PUR, u které je použita hmoždina o délce 90 mm.

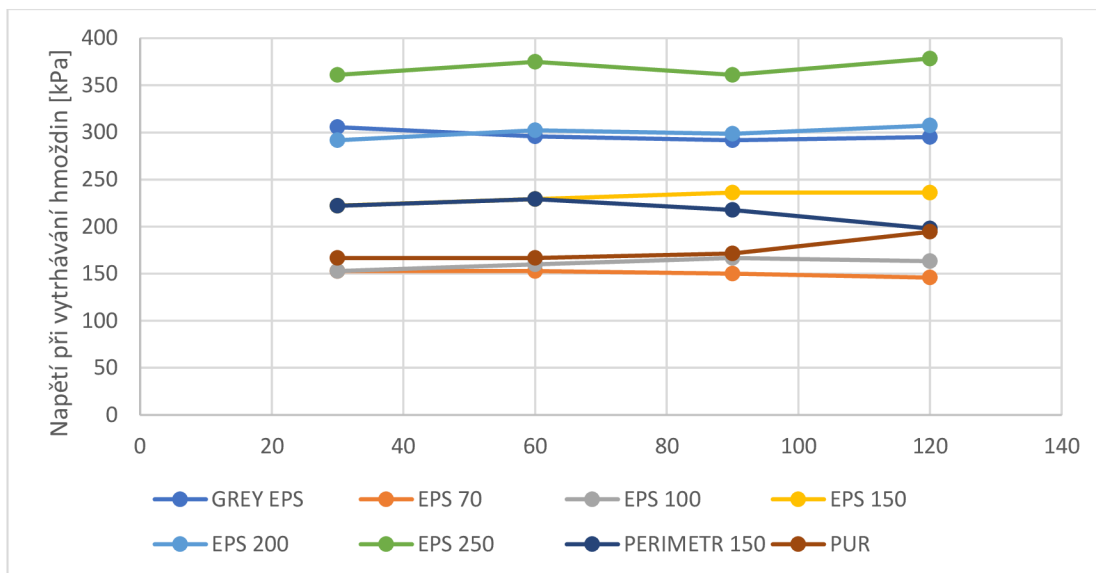
Takových variant a kombinací je mnoho, ale na základně naměřených hodnot lze však zvolit vhodnou hloubku zapuštění pro konkrétní izolant. Je tedy důležité při výběru určit priority, v závislosti na druhu použitého tepelně izolačního materiálu zvolit odpovídající hloubkou kotvení v materiálu

V grafu č. 10 je vyobrazena závislost mezi silou potřebnou k vytažení hmoždiny z tepelného izolantu a hloubce zapuštění hmoždiny. Z lineárních závislostí jednotlivých tepelných izolantů vyplývá, že lze určit i velikost síly například při jiném než zvoleném zapuštění. Například lze vypočítat velikost síly u EPS 150 při 80mm zapuštění. K určení těchto mezilehlých hodnot byly vytvořeny rovnice uvedeny na pravém boku grafu. Síla potřebná k vytržení EPS 150 při 80mm zapuštění by byla 0,75 kN.



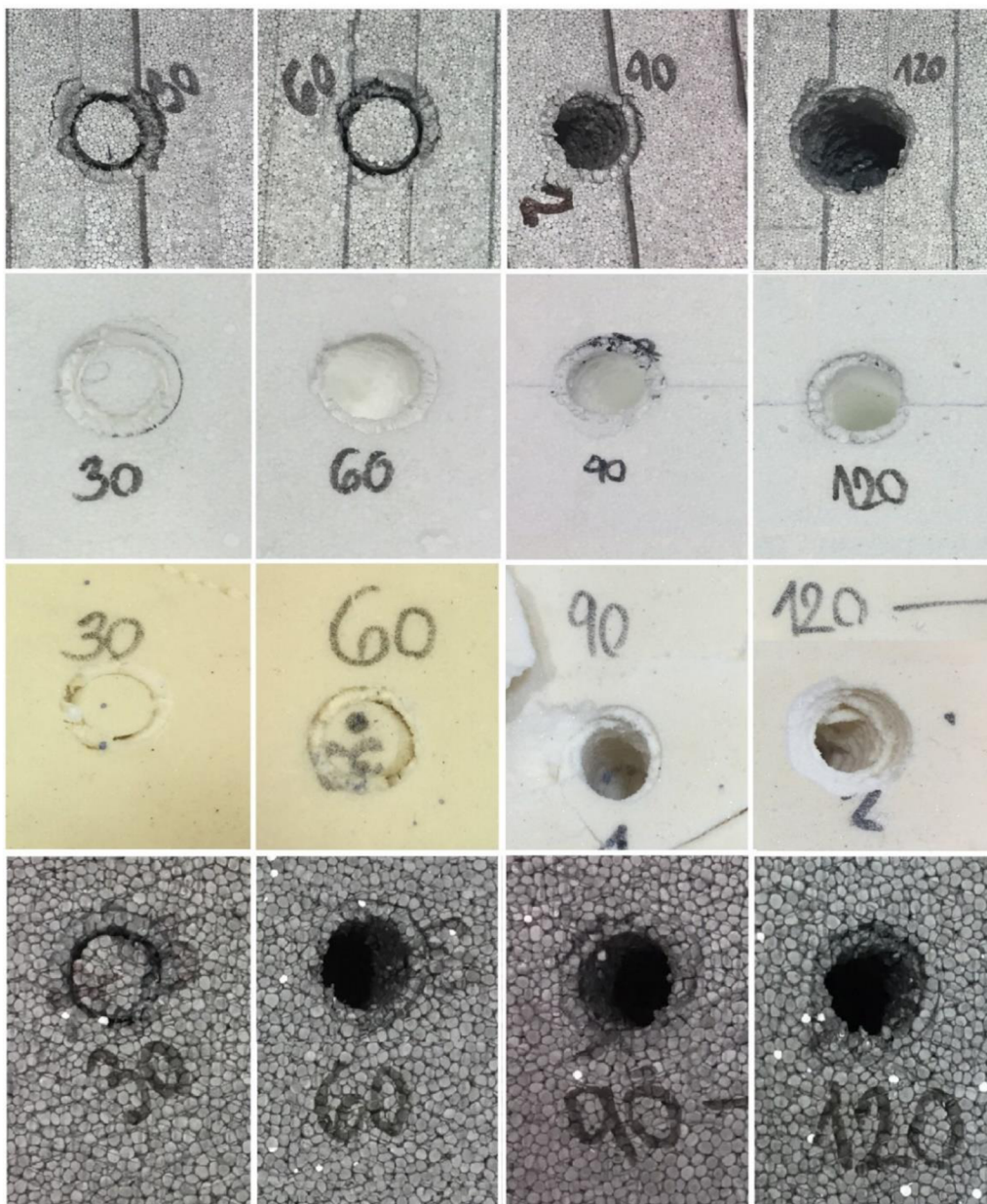
Graf 10: Sily potřebné k vytržení hmoždin u jednotlivých tepelných izolantů, rovnice k vypočítání mezilehlých hodnot

V grafu č. 11 jsou uvedeny hodnoty napětí při vytrhávání hmoždin neboli odolnost proti vytrhnutí, vypočítané ze vzorce uvedeného na začátku této kapitoly, který slouží k výpočtu kotvení kovových spojovacích prvků ve dřevu. Jelikož vzorec zohledňuje i délku hmoždiny, ukazuje tento graf jen míru napětí v jednotlivých materiálech při namáhání. Linearita spojnic bodů je důkazem toho, že při zapuštění hmoždiny do jakékoliv hloubky, vykazuje materiál stejné napětí.



Graf 11: Napětí při vytrhávání hmoždin v tepelných izolantech

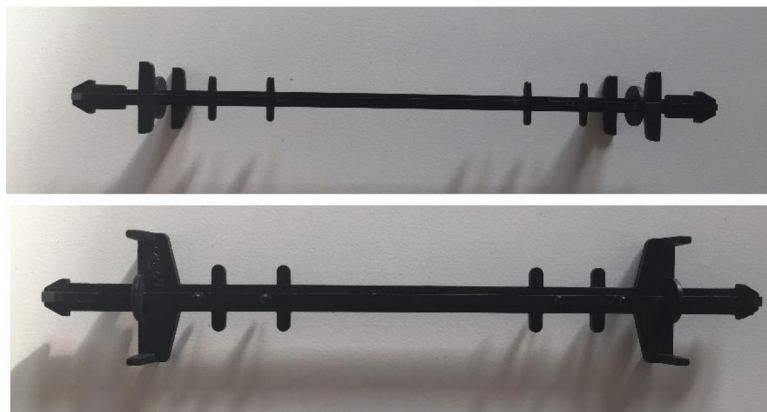
U vytrhávání hmoždin při plném zapuštění, tedy 120 mm, docházelo u všech materiálů kromě vytrhnutí samotné hmoždiny i k vytrhnutí materiálu po celé délce hmoždiny. Soudržnost izolantu s hmoždinou byla tedy větší než pevnost v tahu izolantu. I u 90mm částečného zapuštění docházelo u všech materiálů k vytržení izolantu po celé délce hmoždiny. Při 60mm zapuštění u Grey EPS 200 a PUR nedošlo k vytržení materiálu s hmoždinou, soudržnost nebyla dostatečně velká, aby materiál vytrhla. Při zapuštění 30 mm nedošlo u žádného materiálu k odtrhnutí společně s hmoždinou. Na obrázku č. 60 jsou vyobrazeny výtrhy hmoždin z některých materiálů při zapuštění 30 mm, 60 mm, 90 mm a 120 mm.



Obrázek 60: Odtrhy hmoždin z tepelných izolantů: při 30, 60, 90 a 120 mm (zleva).  
 Grey EPS 200; EPS 250; PUR; PERIMETR (zhora)

#### 4.3.1.3. Stanovení maximálního zatížení při porušení plastové spojky

V návrhu úpravy ICF systému jsou desky z izolačního materiálu spojeny zapuštěnými hmoždinami vzájemně propojenými plastovými spojkami. Jde o plastovou spojku o délce 21,5 mm, opatřenou zobáčky z obou stran sloužící k zacvaknutí do plastových hmoždin, obrázek č. 61.



Obrázek 61: Plastová spojka používaná v ICF

V ICF systémech je tato plastová spojka po celou dobu její životnosti namáhána na prostý tah. Ke stanovení síly potřebné k porušení byla spojka zacvaknuta do již zmíněné hmoždiny předem zavrtané v izolantu. Takto sestavený systém byl následně vložen do zkušebního lisu, ve kterém byla plastová spojka namáhána na prostý tah. Takto bylo zkoušeno deset plastových spojek. Zjištěné síly byly následně zprůměrovány. Výsledná hodnota síly potřebné k porušení plastové spojky dosáhla 0,91 kN.

Na obrázku č. 62 jsou vyobrazeny plastové spojky po zkoušce stanovování síly potřebné k porušení spojky. Ze všech zkoušených spojek došlo u 8 hmoždin k odtržení celé délky zobáčku, u zbylých 2 se porušila jen část zobáčku.



Obrázek 62: Místa porušení plastových spojek při stanovení síly potřebné k porušení

#### 4.4. III. ETAPA

Ve třetí a zároveň poslední etapě, byly na základě stanovených parametrů z předchozích dvou etap navrženy možné úpravy stávajícího ICF systému. Za použití izolantu, vybraného a zkoušeného v první etapě. A kotevního systému, sestaveného z plastové hmoždiny a plastové spojky, zkoušeného ve druhé etapě.

##### 4.4.1. Shrnutí

V první etapě byly na vybraných tepelně izolačních materiálech stanovovány některé fyzikálně mechanické vlastnosti. Ty následně posloužily kužšímu výběru k možnému použití do návrhu a úpravy ICF systému. Kvůli relativně vysoké pevnosti v tlaku při 10% deformaci, pevnosti v tahu za ohybu a zároveň dobré přídržnosti k podkladu byly zvoleny jako nejvhodnější izolanty EPS 150, EPS 200, EPS 250, PERIMETR 150 a PUR. Vybrané izolační materiály jsou v následující tabulce č. 11 podbarveny oranžově, modře je podbarven referenční Grey EPS 200.

Tabulka 11: Shrnutí fyzikálně mechanických vlastností vybraných tepelných izolantů, tepelné izolanty pro úpravu ICF

	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Krátkodobá nasákavost [%]	Pevnost v tlaku při 10% deformaci [kPa]	Pevnost v tahu za ohybu [kPa]	Přídržnost izolantu k podkladu [kPa]
Grey EPS 200 (referenční)	28,2	4,14	173	305	244
EPS 70	13,6	4,46	72	127	71
EPS 100	18,2	4,78	97	150	112
EPS 150	23,1	4,58	145	204	129
EPS 200	28,6	4,64	188	277	206
EPS 250	35,2	4,82	243	349	282
XPS 500	33,2	0,47	532	255	347
PERIMETR 150	23,7	1,74	142	239	174
PUR	33,4	2,31	205	284	119

V druhé etapě byly na vybraných tepelně izolačních materiálech stanovovány mechanické vlastnosti kotvení. Byla zjišťována odolnost izolantu proti vytržení plastové hmoždiny a síla potřebná k porušení plastové spojky. Z výsledků vyplynulo, že z teoretického hlediska lze sice použít hmoždiny u všech vybraných materiálů, je však nutné si uvědomit, že se snižující objemovou hmotností materiálu bude stoupat počet a délka hmoždin. Na velikost síly potřebné k vytržení zapuštěné hmoždiny má vliv délka zapuštění hmoždiny a objemová hmotnost izolantu. Čím bude délka hmoždiny větší a objemová hmotnost materiálu vyšší, tím bude potřeba menší počet hmoždin.



Součástí ICF je i plastová spojka, která ovlivňuje pevnost systému. Pokud je síla potřebná k vytržení zapuštěné hmoždiny rozdílná než síla potřebná k porušení plastové spojky, počítá se vždy s nižší hodnotou. Například síla potřebná k vytržení zapuštěné hmoždiny je menší než síla potřebná k porušení plastové spojky, bereme při návrhu ICF systému sílu proti vytržení hmoždiny. Naopak v případě síly pro vytvrzení hmoždiny větší, než je síla, kterou přenese spojka (0,91 kN), je síla omezena na přenos síly spojkou.

V následující tabulce č. 12 jsou uvedeny hodnoty sil, potřebných k vytržení zapuštěné hmoždiny. Zeleně podbarvená políčka značí menší dosaženou sílu, než kterou dosáhla plastová spojka.

*Tabulka 12: Síly potřebné k vytržení hmoždiny z tepelného izolantu*

	120	90	60	30
Grey EPS 200 (referenční)	1,42	1,05	0,71	0,37
EPS 70	0,70	0,54	0,37	0,18
EPS 100	0,78	0,60	0,38	0,18
EPS 150	1,13	0,85	0,55	0,27
EPS 200	1,48	1,08	0,73	0,35
EPS 250	1,82	1,30	0,90	0,43
PERIMETR 150	0,95	0,78	0,55	0,27
PUR	0,93	0,62	0,40	0,20

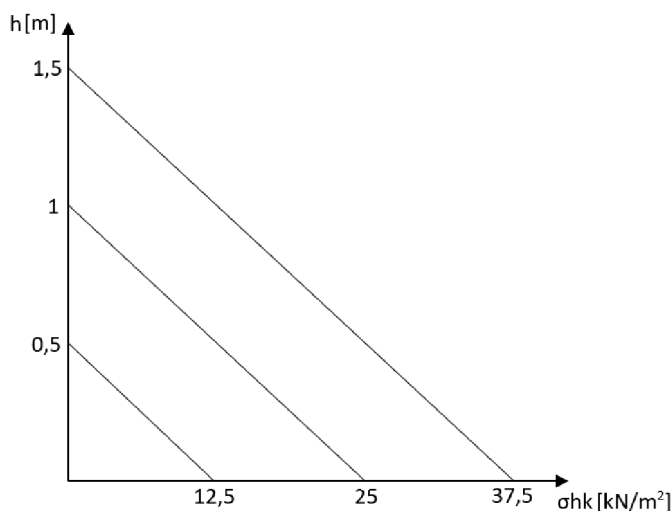
EPS 70 a EPS 100 nejsou k použití do ICF vhodné, důvodem je jejich nízká pevnost, jak v tlaku při 10% deformaci, tak v tahu za ohybu. Dále kvůli jejich nízké objemové hmotnosti a nízké odolnosti proti vytržení hmoždiny. V ICF systému by musely obsahovat velké množství hmoždin, které by přenesly napětí vyvozené betonem. To už by však nebylo ekonomické a staticky únosné. XPS 500 nebyl vybrán z důvodu jeho pevnostních parametrů, bylo by naddimenzováno a byl ekonomicky méně výhodný.

Z výše uvedených důvodů, a především na základě stanovených parametrů v předchozích etapách byly vybrány k návrhu na úpravu ICF EPS 150, EPS 200, EPS 250, PERIMETR 150 a PUR.

#### 4.4.2. Návrh a úprava ICF systému

Před návrhem a úpravou ICF systému bylo důležité nejprve stanovit fyzikálně mechanické vlastnosti všech použitých materiálů, izolantů a plastových komponentů, a parametry jejich vzájemného spolupůsobení. V prvních dvou etapách byly tyto parametry zjištěny a tepelně izolační materiály na jejich základě porovnány. Mezi ty nejvhodnější patří EPS 200, EPS 250, a PUR. V úvahu by šlo vzít i EPS 150 a PERIMETR 150, u návrhu je však nutné počítat s nízkou pevností a tu vykompenzovat větším počtem a délkou hmoždin.

Síla, na kterou se navrhuje kotvení ICF systému, je napětí vyvozené od čerstvě nalitého betonu. Při betonování obvodové zdi po celé její výšce, tedy 2,6 m, vyvozuje beton u paty konstrukce napětí ve výši až 65,4 kN/m<sup>2</sup> [103]. Při takové síle by na 1 m<sup>2</sup> muselo být více než 70 hmoždin, aby dokázaly přenést veškeré napětí, a přitom nedošlo k poškození systému. Proto se zpravidla v praxi systém betonuje při krocích o výšce obvodové zdi maximálně 1,5 m. Na obrázku č. 63 je vyobrazena závislost tlaku čerstvého betonu na výšce betonáže. V tabulce č. 13 jsou izolační materiály s předpokladem vhodnosti k použití do ICF systému, zelená podbarvení značí omezení uvažované síly pro vytržení na hodnotu porušení plastové spojky (0,91 kN).



Obrázek 63: Velikost tlaku čerstvého betonu závislá na výšce betonáže [103]

Tabulka 13: Síly potřebné k vytržení hmoždin izolačních materiálů

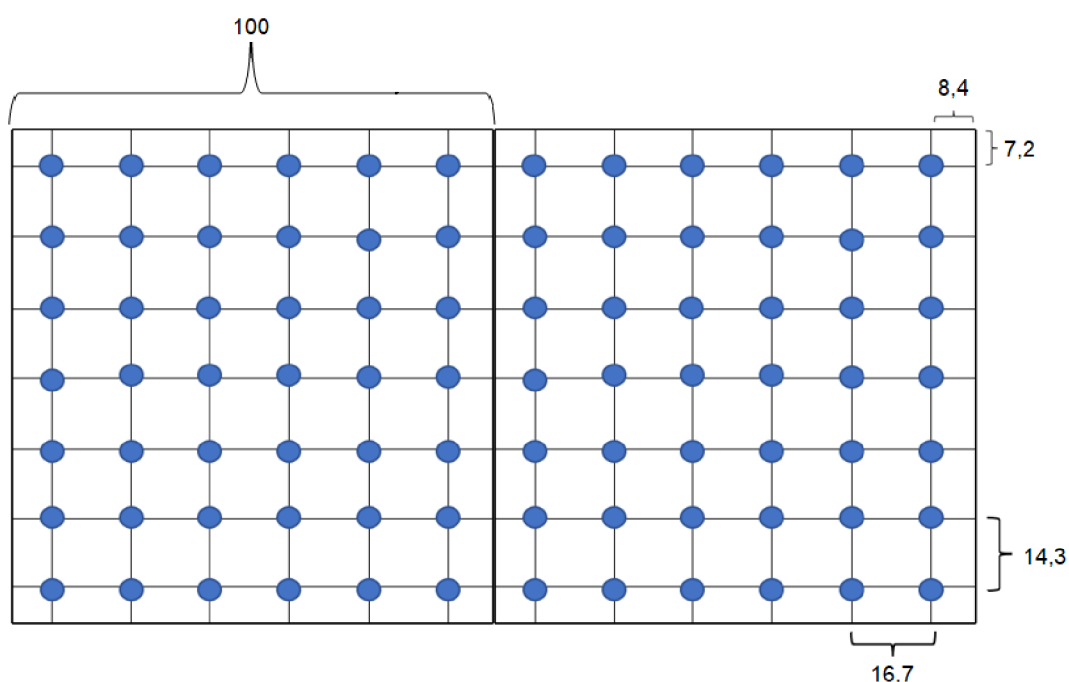
	120	90	60	30
EPS 150	1,13	0,85	0,55	0,27
EPS 200	1,48	1,08	0,73	0,35
EPS 250	1,82	1,30	0,90	0,43
PERIMETR 150	0,95	0,78	0,55	0,27
PUR	0,93	0,62	0,40	0,20

#### 4.4.2.1. Varianta EPS 250, EPS 200

I když měly EPS 250 nebo EPS 200 nejvyšší odolnosti proti vytržení hmoždiny při plném zapuštění nebo 90mm zapuštění (viz tabulka č. 13) ze zkoušených izolantů, brala se do výpočtu návrhu síla potřebná k porušení plastové spojky, tedy 0,91 kN. U betonování obvodové zdi do výšky 1,5 m, dosahuje tlak čerstvého betonu u paty konstrukce až 37,5 kN/m<sup>2</sup>.

$$\frac{37,5}{0,91} = 41,2 \doteq 42 \text{ hmoždin}$$

U EPS 200 k přenesení vzniklého napětí bude nutné do 1 m<sup>2</sup> zavřít 42 plastových hmoždin o délce 90 mm, při stávajícím systému kotvení pomocí plastové spojky. Jelikož je závislost mezi délkami hmoždin a silami potřebnými k vytržení hmoždiny lineární, bylo možné dopočítat, že tohle napětí přenesou i 42 hmoždin o 80mm délce. U EPS 250 je návrh počtu plastových hmoždin do 1 m<sup>2</sup> stejný, tedy 42. S tím rozdílem, že lze použít hmoždiny o délce 60 mm. Rozložení 42 hmoždin do 1 m<sup>2</sup> je 6×7 kusů, s rozestupy cca 17×14 cm. Schéma rozvržení je na obrázku č. 64. Na standardní rozměr 1000×500 mm, který je běžně vyráběný a na trhu dostupný, připadá 21 hmoždin. Rozložení hmoždin by bylo 3×7 kusů, s rozestupy cca 17×14 cm.



Obrázek 64: Schéma rozložení plastových hmoždin u návrhu ICF systému

Z plochy 1 m<sup>2</sup> budou hmoždiny zabírat 5,3 %. Množství hmoždin by tedy nemělo mít velký vliv na pevnosti materiálu.

U obou izolantů při použití kratších hmoždin bude nutné jejich počet zvýšit. Při použití hmoždin o délce 60 mm, by bylo nutné u EPS 200 zvýšit počet hmoždin na 52 kusů. Snížení délky hmoždiny na minimum, 30 mm, u EPS 250 znamená zvýšení počtu hmoždin na 87.

V tomto případě nebylo bráno v úvahu použití opěrného systému při zabetonování ICF tvárnic. Bylo by tedy možné, po přidání pomocného opěrného systému, několik hmoždin z návrhu odebrat a snížit tak množství potřebných hmoždin pro zajištění stability konstrukce vůči odolnosti hydrostatického tlaku čerstvého betonu. Kolik by bylo nutné použít hmoždin by záleželo na dalších statických výpočtech, které nejsou součástí této práce.

#### **4.4.2.2. Varianta EPS 150, PERIMETR 150**

EPS 150 a PERIMETR 150 dosáhly nejnižší odolnosti proti vytržení hmoždiny. Z toho důvodu je nutné použít plně zapuštěné hmoždiny, 120 mm. Do výpočtu návrhu se opět brala síla potřebná k porušení plastové spojky, tedy 0,91 kN.

$$\frac{37,5}{0,91} = 41,2 \doteq 42 \text{ hmoždin}$$

U EPS 150 k přenesení vzniklého napětí bude nutné do 1 m<sup>2</sup> zavrtat 42 plastových hmoždin o délce 120 mm. Jelikož je i u těchto izolantů závislost mezi délkami hmoždin a silami potřebnými k vytržení hmoždiny lineární, bylo možné dopočítat, že tohle napětí přenesou i 42 hmoždin o 100mm délce. U PERIMETRU 150 je návrh počtu plastových hmoždin do 1 m<sup>2</sup> stejný, tedy 42 o délce 120 mm. Rozložení 42 hmoždin do 1 m<sup>2</sup> je 6×7, s rozestupy cca 14×12 cm. Schéma rozložení je na obrázku č. 64. Stejně jako v předchozí variantě při použití standardního rozměru bude k přenesení napětí potřeba 21 hmoždin, u EPS 150 a PERIMETRU při délce 120 mm. Rozložení hmoždin je taktéž totožné.

U obou izolantů při použití kratších hmoždin bude nutné jejich počet zvýšit. Použití hmoždin o délce 90 mm, bude mít u EPS 150 za následek zvýšení počtu hmoždin na 45 kusů. Snížení délky hmoždiny na 90 mm, u PERIMETRU 150 znamená zvýšení počtu hmoždin na 48. V těchto případech není navýšení počtu hmoždin tak markantní, bude pak záležet na investorovi nebo výrobcu, jestli se přikloní k nižšímu počtu hmoždin, ale vyšší tloušťce izolantu nebo k vyššímu počtu hmoždin a nižší tloušťce izolantu.

#### 4.4.2.3. Varianta PUR

PUR dosáhl nejnižší odolnosti proti vytržení hmoždiny. Z toho důvodu je nutné použít plně zapuštěné hmoždiny, 120 mm. Do výpočtu návrhu se opět brala síla potřebná k porušení plastové spojky, tedy 0,91 kN.

$$\frac{37,5}{0,91} = 41,2 \doteq 42 \text{ hmoždin}$$

U PUR k přenesení vzniklého napětí o síle 37,5 kN/ m<sup>2</sup> bude nutné do 1 m<sup>2</sup> zavrtat 42 plastových hmoždin o délce 120 mm. Rozložení 42 hmoždin do 1 m<sup>2</sup> je 6×7, s rozestupy cca 14×12 cm. Schéma rozložení je na obrázku č. 64. Při použití kratších hmoždin, tedy o délce 90 mm, se zvýší počet hmoždin na 60 kusů. Stejně jako v předchozích variantách při použití standardního rozměru bude k přenesení napětí potřeba 21 hmoždin, o délce 120 mm. Rozložení hmoždin je taktéž totožné.

#### 4.4.3. Shrnutí úprav ICF systému

Třetí etapa byla zaměřena na vyhodnocení předchozích dvou etap, které vedlo k následnému návrhu úpravy ICF systému. Jako nejvhodnější materiály k úpravě ICF systému byly zvoleny EPS 200 a EPS 250. Za méně vhodné byly vybrány EPS 150, PERIMETR 150 a PUR. Jelikož je nejslabší část celého systému plastová spojka, systémy byly navrženy na sílu, kterou plastová spojka dokáže přenést. Všechny úpravy systémů jsou tedy navrženy na 42 hmoždin na 1 m<sup>2</sup>. Systémy se liší akorát délkou hmoždiny. V tabulce č. 14 a v tabulce č. 15 jsou uvedeny délky hmoždin u jednotlivých materiálů a k nim potřebný počet hmoždin. Zároveň je v tabulce uvedena v modrém sloupečku potřebná délka hmoždiny, při zapuštěných 42 kusech.

Tabulka 14: Počet hmoždin na m<sup>2</sup> při určité délce u návrhu ICF systému

	120 mm	90 mm	60 mm	30 mm	42 kusů
EPS 150	42	45	68	141	100
EPS 200	-	42	52	107	80
EPS 250	-	-	42	87	60
PERIMETR 150	42	48	68	141	120
PUR	42	60	94	188	120

Tabulka 15: Počet hmoždin na 0,5 m<sup>2</sup> při určité délce u návrhu ICF systému

	120 mm	90 mm	60 mm	30 mm	21 kusů
EPS 150	21	23	34	70	100
EPS 200	-	21	26	54	80
EPS 250	-	-	21	44	60
PERIMETR 150	21	24	34	70	120
PUR	21	30	47	94	120

## 5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou shrnuty výsledky provedené v rámci praktické části této práce. Na vybraných tepelně izolačních materiálech byly stanoveny vybrané fyzikálně mechanické parametry, které posloužily k vzájemnému srovnání tepelných izolantů. Dále byly zjišťovány mechanické vlastnosti plastového kotvení. V závislosti na dosažených parametrech tepelně izolačních materiálů a kotevních prvků, byla navržena úprava ICF systému.

Na základě dotazů na prováděcí firmy a aktuálních poznatků ze zahraniční a tuzemské literatury, byly v první etapě vybrány vhodné tepelně izolační materiály. Vybrány byly EPS 70, EPS 100, EPS 150, EPS 200, EPS 250, PERIMETR 150, XPS 500, PUR a Grey EPS 200, který sloužil jako referenční vzorek, protože je aktuálně využíván na tvarovkách, které jsou v praktické části analyzovány.

Objemová hmotnost je ovlivněna hutností materiálu, např. u EPS záleží na množství suroviny a míře expanze. Toto se promítá do většiny vybraných tepelných izolantů. Stanovená objemová hmotnost u expandovaných pěnových polystyrenů se pohybovala od 13,6–35,2 kg/m<sup>3</sup>. Podle předpokladu dosáhl nejnižší hodnoty objemové hmotnosti 13,6 kg/m<sup>3</sup> nejméně hutný polystyren EPS 70, oproti němu s nejvyšší hutností EPS 250 35,2 kg/m<sup>3</sup>. Ostatní expandované polystyreny se svými objemovými hmotnostmi podle jejich hutnosti zařadily rovnoměrně mezi EPS 70 a EPS 250. Na základě stanovené objemové hmotnosti odpovídá referenční vzorek Grey EPS 200 objemové hmotnosti EPS 200 a PERIMETR 150 odpovídá EPS 150. Extrudovaný polystyren XPS 500 měl objemovou hmotnost 33,2 kg/m<sup>3</sup>. Polyuretanová pěna dosáhla hodnoty 33,4 kg/m<sup>3</sup>. Stanovení objemové hmotnosti sloužilo především ke stanovení základních fyzikálních vlastností, aby bylo jednoznačně určeno, jaké vlastnosti mají zkoušené materiály a následně bylo komparováno s deklarovanými vlastnostmi uvedenými v technickém listu výrobků.

Další sledovanou základní vlastností byla krátkodobá nasákavost, u neupravených expandovaných polystyrenů vyšla pod 5 %. Upravený expandovaný polystyren, PERIMETR 150, díky své uzavřenější struktuře dosáhl krátkodobé nasákavosti nižší než 2 %. Vůbec nejnižší nasákavost, pod 0,5 %, měl podle předpokladu extrudovaný polystyren, jehož uzavřená struktura mu nedovolila absorbovat více vody. PUR dosáhl nasákavosti pod 2,5 %. Vyšší krátkodobou nasákavost v porovnání s referenčním vzorkem měly jen neupravené expandované polystyreny, a to s nepatrným rozdílem 0,5 %. Podobně jako u objemové hmotnosti, byly stanovené hodnoty porovnány s deklarovanými a bylo zjištěno že odpovídají deklarovaným hodnotám v technických listech. Stanovení nasákavosti je důležitým parametrem z důvodu přímého kontaktu izolantu s betonem, jak již bylo řešeno

v teoretické části. Příliš vysoká nasákavost může odebírat vodu z betonu, která je nezbytná pro hydrataci cementu.

Pevnost v tlaku při 10% deformaci nebo pevnost v tlaku úzce souvisí s objemovou hmotností. S rostoucí objemovou hmotností, roste hutnost materiálu, a tedy i pevnost v tlaku. Jedná se o jeden z klíčových parametrů v souvislosti s kotvením prvků v izolantu. Pevnost v tlaku při 10% deformaci u expandovaných pěnových polystyrenů souvisí s měnící se objemovou hmotností. Nejnižších pevností podle očekávání dosáhl EPS 70, 71,2 kPa, a EPS 100, 92,4 kPa, jejich nízká objemová hmotnost jim dosažení vyšších pevností nedovoluje. EPS 150 a PERIMETR 150 dosáhly pevností téměř totožných, 141 kPa. Nepatrně odlišná technologie výroby perimetru na pevnost v tlaku nemá podstatný vliv. Podle předpokladu nejvyšší pevnost v tlaku při 10% deformaci u expandovaného polystyrenu dosáhl EPS 250, následovaný EPS 200. Objemová hmotnost XPS 500 sice dosáhla podobných hodnot jako EPS 250, pevnost v tlaku však dosahuje více než dvojnásobných pevností, až 530 kPa. Vysoká pevnost v tlaku je přisuzována způsobu výroby extruzí, která je zcela odlišná od expanze standardního EPS. Struktura XPS však není dostatečně pružná, při zkoušení pevnosti v tlaku došlo dříve k porušení vzorku, než bylo dosaženo 10% deformace. U PUR podobně jako u XPS došlo dříve k porušení izolantu při hodnotě 205 kPa. Referenční vzorek Grey EPS 200 v porovnání s ostatními vzorky se svými hodnotami okolo 170 kPa pohyboval mezi EPS 150 a EPS 200. Minimálním hodnotám deklarovaným výrobcem odpovídá jen EPS 70, XPS 500 a PUR. U ostatních vzorků, nebo při stanovení 10% deformaci dosaženo deklarované hodnoty a výsledné průměrné hodnoty pevnosti v tlaku byly přibližně o 10 % nižší

Součástí první etapy byla také přídržnost tepelného izolantu k betonu, protože je nezbytné řešit rozhraní materiálů a jejich spolupůsobení z pohledu konstrukčního řešení ICF bloků. Rozhraní materiálů by mohlo být slabým místem, pokud by nenastalo dokonalé spojení a tepelně izolační materiál by tak nebyl zcela integrován s nosnou betonovou částí celého systému. Přídržnost úzce souvisí s pevností v tlaku při 10% deformaci, protože při dokonalé soudržnosti izolantu s betonem, je předpoklad možného porušení právě izolantu, kde jde především o mechanické vlastnosti. EPS 70, EPS 100, EPS 150 a PERIMETR 150 dosáhly přídržnosti izolantu k podkladu pod 150 kPa. EPS 200 dosáhl přídržnosti k betonu lehce nad 200 kPa a EPS 250 až 280 kPa. Nejvyšší přídržnost měl XPS 500, přes 340 kPa. PUR dosáhla jedné z nejnižších přídržností, necelých 120 kPa. Jelikož pevnost v tahu nebo přídržnost izolantu k podkladu výrobci nedeklarují, nebyla u tohoto parametru možnost porovnání. U nižší objemové hmotnosti EPS 70 a také EPS 100, byly nižší přídržnosti ve srovnání

s vyššími objemovými hmotnostmi EPS, které by byly vhodnější i pro kotvení mechanických prvků v izolantu.

Pevnost v tahu za ohybu je oproti pevnosti v tahu výrobcí deklarována. Všechny vzorky dosáhly vyšších pevností, než byly uvedeny v technických listech. Expandované polystyreny dosáhly o více než 50 kPa vyšších pevností v tahu za ohybu, než hodnoty deklarované v tlaku při 10% deformaci. Nejvyšších hodnot tentokrát dosáhl EPS 250 s pevností až 350 kPa. Následovaný referenčním vzorkem. Vysokých pevností dosáhla i PUR pěna s pevností vyšší než 280 kPa. Stanovené hodnoty souhlasí s deklarovanými vlastnostmi.

Dalším kritickým místem, z pohledu uspořádání tepelně izolačních desek a uvažovaného systému ICF, by bylo spojování desek v ložné i styčné spáře, proto bylo uvažováno o lepeném spoji. V druhé etapě byla zkoušena i lepená spára v tahu za ohybu na tělesech stejných rozměrů. Pevnost v tahu za ohybu lepeného spoje byla u EPS 250 v porovnání s referenčním vzorkem, nelepeného EPS 250, o 30 % nižší. U PUR o 35 % nižší, konkrétně se lepený EPS pohyboval na hodnotě 260 kPa a u lepeného spoje PUR na hodnotě 180 kPa. Mechanický spoj v ICF systému nemá pevnostní ani nosnou funkci, slouží ke správnému sestavení systému a vzájemnému ukotvení desek mezi sebou. Náhrada mechanického spoje spojem lepeným by tedy mohla být možná varianta, protože je nezbytné, aby byly desky tepelných izolantů mechanicky kotveny z důvodu odolnosti hydrostatickému tlaku betonu v bednění.

Dále bylo řešeno vzájemné kotvení systému pro vymezení betonového jádra, kterým prochází kotevní prvky kotvené v izolantu. Z tohoto důvodu byla pozornost věnována speciálnímu kotevnímu systému do izolantu, což byly plastové hmoždiny a jejich odolnost proti vytržení z izolantu, což opět souvisí s objemovou hmotností, a tedy i s pevnostními charakteristikami tepelného izolantu. Odpor proti vytržení hmoždiny opět souvisí s objemovou hmotností, a tedy i s pevnostními charakteristikami tepelného izolantu. Síla potřebná k vytržení hmoždiny roste dle předpokladu s rostoucí délkou hmoždiny a hutností, respektive objemovou hmotností izolantu. Izolanty na bázi polystyrenu s nejvyšší objemovou hmotností dosáhly i nejvyšších sil a naopak. Polyuretan i přes svou vysokou objemovou hmotnost dosahuje pevností nižších než EPS 150, který má třetinovou objemovou hmotnost. Je to důsledek odlišného výrobního postupu, vstupních materiálů a výsledné materiálové struktury. Byla sledována různá kotevní délka hmoždiny v izolantu, konkrétně: 30, 60, 90 a 120 mm. S klesající délkou hmoždiny zapuštěné v izolantu klesá i síla potřebná k jejímu vytrhnutí. Jedná se o lineární závislost, která byla z naměřených dat vyhodnocena. Materiály jako EPS 70 nebo EPS 100 dosáhly i při zapuštění celé 120mm hmoždiny nízkých hodnot, jako náhrada za referenční Grey EPS 200 nejsou moc vhodné. Ostatní



zkoušené izolanty mají předpoklad, že při správném návrhu délky, počtu a rozmístění hmoždin by mohly zatížení od čerstvého betonu přenést. Při stanovování síly potřebné k porušení plastové spojky bylo zjištěno, že spojka dokáže přenést zatížení až 0,91 kN. K porušení došlo vždy v nejslabších místech. Ke zvýšení odolnosti plastové spojky vůči tahovému napětí by bylo tedy potřeba upravit slabá místa.

V závěrečné třetí etapě byla řešena problematika úpravy a zjednodušení aplikace ICF bloků. Bylo uvažováno, že místo tvarovek budou používány deskové izolační materiály, bez nutnosti specifické výroby. Na základě stanovených parametrů byly k návrhu vybrány EPS 150, EPS 200, EPS 250, PERIMETR 150 a PUR. Nejslabším místem celého návrhu byla zkoušením v laboratoři určena plastová spojka. Ta dokáže přenést maximální zatížení o hodnotě 0,91 kN. Celá úprava byla tedy navržena na její maximální parametry, které je schopna přenést. Všechny úpravy systémů jsou tedy navrženy na 42 hmoždin na 1 m<sup>2</sup> nebo 21 hmoždin na standardizovaný rozměr (500×1 000 mm), aby byl ICF blok schopný přenést napětí vyvozené při betonáži. Systémy se liší akorát délkou hmoždiny, kdy s rostoucí objemovou hmotností se potřebná délka hmoždiny snižuje. EPS 250 byl navržen na délku 60 mm, EPS 200 na délku 90 mm, EPS 150, PERIMETR 150 a PUR na délku 120 mm. Úpravy jsou navrženy na nejmenší počet hmoždin. Samotnou délku hmoždin je možné měnit. Se změnou délky však souvisí změna počtu hmoždin. Čím kratší hmoždiny, tím méně napětí dokážou přenést a tím je konečný počet hmoždin vyšší. Při uvažování redukce počtu použitých hmoždin by byla nezbytná úprava kotevní spojky, její zesílení. Součástí návrhu ICF systému je i dutá plastová hmoždina. Výhodou celoplastové hmoždiny je, že se při zavrtávání hmoždiny do izolantu nevnáší žádný kov, který by zapříčinil vznik tepelného mostu, které by ICF systému ubíraly na tepelně izolačních vlastnostech. Tím, že je hmoždina dutá dostává se do ní při zavrtávání izolační materiál a nedochází tak k vytváření dalších nehomogenit vlivem kotvení. Současně se lokálně, v místě kotvení, nesnižuje účinná tloušťka izolantu. Nevýhodou oproti referenční tvarovce, zmíněné v předchozí kapitole, je, že hmoždiny nelze do izolantu ručně vsadit, musí být použita technika.

## 6. ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na aplikaci tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů. Teoretická část je v první části zaměřena na princip pasivních domů, jejich obecnou charakteristik u, základní principy a požadavky. Dále jsou popsány vybrané nejpoužívanější a nejžádanější tepelně izolační materiály, jejich fyzikálně mechanické vlastnosti a vhodnost použití v konstrukci pasivního domu. Jsou popsány typy zateplení obvodových konstrukcí, jejich výhody a nevýhody při použití u pasivních domů, kdy se jako nejvhodnější jeví systém vnějšího zateplení, při kterém nedochází k promrzání konstrukce. U pasivních domů, z pohledu skladby obvodových stěn při zateplení, musí být splněn požadavek, který říká, že součinitel prostupu tepla nesmí být větší než  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Z toho důvodu, je tepelně izolační materiál stěžejní část celé skladby. Jako vhodný systém zateplení se v posledních letech považuje i systém sendvičový. Převážně jeho inovace tzv. ICF systém (Insulating Concrete Forms), kterému je v této práci věnována velká část. Jedná se o systém ztraceného bednění tvořeného z tuhých tepelně izolačních desek. Tento systém je hojně používán při konstrukcích pasivních domů, protože je v něm využita výhoda monolitického betonového jádra s vnější tepelně izolační vrstvou. Jsou popsány vybrané varianty používaných ICF systémů, výhody a nevýhody, používané materiály, systém uspořádání a systémy vzájemného kotvení.

Praktická část je rozdělena na tři etapy. V první etapě byly na vybraných tepelně izolačních materiálech popsány v teoretické části stanoveny fyzikálně mechanické parametry, které byly použity i k upřesnění a ověření hodnot deklarovaných výrobcem v technických listech jednotlivých izolantů. Ke zkoušení byly vybrány na základě průzkumu zájmu realizačních firem a ekonomické vhodnosti tyto tepelně izolační materiály: EPS 70, EPS 100, EPS 150, EPS 200, EPS 250, PERIMETR 150, XPS 500, PUR a referenční vzorek Grey EPS 200, se kterým byly ostatní tepelné izolanty v průběhu celé praktické části porovnávány a je využíván na vybraném ICF systému. Byla stanovena krátkodobá nasákavost, objemová hmotnost, která úzce souvisí s pevnostními parametry, dále byla stanovena pevnost v tlaku při 10% deformaci, pevnost v tahu za ohybu a přídržnost izolantu k betonu. Výsledné hodnoty byly mezi sebou vzájemně porovnány a vedly k užšímu výběru izolantů s vhodností jejich použití, a které byly následně použity ve třetí etapě do návrhu ICF systému. V první etapě byla dle očekávání potvrzena úzká souvislost mezi objemovou hmotností a pevnostními charakteristikami. S rostoucí objemovou hmotností, rostla jak pevnost v tlaku při 10% deformaci, tak pevnost v tahu za ohybu a přídržnost izolantu k betonu. Soudržnost na rozhraní materiálů je důležitým

parametrem při aplikaci izolantu v ICF systému, aby byl zajištěn kompaktní systém s betonovým jádrem. Z první etapy byly vyvozeny na základě stanovených parametrů jako nejvhodnější EPS 200, EPS 250, jako méně vhodné EPS 150, PERIMETR 150 a PUR. A za nevhodné EPS 70, EPS 100 a XPS 500.

Druhá etapa byla zaměřena na mechanické vlastnosti kotvení ICF systému. Nejprve byl zkoušen lepený spoj mezi dvěma stejnými izolanty s myšlenkou, že by mohl nahradit spoj mechanický. Lepený spoj byl zkoušen na dvou izolantech, EPS 250 a PUR. V obou případech byla pevnost v tahu za ohybu o téměř třetinu nižší v porovnání s nelepeným vzorkem. Pokud však bude ICF systém po dobu betonáže a následného vytvrzování podepřen opěrným systémem, mohla by být tato varianta používána. Následně byla stanovována odolnost izolantu proti vytržení hmoždiny, která opět úzce souvisí s objemovou hmotností, a tedy i s pevnostmi izolantu. Síla potřebná k vytržení hmoždiny roste s rostoucí délkou hmoždiny a hutností izolantu. Poslední zkouškou této etapy bylo stanovení síly potřebné k porušení plastové spojky. K porušení došlo vždy v nejslabších místech. Ke zvýšení odolnosti plastové spojky, a tedy i ke zvýšení potřebné síly k porušení, by bylo potřeba plastovou spojku ve slabých místech zesílit. Byly tedy formovány možnosti kotvení z pohledu hloubky zapuštění hmoždiny, kde byly vytvořeny lineární závislosti s možností odečítat i mezilehlé hodnoty. U plastových spojek byla zjištěna slabá místa, která mají za následek snížení mechanických parametrů celého systému. Při úpravě kotevních spojek by bylo možné efektivněji využít kotvení hmoždiny v izolantu.

Ve třetí a zároveň poslední etapě byla na základě zjištěných parametrů z předchozích etap navržena úprava ICF systému. Za použití tuhých bloků tepelných izolantů zkoušených v první etapě a kotevního systému zkoušeného v etapě druhé. Z izolantů vybraných na konci první etapy bylo navrženo pět systémů. Z důvodu, že nejslabším článkem celého systému byla stanovena plastová spojka, celá úprava byla navržena na její maximální parametry, které je schopna přenést. Při návrhu nebyl uvažován opěrný systém, který by přispěl při betonáži k redukci počtu použitých hmoždin v izolantu, které přenáší zatížení vyvozené od hydrostatického tlaku betonu. Všechny systémy navržené na standardizované rozměry deskových izolantů (500×1 000 mm) by měly obsahovat 21 rovnoměrně rozložených hmoždin, aby byl ICF blok schopný přenést napětí vyvozené při betonáži. Rozdíly byly vyvozeny na základě provedených zkoušek pro délky hmoždin v závislosti na použitém izolantu a jeho objemové hmotnosti. Se zkrácením délky hmoždiny je nutné počítat s růstem počtu hmoždin. Při uvažování redukce počtu použitých hmoždin by byla nezbytná úprava kotevní spojky. A jelikož byla plastová spojka označena za nejslabší článek, bylo by

vhodné plastovou spojku zesílit. Velkou výhodou duté plastové hmoždiny je, že při zavrtávání do izolační desky se do hmoždiny dostává izolační materiál, tím nedochází k možnostem vzniku tepelných mostů. Důvodem je jak polymerní materiál, ze kterého je hmoždina vyrobena, tak i vyplnění dutého jádra hmoždiny původním izolantem, do konstrukce se tedy nevnáší žádný kovový materiál, což by mělo za následek vznik tepelného mostu a snížení účinné tloušťky izolantu.

Se stále zpřisňujícími se podmínkami na energetickou náročnost budov, zájem o pasivní domy roste. A s nimi i vývoj související s řešením skladeb obvodových stěn. Za jednu takovou skladbu lze považovat i sledovaný ICF systém. Ten je na trhu již řadu let a obliba tohoto řešení je čím dál více žádoucí, má však stále, jako jiné materiály, prostor pro další výzkum a vývoj, a to jak na primárně používaných materiálech, tak na konstrukčních řešeních, především na detaily, které utváří komplexní řešení celého ICF systému.

## 7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] KORNELOVÁ, Hana. Studium tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
- [2] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky
- [3] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19.května 2010 o energetické náročnosti budov. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>
- [4] Vyhláška č. 264/2020 Sb., o energetické náročnosti budov
- [5] KABELÉ, Karel. Změna evropské směrnice o energetické náročnosti budov (EPBD 3). TZB-info [online]. 2018, 26.9. 2018 [cit. 2021-09-12]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/17969-zmena-evropska-smernice-o-energeticke-narocnosti-budov-epbd-3#literatura03>
- [6] Zákon č. 3/2020 Sb., Zákon, kterým se mění zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů
- [7] VAVERKA, Jiří. Průkaz ENB a dotační program Zelená úsporám. TZB-info [online]. FA VUT Brno, 8.6. 2009 [cit. 2021-09-13]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/5700-prukaz-enb-a-dotacni-program-zelena-usporam>
- [8] AUDENAERT, A., S.H. DE CLEYN a B. VANKERCKHOVE. Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses. Energy Policy [online]. 2008, 36(1), 47-55 [cit. 2021-09-14]. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.09.022. ISSN 03014215. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507004235>
- [9] HALL, M.R., R. LINDSAY a M. KRAYENHOFF. Overview of modern earth building. Modern Earth Buildings [online]. Elsevier, 2012, 2012, , 3-16 [cit. 2021-09-013]. DOI: 10.1533/9780857096166.1.3. ISBN 9780857090263. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090263500010>
- [10] SMOLA, Josef. Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů. Praha: Grada, 2011. Stavitel. ISBN 978-80-247-2995-4.
- [11] HERNANDEZ, Patxi a Paul KENNY. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). Energy and Buildings [online]. 2010, 42(6), 815-821 [cit. 2021-09-14]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.001. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778809003247>
- [12] MARSZAL, A.J., P. HEISELBERG, J.S. BOURRELLE, E. MUSALL, K. VOSS, I. SARTORI a A. NAPOLITANO. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. Energy and Buildings [online]. 2011, 43(4), 971-979 [cit. 2021-09-14]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810004639>
- [13] SOBEK, Werner. Buildings as Renewable Power Plants: Active Houses for the Electric City. Urban Energy Transition [online]. Elsevier, 2018, 2018, , 131-138 [cit. 2021-09-14]. DOI: 10.1016/B978-0-08-102074-6.00020-6. ISBN 9780081020746. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081020746000206>
- [14] ČEJKA, Michal a Jan ANTONÍN. Budovy s téměř nulovou spotřebou – porovnání energetických standardů. TZB-info [online]. 16.1. 2017 [cit. 2021-09-14]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15181-budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-porovnan-energetickych-standardu>
- [15] Základní principy. Pasivní domy [online]. 31.1. 2007 [cit. 2021-09-14]. Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/zakladni-principy/t134>
- [16] VONKA, M. Pasivní domy [online]. Poslední revize 20. 11. 2004 [cit. 2021-09-14]. URL:<<http://www.vonka.wz.cz/pasiv.htm>>
- [17] DAN, D., C. TANASA, V. STOIAN, S. BRATA, D. STOIAN, T. NAGY GYORGY a S.C. FLORUT. Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania. Energy for Sustainable Development [online]. 2016, 32, 99-109 [cit. 2021-09-14]. DOI: 10.1016/j.esd.2016.03.007. ISSN 09730826. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0973082615301629>
- [18] RONGEN, L. Passive house design: a benchmark for thermal mass fabric integration. Modern Earth Buildings [online]. Elsevier, 2012, 2012, , 110-152 [cit. 2021-09-14]. DOI:

- 10.1533/9780857096166.1.110. ISBN 9780857090263. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090263500058>
- [19] Energeticky úsporné domy: katalog pasivních a nízkoenergetických domů. Brno: Centrum pasivního domu, 2011. ISBN 978-80-904739-1-1.
- [20] HUDEC, Mojmir, Blanka JOHANISOVÁ a Tomáš MANSBART. Pasivní domy z přírodních materiálů. 2013. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
- [21] HUDEC, Mojmir. Pasivní rodinný dům: proč a jak stavět. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2555-0.
- [22] ABU-JDAYIL, Basim, Abdel-Hamid MOURAD, Waseem HITTINI, Muzamil HASSAN a Suhaib HAMEEDI. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. Construction and Building Materials [online]. 2019, 214, 709-735 [cit. 2021-09-28]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819309845>
- [23] JELLE, Bjørn Petter. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. Energy and Buildings [online]. 2011, 43(10), 2549-2563 [cit. 2021-09-28]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811002295>
- [24] Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS) Pěnový polystyren pro tepelnou a zvukovou izolaci. Stavba.tzb-info [online]. 2012, 13.4. 2012 [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: stavba.tzb-info.cz
- [25] HEINRICH, Pavel. Polystyrenová výplň v cihlách HELUZ Family 2in1. Stavba.tzb-info [online]. 2016, 24.5. 2016 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://c/cihly-bloky-tvarnice/14248-polystyrenova-vypln-v-cihlach-heluz-family-2in1>
- [26] Ossa, Alexandra & Miguel, Romo. (2011). Dynamic characterization of EPS geofom. Geotextiles and Geomembranes - GEOTEXT GEOMEMBRANE. 29. 40-50 [cit. 2021-11-27]. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2010.06.007.
- [27] MultiTherm® NEO - zateplení budoucnosti. Zateplovací systém s izolantem nové generace [online]. 2008, 6.3. 2008 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: stavba.tzb-info.cz
- [28] WANG, Zhi, Shichao LI a Zhanjun WU. The fabrication and properties of a graphite nanosheet/polystyrene composite based on graphite nanosheets treated with supercritical water. Composites Science and Technology [online]. 2015, 112, 50-57 [cit. 2021-12-02]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2015.03.010
- [29] SDRUŽENÍ EPS ČR. Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS) Pěnový polystyren pro tepelnou a zvukovou izolaci. TZB-info [online]. 2012, 13.4. 2012 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8482-vlastnosti-expandovaneho-penoveho-polystyrenu-eps>
- [30] ARUN SOLOMON, A a G HEMALATHA. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. Structures [online]. 2020, 23, 204-213 [cit. 2021-11-28]. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. ISSN 23520124. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012419301900>
- [31] CAI, Shanshan, Boxiong ZHANG a Lorenzo CREMASCHI. Moisture behavior of polystyrene insulation in below-grade application. Energy and Buildings [online]. 2018, 159, 24-38 [cit. 2021-11-28]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.067. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817303183>
- [32] KHOUKHI, Maatouk. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. Energy and Buildings [online]. 2018, 169, 228-235 [cit. 2021-11-28]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.055. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817338161>
- [33] NOWOŚWIAT, Artur, Paweł KRAUSE a Artur MIROS. Properties of expanded graphite polystyrene damaged by the impact of solar radiation. Journal of Building Engineering [online]. 2021, 34 [cit. 2021-12-02]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2020.101920
- [34] Premeňte odpadový polystyrén na hodnotnú komoditu so spoločnosťou INECS. Plasticportal.eu [online]. 18.8. 2020 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: [www.plasticportal.sk/sk/premente-odpadovy-polystyren-na-hodnotnu-komoditu-so-spolocnostou-inecs/c/6755/](http://www.plasticportal.sk/sk/premente-odpadovy-polystyren-na-hodnotnu-komoditu-so-spolocnostou-inecs/c/6755/)
- [35] Šedý polystyren. Tepelná izolace nové generace. Stavebnictvi3000 [online]. 9.3. 2019 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sedy-polystyren-tepelna-izolace-nove-generace>

- [36] Polystyrenové izolace. Stavba.tzb-info [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>
- [37] Extrudovaný polystyren XPS. Forumpodlah [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.forumpodlah.cz/extrudovany-polystyren-xps>
- [38] ZHANG, Cailiang, Bin ZHU, Dachao LI a L. James LEE. Extruded polystyrene foams with bimodal cell morphology. Polymer [online]. 2012, 53(12), 2435-2442 [cit. 2021-12-01]. ISSN 00323861. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymer.2012.04.006
- [39] POLYURETAN, PUR. Izolace-info [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/katalog/polyuretan/>
- [40] Izolace PUR, PIR a fenolická pěna. Stavba.tzb-info [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/299-izolace-pur-pir-a-fenolicka-pena>
- [40] WINKLER-SKALNA, Agnieszka a Beata ŁOBODA. Determination of the thermal insulation properties of cylindrical PUR foam products throughout the entire life cycle using accelerated aging procedures. Journal of Building Engineering [online]. 2020, 31 [cit. 2021-12-05]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2020.101348
- [41] Minerální izolace. Stavba.tzb-info [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/298-mineralni-izolace>
- [42] Která minerální vlna je lepší pro izolaci - kámen nebo skleněná vlna, srovnání materiálů. Echno.expertepro [online]. 6.8. 2019 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: [https://techno.expertepro.com/cs/stroitelnye-materialy/1582-kakaya-luchshe-mineralnaya-vata-ili-bazaltovaya-vata.html#link\\_tab](https://techno.expertepro.com/cs/stroitelnye-materialy/1582-kakaya-luchshe-mineralnaya-vata-ili-bazaltovaya-vata.html#link_tab)
- [43] LAKATOS, Ákos a Zsolt KOVÁCS. Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods. Energy and Buildings [online]. 2021, 236 [cit. 2021-12-05]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2021.110771
- [44] MAO, Shang, Ankang KAN a Ning WANG. Numerical analysis and experimental investigation on thermal bridge effect of vacuum insulation panel. Applied Thermal Engineering [online]. 2020, 169 [cit. 2021-12-05]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.114980
- [45] SIMÕES, Nuno, Márcio GONÇALVES, Catarina SERRA a Shahaboddin RESALATI. Can vacuum insulation panels be cost-effective when applied in building façades? Building and Environment [online]. 2021, 191 [cit. 2021-12-05]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2021.107602
- [46] ADITYA, L., T.M.I. MAHLIA, B. RISMANCHI, H.M. NG, M.H. HASAN, H.S.C. METSELAAR, Oki MURAZA a H.B. ADITIYA. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2017, 73, 1352-1365 [cit. 2021-12-07]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.02.034
- [47] Katalog modelových řešení budov při spotřebě tepla. 2001, 139 s [cit. 2021-12-07]. Dostupné také z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/1184.pdf>
- [48] ALTHERM ICF SYSTEM [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://altherm.ie/>
- [49] PRESCRIPTIVE METHOD FOR INSULATING CONCRETE FORMS IN RESIDENTIAL CONSTRUCTION: ICCF BLOCK SYSTEMS [online]. In: . 2002, 2002, s. 117 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://theperfectblock.com/wp-content/themes/perfect-block/app/assets/downloads/us-department-of-housing-urban-development-prescriptive-method-for-ebc-icf-2nd-edition.pdf>
- [50] One Series 90 Degree Corner Outside (EPS Inside Panel). BOQ [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://boq.ae/one-series-90-degree-corner-outside-eps-inside-panel.html>
- [51] Thermohouse ICF Wall System: ThermoWall. Thermohouse [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://thermohouse.co.uk/thermowall/>
- [52] Hrubá stavba do dvouh mesiacov. Urobsisam [online]. 29.11. 2016 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://urobsisam.zoznam.sk/dom/stavebny-material/hruba-stavba-do-dvoch-mesiakov>
- [53] Pevné bednění z polystyrenové pěny: klady a zápory použití při stavbě domu. Xtarh [online]. 11.11. 2019 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <http://xtarh.com/pevne-bedneni-z-polystyrenove-peny-klady-a-zapory/>
- [54] Insulating Concrete Forms (ICFs) [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: [https://www.cement.org/cement-concrete/paving/buildings-structures/concrete-homes/building-systems-for-every-need/insulating-concrete-forms-\(ICFs\)](https://www.cement.org/cement-concrete/paving/buildings-structures/concrete-homes/building-systems-for-every-need/insulating-concrete-forms-(ICFs))
- [55] BuildBlock SOS BUILDBLOCK ICF [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.lowes.com/pd/BuildBlock-6-Insulating-Concrete-Form-Straight/3228020>

- [56] Polystyrénové bloky. Polystyrenovebloky [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.polystyrenovebloky.sk/produkt/polystyrenovy-blok/>
- [57] One Series Corners. Vancouvericf [online]. 2021 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.vancouvericf.com/technicalDetailsOther.php>
- [58] Integraspec® STANDARD PANEL(S). Integraspec [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: [https://integraspec.com/wp-content/uploads/2019/09/Integraspec-Catalogue-2019\\_EN.pdf](https://integraspec.com/wp-content/uploads/2019/09/Integraspec-Catalogue-2019_EN.pdf)
- [59] ICFREX wall. ICFREX wall [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <http://www.icfrexwall.com/icf-rexwall-7-dist-18-k.html>
- [60] Waterproofing Plastic Web Ties for Insulating Concrete Forms (ICF) Building System. Alibaba [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/Waterproofing-Plastic-Web-Ties-for-Insulating\\_62118456789.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Waterproofing-Plastic-Web-Ties-for-Insulating_62118456789.html)
- [61] Quad-Lock Ties. Quadlock [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.quadlock.com/insulated-concrete-forms/ties.htm>
- [62] SERIÁL: KONSTRUKČNÍ DETAILY PRO PASIVNÍ A NULOVÉ DOMY - 5. DÍL. Izolace-info [online]. 15.7. 2019 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.isolace-info.cz/aktuality/21833-serial-konstrukcni-detaily-pro-pasivni-a-nulove-domy-5-dil-a.html#.YbfY7NDMJpB>
- [63] Dům z polystyrenu – co je to ICF systém? Stavimbydlim [online]. 7.12. 2017 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://stavimbydlim.cz/dum-z-polystyrenu-co-je-to-icf-system/>
- [64] Jeden osvědčený postup pro energetickou účinnost a sílu. Sbcmag [online]. 26.6. 2019 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.sbcmag.info/news/2019/jun/one-best-practice-energy-efficiency-strength>
- [65] ARUN SOLOMON, A a G HEMALATHA. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. Structures [online]. 2020, 23, 204-213 [cit. 2021-12-15]. ISSN 23520124. Dostupné z: doi:10.1016/j.istruc.2019.10.019
- [66] AMER-YAHIA, Cherif a Todd MAJIDZADEH. Construction and Building Materials [online]. 2012, 26(1), 448-458 [cit. 2021-12-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.044
- [67] EKRAMI, Navid, Anais GARAT a Alan S. FUNG. Thermal Analysis of Insulated Concrete Form (ICF) Walls. Energy Procedia [online]. 2015, 75, 2150-2156 [cit. 2021-12-15]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.07.353
- [68] LI, Pengwei, Huijun WU, Yanchen LIU, Jianming YANG, Zhaosong FANG a Borong LIN. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. Construction and Building Materials [online]. 2019, 205, 529-542 [cit. 2021-12-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212
- [69] GAO, Tao, Bjørn Petter JELLE, Arild GUSTAVSEN a Stefan JACOBSEN. Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. Construction and Building Materials [online]. 2014, 52, 130-136 [cit. 2021-12-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.100
- [70] MANALO, Allan. Structural behaviour of a prefabricated composite wall system made from rigid polyurethane foam and Magnesium Oxide board. Construction and Building Materials [online]. 2013, 41, 642-653 [cit. 2021-12-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.058
- [71] CHEN, Wensu, Hong HAO, Dylan HUGHES, Yanchao SHI, Jian CUI a Zhong-Xian LI. Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene [online]. 2015, 69, 170-180 [cit. 2021-12-15]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2014.12.024
- [72] ALI, Youmna A.Y., Ezzat H.A. FAHMY, Mohamed N. ABOUZEID, Yoursy B.I. SHAHEEN a Mohamed N. Abdel MOOTY. Use of expanded polystyrene in developing solid brick masonry units. Construction and Building Materials [online]. 2020, 242 [cit. 2021-12-15]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118109
- [73] ŠÁLA, Jiří. O vnitřním zateplení. Alternativní energie [online]. 4.5. 2001 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/540-o-vnitrim-zatepleni>
- [74] ŠŤASTNÝ, Pavel a Radim LOVĚTÍNSKÝ. Zateplování budov zevnitř. Realizace staveb [online]. 8.10. 2010 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zatepleni/zateplovani-budov-zevnitr>
- [75] SRDEČNÝ, Karel. Energeticky soběstačný dům - realita, či fikce?. Brno: ERA, 2006. 21. století. ISBN 80-736-6052-0.



- [76] Zateplovací systémy ETICS. TZB-info [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/303-zateplovaci-systemy-etics>
- [77] VAŠUT, Jan. ZATEPLENÍ DOMŮ - ZATEPLENÍ UŠETŘÍ MNOŽSTVÍ ENERGIE 2.ČÁST: Zateplování domu. Izolace-info [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.isolace-info.cz/technicke-informace/zatepleni-usetri-mnozstvi-energie2/>
- [78] Sendvičové zdivo. Chatar-chalupar [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/sendvicove-zdivo/>
- [79] Cementovláknité desky pro fasády obvodových stěn – těsnost za větru i deště. Imaterialy [online]. 5. 12. 2016 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: [https://www.imaterialy.cz/rubriky/informace-vyrobcu/cementovlaknite-desky-pro-fasady-obvodovych-sten-tesnost-za-vetru-i-deste\\_44201.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/informace-vyrobcu/cementovlaknite-desky-pro-fasady-obvodovych-sten-tesnost-za-vetru-i-deste_44201.html)
- [80] Hmoždinky pro ETICS. Ejot [online]. [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.ejot.cz/overview-etics>
- [81] MALANHO, Sofia a Maria do Rosário VEIGA. Bond strength between layers of ETICS – Influence of the characteristics of mortars and insulation materials. Journal of Building Engineering [online]. 2020, 28 [cit. 2021-12-21]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2019.101021
- [82] NORVAIŠIENĚ, Rosita, Vincent BUHAGIAR, Arūnas BURLINGIS a Kęstutis MIŠKINIS. Investigation of mechanical resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS). Journal of Building Engineering [online]. 2020, 32 [cit. 2021-12-21]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2020.101682
- [83] ŠVÁB, Václav. Pasivní a nulové budovy od návrhu K realizaci A Provozu [online]. 2013 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2605686-Pasivni-a-nulove-bu-dovy-od-navrhu-k-realizaci-a-provozu.html>
- [84] POJAR, Petr. Z VELOXu postavíte malý i velký dům. Www.ceskestavby.cz [online]. 12. 9. 2013 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/z-veloxu-postavite-maly-i-velky-dum-22385.html>
- [85] BuildLock Knockdown (KD) Forms: The BuildLock Knockdown ICF System is a high-performance knock-down insulating concrete form (ICF) wall system. Lakecrestfoundations [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://lakecrestfoundations.com/products/buildlock-knockdown-icfs/>
- [86] JACKON brings ICF innovation to the UK market. Jackon.co [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.jackon.co.uk/jackon-brings-icf-innovation-to-uk-market/>
- [87] Produkty ICF.: Stavební systémy Passivhaus. Icfbuildingsolutions.co [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.icfbuildingsolutions.co.uk/products/>
- [88] Thar be walls! ICF castle walls going up. Buildingmycastle [online]. 20.6. 2015 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <http://www.buildingmycastle.com/thar-be-walls-icf-castle-walls-going-up/>
- [89] ISOVER EPS 70. Isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/isover-eps-70#descriptions>
- [90] ISOVER EPS 100. Isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/isover-eps-100>
- [91] ISOVER EPS 150. Isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/isover-eps-150>
- [92] ISOVER EPS 200. Isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/isover-eps-200>
- [93] SYNTHOS XPS PRIME G: Extrudovaný polystyrén. E-isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.e-isover.cz/data/files/technick-list-synthos-xps-prime-1497.pdf>
- [94] TDP – PUR 30/40. Skorvaga [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: [https://www.skorvaga.cz/wp-content/uploads/2017/10/Technicky\\_list\\_TPD\\_PUR-New-Therm.pdf](https://www.skorvaga.cz/wp-content/uploads/2017/10/Technicky_list_TPD_PUR-New-Therm.pdf)
- [95] ISOVER EPS Greywall SP. Isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/isover-eps-greywall-sp#descriptions>
- [96] ISOVER EPS Grey 100. Isover [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/produkty/isover-eps-grey-100>
- [97] ČSN EN 1602. Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení objemové hmotnosti. 2013.
- [98] ČSN EN ISO 29767. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření. 2020.
- [99] ČSN EN 826. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška tlakem. 2013.

- [100] ČSN EN 12089. Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška ohybem. 2013.
- [101] ČSN 73 2577. Zkouška přidrženosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1981.
- [102] ČSN EN 13446. Desky ze dřeva - Stanovení odporu proti vytažení spojovacích prostředků. Český normalizační institut, 2003.
- [103] Kalkulátor tlaku čerstvého betonu Doka. Doka [online]. [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://www.doka.com/cz/home/apps/Doka-Tools-App>

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Porovnání energetické náročnosti jednotlivých typů budov [14] .....	14
Obrázek 2: Expandovaný pěnový polystyren [34] .....	21
Obrázek 3: Schéma výroby expandovaného pěnového polystyrenu [24].....	21
Obrázek 4: Závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti expandovaného pěnového polystyrenu [24] .....	22
Obrázek 5: Struktura EPS pod elektronovým mikroskopem [25].....	23
Obrázek 6: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti expandovaného polystyrenu [24] .....	23
Obrázek 7: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemovém obsahu vlhkosti na expandovaného pěnového polystyrenu [24] .....	24
Obrázek 8: Struktura EPS perle (a); příčný řez perlí (b); uzavřené buňky (c) [26] .....	25
Obrázek 9: Mikrostruktura grafitového expandovaného pěnového polystyrenu [28] .....	25
Obrázek 10: Průchod tepelného záření v EPS a v Grey EPS [27] .....	26
Obrázek 11: Expandovaný pěnový polystyren s přídavkem grafitu [33].....	26
Obrázek 12: Ztráta rozměrové stability grafitových polystyrenových desek při zateplovacích pracích [33] .....	27
Obrázek 13: Povrch grafitového polystyrenu narušený vlivem slunečního záření [33].....	27
Obrázek 14: Profilovaný povrch Perimetru [36].....	28
Obrázek 15: Tvar desky Perimetru s polodrážko (vlevo), s hladkou hranou (vpravo) .....	28
Obrázek 16: Extrudovaný pěnový polystyren [37].....	29
Obrázek 17: Uzavřená struktura extrudovaného pěnového polystyrenu pod mikroskopem [38].....	29
Obrázek 18: Polyuretanová izolační deska [39] .....	30
Obrázek 19: Tuhý PUR mezi hořčnatými deskami vyztuženými skelnými vlákny [70] .....	31
Obrázek 20: Minerální vlna - kamenná (vlevo), skelná (vpravo) [42].....	32
Obrázek 21: Pohled na bariérovou fólii a strukturu přepážky uvnitř GFP [24] .....	34
Obrázek 22: Skladba vakuového izolačního panelu [24].....	34
Obrázek 23: Zjednodušené schéma výroby aerogelového pěnobetonu [68].....	36
Obrázek 24: Mikrostruktura pěnobetonu (a,b); částice na bázi cementu (c); částice na bázi aerogelu (d) [68] .....	36
Obrázek 25: Průběhy teplot v obvodových stěnách pro různé typy zateplení [47] .....	37
Obrázek 26: Provětrávaná fasáda s kovovým roštem a izolantem z minerální vlny [79].....	38
Obrázek 27: Systém ETICS [80] .....	39
Obrázek 28: ICF systém [48].....	40
Obrázek 29: ICF systém s vnitřním dílem z cementotřískové desky [50] .....	41
Obrázek 30: Designy ICF systémů [49].....	42
Obrázek 31: ICF tvárnice pro vnitřní příčky (25 cm), tvárnice pro obvodové stěny (35 cm), .....	43
Obrázek 32: ICF systém ze štěpkocementové desky; tvárnice (vlevo); výstavba (vpravo) [84] .....	44
Obrázek 33: Možnosti oddělení tuhých izolantů v ICF systémech [55,56] .....	44
Obrázek 34: Plastové spojky používané v ICF systémech [58–61].....	45
Obrázek 35: Způsob spojování ICF systémů [57,85].....	45
Obrázek 36: Stavebnicový systém ICF systému [51] .....	46
Obrázek 37: ICF systém – stavebnicový systém [87].....	46
Obrázek 38: ICF systém ve výstavbě [86].....	46
Obrázek 39: Kruhový půdorys vystavěný ze zakřivených ICF bloků [88] .....	47
Obrázek 40: Metodika praktické části diplomové práce .....	48
Obrázek 41: Výstavba domu pomocí ICF systému z Grey EPS 200 .....	50
Obrázek 42: Vybrané tepelné izolanty.....	52
Obrázek 43: Výroba zkušebních těles pro stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu .....	57
Obrázek 44: Odtrhový přístroj pro stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu .....	57
Obrázek 45: Vzorky po zkoušce stanovení přídržnosti tepelného izolantu k betonu .....	58
Obrázek 46: Vzorky tepelných izolantů připravené ke zkoušce pevnosti v tlaku při 10% deformaci .....	61
Obrázek 47: Porušení při stanovování pevnosti v tlaku před dosažením 10% deformace PUR .....	63
Obrázek 48: Zkušební vzorky tepelných izolantů pro pevnost v tahu za ohybu .....	64
Obrázek 49: Tepelné izolanty při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu; vlevo – PERIMETR, vpravo – PUR .....	64
Obrázek 50: Jednotlivé části ICF systému: polystyrenové bloky (vlevo), plastová kotva (vpravo) .....	67
Obrázek 51: Tvárnice ICF systému – vzájemné propojení.....	67
Obrázek 52: Plastová kotva ICF systému: stojky (vlevo), spojka (vpravo) .....	68
Obrázek 53: Mechanický horizontální spoj ICF systému.....	68
Obrázek 54: Zkušební vzorky tepelných izolantů na zkoušku pevnosti v tahu za ohybu lepeného spoje ..	70
Obrázek 55: Působení ohybového zatížení na lepený vzorek PUR .....	70
Obrázek 56: Místa porušení při působení zatěžovacího břemena při stanovení tahu za ohybu: .....	71
Obrázek 57: Míra a místa porušení u lepených spojů EPS 250 po stanovení pevnosti v tahu za ohybu: ..	72
Obrázek 58: Plastové hmoždiny zkoušené k použití do ICF systému .....	73
Obrázek 59: Plastová hmoždina po vytrhnutí z tepelného izolantu .....	74
Obrázek 60: Odtrhy hmoždin z tepelných izolantů: při 30, 60, 90 a 120 mm (zleva).....	78
Obrázek 61: Plastová spojka používaná v ICF.....	79

Obrázek 62: Místa porušení plastových spojek při stanovení síly potřebné k porušení .....	79
Obrázek 63: Velikost tlaku čerstvého betonu závislá na výšce betonáže [103].....	82
Obrázek 64: Schéma rozložení plastových hmoždin u návrhu ICF systému .....	83

## 9. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Klasifikační třídy hodnocení energetické náročnosti budovy, měrné spotřeby energie udávány v kWh/(m <sup>2</sup> ·rok) [7] .....	13
Tabulka 2: Přehled vybraných tepelných izolantů dostupných na českém trhu [89–96] .....	51
Tabulka 3: Hodnoty změřených a uváděných objemových hmotností.....	53
Tabulka 4: Výsledné hodnoty krátkodobé nasákavosti v [kg/m <sup>2</sup> ] a v [%] tepelných izolantů .....	55
Tabulka 5: Výsledky zkoušky přídržnosti tepelného izolantu k betonu a místa porušení .....	59
Tabulka 6: Hodnoty pevností v tlaku při 10% deformaci a pevností v tlaku zkoušených tepelných izolantů .....	61
Tabulka 7: Pevnosti tepelných izolantů v tahu za ohybu .....	65
Tabulka 8: Shrnutí výsledků zkoušek z první etapy .....	66
Tabulka 9: Výsledné hodnoty pevností v tahu za ohybu.....	71
Tabulka 10: Výsledné síly a napětí po zkoušce odolnosti izolantu proti vytržení hmoždin .....	74
Tabulka 11: Shrnutí fyzikálně mechanických vlastností vybraných tepelných izolantů, tepelné izolanty pro úpravu ICF .....	80
Tabulka 12: Síly potřebné k vytržení hmoždiny z tepelného izolantu .....	81
Tabulka 13: Síly potřebné k vytržení hmoždin izolačních materiálů .....	82
Tabulka 14: Počet hmoždin na m <sup>2</sup> při určité délce u návrhu ICF systému .....	85
Tabulka 15: Počet hmoždin na 0,5 m <sup>2</sup> při určité délce u návrhu ICF systému.....	85

## 10. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Orientační porovnání rozptylu součinitele tepelné vodivosti vybraných tepelných izolantů [22].....	20
Graf 2: Interval deklarovaných objemových hmotností a naměřená objemová hmotnost jednotlivých tepelných izolantů.....	53
Graf 3: Porovnání součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů a objemové hmotnosti ....	54
Graf 4: Krátkodobá nasákavost tepelných izolantů dle normy ČSN EN ISO 29767 .....	56
Graf 5: Příkladnost tepelného izolantu k betonu v porovnání s objemovou hmotností .....	60
Graf 6: Pevnost v tlaku při 10% deformaci a pevnost v tlaku u vybraných tepelných izolantů ...	62
Graf 7: Pevnosti tepelných izolantů v tahu za ohybu .....	65
Graf 8: Porovnání výsledných pevností v tahu za ohybu lepeného a referenčního tepelného izolantu .....	72
Graf 9: Síly potřebné k vytržení hmoždin z tepelného izolantu v porovnání s objemovou hmotností.....	75
Graf 10: Síly potřebné k vytržení hmoždin u jednotlivých tepelných izolantů, rovnice k vypočítání mezilehlých hodnot.....	76
Graf 11: Napětí při vytrhávání hmoždin v tepelných izolantech.....	77

## 11. SEZNAM ZKRATEK

PENB...	Průkaz energetické náročnosti budovy
EPS...	Expandovaný pěnový polystyren
ETICS...	External thermal insulation composite system
XPS...	Extrudovaný pěnový polystyren
PUR..	Polyuretanová pěna
PIR...	Polyisokianurátová pěna
GFP...	Gas filled panel
VIP...	Vacuum insulation panel
MW...	Minerální vlna
ICF...	Insulating concrete forms