



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

**STUDIUM VLIVU KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ
NA TEPELNOU STABILITU NÍZKOENERGETICKÝCH
STAVEB**

STUDY OF THE EFFECT OF CONSTRUCTION MATERIALS ON THE THERMAL STABILITY
OF THE LOW-ENERGY BUILDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Mikeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK,
CSc.**

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Vít Mikeš
Název	Studium vlivu konstrukčních materiálů na tepelnou stabilitu nízkoenergetických staveb
Vedoucí práce	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- 1) Halahya, M., Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie, Alfa Bratislava 1985
- 2) Kmínová, H., Studium tepelně technických materiálových vlastností staviv z hlediska jejich projevu na vnitřní mikroklima v budovách, disertační práce FAST VUT Brno 2006
- 3) Davies, M. G., Building Heat Transfer, John Wiley & Sons Ltd 2004

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Použitím tepelných izolací ve stavebních konstrukcích se redukuje zejména tepelné ztráty budovy, vedle této vlastnosti se uplatní i další užité vlastnosti použitých staviv. Práce je věnována problematice konstrukčních materiálů a jejich vlivu na tepelnou stabilitu nízkoenergetických staveb pro různé klimatické podmínky. Obsahem bakalářské závěrečné práce je:

- i) přehled konstrukčních materiálů používaných pro výstavbu nízkoenergetických staveb, jejich fyzikální vlastnosti, konstrukční možnosti při jejich zabudování do staveb,
- ii) projev ročních období na tepelnou stabilitu nízkoenergetických staveb,
- iii) přehled výpočtových modelů, kterými lze odhadovat energetickou náročnost budov vlivem klimatických podmínek ročního období v podmínkách ČR,
- iv) výpočtové posouzení tepelné stability budov při zabudování různých konstrukčních materiálů s podporou simulačního programu pro podmínky zimní i letní tepelné ochrany staveb,
- v) porovnání výpočtových závěrů s využitím vybraných konstrukčních materiálů z hlediska minimalizace spotřeby energií pro udržení podmínek vnitřního prostředí, jejich přednosti i rizika pro aplikaci v nízkoenergetických stavbách.

Při vypracování bakalářské práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; praktická část do 20 % rozsahu; celkový rozsah do 40 stran včetně tabulek a grafů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tématem bakalářské práce je studium vlivu konstrukčních materiálů na tepelnou stabilitu nízkoenergetických staveb. V práci jsou porovnávány teplotní a energetické projevy u tří různých materiálových verzí konstrukčního řešení domu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkoenergetický dům, stavební materiály, spotřeba energie, tepelná stabilita, pasivní dům, energetická náročnost budovy, tepelně-technické vlastnosti stavebních materiálů, vzájemné porovnání.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the study of the impact of the construction materials on heat stability of the low-energy buildings. The study aims at comparison of heating and energetic sings for three different material versions of the construction solution of a house.

KEYWORDS

Low-energy house, construction materials, energy consumption, heating stability, passive house, energy performance of a building, heat-technical properties of building materials, mutual comparison.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Vít Mikeš *Studium vlivu konstrukčních materiálů na tepelnou stabilitu nízkoenergetických staveb*. Brno, 2017. 61 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Vít Mikeš
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat své rodině za důvěru a podporu během studia. Dále děkuji panu prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovi, CSc. za odborné vedení, užitečné rady, ochotu a čas strávený při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat svému příteli Václavovi Konvičnému za čas strávený při konzultacích.

Obsah

1.Úvod	11
2.Historie nízkoenergetických staveb	12
3. Budovy s velmi nízkou energetickou náročností – kategorie budov	13
3.1 Nízkoenergetické domy	14
3.2 Pasivní domy	14
3.3 Nulové domy	15
3.4 Energeticky nezávislé budovy	16
3.5 Koncepční řešení nízkoenergetických budov	16
3.5.1 Koncepce budovy	16
3.5.2 Umístění stavby	16
3.5.3 Tvar domu	17
3.5.4 Vysoký izolační standard	17
3.5.5 Pasivní využívání sluneční energie	17
3.5.6 Větrání a vzduchotěsnost	18
3.5.7 Vlhkost vzduchu a nasákavost	18
3.6 Prostupy tepla obálkou budovy	19
3.6.1 Prostup tepla stěnou	19
3.6.2 Prostup tepla základy	20
3.6.3 Prostup tepla střechou	21
3.6.4 Prostup tepla výplněmi otvorů	21
3.6.4.1 Materiály pro výplně	23
4. Rozdělení konstrukcí z hlediska tepelné stability	24
4.1 Těžké konstrukce s vnějším zateplením	24
4.2 Těžké konstrukce s vnitřním zateplením	24
4.3 Lehké konstrukce	24
5. Konstrukční materiály nosných obvodových konstrukcí	25

5.1 Konstrukční systém z cihelného zdiva	25
5.2 Konstrukční systém z pórobetonového zdiva – Ytong	26
5.3 Konstrukční systémy z vápenopískového zdiva - VAPIS	26
5.4 Konstrukční montované dřevěné systémy	27
6. Izolační materiály	27
6.1 Použití podle skladby obálky budovy	28
6.2 Rozdělení tepelně izolačních materiálů	28
7. Tepelně technické vlastnosti	32
7.1 Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů	32
7.1.1 Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W/(m \cdot K)]$	32
7.1.2 Měrná tepelná kapacita $c [J/(kg \cdot K)]$	33
7.1.3 Součinitel teplotní vodivosti $a [m^2/s]$	33
7.1.4 Množství tepla $Q [J]$	34
7.2 Tepelně technické vlastnosti stavebních konstrukcí	34
7.2.1 Tepelný odpor konstrukce $R [(m^2 \cdot K)/W]$	34
7.2.2 Součinitel prostupu tepla $U [W/(m^2 \cdot K)]$	35
7.2.3 Tepelný most	37
7.2.4 Teplotní útlum konstrukce $v [-]$	37
7.2.5 Fázový posun $\Delta \tau_f [hod]$	38
7.2.6 Faktor difuzního odporu $\mu [-]$	38
7.2.7 Vnitřní povrchová teplota $\theta_{si,cr}$	39
8. Projev ročního období na tepelnou stabilitu	40
8.1 Tepelná stabilita místnosti	40
8.1.1 Tepelná stabilita místnosti v letním období	40
8.1.2 Tepelná stabilita místnosti v zimním období	42
9. Přehled energetických hodnocení budov	43
9.1 Prohlášení o shodě	43

9.2 Protokoly o tepelně technickém hodnocení	43
9.3 Průkazy energetické náročnosti budov	45
9.4 Energetický audit	45
10. Experimentální část	46
10.1 Popis vybraného objektu	46
10.1.1 Rodinný dům zděný z keramických tvarovek	46
10.1.2 Rodinný dům s lehkou dřevěnou konstrukcí	47
10.1.3 Rodinný dům postavený jako železobetonová konstrukce	47
10.2 Použita výpočtová metodika	49
10.2.1 Popis použitého programu	49
10.2.2 Princip nestacionárního výpočtu programem	49
10.3 Sledované údaje	50
10.4 Grafické výstupy ze simulace programem Stabilita	50
10.5 Přehled poznatků z provedených simulací	54
11. Závěr	55
12. Seznam použitých zdrojů	56
13. Seznam tabulek	58
14. Seznam obrázků	59
15. Seznam symbolů	60
16. Seznam zkratk	61

1.Úvod

Díky stále rostoucím cenám energií se lidé snaží snížit náklady pro provozování staveb. Díky tomuto problému se trendem ve stavebnictví stávají nízkoenergetické a pasivní domy, které mají ve srovnání s běžnými stavbami výrazně nižší provozní náklady.

Na provozování budov v evropských zemích se spotřebovává asi 40 % vyrobené energie. Tomu odpovídá přibližně 30 % emisí CO₂ a současně to vytváří asi 40% všech odpadů. Z toho vyplývají negativní dopady výstavby a provozování budov na životní prostředí.

Největší podíl při spotřebě energie pro provoz budov tvoří podíl na vytápění, a to přibližně 70-80 %. Při snaze o úsporu energie je prioritou snížení spotřebované energie na vytápění. Toho lze dosáhnout použitím konstrukčních a izolačních materiálů s dobrými tepelně technickými vlastnostmi a dobrým koncepčním řešením celé stavby. U nízkoenergetických a pasivních domů se významně uplatní tzv. pasivní solární zisky. Pro dosažení těchto zisků je důležitá orientace a umístění budovy na pozemku. Energetické vlastnosti budovy jsou tedy ovlivněny celou řadou faktorů.

V současné době se navrhují rodinné a bytové stavby z různých stavebních materiálů. Požadavkem je kompozice kvalitního bydlení i potenciál vysoké energetické účinnosti při provozu domů. V bakalářské práci se zabývám vlivem různých konstrukčních materiálů na spotřebu energie pro udržení stabilního vnitřního klimatu v zimním, ale i letním období. Racionálním uspořádáním materiálů ve stavebních konstrukcích lze dosáhnout stavu, kdy se vnitřní prostor v letním období nepřehřívá, a naopak v zimním období poskytuje příznivé mikroklima volbou vhodných tepelně-izolačních poměrů v obalových konstrukcích. Správnou materiálovou volbou a konstrukčním řešením budov lze tyto vlastnosti ovlivňovat, jak je dále ukázáno v práci.

2.Historie nízkoenergetických staveb

Největší rozvoj nízkoenergetické a solární architektury vznikl díky ropným krizím v 70. letech v USA. Svět si v té době poprvé uvědomil svoji závislost na ropě a energii. Díky tomu se začal zvyšovat tlak na úspory energie. Hlavní oblastí, kde se začala hledat úspora energie bylo stavebnictví, kde začala experimentální výstavba úsporných domů, zaměřených na solární energii. V této době také vzniklo velké množství staveb, které využívaly sluneční energii pomocí velkých ploch slunečních kolektorů. Solárních skleníků a velkých prosklených ploch. V těchto stavbách se používaly velké zásobníky, do kterých se akumulovalo teplo z těchto ploch. Tyto stavby lze nazvat jako nízkoenergetické domy první generace. Tyto domy měly několik charakteristických prvků:

- byl podceňován vliv tepelných ztrát,
- největší váha byla kladena na pasivní solární zisky a díky tomu bylo velmi časté přehřívání prostorů,
- tepelné mosty byly příliš velké a četné,
- nebyla věnována pozornost vzduchotěsnosti, domy nebyly těsné.

Díky vysoké finanční náročnosti staveb se od ní brzy upustilo [1].

Evropa byla ropnou krizí zasažena v menším měřítku. Americké a evropské stavebnictví je založeno na jiných principech. V evropském stavebnictví se klade důraz na tradiční materiály a kvalitu stavby, počítá se zde s podstatně vyšší životností staveb. Trend úsporných staveb se postupně vyvinul do nízkoenergetických staveb druhé generace. Tyto domy sice obsahovaly všechny podstatné prvky, které patří k nízkoenergetickým domům, ale v trochu nevyzrálé formě:

- vysoký standard tepelné izolace,
- vysoká vzduchotěsnost,
- mechanické větrání,
- dobré využití odpadního tepla,
- částečné krytí zbytkové potřeby tepla solárním zařízením,
- zónování vnitřních prostor.

Se stále postupujícím vývojem vznikla „teorie pasivního domu“. Jedná se zde o dům, který si vystačí na vytápění s pasivními zisky (to jsou zisky ze slunečního záření a z vnitřního provozu domu). První pasivní dům byl postaven v Německu v Darmstadtu v roce 1991 [2].

V roce 2006 vzniklo v České republice sdružení Centrum pasivního domu. A tím následně vznikla i síť center pasivního domu u nás.

3. Budovy s velmi nízkou energetickou náročností – kategorie budov

Kategorizaci domů dle energetické náročnosti uvádí tepelně technické norma [4].

Tab. 1: Charakteristika budov s odlišnou potřebou tepla na vytápění [4]

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

3.1 Nízkoenergetické domy

Koncept nízkoenergetického domu vznikl jako odpověď na rostoucí ceny energií. Přestože se předpisy na energetickou náročnost budov a izolační vlastnosti konstrukcí stále zpřísňují, má nízkoenergetický dům ve srovnání s běžnou novostavbou zhruba jen poloviční až třetinovou spotřebu tepla na vytápění. Vyšší kvalitu energetické úspornosti splňuje dům pasivní, kde je spotřeba energie ještě nižší. Takový dům však vyžaduje velmi kvalitní projektovou přípravu i realizaci. Nízkoenergetický dům je tedy jakýmsi kompromisem mezi pasivním domem a „běžnou“ výstavbou. V zahraničí je již zcela běžným standardem. Nízkoenergetický dům má několik základních znaků:

- maximální tepelná izolace obvodového pláště,
- vysoká vzduchotěsnost povrchu celého domu,
- regulace vytápění a větrání pomocí speciálních systémů,
- kompaktní tvar bez zbytečných výčnělků,
- nejvíce prosklených ploch je orientováno na jih,
- regulace vytápění využívající tepelné zisky,
- potřeba tepla na vytápění do $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

3.2 Pasivní domy

Pasivní dům poskytuje celoročně tepelný komfort, aniž by využíval aktivní topný systém, po většinu roku využívá pasivní tepelné zisky externí (ze slunečního záření procházejícího okny) a interní (teplo vyzařované obyvateli domu a spotřebiči). Měrná roční potřeba tepla na vytápění je maximálně $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Jde o obecný standard pro středoevropské klimatické podmínky. Pasivní dům má nadstandardně dimenzované zateplení a musí mít zajištěnou vzduchotěsnost stěn. Teplo je navíc získáváno rekuperací z odváděného vzduchu.

Množství primární energie spojené s provozem budovy (vytápění, ohřev teplé vody a elektrická energie pro spotřebiče) nesmí překračovat hodnotu $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ pro rodinné a bytové domy a hodnotu $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ pro neobytné a ostatní budovy.

3.3 Nulové domy

Jedná se v podstatě o pasivní dům, jehož spotřeba energie je kryta v maximální možné míře z obnovitelných zdrojů. Roční spotřeba tepelné energie u nulových domů je 0 až 5 KWh/(m²·a).

Hodnocení vychází z roční bilance energetických potřeb a energetické produkce v budově a jejím okolí, vyjádřené v hodnotách primární energie. Předpokládá se, že budova je připojena na obvyklé energetické sítě. Zpravidla je výhodné, aby stavební řešení a technická zařízení budovy byla navržena tak, aby odpovídala standardu pasivní budovy.

Jsou stanoveny dvě základní úrovně hodnocení:

Úroveň A – do energetických potřeb budovy se zahrne potřeba tepla na vytápění, potřeba energie na chlazení, energie na přípravu teplé vody, pomocná elektrická energie na provoz energetických systémů budovy, elektrická energie na umělé osvětlení a elektrické spotřebiče.

Úroveň B – jako A, ale bez zahrnutí elektrické energie na elektrické spotřebiče [4].

Tab. 2: Základní požadavky na energeticky nulové budovy [4]

Závaznost kritéria		Požadovaná hodnota	Doporučená hodnota	Požadovaná hodnota podle zvolené úrovně hodnocení	
		Průměrný součinitel prostupu tepla U_{em} [W/(m ² ·K)]	Měrná potřeba tepla na vytápění E_a [W/(m ² ·K)]	Měrná roční bilance potřeby a produkce energie vyjádřená v hodnotách primární energie z neobnovitelných zdrojů PE_A [W/(m ² ·K)]	
				Úroveň A	Úroveň B
Obytné budovy	Nulový	Rodinné domy ≤ 0,25	Rodinné domy ≤ 0,20	0	0
	Blízký nulovému	Bytové domy ≤ 0,35	Bytové domy ≤ 0,15	80	30
Neobytné budovy	Nulový	≤ 0,35	≤ 0,30	0	0
	Blízký nulovému			120	90

3.4 Energeticky nezávislé budovy

Jako energeticky nezávislé budovy se označují budovy bez potřeby dodávek energie ze zdrojů mimo budovu. Zpravidla se jedná o budovy mimo zastavěné území, kde by napojení na energetické sítě nebylo možné a jiná dodávka energie by byla obtížná. V takovém případě je výhodné, aby budova byla řešena jako pasivní. Vyrovnání mezi energetickou produkcí a spotřebou energie slouží akumulace energie do tepelných zásobníků, elektrických akumulátorů a využití akumulace energie v podzákladích.

3.5 Koncepční řešení nízkoenergetických budov

Kvalita nízkoenergetických staveb je podstatně určována zvolenou a realizovanou koncepcí. Častou chybou při výstavbě nízkoenergetických staveb je zdůrazňování jednotlivých technologií. Typickým příkladem je předimenzování stavby solárním zařízením a zásobníky. Jako opora pro projektování nízkoenergetických staveb může posloužit několik pravidel.

3.5.1 Koncepce budovy

Navrhování nízkoenergetických budov představuje řešení komplexu problémů, které zahrnují jak provozní, dispoziční, architektonické a finanční požadavky investora, tak souhrn technických problémů napříč všemi profesemi a specializacemi, tepelnou technikou a návrhem vytápění. Tvar a poloha domu, ale i uspořádání prostorů a půdorys mají podstatný vliv na spotřebu energie. Mělo by se zvolit jednoduché řešení systémů a půdorysů.

3.5.2 Umístění stavby

Základem je správné umístění stavby na pozemku. Ideálně ji situujeme k severní hranici parcely. Přitom je důležité, aby jižní a pokud možno i východní, případně západní fasáda byla osluněna a v maximální míře byly využity solární zisky od slunečního svitu. Z tohoto důvodu se navrhuje na jižní a západní stranu rozsáhlá prosklení. Důležitá je i poloha ve smyslu vrstevnic.

Nejnevhodnější je údolí a naopak ideální je mírný jižní svah. To, co nesledujeme u běžné výstavby, může být u pasivních domů fatální problém.

3.5.3 Tvar domu

Ideálem je co nejkompaktnější, jednoduchý tvar domu, bez zbytečných výstupků. Pasivní dům se nejčastěji staví v podobě ležatého kvádrů (delší stranou orientovaného k jihu), přestože by byl nejlepší tvar koule. Tvar koule je ovšem prakticky nerealizovatelný a jemu nejbližší krychle je nepraktická zase z dispozičního hlediska. Důležitý je také tvar střechy, nejvhodnější je střecha plochá nebo pultová.

3.5.4 Vysoký izolační standard

Obálka domu, která je nejvíc ochlazovaná, musí být vybavena dostatečnou vrstvou tepelné izolace. Tloušťka tepelné izolace konstrukcí nízkoenergetických staveb má být 200 mm a více (podle konstrukce budovy a typu materiálu). Obvodové stěny mají pak mít tloušťku mezi 250 a 550 mm. V mnoha domech uniká odstranitelnými tepelnými mosty více tepla než nerušenou částí stěny. Z tohoto důvodu je důležité dbát na kontrolu vzájemných přechodů a napojení:

- mezi oknem a stěnou,
- mezi stěnou a střechou,
- mezi dveřmi a stěnou,
- šachet a komínů na stěny a střechu,
- prahů, parapetů a nadokenních překladů.

3.5.5 Pasivní využívání sluneční energie

Okna mají u nízkoenergetických staveb velký význam, protože vytváří solární tepelné zisky, v závislosti na tepelných ztrátách prostupem a na orientaci. Okna o vysoké tepelné izolaci mají při jižní orientaci významně pozitivní bilanci. Při východní a západní orientaci jsou zisky a ztráty přibližně stejné, při severní orientaci jsou ztráty dvojnásobné oproti ziskům. Na jižní fasádě by měla být okna velká, na východní a západní malá a na severní, pokud možno žádná.

3.5.6 Větrání a vzduchotěsnost

Snížení tepelných ztrát větráním lze dosáhnout vysokou vzduchotěsností obálky budovy, mechanickou výměnou vzduchu se zpětným získáváním tepla a vhodnou intenzitou výměny vzduchu.

Pro vzduchotěsnost obálky budovy se doporučuje kombinovat parotěsné a vzduchotěsné zábrany. Z hlediska vzduchotěsnosti je důležité dbát na kvalitní provedení přechodů a napojení, jak při výrobě prefabrikátů, tak na stavbě.

Pro kvalitu vzduchu v místnostech budovy není rozhodující násobnost výměny vzduchu, ale intenzita výměny vzduchu na osobu za hodinu. Doporučené množství vyměněného vzduchu za hodinu na osobu je mezi 10 a 50 m³.

Tab. 3: Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$ [4]

Větrání v budově	Doporučená hodnota celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$ [h ⁻¹]	
	Úroveň I	Úroveň II
Přirozené nebo kombinované	4,5	3,0
Nucené	1,5	1,2
Nucené se zpětným získáváním tepla	1,0	0,8
Nucené se zpětným získáváním tepla v budovách se zvláště nízkou potřebou tepla na vytápění	0,6	0,4

Pozn.: úroveň I – doporučuje se splnit vždy; úroveň II – doporučuje se splnit přednostně

3.5.7 Vlhkost vzduchu a nasákavost

Vlhkost vzduchu a dešťová voda zapříčiňují zvýšené hodnoty vlhkosti v obvodových konstrukcích budov. V důsledku toho, že voda má největší hodnotu měrné tepelné kapacity, dochází při jejím vyšším obsahu ve stavebních konstrukcích také ke zvýšení jejich součinitelů tepelné vodivosti. To má pak za následek zvýšení hodnot součinitelů prostupu tepla. Důsledkem pak nastávají vyšší tepelné ztráty budov.

Z hlediska vlhkosti obsažené ve vzduchu není vhodné stavět budovy v údolích. Je také vhodné, aby povrchové vrstvy obvodových stěn budov byly z materiálů s minimální nasákavostí. Taktéž je vhodné, aby obvodové zdivo v místě kontaktu s terénem bylo opatřeno vhodnou povrchovou úpravou, která bude odolávat proti odstříkující vodě (např. hydrofobní nátěry, vhodný obklad apod.).

3.6 Prostupy tepla obálkou budovy

Únik tepla z budovy nastává její konstrukční obálkou. Obálkou se rozumí celá obvodová plocha domu. Jedná se o styk budovy se základovou zeminou a s venkovním prostředím. Případně i kontaktem s přilehlými objekty, které mohou být vytápěné i nevytápěné.

3.6.1 Prostup tepla stěnou

Pro jednotlivé konstrukce nízkoenergetických domů platí, že musí splňovat alespoň doporučené normové hodnoty součinitele prostupu tepla U dle ČSN 73 0540–2. Tepelná ochrana budov [1].

Prostupy tepla stěnami jsou významnou částí úniku tepla tepelnou obálkou objektu do vnějšího prostředí, tedy prostupem mezi vnitřním prostředím budovy a vnějším vzduchem.

Zmíněná norma v rámci kladených požadavků rozlišuje nároky na konstrukce obvodových stěn lehkých, obvykle dřevostavby, a konstrukce vnějších stěn těžkých, většinou zděné. Maximální hodnoty součinitele prostupu tepla jsou pro lehké konstrukce nízkoenergetických domů $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pro těžké konstrukce, kde obvykle hraje pozitivní roli vyšší hmotnost a tím i faktor akumulace tepla, je požadavek max. $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Ochlazovaná obálka stěn domu musí být vybavena dostatečnou vrstvou tepelné izolace s eliminací obvyklých tepelných mostů. Ve stěnách v závislosti na technologii a skladbě konstrukce je aplikováno u nízkoenergetických domů bez rozlišení druhu konstrukce cca 200-250 mm izolace.

Pasivní domy musí splňovat všechna kritéria platná rovněž pro nízkoenergetické budovy. Mají však ještě více posílenou tepelnou obálku. Hodnoty součinitelů prostupu tepla obvodových konstrukcí nesmí překračovat hodnotu $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Ve stěnách je v závislosti na technologii aplikováno cca 300-400 mm izolace.

3.6.2 Prostup tepla základy

Prostup tepla základy rozlišujeme u staveb podsklepených a nepodsklepených. Maximální součinitel prostupu tepla má být $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. U nepodsklepené stavby obvykle tepelně izolujeme boky základových pásů vnějšího obvodu domu odvodu domu od úrovně základové desky až po ložnou spáru základů v nezámrazné hloubce, která činí maximálně 1300 mm. V tomto případě postačuje pro nízkoenergetické domy izolace 100-200 mm extrudovaného (nenasákavého) polystyrenu. Pro pasivní domy je obvykle aplikováno 200-300 mm. Pokud je navržena namísto základových pásů základová deska, objekt se nezakládá v úrovni nezámrazné hloubky a je nutné použít tepelnou izolaci o tloušťce 200-500 mm. Základová deska se betonuje přímo na této izolaci. Jako izolační materiál může být použit extrudovaný nasákavý polystyren nebo granulované pěnosklo.

V případě moderních dřevostaveb je zajímavou alternativou k těžké a kontaktní silikátové spodní stavbě založení na bodových opěrách, vrtaných pilířích, nebo prefa patkách. Spodní líc vrchní stavby je při tomto způsobu založení od úrovně upravovaného terénu oddělen provětrávanou vzduchovou mezeru min. 500 mm. Podlahu nad terénem tvoří tepelně izolovaný nosný dřevěný rošt. Tímto konceptem je vyloučena rovněž potřeba speciální izolace proti vlhkosti. Nesmíme zapomenout na dokonalou tepelnou izolaci přípojek vedených přes vzduchovou mezeru a vzduchotěsné ošetření prostupu rovinou konstrukce podlahy nad terénem.

U podsklepené stavby přibývá komplikace s dokonalým provedením izolace, nejčastěji proti tlakové vodě. V současnosti v podobě těžkých asfaltových pásů, nebo hydroizolační plastové fólie. Stěny jsou obvykle zatepleny lepenými nebo kotvenými deskami extrudovaného (nenasákavého) polystyrénu se spoji na pero a drážku a důsledně vystřídány spárami. Tepelná izolace je zpravidla chráněna

drenážní nopovanou fólií a vrstvou netkané textilie. Teplené mosty mezi spodní stavbou a první vrstvou zdiva u těžkých stěn je obvykle možné přerušit vložení 100 mm tl. tvarovek z pěnoskla, což je velmi drahé, případně méně účinnější vrstvou plynosilikátových či jiných speciálních tvárnic. V místě soklu potom musí tepelná izolace základů nebo suterénu důsledně, bez přerušení, navazovat na tepelnou izolaci obvodových stěn vrchní stavby. Oddělení je pouze v podobě systémové dilatační spáry [1].

3.6.3 Prostup tepla střechou

Únik tepla střechou patří k nejvýznamnějším z celkové energetické ztráty objektu. Dle normy ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov je stanovena maximální hodnota součinitele prostupu tepla pro nízkoenergetické domy $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pro pasivní domy je maximální hodnota $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Ochlazovaná obálka stěn domu musí být vybavena dostatečnou vrstvou tepelné izolace s eliminací obvyklých tepelných mostů. Ve střešním plášti v závislosti na technologii a skladbě je aplikována izolace o tloušťce 300-350 mm pro nízkoenergetické domy. Pro pasivní domy je to 500-600 mm izolace [1].

Pro nízkoenergetické domy jsou výhodné tvary střech, které mají minimální ochlazovanou plochu, tedy střechy ploché či pultové, které jsou cenově a konstrukčně nejvýhodnější. Pokud je požadavek na jiný tvar střechy, je vhodným kompromisem jednoduchá sedlová střecha. Konstrukce střechy by měla být difuzně otevřená. Pro tuto konstrukci je vhodná více plášťová střecha s větranou vzduchovou mezerou. Tvar střechy a její vyložení může příznivě působit v letních měsících zastíněním oken na jižní a západní straně, jež sníží nežádoucí solární zisky. Naopak v zimních měsících její tvar umožní oslunění těch ploch, kterými se využije sluneční zisk.

3.6.4 Prostup tepla výplněmi otvorů

Okna a dveře v obálce budovy oddělují chráněné vnitřní prostředí od exteriéru. Působí na ně tedy mimo jiné vlhkost, teplotní rozdíly, sluneční záření a vítr. V obálce budovy zajišťují tyto otvory nejen dostatek denního osvětlení v objektu, ale také umožňují využívat solárních zisků v přechodném období a v zimě.

Z energetického hlediska je obvykle 40 % z celkových tepelných ztrát domu zapříčiněno výplněmi otvorů. Klíčovým parametrem pro posuzování kvality oken a dveří je velikost součinitele prostupu tepla U . Obecně lze říci, že čím je hodnota U menší, tím jsou okna kvalitnější. Požadovaná normová hodnota je dnes v případě nových oken $1,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, dobrá $1,4\text{--}1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a minimální dosažitelná hodnota aktuálně činí u špičkových výrobků $0,4\text{--}0,55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pro nízkoenergetické domy je požadován maximální součinitel prostupu tepla $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Okna pro pasivní domy mají mít výsledný součinitel prostupu tepla max. ve výši $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Požadavek na součinitel prostupu tepla pro dveře je obdobný jako u oken $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pro nízkoenergetické i pasivní domy.

Prostupy tepla můžeme obecně rozdělit na prostupy výplní, rámem a spárami v osazení výrobku. Mnoho výrobců uvádí součinitel prostupu tepla pouze sklem, ale ne rámy. U rámu bývá součinitel prostupu tepla vyšší, takže celkový součinitel prostupu tepla pro celé okno se zvýší. Výrobci se tomuto snaží zabránit buď zesilováním rámu, nebo vkládáním různých izolačních materiálů do rámu tak, aby byl přerušen tepelný most.

Při osazování oken a dveří je důležité dbát na správné ošetření spár ve styku v osazení okna nebo dveří do otvoru. Připojovací spára by měla být z exteriérové strany překryta tepelnou izolací a utěsněna, z interiérové strany pak parotěsně upravena. Cílem je zabránění tvorbě kondenzátu vodních par ve spáře.

Solární zisky od slunečního záření přicházejí do objektu přes okna a prosklené dveře. Proto se navrhuje na jižní a západní fasádě nejvíce prosklených ploch. Součet těchto ploch by měl být cca 40 % ze součtu ploch jižní a západní fasády. Naopak v letním období dochází díky těmto otvorům k přehřívání objektu. Je tedy nutné řešit stínění těchto oken. Stínění oken jižní a západní fasády je nutné především u pasivních dřevostaveb. Tyto budovy mají velmi nízkou akumulaci tepla a chladu a díky tomu se v letním období přehřívají. Přebytek slunečního záření v letním období lze odclonit navrženým cloněním oken. Nejběžnější je stínění přesahem střechy, venkovními okenicemi, pergolami, nebo použitím rolet a žaluzií. Žaluzie můžeme umístit do exteriéru nebo interiéru. Účinnost vnějších žaluzií a rolet je podstatně vyšší než u stínění ze strany interiéru.

3.6.4.1 Materiály pro výplně

Výrobky pro výplň otvorů můžeme rozdělit podle použitého materiálu na jejich výrobu.

- a) okna a dveře plastové,
- b) okna a dveře dřevěné,
- c) okna a dveře hliníkové,
- d) okna a dveře dřevohliníkové.

Ad a) Jsou to v dnešní době nejpoužívanější okna, jejich výhodou je snadná údržba, příznivá cena a dobrá životnost, přibližně 50 let. Nosná konstrukce je ocelová a plášť je tvořen tvrzeným PVC. Nevýhodou je vysoká spotřeba energie na výrobu, spotřeba energie na výrobu PVC oken je dvakrát vyšší než na výrobu oken ze dřeva. Mezi nevýhody patří také složitá recyklace.

Ad b) Dřevěná okna jsou výhodná ve spotřebě energie pro výrobu, jsou plně recyklovatelná, ale bohužel jsou náročnější na údržbu. Obnovu nátěrů je nezbytné provádět jednou za pět až sedm let. Obvykle se jedná o lepené profily ze smrku, borovice či modřínu, které jsou impregnovány biokonzervačními látkami, šetrnými k životnímu prostředí. Na povrchu jsou okna opatřena ochrannými transparentními lazurami. Exteriérová strana rámu musí být velmi pečlivě ošetřena, kvůli namáhání zejména slunečním UV zářením a dešťovými srážkami.

Ad c) Hliníková okna jsou pro nízkoenergetické, natož pasivní domy problematicky použitelné, vzhledem ke špatným tepelně technickým vlastnostem. Dalšími nevýhodami je vysoká cena, velmi náročná výroba a špatný vliv na životní prostředí. Jejich výhodami je snadná údržba a velmi dlouhá životnost. Po dožití je výhodná úplná recyklace výrobku.

Ad d) K zajištění lepších tepelně technických vlastností a ochraně vnější části před povětrností jsou vyráběna dřevohliníková okna, kdy dřevěné jádro směrem do interiéru zajišťuje prostorovou tuhost a přidané části karoserie vně jsou z hliníkových profilů vystříkaných polyuretanovou pěnou. Tento díl tvoří zároveň okapnice i zasklívací lištu [1].

4. Rozdělení konstrukcí z hlediska tepelné stability

4.1 Těžké konstrukce s vnějším zateplením

Z hlediska tepelné stability objektu dosahují dobrých výsledků těžké konstrukce. Například keramické tvárnice, vápenopískové bloky, nebo železobetonové stěnové konstrukce, u kterých je tepelná izolace z vnější strany (ETICS). Tyto konstrukce dobře využívají materiálových vlastností jednotlivých vrstev, z vnitřní strany jsou to akumulující materiály s velkou objemovou hmotností a měrnou tepelnou kapacitou a z vnější strany jsou to vysoce tepelně izolační materiály.

4.2 Těžké konstrukce s vnitřním zateplením

Tento konstrukční systém se používá při rekonstrukci starých historických budov. Při umístění tepelné izolace na vnitřní povrch stěny, těžké konstrukce ztrácí svou přirozenou tepelnou stabilitu. Tenká vrstva vnitřní omítky nezajistí dostatečnou tepelnou stabilitu, takže se konstrukce chovají jako lehké konstrukce.

4.3 Lehké konstrukce

Jedná se převážně o vícevrstvé konstrukce, které jsou složeny z relativně tenké masivní konstrukce do tloušťky přibližně 80 mm (například dřevěné panely, fošinkový skelet nebo železobetonová skořepina), která má výrazně sníženou tepelně akumulační schopnost. Jejich vlastnosti jsou zlepšeny tepelně izolačními materiály z vnější strany, které mají malý součinitel prostupu tepla λ a vysokou měrnou tepelnou kapacitu c (například izolace z dřevovláknitých desek). Typickým reprezentantem jsou moderní dřevostavby.

5. Konstrukční materiály nosných obvodových konstrukcí

Nosná obvodová konstrukce vytváří ochrannou vrstvu mezi exteriérem a interiérem. Konstrukční materiál musí spolehlivě vynášet svou vlastní váhu i hmotnost stavby, která plášť zatěžuje. Konstrukce obvodového pláště musí splňovat tepelně izolační a zvukově izolační požadavky. Velikost otvorů v plášti musí zajišťovat požadované osvětlení a větrání vnitřních prostorů a měl by chránit stavbu proti pronikání vlhkosti a deště.

Podle skladby rozdělujeme obvodové pláště na jednovrstvé (jsou provedeny z jednoho materiálu a nazýváme je kompaktními plášti) a vícevrstvé (jsou složeny z více materiálů a nazýváme je sendvičovými plášti).

5.1 Konstrukční systém z cihelného zdiva

Pro výstavbu nízkoenergetických domů z cihelného zdiva se pro jednovrstvé pláště používají tvarovky Porotherm 44 T Profi a HELUZ FAMILY 50 2in1. Pro vícevrstvé obvodové pláště se používají menší tvarovky o šířce 250 mm a 300 mm s masivním zateplením ze strany exteriéru.

Tvarovky Porotherm 44 T Profi o tloušťce 440 mm mají součinitel prostupu tepla $U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,077 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Pro vícevrstvé obvodové pláště lze použít Porotherm 30 T Profi o tloušťce 300 mm, součinitel prostupu tepla je u těchto tvarovek $U = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,064 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Svislé dutinky jsou vyplněny hydrofobizovanou minerální vatou, hydrofobizace zajišťuje nenasákavost vaty v cihlách [5].

Tvarovky HELUZ FAMILY 50 2in1 o tloušťce 500 mm, které splňují požadavky pro nízkoenergetické domy, ale také pro pasivní domy, mají součinitel prostupu tepla $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,058 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Pro vícevrstvé obvodové pláště lze použít HELUZ FAMILY 30 2in1 o tloušťce 300 mm, s hodnotou součinitele prostupu tepla $U = 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a součinitelem tepelné

vodivosti $\lambda = 0,077 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Dutinky u těchto tvarovek jsou vyplněny expandovaným polystyrenem. Paropropustnost u těchto tvarovek zamezuje kondenzaci vodních par. Díky nahrazení spojovací malty lepidlem na cementové bázi se snížila tloušťka ložné spáry a tím jsou výrazně sníženy tepelné ztráty vlivem ložných spár [6].

5.2 Konstrukční systém z pórobetonového zdiva – Ytong

Konstrukční systémy z pórobetonových tvárnic Ytong se používají pro obvodové jednovrstvé a vícevrstvé sendvičové zdivo. Systém Ytong má pro jednovrstvé zdivo v sortimentu několik tvarovek. Tepelně izolační tvárnice Ytong theta⁺ a Ytong lambda⁺ různých tloušťek. Ytong theta⁺ tl. 500 mm má hodnotu součinitele prostupu tepla $U = 0,16 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ a Ytong lambda⁺ tl. 450 mm má hodnotu součinitele prostupu tepla $U = 0,18 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Pro sendvičový konstrukční systém se používají tvarovky P2-400 PDK s kontaktním zateplovacím systémem ETICS se skladbou EPS-F či minerální izolací.

Od společnosti XELLA můžeme použít pro jednovrstvé zdění tvárnice Ytong energy⁺. Tato třívrstvá tvarovka se skládá z první vrstvy pórobetonu Ytong, z prostřední tepelně izolační vrstvy Ytong multipor a třetí vrstvy z pórobetonu Ytong. Tvarovka Ytong energy⁺ o tloušťce 500 mm má hodnotu součinitele prostupu tepla $U = 0,11 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ [7].

5.3 Konstrukční systémy z vápenopískového zdiva - VAPIS

Vápenopískové tvarovky se používají spíše pro sendvičové konstrukce, kde se využívají jejich dobré vlastnosti a umožňují zdění subtilních nosných obvodových stěn. Mají vysokou pevnost v tlaku, velmi dobré akustické vlastnosti a vysokou akumulaci tepla. Tvarovka VAPIS QUADRO E tloušťky 200 mm, má hodnotu součinitele prostupu tepla $U = 0,24 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ a její součinitel tepelné vodivosti je $\lambda = 0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Tvarovky se používají pro obvodové stěny např. s kontaktním zateplovacím systémem ETICS [8].

5.4 Konstrukční montované dřevěné systémy

Do montovaných systémů zahrnujeme těžké dřevěné konstrukce, lehké dřevěné konstrukce a dřevěné konstrukce stavěné systémem skeletu. Podle způsobu výstavby je potom dělíme na prefabrikované, obvykle panelové, užívané nejčastěji v případě typových domů, dále zhotovované z jednotlivých prvků přímo na staveništi, aplikované většinou při stavbách podle individuálního projektu. Preferujeme bezpečnější, difuzně otevřené konstrukce, to znamená, že odpor jednotlivých vrstev vůči průchodu vodních par směrem k exteriéru klesá [1].

Výhodou lehkých dřevěných konstrukcí je umístění tepelné izolace přímo do konstrukce. Jako nosné prvky se používají příhradové nosníky, nebo vazníky tvaru I. Dále se používají fošinkové konstrukce (two-by-four), které se dají prefabrikovat jako celé panely. Nevýhodou těchto konstrukcí je velmi malá akumulace tepla, proto se navrhují do interiéru masivní konstrukce (stěny, podlahy). Výplň mezi nosnými prvky je tepelně-zvuková izolace. K opláštění se používají dřevotřískové desky (OSB desky, sádrovláknité desky, cementotřískové desky) pro lepší tepelnou akumulaci.

Těžké dřevěné konstrukce rozdělujeme na roubené, srubové a konstrukce z CLT panelů. Masivní konstrukce umožňují i vícepodlažní stavby. Roubené stavby umožňují dosáhnout dobrých tepelně izolačních vlastností, při zachování pohledového dřeva z interiéru i exteriéru pomocí dvouplášťové konstrukce [9].

6. Izolační materiály

Z fyzikálního pohledu, můžeme izolační materiál popsat jako látku, která je špatným vodičem tepla. Dle normy je izolační materiál popsán, jako materiál výrazně omezující šíření tepla, vykazující charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti max. $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ při referenčních teplotách, vlhkostních podmínkách a daném stáří [10].

6.1 Použití podle skladby obálky budovy

Umístění tepelně izolačních materiálů v obvodovém plášti budovy souvisí s materiálovým a konstrukčním řešením budovy. U jednovrstvých zděných, nebo betonových konstrukcí je možné umístit tepelnou izolaci na vnitřní nebo vnější stranu konstrukce.

6.2 Rozdělení tepelně izolačních materiálů

Tepelně izolační materiály rozdělujeme podle druhu použitých materiálů, jejich složení, struktury výrobků a podle použité technologie k výrobě. Tepelně izolační materiály, které jsou v této době nejčastěji používány zatěžují negativně životní prostředí. Materiály můžeme rozdělit:

a) Tepelné izolace z neobnovitelných zdrojů:

- dřevocementové izolace,
- pěnový polystyrén,
- polyuretan, PUR, PIR,
- pěnový polyetylén, PEF,
- izolace na bázi fenolické pěny,
- pěnové sklo,
- termoreflexní izolační fólie,
- aerogely, pyrogenní kyselina křemičitá,
- nanogely, nanopore technologie,
- vakuová izolace.

b) Tepelné izolace na bázi obnovitelných zdrojů:

- dřevovláknité izolace,
- minerální vláknité izolace,
- izolace z přírodních materiálů,
- izolace ze zemědělsky pěstovaných rostlin (konopí, lnu, korku, rákosu nebo slámy),
- izolace z ovčí vlny.

Minerální skelná vlna

Skelnou vlnu lze vyrábět z nového skla, nebo také recyklací a rozvlákněním obalového skla. Roztavené sklo je rozfoukáváno na vlákna a formováno do desek nebo rohoží. Skelná vlna se používá pro izolaci mezi krokve krovů či sloupky lehkých skeletových staveb, do stropů a podhledů i provětrávaných fasád. Jako nehořlavý materiál je lze použít i jako požární izolaci [3].

Základní fyzikální vlastnosti:

- součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,030 - 0,042 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- faktor difuzního odporu $\mu = 1-3$,
- objemová hmotnost $\rho = 15-35 \text{ kg/m}^3$,
- třída reakce na oheň A1.

Izolace na bázi polystyrénu

Nejvíce užívanými reprezentanty jsou pěnové polystyrény značené jako EPS a extrudované polystyrény XPS. Oba se vyrábí z granulátu polystyrénu, liší se pouze Doplnkovými surovinami a odlišnou technologií výroby. Pěnový polystyrén má známou „kuličkovou strukturu“. Extrudovaný polystyrén má uzavřenou homogenní strukturu. V posledních letech se objevil na trhu „šedý polystyrén“ s objemovou hmotností 15 kg/m^3 , který má o 15–20 % lepší tepelně technické vlastnosti než běžný pěnový polystyrén [1].

Tab.4: Přehled fyzikálních vlastností EPS a XPS.

Fyzikální vlastnosti	EPS	XPS
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	0,031-0,040	0,029-0,038
Faktor difuzního odporu μ	20-100	80-200
Objemová hmotnost $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	15-40	30-150
Třída reakce na oheň	E	E

Polyuretanová pěna PUR

Polyuretanová pěna existuje dvojího druhu, jako tvrdá a měkká. Ve stavebnictví se využívá polyuretanová pěna tvrdá, zkratkou označována jako PUR pěna. Široké uplatnění má v detailech konstrukcí jako výplň a izolace spár. Lze ji využít i pro zateplení plošných konstrukcí, stropů, střech. Aplikuje se nástřikem nebo litím. Jelikož pěna na povrchu ulpívá přizpůsobí se i složitě tvarovaným povrchům [17].

Základní fyzikální vlastnosti:

- součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,024 - 0,028 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- faktor difuzního odporu $\mu = 180\text{--}200$ (dle objemové hmotnosti),
- objemová hmotnost $\rho = 30\text{--}100 \text{ kg/m}^3$,
- třída reakce na oheň C-E (dle konkrétního chemického složení).

Polyisokyanurátová pěna PIR

Materiál je tvořen kombinací uretanových a isokyanurátových vazeb. Jde o velmi podobný materiál jako polyuretan (PUR), PIR má obecně vyšší pevnost v tlaku (PUR 100 kPa, PIR 170 kPa) a menší tepelnou vodivost. Aplikovat se může jak litím, tak stříkáním na povrch či do dutin [17].

Základní fyzikální vlastnosti:

- součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,021 - 0,023 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- faktor difuzního odporu $\mu = 35$,
- objemová hmotnost $\rho = 30\text{--}100 \text{ kg/m}^3$,
- třída reakce na oheň C-E (dle konkrétního chemického složení).

Vakuová izolace

Vakuová izolace patří mezi takzvané high-tech izolační materiály. Používá se zejména kvůli své extrémně vysoké ceně velmi okrajově. Dodává se ve formě panelů obalených v metalizované fólii. Plnivo tvoří pyrogenní kyselina křemičitá, která zajišťuje prvku unikátní vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti vakuové izolace v neporušeném stavu se udává $\lambda = 0,004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, do výpočtu se počítá s vyšší hodnotou s přídavkem na stárnutí $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Při těchto hodnotách je možné použít k izolování stěny na úroveň pasivního domu pouze 6 centimetrů široký panel. Vakuové panely nacházejí uplatnění zejména při řešení komplikovaných konstrukčních detailů. V zahraničí jsou však i realizace, kde byla provedena kompletní izolace domu pomocí systému vakuových panelů – fasáda, střecha, podlaha [14].

Dřevovláknité izolace

Dřevovláknité izolace se zpravidla vyrábějí ve formě lisovaných desek se spoji pero – drážka po celém obvodu. Desky z dřevitých vláken se dají považovat za čistě ekologický materiál, při jejich výrobě nejsou používána žádná lepidla. Mezi velkou výhodou patří mimořádně vysoká tepelná kapacita, která brání proti přehřívání v letních měsících. Používají se zejména u dřevostaveb pro zateplení pláště a střech. Také se používají do podlah jako kročejová izolace.

Základní fyzikální vlastnosti:

- součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,039 - 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- faktor difuzního odporu $\mu = 2-10$,
- objemová hmotnost $\rho = 50-300 \text{ kg/m}^3$,
- měrná tepelná kapacita $c = 2100 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,
- sorpční hmotnostní vlhkost 15-20 %,
- třída reakce na oheň E.

7. Tepelně technické vlastnosti

Tepelně technické vlastnosti materiálů nebo konstrukcí jsou důležitým faktorem při návrhu vhodného materiálu nebo skladby konstrukce. Díky těmto vlastnostem dokážeme navrhnout systém pro dané technické požadavky. Tepelně technické vlastnosti jsou zpracovány z norem [4,10,11].

7.1 Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů

7.1.1 Součinitel tepelné vodivosti λ [$W/(m \cdot K)$]

Součinitel tepelné vodivosti λ je hlavním parametrem stavebních materiálů z hlediska tepelné techniky. Udává schopnost stejnorodého materiálu vést teplo. Izolační schopnosti obvodových konstrukcí tedy přímo závisí na této hodnotě. Čím je λ nižší, tím lépe materiál tepelně izoluje.

Číselně je roven teplu, které projde materiálem za jednotku času, jednotkou plochy při jednotkovém teplotním gradientu.

Je definován vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-grad \theta},$$

q je vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým izotropním materiálem [W/m^2],

$grad \theta$ je gradient teploty [K/m].

Látky dělíme dle součinitele tepelné vodivosti na dobré izolanty a vodiče. Nejlepší izolanty jsou plyny, naopak nejlepšími vodiči jsou kovy. Proto jsou dobými izolačními materiály látky, které obsahují velké množství uzavřených dutinek vyplněných vzduchem nebo jinými plyny. Hodnota součinitele tepelné vodivosti závisí na vlhkosti a teplotě materiálu.

7.1.2 Měrná tepelná kapacita c [J/(kg·K)]

Měrná tepelná kapacita c je množství tepelné energie, kterou je třeba dodat při stálém tlaku, vzorku materiálu o definované vlhkosti a hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K.

Je definována vztahem:

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta\theta}$$

kde: E tepelná energie (množství přivedeného tepla) [J],
 m hmotnost materiálu [kg],
 $\Delta\theta$ přírůstek teploty [K].

Tab. 5: Přehled vlastností materiálů užitých v praktické části této práce

Stavební materiál	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg·K)]
Keramická tvarovka	0,077	670	860
EPS izolace	0,038	35	1250
Vnitřní omítka	0,8	1600	840
ŽLB deska	1,43	2300	1020
Minerální vlna	0,04	40	1150
Dřevovláknitá deska	0,13	600	1630
PUR pěna	0,024	930	1470

Pozn. Hodnoty převzaté z normy [11] nebo z technických listů výrobců materiálů.

7.1.3 Součinitel teplotní vodivosti a [m²/s]

Součinitel teplotní vodivosti a je schopnost stejnorodého materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla.

Je dán vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

λ je součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)],

c je měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)],

ρ je objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [kg/m³].

Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje rychlost změny teploty v určitém místě způsobené změnou povrchové teploty. Čím je tedy hodnota menší, tím menší je rychlost změny teploty a materiál vykazuje větší stabilitu.

7.1.4 Množství tepla Q [J]

Tepelnou energii lze uchovávat v kapalných, plynných i pevných látkách. Množství tepla Q přijatého látkou je přímo úměrné jeho hmotnosti m , měrné tepelné kapacitě c a rozdílu počáteční a koncové teploty $\Delta\theta$.

Lze jej definovat vztahem:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$

m je hmotnost [kg],

c je měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)],

$\Delta\theta$ je rozdíl počáteční a koncové teploty [K].

7.2 Tepelně technické vlastnosti stavebních konstrukcí

7.2.1 Tepelný odpor konstrukce R [(m²·K)/W]

Tepelný odpor konstrukce vyjadřuje míru, jak je konstrukce schopna izolovat interiér vzhledem k venkovním teplotám. Tepelný odpor R závisí na tloušťkách jednotlivých materiálových vrstev dané konstrukce a jejich součiniteli tepelné vodivosti λ .

Je vyjádřen vztahem:

$$R = \sum \frac{d_j}{\lambda_j},$$

d_j je tloušťka vrstvy j -té konstrukce [m],

λ_j je součinitel tepelné vodivosti j -té konstrukce [W/(m·K)].

7.2.2 Součinitel prostupu tepla U [W/(m²·K)]

Součinitel prostupu tepla U je hlavní veličinou pro hodnocení tepelně technických parametrů obvodové obálky stavby. Hodnotí prostup tepla stavebních konstrukcí se započtením k ní přilehlých vzduchových vrstev. Zjednodušeně řešeno U udává, kolik tepla projde jedním čtverečním metrem konstrukce při rozdílu teplot 1 K na vnitřní a vnější straně konstrukce.

Je dán vztahem:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$

R_{si} je odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [(m²·K)/W],

R_{se} je odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [(m²·K)/W],

R_T je odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí) [(m²·K)/W].

Tab. 6: Přehled požadovaných a doporučených hodnot součinitele prostupu tepla U_N pro budovy s převažující návrhovou teplotou $\theta_{im} = 18$ až 22 °C podle normy z roku 2011 [4]

Popis konstrukce	Typ konstrukce	Požadované hodnoty U_N [W/(m ² ·K)]	Doporučené hodnoty U_N [W/(m ² ·K)]
stěna vnější	lehká	0,30	0,20
	těžká		0,25
Střecha strmá se sklonem nad 45°		0,30	0,20
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45°		0,24	0,16
Strop s podlahou nad venkovním prostorem		0,24	0,16
Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)		0,30	0,20
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině		0,45	0,30
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru		0,60	0,40
Stěna mezi sousedními budovami		1,05	0,70
Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C		2,20	1,45
Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří		1,50	1,20
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° z vytápěného prostoru do venkovního prostředí		1,40	1,10
Dveřní výplň otvoru vytápěného prostoru do venkovního prostředí (včetně rámu)		1,70	1,20

Pozn. Hodnoty požadované jsou závazné. Doporučené hodnoty jsou vhodné pro energeticky úsporné stavby. Nízkoenergetické stavby by měli dosahovat 2/3 hodnot doporučených.

7.2.3 Tepelný most

Část dané stavební konstrukce, kde se její tepelný odpor místně významně mění:

- a) úplným nebo částečným průnikem stavební konstrukce nebo vrstvy materiálu s odlišnou tepelnou (konstrukce je tepelně nestejnorodá), nebo stavební konstrukce obsahuje alespoň jednu nestejnorodou vrstvu;
- b) změnou tloušťek vrstev stavební konstrukce;
- c) rozdílem mezi vnitřními a vnějšími plochami stavební konstrukce, např. vyztuženými žebry.

Vliv tepelného mostu se zohledňuje při výpočtu tepelného odporu konstrukce R a součinitele prostupu tepla U . Tepelný most ovlivňuje tepelné vlastnosti stavební konstrukce stanovené výpočtem nebo měřením.

7.2.4 Teplotní útlum konstrukce v [-]

Teplotní útlum konstrukce je vlastností těsně související s její tepelně akumulací schopností. Významně se projevuje v letním období, kdy stavební konstrukce tlumí účinek teplotní amplitudy z vnějšího prostředí, který proniká do interiéru. V zimním období vliv teplotního útlumu konstrukce ustupuje do pozadí, neboť se uplatní zejména tepelný odpor obvodové konstrukce (na větší teplotní výkyvy reaguje vytápěcí systém, který redukuje lokální teplotní výkyvy).

Teplotní útlum je podíl venkovní amplitudy venkovního vzduchu a teplotní amplitudy na vnitřním povrchu konstrukce. Teplotní útlum se nejvíce projevuje:

- v zimním období během topné sezóny dochází k ohřevu obvodových konstrukcí. Čím je tepelně akumulací schopnost stavební konstrukce vyšší, tím pomaleji nastává ochlazování konstrukce a vnitřního vzduchu vlivem nízkých venkovních teplot,
- v letním období zejména u lehčích stavebních konstrukcí (střešní nadstavby apod.) dochází vlivem nedostatečného tepelné akumulace k výraznému zvýšení teplot v místnostech přiléhajících k obvodové konstrukci.

7.2.5 Fázový posun $\Delta\tau_f$ [hod]

Fázový posun je doba, za kterou dojde k průchodu teplotní vlny obvodovou konstrukcí neboli s jakým zpožděním se projeví maximální teplota venkovního vzduchu na vnitřním povrchu konstrukce.

Tato veličina může být důležitá z pohledu jejího využití jako pasivní techniky pro udržení vhodného vnitřního mikroklima v budově. Kladná amplituda denních teplot vlivem zpoždění při průchodu konstrukcí by mohla při vhodném materiálovém a konstrukčním nastavení ohřívat vnitřní vzduch během nočních hodin, a naopak ochlazovat jej během poledních teplot.

7.2.6 Faktor difuzního odporu μ [-]

Za základní veličinu, charakterizující schopnost stavebních materiálů propouštět vodní páru, lze považovat faktor difuzního odporu μ . Jeho hodnota udává, kolikrát je konkrétní stavební materiál méně prostupný pro vodní páry než vzduchem.

$$\mu = \frac{\delta_A}{\delta}$$

δ_A je součinitel difuzní vodivosti vzduchu [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$] = [s],

δ je součinitel difuzní vodivosti materiálu [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$] = [s].

Pro prostup vodní páry stěnou jsou důležité vlastnosti všech vrstev stěny, včetně omítek a povrchových úprav.

Všechny vrstvy stěny by měly mít přibližně stejný difuzní odpor μ , případně by difuzní odpor vrstev stěny měl klesat směrem z interiéru do exteriéru tak, aby ve stěně nedocházelo k nadměrné kondenzaci vodní páry.

7.2.7 Vnitřní povrchová teplota $\theta_{si,cr}$

Nejnižší vnitřní povrchová teplota obvodových konstrukcí θ_{si} musí být u všech částí stavby vyšší než kritická vnitřní povrchová teplota $\theta_{si,cr}$. Splnění tohoto požadavku brání tomu, aby na vnitřním povrchu docházelo k podmínkám, při kterých může docházet ke kondenzaci vodních par nebo růstu plísní. Jedná se tedy o velmi důležitou podmínkou, jejíž splnění má zásadní vliv na životnost obvodových konstrukcí a jejich povrchových úprav i na hygienické parametry interiéru.

Kritickými místy z hlediska vnitřní povrchové teploty jsou především tepelné mosty a tepelné vazby mezi obvodovými konstrukcemi. Proto je nutné provést výpočet nejnižší povrchové teploty u všech předvídatelných tepelných mostů a vazeb.

Kritická vnitřní povrchová teplota $\theta_{si,cr}$ závisí na teplotě vnitřního vzduchu θ_{ai} a jeho relativní vlhkosti ϕ_i . Je to taková teplota, při které za daných parametrů nabývá vzduch v těsné blízkosti povrchu kritické hodnoty relativní vlhkosti $\phi_{si,cr} = 100 \%$ u výplní stavebních otvorů, a 80 % u ostatních konstrukcí včetně stěn.

8. Projev ročního období na tepelnou stabilitu

8.1 Tepelná stabilita místnosti

Při změnách vnějších teplot a požadavku stabilních vnitřních teplot, se posuzuje teplotní zatížení budovy v zimním a letním období. V současné době je klíčové především letní období, kvůli zvětšování prosklení fasád a díky změnám klimatu dochází k přehřívání vnitřních prostorů budov.

8.1.1 Tepelná stabilita místnosti v letním období

Tepelná stabilita popisuje teplotní vlastnosti prostoru, který je tvořen stavebními konstrukcemi ve vztahu k vnějším podmínkám. Místnost můžeme považovat za tepelně stabilní, pokud tepelný stav místnosti zůstane v daném časovém intervalu v předepsaných mezích. Návrh dobré tepelné stability obytné stavby by měl zajistit, aby se daná stavba nebo její jednotlivé místnosti v letním období nepřehřívaly.

Tepelná stabilita se hodnotí v letním období pro kritickou místnost, ve které se hodnotí:

- nejvyšší denní vzestup teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max}$,
- nejvyšší denní teplotu vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max}$.

Hodnotícím kritériem u těchto místností jsou normové hodnoty nejvyššího denního vzestupu teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max,N}$, popř. nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$ a jsou uvedeny pro nevýrobní obytné budovy.

$$\Delta\theta_{ai,max} \leq \Delta\theta_{ai,max,N}$$

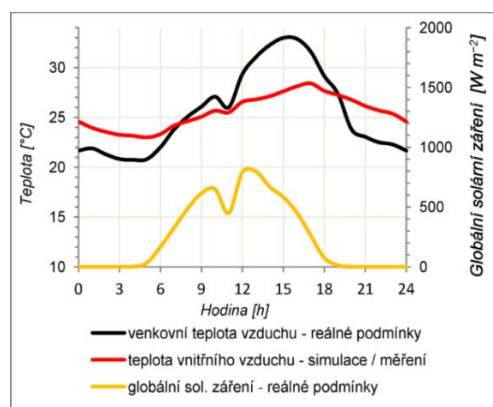
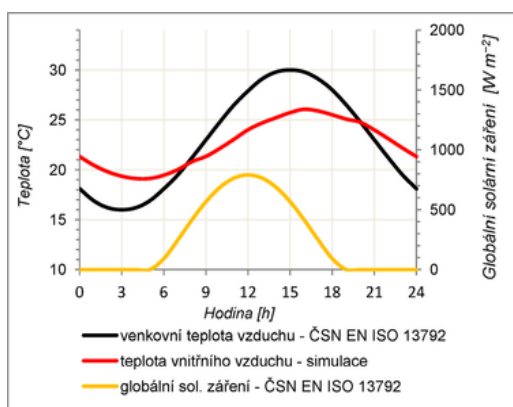
Tab. 7: Požadované hodnoty nejvyššího denního vzestupu teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max,N}$ a nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$ [4]

Druh budovy		Nejvyšší denní vzestup teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max,N}$ [°C]	Nejvyšší denní teplota vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$ [°C]
Nevýrobní		5,0	27
Ostatní s vnitřním zdrojem tepla	$\leq 25 \text{ W/m}^3$	7,5	29,5
	$> 25 \text{ W/m}^3$	9,5	31,5

V závislosti na technologických požadavcích, charakteru provozu budovy a tělesné aktivitě osob, mohou být uplatněny i přísnější požadavky. Tímto hodnocením se prokazuje schopnost budovy odolávat přehřívání v letním období bez působení klimatizace a vnitřních tepelných zisků. Pokud jsou budovy vybavené klimatizací musí splňovat podmínku:

$$\theta_{ai,max} \leq 32 \text{ °C}$$

Výpočet tepelné stability letního období probíhá za podmínek neustáleného teplotního stavu. Posuzovaná místnost je vystavena periodicky se opakujícím tepelnému zatížení v podobě slunečního záření a vnějších teplot. Tento stav je zobrazen na (obr. 1). Průběh teploty slunečního záření není ve skutečnosti tak ideální jako v normových okrajových podmínkách (obr. 2).



Obr.1: Výpočtový průběh teplot v letním období pro posouzení letní tepelné stability podle ČSN EN ISO 13792 [15]

Obr.2: Reálný průběh teplot v letním období pro posouzení tepelné stability [15]

Faktory ovlivňující letní tepelnou stabilitu:

- tepelné zisky přes průsvitné části obálky budovy,
- tepelné zisky přes neprůsvitné části obálky budovy,
- větrání budovy,
- míra tepelné akumulační schopnosti objektu,
- vnitřní tepelné zisky od osob a spotřebičů.

8.1.2 Tepelná stabilita místnosti v zimním období

Tepelná stabilita místnosti v zimním období spočívá ve sledování poklesu teplot vnitřních povrchů konstrukcí, vnitřního vzduchu a výsledné teploty místnosti v závislosti na čase. K poklesu teplot dochází v době, kdy je přerušeno vytápění, ať už jde o nechtěný výpadek dodávky energie nebo o pravidelnou otopnou přestávku. Jedná se tedy o neustálený teplotní stav, který předpokládá konstantní teplotu vnějšího vzduchu a měnící se teplotu vnitřního prostředí.

Posuzováním kritériem podle normy [4] je pokles výsledné teploty v kritické místnosti v čase a stanoví se ze vztahu

$$\Delta\theta_{r(t)} \leq \theta_{r,N(t)}$$

kde $\theta_{r,N(t)}$ je normový požadavek hodnoty poklesu výsledné teploty místnosti z tab. 8.

Za kritickou místnost v objektu považujeme tu, která je charakterizována nejvyšší hodnotou průměrného součinitele prostupu tepla. Zpravidla se jedná o nárožní místnost pod střešou s nejvyšším podílem ochlazovaných ploch, nebo případně o místnost s nejvyšším podílem ploch prosklených.

Tab.8: Příпустné hodnoty poklesu výsledné teploty v místnosti v zimním období $\Delta\theta_{r,N(T)}$ [4].

Druh místnosti (prostoru)	Pokles výsledné teploty v místnosti v zimním období $\Delta\theta_{r,N(T)}$ [°C]
S pobytem lidí po přerušení vytápění	
- při vytápění radiátory, sálavými panely a teplovzdušně	3
- při vytápění kamny a podlahové vytápění	4
Bez pobytu lidí po přerušení vytápění	
- při přerušení vytápění otopnou přestávkou	
- budova masivní	6
- budova lehká	8
- při předepsané nejnižší výsledné teplotě	$\theta_i - \theta_{v,min}$
- při skladování potravin	$\theta_i - 8$
- při nebezpečí zamrznutí vody	$\theta_i - 1$
Nádrže s vodou (teplota vody)	$\theta_i - 1$

9. Přehled energetických hodnocení budov

9.1 Prohlášení o shodě

Prohlášení o shodě je zpracováváno výrobcem a verifikováno autorizovanou osobou. Certifikáty a osvědčení jsou zpracovávány autorizovanou osobou a shrnují předepsanou formou výsledky úředního ověřování.

9.2 Protokoly o tepelně technickém hodnocení

Pro prokázání splnění požadovaných hodnot a porovnávání tepelně technických vlastností budovy a konstrukcí slouží protokoly o tepelně technickém hodnocení, které jsou uvedeny v ČSN EN 73 0540-2:2011 v příloze B. Výsledky z tohoto protokolu by se pak měly citovat v průkazech energetické náročnosti budovy.

Protokoly musí obsahovat:

- nejnižší vnitřní povrchovou teplotu θ_{si} hodnocenou pomocí f_{Rsi} ,
- součinitel prostupu tepla obálkou budovy U pro všechny ochlazované konstrukce,
- součinitel prostupu tepla obálkou budovy U_{em} a porovnání s normovým $U_{em,N}$,
- lineární a bodové činitele prostupu tepla ψ_e a χ_e a jejich porovnání s normovými hodnotami $\psi_{e,N}$ a $\chi_{e,N}$,
- pokles dotykové teploty podlahy $\Delta\theta_{10}$ pro všechny podlahy na ochlazovaných konstrukcích a porovnání s normovými hodnotami $\Delta\theta_{10,N}$,
- zkondenzované množství vodní páry uvnitř konstrukce M_c pro všechny ochlazované konstrukce v zimním období a porovnání schopnosti vypařování vůči kondenzaci v ročním průběhu podle normy $M_{ev} - M_c$,
- celková průvzdušnost obálky budovy n_{50} při tlakovém rozdílu 50 Pa porovnaná s požadovanými hodnotami $n_{50,N}$,
- intenzita výměny vzduchu v místnosti n pro rozhodující užívané a neužívané místnosti v porovnání s požadovanými n_N podle normy,
- tepelná stabilita místností v zimním období se doloží výpisem hodnot poklesu výsledné teploty $\Delta\theta_{v(t)}$ pro kritické místnosti. Splnění požadavku se prokazuje porovnáním s normovými hodnotami $\Delta\theta_{v(t),N}$,
- tepelná stabilita místností v letním období se doloží výpisem hodnot nejvyšší denní teploty pro letní období $\theta_{ai,max}$ pro kritické místnosti. Splnění požadavku se prokazuje porovnáním s normovými hodnotami $\theta_{ai,max,N}$ [4].

9.3 Průkazy energetické náročnosti budov

Průkaz energetické náročnosti budov (PENB) slouží k vyhodnocení energetické náročnosti budovy. Kvalifikuje veškeré energie spotřebované při standardizovaném provozu hodnocené budovy a zařazuje budovu do příslušné třídy v rozsahu A-G. Součástí je i grafické znázornění průkazu, viz následující obrázek [12].

PRŮKAZ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI BUDOVY					
Dle vyhlášky 148/2007. Sb.				Hodnocení budovy	
Typ budovy:		Rodinný dům		STÁVAJÍCÍ STAV	PO REALIZACI DOPORUČENÍ
Adresa:		Litoměřice			
Celková plocha:		150,0 m ²			
Měrná vypočtená roční spotřeba energie v kWh/m ² .rok				42	0
Celková vypočtená roční dodaná energie v GJ				11,7	0,0
Podíl dodané energie připadající na jednotlivé část v %					
Vytápění	Chlazení	Větrání	Teplá voda	Osvětlení	Celkem
55,3	0,0	19,1	20,8	4,8	100,0
Průkaz vypracoval		Jméno a příjmení:		Ing. Zpracovatel	
		Osvědčení č. :		00001	
		Datum vypracování:		1.1.2008	

Obr.3: Průkaz energetické náročnosti [16]

9.4 Energetický audit

Pojmem energetický audit (EA) se rozumí odborné zhodnocení toků energie a nakládání s energiemi v celém subjektu (soubor budov, budova, technologie). Cílem tohoto odborného posouzení je zhodnotit současný stav užití energií v subjektu a identifikovat z technického, ekonomického a ekologického hlediska optimální způsob dosažení úspor energií. Povinnost jejich zpracování je zavedeno vyhláškou 406/2000 Sb. O hospodaření energií [13].

10. Experimentální část

10.1 Popis vybraného objektu

Pro porovnání vlivu materiálů na tepelnou stabilitu byl vybrán nepodsklepený dvoupodlažní rodinný dům s orientací na východ-západ. Půdorysná plocha jednoho podlaží je 96,8 m². Celková plocha domu je 193,6 m². Výpočet byl navrhován pro klimatické podmínky České republiky v rámci klimatického referenčního roku. Pro porovnání tepelné stability domu byly použity výpočtové hodnoty provedeny prostřednictvím programu *Stabilita*. Výpočet byl proveden ve třech konstrukčně-materiálových variantách.

10.1.1 Rodinný dům zděný z keramických tvarovek

- Svislé nosné obvodové stěny z keramických tvarovek Porothersm 44 T profi o tloušťce 440 mm, tepelnou izolací EPS o tloušťce 50 mm a s vnější tepelně izolační omítkou o tloušťce 15 mm.
- Vnitřní nosné příčky jsou provedeny také z keramických tvarovek Porothersm o tloušťce 300 mm a nenosné příčky z keramických tvarovek tloušťky 115 mm.
- Podlaha na terénu je tvořena vrstvou 100 mm podkladového betonu, jako izolace byl použit podlahovým polystyrenem o tloušťce 200 mm a 50 mm minerální vláknité izolace.
- Vodorovná stropní konstrukce nad 1.NP je tvořena keramickou stropní konstrukcí Porothersm.
- Vodorovnou stropní konstrukci nad 2.NP tvoří lehký trámový strop s vrstvou minerální vláknité izolace o tloušťce 250 mm.
- Střešní část je opatřena minerální vláknitou izolací o tloušťce 300 mm.
- Okna jsou použita plastová sedmi komorová, zasklená izolačním trojsklem s hodnotou $U_w = 0,69 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.
- Do střešního pláště je osazeno 5 střešních oken, která jsou zasklená izolačním trojsklem s hodnotou $U_w = 0,8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

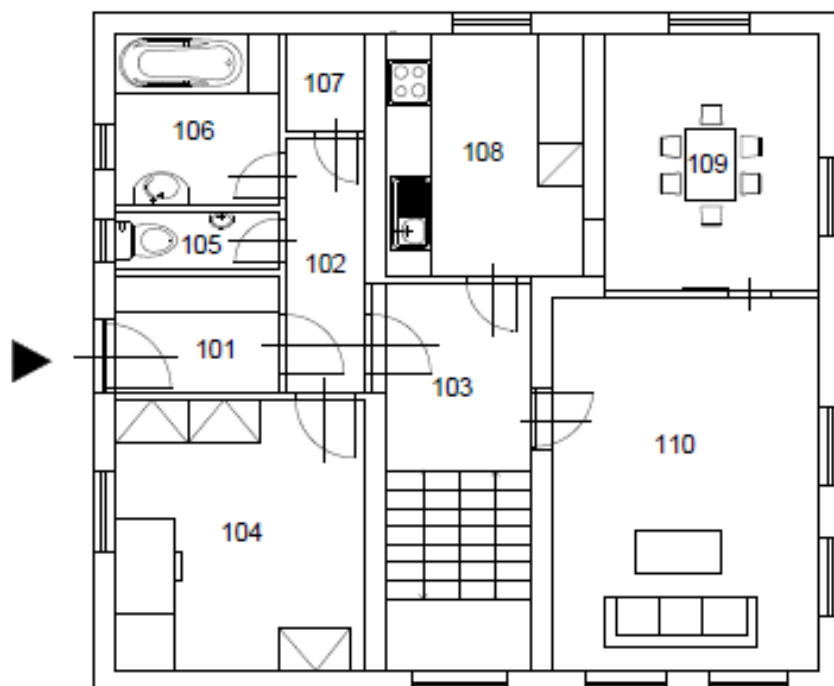
10.1.2 Rodinný dům s lehkou dřevěnou konstrukcí

- Svislé nosné obvodové stěny jsou tvořeny z KVH nosníků vyplněné PUR pěnou o tloušťce 250 mm, doplněné 30 mm instalační předstěnou s minerální vlnou.
- Vnitřní příčky jsou provedeny jako lehké sádkartonové.
- Vodorovná stropní konstrukce nad 1.NP je tvořena stropními nosíky KVH s 60 mm minerální vláknité izolace.
- Vodorovná stropní konstrukce nad 2.NP je tvořena stejně jako strop v 1.NP, pouze s větší vrstvou izolace.
- Ostatní konstrukce a výplně otvorů se shodují s předchozí variantou.

10.1.3 Rodinný dům postavený jako železobetonová konstrukce

- Svislé nosné obvodové stěny jsou tvořeny z litého železobetonu o tloušťce 250 mm a vrstvy pěnového polystyrenu o tloušťce 150 mm.
- Vnitřní nosné stěny jsou tvořeny železobetonem o tloušťce 100 mm a nenosné stěny betonem bez výztuže o stejné tloušťce.
- Vodorovná stropní konstrukce nad 1.NP je tvořena železobetonovými předpjatými panely typu *spiroll*.
- Vodorovnou stropní konstrukci nad 2.NP tvoří lehký trámový strop s vrstvou minerální vláknité izolace o tloušťce 250 mm.
- Ostatní konstrukce a výplně otvorů se shodují s první variantou.

PŮDORYS 1.NP

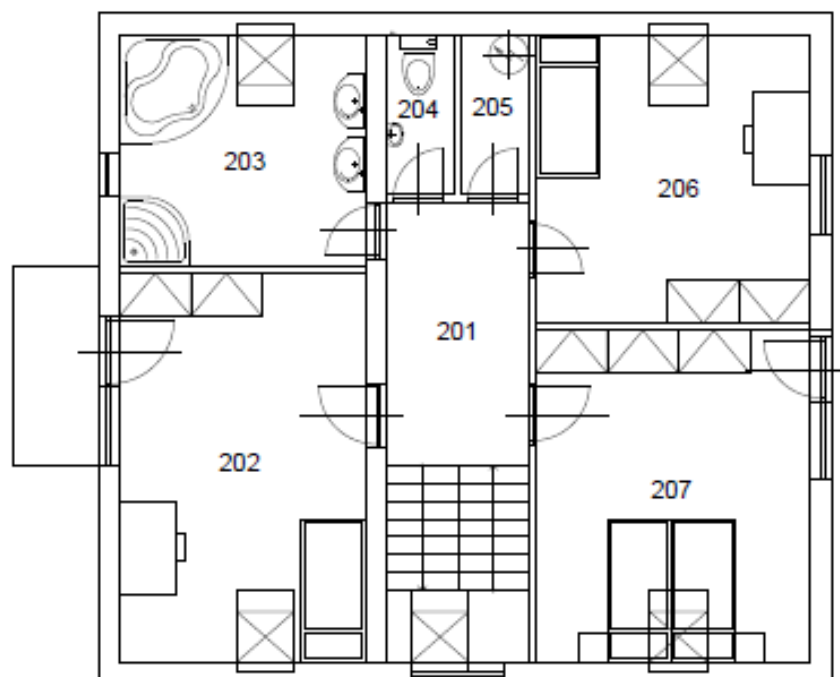


LEGENDA MÍSTNOSTÍ

- 101 zádveří
- 102 chodba
- 103 hala
- 104 pracovna
- 105 wc
- 106 koupelna
- 107 sklad
- 108 kuchyň
- 109 jídelna
- 110 obývací pokoj

Obr.4: Schéma půdorysu 1.NP

PŮDORYS 2.NP



LEGENDA MÍSTNOSTÍ

- 201 hala
- 202 dětský pokoj
- 203 koupelna
- 204 wc
- 205 kotelna
- 206 dětský pokoj
- 207 ložnice

Obr.5: Schéma půdorysu 2.NP

10.2 Použitá výpočtová metodika

Pro výpočtové hodnocení bylo užito obecného numerického nestacionárního principu uspořádání tepelného systému objektu. V tomto systému lze volně nastavit požadované klimatické údaje, které odpovídají reálným okrajovým podmínkám. Výsledné hodnoty by měly být téměř stejné jako reálná spotřeba energie objektu.

10.2.1 Popis použitého programu

Pro simulaci nestacionárního modelování tepelného šíření v budově byl použit výpočetní program *Stabilita*. Jeho základy položil před lety S. Šťastník. Program je napsán v jazyce *pascal* pro vývojové prostředí *Delphi*, jeho verifikace již byl provedena v dřívějších letech.

Hlavním vstupem je datový soubor obsahující formulaci modelu budovy, který je určen jednotlivými místnostmi, tepelnými vazbami mezi nimi, materiálovými skladbami stěn, stropů, podlah a střech a jejich materiálovými charakteristikami. Tento soubor je zadáván v textovém formátu. Jako další vstupy byly doplněny soubory s konkrétními meteorologickými daty, zejména průběh venkovní teploty, intenzity slunečního záření, případně relativní vlhkosti venkovního vzduchu.

Výstupními daty jsou především průběhy teplot v jednotlivých místnostech, okamžitá spotřeba tepla na vytápění a celková spotřeba tepla za sledované období.

10.2.2 Princip nestacionárního výpočtu programem

Při simulaci nestacionárního vedení tepla budovou je nutné nejprve sestavit model zkoumaného objektu. Ten se skládá z libovolného počtu zón, které jsou ohraničeny libovolným počtem povrchů. Dále má model obvykle, alespoň jednu tepelnou vazbu do okolí, obvykle s venkovním prostředím.

Vzduch v každé místnosti je zastoupen jako uzel, pro který se v daném čase počítá jeho teplota. Jednotlivé uzly jsou propojeny tepelnými vazbami, které zastupují příslušné stavební konstrukce, v tomto případě svislé stěny, podlahy místností a střecha. Tyto konstrukce jsou tvořeny jednotlivými skladebnými vrstvami definovaných materiálů.

Přenos tepla v rámci jedné konstrukce je popsán jako úloha nestacionárního šíření tepla, je započtena tepelná kapacita každé jednotlivé skladebné vrstvy stěny. Pro zvýšení přesnosti jsou materiálové vrstvy dále rozděleny na jednotlivé parciální vrstvy.

Použitý program *stabilita* zohledňuje následující vlivy na tepelný stav objektu:

- tepelné toky z přiléhajících konstrukcí,
- tepelné toky výplněmi otvorů,
- energie slunečního záření okny,
- tepelné toky způsobené výměnou vzduchu,
- tepelné zisky vytápěním.

V případě výpočtu spotřeby tepla je pro každou zónu stanovena návrhová teplota vzduchu a neznámou proměnnou je tepelný zisk z vytápění. Vytápění je uvažováno jako řízeně přerušované a v každém časovém kroku je dodávána právě taková energie, která je potřebná pro udržení návrhové teploty. Celková spotřeba tepla je pak součtem energií ze všech časových intervalů.

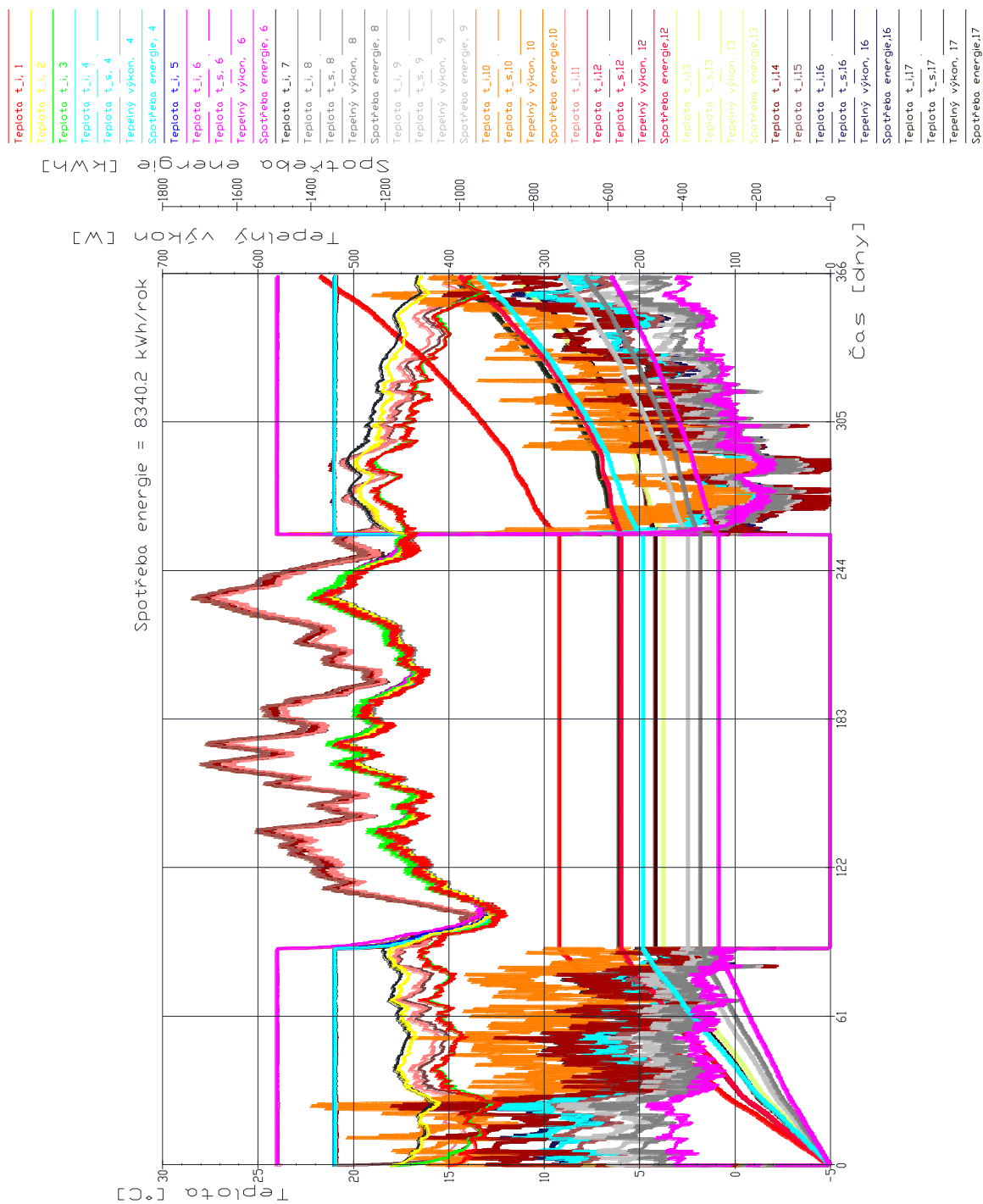
10.3 Sledované údaje

Hlavním sledovaným údajem u všech tří variant simulace byla spotřeba tepla na vytápění v zimním období. Tato spotřeba byla zjišťována výše popsaným postupem. Sledovaný časový úsek vychází z délky otopného období, to bylo stanoveno na 194 dní. Konkrétně od začátku roku do 1. dubna a od 17. září do konce referenčního roku. Byl zaznamenáván jak konkrétní průběh spotřeby vytápěcího tepla v jednotlivých místnostech, tak kumulativní spotřeba tepla za sledované období.

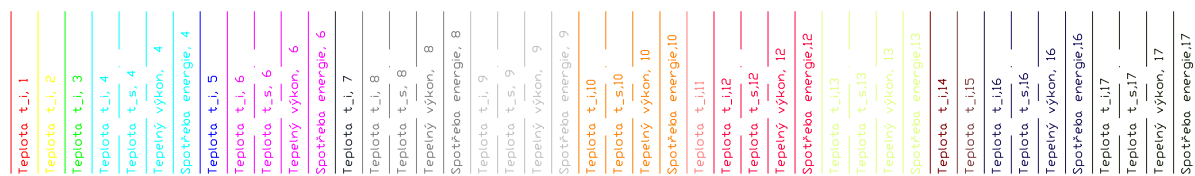
V letním období bylo hodnoceno přehřívání teploty vnitřního vzduchu v místnostech budovy.

10.4 Grafické výstupy ze simulace programem Stabilita

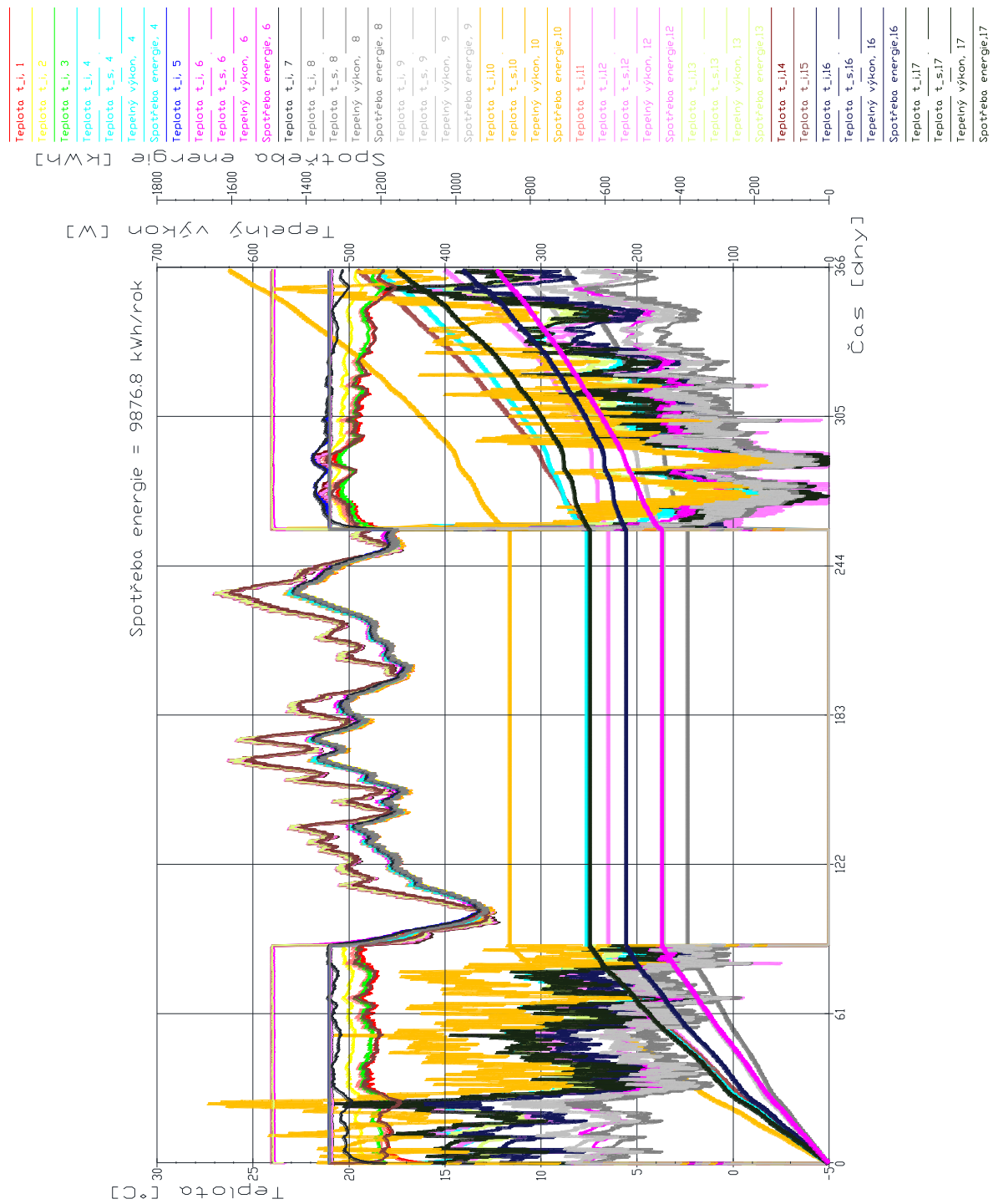
Dále jsou uvedeny grafické výstupy simulovaného tepelného chování pro všechny konstrukčně-materiálové varianty.



Obr. 6: Průběh vnitřních a povrchových teplot, spotřeby energie a průběh součtové spotřeby energie modelového domu na bázi keramických tvarovek



Obr. 7: Průběh vnitřních a povrchových teplot, spotřeby energie a průběh součtové spotřeby energie modelového domu na bázi dřevostavby



Obr.8: Průběh vnitřních a povrchových teplot, spotřeby energie a průběh součtové spotřeby energie modelového domu na bázi železobetonového monolitu

10.5 Přehled poznatků z provedených simulací

Pro výpočet byly nastaveny okrajové podmínky podle tabulky č.9.

Tab.9: Přehled požadavků uživatelů domu pro jednotlivé místnosti

číslo místnosti	Účel místnosti	Objem místnosti [m ³]	Navrhovaná teplota [°C]	Topení
1	Předsíň	9	15	ne
2	Chodba	10	18	ne
3	Schodiště	26,8	18	ne
4	Pracovna	32,3	21	ano
5	WC	4,5	21	ne
6	Koupelna	13,3	24	ano
7	Úložný prostor	3,8	18	ano
8	Kuchyně	22,8	21	ano
9	Jídelna	26,3	21	ano
10	Obývací pokoj	47	21	ano
11	Chodba	23,2	18	ne
12	Dětský pokoj	42,1	21	ano
13	Koupelna	25	24	ano
14	WC	5,6	21	ne
15	Kotelna	5,6	21	ne
16	Dětský pokoj	34,8	21	ano
17	Ložnice	39,9	21	ano

Celková součtová spotřeba energie na vytápění během ročního období z výpočtu programem *Stabilita* byla nejnižší pro rodinný dům s lehkou dřevěnou konstrukcí, a to 7978 kWh/a. Rodinný dům na bázi keramických tvarovek vykazuje celkovou součtovou spotřebu energie 8342 kWh/a. Nejvyšší spotřeba byla u rodinného domu postaveného na bázi železobetonové konstrukce, a to 9879 kWh/a.

Využitím teplotního průběhu v jednotlivých posuzovaných místnostech programem *Stabilita* můžeme sledovat nejvyšší vzestup vnitřní teploty místností v letním období. Nejvyšší teplota byla zjištěna pro místnost č.17 orientovanou na jihozápad, a to 28,7 °C pro rodinný dům s lehkou dřevěnou konstrukcí. U zděné keramické konstrukce byla tato hodnota 27,2 °C. Nejnižší výpočtová vnitřní teplota vzduchu v letním období byla dosažena u železobetonové konstrukce, a to 26,6 °C.

11. Závěr

Se zvyšující se cenou energie je u novostaveb snahou dosáhnout energetické náročnosti na úrovni nulových či pasivních domů. Nezbytným vývojovým stupněm k těmto typům domů jsou domy nízkoenergetické.

Výsledné energetické vlastnosti budovy ovlivňují nejen konstrukční a izolační materiály s dobrými tepelně technickými vlastnostmi, ale také celkové dispoziční řešení budovy. Pro zajištění nízké spotřeby energie nestačí pouze dostatečná tloušťka tepelné izolace, ale na nízkých tepelných ztrátách a vysokých pasivních ziscích se podílí řada dalších faktorů, které by měly být při návrhu domu zohledněny a navzájem sladěny. Při návrhu nelze brát ohled pouze na tepelný odpor či prostup tepla konstrukcemi, stavební materiály projevují i další fyzikální vlastnosti, které mohou ovlivnit energetickou náročnost budovy i její uživatelský komfort.

Tepelná stabilita v letním a zimním období je důležitou vlastností stavebních konstrukcí. K této vlastnosti výrazně přispívá schopnost tepelné akumulace a teplotní útlum konstrukce. Těžká obvodová sendvičová zdiva mají vysokou tepelně akumulační schopnost a díky tomu dochází k pomalejšímu ochlazování konstrukce. V letním období dochází především u lehkých stavebních konstrukcí vlivem nedostatečné tepelné akumulace k výraznému zvýšení teplot v místnostech.

Z výpočtového grafu provedeného v experimentální části lze konstatovat že nejnižší spotřeba energie pro vytápění v rámci klimatického referenčního roku byla u rodinného domu s lehkou dřevěnou konstrukcí. Tato varianta má ovšem nižší tepelnou stabilitu než zděný dům z keramických tvarovek a díky tomu dochází v letním období k přehřívání místností a v zimním období k rychlému poklesu teplot při přerušení topení. Dobrou tepelnou stabilitu mají těžká obvodová zdiva, u kterých v letním období nedochází k tak razantnímu přehřívání a v zimním období dochází k menšímu kolísání teplot uvnitř budovy. Nevýhodou u těchto konstrukčních materiálů je vyšší potřeba energie pro vytápění na požadovanou vnitřní teplotu.

12. Seznam použitých zdrojů

- [1] SMOLA, Josef. Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů. Praha: Grada, 2011. Stavitel. ISBN 9788024729954.
- [2] HUMM, Othmar. Nízkoenergetické domy. Praha: Grada, 1999. Stavitel. ISBN 8071696579.
- [3] PREGIZER, Dieter. Zásady pro stavbu pasivního domu. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 9788024724317.
- [4] ČSN 73 0540–2. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [5] Produkty. Porotherm - Wienerberger cihlářský průmysl, a.s. [online]. Copyright © [cit. 5.03.2017]. Dostupné z: <http://wienerberger.cz/produkty>
- [6] HELUZ – cihly, překlady, komíny, stropní systémy pro stavbu rodinného domu [online]. Copyright © 2016, HELUZ cihlářský průmysl v.o.s. [cit. 5.03.2017]. Dostupné z: <http://www.heluz.cz/>
- [7] Stavební materiál pro stavbu i rekonstrukce | Ytong.cz [online]. Copyright © Xella Group. All rights reserved. [cit.6.03.2017]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/>
- [8] http://www.vapis-sh.cz/cs/planovani/projekce_zdiva, verze květen 2017
- [9] DUS, Tomáš. Studium vlivu konstrukčních systémů na energetickou náročnost staveb [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2015 [cit.2017-05-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/37505>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Stanislav Šťastník.
- [10] ČSN 73 0540–1. Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie. Praha: Český normalizační institut, 2005.

- [11] ČSN 73 0540–3. Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [12] Vyhláška č.78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov.
- [13] Vyhláška č. 213/2001 Sb., kterou se vydávají podrobnosti náležitostí energetického auditu.
- [14] Izolace vakuová. Izolace vakuová [online]. Copyright © [cit.10.04.2017]. Dostupné z: <http://www.izolace-vakuova.cz>
- [15] <http://stavba.tzb-info.cz/pasivni-domy/13198-vnitri-tepelna-akumulace-pasivnich-domu-a-letni-tepelna-stabilita>, verze květen 2017
- [16] http://www.zelenausporam-2.cz/?page_id=52, verze květen 2017
- [17] <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/299-izolace-pur-pir-a-fenolicka-pena>, verze květen 2017

13. Seznam tabulek

Tab. 1: Charakteristika budov s odlišnou potřebou tepla na vytápění

Tab. 2: Základní požadavky na energeticky nulové budovy

Tab..3: Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$

Tab.4: Přehled fyzikálních vlastností EPS a XPS

Tab.5: Přehled vlastností materiálů užitých v praktické části této práce

Tab.6: Přehled požadovaných a doporučených hodnot součinitele prostupu tepla U_N pro budovy s převažující návrhovou teplotou $\theta_{im} = 18$ až 22 °C podle normy z roku 2011

Tab.7: Požadované hodnoty nejvyššího denního vzestupu teploty vzduchu v místnosti v letním období $\Delta\theta_{ai,max,N}$ a nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti v letním období $\theta_{ai,max,N}$

Tab.8: Přípustné hodnoty poklesu výsledné teploty v místnosti v zimním období $\Delta\theta_{r,N(T)}$

Tab.9: Přehled požadavků uživatelů domu pro jednotlivé místnosti

14. Seznam obrázků

Obr.1: Výpočtový průběh teplot v letním období pro posouzení letní tepelné stability podle ČSN EN ISO 13792

Obr.2: Reálný průběh teplot v letním období pro posouzení tepelné stability

Obr.3: Průkaz energetické náročnosti

Obr.4: Schéma půdorysu 1.NP

Obr.5: Schéma půdorysu 2.NP

Obr.6: Průběh vnitřních a povrchových teplot, spotřeby energie a průběh součtové spotřeby energie modelového domu na bázi keramických tvarovek

Obr.7: Průběh vnitřních a povrchových teplot, spotřeby energie a průběh součtové spotřeby energie modelového domu na bázi dřevostavby

Obr.8: Průběh vnitřních a povrchových teplot, spotřeby energie a průběh součtové spotřeby energie modelového domu na bázi železobetonového monolitu

15. Seznam symbolů

λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/m·K
c	Měrná tepelná kapacita	J/kg·K
ρ	měrná hmotnost	kg/m ³
a	Součinitel teplotní vodivosti	m ² /s
Q	Množství tepla	J
m	hmotnost	kg
R	Tepelný odpor konstrukce	m ² ·K/W
R_{si}	odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce	m ² ·K/W
R_{se}	odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce	m ² ·K/W
U	Součinitel prostupu tepla	W/m ² ·K
U_{em}	součinitel prostupu tepla obálkou	W/m ² ·K
$U_{em,N}$	součinitel prostupu tepla obálkou dle normy	W/m ² ·K
Δ_{rf}	Fázový posun	hod
μ	Faktor difuzního odporu	-
$\theta_{si,cr}$	Vnitřní povrchová teplota	°C
θ_{si}	Nejnižší vnitřní povrchová teplota obvodových konstrukcí	°C
θ_{ai}	teplota vnitřního vzduchu	°C
$\theta_{ai,max}$	teplota v letním období pro kritické místnosti	°C
$\theta_{ai,max,N}$	hodnoty nejvyšší denní teploty vzduchu v místnosti	°C
$\theta_{si,min}$	nejnižší požadovaná povrchová teplota	°C
n	intenzita výměny vzduchu v místnosti	h ⁻¹
$n_{50,N}$	celková průvzdušnost obálky vzduchu při $\Delta p = 50$ Pa	h ⁻¹
M_c	zkondenzované množství vodní páry uvnitř konstrukce	Kg
φ	relativní vlhkost vzduchu	-

16. Seznam zkratek

ČSN	Označení českých technických norem
PVC	Polyvinylchlorid
ETICS	Fasádní kontaktní zateplovací systém
OSB	Lisovaná deska z orientovaně rozprostřených velkých třísek
CLT	Stěnové panely na bázi křížem vrstveného masivního dřeva
PUR	Polyuretan
PEF	Pěnový polyetylén
EPS	Pěnový polystyren
XPS	Extrudovaný polystyren
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
PENB	Průkaz energetické náročnosti budovy
EA	Energetický audit
1.NP	První nadzemní podlaží
2.NP	Druhé nadzemní podlaží
KVH	Dřevěné hranoly vyráběné z jehličnatého dřeva