

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hodnocení přínosu Trombeho stěny pro přitápění domu

2009

Marie Hánová

Název práce:

Hodnocení přínosu Trombeho stěny pro přitápění domu

Anotace:

Obsahem této diplomové práce je popis Trombeho stěny spojený s měřením v novostavbě v Netunicích u Plzně. Součástí práce je i popis metodiky měření. Výsledky měření jsou shrnuty do praktických poznatků a návrhů pro vylepšení tohoto pasivního přitápěcího systému.

Klíčová slova:

Trombeho stěna, pasivní vytápěcí systém

Name:

Evaluation of Trombe wall contribution for house heating

Synopsis:

In this diploma work subscription of Trombe wall can be found. It is combined with measurement of Trombe wall in Netunice near Pilsen. Part of this work is subscription of methodology of measurement too. For improvements of this passive heating system results of measurement are summed up in empirical evidence and practical concepts.

Keywords:

Trombe wall, passive rating system

Prohlášení:

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem zpracovala samostatně s použitím uvedených zdrojů a literatury.

V Plzni dne 12. května 2009

.....

Marie Hánová

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce prof. Janu Škorpilovi za cenné rady a připomínky, a Václavu Švábovi za odborné konzultace a poskytnutí výsledků měření. Zvláštní poděkování patří majiteli domu v Netunicích, který umožnil přístup do objektu a vlastní měření, za ochotu a pomoc.

Obsah

Úvod	3
1. Princip a funkce Trombeho stěny	5
1.1. Historie Trombeho stěny	5
1.2. Princip a funkce	6
1.2.1. Trombeho stěna bez zasklení a vzduchové mezery	6
1.2.2. Trombeho stěna se zasklením a vzduchovou mezerou	7
1.2.3. Trombeho stěna integrovaná do větracího systému	8
1.2.4. Regulace teploty	9
1.3. Materiály pro Trombeho stěnu	10
2. Realizace Trombeho stěny, metodika měření a sběru dat	12
2.1. Popis provedení Trombeho stěny	12
2.2. Způsob realizace a použité materiály	14
2.3. Metodika měření a sběru dat	15
2.3.1. Obecné podmínky měření	15
2.3.2. Popis čidel	16
2.3.3. Zařízení pro sběr dat	18
2.3.4. Zakrytí stěny reflexní fólií	19
2.3.5. Měření povrchových teplot zdi Trombeho stěny a ostatních zdí	20
3. Analýza získaných dat a vyhodnocení přínosu Trombeho stěny pro tepelnou bilanci objektu	22
3.1. Zhodnocení výsledků měření	22
3.1.1. Způsob hodnocení výsledků měření	22
3.1.2. Vliv cirkulace vzduchu na účinnost	25
3.1.3. Reflexní fólie	29
3.1.4. Vliv použitých materiálů a způsobu provedení	31
3.1.5. Celkové zhodnocení přínosu Trombeho stěny	32
3.2. Zlepšovací návrhy	34
4. Technické a ekonomické porovnání Trombeho stěny s klasickými solárními kolektory	36
4.1. Popis solárních kolektorů	36
4.1.1. Princip solárních kolektorů	36
4.1.2. Médium	37
4.1.3. Umístění a velikost solárních kolektorů	37
4.2. Porovnání Trombeho stěny se solárními kolektory	39
5. Návrh Trombeho stěny s přihlédnutím k výsledkům měření	41

5.1. Vhodnost domu pro výstavbu Trombeho stěny	41
5.2. Návrh a stavba Trombeho stěny	42
Závěr	44
Použitá literatura a zdroje	46
Seznam příloh	47
Evidenční list	50

Úvod

V současné době při stále vyšších energetických nárocích ve všech oblastech lidského konání je důležité energiemi šetřit. Vedou nás k tomu důvody ekologické a zejména ekonomické. V našich zeměpisných šířkách činí jednu z největších položek teplo, které je nezbytné nejen v zimě, ale i v teplých měsících roku, pro ohřev vody. Právě z ekonomických důvodů mnoho lidí hledá možnosti, jak snadno a levně získávat teplo z okolí pro ohřev vody a pro přitápění domu. Zároveň jsou však na tyto systémy kladeny i další požadavky – nízké počáteční náklady, malá náročnost na údržbu, nízké náklady na provoz a možnost vyrobit si takový systém svépomocí. Jako nejsnazší se jeví využívání solární energie jak pro výrobu elektrické energie, tak pro výrobu tepla. Zatímco pro výrobu elektrické energie je zapotřebí poměrně drahé a složité technologie, k výrobě tepla stačí mnohem méně. Nejjednodušším takovým systémem je Trombeho stěna, o které tato práce pojednává.

V současné době je použití tohoto systému spíše výjimkou a zajímavostí než plnohodnotnou alternativou k přitápění. Většinou je stavěn a využíván nadšenci, kteří si sami shání informace a materiál. Ve světě však můžeme nalézt i velmi zajímavé příklady odborně navržených staveb jako např. Dan Shaefer Federal Building, která je součástí Národní laboratoře pro obnovitelnou energii (National Renewable Energy Laboratory). Tam je systém přizpůsobený i směru dopadu slunečních paprsků během dne a tím je do velké míry zajištěna regulace. Zřídkaové využití systému Trombeho stěny nalézá příčinu v malé informovanosti a efektivnosti. Neodborně zkonstruovaná Trombeho stěna má poměrně nízkou účinnost a hodí se tedy jen pro přitápění rodinných domů, temperování skladovacích prostor apod. I tak ale může nemalou měrou přispět k úspoře tepla a tím i finančních prostředků. Naopak dobře navržená Trombeho stěna může fungovat s vysokou účinností a může se stát hlavním vytápěcím systémem budovy. Navržení takového systému je však časově náročné nejen z důvodu studia meteorologických podmínek, ale i kvůli náročným výpočtům. Je nutno vzít v úvahu proudění vzduchu, směr dopadu paprsků, orientace stěny, maximální i průměrnou intenzitu slunečního záření pro danou lokalitu a další faktory. Takový postup se však provádí jen u velkých vícepatrových staveb, které slouží k dlouhodobému pobytu osob, např. obytné budovy, kanceláře apod.

Cílem této diplomové práce je odpovědět na otázky, jak Trombeho stěna funguje, co může nabídnout v našich podmínkách, a zdali může konkurovat jiným způsobům vytápění. Pro tyto potřeby bylo použito dat z měření v rodinném domě v Netunicích u Plzně. Zároveň je úkolem této práce nabídnout obecné zásady návrhu a konstrukce Trombeho stěny ve stávajících i nových objektech, zejména rodinných domech.

1. Princip a funkce Trombeho stěny

1.1. Historie Trombeho stěny

Trombeho stěna byla poprvé navržena již v roce 1881 Edvardem Morsem, kdy také byla patentovaná ve Spojených státech Amerických. Realizována však byla až v roce 1964 Felixem Trombem a Jaquesem Michelem ve Francii v rámci projektu solárního pasivního domu. Tento dům byl plně vybaven různými solárními systémy zahrnujícími většinu energetických nároků domu od ohřevu vody přes vytápění po klimatizaci. Trombeho stěna zde byla realizována jen tmavou izolační glazurou, kterou byla stěna natřena. Toto provedení tedy mělo velké ztráty a bylo málo efektivní.

Později zaznamenal princip Trombeho stěny značnou oblibu a to hlavně ve Francii, kde pro tento přitápěcí systém panují velmi dobré podmínky. V současné době je ve Francii u většiny nově vystavěných domů vybudována i Trombeho stěna. Tato technologie je ale využívána i v jiných částech světa – Indie, USA, Čína atd. Většinou se jedná o velké projekty pro přitápění administrativních budov a veřejných budov, jako jsou školy. Některá provedení mohou být velmi důmyslná a efektivní a zároveň vzhledově atraktivní.

Snad nejlepším příkladem je budova Dan Shaefer Federal Building v Coloradu ve Spojených státech Amerických (obr. 1). Tato budova je vytápěna převážně pomocí Trombeho stěny. Profil čelní stěny orientované na jih je uzpůsoben tak, aby bylo využití slunečního záření co nejefektivnější.



Obr. 1.: Dan Shaefer Building

Ráno a brzy dopoledne dopadají paprsky přímo do okenní tabule, takže interiér je rychle zahříván. Odpoledne největší část paprsků dopadá na část stěny, která je orientována přímo na jih. Zde se začíná akumulovat teplo, které večer a v noci bude vyzařováno do místnosti. V pozdním odpoledni a při západu slunce dopadají paprsky na třetí část stěny, kam se rovněž akumuluje teplo. V případě potřeby lze otevřít větrací otvor a tím regulovat množství akumulovaného tepla. Po západu slunce je naakumulované teplo vyzařováno dovnitř budovy. Tím, že je stěna rozdělena a její části natočeny do různých úhlů, je maximalizováno využití solární energie a zároveň je tak provedena i regulace.

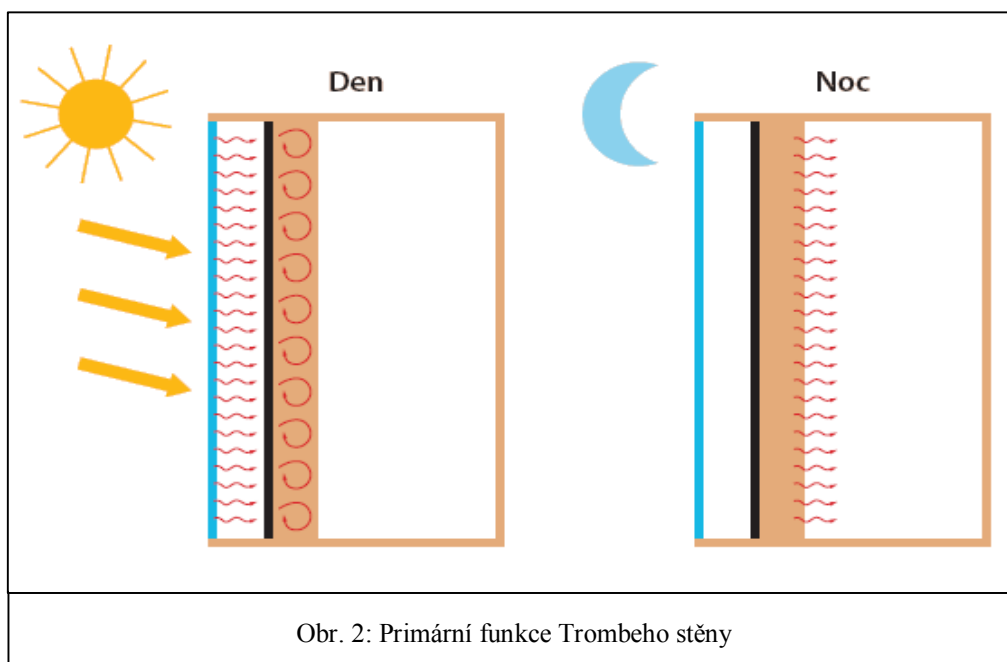
Takový systém je však poměrně složitý, i když vysoce efektivní, a představuje vrchol propracovanosti Trombeho stěny. V praxi se spíše setkáme s rovnou Trombeho stěnou, jako doplňkem ke stavbě, ne jako určujícím prvkem stavby.

1.2. Princip a funkce

Základní a původní funkcí Trombeho stěny je akumulace tepelné energie do stěny domu vlivem slunečního záření. Druhou funkcí je ohřev vzduchu, který otvory v místnosti proudí do prostoru mezi stěnou domu a sklem a zpět. Funkce Trombeho stěny závisí na jejím provedení.

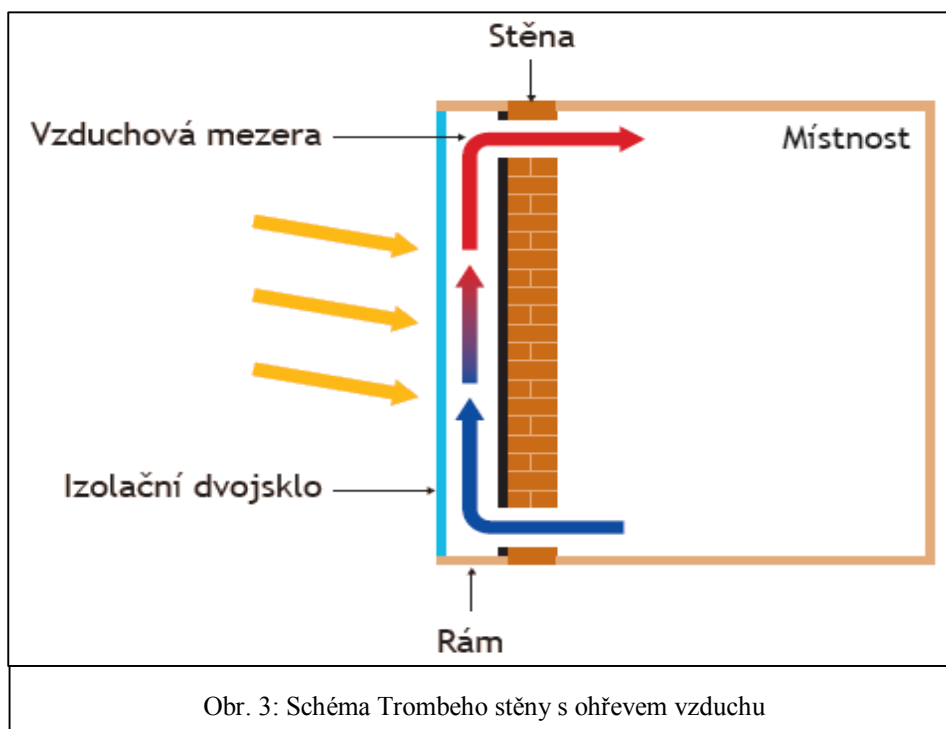
1.2.1. Trombeho stěna bez zasklení a vzduchové mezery

V tomto provedení je zeď, která má plnit funkci Trombeho stěny, jen natřená izolační glazurou. Ta má černou nebo alespoň tmavou barvu a pomáhá akumulovat teplo do stěny. Přes den dochází k ohřevu stěny vlivem absorpce slunečního záření. Stěna se tak může ohřát na teplotu o několik stupňů vyšší, než je v místnosti. Během noci dochází k uvolňování nahromaděného tepla ze stěny do okolí, tedy do místnosti, ale také ven mimo dům. Zde vznikají velké tepelné ztráty a snižuje se celková efektivita Trombeho stěny. Vyhřátá stěna v noci vytápí místnost, ale i během celého dne má význam pro celkovou teplotní pohodu člověka. Z této stěny dochází k sálání tepla, což přispívá k subjektivnímu pocitu tepla. To má význam zejména u takových stavebních materiálů, které těžko absorbují teplo (obr. 2).



1.2.2. Trombeho stěna se zasklením a vzduchovou mezerou

Toto provedení je mnohem efektivnější než předchozí. Má stejný základ jako provedení bez zasklení, tedy zeď je natřena černou glazurou. Před samotnou zdí je ve vzdálenosti sedmi až dvaceti centimetrů skleněná stěna, která spolu se vzduchovou mezerou a zdí funguje jako skleník a navíc zabraňuje únikům tepla zpět do okolí. Kvalita a provedení skleněné stěny mají zásadní vliv na celkovou účinnost Trombeho stěny. Ve zdi jsou navíc otvory opatřené klapkami, které umožňují proudění chladnějšího vzduchu z místnosti do prostoru mezi sklem a zdí, kde se ohřívá a proudí zpět do místnosti (obr. 3). Otvorů je podle potřeby několik, záleží to zpravidla na velikosti a tvaru místnosti. Jejich umístění závisí na proudění vzduchu v místnosti. Vychází se z poznatku, že teplejší vzduch stoupá vzhůru, tudíž několik otvorů je umístěno při podlaze místnosti. Těmi proudí studenější vzduch do Trombeho stěny. Další otvory jsou v horní části stěny. Ty zajišťují návrat ohřátého vzduchu zpět do domu. Cirkulace vzduchu může být podpořena kanálky pod podlahou místnosti. Ty vedou z různých vzdálenějších míst, zpravidla rohů, kde je cirkulace obtížná, a ústí do Trombeho stěny. U vstupu do Trombeho stěny mohou být umístěny ventilátory pohánějící vzduch a usnadňující výměnu vzduchu ve stěně a celé místnosti. Ventilátory mohou být umístěny i jinde, v podstatě kdekoli v Trombeho stěně nebo přívodních kanálech. Jejich hlavní funkcí je zajištění nuceného větrání.



Tvar a velikost Trombeho stěny se může různit. Může být přizpůsobena tvaru stěny, na které je umístěna, nebo dalším prostorovým omezením jako je třeba rozmístění oken, dveří apod. Obecně platí, že čím větší je Trombeho stěna, tím lepších výsledků se při vytápění dosahuje.

1.2.3. Trombeho stěna integrovaná do větracího systému

Spolu se snahou o co nejlepší tepelnou izolaci domů vyvstává problém s větráním a přirozenou cirkulací vzduchu. Domy jsou velmi dobře izolované nejen pro únik tepla, ale také pro únik vlhkosti. Hrozí tak riziko vzniku plísní a celkově je životní prostředí v domě zhoršováno. Proto je v těchto domech, zejména pasivních, důležitá nucená cirkulace vzduchu.

Nelze však jen nasávat vzduch zvenčí, protože by docházelo ke ztrátám tepla. Řešením je průchod vzduchu přes rekuperační jednotku, nebo ohřev ve vzduchovém kolektoru. Vzduchový kolektor je obvykle realizován solárním kolektorem, ale místo něj může být použita i Trombeho stěna. Vzduch proudící do domu by byl nasáván zvenčí a procházel by přes filtry a Trombeho stěnu do domu. Trombeho stěna by v tomto případě nemusela být velká a mohla by být umístěna kdekoliv na domě, nejen na zdech, ale také na střeše.

1.2.4. Regulace teploty

U každého systému dodávajícího teplo je důležitá jeho regulace. Ta je u Trombeho stěny velmi jednoduchá – je provedena pomocí klapek u jednotlivých otvorů a uzavíratelné lišty v horní části Trombeho stěny.

Pokud je teplota v daném místě domu dostatečně vysoká, uzavřou se příslušné klapky, takže teplý vzduch již neproudí dovnitř. Je-li třeba proudění teplého vzduchu jen omezit, uzavřou se horní otvory, kterými proudí nejteplejší vzduch. Pokud je teplota příliš vysoká a i sálání tepla přes noc je nežádoucí, lze navíc otevřít lištu v horní části stěny a uzavřít všechny klapky kromě dolních (nasávacích). Teplý vzduch tak vůbec neproudí do domu a uniká horní lištou do okolí. Zároveň je tak částečně ochlazována zeď, která pak akumuluje méně tepla, a je zajištěno provětrávání domu.

Pokud je zataženo a venkovní teplota je velmi nízká, může se stát, že zeď Trombeho stěny je chladnější než vzduch v místnosti, zvláště ráno. V tom případě je dobré uzavřít střední otvory a nechat otevřené jen horní. Těmi totiž proudí do místnosti nejteplejší vzduch.

V extrémním případě, zejména letních měsících, by mohl být dům přetopen. V tom případě by bylo nutné vliv Trombeho stěny zcela eliminovat. Pro tento účel se dá použít reflexní fólie, kterou se Trombeho stěna zvenčí překryje. Reflexní fólie musí být vyrobena z vysoce odrazivého materiálu, aby se do Trombeho stěny nemohlo akumulovat teplo. Obecně se jedná o tenký, světlý a lesklý materiál, který dobře odráží elektromagnetické záření – tedy světlené i tepelné. Jednodušší je však instalace žaluzií (obr 4). V zimním období je možné je vytáhnout a nechat sluneční záření volně dopadat na stěnu. V létě mohou být spuštěny a podle potřeby nastaveny tak, aby na stěnu dopadalo optimální množství záření. Velkou výhodou žaluzií je snadná instalace a ovládání.



Obr. 4: Trombeho stěna zakrytá žaluziemi

1.3. Materiály pro Trombeho stěnu

Pro účinnost Trombeho stěny jsou rozhodující tři prvky – zeď, která plní primární funkci Trombeho stěny, skleněná plocha se vzduchovou mezerou a izolace předsazené skleněné plochy. Je-li způsob provedení jednoho z těchto prvků zanedbán, významně se snižuje účinnost celého systému. Jedná se zejména o izolační schopnosti Trombeho stěny. Je žádoucí, aby Trombeho stěna pomáhala vytápět dům, ale nesmí to být na škodu celkové tepelné bilanci domu.

Základem Trombeho stěny je zeď, která plní zejména primární funkci. Při stavbě nového domu převládá v současné době snaha o výběr tepelně dobře izolujících materiálů, což se však s provedením Trombeho stěny jen těžko slučuje. Nové budovy jsou stavěny z izolačních cihel. Znamená to, že díky svislému děrování je v cihle více vzduchových mezer, které slouží jako izolace. Tyto tzv. cihly typu „therm“ mají velmi dobré izolační vlastnosti a domy již obvykle nepotřebují další zateplení. Pro zeď Trombeho stěny je však důležité, aby teplo snadno akumulovala a snadno jej uvolňovala. Tyto nároky izolační cihly nesplňují, proto je dobré se kvůli konstrukci Trombeho stěny vrátit ke klasickým páleným cihlám. Z principu je nemožné přidat ke zdi další zateplení. V tom případě je však nutné zajistit takové provedení zbytku Trombeho stěny, aby bylo více tepla získáno než ztraceno vlivem nedostatečné izolace.

Materiály vhodné pro stavbu zdi Trombeho stěny můžeme vybrat podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Čím větší je součinitel tepelné vodivosti, tím lépe materiál vede teplo a tím hůře izoluje. Pokud je však součinitel tepelné vodivosti příliš velký, zeď vyzařuje naakumulované teplo příliš rychle a pak dochází k velkým tepelným ztrátám. Pro zeď Trombeho stěny jsou nejlepší materiály se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda = 0,85 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, což odpovídá pálené cihle, některým druhům betonu a pískovci. Dalšími vhodnými materiály jsou ty, které mají součinitel tepelné vodivosti v rozsahu $\lambda = 0,6$ až $2,0 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, např. další druhy cihel (příčně děrované, podélně děrované), vápenec a většina druhů betonů. Méně vhodné, ale stále dostačující jsou cihly typu „therm“.

Jednou z možností, které se vyplatí věnovat pozornost, je kvalitní izolační dvojsklo. V současné době lze využít i speciálních skel, které sice propouštějí viditelné záření, ale průchodu tepelného záření zabráňují. Bohužel prostupnost tepelného záření je malá v

obou směrech, tudíž Trombeho stěna může využít jen přeměněného viditelného záření. Taková skla mají sice výborné izolační vlastnosti, ale snižují účinnost samotného systému a jsou velmi drahá. Levnější a pro systém lepší variantou je izolační dvojsklo, přičemž mezi skleněnými deskami zůstane vzduchová mezera o šířce alespoň jednoho centimetru. Rovněž je vhodné použít i silnější sklo.

Třetím faktorem důležitým pro Trombeho stěnu je vzduchotěsnost předsazené skleněné plochy. Zde je hlavním cílem zajistit, aby ohřátý vzduch a teplo neproudili jinam, než do objektu. Skleněná plocha není obvykle vyrobena z jednolitého kusu skla, ale z několika – někdy i desítek – menších tabulí. Ty musí být pevně spojeny, ale spoje nesmí být široké, aby byla zajištěna co největší prostupnost slunečního záření na povrch zdi. Zároveň musí být spoje utěsněné, aby nedocházelo k pronikání vlhkosti dovnitř Trombeho stěny a nevznikaly zbytečné tepelné ztráty prouděním teplého vzduchu do okolí. Jednotlivé tabule skla jsou spojeny pomocí pevné konstrukce vyrobené např. ze dřeva, oceli nebo plasu, a utěsněny tmelem, popřípadě izolační gumou. Ta dobře izoluje a dobře těsní, takže se minimalizují ztráty teplého vzduchu a dovnitř Trombeho stěny nepronikne nežádoucí vlhkost. Rám celé plochy může být vyroben z různých materiálů – opět je to např. kov, dřevo nebo plast. Z hlediska vzhledu je také možné různé materiály kombinovat. Při výběru vhodného materiálu je nutné vzít v úvahu povětrnostní podmínky dané lokality, odolnost konkrétního materiálu a jeho tepelnou vodivost. Pro konstrukci i rám lze sice použít kov, ale z důvodu vzniku tepelných mostů jej nelze doporučit. Optimálními materiály jsou dřevo a plast s dobrými mechanickými vlastnostmi. Pokud skleněné tabule nedoléhají těsně k rámu, je vhodné opět použít tmel nebo izolační gumu. Je také důležité zajistit těsnost mezi rámem a zdí.

Při stavbě nejen Trombeho stěny je třeba mít na paměti, že čím méně bude ztrát, tím lépe bude systém fungovat.

2. Realizace Trombeho stěny, metodika měření a sběru dat

Měřená Trombeho stěna byla spolu s domem vystavěna v roce 2008. Umístění Trombeho stěny bylo navrženo projektantem, který zpracoval projekt domu. Vystavění Trombeho stěny muselo být respektováno již v projektu stavby z důvodu použití jiných materiálů. Samotná Trombeho stěna byla vystavěna svépomocí majitelem objektu. (obr. 5)



Obr. 5: Celkový pohled na dům s Trombeho stěnou

2.1. Popis provedení Trombeho stěny

Stěna je umístěna na části jižní fasády a zabírá celkově přibližně 16m^2 . Stěna je natřena černou barvou, aby byla umožněna co nejlepší absorpce slunečního záření do zdi domu a mohla tedy být vyhřívána. Před stěnou je umístěna skleněná plocha ve vzdálenosti 100mm. Tím je v utěsněném prostoru mezi stěnou a sklem dosaženo skleníkového efektu a vzduch se zde rychle ohřívá.

Cirkulace vzduchu je zajištěna šesti uzavíratelnými otvory o velikosti přibližně 200cm^2 . Ty jsou rovnoměrně rozmístěny ve stěně tak, aby bylo dosaženo co největší využitelnosti Trombeho stěny (obr. 6).



Obr. 6: Rozmístění otvorů zevnitř domu – střední a horní otvory

Dva otvory jsou umístěny u paty Trombeho stěny a zajišťují nasávání chladnějšího vzduchu z rohů místnosti do prostoru mezi zdí a sklem. Vzduch je na vstup přiváděn dvěma potrubími. Dva otvory se nachází přibližně ve výšce 2,5m, tedy uprostřed stěny, a vrací se jimi částečně ohřátý vzduch zpět do místnosti. U horního okraje stěny jsou umístěny zbývající dva otvory, kterými proudí ke stropu místnosti plně ohřátý vzduch. Protože je vyhřívaná místnost velká, je cirkulace vzduchu zajištěna i pomocnými kanálky v podlaze o průměru asi 10cm. Ty ústí ke spodním otvorům ve stěně, kde je proudění umocňováno dvěma ventilátory. Ventilátory byly ovládány termostatem tak, že pokud byl rozdíl mezi teplotou vzduchu na výstupu a na vstupu větší kladný, ventilátory byly uvedeny do chodu.

Zed' pod Trombeho stěnou je vystavěna z klasických cihel, aby se do zdi mohlo akumulovat teplo a byla tak zajištěna primární funkce Trombeho stěny. Tloušťka zdi je 300mm. Její vnější strana je natřena černou barvou. Před samotnou zdí je ve vzdálenosti 100mm předsazena skleněná plocha složená z několika skleněných tabulí, spojených v ocelové konstrukci a upevněná v dřevěném rámu. Na horním okraji rámu je uzavíratelný větrací otvor. V případě, že interiér je dostatečně vyhřátý a další vytápění je na škodu, je možné jej otevřít a nechat ohřátý vzduch volně proudit do okolí.

Pro lepší využití akumulovaného tepla se majitel rozhodl do Trombeho stěny nainstalovat černě natřené měděné trubky, v nichž se ohřívá užitková voda (obr. 7). Trubky jsou stočeny do dvou velkých šneků a celkově se zde může předehtřívát přibližně 16l vody. Tento systém bude využíván především v letních měsících, ale i v zimě může vodu ohřát o několik stupňů. Zde je primární funkce Trombeho stěny mírně potlačena ve prospěch ohřevu vody. Trombeho stěna je využívána především pro ohřev vzduchu.



Obr. 7: Předehtřív vody

Nutno podotknout, že v odpoledních hodinách (cca od 16 hodin v závislosti na roční době) je Trombeho stěna z části zakryta přístřeškem, který je poblíž domu, a snižuje tak účinnost Trombeho stěny.

2.2. Způsob realizace a použité materiály

Základem Trombeho stěny je zeď vystavěná do výšky 2,5m ze zdiva Porotherm a od 2,5m do 5m se skládá z plných cihel. Zeď je zevnitř vyštukována (2mm) a opatřena dvojitým nátěrem bílé barvy Primalex. Zvenčí je zeď omítnuta jádrovou omítkou a natřena dvěma nátěry černé barvy. Na zeď je nasazena ocelová konstrukce natřená černou matnou barvou, do níž jsou zasazeny skleněné tabule o tloušťce 5mm. Těsnění je provedeno izolační gumou Armaflex. Vzduchová mezera mezi zdí a sklem je široká 100mm a z boku je uzavřena PUR panelem. V horní části Trombeho stěny v PUR panelu jsou otevírací dvířka sloužící k případnému větrání Trombeho stěny.

Použité materiály:

- spodní část zdi do výšky 2500mm – zdivo Porotherm 44 P+D 440mm
- horní část zdi od 2500mm do 5000mm – zdivo z plných cihel 300mm
- nosná ocelová konstrukce
- černá matná barva
- štuk 2mm

- jádrová omítka 15mm
- 2krát penetrace Düfa
- 2krát barva Düfa matná černá
- vzduchová mezera 100mm z boků uzavřená PUR panelem
- v horní části PUR panelu otevírací dvířka
- izolační sklo 4-16-4 osazené v izolační gumě Armaflex
- 2krát bílá barva Primalex (vnitřní nátěr)

2.3. Metodika měření a sběru dat

2.3.1. Obecné podmínky měření

Měření probíhalo od 23. 9. 2008 do 30. 4. 2009. Toto období bylo zvoleno proto, že v zimě lze účinnost Trombeho stěny nejlépe zhodnotit. Nově postavený rodinný dům v Netunicích u Plzně nebyl přes zimu obýván ani příležitostně, tudíž nebyl vytápěn a vliv na teplotu ve sledované místnosti měla pouze venkovní teplota a Trombeho stěna. Základní stav pro měření byl následující – uzavřená všechna okna a dveře, bez jakéhokoliv vytápění, spodní klapky a horní klapky Trombeho stěny otevřeny, střední klapky a větrací otvor Trombeho stěny uzavřen, Trombeho stěna nezakrytá. Vzduch byl do Trombeho stěny nasáván jen přes drenáže z rohů místnosti. V průběhu měření docházelo k odchylkám od tohoto stavu, zejména v průběhu března a dubna, kdy dům začal být využíván jako víkendové sídlo. Největšími zásahy do měření bylo přitápění v kamnech. Všechny odchylky jsou zaznamenány v protokolu o využívání domu v příloze.

K samotnému měření bylo použito dvanácti čidel a měřicího zařízení pro sběr dat. Měření probíhalo od 27. 10. 2008 do 30. 4. 2009 kontinuálně. V období od 23. 9. 2008 do 27. 10. 2008 bylo testováno zařízení pro sběr dat a byl upravován jeho software. I v tomto období ve dnech, kdy měření probíhalo, byly získány reprezentativní údaje. Zařízení pro sběr dat automaticky ukládalo hodnotu z každého čidla každých pět minut. V průběhu dalšího měření byl upravován software měřicího zařízení, což však nemělo vliv na výsledky měření.

2.3.2. Popis čidel

K vyhodnocení efektivnosti Trombeho stěny bylo třeba instalovat dvanáct teplotních čidel a jedno čidlo pro snímání intenzity slunečního záření. Základními požadavky na snímače teploty byly následující: nejistota měření jednotlivých snímačů nesměla přesáhnout 1°C , snímače nesměly být ovlivněny slunečním zářením rozsah měření od -20°C do 100°C s rozlišením alespoň $0,05^{\circ}\text{C}$. Měření intenzity slunečního záření mělo nejistotu měření menší než 10% z rozsahu při rozsahu měření 0 až 1500W/m^2 a rozlišení lepší než $0,1\text{W/m}^2$.



Obr. 8: Snímač teploty

Teploty byly měřeny digitálním teploměrem typu DS18B20 (obr. 8). Původně se uvažovalo o přesných analogových snímačích teploty, konkrétně o platinových odporových termistorech, ale kvůli dlouhým přívodním kabelům k zařízení pro sběr dat byla zvolena méně přesná varianta digitálního teploměru.

Intenzita slunečního záření byla snímána senzorem firmy DAVIS, konkrétně typem DS6450 (obr. 9). Tento snímač je založen na měření osvitu křemíkovou diodou, která je zapojena jako zdroj proudu. Protože snímač obsahuje i převodník proud-napětí, byl nutný přesný a stabilní zdroj. Snímač DS6450 je méně přesný, ale rozpočet projektu neumožňoval pořízení lepšího senzoru. Pro potřeby měření byl však dostačující.



Obr. 9: Snímač DS6450

K měření bylo použito celkem třináct čidel, z toho dvanáct teplotních a jedno jako snímač intenzity slunečního záření (obr. 1, 2). Čidlo č. 1 snímalo venkovní teplotu danou meteorologickými podmínkami. Čidla 2 a 3 snímala teplotu vzduchu v přízemí (č. 2) a v patře domu (č. 3) a spolu s prvním čidlem slouží jako výchozí body pro základní zhodnocení přínosu Trombeho stěny. Dále byly snímány teploty na vstupech do přívodních kanálů v rozích místnosti (čidla č. 4 a 5). Čidla č. 6 a 7 byla umístěna přímo mezi zdí a skleněnou plochou – čidlo č. 6 u paty Trombeho stěny, čidlo č. 7

u horního okraje. Rozdíl těchto hodnot udává, o kolik stupňů se maximálně mohl ohřát vzduch procházející Trombeho stěnou. Teploty vzduchu na vstupu zpět do budovy byly sledovány čidly č. 8 a 9 (prostřední otvory) a č. 10, 11 a 12 (horní otvory). Čidlo č. 12 se lišilo od všech ostatních. Protože na měření teploty může mít vliv i infračervené záření, bylo čidlo č. 12 umístěno do hliníkové trubičky, která tento vliv odstranila. Pomocí hodnot z těchto čidel můžeme stanovit ohřívací účinek Trombeho stěny. Čidlo označené I. je snímač intenzity slunečního záření. Díky němu lze orientačně stanovit výkon dopadající na Trombeho stěnu a porovnat ji s výkonem, který byl skutečně ve formě tepla dodán k vytápění místnosti.

Rozmístění jednotlivých čidel je uvedeno na obrázcích 10 a 11.



Obr. 10: Umístění čidel č. 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11 a 12 a snímače intenzity slunečního záření I

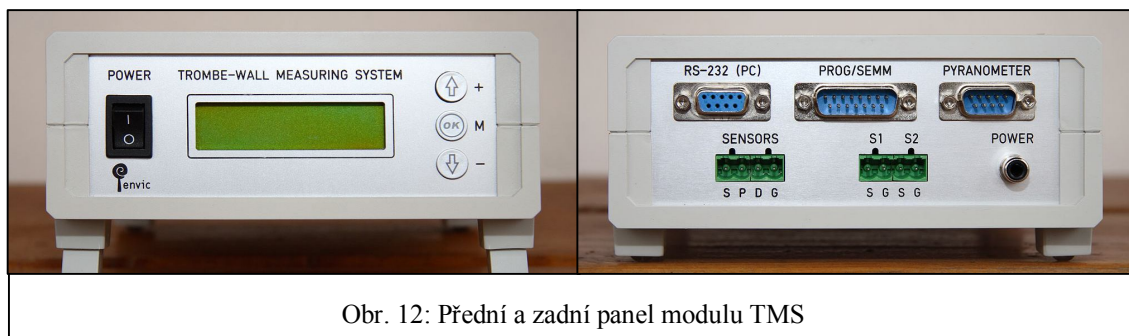


Obr. 11: Umístění čidel 2, 4 a 5

2.3.3. Zařízení pro sběr dat

Modul TMS – Trombe Wall System Measurement – je plně autonomní a potřebuje ke své činnosti jen napájení. Základem měření bylo dvanáct snímačů teplot a jeden snímač intenzity slunečního záření. Dále bylo třeba zpracovávat signály z termostatu, který ovládal činnost větráček. Po uvážení všech vlivů a potřeb byly stanoveny tyto požadavky:

Modul měl mít vstup pro 12 kanálů z měření teplot, jeden vstup pro měření intenzity slunečního záření a dva vstupy z termostatu. Měl provádět kontinuální měření, naměřené hodnoty zprůměrovat a na konci periody data uložit do vnitřní paměti. Ta musela mít takovou kapacitu, aby po dobu alespoň půl roku bylo možno ukládat data každých pět minut. Doba periody byla nastavitelná s možnostmi od 1s do 1hod. Modul TMS byl ovládán přes LCD displej a jednoduchou klávesnici. Během měření se na displeji zobrazovala aktuálně měřená data, takže bylo možné průběžně sledovat různé aktuální hodnoty (obr. 12).



Obr. 12: Přední a zadní panel modulu TMS

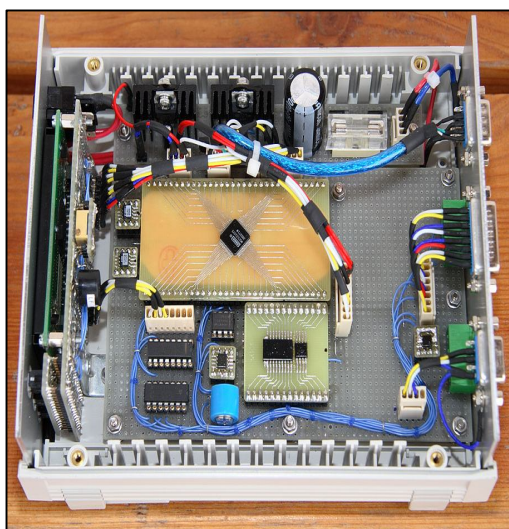
Aby modul TMS mohl ukládat data v přesně stanovených intervalech, bylo třeba, aby měl vnitřní hodiny reálného času. Jejich chyba měla být menší než 1min/měsíc. Při každém stahování dat byly tyto hodiny automaticky přenastaveny na přesný čas. Data byla stahována do počítače přes převodník RS 232, jehož výstup je vidět na zadní straně modulu. Přes tento převodník se také konfiguroval modul TMS, nastavoval čas a bylo možné programovat software. Dalšími požadavky byly malé rozměry, nízká spotřeba (max. 10W), rozsah pracovních teplot -20°C až 50°C a napájení síťovým napětím 230V. Pokud by došlo k výpadku napájení, modul se musel bezpečně vypnout a po restartu automaticky pokračovat v záznamu dat. Aby byl zajištěn bezproblémový chod, byl po každém zapnutí proveden diagnostický test zaměřený na kompletní činnost modulu.

Kritické části měřicího řetězce procházely diagnostikou každou periodu.

Pro bezproblémové ukládání a stahování dat byly stanoveny požadavky na software počítače, přes který se stahovala data z modulu TMS. Vycházelo se zejména z požadavku na snadnou obsluhu.

Software musel být kompatibilní s operačním systémem Microsoft XP Professional a po připojení se automaticky přihlásit k počítači. Dále modul automaticky synchronizoval čas a zobrazoval aktuální čas a datum, počet naměřených vzorků a využití paměti. Software umožňoval diagnostiku modulu, možnost smazání dat a uložení dat ve formátu *.csv.

V průběhu zkušebního provozu bylo zjištěno, že při ukládání dat do paměti modulu dochází k náhodným chybám. Dále docházelo k potížím při stahování dat do počítače. Software nedokázal efektivně komunikovat s různými verzemi OS Microsoft XP Professional, protože převodník RS 232 se ukázal jako velmi nespolehlivý. Proto bylo nutné software pozměnit a od října 2008 již úspěšně probíhalo kontinuální měření.



Obr. 13: Vnitřek modulu TMS

2.3.4. Zakrytí stěny reflexní fólií

V rámci měření je důležité zjistit, jaké teploty by v místnosti byly naměřeny, pokud by dům postrádal Trombeho stěnu. Předpokládalo se, že teplota v místnosti poklesne. Jednak po dobu 48 hodin neproudil otvory žádný ohřátý vzduch a jednak nebyla nijak zahřívána zeď Trombeho stěny a teplo nemohlo sálat dovnitř místnosti. Zároveň bylo nutné vzít v úvahu horší izolační vlastnosti zdi Trombeho stěny.

Měření bylo navrženo tak, aby bylo možné proměřit jeden celý cyklus ohřátí a vychladnutí stěny, tedy v intervalu od východu slunce, do východu slunce. Navrženy byly dvě varianty – zakrytí stěny na 24 hodin a na 48 hodin.

Při zakrytí stěny jen na 24 hodin, by bylo nutné, aby byla stěna zakryta těsně před východem slunce, kdy je zeď nejchladnější a nemůže ještě být zahřívána. I tak by mohl být patrný vliv zahřátí stěny z předchozího dne, i když ne významně. Z časových důvodů však byla zvolena druhá varianta, kdy byla stěna zakryta večer při západu slunce 14. 4. a fólie byla sejmuta odpoledne 16. 4. Tím bylo zajištění proměření celého cyklu den-noc navíc zcela bez vlivu zahřátí stěny.

Toto měření je důležité především pro letní měsíce, kdy je možné, že vliv Trombeho stěny bude třeba zcela eliminovat. Proto bylo pro měření zvoleno teplé počasí.

2.3.5. Měření povrchových teplot zdi Trombeho stěny a ostatních zdí

Pro lepší a objektivnější zhodnocení účinku Trombeho stěny bylo přidáno měření povrchových teplot stěn vytápěné místnosti. V domě se dlouhodobě netopilo, tudíž jediným vytápěcím systémem byla Trombeho stěna. Vzhledem k tomu, že Trombeho stěna nemůže být zaizolována jako ostatní stěny, může skrz ni docházet ke ztrátám tepla. Izolační vlastnosti Trombeho stěny jsou horší, protože pro její stavbu je použito obyčejných cihel bez dalšího zateplení, avšak velmi dobře akumuluje teplo ze slunečních paprsků. Oproti tomu ostatní zdi byly vystavěny z lépe izolujícího Porothermu, ale nemohly využívat solární energie k zahřátí v takové míře, jako zeď z pálených cihel. Měření povrchových teplot zdí se tedy nezaměřovalo na zjišťování izolačních vlastností Trombeho stěny a ostatních zdí, ale na porovnání celkového efektu izolační a primární funkce Trombeho stěny a izolačních vlastností ostatních zdí.

Trombeho stěna v Netunicích je vystavěna ze dvou druhů cihel. Do výšky 2,5m je zeď tvořena cihlami Porotherm a od 2,5m do 5m je zeď z obyčejných pálených cihel. Toto provedení umožnilo praktické porovnání vhodnosti Porothermu s obyčejnými cihlami pro výstavbu Trombeho stěny. Experimentálně bylo ověřeno, že cihly lépe akumuluji a vyzařují teplo, jsou tedy pro Trombeho stěnu vhodnější.

Byla provedena tři měření – 23. 3. 2009 a v průběhu pokusu s reflexní fólií 14. 4. 2009 a 16. 4. 2009. Vždy bylo měřeno sedm hodnot – povrchová teplota Trombeho stěny do 2,5m a nad 2,5m a dále povrchové teploty všech ostatních zdí.

První měření proběhlo 25. 3. 2009, přičemž hodnoty byly naměřeny večer před západem slunce. V tuto dobu je teplota Trombeho stěny nejvyšší, protože je v ní za celý

den naakumulováno nejvíce tepla. Smyslem měření bylo ověřit vhodnost stavebního materiálu pro Trombeho stěnu. Potvrdil se předpoklad, že Porotherm má lepší izolační vlastnosti, protože jeho povrchová teplota u Trombeho stěny byla průměrně o $1,7^{\circ}\text{C}$ nižší, než povrchová teplota zdi z pálených cihel. Důležité byly podmínky měření – jednalo se o zatažený den, kdy intenzity slunečního záření dosahovaly nejvýše $255,1\text{W/m}^2$.

Další měření souvisela se zakrytím Trombeho stěny reflexní fólií. První sada dat ze 14. 4. byla naměřena před instalací fólie, druhá sada ze dne 16. 4. těsně po jejím odstranění. Obě měření měla stejné meteorologické podmínky a obě měření byla provedena při západu slunce, kdy povrchová teplota zdi má být největší. Dne 14. 4. byla povrchová teplota zdi z cihel $t_c = 27,1^{\circ}\text{C}$, kdežto povrchová teplota zdi z Porothermu byla $t_p = 23,1^{\circ}\text{C}$. Dne 16. 4. naměřeny tyto hodnoty: $t_c = 19,3^{\circ}\text{C}$, $t_p = 18,5^{\circ}\text{C}$. Nižší teploty byly naměřeny v důsledku částečného zakrytí Trombeho stěny reflexní fólií.

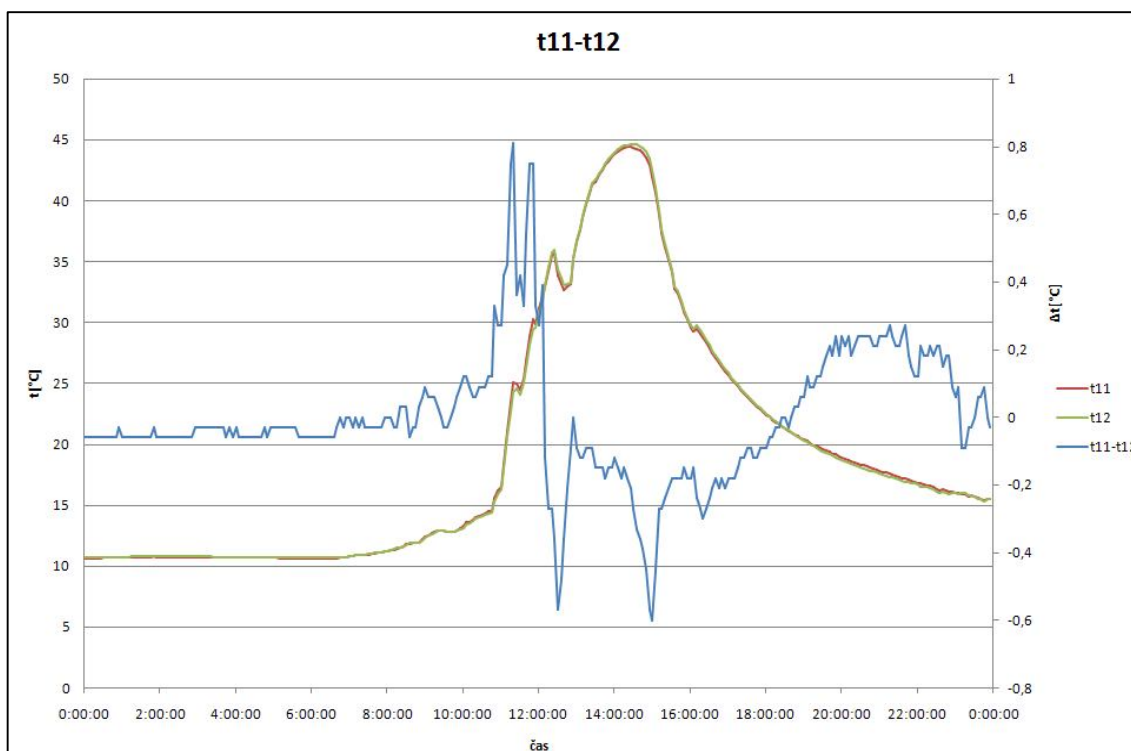
3. Analýza získaných dat a vyhodnocení přínosu Trombeho stěny pro tepelnou bilanci objektu

3.1. Zhodnocení výsledků měření

3.1.1. Způsob hodnocení výsledků měření

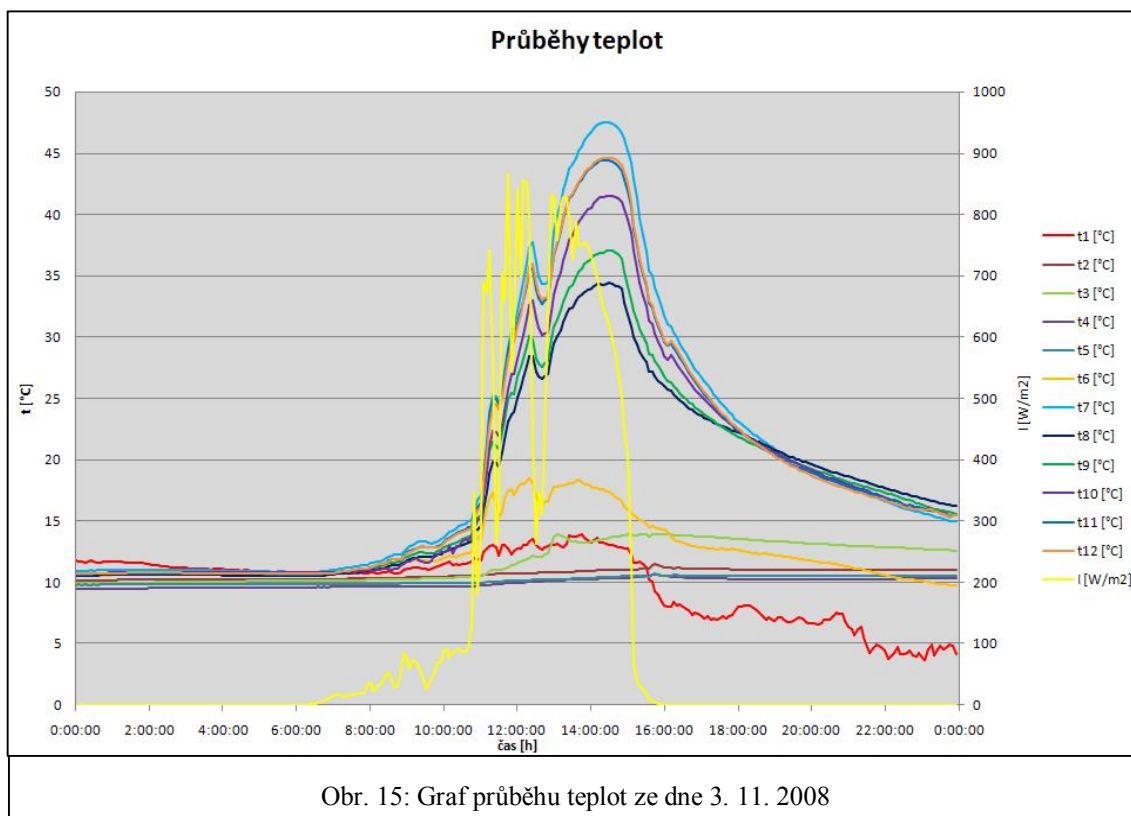
Výstupem z měření byla sada hodnot od počátku měření, tedy od 23. 9. 2008 do 30. 4. 2009. Pro efektivní zpracování dat byly hodnoty rozděleny po dnech a v obdobích, která to umožňovala, po měsících. Pro každou tabulku dne či měsíce byly vytvořeny grafy – Rozdíl t_{11} a t_{12} , Průběhy teplot a Rozdíl vstupu a výstupu.

Před vlastním zpracováním dat bylo nutné posoudit vliv infračerveného záření na snímače teploty. To bylo umožněno měřením na čidlech č. 11 a 12, přičemž č. 12 bylo umístěno v hliníkové trubičce. Porovnáním teplot t_{11} a t_{12} a zprůměrováním rozdílu bylo zjištěno, že pro potřeby této práce nemá infračervené záření na měřené teploty významný vliv. Typický průběh je vidět na grafu ze dne 3. 11. 2008 (obr. 14).



Obr. 14: Rozdíl teplot t_{11} a t_{12} ze dne 3. 11. 2008

V grafu Průběhy teplot jsou zakresleny průběhy naměřených hodnot ze všech čidel snímajících teplotu a ze snímače intenzity slunečního záření. Je zde názorně vidět, jak stoupala teplota ohřívaného vzduchu při průchodu Trombeho stěnou v porovnání s intenzitou slunečního záření. Z tohoto grafu lze vyčíst mírné zpoždění změn teploty v závislosti na změně intenzity záření. Je to způsobeno časovou prodlevou, než se zahřeje povrch zdi. Typický a očekávaný průběh je vidět opět na grafu ze dne 3. 11. 2008 (obr. 15).



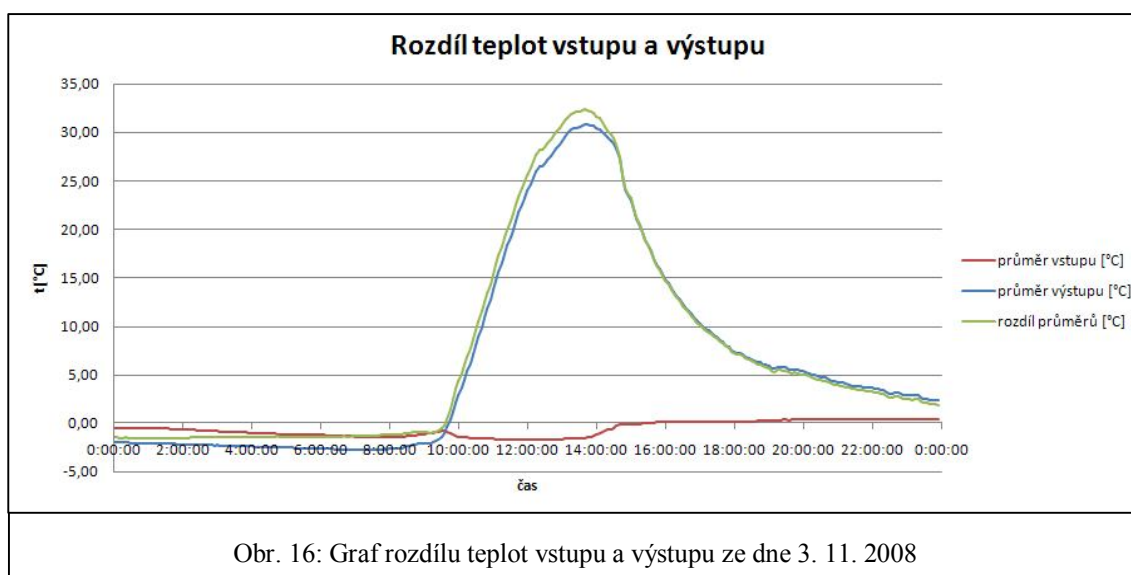
Obr. 15: Graf průběhu teplot ze dne 3. 11. 2008

Graf Rozdíl vstupu a výstupu je pro hodnocení přínosu Trombeho stěny pro přitápění domu rozhodující. Názorně ukazuje, jak se vzduch v závislosti na průchodu Trombeho stěnou ohříval nebo ochlazoval.

Průměrná teplota vzduchu na vstupu do Trombeho stěny byla spočítána jako průměr z čidel umístěných na vstupu do Trombeho stěny, tedy z čidel č. 4 a 5. Teplota vzduchu na výstupu z Trombeho stěny, tedy u horních klapek, ovlivňuje díky cirkulaci vzduchu všechna čidla v domě. Čidlo č. 4 se nacházelo za pohovkou v rohu místnosti. Kvůli horší cirkulaci vzduchu zde byly naměřeny nižší teploty.

Průměrná teplota vzduchu na výstupu z Trombeho stěny byla vypočítána jako průměr z čidel umístěných v horní části Trombeho stěny na vstupu do místnosti, tedy z čidel

č. 10 a 11. Protože byly střední klapky trvale uzavřeny, nebyly brány v potaz hodnoty čidel 8 a 9. Rozdíl byl proveden odečtem průměrné vstupní teploty od průměrné výstupní teploty. V případě, že rozdíl byl nulový, Trombeho stěna nepřispívala k vytápění, ani nezpůsobovala ztráty. Pokud byl rozdíl záporný, Trombeho stěna byla ztrátová. Rozdíl průměrné vstupní a výstupní teploty ukazuje především na vliv cirkulace vzduchu na účinnost Trombeho stěny, i když vliv sálání tepla ze zdi je zde také velmi patrný. Příklad takového průběhu lze vidět v grafu opět ze dne 3. 11. 2008 (obr. 16).



Dalšími důležitými hodnotami byly venkovní teplota snímaná čidlem 1 a intenzita slunečního záření dopadajícího na Trombeho stěnu snímaná čidlem 1. Tyto dvě hodnoty mají zásadní vliv na všechny ostatní. Venkovní teplota ovlivňuje především ztráty únikem tepla do okolí. Čím nižší je venkovní teplota, tím je větší tepelný spád a tím jsou větší ztráty tepla. Zároveň také teplota t_1 slouží pro porovnání teploty venku s teplotou uvnitř domu. Intenzita slunečního záření ovlivňuje tepelný zisk. Čím je intenzita slunečního záření vyšší, a její působení je delší, tím více se zeď a vzduch v Trombeho stěně zahřívají.

Další analýza dat se zaměřovala na zjištění příčin případné ztrátovosti Trombeho stěny a to porovnáváním skupin dat z jednotlivých snímačů nebo jejich průměrů.

3.1.2. Vliv cirkulace vzduchu na účinnost

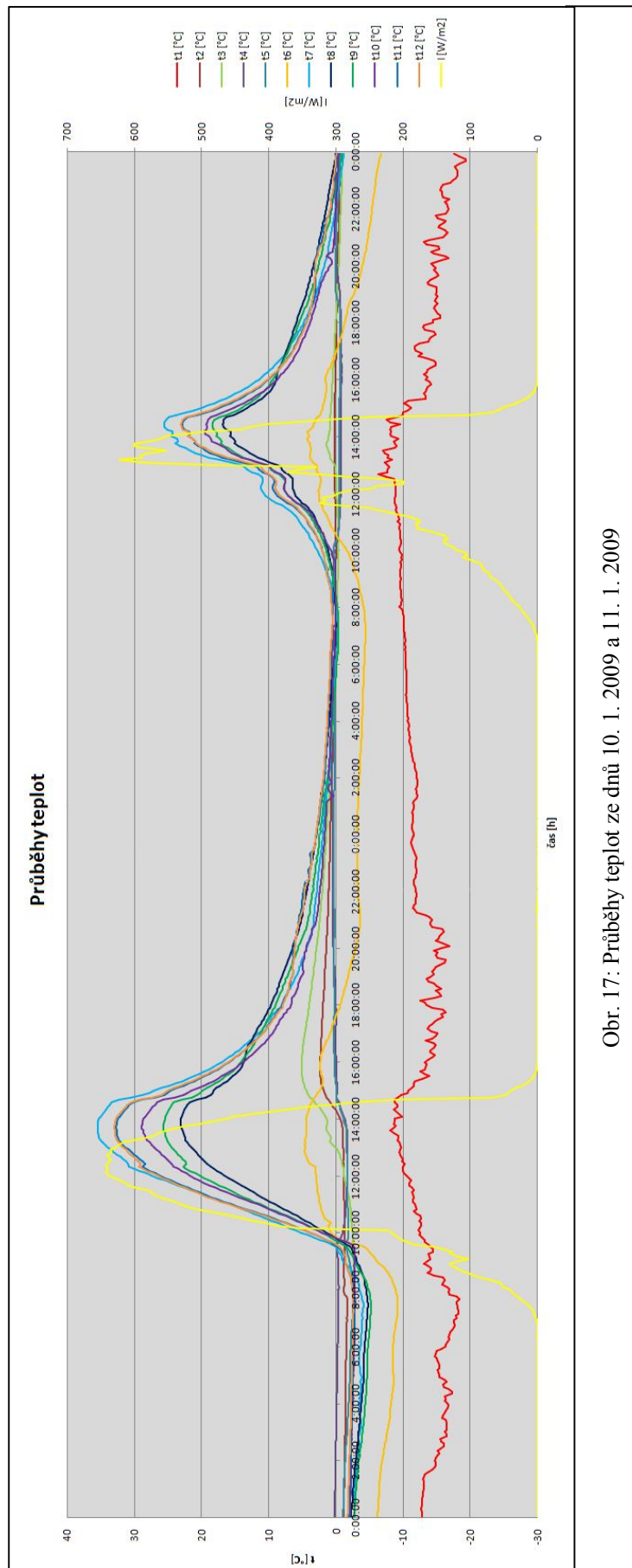
Cirkulace vzduchu se v zimním období ukázala být zásadní funkcí Trombeho stěny významně ovlivňující zisky i ztráty tepla. Teplo sálající ze stěny dovnitř domu mělo na přitápění jen malý podíl. Teplo sálající ze stěny do vzduchové mezery Trombeho stěny však silně ovlivňovalo teplotu vzduchu.

Vzduch je nasáván z místnosti do Trombeho stěny, kde se mění jeho teplota v závislosti na intenzitě slunečního záření a venkovní teplotě. Po průchodu Trombeho stěnou se vzduch vrací zpět do místnosti. Tato cirkulace vzduchu má zásadní vliv na efektivitu Trombeho stěny.

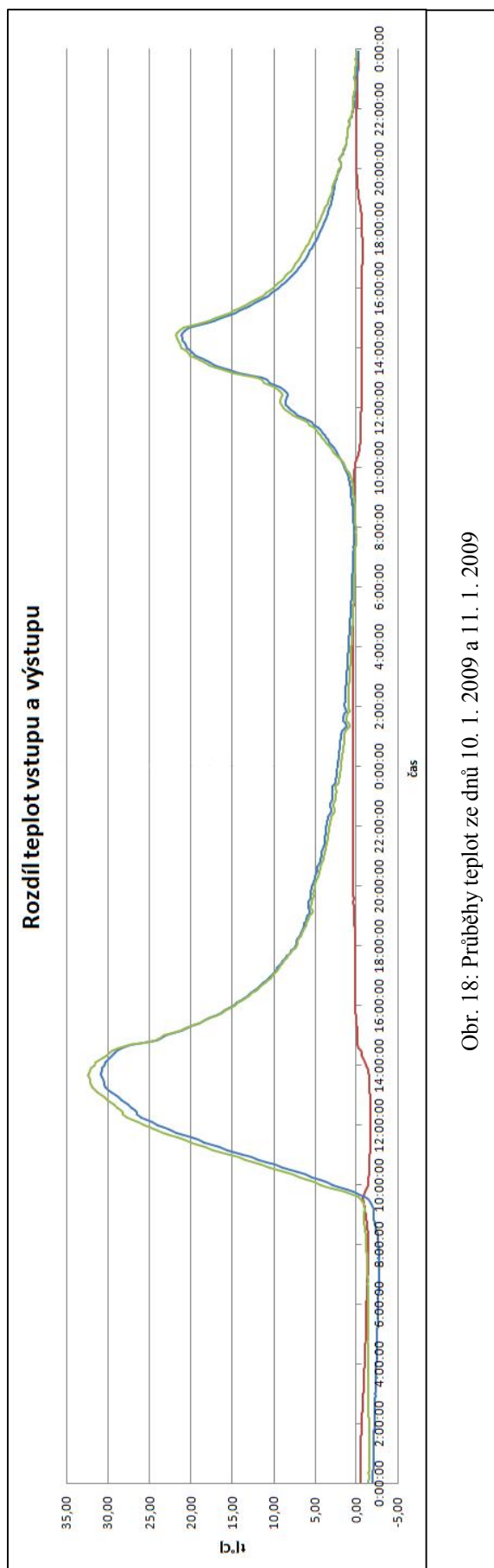
Pro zhodnocení přínosu Trombeho stěny pro přitápění domu byly použity především hodnoty ze zimních měsíců.

Zásadní roli nehraje venkovní teplota, ale intenzita slunečního záření. I v zimních měsících může intenzita dosahovat 600W/m^2 až 800W/m^2 na svislé ploše, což odpovídá jasnému slunečnému dni. Při těchto intenzitách slunečního záření zeď akumuluje velké množství tepla, takže při působení takových intenzit po dva a více dnů, může být efekt sálání podle naměřených hodnot patrný zhruba do poloviny následujícího dne. Pokud ovšem intenzita nedosahuje celý den ani 200W/m^2 , pak po západu slunce teplota ohřátého vzduchu prudce klesá. Po řádově dvou až třech hodinách již stěna nemůže zahřívat procházející vzduch a ten se v Trombeho stěně ochlazuje. V závislosti na okolní teplotě může být vzduch procházející Trombeho stěnou až o 3°C chladnější, při extrémních podmínkách, tedy teplotách pod -10°C a denních intenzitách slunečního záření do 200W/m^2 . To odpovídá chladnému zataženému dni. Při běžných zimních teplotách kolem -5°C a průměrných denních intenzitách záření přibližně 400W/m^2 je vzduch od pozdních nočních hodin ochlazován přibližně o 1°C .

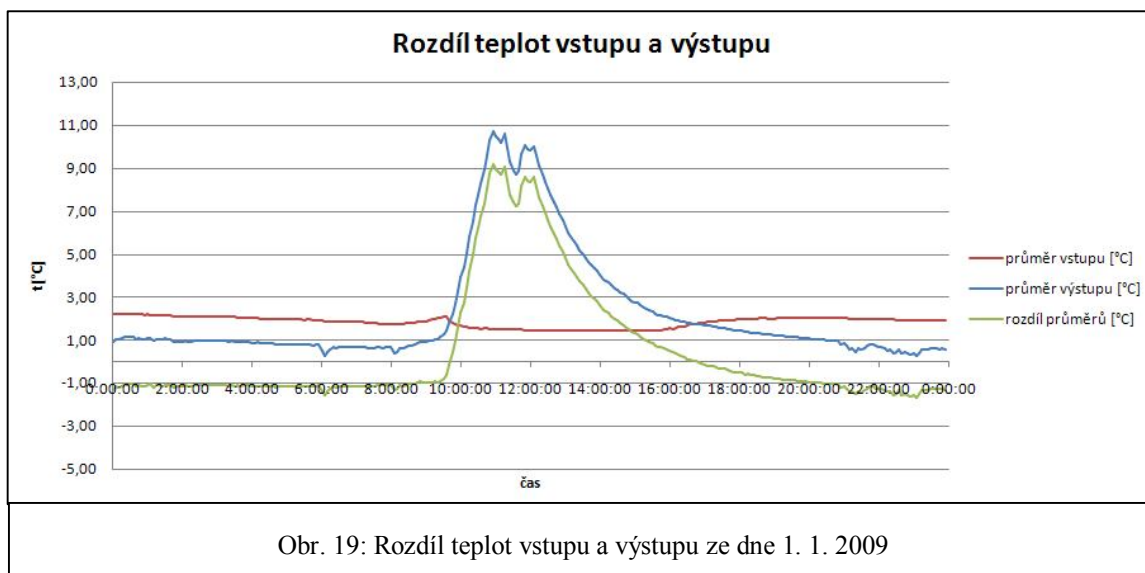
Pokud bude intenzita slunečního záření přes den průměrně dosahovat alespoň 350W/m^2 , bude zeď zahřátá natolik, že ani při cirkulaci vzduchu skrz Trombeho stěnu nebudou patrné žádné ztráty. Naopak – vzduch bude mít na výstupu z Trombeho stěny vždy vyšší hodnotu než na vstupu alespoň o $0,3^\circ\text{C}$. Důvodem je to, že teplo sálá ze zdi dovnitř domu, ale i ven, tedy do vzduchové mezery. Výborným příkladem jsou grafy ze dnů 10. 1. 2009 a 11. 1. 2009 (obr. 17, 18). Tyto dny byly velmi slunečné a teploty během celého dne klesly pod -18°C .



Obr. 17: Průběhy teplot ze dnů 10. 1. 2009 a 11. 1. 2009



Předchozí případ byl však příkladem ideálních dnů z hlediska intenzity záření. Obvykle je venkovní teplota sice vyšší, ale intenzity o několik set W/m^2 nižší. Většinu zimních dní proto Trombeho stěna vykazovala v noci vlivem cirkulace vzduchu ztráty, které průměrně dosahovaly přibližně $1,2^\circ\text{C}$. Typickým příkladem takového dne je 1. 1. 2009 (obr. 19).



Obr. 19: Rozdíl teplot vstupu a výstupu ze dne 1. 1. 2009

Velká ztráta je během zimních měsíců způsobena nedokonalou konstrukcí Trombeho stěny. Na vstupu do drenáží (teploty t_4 a t_5) byla po celou zimu teplota řádově o 5°C vyšší, než na vstupu do Trombeho stěny (teplota t_6). Tento rozdíl znamená největší ztrátu celého systému. Je to dáno prostým principem, že chladný vzduch klesá dolů. Když je stěna zahřátá, vzduch, který do ní vstupuje, je zahříván a stoupá vzhůru. Na výstupu je vzduch teplejší, než na vstupu. To je měřicím zařízením vyhodnoceno kladně a do činnosti se uvedou ventilátory, které umocňují cirkulaci vzduchu skrz Trombeho stěnu. Pokud je stěna chladnější, nebo jsou ztráty příliš velké, vzduch je naopak ochlazován a klesá dolů. V tomto případě to znamená, že zůstává při patě Trombeho stěny a částečně vstupuje zpět do přívodních kanálků. Protože je teplota vzduchu na výstupu nižší než na vstupu, ventilátory nejsou v chodu a chladný vzduch může postupovat přívodními kanálky a ochlazovat je.

Dalším činitelem významným pro ztráty je fakt, že do výšky 2,5m je zeď postavena z izolačních cihel Porotherm. Tato část zdi nemá dostatečné akumulční vlastnosti, takže není schopná se zahřát natolik, aby po celou noc mohla ohřívat vzduch proudící skrz ni. Podíváme-li se na průběh teploty t_6 , je tu tento vliv patrný. U čidla 6 je třeba

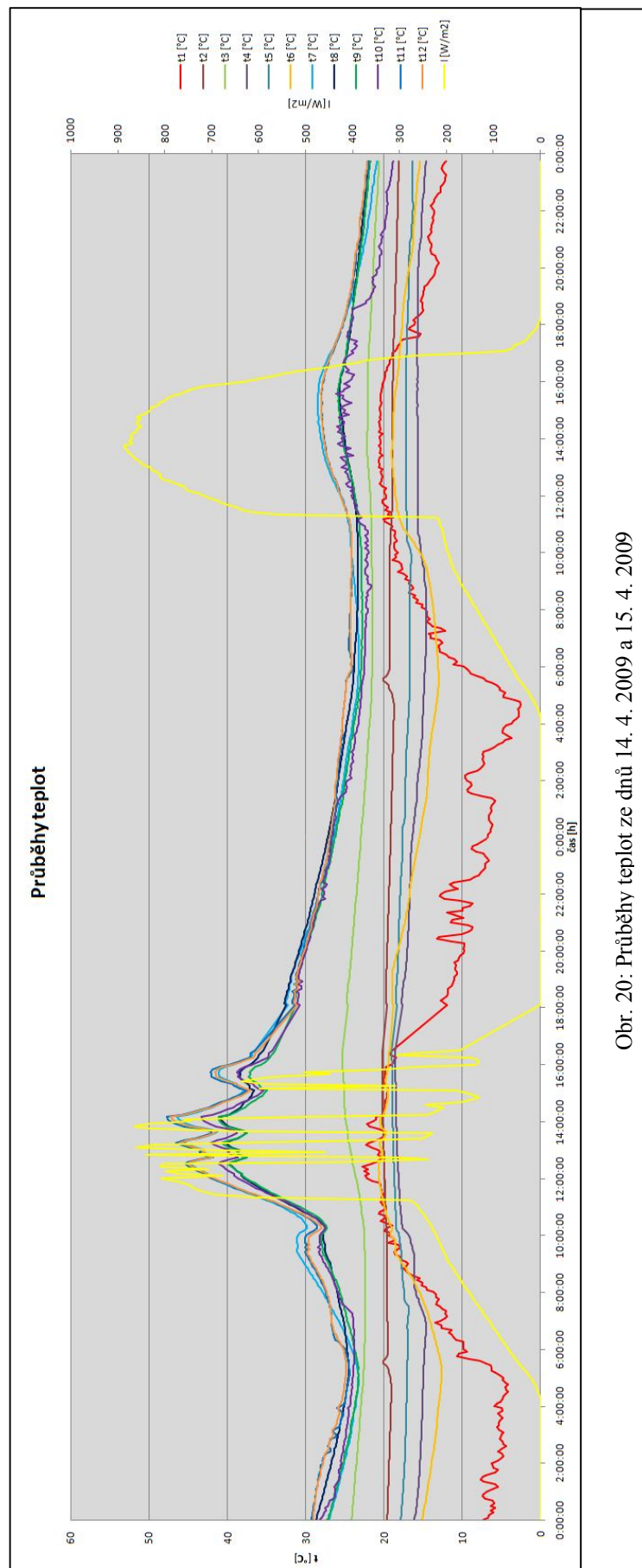
vzít v úvahu i další vlivy. Nacházelo se u paty Trombeho stěny, takže bylo ovlivněno i nižšími přízemními teplotami. To se projevilo hlavně v brzkých ranních hodinách. Po průchodu celou Trombeho stěnou však vzduch dosahoval alespoň přibližně stejné hodnoty, jaká byla naměřena v místnosti.

Cirkulace vzduchu skrz Trombeho stěnu je přínosem i bez zásahů do regulace, tedy v základním stavu (horní a dolní klapky otevřené, střední klapky a horní lišta uzavřeny). Pokud by byl dům obývaný, bylo by možné účinnost Trombeho stěny zvýšit její regulací - jednu až dvě hodiny po východu slunce otevřít dolní a horní klapky, aby se vzduch mohl ohřívat i od zdi, a po západu slunce všechny klapky opět zavřít. Současně by bylo vhodné zaizolovat drenáže pro přívod vzduchu do Trombeho stěny. Izolace nemusí být dokonalá, protože pokud bude dům obýván, bude vytápěn i jinak, než jen Trombeho stěnou. Podlaha domu tedy bude mít vyšší teplotu a tepelné ztráty v drenážích budou malé. Tím bude odstraněn zdroj největších ztrát systému.

Na jaře a na podzim je přínos Trombeho stěny nesporný. Venkovní teploty neklesají pod nulu a intenzita slunečního záření stačí dostatečně ohřívat stěnu a vzduch v ní. Se specifickými problémy se lze setkat během léta, kdy je vliv Trombeho stěny spíše nežádoucí. Vzhledem k tomu, že hlavní podíl na přitápění má cirkulace vzduchu, lze uzavřít horní a střední klapky Trombeho stěny a otevřít horní lištu. Tím bude ohřátý vzduch unikat mimo objekt a zároveň bude mírně ochlazovat stěnu. Ideálním řešením by však bylo přetažení reflexní fólie nebo instalace žaluzií, které by zabránily akumulaci tepla. Na stěnu by pak nedopadalo žádné sluneční záření a vliv Trombeho stěny by byl zcela eliminován.

3.1.3. Reflexní fólie

Trombeho stěna byla zakryta reflexní fólií MIRELON. Jedná se o pěnový polyetylen o tloušťce 5mm laminovaný hliníkovou fólií silnou 20μm. Jednotlivé pruhy byly spojeny izolepou. Celá reflexní fólie byla k Trombeho stěně připevněna oboustrannou lepicí páskou na skle a izolepou na rámu, což se bohužel ukázalo jako nedostačující a fólie byla větrem částečně stržena pravděpodobně ještě tutéž noc. Z naměřených hodnot lze usoudit, že reflexní fólie byla pravděpodobně strhávána postupně a dne 15. 4. měla ještě výrazný vliv na funkci Trombeho stěny, což je ostatně vidět při porovnání grafů ze dnů



14. 4. a 15. 4. (obr. 20). Teplota v Trombeho stěně byla přibližně o 20°C nižší při alespoň částečně účinné fólii. Z naměřených hodnot nelze plně určit účinek reflexní fólie. Je známý jen předpoklad a výsledky měření, není však znám průběh a podmínky experimentu. Lze jen usuzovat na to, že reflexní fólie může být významným regulačním prvkem Trombeho stěny.

3.1.4. Vliv použitých materiálů a způsobu provedení

Izolace vzduchové mezery se v zimních měsících ukázala jako nedostatečná. Bylo to však do značné míry způsobeno metodou měření, kdy vzduch mohl Trombeho stěnou proudit volně přes den i v noci. Pokud by se klapky na noc uzavíraly, byly by ztráty minimalizovány.

Účinnost Trombeho stěny byla snižována také špatným provedením dolních otvorů. Správně mají být dolní (nasávací) otvory provedeny svisle, aby přes ně mohla být pověšena lehká fólie. Ta je teplým vzduchem nadnášena a umožňuje mu procházet Trombeho stěnou a ohřívat se. Pokud je vzduch v Trombeho stěně studený, klesá dolů a fólie je přitlačena na otvor, takže chladný vzduch nemůže pronikat do místnosti nebo přírodních trubek. Provedení Trombeho stěny v Netunicích bohužel tuto úpravu značně ztěžuje. Vstupní otvory jsou totiž umístěny ve vodorovné poloze.

Vzhledem k tomu, že pata Trombeho stěny je umístěna těsně při zemi, je zvláště v ranních hodinách na teplotě vzduchu patrný negativní vliv přízemní teploty. Ta je zejména v ranních hodinách vždy nižší než teplota měřená ve výšce 2m nad zemí a i přes izolační dvojsklo vzduch proudící do Trombeho stěny značně ochlazuje, což je patrné z grafů Průběhy teplot. Teplejší vzduch proudící z místnosti je u paty Trombeho stěny značně ochlazován – až o 4°C. Nabízí se řešení spodních 20cm Trombeho stěny zaizolovat, což však není ideální a spíše by to účinnosti uškodilo. V současné podobě již tento problém nelze efektivně řešit. V dalších provedeních u jiných domů lze doporučit usadit Trombeho stěnu přibližně 20cm nad terén. Vliv přízemních teplot tak bude omezen.

Velké ztráty jsou způsobeny nevhodným izolačním dvojsklem. Současné izolační dvojsklo má součinitel prostupu tepla udávaný výrobcem $U = 2,8$ až $3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Z těchto hodnot je patrné, že izolační schopnost instalovaného dvojskla je minimální,

což se projevilo zejména v zimním období. Pokud by byl dům vytápěn, ztráty by byly mnohem větší kvůli většímu tepelnému spádu mezi vzduchovou mezerou a okolím. Z uvedeného vyplývá, že pro další projekty je třeba použít izolační dvojsklo s nižším součinitelem prostupu tepla. Dobrým kompromisem mezi cenou a kvalitní izolací jsou skla se součinitelem prostupu tepla přibližně $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. To odpovídá izolačním dvojsklům v oknech, která jsou dnes již běžně používána.

Dalším významným faktorem je to, že do výšky 2,5m je zeď vstavěna z Porothermu a od 2,5m do výšky 5m je vystavěna z pálených cihel. Měřením povrchových teplot stěn uvnitř domu bylo potvrzeno, že cihly lépe akumulují teplo a lépe ho vyzařují. Pokud by zeď byla vystavěna celá z pálených cihel, naakumulovala by více tepla a mohla by intenzivněji a déle vyhřívat místnost uvnitř domu. V období silných mrazů a horkých dnů je ale lepší Porotherm. V zimě zeď v noci rychle nepromrzne a lépe tedy zabraňuje únikům tepla. V létě se naopak pomaleji zahřívá a vliv sálavého tepla – v létě nežádoucího – je snížen.

3.1.5. Celkové zhodnocení přínosu Trombeho stěny

Při stavbě Trombeho stěny vznikly některé technologické nedostatky, zřejmě vlivem nedostatečných zkušeností. Jsou to především špatně umístěné nasávací otvory a odsazení paty Trombeho stěny od terénu. Dalším významným nedostatkem je zastínění stěny v odpoledních hodinách přístřeškem (obr. 21). V zimním období tento vliv není tolik znatelný, protože slunce zapadá již mezi čtvrtou a pátou hodinou odpolední. Na jaře a na podzim je však přibližně od čtyř hodin Trombeho stěna zastíněna přístřeškem, i když slunce ještě nezapadlo. Pro skutečně efektivní přitápění je důležité, aby Trombeho stěna po celý den nebyla ničím stíněna.

V letním období může být vliv Trombeho stěny nežádoucí. V takovém případě lze vystavět zeď Trombeho stěny z cihel typu „therm“, nebo může být přes stěnu natažena reflexní fólie, nebo může být Trombeho stěna opatřena žaluziovým systémem. Zajímavým návrhem řešení je vysazení opadavých stromů před Trombeho stěnu. V létě, kdy jsou stromy olistěné, brání dopadu slunečních paprsků na stěnu. V zimě stromy postrádají listy a sluneční záření může stěnu zahřívat. Toto řešení však skrývá některá úskalí. Pokud stromy nejsou vzrostlé, neplní svojí regulační funkci. Pokud vzrostlé jsou,

mohou vyvstat další potíže. Na podzim, kdy je již třeba přitápění, nemusí být stromy ještě opadané, takže je potlačena funkce Trombeho stěny. V zimě, kdy už stromy listí nemají, a kdy je přitápění třeba nejvíce i s ohledem na ztráty vznikající velkým tepelným spádem, mohou stínit větve. Na první pohled to není nijak významné, ale z výsledků měření je patrné, že v zimním období je třeba „každý watt“.



Obr. 21: Zastínění Trombeho stěny přístřeškem

Celkově je tato Trombeho stěna jednoznačným přínosem pro přitápění domu. Vezme-li se v potaz základní požadavek majitele objektu, aby dům v zimě nepromrznul, plní Trombeho stěna svůj účel velmi dobře. Pokud by měla být plnohodnotným přitápěcím systémem, je třeba její regulace.

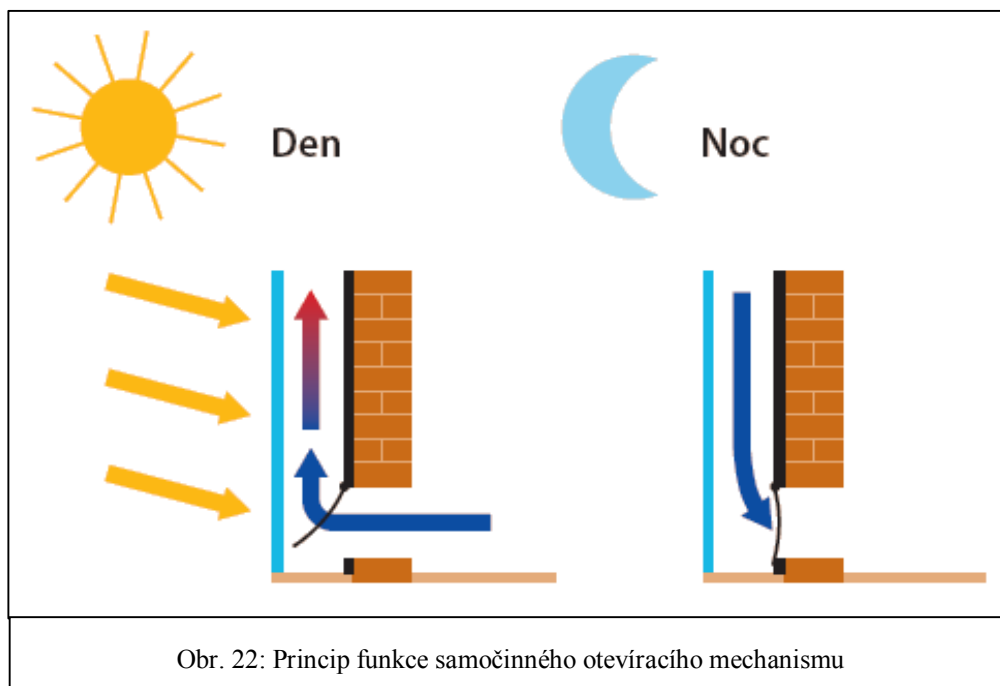
Vyvstává otázka, zda bude Trombeho stěna přínosem i v případě, že se v zimě bude v objektu topit. Uvnitř Trombeho stěny bude větší tepelný spád mezi vzduchovou mezerou a vnějším okolím a ztráty tak budou větší. Tato otázka je námětem pro další měření.

3.2. Zlepšovací návrhy

Konkrétní provedení Trombeho stěny v objektu v Netunicích u Plzně by mohlo doznat několika zlepšení, kterými by se zvýšila její účinnost.

Z výsledků měření vyplývá, že izolace vzduchové mezery mezi sklem a zdí je nedostatečná. V současné době je Trombeho stěna osazena dvojitým izolačním sklem, které se ukázalo jako nedostačující. Jediným možným řešením by bylo přidání další vrstvy skla. Množství propuštěného světla a tedy i energie by bylo přibližně stejné, ale bylo by lépe zabráněno únikům tepla ze sálající stěny. Toto řešení by ovlivnilo účinnost cirkulace vzduchu mezi místností a Trombeho stěnou, takže v noci by i při otevřených horních klapkách docházelo k menším ztrátám tepla.

Významné ztráty vznikaly nedokonalou konstrukcí Trombeho stěny, konkrétně absencí samočinného uzavírání vstupních otvorů. V tomto případě lze doporučit obvyklý mechanismus založený na principu stoupání teplého vzduchu (obr. 22). Teplý vzduch tak nadnáší fólii, která by v tomto případě musela být velmi lehká, a tím je otvor otevírán. Pokud je vzduch studený, klesá dolů a fólie je přitlačena na otvor, který je takto uzavřen. Tímto jednoduchým samočinným mechanismem by bylo dosaženo lepší účinnosti, protože v chladných dnech by nedocházelo k ochlazování interiéru vlivem cirkulace studeného vzduchu ochlazovaného v Trombeho stěně.



Pro toto provedení by bylo vhodné zvážit instalaci jednoduchého systému žaluzií nebo reflexní fólii. Zda bude v letních měsících efekt Trombeho stěny nežádoucí, však záleží na dalším pozorování a měření.

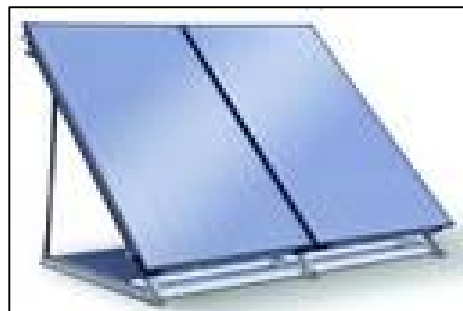
Pro úplnou optimalizaci činnosti Trombeho stěny by bylo vhodné vyvinout samoregulační systém. Ten by byl tvořen třemi teplotními čidly – jedno pro snímání teploty na vstupu do Trombeho stěny, druhé a třetí pro snímání teploty na výstupu u středních a horních otvorů. Dále by bylo potřebné vyhodnocovací zařízení a mechanismy zajišťující pohyb klapky. Teplotní čidlo na vstupu by sloužilo i pro měření teploty v místnosti. Pokud by teplota na vstupu byla nižší než na výstupu, byly by otevřeny horní, popř. střední klapky a horní lišta uzavřena. Pokud by teplota na vstupu byla vyšší než na výstupu, horní (střední) klapky by byly uzavřeny. Pokud by teplota v místnosti přesáhla stanovenou mez, byly by uzavřeny horní i střední klapky a otevřena horní lišta. Nyní je tato regulace prováděna ručně a záleží na úsudku obyvatel, jakým způsobem budou vliv Trombeho stěny regulovat.

Regulační mechanismy potřebují vlastní pohon. Možným řešením je instalace malého fotovoltaického systému, který by sloužil jen pro tento účel, a který by byl umístěn co nejbližší Trombeho stěny. Pokud by na panel dopadal dostatek záření, znamenalo by to, že i Trombeho stěna bude fungovat dostatečně efektivně, a regulační systém by byl uveden do chodu. Klapky by mohly být udržovány otevřené díky dodávkám energie z fotovoltaického panelu. Pokud by intenzita slunečního záření poklesla natolik, že by energie k pokrytí těchto požadavků nestačila, klapky by vlastní vahou uzavřely otvory.

4. Technické a ekonomické porovnání Trombeho stěny s klasickými solárními kolektory

4.1. Popis solárních kolektorů

Solární kolektory mohou přeměňovat sluneční záření v tepelnou nebo elektrickou energii, podle toho, jaké je jejich konkrétní provedení. Tuto energii je třeba velmi brzy využít. Pro potřeby této práce se budeme věnovat jen kolektorům pro ohřev vody nebo vytápění domu. (obr. 23)



Obr. 23: Ukázka solárního kolektoru

4.1.1. Princip solárních kolektorů

Základním principem solárních kolektorů je skleníkový efekt. Dopadající sluneční záření se přeměňuje v teplo a je zachyceno pod průhledným, nejčastěji skleněným, krytem v absorběru. Mezi absorbérem a krytem se nachází izolace. Izolací může být vzduch nebo vakuum, a zabraňuje únikům tepla do okolí.

Absorbér je vyroben z teplotně dobře vodivého materiálu, nejčastěji mědi nebo hliníku, a je natřen černou barvou, aby se co nejvíce snížila odrazivost záření. Celkově absorbér odrazí přibližně 10% dopadajícího slunečního záření. Je-li požadavek na vyšší účinnost a tedy nižší ztráty odrazem záření, je možné použít místo obyčejné černé barvy selektivní nátěr, protože má mnohem menší emisivitu v oblasti infračerveného záření. Další výhodou selektivního nátěru je jeho delší trvanlivost oproti obyčejné barvě. V absorběru je ohříváno teplotnosné médium, které následně proudí do výměníku a vrací se zpět do kolektoru. Ve výměníku se teplo z média předává do vody v zásobníku, kterou je pak možné vytápět dům nebo ji použít jako užitkovou vodu. Médium může ve výměníku ohřívat i vzduch, ale ten je možné využít jen pro přitápění.

Mezi absorbérem a zadní stěnou kolektoru je další izolace, která je může být provedena skelnou nebo minerální vatou nebo různými druhy PU.

Celý výše popsaný systém je zasazen do tzv. vany. Ta může být vyrobena z různých

materiálů. Nejčastěji jsou to kovy, např. hliník, ale lze použít i trvanlivé plasty nebo dřevo.

4.1.2. Médium

Médiem je kapalina nebo plyn. Podle média můžeme dělit solární kolektory na vzduchové a kapalinové. Médiem může být vzduch, olej, voda, případně směs vody s nemrznoucí příměsí. Konkrétní druh média má zásadní vliv na konečné umístění a použití solárního kolektoru. Některé kolektory se používají především v zimě, protože jsou schopny fungovat i při teplotách mírně pod bodem mrazu, jejich médium nezamrzá a efektivně využívají i značně rozptýlené sluneční světlo.

Nejobvyklejším a nejlevnějším médiem je voda, případně její směs s glycerolem. V takovém provedení se kolektory používají zejména pro ohřev vody a její další využití při vytápění domu.

4.1.3. Umístění a velikost solárních kolektorů

Pro umístění a správnou volbu velikosti solárních kolektorů platí několik základních pravidel. Nejprve je třeba rozhodnout, pro jaké účely bude kolektor použit, zda pro vytápění nebo pro ohřev vody. Také je nutné kolektory optimálně nastavit tak, aby jejich sklon odpovídal dopadu slunečních paprsků. Pokud se kolektory automaticky nenastavují, instalují se se sklonem mezi 30° a 40°. Při instalacích mimo střechu lze nastavit kolektor na jakýkoliv sklon.

V případě vytápění domu je třeba použít takovou plochu kolektoru, aby pokryla spotřebu tepla, případně požadovanou část spotřeby. Obecně platí, že na 10m² obytné plochy je třeba 1÷2m² kolektoru. Přítápěcí systémy pro rodinné domy dosahují obvykle kolektorové plochy do 20m². Je-li kolektorová plocha větší, musí se zvážit, jak se bude odvádět a využívat přebytečné teplo v letních měsících. Jedním z řešení může být vyhřívání bazénu. Další možností je zakrývání kolektorové plochy reflexní fólií, která odrazí většinu záření. I tak je ale zvláště v teplých měsících kolektor zahříván. Obecně však tento problém zůstává nevyřešen, protože regulace solárních kolektorů je technicky i ekonomicky velmi náročná. Proto se tato technologie používá spíše pro

přítápění nebo předeřev vytápěcího média a zbylý rozdíl teploty předeřátého média od požadované teploty je dorovnán tradiční metodou.

Pokud se bude jednat o ohřev vody, je nutné dimenzovat plochu kolektorů podle spotřeby vody v daném objektu. Pro tyto potřeby se vychází z hodnot spotřeby vody na osobu – nízká, střední, vysoká. Při nízké spotřebě se spotřeba vody pohybuje mezi 30-ti až 40-ti litry na osobu a den. Při střední spotřebě je to 50 až 60 litrů a při vysoké 70 až 100 litrů na osobu a den. Obecně platí, že kolektor o ploše 1 až 2m² pokryje spotřebu jedné osoby na jeden den. Zároveň je ale nutné uvažovat i o přiměřeném objemu zásobníku teplé vody. Zpravidla 1m² kolektoru odpovídá 50 až 80 litrům objemu zásobníku. Použijeme-li jako zásobník bojler, je po příslušných úpravách možné ohřívát vodu i na vyšší teploty, případně ji ohřívát v noci nebo v zimních měsících. I zde ovšem platí, že ohřátou vodu je nutné spotřebovávat.

Potřebná plocha pro ohřev média je závislá na použité technologii a účinnosti. Je-li solární systém málo účinný, je třeba větší kolektorové plochy a naopak.

Solární kolektory je možné instalovat na různá místa, je však třeba respektovat konkrétní provedení kolektoru. Kolektor tedy lze umístit na ploché i zešíkmené střechy domů, ale i na zcela svislé plochy – tzv. solární fasády (obr. 24).



Obr. 24: Solární fasáda

V současné době již není nutné obávat se vizuálního efektu, spíše naopak. Vhodně umístěný solární kolektor může být zajímavým, atraktivním a především praktickým architektonickým prvkem. Navíc jsou solární kolektory vyráběny v různých velikostech.

Škála míst, kam je lze instalovat, je široká – zdi a střechy rodinných i panelových domů, výplň plotů, použití kolektorů namísto střešní krytiny apod.

Při použití solárních kolektorů je nutné počítat s podpůrnými systémy, které umožní tuto technologii náležitě využít. Tím jsou myšleny rozvody vody, vytápění apod. Tato podmínka je u některých domů značně omezující, protože jejich konstrukce či použité materiály znemožňují větší zásahy.

4.2. Porovnání Trombeho stěny se solárními kolektory

Pro porovnání solárních kolektorů a Trombeho stěny je třeba shrnout výhody a nevýhody obou.

Solární panely obecně mají vysokou účinnost vzhledem k ploše, což je jejich hlavní výhodou. Díky rozvinuté technologii jsou solární kolektory schopny efektivně využívat i rozptýlené záření o nízké intenzitě. Lze je umístit na různá nezastíněná místa a svým vzhledem mohou tvořit zajímavý prvek objektu. Při použití vhodného výměníku je možné použít vyrobené teplo buď přímo k vytápění, nebo ohřevu vody. Mezi hlavní nevýhody solárních kolektorů patří vysoká počáteční investice, která může v současné době činit 50 000Kč až 250 000Kč za kompletní systém v závislosti na kolektorové ploše a dalších nutných instalacích. Dále je nutné počítat s podpůrnými systémy, prostorem na bojler a rozvody vody, případně vzduchu. Instalace samotných panelů je poměrně snadná, ale instalace celého systému do staršího domu může být velmi obtížná. Technologie samotného kolektoru je velmi složitá a je třeba, aby systém navrhl odborník. I v případě poruchy je nutné posouzení odborníka. Na druhou stranu jsou kolektory velmi spolehlivé a závady se vyskytují jen výjimečně.

Trombeho stěna má velmi jednoduchý princip založený na základních fyzikálních principech. Oproti solárním kolektorům je velmi levná. V závislosti na její velikosti a použitých materiálech se její cena pohybuje od jednotek tisíc do desítek tisíc Kč, přičemž je možné ji postavit svépomocí. Je však nutné dát pozor na netěsnosti a izolaci skleněné plochy. Další výhodou je snadná regulace a téměř odpadají problémy s přebytky tepla. Regulace je prováděna pomocí otevírání a zavírání klapky a otevírací lišty v horní části stěny. Po zabudování poměrně jednoduchého systému s termostatem může být Trombeho stěna i samoregulační, takže nebude potřebovat téměř žádnou

obsahu. Velkou výhodou zejména v zimním období je sálání tepla ze stěny do místnosti. Tím je dosahováno lepší tepelné pohody člověka i při celkově nižších teplotách. Nevýhodou je malá efektivita oproti solárním kolektorům. I tak je ale Trombeho stěna schopna využít i značně rozptýlené záření k akumulaci tepla a ohřevu vzduchu. Pokud není použito dvojsklo, a zůstávají otevřené otvory ve stěně, v noci v zimních měsících může docházet ke značným únikům tepla vlivem nedokonalé izolace. Tyto úniky je však snadné podstatně snížit prostým uzavřením klappek.

V zásadě nelze jednoznačně říci, zda je lepší pořizovat solární kolektory nebo Trombeho stěnu. Každý systém má svá specifika, výhody a nevýhody. Při rozhodování záleží na situaci a konkrétních podmínkách. Ve starších domech, kdy by instalace Trombeho stěny byla náročná, nebo by nebyly splněny základní podmínky – orientace na jih, absence zastínění, vhodný materiál zdi – je výhodnější použít solární kolektory. Solární kolektory jsou lepší i v případě, že chceme nejen vytápět, ale také ohřívat vodu. V některých typech domů je instalace samotných solárních kolektorů snadná, avšak není způsob, jak instalovat podpurné systémy včetně zásobníku či bojleru. Pokud se navíc nedostává financí, je ideálním řešením Trombeho stěna. Ta také nabízí možnost ohřevu vody, jedná se ale jen o vedlejší funkci.

Po zvážení všech aspektů lze říci, že pro přitápění domu jsou lepší solární kolektory. Neovlivňují izolaci domu a tak k tepelné bilanci mohou jen přidat. Díky zásobníku na ohřátou vodu jsou dodávky tepla poměrně vyrovnané. Nedokážou však aktivně přispívat k tepelné pohodě člověka v místnosti vlivem sálavého tepla.

Zajímavou možností je kombinace obou systémů (obr. 25). Tím by bylo využito všech zmíněných výhod. Obecně o takové úpravě lze uvažovat spíše u nových domů, protože kombinace těchto systémů může být náročná na stavební úpravy. Samozřejmostí je důkladná tepelná izolace domu. S takovými úpravami by bylo možné ušetřit značné finanční náklady na vytápění.



Obr. 25: Kombinace solárních panelů a Trombeho stěny

5. Návrh Trombeho stěny s přihlédnutím k výsledkům měření

5.1. Vhodnost domu pro výstavbu Trombeho stěny

Dům, který má být vybaven Trombeho stěnou, musí splňovat několik podmínek, jež zaručují co nejvyšší možnou efektivitu systému. Ne každý dům tyto podmínky splňuje. U některých domů může dokonce dojít ke zvýšení množství tepla potřebného k vytápění a tedy i finančních nákladů. Nejlépe je počítat s umístěním Trombeho stěny již v projektu s ohledem na všechny požadavky, které jsou na Trombeho stěnu kladeny.

Jedním z nejdůležitějších kritérií je materiál, z něhož je postavena zeď domu. Na jedné straně je nutné zvažovat izolační schopnost daného materiálu, na straně druhé je třeba zajistit primární, tedy akumulární, funkci Trombeho stěny. Je třeba zvolit takový materiál, který nejlépe tvoří kompromis mezi izolační a akumulární schopností. Jak je patrné z výsledků měření, nejvhodnějšími materiály jsou materiály podobné páleným cihlám. Jejich izolační schopnost je sice horší než izolačních cihel typu „therm“, ale výborně akumulují teplo. Akumulace a postupné uvolňování tepla je pro funkci Trombeho stěny zásadní. Přes den se vlivem slunečního záření zeď ohřívá a po západu slunce se naakumulované teplo vyzařuje do okolí, tedy zejména dovnitř domu.

Další velmi důležitou podmínkou je jižní orientace Trombeho stěny. Pokud bude stěna orientována na jih, můžeme očekávat vysoký příspěvek k vytápění domu. Pokud je stěna natočena jinak, snižuje se její účinnost. Nelze-li orientovat Trombeho stěnu přímo na jih, je možné ji postavit na té zdi, která se k tomuto směru nejvíce přibližuje. Obecně lze říci, že o stavbě Trombeho stěny můžeme uvažovat při průměrné zimní denní intenzitě slunečního záření nad 300W/m^2 na konkrétním místě.

K co nejlepší funkci celého systému je třeba, aby Trombeho stěna byla tvořena co největší plochou, takže k výstavbě je vhodná zeď bez dveří a oken. V zásadě je možné postavit Trombeho stěnu v jakékoliv výšce a v jakémkoliv tvaru, ale realizace takového projektu může být náročná. Také je nutné počítat s horší izolační vlastností dané zdi, takže by docházelo k významným únikům tepla zejména kolem oken. Nejvhodnější je co největší souvislá plocha.

Dále je třeba se ujistit, že stěnu nebude nic významně zastiňovat, jako např. stromy,

keře, přístřešky, jiné budovy apod. Trombeho stěna získává největší podíl tepla z přímého slunečního záření, nikoliv z okolní teploty, takže čím více bude stěna zastíněna, tím menší bude tepelný zisk. Navíc nebudou kompenzovány tepelné ztráty vlivem nedokonalé izolace a může docházet k únikům tepla.

Aby Trombeho stěna mohla plnit svoji primární funkci, není žádoucí před ni umisťovat velké předměty jako např. skříně či jiný nábytek. Nábytek by fungoval jako tepelná bariéra a tím by bylo zabráněno sálání tepla do místnosti, což je nežádoucí. Vhodné umístění je např. u schodiště.

Posledním a nejméně důležitým kritériem je estetická funkce Trombeho stěny. U nově postavených domů může být Trombeho stěna zajímavým doplňkem, se kterým projekt přímo počítá. Naproti tomu u starších domů může být pro některé vlastníky domů černý nátěr se skleněnou lesklou plochou Trombeho stěny vzhledově nepřijatelný. Opatrnost lze doporučit u domů, které jsou umístěny v lokalitách chráněných oblastí nebo památkových zónách. V takovém případě je třeba žádat o povolení příslušný úřad.

5.2. Návrh a stavba Trombeho stěny

Protože je Trombeho stěna jednoduchým pasivním přitápěcím systémem, je možné si ji postavit svépomocí. Při návrhu je nutné vzít v potaz podmínky vhodnosti objektu k takové stavbě, které jsou uvedeny v kapitole 5.1. Je vhodné, aby Trombeho stěnu bylo možné v letním období zakrýt reflexní fólií. Z měření vyplynulo, že Trombeho stěna by nepříznivě ovlivňovala teplotu uvnitř místnosti. V letních měsících je třeba, aby uvnitř domu bylo pokud možno chladno, což by při funkční Trombeho stěně nebylo možné zajistit.

Pokud se jedná o novostavbu nebo je ta možnost, v podlaze se vyhloubí drenáže pro přívod vzduchu do Trombeho stěny i ze vzdálených koutů místnosti. Zajišťuje to lepší cirkulaci vzduchu a efektivitu Trombeho stěny. Samotná zeď má být vystavěna z pálených cihel nebo z jiného materiálu, který dobře akumuluje teplo, přičemž se ve zdi nechají otvory pro proudění vzduchu. K dolním otvorům je možné přidat ventilátory pro umocnění cirkulace vzduchu. Pak se zeď omítne a natře černou barvou. Otvory pro průchod vzduchu se orámují a opatří uzavíratelnými klapkami. Při tom je vhodné myslet i na způsob jejich ovládání např. lanky nebo jiným mechanickým systémem. Následně

se ke zdi upevní rám a pomocí tmelů nebo izolační pěny se zaizoluje kolem zdi kvůli únikům teplého vzduchu a průniku vlhkosti. Poté se do rámu upevní skleněné tabule izolačního dvojskla a rovněž se zaizolují tmelem nebo izolační pěnou.

Závěr

Ve své diplomové práci jsem zhodnotila možnosti využití Trombeho stěny v podmínkách České republiky.

Trombeho stěna se podle provedeného měření ukázala být zajímavou možností přitápění. Přihlédneme-li ke skutečnosti, že měřený systém nebyl účinně regulován, výsledky jsou velmi dobré. Požadavek majitele, že dům musí být po celou zimu temperován, aby za nepřítomnosti obyvatel nepromrzl, splnila měřená Trombeho stěna v Netunicích u Plzně i navzdory velkým tepelným ztrátám vzniklých chybami v konstrukci. Největším nedostatkem je špatně izolující sklo, kde vznikají největší ztráty. Při základní regulaci však i tato Trombeho stěna může být dobrým přitápěcím systémem.

Použití Trombeho stěny pro další objekty lze při splnění podmínek umístění jen doporučit zvláště pro temperování velkých prostor, jako jsou např. sklady, výrobní haly, společenské sály apod., nebo pro temperování objektů, které jsou používány jen zřídka nebo příležitostně, např. chaty. U menších objektů jako jsou rodinné domy lze použít Trombeho stěnu přímo pro přitápění nebo pro předehřev vody, u pasivních domů lze princip Trombeho stěny využít pro ohřev větracího vzduchu.

Má-li být Trombeho stěna plnohodnotným přitápěcím systémem, je třeba její regulace. Velmi vhodné je proto použití samočinného regulačního systému, který však zpravidla potřebuje energii pro pohon. Navíc lze použít malého fotovoltaického panelu, který potřebnou energii obstará. Regulační systém by však musel být do značné míry specifický pro každé provedení Trombeho stěny. Bude-li použito pro regulační systém napájení ze sítě, Trombeho stěna ztrácí statut pasivního systému.

V podmínkách České republiky funguje Trombeho stěna velmi dobře. Důvodem, proč se u nových domů zpravidla nepoužívá, je, že tento systém není dost dobře znám. Projektanti v současné době nemají dostatek informací a zkušeností, aby takový systém mohli správně navrhnout. Měření Trombeho stěny v Netunicích je proto výchozím bodem pro návrhy vylepšení, studium materiálů, konstrukce a celkového provedení.

Velmi důležité je další měření. Je třeba proměřit, jak funguje Trombeho stěna v letních měsících, aby bylo možné navrhnout účinné a přiměřené zastínění Trombeho stěny. Pro

skutečné určení účinnosti Trombeho stěny bude nutné získat nové hodnoty v průběhu zimy, kdy bude systém regulován. Takto určená účinnost bude však i tak jen orientační, protože každá Trombeho stěna má svá specifika – umístění, použité materiály, možnosti regulace apod.

Použití Trombeho stěny v našich podmínkách vyžaduje důkladnější přípravu z hlediska použitých materiálů než v teplejších a slunnějších oblastech, jako je např. Francie. Naproti tomu není třeba žádných speciálních či nedostupných materiálů. Všechny jsou běžně dostupné a je možné si Trombeho stěnu postavit svépomocí jako levný pasivní přitápěcí systém.

Nelze než doufat, že se Trombeho stěna stane běžným prvkem na nových i starších domech.

Použitá literatura a zdroje

- [1] Nagy E. – *Nízkoenergetický ekologický dům*, Jaga 2002
- [2] Petráš D. a kolektiv – *Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie*, Jaga 2008
- [3] Florián M. – *Inteligentní skleněné fasády*, ČVUT 2005
- [4] <http://www.heliostar.cz/slunecni-kolektory.php>
- [5] <http://www.obb.cz/produkty/solarni-kolektory-bramac/>
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Trombe_wall
- [7] <http://www.envic-sdruzeni.cz/aktuality/aktuality-obsah/trombeho-stena-zakladni-informace.htm>

Seznam příloh

- [1] Protokoly o využívání domu v průběhu měření
- [2] CD „Naměřené a zpracované hodnoty“
- [3] Informační brožura pro veřejnost vypracovaná pro Envic o.s.

Protokoly o využívání domu v průběhu měření:

datum	délka pobytu	počet lidí	topení	větrání - intenzita		frekvence průchoďů		horní klapky otevřeno	střední klapky otevřeno	zavřeno	změna termostatů, folie, jiný zásah
				málo	středně	málo	středně				
27.9.	15-16	2	ANO	x		x		x	23°	x	
28.9.	16-17	2	ANO	x		x		x		x	
29.9.	17-18	1	—	—		x		x		x	
30.9.	18-19	1	—	—		x		x		x	
1.10.	19-20	5	—	—		x		x		x	
2.10.	20-21	4	—	—		x		x		x	
3.10.	21-22	4	ANO	x				x		x	
4.10.	22-23	4	ANO	—				x		x	
5.10.	23-24	4	—	—				x		x	
6.10.	24-25	4	—	—				x		x	
7.10.	25-26	4	—	—				x		x	
8.10.	26-27	2	ANO	—				x		x	
9.10.	27-28	2	ANO	—				x		x	
10.10.	28-29	2	ANO	—				x		x	
11.10.	29-30	1	ANO	—				x		x	
12.10.	30-11	1	ANO	—				x		x	
13.10.	1-12	2	ANO	—				x		x	
14.10.	12-13	2	ANO	—				x		x	
15.10.	13-14	2	ANO	—				x		x	
16.10.	14-15	2	ANO	—				x		x	
17.10.	15-16	1	ANO	—				x		x	
18.10.	16-17	2	ANO	—				x		x	
19.10.	17-18	1	ANO	—				x		x	
20.10.	18-19	1	ANO	—				x		x	
21.10.	19-20	1	ANO	—				x		x	
22.10.	20-21	1	ANO	—				x		x	
23.10.	21-22	1	ANO	—				x		x	
24.10.	22-23	1	ANO	—				x		x	
25.10.	23-24	1	ANO	—				x		x	
26.10.	24-25	1	ANO	—				x		x	
27.10.	25-26	1	ANO	—				x		x	
28.10.	26-27	1	ANO	—				x		x	
29.10.	27-28	1	ANO	—				x		x	
30.10.	28-29	1	ANO	—				x		x	
31.10.	29-30	1	ANO	—				x		x	
1.11.	30-11	1	ANO	—				x		x	
2.11.	1-12	1	ANO	—				x		x	
3.11.	12-13	1	ANO	—				x		x	
4.11.	13-14	1	ANO	—				x		x	
5.11.	14-15	1	ANO	—				x		x	
6.11.	15-16	1	ANO	—				x		x	
7.11.	16-17	1	ANO	—				x		x	
8.11.	17-18	1	ANO	—				x		x	
9.11.	18-19	1	ANO	—				x		x	
10.11.	19-20	1	ANO	—				x		x	
11.11.	20-21	1	ANO	—				x		x	
12.11.	21-22	1	ANO	—				x		x	
13.11.	22-23	1	ANO	—				x		x	
14.11.	23-24	1	ANO	—				x		x	
15.11.	24-25	1	ANO	—				x		x	
16.11.	25-26	1	ANO	—				x		x	
17.11.	26-27	1	ANO	—				x		x	
18.11.	27-28	1	ANO	—				x		x	
19.11.	28-29	1	ANO	—				x		x	
20.11.	29-30	1	ANO	—				x		x	
21.11.	30-12	1	ANO	—				x		x	
22.11.	1-12	1	ANO	—				x		x	
23.11.	12-13	1	ANO	—				x		x	
24.11.	13-14	1	ANO	—				x		x	
25.11.	14-15	1	ANO	—				x		x	
26.11.	15-16	1	ANO	—				x		x	
27.11.	16-17	1	ANO	—				x		x	
28.11.	17-18	1	ANO	—				x		x	
29.11.	18-19	1	ANO	—				x		x	
30.11.	19-20	1	ANO	—				x		x	
1.12.	20-21	1	ANO	—				x		x	
2.12.	21-22	1	ANO	—				x		x	
3.12.	22-23	1	ANO	—				x		x	
4.12.	23-24	1	ANO	—				x		x	
5.12.	24-25	1	ANO	—				x		x	
6.12.	25-26	1	ANO	—				x		x	
7.12.	26-27	1	ANO	—				x		x	
8.12.	27-28	1	ANO	—				x		x	
9.12.	28-29	1	ANO	—				x		x	
10.12.	29-30	1	ANO	—				x		x	
11.12.	30-1	1	ANO	—				x		x	
12.12.	1-12	1	ANO	—				x		x	
13.12.	12-13	1	ANO	—				x		x	
14.12.	13-14	1	ANO	—				x		x	
15.12.	14-15	1	ANO	—				x		x	
16.12.	15-16	1	ANO	—				x		x	
17.12.	16-17	1	ANO	—				x		x	
18.12.	17-18	1	ANO	—				x		x	
19.12.	18-19	1	ANO	—				x		x	
20.12.	19-20	1	ANO	—				x		x	
21.12.	20-21	1	ANO	—				x		x	
22.12.	21-22	1	ANO	—				x		x	
23.12.	22-23	1	ANO	—				x		x	
24.12.	23-24	1	ANO	—				x		x	
25.12.	24-25	1	ANO	—				x		x	
26.12.	25-26	1	ANO	—				x		x	
27.12.	26-27	1	ANO	—				x		x	
28.12.	27-28	1	ANO	—				x		x	
29.12.	28-29	1	ANO	—				x		x	
30.12.	29-30	1	ANO	—				x		x	
31.12.	30-1	1	ANO	—				x		x	

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto diplomovou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis