



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**KONCEPCE TEPELNÉ OBÁLKY LEHKÉHO HABITATU
PRO EXTRÉMNÍ PROSTŘEDÍ**

CONCEPT OF THERMAL ENVELOPE OF HABITAT FOR EXTREME ENVIRONMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kučera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Jan Kučera
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Koncepce tepelné obálky lehkého habitatu pro extrémní prostředí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelná obálka je klíčovým prvkem habitatu pro extrémní prostředí. Její parametry zásadním způsobem ovlivňují energetické nároky habitatu při jeho ostrovním provozu. Lehká konstrukce habitatu je důležitá pro možnost jeho rychlého a efektivního transportu. Není proto vhodné dodávat do konstrukce lehkého habitatu přidavnou tepelně akumulaci hmotu, která neplní další funkce (např. pevnostní). Habitaty pro extrémní prostředí jsou unikátní zařízení, pro které se v dostupné literatuře nevyskytuje příliš mnoho podkladů. Rešeršní studie může proto přejímat také smysluplná řešení z obdobných, frekventovanějších konstrukcí, jako jsou například nízkoenergetické budovy, obytné přívěsy, osobní automobily, trupy dopravních letounů atp.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte literární rešerši současných řešení tepelných obálek habitatů pro extrémní prostředí, případně i řešení obdobných konstrukcí. Popište výhody a nevýhody jednotlivých řešení. U každého z těchto řešení identifikujte problematická místa pro zaintegrování tepelné obálky do konstrukce habitatu. Vypracujte vlastní koncepci návrhu tepelné obálky lehkého habitatu pro extrémní prostředí.

Seznam doporučené literatury:

INCROPERA, F. P. et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley, 2011.

S.H.E.E. Self-deployable habitat for extreme environments. Shee.eu [online]. Space Innovations, 2015.

Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz>>.

JÍCHA, M. Přenos tepla a látky. Skripta FSI VUT. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 10. 4. 2017



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katořický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou v první části popsány různé druhy mobilních a stacionárních habitatů pro extrémní prostředí. Důraz je kladen na složení opláštění a jeho tepelnou odolnost. V druhé části práce je popsána tepelná obálka, ve které je zohledněn fenomén tepelných mostů. Je zde uveden způsob, jakým se kvantifikují a jak působí na celkovou tepelnou ztrátu prostupem tepla habitatu. V třetí části je navrhnout rozkládací habitat, ke kterému je určena ztráta prostupem tepla bez vlivu tepelných mostů. Riziková místa obálky, spoje panelů, jsou analyzovány v programu Therm pro získání lineárního činitele prostupu tepla daným místem. Ze získané hodnoty je kvantifikována tepelná ztráta prostupem tepla celého habitatu s vlivem tepelných mostů a porovnána s hodnotou bez vlivu tohoto jevu.

Klíčová slova

Habitat, tepelná obálka, extrémní prostředí, tepelné mosty.

Abstract

Various types of stationary and mobile habitats for extreme environments are described in this bachelor thesis. Description is focused on structure of heat envelope and its thermal resistance. The thermal envelope with influence of thermal bridges with the way to calculate and quantify this phenomenon and its influence on thermal loss by heat transfer is described in second part of this thesis. In third and last part of this thesis is designed deployable habitat for which is calculated thermal loss by heat transfer. After calculating heat loss, the panel joints are analysed in Therm software for calculating linear thermal transmittance of its detail. After all the thermal loss by heat transfer with influence of thermal bridges is count and compared with loss without thermal bridges.

Keywords

Habitat, thermal envelope, extreme environments, thermal bridges.

Bibliografická citace

KUČERA, J. *Koncepce tepelné obálky lehkého habitatu pro extrémní prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Koncepce tepelné obálky lehkého habitatu pro extrémní prostředí vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....

Poděkování

Tímto chci poděkovat doc. Ing. Jaroslavu Katolickému, Ph.D. za to, že se ujal vedení této bakalářské práce a Ing. Vratislavu Šálenému, bez kterého by neměla možnost vzniknout. Děkuji své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Obsah

Úvod	15
1 Habitat pro extrémní prostředí	16
1.1 Extrémní prostředí	16
1.2 Rozdělení habitatů	16
1.3 Stacionární habitaty	17
1.3.1 Mendelova polární stanice	17
1.3.2 Habitat Demonstration Unit – Deep Space Habitat	18
1.4 Mobilní habitaty	19
1.4.1 Karavany	19
1.4.2 Bigelow expendable activity module (BEAM)	21
1.4.3 Self-deployable Habitat for Extreme Environments (SHEE)	22
1.5 Pasivní budovy	23
1.5.1 Předcházení tepelných mostů	23
1.6 Shrnutí řešerše	23
2 Tepelná obálka	25
2.2 Vliv tepelných mostů	25
2.2.1 Bodové tepelné vazby	25
2.2.2 Lineární tepelné vazby	26
2.3 Prostup tepla obálkou habitatu	26
3 Koncepce tepelné obálky	27
3.1 Postup výpočtu energetické náročnosti bez vlivu TM	27
3.1.1 Vnitřní a venkovní výpočtová teplota	27
3.1.2 Součinitel prostupu tepla uvnitř habitatu	27
3.1.3 Součinitel přestupu tepla vně habitatu	27
3.1.4 Tepelná ztráta habitatu prostupem tepla	28
3.2 Rozměry habitatu	28
3.3 Výpočet tepelné ztráty habitatu	29
3.3.1 Výpočet součinitelů přestupu tepla	29
3.3.2 Výpočet obsahu částí habitatu	30
3.3.3 Výpočet prostupu tepla obálkou habitatu bez TM	31
3.4 Výpočet vlivu tepelných mostů	32
3.4.1 Spojení strop-světlovod	32
3.4.2 Spojení stěna-strop	33
3.4.2 Spojení panel-panel	34
3.4.3 Spojení podlaha-stěna	34
3.4.4 Spojení podlaha-podlaha	35
3.4.5 Spojení strop-strop	35
3.4.6 Spojení dveře-stěna	35
3.4.7 Výpočet prostupu tepla obálkou habitatu s TM	36
3.4.8 Prostup tepla obálkou habitatu v extrémním prostředí	37
Závěr	36
Seznam použitých zdrojů	41
Seznam použitých zkratk a symbolů	44
Seznam obrázků	45

Úvod

Od nepaměti prochází planeta Země klimatickými změnami. Tyto změny jsou přirozené, nicméně z části mohou být antropogenního původu. Vyznačují se tím, že se počasí dostává do extrémnějších podmínek, než jsme zvyklí. Dobrymi příklady budiž rozšiřování saharské pouště [1] a výkyvy teplot v Severní Americe [2] a Evropě [3].

Protože společným důsledkem těchto změn je zhoršování podmínek vhodných k lidskému životu, je pro setrvání v postižené oblasti navrženo specifické zařízení, které se nazývá habitat. Toto zařízení nemusí být primárně využito v nadměrně teplé či studené oblasti, ale i v oblasti, která je postižena přírodní kalamitou [4].

Habitat slouží především k zajištění základních životních podmínek. Není prospěšné, aby bylo pro jeho provoz vyžadováno velké množství primárních zdrojů, protože ty jsou v režimu ostrovního provozu habitatu dostupné pouze v omezeném množství.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout koncepci tepelné obálky habitatu pro extrémní prostředí. Zpočátku je popsáno několik typů stavebních konstrukcí obdobných zařízení, a následně z poznatků získaných z rešerše bude proveden návrh obálky habitatu. Řešeny jsou ztráty vzniklé spojením hraničních ploch (stěna-strop, stěna-stěna...), neboť je uvažován habitat rozkládací.

Ztráty vzniklé spojením ploch jsou řešeny jako problematika tepelných mostů. Pro zjištění vlivu daného tepelného mostu na obálku habitatu je využit program Therm, který z teplotního pole určí součinitel prostupu tepla daného detailu. Získaný součinitel prostupu tepla slouží k určení lineárního činitele prostupu tepla. Ten figuruje ve výpočtu tepelné ztráty se zohledněným vlivem tepelných mostů, která bude kvantifikována.

1 Habitat pro extrémní prostředí

Pod pojmem habitat pro extrémní prostředí se rozumí prostor, který je uzpůsoben tak, aby zde panovaly podmínky slučitelné se životem. Samotné slovo habitat znamená biotop. Nicméně pro cíle této práce se nadále bude využívat slovo habitat a myšleno tím bude výše zmíněné obydlí.

1.1 Extrémní prostředí

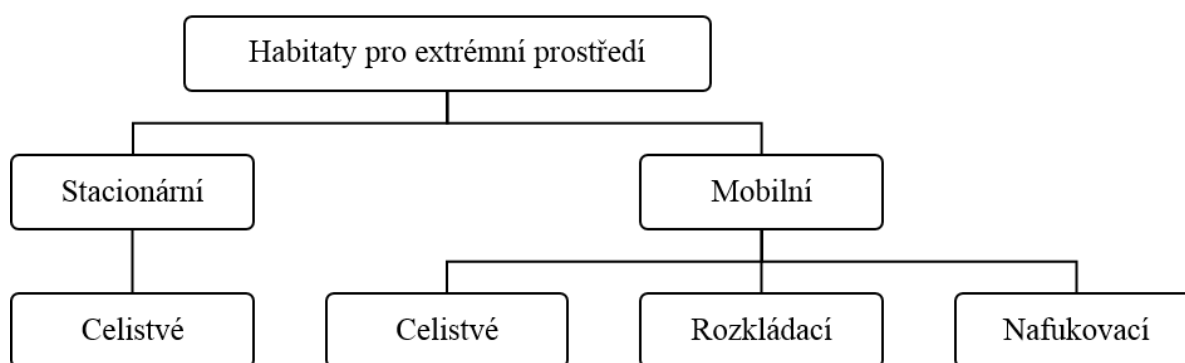
Nasazení habitatu je vhodné všude tam, kde je zapotřebí buďto za krátkou dobu zajistit přístřeší a vhodné životní podmínky pro obyvatele v postižené oblasti, nebo tam, kde se podmínky vhodné k lidskému životu nevyskytují.

Na planetě Zemi je mnoho prostředí, která jsou typická svou nehostinností vůči člověku. Jedním z faktorů, který má vliv na kvalitu života, je teplota okolí. Na Antarktidě se nízké teploty pohybují v rozmezí od $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rámci celého roku [5]. Oproti tomu na Sahaře teplota v nejteplejších dnech vystoupá i na $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve stínu [6]. Tato dvě prostředí mají mimo svých extrémních teplot společné i to, že se jedná o velice větrné oblasti a oblasti s nízkým výskytem vodní páry v atmosféře. Vodní pára v atmosféře působí jako skleníkový plyn a zachycuje odražené záření ze země. V případě její absence se odražená tepelná energie nevrací na zem, ale pokračuje zpět do vesmíru. To zapříčiňuje rychlé výkyvy nočních a denních teplot.

Další příkladné prostředí nevhodné k životu je vesmír. Ve vesmírném prostoru nelze žít bez zařízení, které imituje některé pozemské podmínky, kvůli absenci kyslíku a velice nízkému tlaku. Zařízení, které umožňuje pobyt lidí ve vesmíru, musí odolávat teplotám od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve stínu do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ na slunci [7]. Požadavky kladené na pevnost konstrukce se oproti zařízení pro pozemské použití zvlášť neliší. Protože je zde podtlak $1.3 \times 10^{-11}\text{ Pa}$ [7], je vhodné projektovat kostru na maximální zatížení, které vznikne při průchodu atmosférou.

1.2 Rozdělení habitatů

Z následující rešerše vyplývá rozdělení habitatů, které je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1: Schéma dělení habitatů

Stacionární habitaty jsou charakteristické svým zakotvením k povrchu a nemožností přesunu bez vynaložení většího úsilí. Typicky to mohou být ubytovací zařízení, ve kterých byl brán zřetel na okolní klimatické podmínky od počátku projektování až do zrealizování stavby. Vynikají svou odolností vůči povětrnostním podmínkám a vynikající tepelné izolaci.

U mobilních habitatů musí být dbáno na lehkost, pevnost a snadnou manipulaci. Stacionární habitaty bývají pevně spojeny s pohonnou jednotkou. Oproti tomu rozkládací a nafukovací habitaty musí být na místo rozložení/nafouknutí dopraveny externím prostředkem. Z toho důvodu je u nich snaha minimalizovat objem, který zaujímají v nefunkčním stavu, a maximalizovat objem, který se získá jejich rozložením/nafouknutím.

1.3 Stacionární habitaty

Stacionární obydlí přizpůsobené klimatickým podmínkám se používá v lokacích, kde je zájem udržovat stálé přítomné lidské osídlení. Často z důvodů výzkumných. Například na Antarktidu by bylo finančně i časově náročné pravidelně vysílat vědce za účelem sbírání a vyhodnocování tamějšího biotopu a vzorků ledu. Česká republika proto již několik let provozuje vlastní polární stanici. Informace o její konstrukci jsou popsány dále v kapitole 1.3.1.

V oblasti stacionárních obydlí je nutno zmínit i habitaty, které doposud nejsou realizovány na místě jejich plánovaného působení. Tyto habitaty jsou určeny k trvalému lidskému osídlení na vesmírných objektech. V kapitole 1.3.2 je popsán modul, který je testován na planetě Zemi v podmínkách maximálně bližších planetě Mars.

1.3.1 Mendelova polární stanice

Od roku 2006 je na Antarktickém ostrově James Ross vystaveno ubytovací zařízení sloužící k vědeckým účelům a ubytování 15–20 lidí [8] po teplejší část roku (prosinec–březen), neboť to jsou průměrné teploty a příspěvek solárním zářením největší [9]. Areál stanice je tvořen hlavní budovou a přilehlými kontejnery s technickým zařízením (například generátor elektrické energie a odpadové hospodářství). Oddělené jsou především proto, aby se předešlo riziku požáru hlavní budovy, a aby se uspořilo místo ve vytápěných prostorech. Charakteristické rozměry jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Rozměry Mendelovy polární stanice [9]

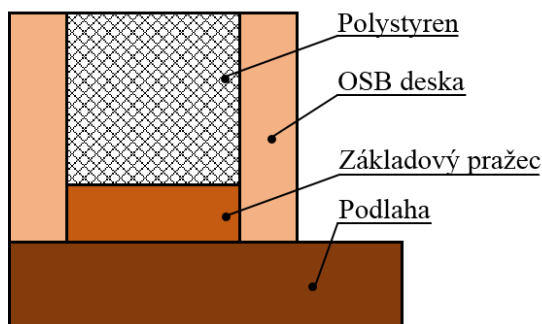
<i>Rozměry</i>	<i>Půdorys</i>	<i>Objem</i>
~ 10,5 × 26,5 m	Obdélníkový	1 033 m ³

Obálka hlavní budovy je tvořena sendvičovými panely a tvoří ji pouze jedno patro. Předchází se tak tepelným únikům, které by vznikly vystavením velké plochy budovy povětrnostním podmínkám. Panely jsou tvořeny dvěma OSB deskami, mezi kterými je samozhášivý polystyren [10].

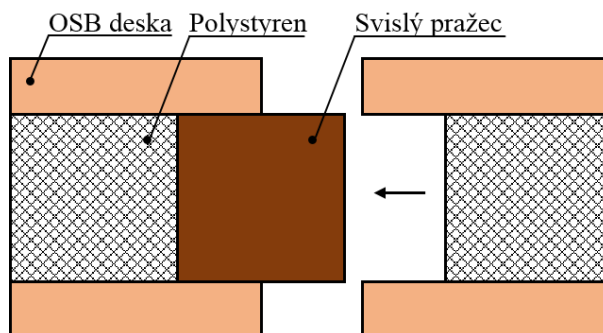
Střešní a podlahové panely jsou pokryty gumovou fólií, která je přilepena a mechanicky připevněna k panelům [10], aby se zabránilo průsaku tajícího sněhu ze střechy a aby se zlepšily izolační vlastnosti podlahy. Na bočních panelech je z vnější strany umístěna voděodolná dřevěná překližka. Ta má omezenou životnost a po určité době se tak musí vyměnit [10].

Celá tato konstrukce je umístěna na základech, které jsou umístěny v půdě, přičemž podlaha není ve styku se zemí, ale je upevněna na základových trámech. Předchází se tak případným tepelným únikům do podloží. Musí se ale zamezit průchodu větru a studeného vzduchu do těchto mezer, jinak by vznikl průvan a následná konvekce by zapříčinila masivní únik tepla.

Pro stavbu této stanice je použit systém české firmy, zvaný K-KONTROL® [11]. Vyznačuje se svou lehkostí, modulárností a dobrými tepelně-technickými vlastnostmi. Samotná stěna má výborné izolační schopnosti (Součinitel prostupu tepla U dosahuje hodnot až $0,126 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) [12]. Tyto vlastnosti jsou garantovány po celé ploše desky, nicméně ve spojích dvou a více stěn může vznikat tepelná vazba, která zapříčiňuje vyšší tepelné ztráty. V této realizaci jsou stěny nasunuty na základový pražec připevněný na podlaze – obr. 2. Mezi pražcem a stěnou se nachází hmota sloužící k utěsnění a slepení ploch. Stejným způsobem je uskutečněn i spoj stěna-strop.



Obr. 2: Spojení stěna-podlaha



Obr. 3: Spojení stěna-stěna

Spoj stěna-stěna (obr. 3) je realizován „zámkovým“ způsobem, panely se na sebe nasunují. Mezi panely je vložen svislý pražec, který slouží jako vodící lišta protilehlému kusu. Na tento vodící pražec je opět umístěna lepicí hmota a následně je pomocí vrutů zamezeno případnému pohybu [12]. Obr. 4 demonstruje složení stěn obydlí a stavbu Mendelovy polární stanice.



Obr. 4: Stavba polární stanice [10]

Výhody a nevýhody takového stavení jsou shrnuty v tabulce 2.

Tab. 2: Vybrané výhody a nevýhody obálky Mendelovy polární stanice

Výhody	Nevýhody
Rychlá výstavba	Výkopové práce
Odolnost vůči povětrnostním podmínkám	Životnost některých prvků ochrany stavby
Dobrá tepelná izolace	

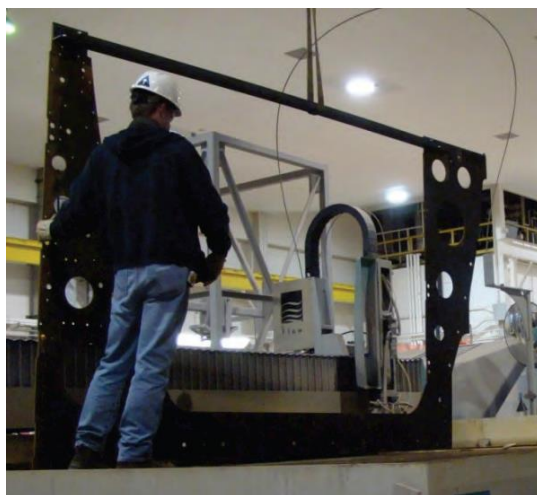
1.3.2 Habitat Demonstration Unit – Deep Space Habitat

Tento experimentální habitat se postupně zkouší v různých prostředích, kde jsou získávána data o jeho provozu. Primárním cílem je vyvinout obydlí, které bude zajišťovat zázemí astronautům v dlouhotrvajících misích mimo planetu Zemi. Komplex této jednotky se skládá z hygienického, laboratorního, vstupního a ubytovacího modulu. První tři mají pevnou konstrukci, zatímco poslední je nafukovací [13]. Největší jednotka (laboratorní modul) má tvar válce a jeho rozměry jsou popsány v tabulce 3.

Tab. 3: Rozměry HDU [13]

<i>Rozměry</i>	<i>Půdorys</i>	<i>Objem</i>
Ø 5 × 3,3 m	Kruhový	56 m ³

Stěny z kompozitního sklolaminátu jsou připevněny na nosnou konstrukci [13]. Nosná konstrukce je složena ze 16 ocelových žeber. Na obr. 5 je žebro, které se v polovině rozřízne na dva kusy a ty budou připevněny k prefabrikátům – obr. 6. Tyto dílce jsou poté sestaveny do válcovitého tvaru [14].



Obr. 5: Ocelové žebro [15]



Obr. 6: Prefabrikát stěny [15]

Protože tepelné vodivosti kompozitního laminátu a oceli jsou velice rozdílné, je zde riziko vzniku výrazného tepelného mostu. Ten se dá následně eliminovat překrytím spoje izolačním materiálem. Složená konstrukce je umístěna na rámu z ocelových nosníků, ke kterému jsou připevněny stabilizační nohy. V tabulce 4 jsou zaznamenány některé výhody a nevýhody takového typu konstrukce.

Tab. 4: Vybrané výhody a nevýhody obálky HDU

<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Dlouhá životnost konstrukce Odolnost vůči povětrnostním podmínkám	Těžká konstrukce Velké nároky na převoz

1.4 Mobilní habitaty

Přenosné habitaty musí být lehké a prostorné, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2. V závislosti na cílové destinaci se na ně kladou různé požadavky. Například do vesmírných a leteckých modulů se musí uvažovat přetlaková obálka, která zabezpečí podmínky k pobytu lidí. Jako první je v této práci vzata v potaz obálka karavanů, které musí čelit různým podmínkám (vysoké teploty/nízké teploty), a schránka tak musí být univerzální. Posléze je popsán nafukovací modul, který je v současnosti testován na ISS (International Space Station – Mezinárodní vesmírná stanice). Příkladem habitatu pro extrémní prostředí je SHEE, popsán v podkapitole 1.4.3, určeném pro pozemské použití.

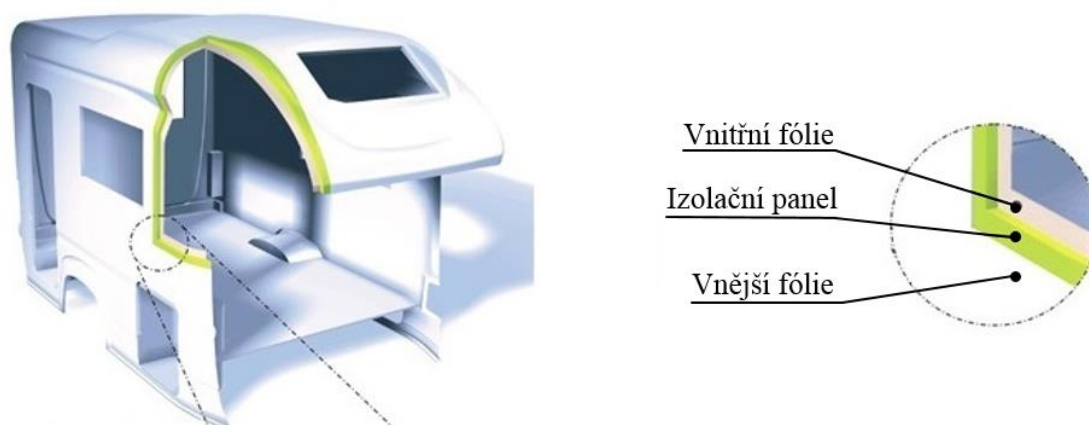
1.4.1 Karavany

Jednou z možných variant, kde lze nacházet inspiraci v řešení tepelné obálky habitatu, jsou karavany a obytné přívěsy. Tato zařízení na první pohled mají s habitatem mnohé společné – ostrovní provoz, malý prostor obývaný několika lidmi, vyšší nároky na udržení mikroklimatu z důvodu stálého obydlení a omezených zdrojů.

Stěžejní konstrukce obytného vozu je v mnohém podobná typickému zástupci nákladní dodávky. Mnohdy jsou využívány podvozky, které jsou primárně určeny pro nákladní automobily. Tyto skelety jsou následně vzaty a je na ně přistavěn obytný modul, který musí plnit podmínky dané charakteristikou jeho provozu, jak je zmíněno výše.

Protože jsou obytné vozy využívány převážně v letním období, je primárním cílem navrhnout vhodné zateplení z hlediska kondenzace vlhkosti obsažené ve vzduchu tak, aby na interní straně stěny nebyla podkročena teplota rosného bodu.

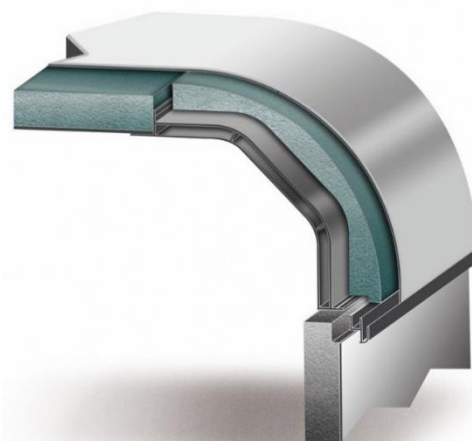
V zimním období se zateplení vozu řeší především tím, že se kabina pokryje tenkou mrazu odolnou fólií, protože právě v kabině dochází k největším tepelným únikům. To je zapříčiněno především kvůli vysokému součiniteli prostupu tepla, které náleží oknům ze skla. Jedna z možných a efektivních cest zabránit netěsnostem a spojům ploch, je vyrábět skelet prostředku z co nejmenšího počtu kusů. Na obr. 7 lze vidět, že hlavní část objektu je zhotovena laminováním několika vrstev, z nichž interní vrstva je z laminátu následující vrstvou z polyuretanové pěny a vnější laminátovou stěnou [16].



Obr. 7: Monolit karavanové obálky [16]

V případech, kdy není zvolena obálka jednolitá, jsou stěny spojeny buď přímo mechanicky k sobě, nebo je mezi ně vkládán prvek (viz obr. 8). Ten zajišťuje spojení stěn a snížení vlivu tepelného mostu, který by mohl vzniknout přímým spojením stěn.

Pro shrnutí lze uvést, že v zateplení karavanů a obytných vozů je v současné době dominující metoda skládání sendvičových stěn. Tyto stěny mají obecně malý součinitel prostupu tepla, avšak v jejich spojích, kde je potřeba použít kovových nebo jiných pevných materiálů, dochází k tepelným mostům, které mohou mít menší či větší vliv na energetickou bilanci obálky. Výrobci se snaží množství spojů minimalizovat, a tím tak vliv tepelných úniků procentuálně snížit na co nejnížší hranici.



Obr. 8: Spojení stěna-strop [17]

1.4.2 Bigelow expendable activity module (BEAM)

Modul firmy Bigelow Aerospace vznikl za účelem prozkoumání možností, které skýtají habitaty nafukovací. V roce 2016 byl úspěšně připojen k Mezinárodní vesmírné stanici (ISS). Jeho specifika jsou vypsána v tabulce 5 [18].

Tab. 5: Technické specifikace BEAM [19]

	Zabalený	Nafouknutý	Poměr
Hmotnost (kg)	1 400	-	-
Délka (m)	2,16	4,01	1:1,85
Průměr (m)	2,36	3,23	1:1,36
Objem (m ³)	3,6	16	1:4,44

Na obr. 9 je zobrazen nafouknutý modul (na obr. 10 v zabaleném stavu – pro srovnání) v pohledu z boku a přirovnání s průměrnou výškou člověka. Lze vidět, že tento modul není primárně určen pro pobyt lidí, nýbrž pro skladování různých materiálů.



Obr. 9: BEAM v porovnání s výškou člověka [19]



Obr. 10: složený BEAM [19]

Složení stěn je převážně z kompozitních tkaninových vláken, která zde plní funkci měkké části konstrukce, poskytují možnost nafouknutí a navýšení objemu. Tlakové přepážky (přední a zadní) jsou kovové a vnitřní kostra je z kovu na bázi hliníku. Na obr. 11 je zobrazen modul v řezu, kde jsou zřejmé tlakové přepážky a vrstvy tkaniny. Ve skutečnosti to není souvislá tlustá vrstva, ale mezi vrstvami jsou mezeríky z důvodů snížení přenosu tepla vedením a ochrany vnitřní obálky.

Výhodami takového modulu je nízká hmotnost, a malé prostorové nároky na skladovací prostory. Díky tkaninovým materiálům lze zredukovat jeho objem z funkčního stavu o 440 %.

Jako nevýhoda se jeví složitost spojení tkanin a jejich prokládání kevlarovými vrstvami, které chrání povrch modulu před zásahem částic narušující jeho integritu. Z průběhu nafukování na ISS se ukázalo, že i dlouhodobá depozice modulu ve složeném stavu ovlivňuje jeho schopnost zvětšit objem [20], a tudíž je na to potřeba brát zřetel.



Obr. 11: Vertikální řez modulem [19]

1.4.3 Self-deployable Habitat for Extreme Environments (SHEE)

Modul SHEE je určen k použití na Zemi v místech, kde došlo k přírodní pohromě [21]. Nicméně účelem jeho konstrukce je i prozkoumání možnosti využití podobné konstrukce jako obydlí pro vesmírnou expedici. Konfigurace určená k pobytu lidí uvažuje s prostorem pro 2 lidi [22]. V tabulce 6 jsou uvedeny základní rozměry.

Tab. 6: Technické specifikace SHEE [23]

	Nerozvinutý	Rozvinutý	Poměr
Šířka (m)	2,8	5,6	1:2
Výška (m)	2,4	2,4	1:1
Objem (m ³)	39,6	50	1:1,25

Self-deployable znamená, že je habitat schopen sestavit se ze složeného stavu do provozního (pomocí integrovaných elektromotorů). Ve složeném stavu jeho obálku tvoří kvádr a po sestavení válec, viz obr. 12. Stěny jsou vyrobeny monoliticky a zrcadlově. Šetří se tím náklady na konstrukci jejich forem. Hlavní část konstrukce je jádro ve tvaru kvádru, ve kterém jsou připevněny obloukové panely. Každý má svou osu uvnitř jádra tak, aby při otáčení kolem ní měl habitat zhruba kruhový půdorys a dal se tak složit dovnitř.

Ke konstrukci obálky tohoto habitatu je použita obdobná technologie jako u gondol větrných elektráren nebo trupu lodí. Jádro stěny je tvořeno plastovou voštinou vyplněnou plastovou pěnou. Z obou stran panelu je umístěna vrstva laminátu, která je potřena ohnivzdorným nátěrem. Tyto stěny podpírá hliníková kostra, která zajišťuje především jejich správné usazení. [22]



Obr. 12: SHEE v rozložené a složené konfiguraci [22]

Výhody a nevýhody takové obálky jsou shrnuty v tabulce 7.

Tab. 7: Vybrané výhody a nevýhody obálky SHEE

<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Tepelná izolace	Velké požadavky na těsnění
Odolnost vůči povětrnostním podmínkám	Těžká konstrukce

1.5 Pasivní budovy

Dle současných právních předpisů musí nově vzniklé stavby nebo objekty, které se prodají, mít vypracovaný průkaz energetické náročnosti budovy. Tento protokol zohledňuje nároky budovy na vytápění, ohřev vody, chlazení, větrání, úpravu vlhkosti a větrání [24]. K docílení nízké měrné roční spotřeby tepla musí být zohledněn vliv faktorů, které ve standardních budovách nejsou prioritně řešeny [25]. Aby byla roční měrná spotřeba tepla co nejmenší, musí se minimalizovat tepelné ztráty objektu. Minimálních ztrát se dosahuje různými způsoby.

1.5.1 Předcházení tepelných mostů

U dobře zaizolovaných budov mají velký vliv na tepelné ztráty tepelné mosty, neboť skrze ně může unikat procentuálně vyšší podíl tepla než stěnami. V místě tohoto jevu je zpravidla menší teplota než v obydleném prostoru, a když klesne pod teplotu rosného bodu, tak zde začne kondenzovat vzdušná vlhkost. To může zapříčinit vznik plísní a bujení mikroorganismů škodlivých lidskému zdraví. V případě dřevěné stavby to může vést k postupnému narušování konstrukce a snižování izolační a podpěrné schopnosti [26].

Tepelné mosty jsou často způsobeny různými konstrukčními prvky sloužících k dosažení správné funkce objektu. Například hmoždinky, které drží izolační vrstvu na stěně, kovové armatury ve zdi zajišťující správný chod rozvodné a otopné soustavy, nebo nekvalitní usazení okenních rámců/dveří do zdi. [27]

1.6 Shrnutí řešerše

Protože se v literatuře nevyskytuje moc pramenů o habitatech pro extrémní prostředí, jsou v předcházející řešerši probírány i konstrukce, které na první pohled nesouvisí s extrémním prostředím, nicméně svými nároky na tepelnou obálku se jim blíží. Rozdělení habitatů je patrné z obr. 1. Jako první příklad je uvedena Mendelova polární stanice v kapitole 1.3.1. Protože se nachází v extrémním prostředí, jeví se jako ideální řešeršní objekt k habitatům. Její konstrukce je stacionární, což umožňuje použít skladbu konstrukce, která u mobilního habitatu není možná. Jsou zde použity masivní sendvičové panely složené z OSB desek a jádrem z PUR pěny, které zajišťují komfort až pro 20 lidí. Panely byly prefabrikovány a lodí dovezeny na místo, kde byly smontovány. Protože je konstrukce připevněna k základovým pražcům v zemině, odolá tak velikým rychlostem větru, které se na Antarktidě vyskytují. Na druhou stranu přináší zakotvení nutnost výkopových prací, které bývají časově a fyzicky náročné. Dopravit na takové místo těžkou stavební techniku nebývá reálné, a tak si obsluha musí vystačit s příručním nářadím.

Dalším z popsáných stacionárních habitatů je HDU v kapitole 1.3.2. Tento habitat je určen pro kolonizaci vesmírných těles. V současnosti je dlouhodobě provozován na Zemi. Pravidelně je do něho alokována posádka, která simuluje pracovní a osobní život v takovém obydlí. Konstrukce hlavního bloku je složena z prefabrikovaných dílců, které jsou poskládány do kruhového půdorysu a utěsněny. Z obr. 6 je zjevná šíře takových panelů a z toho vyplývající hmotnost. Životnost této konstrukce je vlivem použitých materiálů (ocel a laminát) větší než Mendelovy polární stanice. Náročnost převozu panelů, které mají netradiční tvar, je větší, než prefabrikované panely naskládané na sebe (příkladem jsou panely z Mendelovy polární stanice).

V mobilních habitatech je nastíněna konstrukce karavanů. Karavany jsou používány za rozličných podmínek, proto musí být dimenzovány na různé povětrnostní podmínky. Velká výhoda spočívá v tom, že místo největších tepelných úniků – kabina, může být spolehlivě oddělena od obytných prostor, které vyžadují komfortní podmínky. Od standardní skládané konstrukce opláštění je postupně opouštěno a do budoucnosti se jeví jako vhodnější využívat

výhod monolitické obálky (obr. 7). Využitím monolitického pláště se minimalizuje množství lineárních tepelných mostů, které zapříčiňují vyšší energetickou náročnost a zhoršené životní podmínky.

Jasným zástupcem pro lehký habitat pro extrémní prostředí je BEAM (kapitola 1.4.2). V současnosti je testován přímo na místě určeném k jeho provozu, na ISS. Vzhledem k využitým textilním materiálům, vyniká svou lehkostí a skladovatelností, neboť se může skladovat ve složeném stavu a na určeném místě nafouknout. Rizikem takové konstrukce je depozice po delší dobu. Textilie mohou ve složeném stavu ztrácet své mechanické vlastnosti a v případě potřeby nemusí habitat fungovat tak, jak je očekáváno. Tlakové přepážky u vstupu a na konci modulu jsou k udržení nízké hmotnosti celku z lehkých materiálů, například ze slitiny hliníku. Hliníkové materiály mají oproti textiliím vysokou tepelnou vodivost, proto je zapotřebí tyto konce dostatečně zaizolovat.

Posledním příkladem habitatu pro extrémní prostředí je SHEE (kapitola 1.4.3). Tato konstrukce je rozkládací z panelů, které jsou prefabrikovány. Oproti HDU využívá podstatně menší tloušťky stěn, a je tak lehčí a mobilnější. Další výhodou je, že ve složeném stavu se tato konstrukce vejde do přepravního kontejneru. Množství lidí v SHEE alokovaných je menší než u předešlých habitatů, nicméně díky důmyslné konstrukci lze více modulů spojit v jeden celek a utvořit větší stanici. Protože jsou zde využity prefabrikované panely, které se vůči sobě pohybují, vzrůstají požadavky na utěsnění objektu.

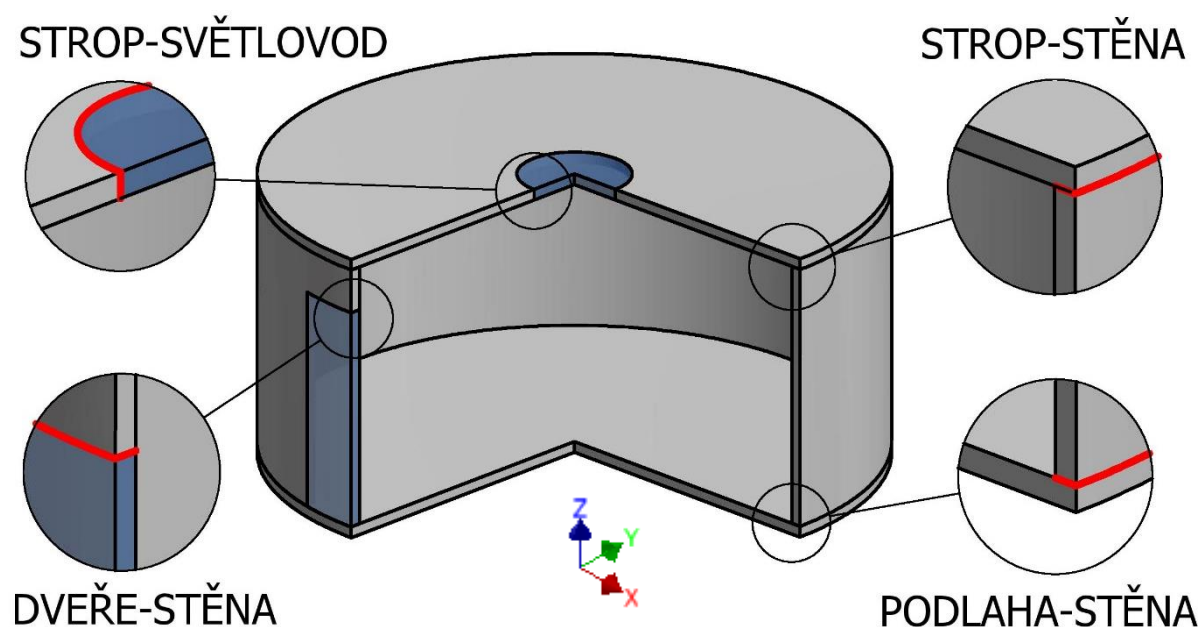
Tepelnou obálku habitatu pro extrémní prostředí lze pojmout jako obálku pasivního domu. Je zapotřebí minimálního přísunu energie při požadavku na udržení požadovaných životních podmínek bez větších tepelných ztrát. Protože v současnosti existují materiály s výbornými izolačními schopnostmi, nabývají na důležitosti tepelné mosty v konstrukcích. Tepelné mosty vždy byly, jsou a budou součástí tepelných obálek, nicméně vhodnými úvahami jim lze předcházet a minimalizovat jejich vliv. U habitatu, kde se střídají stěny s velkým teplotním odporem a kovová žebra nebo konstrukce s nízkým teplotním odporem, je zapotřebí tepelné mosty řešit, neboť právě ty se podílejí na většinovém podílu energetické náročnosti.

Obecně lze říci, že vhodným řešením lehkého habitatu je zvolení sendvičových stěn s jádrem z izolačního materiálu, které umožní nízkou tloušťku panelů. Pro rychlý a efektivní transport je zapotřebí zvolit takový tvar panelů, které jsou dobře skladovatelné a odolné vůči zacházení při nakládání a vykládání. Takové kritérium splňují ploché sendvičové panely. Pro zajištění nízké energetické náročnosti habitatu je zapotřebí uvažovat vliv tepelných mostů. Vzhledem k rozkládacímu charakteru konstrukce může být jejich vliv zásadní.

2 Tepelná obálka

Tepelná obálka je systémovou hranicí, která odděluje vybraný prostor charakteristický temperovanou teplotou na požadované parametry od zbytku okolí. Její vlastnosti ovlivňuje materiál stěn, vnitřní a venkovní tepelné či povětrnostní podmínky. Mezi ostatní vlastnosti patří například tepelné mosty, které vznikají v konstrukcích všude tam, kde se významně mění tepelný odpor (složením materiálů, změnou tloušťky materiálu či přidáním prvku, který má významně vyšší tepelnou vodivost než zbytek konstrukce). Je proto vhodné takovým změnám předejít už v návrhu. Na obr. 13 je vyobrazen habitat s vyznačenými tepelnými mosty vzniklými skládáním materiálu. V detailech jsou uvedeny spoje, kterým se lze jen těžko vyhnout. Některým se nelze vyhnout – například spoj strop-světlovod. Přístup slunečního světla do obydlí je nezbytný pro život z hlediska psychické pohody, která je v extrémním prostředí zapotřebí.

Následující úvahy neobsahují realizaci spojů, problematiku průvzdušnosti obálky a řešení kondenzace vodních par. Pouze tepelnou vodivost danými místy konstrukce, kde se mění složení materiálů a tím i vliv na ostrovní provoz habitatu.



Obr. 13: Vizualizace habitatu

2.2 Vliv tepelných mostů

Předcházení tepelným mostům se věnuje norma ČSN 73 0540: Tepelná ochrana budov. Tepelné mosty jsou zde děleny na lineární a bodové. Mimo to se zde definuje také lineární a bodová tepelná vazba [28]. Tepelná vazba vzniká v místě dvou či více různých materiálů [26].

Tato vazba se tedy nachází například mezi dveřmi a stěnou, jsou-li dveře dřevěné, zárubně kovové a stěna z cihel. Oproti tomu tepelný most je obecný výraz pro místo v konstrukci, kde se intenzifikuje tepelný tok stěnou. Svými vlastnostmi se tak vymyká svému okolí (kupříkladu změna geometrie stěny v rohu místnosti).

2.2.1 Bodové tepelné vazby

Bodový tepelný most/vazba je dle ČSN 73 0540 charakterizován/a jako „místně omezený tepelný most, jehož vliv se může popsat bodovým činitelem prostupu tepla“ [28]. Vliv tohoto prvku je lokálního charakteru, neboť se soustředí do malého prostoru. Nicméně i tak může způsobit značné tepelné úniky. Typickým příkladem budiž kotvení okapů kovovými pásy ke

zdi, přičemž okolní prostor je zaizolován. Kov, který je velmi dobrým vodičem tepla, „přenáší“ teplo ze zaizolovaných cihel rovnou do okapu a venkovního prostředí a naopak. Podobné uchycení by se mělo realizovat pomocí přidání dílčích izolantů pod kotvu. Eliminovat to také lze připevněním nosných prvků na vrstvu izolantu, ta však zpravidla nemá dostatečné mechanické vlastnosti k udržení takového prvku. V extrémním prostředí, kde je obálka vystavena rozmanitým povětrnostním podmínkám, by měla být snaha minimalizovat množství jakýchkoli prvků uchycených na vnějším plášti.

2.2.2 Lineární tepelné vazby

Definice dle ČSN 73 0540 praví, že lineární tepelná vazba je „tepelný most s jednotným příčným řezem podél jedné ze tří ortogonálních os“ [28]. Ve výsledku to znamená, že lineární tepelná vazba se nachází v místě spojení dvou konstrukčních celků. Demonstrativním příkladem u habitatu je spojení stěn. Takové spoje jsou zobrazeny na obr. 16. Vzhledem k tomu, že délka těchto spojů nabývá řádově stejných hodnot jako teplosměnná plocha habitatu, je potřeba tyto spoje zohlednit v celkové bilanci. Parametry prostupu tepla se zde můžou výrazně měnit a narušovat tak hospodárny provoz zařízení.

Veličina popisující vliv lineárního tepelného mostu na celkový tepelný tok se nazývá lineární činitel prostupu tepla a značí se Ψ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Výpočet je uveden ve vztahu (1).

$$\Psi = L^{2D} - \sum_{i=1}^n U_i \cdot l_i \quad (1)$$

L^{2D} ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$) je tepelná propustnost detailu, která je dopočítána ze vztahu (2), U ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel prostupu tepla i -té konstrukce a l (m) je délkou i -té hrany konstrukce, ke které se vztahuje příslušné U . Délkové hodnoty do tohoto výpočtu vstupující musí být z vnějších rozměrů objektu.

$$U^{2D} = \frac{L^{2D}}{l} \quad (2)$$

Součinitel prostupu tepla U^{2D} je vyjádřen z programu určeného k výpočtu teplotních polí a délka l (m) je délka úseku, který vstupuje do výpočetního programu [29].

2.3 Prostup tepla obálkou habitatu

Měrnou ztrátu prostupem tepla H_T ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$) konstrukce lze spočítat dle vztahu (3) [30].

$$H_T = \sum_{i=1}^n U_i \cdot S_i + \sum_{j=1}^n \Psi_j \cdot l_j + \sum_{k=1}^n \chi_k \quad (3)$$

Veličina S (m^2) je plocha i -té konstrukce a χ ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$) je bodový činitel prostupu tepla. První suma ve vzorci udává tepelnou propustnost ploch habitatu, druhá suma koriguje množství tepla prostoupené konstrukcí díky lineárním tepelným mostům a třetí suma přidává vliv bodových tepelných mostů. Tepelná ztráta prostupem tepla se zohledněným vlivem tepelných mostů Q_T (W) se získá z měrné ztráty prostupem tepla vztahem (4)

$$Q_T = H_T \cdot \Delta T \quad (4)$$

Přičemž ΔT (K) je teplotní diference vypočítaná z teplot uvnitř a vně konstrukce.

3 Koncepce tepelné obálky

V koncepčním výpočtu je uvažován rozkládací habitat kvůli snadnější přepravě. Díky výborné izolační vlastnosti jsou zvoleny sendvičové stěny. Uvažovány jsou konstantní teploty vně i uvnitř habitatu. Z důvodu častého výskytu fráze tepelný most, je dále využívána zkratka TM.

3.1 Postup výpočtu energetické náročnosti bez vlivu TM

Pro výpočet energetické náročnosti je potřeba vědět, jakých hodnot nabývají součinitelé prostupu tepla na povrchu konstrukce. Kapitoly 3.1.1 až 3.1.3 definují postup dosažení jejich hodnot.

3.1.1 Vnitřní a venkovní výpočtová teplota

Vnitřní výpočtová teplota t_i (°C) se stanoví jako aritmetický průměr z teploty vzduchu t_v a teploty okolních ploch t_u . Viz vztah (5).

$$t_i = \frac{t_v + t_u}{2} \quad (5)$$

Venkovní výpočtová teplota t_e (°C) se určí z normovaných tabulek dle lokality a nadmořské výšky.

3.1.2 Součinitel prostupu tepla uvnitř habitatu

Součinitel přestupu tepla uvnitř habitatu α_i (W·m⁻²·K⁻¹) je zde vyjádřen jako součet dílčích součinitelů zohledňujících konvekci (α_k) a sálání (α_s).

Součinitel přestupu tepla zapříčiněný sáláním se vyjádří z rovnosti Newtonova ochlazovacího zákona a Stefan – Boltzmannova zákona viz vztah (6). Tento vztah je následně upraven do vztahu (7) pro výpočet veličiny α_s . Pro rozlišení podmínek je ve veličinách použit dolní index i značící interní a e značící externí prostředí.

$$\dot{q} = \alpha_s \cdot \Delta t = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \Delta T^4 \quad (6)$$

$$\alpha_s = \sigma \varepsilon \frac{T_i^4 - T_u^4}{t_i - t_u} \quad (7)$$

Konstanta $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴ (Stefan – Boltzmannova konstanta). Veličina ε bezrozměrně vyjadřuje emisivitu povrchu daného materiálu.

Součinitel přestupu tepla uvnitř habitatu, který je dán konvekcí (α_k), se mění v závislosti na směru tepelného toku. Pro svislé povrchy platí vztah (8), pro vodorovné, přes něž prochází tepelný tok směrem vzhůru, platí vztah (9) a pro vodorovné plochy, kterými prochází tepelný tok směrem dolů, platí vztah (10).

$$\alpha_k = 1,59 \cdot \sqrt[3]{\Delta t} \quad (8)$$

$$\alpha_k = 2,07 \cdot \sqrt[3]{\Delta t} \quad (9)$$

$$\alpha_k = 2,07 \cdot \sqrt[3]{\Delta t} \quad (10)$$

3.1.3 Součinitel přestupu tepla vně habitatu

Vně habitatu je součinitel přestupu tepla α_e (W·m⁻²·K⁻¹) opět dán jako součet α_s a α_k , přičemž u α_k se zohledňuje rychlost větru v (m·s⁻¹), který ochlazuje konstrukci. Součinitel přestupu tepla je tak dán vztahem (11)

$$\alpha_k = 5,6 + 4v \quad (11)$$

3.1.4 Tepelná ztráta habitatu prostupem tepla

Tepelná ztráta prostupem tepla stěnou je určena součtem tepelných toků $\dot{Q}$ (W) ze vztahu (12) pro každou plochu.

$$\dot{Q} = S \frac{(t_i - t_e)}{R_i + R_{stěna} + R_e} \quad (12)$$

Přičemž R_i ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) je vnitřní odpor při přestupu tepla, $R_{stěna}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) určuje odpor stěny při přestupu tepla, R_e ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) zohledňuje vnější odpor při přestupu tepla. Vnitřní a vnější odpor při přestupu tepla se vypočítá ze vztahu (13). Odpor stěny při přestupu tepla je dán podílem rozměrů a tepelné vodivosti konstrukce dle rovnice (14).

$$R_{i,e} = \frac{1}{\alpha_k + \alpha_s} \quad (13)$$

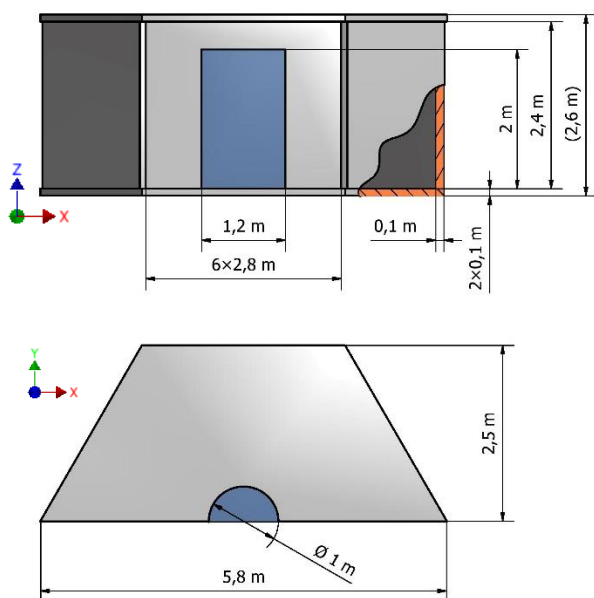
$$R_{stěna} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (14)$$

Veličina δ (m) značí tloušťku překážky, skrze kterou tepelný tok prochází. Pro ty, kde se tok pohybuje směrem vzhůru a dolů platí, že se do plochy započítá tloušťka stropu a u svislých stěn je to dáno pouze plochou stěny. Převrácená hodnota součtu odporů při přestupu tepla se nazývá součinitel prostupu tepla U ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) viz vztah (15).

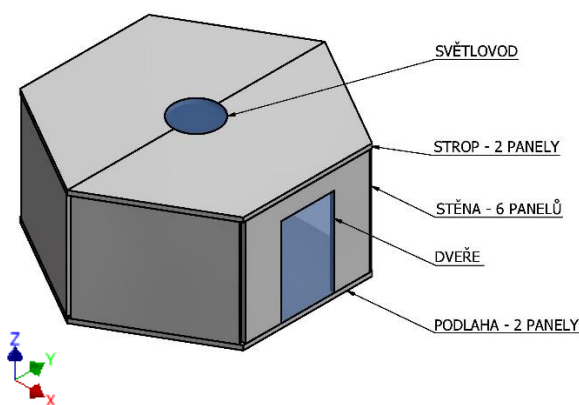
$$U = \frac{1}{R_i + R_{stěna} + R_e} \quad (15)$$

3.2 Rozměry habitatu

Koncept habitatu uvažuje prostor pro 2 lidi. Skladba konstrukce je zřejmá z obr. 15 a rozměry z obr. 14. Objem takového modulu je zhruba 50 m^3 .



Obr. 14: Rozměry rozkládacího habitatu



Obr. 15: Vizualizace rozkládacího habitatu

Panely habitatu využívají výhod sendvičové konstrukce. Jádrem tvoří polyuretanová pěna (dále jen PUR). Opláštění tvoří hliníkový plech o tloušťce 2 mm. Celková tloušťka stěny činí 100 mm. Dveře jsou stejného charakteru jako zbytek stěn a světlovod je odlit z plexiskla. V tabulce 8 jsou uvedeny geometrické údaje potřebné k výpočtu a v tabulce 9 vybrané vlastnosti použitých materiálů. Postup výpočtu obsahu jednotlivých ploch z tabulky 8 je v kapitole 3.3.2.

Tab. 8: Rozměry prvků habitatu

Prvek	Veličina	Hodnota	Obsah S
Okno	d_{okno}	1 m	0,79 m ²
	δ_{okno}	0,1 m	
Dveře	$h_{dveře}$	2 m	2,40 m ²
	$w_{dveře}$	1,2 m	
	$\delta_{dveře}$	0,1 m	
Strop	δ_{strop}	0,1 m	21,06 m ²
	l_{strop}	4,8 m	
Podlaha	$\delta_{podlaha}$	0,1 m	21,85 m ²
	$l_{podlaha}$	5,8 m	
Panel	δ_{panel}	0,1 m	6,72 m ²
	w_{panel}	2,8 m	
	h_{panel}	2,4 m	
Al plech	δ_{Al}	0,002 m	–
PUR pěna	δ_{PUR}	0,096 m	

Tab. 9: Použité materiály a příslušné vlastnosti

Název a značení	Emisivita ε (–)	Tepelná vodivost λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Hliník	Al	0,05
Polyuretanová pěna	PUR	0,95
Plexisklo	$plex$	0,95
Polyetylen	PE	0,95

3.3 Výpočet tepelné ztráty habitatu

Postup jednotlivých výpočtů je nastíněn v kapitole 3.1. Pro demonstrativní výpočet tepelné ztráty prostupem tepla Q_o (W) je venkovní teplota stanovena na -15 °C , identická teplota byla použita při výpočtu tepelných ztrát Mendelovy polární stanice [31]. Vnitřní návrhová teplota je 19 °C . Tato teplota neodpovídá teplotě udané normou pro obytné místnosti, nicméně v případě habitatu může být menší. V extrémním prostředí je vhodné zajistit minimální podmínky pro přežití, nehledě na komfort. Větší vnitřní návrhová teplota by vedla k větším požadavkům na vytápění, a to by se odrazilo na náročnosti ostrovního provozu habitatu.

3.3.1 Výpočet součinitelů přestupu tepla

- Vnitřní výpočtová teplota t_i

Teplota okolních ploch $t_u = 20\text{ °C}$,

Teplota vzduchu v místnosti $t_v = 18\text{ °C}$

$$t_i = \frac{t_u + t_v}{2} = \frac{20 + 18}{2} = 19\text{ °C} \quad (16)$$

$$T_u = 273,15 + t_u = 273,15 + 20 = 293,15\text{ K} \quad (17)$$

- Venkovní výpočtová teplota t_e

$$t_e = -15\text{ °C} \quad (18)$$

$$T_e = 273,15 + t_e = 273,15 + (-15) = 258,15\text{ K} \quad (19)$$

- Součinitel přestupu tepla uvnitř habitatu – vliv sálání, α_s

$$\alpha_s = \sigma \varepsilon \frac{T_i^4 - T_u^4}{t_i - t_u} = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \frac{292,15^4 - 293,15^4}{|19 - 20|} = 0,284 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (20)$$

- Součinitel přestupu tepla uvnitř habitatu – vliv konvekce, α_{ki}

Směr tepelného toku vzhůru skrze vodorovné stěny $\alpha_{k\uparrow}$

$$\alpha_{k\uparrow} = 2,07^3 \sqrt{t_i - t_e} = 2,07^3 \sqrt{19 - (-15)} = 6,706 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (21)$$

Směr tepelného toku skrze svislé stěny α_k

$$\alpha_k = 1,59^3 \sqrt{t_i - t_e} = 1,59^3 \sqrt{19 - (-15)} = 5,151 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (22)$$

Směr tepelného toku skrze svislé stěny $\alpha_{k\downarrow}$

$$\alpha_{k\downarrow} = 1,11^3 \sqrt{t_i - t_e} = 1,11^3 \sqrt{19 - (-15)} = 3,596 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (23)$$

- Celkový součinitel přestupu tepla uvnitř habitatu α_i

Směr tepelného toku vzhůru. Skrze vodorovné stěny $\alpha_{i\uparrow}$

$$\alpha_{i\uparrow} = \alpha_s + \alpha_{k\uparrow} = 0,284 + 6,706 = 6,990 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (24)$$

Směr tepelného toku skrze svislé stěny α_i

$$\alpha_i = \alpha_s + \alpha_k = 0,284 + 5,151 = 5,435 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (25)$$

Směr tepelného toku dolů skrze vodorovné stěny $\alpha_{i\downarrow}$

$$\alpha_{i\downarrow} = \alpha_s + \alpha_{k\downarrow} = 0,284 + 3,596 = 3,880 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (26)$$

- Součinitel přestupu tepla vně habitatu – vliv konvekce, α_{ke}

Pro všechny směry toku je stejný výpočet.

Rychlost okolního větru $w = 5,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\alpha_{ke} = 5,6 + 4w = 5,6 + 4 \cdot 5,4 = 27,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (27)$$

- Celkový součinitel přestupu tepla vně habitatu α_e

$$\alpha_e = \alpha_s + \alpha_{ke} = 0,284 + 27,2 = 27,484 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (28)$$

3.3.2 Výpočet obsahu částí habitatu

- Obsah okna S_{okno}

Průměr okna $d_{okno} = 1 \text{ m}$

$$S_{okno} = \frac{\pi \cdot d_{okno}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,79 \text{ m}^2 \quad (29)$$

- Obsah dveří $S_{dveře}$

Výška dveří $h_{dveře} = 2 \text{ m}$

Šířka dveří $w_{dveře} = 1,2 \text{ m}$

$$S_{dveře} = h_{dveře} \cdot w_{dveře} = 1,2 \cdot 2 = 2,4 \text{ m}^2 \quad (30)$$

- Obsah stropu S_{strop}

Délka hrany šestiúhelníku, který tvoří strop $a = 2,9 \text{ m}$

$$S_{strop} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 \right) - S_{okno} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} 2,9^2 \right) - 0,79 = 21,06 \text{ m}^2 \quad (31)$$

- Obsah panelu S_{panel}

Šířka panelu $w_{panel} = 2,8 \text{ m}$

Výška panelu $h_{panel} = 2,4 \text{ m}$

$$S_{panel} = h_{panel} \cdot (w_{panel} + \delta_{strop}) = 2,8 \cdot (2,4 + 0,1) = 6,96 \text{ m}^2 \quad (32)$$

3.3.3 Výpočet prostupu tepla obálkou habitatu bez TM

- Prostup tepla oknem $\dot{Q}_{okno}$

$$\dot{Q}_{okno} = \frac{t_i - t_e}{\left(\frac{1}{\alpha_{i\uparrow}} + \frac{\delta_{okno}}{\lambda_{plex}} + \frac{1}{\alpha_e}\right) \frac{1}{S_{okno}}} = \frac{19 - (-15)}{\left(\frac{1}{6,990} + \frac{0,1}{0,2} + \frac{1}{27,484}\right) \frac{1}{0,79}} = 39,30 \text{ W} \quad (33)$$

- Prostup tepla dveřmi $\dot{Q}_{dveře}$

$$\dot{Q}_{dveře} = \frac{t_i - t_e}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + 2 \cdot \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}} + \frac{\delta_{PUR}}{\lambda_{PUR}} + \frac{1}{\alpha_e}\right) \frac{1}{S_{dveře}}} = \frac{19 - (-15)}{\left(\frac{1}{5,435} + 2 \cdot \frac{0,002}{204} + \frac{0,096}{0,033} + \frac{1}{27,484}\right) \frac{1}{2,4}} = 26,07 \text{ W} \quad (34)$$

- Prostup tepla stropem $\dot{Q}_{strop}$

$$\dot{Q}_{strop} = \frac{t_i - t_e}{\left(\frac{1}{\alpha_{i\uparrow}} + 2 \cdot \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}} + \frac{\delta_{PUR}}{\lambda_{PUR}} + \frac{1}{\alpha_e}\right) \frac{1}{S_{strop}}} = \frac{19 - (-15)}{\left(\frac{1}{6,990} + 2 \cdot \frac{0,002}{204} + \frac{0,096}{0,033} + \frac{1}{27,484}\right) \frac{1}{21,06}} = 231,89 \text{ W} \quad (35)$$

- Prostup tepla podlahou $\dot{Q}_{podlaha}$

$$\dot{Q}_{podlaha} = \frac{t_i - t_e}{\left(\frac{1}{\alpha_{i\downarrow}} + 2 \cdot \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}} + \frac{\delta_{PUR}}{\lambda_{PUR}} + \frac{1}{\alpha_e}\right) \frac{1}{S_{podlaha}}} = \frac{19 - (-15)}{\left(\frac{1}{3,880} + 2 \cdot \frac{0,002}{204} + \frac{0,096}{0,033} + \frac{1}{27,484}\right) \frac{1}{21,85}} = 231,92 \text{ W} \quad (36)$$

- Prostup tepla stěnou $\dot{Q}_{stěna}$

Počet panelů tvořících stěnu $n = 6$

$$\dot{Q}_{stěna} = \frac{t_i - t_e}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + 2 \cdot \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}} + \frac{\delta_{PUR}}{\lambda_{PUR}} + \frac{1}{\alpha_e}\right) \frac{1}{S_{panel}}} \cdot n - \dot{Q}_{dveře} = \frac{19 - (-15)}{\left(\frac{1}{5,388} + 2 \cdot \frac{0,002}{204} + \frac{0,096}{0,033} + \frac{1}{27,437}\right) \frac{1}{6,96}} \cdot 6 - 26,06 = 427,62 \text{ W} \quad (37)$$

- Prostup tepla obálkou habitatu $\dot{Q}_o$

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{okno} + \dot{Q}_{dveře} + \dot{Q}_{strop} + \dot{Q}_{podlaha} + \dot{Q}_{stěna} \quad (38)$$

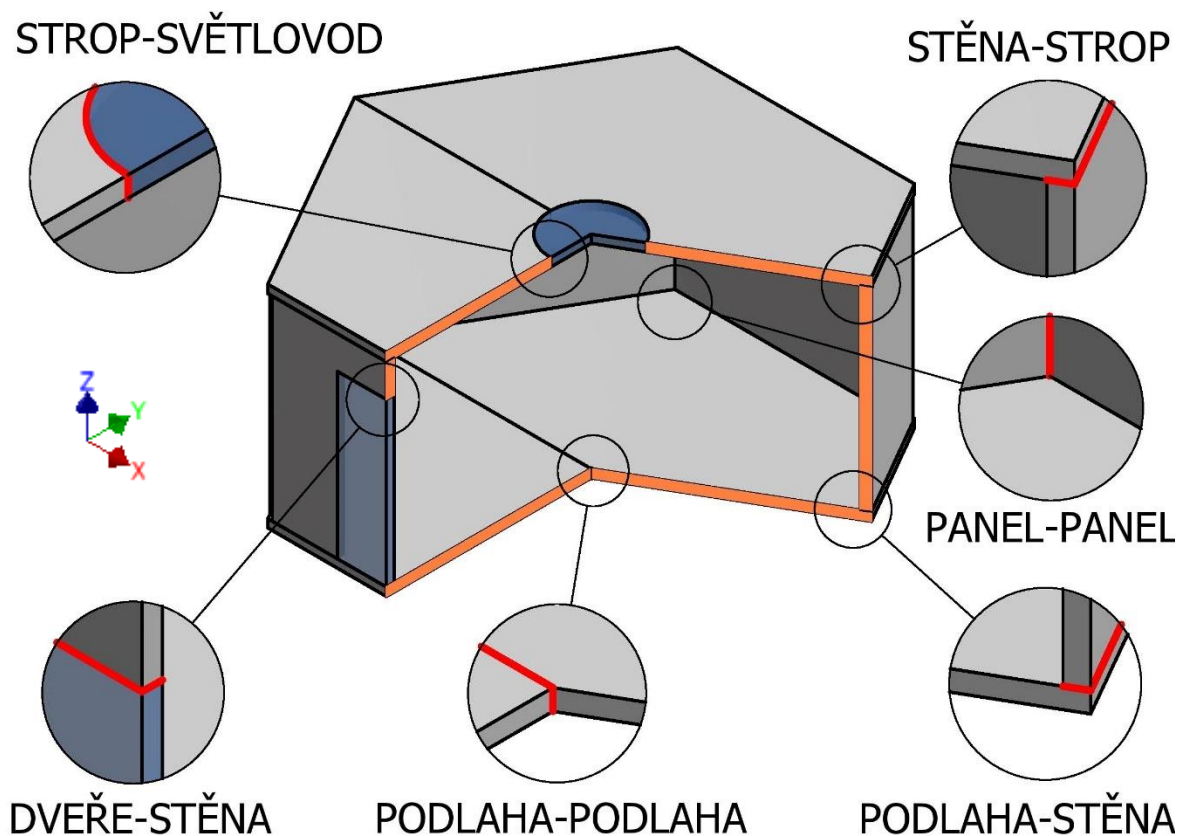
$$\dot{Q}_o = 39,30 + 26,07 + 231,89 + 231,92 + 427,62 = 956,81 \text{ W}$$

Bez bodových a lineárních tepelných vazeb, bez přírážek na vyrovnání vlivu chladných stěn, urychlení zátoku a natočení stěn na světové strany, činí tepelná ztráta necelý 1 kW.

3.4 Výpočet vlivu tepelných mostů

K zobrazení teplotního pole a veličin potřebných k výpočtům je použit program Therm 7.4 naprogramovaný v Národní laboratoři v Lawrence Berkeley [32]. Pro výpočet využívá metodu konečných prvků. Okrajové podmínky jsou zvoleny dle vypočítaných hodnot v kapitole 3.3.1.

Na obr. 16 je vizualizace tepelných mostů, které jsou dále řešeny. Za pomoci tepelné propustnosti detailu L^{2D} , je vypočítán lineární činitel prostupu tepla Ψ , viz rovnice (1). Následně je posouzen vliv daného uspořádání na tepelnou obálku.

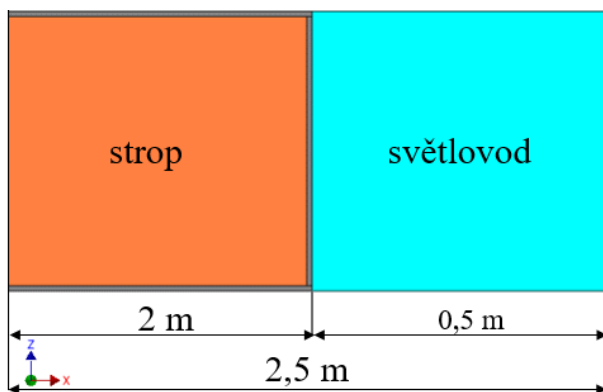


Obr. 16: Vizualizace TM rozkládacího habitatu

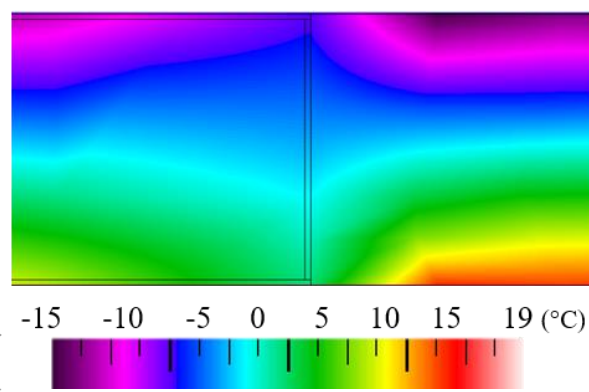
Uvažovány jsou TM lineární. Bodové TM se nacházejí například v oblasti dveří (závěsné panty) a jejich množství je minimální. Jejich vliv je tak bude zanedbán. Všechny výpočty zde uvedené vycházejí z vnějších rozměrů.

3.4.1 Spojení strop-světlovod

Ideová realizace spoje strop-světlovod použitá ve výpočetním programu je zobrazena na obr. 17. Obr. 18 ukazuje vizualizaci teplotního pole v infračerveném spektru. Z obr. 18 je očividné, že v místě styku panelu a plexiskla dochází k lokálnímu navýšení hustoty tepelného toku. Takové navýšení je v tomto případě způsobeno plechem, který odděluje izolační výplň panelu a světlovod. Protože je ze stejného materiálu jako opláštění panelu, je v něm větší hustota tepelného toku než v přilehlých materiálech s větším tepelným odporem.



Obr. 17: Složení detailu strop-světlovod



Obr. 18: Teplotní pole detailu strop-světlovod

Pro výpočet v programu je zvolen výsek o celkové délce $b = 2,5$ m, aby na jeho koncích byl neměnný tepelný tok. Součinitel prostupu tepla $U^{2D} = 0,88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ vnější strany detailu je stanoven s 2,65% chybou. Tepelná propustnost detailu L^{2D} je ze vztahu (2) v závislosti na U^{2D} vyjádřena v rovnici (39) [29].

$$L^{2D} = 0,88 \cdot 2,5 = 2,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (39)$$

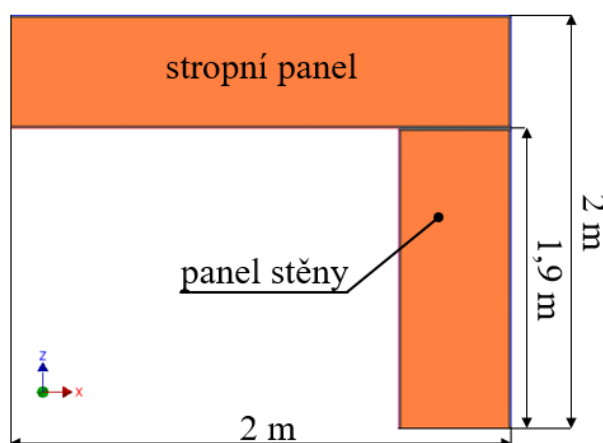
Lineární činitel prostupu Ψ je ze vztahu (1) vyjádřen v rovnici (40)

$$\begin{aligned} \Psi_{okno} &= L^{2D} - b_{okno} \cdot U_{okno} - b_{strop} \cdot U_{strop} \\ \Psi_{okno} &= 2,20 - 0,5 \cdot 1,47 - 2 \cdot 0,32 = 0,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (40)$$

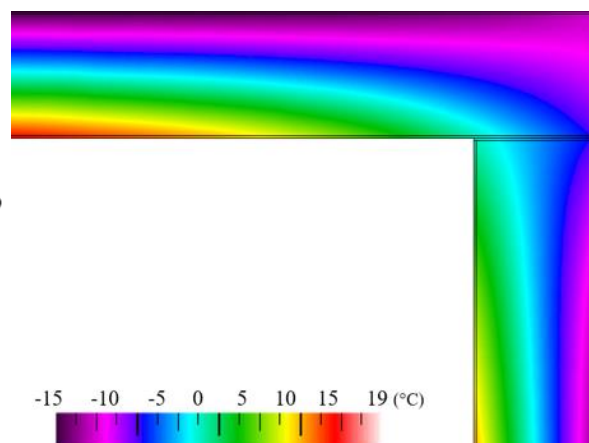
Veličiny b_{okno} a b_{strop} jsou délky prvků v detailu vloženém do programu Therm. Kladná hodnota Ψ značí, že tepelný most vede k dodatečné tepelné ztrátě.

3.4.2 Spojení stěna-strop

Na obr. 19 je ideová realizace spojení stropu a stěny. Z teplotního pole v obr. 20 je patrné, že spoj je zatížen výrazným TM. Teplota v rohu klesá až k 0°C , to je nepříjemný stav.



Obr. 19: Složení detailu stěna-strop



Obr. 20: Teplotní pole detailu stěna-strop

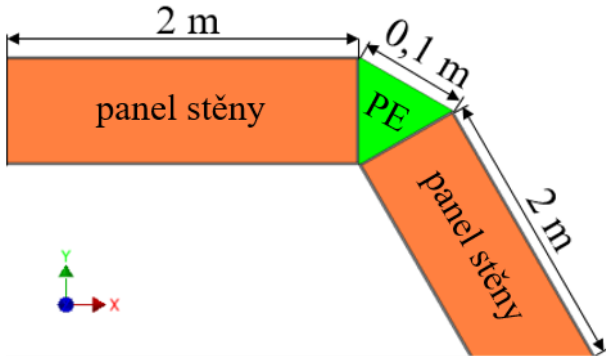
Pro výpočet je zvolen výsek 2×2 m. $U^{2D} = 0,69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ s 1,97% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (41) a lineární činitel v rovnici (42).

$$L^{2D} = 0,69 \cdot 4 = 2,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (41)$$

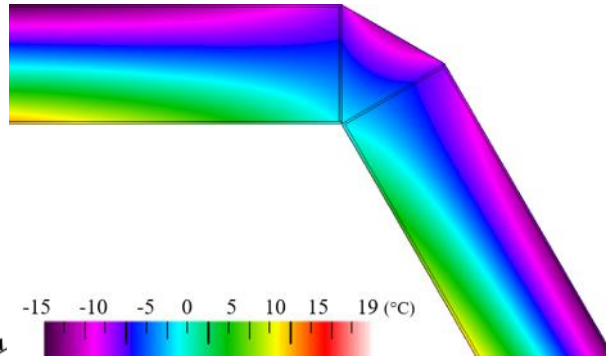
$$\begin{aligned} \Psi_{strop} &= L^{2D} - b_{stěna} \cdot U_{stěna} - b_{strop} \cdot U_{strop} \\ \Psi_{strop} &= 2,76 - 1,9 \cdot 0,32 - 2 \cdot 0,32 = 1,47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (42)$$

3.4.2 Spojení panel-panel

Na obr. 21 je ideová realizace spojení panelů. Vzhledem k tomu, že se panely skládají vedle sebe do hexagonu, nelze zajistit plošný styk po celém boku panelu, jak tomu bylo v předchozích případech. Mezi panely je vložen profil z polyetylenu (PE). Ten má výborné mechanické a materiálové vlastnosti. Z obr. 22 je patrné, že ačkoli je PE výborný izolant, tepelné mosty v hliníkových koncích panelů zcela neodstíní.



Obr. 21: Složení detailu panel-panel



Obr. 22: Teplotní pole detailu panel-panel

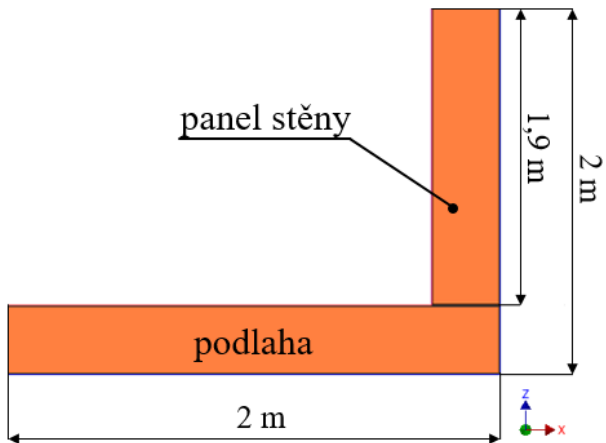
Pro výpočet je zvolen výsek o délce 4,1 m. $U^{2D} = 0,69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ s 2,19% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (43) a lineární činitel v rovnici (44).

$$L^{2D} = 0,69 \cdot 4,1 = 2,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (43)$$

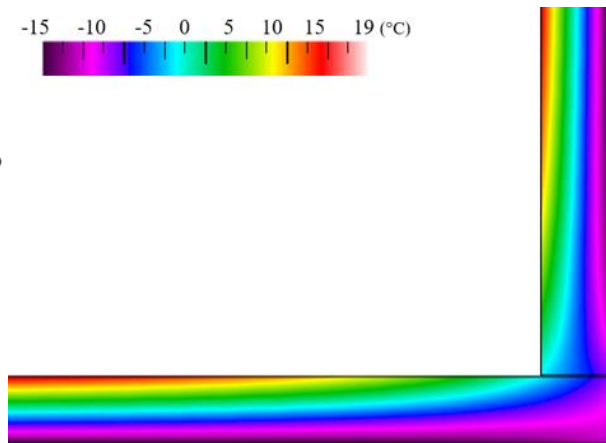
$$\begin{aligned} \Psi_{\text{panel}} &= L^{2D} - b_{\text{panel}} \cdot U_{\text{panel}} - b_{\text{panel}} \cdot U_{\text{panel}} \\ \Psi_{\text{panel}} &= 2,83 - 2(2 \cdot 0,32) = 1,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (44)$$

3.4.3 Spojení podlaha-stěna

Na obr. 23 je znázorněno spojení stěny a podlahy. Roh spoje je opět zatížen zvýšenou hustotou tepelného toku (viz obr. 24). Teplota v rohu spojení je zde vyšší než u spoje stěna-strop z toho důvodu, že součinitel přestupu tepla je vyšší (vliv gravitace přidává na odporu).



Obr. 23: Složení detailu podlaha-stěna



Obr. 24: Teplotní pole detailu podlaha-stěna

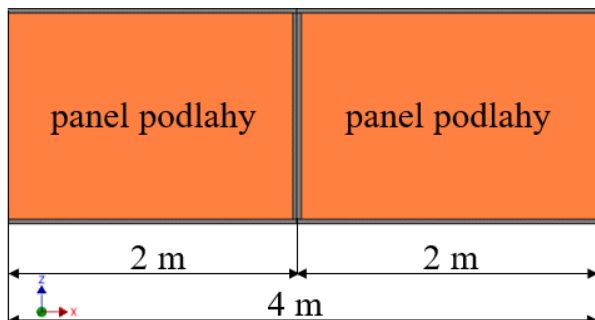
Pro výpočet je zvolen výsek $2 \times 2 \text{ m}$. $U^{2D} = 0,65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ s 2,40% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (45) a lineární činitel v rovnici (46).

$$L^{2D} = 0,65 \cdot 4 = 2,60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (45)$$

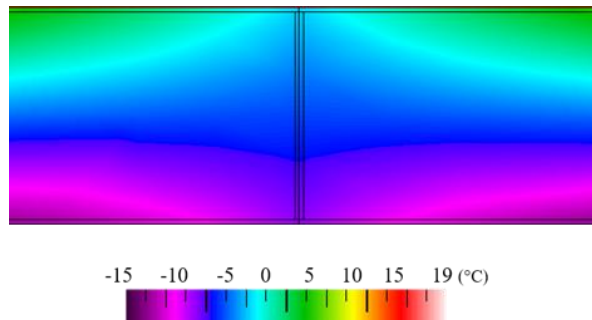
$$\begin{aligned} \Psi_{\text{stěna}} &= L^{2D} - b_{\text{stěna}} \cdot U_{\text{stěna}} - b_{\text{podlaha}} \cdot U_{\text{podlaha}} \\ \Psi_{\text{stěna}} &= 2,60 - 1,9 \cdot 0,32 - 2 \cdot 0,32 = 1,31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (46)$$

3.4.4 Spojení podlaha-podlaha

Na obr. 25 je znázorněna podlaha, kterou tvoří dva panely. Plechové pásy na boku panelů zde způsobují výrazný tepelný most (viz obr. 26). Nejnižší teplota v interiéru činí $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 25: Složení detailu podlaha-podlaha



Obr. 26: Teplotní pole detailu podlaha-podlaha

Pro výpočet je zvolen výsek o celkové délce 4 m. $U^{2D} = 0,63\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ s 2,94% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (47) a lineární činitel v rovnici (48).

$$L^{2D} = 0,63 \cdot 4 = 2,52\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (47)$$

$$\Psi_{\text{podlaha}} = L^{2D} - 2(b_{\text{podlaha}} \cdot U_{\text{podlaha}}) \quad (48)$$

$$\Psi_{\text{podlaha}} = 2,52 - 2(2 \cdot 0,32) = 1,23\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

3.4.5 Spojení strop-strop

Strop je tvořen dvěma panely, které mají stejné složení jako podlahové, schéma i teplotní pole je v principu stejné jako na obr. 25 a 26. Taktéž vstupující hodnoty do výpočtu jsou identické jako u spojení podlaha-podlaha, až na okrajové podmínky. $U^{2D} = 0,73\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ s 2,53% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (49) a lineární činitel v rovnici (50).

$$L^{2D} = 0,73 \cdot 4 = 2,92\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (49)$$

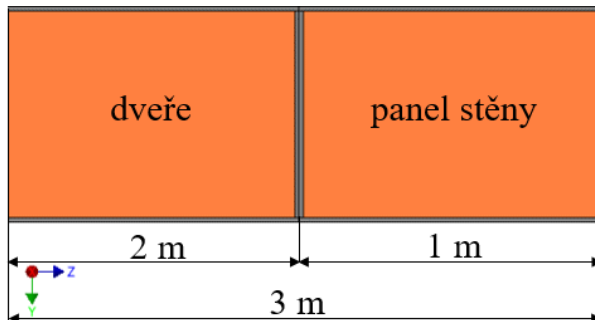
$$\Psi_{\text{střecha}} = L^{2D} - 2(b_{\text{strop}} \cdot U_{\text{strop}}) \quad (50)$$

$$\Psi_{\text{střecha}} = 2,92 - 2(2 \cdot 0,32) = 1,96\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

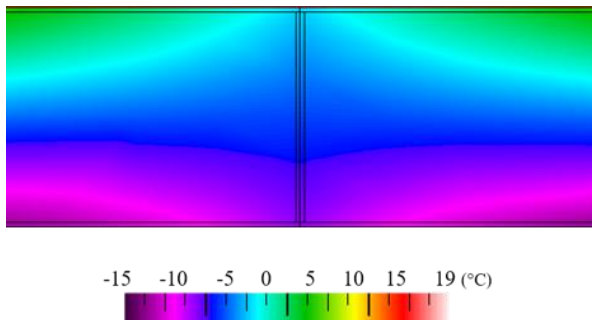
3.4.6 Spojení dveře-stěna

Na obr. 27 je zobrazen pohled na styk dveří a stěny, detail je přetočený o 90° , reprezentuje tak horizontální styk dveří a stěny. Tento spoj se opět (viz obr. 28) jeví jako problematický v případě daného složení stěn. Teplota v místě spojení panelů klesá na nízkou hodnotu.

Pro výpočet byl zvolen výsek o celkové délce 3 m. $U^{2D} = 0,81\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ s 2,30% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (51) a lineární činitel v rovnici (52).



Obr. 27: Složení detailu dveře-stěna

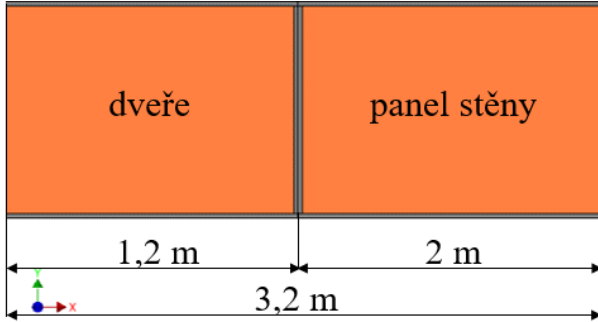


Obr. 28: Teplotní pole detailu dveře-stěna

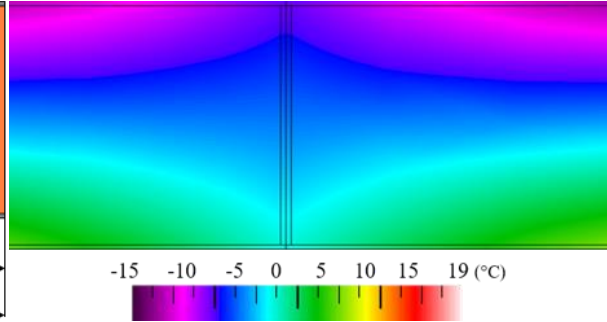
$$L^{2D} = 0,81 \cdot 3 = 2,43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{dveře1} &= L^{2D} - b_{dveře} \cdot U_{dveře} - b_{stěna} \cdot U_{stěna} \\ \Psi_{dveře1} &= 2,52 - 1 \cdot 0,32 - 2 \cdot 0,32 = 1,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (52)$$

Protože se dveře stýkají se stěnou ve více směrech (vertikálním a horizontálním), byl v předešlém výpočtu zohledněn styk horizontální, dále je zohledněn vertikální.



Obr. 29: Složení detailu dveře-stěna



Obr. 30: Teplotní pole detailu dveře-stěna

Pro výpočet je zvolen výsek o celkové délce 3,2 m. $U^{2D} = 0,78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ s 2,59% chybou. Tepelná propustnost tohoto detailu je vyjádřena v rovnici (53) a lineární činitel v rovnici (54).

$$L^{2D} = 0,78 \cdot 3,2 = 2,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{dveře2} &= L^{2D} - b_{dveře} \cdot U_{dveře} - b_{stěna} \cdot U_{stěna} \\ \Psi_{dveře2} &= 2,53 - 1,2 \cdot 0,32 - 2 \cdot 0,32 = 1,49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (54)$$

3.4.7 Výpočet prostupu tepla obálkou habitatu s TM

Ze vztahu (3) je spočítána měrná ztráta prostupem tepla H_T v rovnici (55). Jak je psáno v kapitole 3.4, bodové tepelné mosty nejsou v tomto případě uvažovány.

$$\begin{aligned} H_T &= U_{okno} \cdot S_{okno} + U_{strop} \cdot S_{strop} + 6(U_{panel} \cdot S_{panel}) + U_{podlaha} \cdot S_{podlaha} + \\ &+ \Psi_{okno} \cdot \pi d_{okno} + \Psi_{strop} \cdot (6w_{panel}) + \Psi_{panel} \cdot (6h_{panel}) + \Psi_{stěna} \cdot (6w_{panel}) + \\ &+ \Psi_{podlaha} \cdot l_{podlaha} + \Psi_{střecha} \cdot l_{strop} + \Psi_{dveře1} \cdot w_{dveře} + 2(\Psi_{dveře2} \cdot h_{dveře}) \\ H_T &= 1,47 \cdot 0,79 + 0,32 \cdot 21,06 + 6(0,32 \cdot 6,96) + 0,32 \cdot 21,85 + 0,82 \cdot \pi + \\ &+ 1,47(6 \cdot 2,8) + 1,53(6 \cdot 2,4) + 1,31(6 \cdot 2,8) + 1,23 \cdot 5,8 + 1,63 \cdot 4,8 + 1,14 \cdot 1,2 + \\ &+ 2(1,49 \cdot 2) = 121,6 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (55)$$

Tepelná ztráta prostupem tepla Q_T se zohledněnými lineárními tepelnými mosty je spočítána v rovnici (56). Vychází ze vztahu (4).

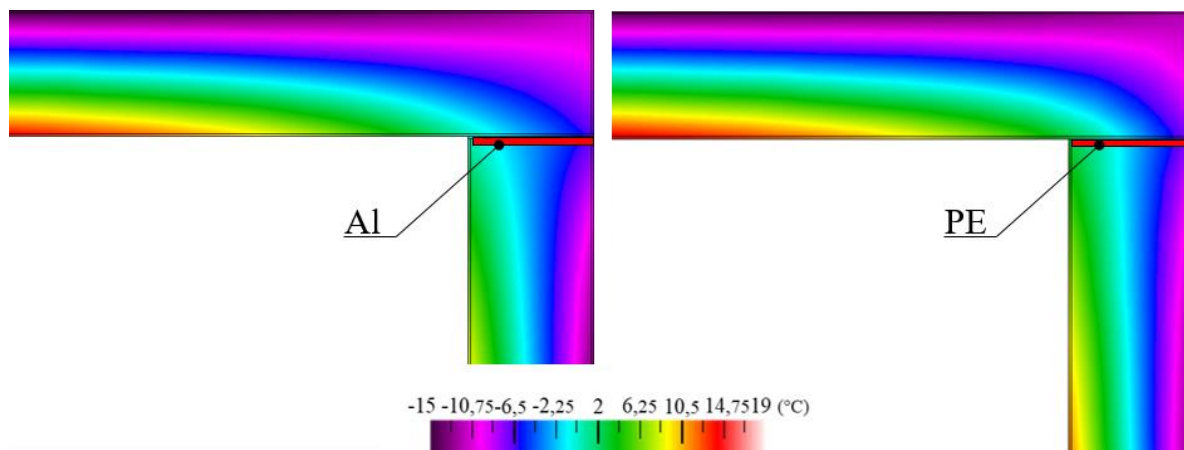
$$\dot{Q}_T = 121,6 \cdot [19 - (-15)] = 4,1 \text{ kW} \quad (56)$$

Rozdíl mezi ztrátou bez vlivu TM $\dot{Q}_o$ a s vlivem TM $\dot{Q}_T$ je veliký. Boční opláštění panelů z hliníku zapříčiňuje vznik tepelného mostu, což vzhledem k velkému množství spojů znamená veliký nárůst v náročnosti vytápění/chlazení. Lze tomu předejít vhodnou volbou materiálu, který se umístí na bok panelu namísto hliníkového plechu nebo dodatečným přidáním izolačního materiálu. Ten se vloží do míst, kde se stýkají panely tak, aby se hliníkové opláštění navzájem nedotýkalo. V případě že by se na opláštění boků panelů zvolil materiál s podobnými vlastnostmi jako jádro panelu (např. polyetylenová pásovina), lze ztrátu minimalizovat. V tabulce 10 jsou pro demonstraci předešlého tvrzení srovnány lineární činitele prostupu tepla Ψ a celková ztráta $\dot{Q}_T$. Hodnoty pro PE opláštění jsou vypočítány stejným způsobem, jako je popsán v kapitole 3.4.

Tab. 10: Srovnání obvodového opláštění z Al a PE

$\Psi (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	okno	strop	panel	stěna	podlaha	střecha	dveře1	dveře2	$Q_T (\text{kW})$
Al	0,82	1,47	1,53	1,31	1,23	1,23	1,14	1,49	4,14
PE	-0,01	0,99	0,10	1,07	-0,05	-0,05	-0,33	-0,01	2,14

Na obr. 31 je zobrazeno teplotní pole detailu spojení stěna-strop. V teplotním poli nalevo lze pozorovat nižší teploty v rohu spoje, díky výraznému tepelnému mostu. Napravo je vloženo obložení z PE materiálu, které svou nízkou tepelnou vodivostí snižuje únik tepla v porovnání s předchozím řešením. To se projeví snížením hodnoty Ψ .

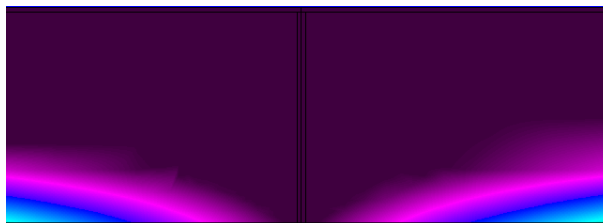


Obr. 31: Porovnání teplotního pole s vnitřním obložení z Al a PE

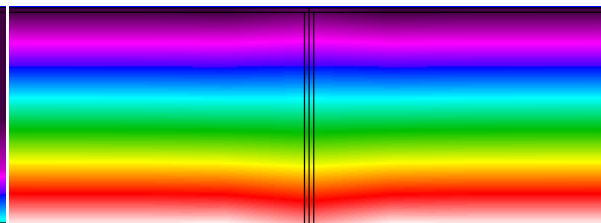
3.4.8 Prostup tepla obálkou habitatu v extrémním prostředí

V podkapitolách 3.4.1 až 3.4.7 byly kvantifikovány tepelné mosty habitatu při venkovní teplotě $t_e -15^\circ\text{C}$. Protože je zde použit obklad panelu z hliníkového plechu, vznikají v obálce výrazné tepelné mosty. V následujícím zhodnocení je jako obklad panelu zvolen materiál PE 500. Potřebné vlastnosti k výpočtu jsou uvedeny v tabulce 9. Ztráty jsou spočítány stejným způsobem jako v předchozích kapitolách. Venkovní teplota t_e činí -50°C .

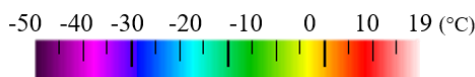
Obložení panelu materiálem PE 500 je vhodnější volba než hliníkový plech z důvodu výrazně menší tepelné vodivosti a nižší váhy. V tabulce 10 je zjevné, že ztráty vlivem TM s Al plechem mohou dosahovat i při normálních návrhových teplotách výrazně vysokých hodnot. Na obr. 32 je teplotní pole v IR spektru pro detail strop-strop, který má největší lineární činitel prostupu tepla v obou uvažovaných variantách (viz tabulka 10). Zobrazené pole je pro panel obložený plechem. Na obrázku 33 je teplotní pole pro panel, který je obložený polyetylenem. Hodnota tepelného mostu se při změně materiálu výrazným způsobem sníží.



Obr. 32: Teplotní pole detailu strop-strop s Al obkladem

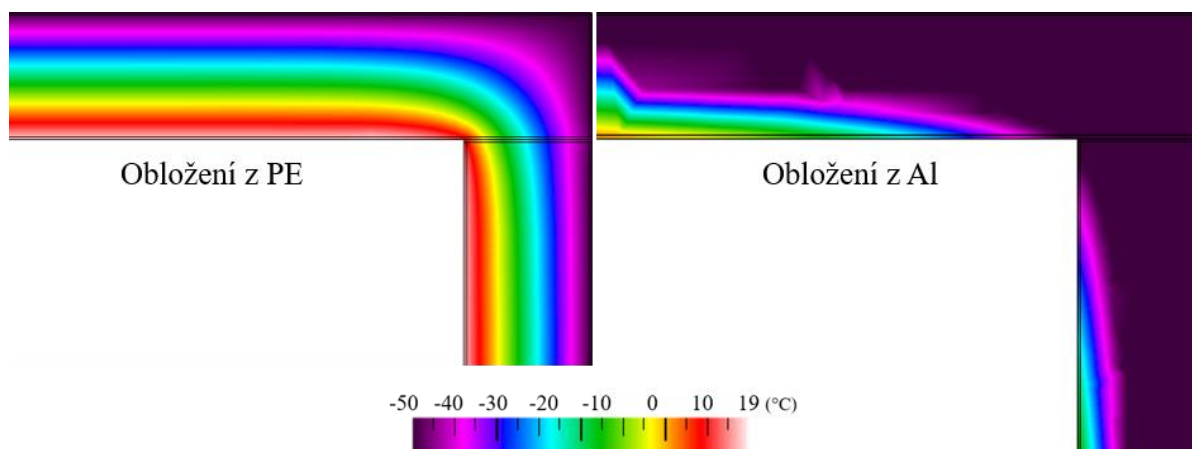


Obr. 33: Teplotní pole detailu strop-strop s PE obkladem



Obr. 34: Legenda k obrázkům 32 a 33

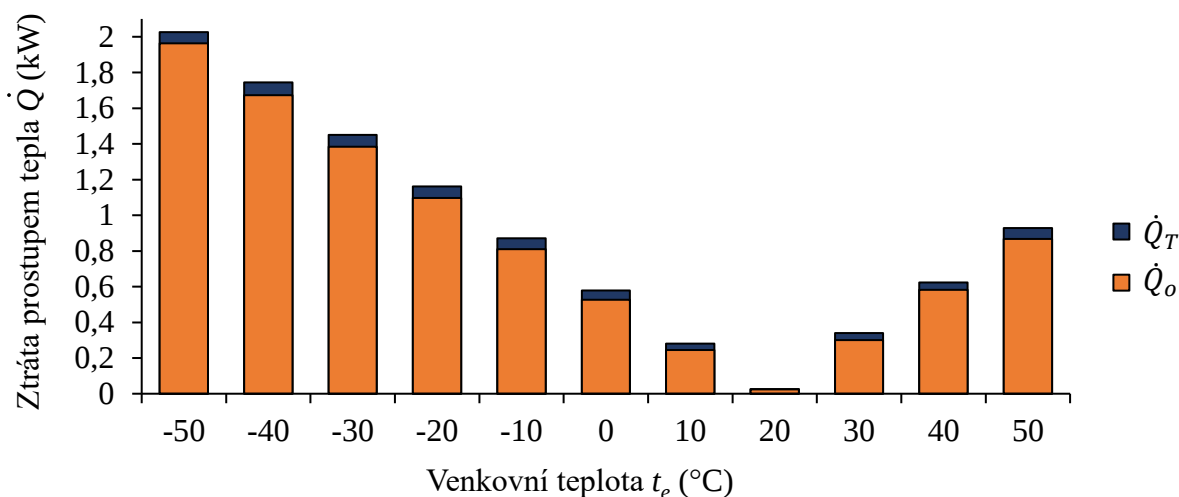
Na obr. 35 je srovnání teplotního pole v IR spektru pro detail stěna-strop s Al plechem a PE pásovinou. Opět lze usoudit, že pro extrémní teploty se hliníkové obložení jeví jako špatná volba.



Obr. 35: Porovnání teplotního pole s kompletním obložním z Al a PE

Z hodnot lineárních činitelů prostupu tepla získaných pro extrémní teploty $t_e -50\text{ °C}$ a 50 °C pro polyetylenové obložení panelů je ze vztahu (4) vypočítána tepelná ztráta prostupem tepla $\dot{Q}_T$ se zohledněnými lineárními tepelnými mosty a vynesena do grafu I. Tepelná ztráta $\dot{Q}_o$ vyjadřuje ztrátu bez vlivu TM. Dominantní složka ztráty je prostupem tepla stěnou a ztráta s vlivem TM činí v průměru 7% příspěvek navíc. Znázorněná ztráta je ekvivalentní výkonu, který je potřeba vyvinout na vytápění nebo chlazení habitatu za daných podmínek.

Graf I: Srovnání tepelných ztrát v závislosti na okolní teplotě



Závěr

V první části této bakalářské práce je popsáno extrémní prostředí, které se vyznačuje teplotními výkyvy a nepříznivými podmínkami pro trvalé lidské osídlení. V návaznosti na popis extrémního prostředí jsou v obr. 1 habitaty rozděleny do dvou základních kategorií, stacionárních a mobilních. V rešerši je v kategorii stacionární habitat popsána Mendelova polární stanice, kterou lze v určitém hledisku klasifikovat jako habitat. Pro zajištění nízké energetické ztráty je zvolena technologie prefabrikovaných zámkových panelů, přezdívané jako „sendvič“ panely. Jádrem takové stěny je polyuretanová pěna, která je obklopena dřevěnou překližkou. Následující rešeršní objekt je HDU (testovaný v poušti) je určen pro vesmírné použití. Pro zajištění odolné a neprůvzdušné obálky jsou zde využity panely, které mají na povrchu laminát a uvnitř silnou vrstvu plastového izolantu. Mezi ně jsou vložena kovová žebra, která zajišťují tuhost konstrukce, nicméně protože jsou ocelová, vnášejí tak do energetické bilance vliv lineárních tepelných vazeb.

Jako příklad pro mobilní habitaty je zvoleno opláštění karavanů. Zde z textu vyplývá, že nejlepší konstrukce k minimalizaci tepelných ztrát je konstrukce bez spojů. Monolitická konstrukce karavanu z laminátu a plastických hmot se jeví jako vhodnější koncepce obálky než sendvičová. Dalším příkladem je BEAM, který je využíván na ISS. Protože vynesení 1 kg nákladu do vesmíru je stále velice nákladná záležitost, bylo u této konstrukce dbáno na minimální váhu a prostor, který zaujímá v nečinné poloze. Jsou zde použity textilní materiály, které dovolují modulu se nafouknout a v případě potřeby složit. Mezi speciální textilií jsou vložena kevlarová vlákna, vzduchové mezery a kovové mezerníky, které zajišťují odolnost a teplotní odolnost nafouknutého modulu. Jasným příkladem pro mobilní habitat pro extrémní prostředí je SHEE. Tento habitat je složen z monolitických plastových stěn, které jsou ve funkčním stavu pohyblivé. Složený habitat tak lze převážet v kontejneru a na místě určení rozložit. Protože má pevné stěny, může převážet cenné přístroje bez rizika jejich zničení. Díky malé výšce a váze rozložené na větším prostoru odolá i velice nepříznivým povětrnostním podmínkám. V závěru rešerše jsou připomenuty pasivní domy, u kterých začíná nabývat na důležitosti fenomén tepelných mostů.

V druhé části bakalářské práce je popsána tepelná obálka ideového habitatu, zejména z hlediska tepelných mostů. Je zde popsán postup, jak se budou v následující části tepelné mosty kvantifikovat a jak se následně určí ztráta prostupem tepla obálkou habitatu. Vliv bodových tepelných vazeb je zde zanedbán.

V třetí a poslední části této bakalářské práce jsou navrženy součinitelé přestupu tepla, kteří mají zásadní vliv na množství prostoupeného tepla obálkou habitatu. Uvažovaný ideový habitat (obr. 14) s podstavou z pravidelného šestiúhelníku má objem 50 m^3 o maximálních rozměrech $5,8 \times 2,6 \text{ m}$. Je složen ze 6 panelů, které tvoří stěnu, 2 panelů, které tvoří podlahu a 2 panelů tvořících strop. Samozřejmou součástí jsou dveře a světlovod. Panely mají celkovou tloušťku 100 mm, přičemž 96 mm je šířka polyuretanové výplně. Po celém svém obvodu jsou zakrytovány v hliníkovém plechu o jmenovité tloušťce 2 mm. Realizace spojů a ukotvení panelů zde není bráno v potaz. Pro vnitřní návrhovou teplotu 19°C a venkovní teplotu -15°C je spočítána energetická náročnost na udržení požadované teploty uvnitř habitatu $\dot{Q}_o = 965 \text{ W}$ z rovnice (38). Následně jsou vybrané detaily ideového habitatu (které mohou zapříčinit vznik tepelného mostu) z obr. 16 vloženy do programu Therm, který ze zadané geometrie a okrajových podmínek metodou konečných prvků vykreslí teplotní pole a určí součinitel prostupu tepla daného detailu. Ze získaných hodnot je následně vyčíslena ztráta habitatu se zohledněnými tepelnými mosty $\dot{Q}_T = 4,1 \text{ kW}$ v rovnici (56). Tato ztráta je mnohonásobně větší

než ztráta neuvažující vliv tepelných mostů $\dot{Q}_o$. Dokazuje to důležitost započítání vlivu tohoto jevu do celkové ztráty objektu. Tak velký vliv na tepelnou ztrátu objektu mají tepelné mosty zřídka. Nicméně je třeba vzít v potaz, že habitat pro extrémní prostředí je netradiční konstrukce, ve které je díky rozkládací konstrukci velké množství liniových tepelných vazeb. Důležitým faktorem v tomto případě je, že jsou panely obklopeny hliníkovým plechem. Z obrázků teplotních polí jednotlivých detailů v kapitole 3.4 je zřejmé, že tepelný most vzniká v místě spojení panelů právě tam, kde se nachází plech spojující vnitřní a vnější část opláštění. Takovému narušení izolace lze předcházet vhodnou volbou materiálů. V tabulce 10 je srovnání lineárních činitelů prostupu tepla pro hliníkové boční obložení panelů a obložení z polyetylenu. V případě polyetylenu vychází ztráta $\dot{Q}_T = 2,1 \text{ kW}$. Z toho vyplývá, že tepelné mosty lze účinně do jisté míry eliminovat vhodnou volbou materiálu stěn, případně jejich spojů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] American Geophysical Union: Sahara's Abrupt Desertification Started By Changes In Earth's Orbit, Accelerated By Atmospheric And Vegetation Feedbacks. *ScienceDaily* [online]. 1999 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/1999/07/990712080500.htm>
- [2] *Mráz ochromil Ameriku: V Minnesotě radí nevycházet, bylo až minus 45.* [online]. 2016 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/svet/1986670-mraz-ochromil-ameriku-v-minnesote-radi-nevychazet-bylo-az-minus-45>
- [3] PISKALA, Vladimír. *Arktida se potýká s extrémy: teploty jsou o 20 stupňů vyšší než normálně, Sibiř naopak mrzne* [online]. 2016 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/veda/1968606-arktida-se-potyka-s-extremy-teploty-jsou-o-20-stupnu-vyssi-nez-normalne-sibir-naopak>
- [4] S.H.E.E.: Self-deployable habitat for extreme environments. *Shee.eu* [online]. Space Innovations, 2015 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.shee.eu/main/lang/cze>
- [5] BULEEN, Chad. Average Temperature of Antarctica. In: *USA Today: Travel tips* [online]. b.r. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://traveltips.usatoday.com/average-temperature-antarctica-13726.html>
- [6] BERRAHMOUNI, Nora a Neil BURGESS. Northern Africa. *Worldwildlife: Deserts and xeric shrublands* [online]. b.r. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.worldwildlife.org/ecoregions/pa1327>
- [7] ZHENG, Mimi. Pressure In Outer Space. In: *The Physics Factbook* [online]. 2002 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://hypertextbook.com/facts/2002/MimiZheng.shtml>
- [8] *Antarktida - Polární výzkum na MU: Výzkum na stanici J.G.M.* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://polar.sci.muni.cz/cs/antarktida>
- [9] ELSTER, Josef, Petr MIXA, Pavel PROŠEK, Alois SUCHÁNEK a Ondřej VÍCHA. *The Czech Antarctic Station of Johann Gregor Mendel: from project to realization* [online]. In: . Brno: Masarykova univerzita, 2006, s. 54 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://oldgeogr.muni.cz/download/ATCM-Edinburgh.pdf>
- [10] *Facilities of J. G. Mendel Antarctic station: Technical and technological solutions with a special respect to energy sources* [online]. In: PROŠEK, Pavel, Miloš BARTÁK, Kamil LÁSKA, Alois SUCHÁNEK, Josef HÁJEK a Pavel KEPLER. Brno: Masarykova univerzita, 2013, s. 38-57 [cit. 2017-03-06]. DOI: 10.5817/CPR2013-1-7. ISSN 1805-0697.
- [11] DOUDOVÁ, Ludmila. 1. Česká vědecká polární stanice v Antarktidě. *ASB-Portál: Odborný stavební portál* [online]. JAGA Group s.r.o., 2008 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/1.-ceska-vedecka-polarni-stanice-v-antarktide>
- [12] *Stavební systém K-KONTROL®* [online]. In: . 4. Varnsdorf: CZECH PAN s.r.o., 2008 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.czechpan.cz/files/k-kontrol/k-kontrol.pdf>
- [13] Habitation Systems Project - Deep Space Habitat Facts. *NASA Fact sheet: FS-2011-08-047-JSC* [online]. 2011 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/pdf/468441main_HDU_FactSheet_508.pdf

- [14] *Habitat Demonstration Unit Build in 45 Seconds* [online]. In: . NASA.gov Video, 2013 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=C9-DG4MRHr0>
- [15] HOWE, Scott A., Kriss J. KENNEDY, Tracy R. GILL, Russell W. SMITH a Patrick GEORGE. NASA Habitat Demonstration Unit (HDU) Deep Space Habitat Analog. In: *AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013, s. - [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.2514/6.2013-5436. ISBN 9781624102394.
- [16] *Wingamm: Fibreglass Monocoque* [online]. In: . 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.wingamm.com/en/w-technology/monocoque-cabin-in-fibreglass/>
- [17] Complete equipment: Connection roof/wall. In: *Mobilvetta design* [online]. b.r. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://mobilvetta.it/kea-p/>
- [18] COFIELD, Calla. Take a Look Inside the 1st Inflatable Space Room for Astronauts. *Space.com* [online]. 2016 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.space.com/33108-inside-beam-inflatable-space-room-photos.html>
- [19] *Bigelow Aerospace: BEAM* [online]. In: . 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.bigelowaerospace.com/beam/>
- [20] MAHONEY, Erin. *BEAM Update: Expandable Habitat Reveals Important Early Performance Data* [online]. 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/beam-update-expandable-habitat-reveals-important-early-performance-data>
- [21] Spacehabitats: S.H.E.E. *Sobriety* [online]. Kuřim, b.r. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: http://sobriety.cz/spacehabitats_shee.htm
- [22] IMHOF, Barbara, Waltraut HOHENEDER, Stephen RANSOM et al. Building the Test Bed SHEE- A Self Deployable Habitat for Extreme Environments Lessons Learnt and Exploitation Opportunities for the Scientific Community. In: *AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.2514/6.2015-4401. ISBN 9781624103346.
- [23] IMHOF, Barbara, Joshua NELSON, Hemanth K. MADAKASHIRA, Alvo AABLOO, Peter WEISS a David ŠEVČÍK. SHEE - a Self-deployable Habitat for Extreme Environments: Exploitation and lessons learnt from testing. In: *46th International Conference on Environmental Systems: ICES-2016-252* [online]. Vienna, Austria, 2016, 16 s. [cit. 2017-03-21].
- [24] Co je to energetický štítek?. In: *Energetický štítek* [online]. b.r. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.energeticky-stitek-domu.cz/o-stitku/co-je-to>
- [25] O pasivním domě: Co je pasivní dům?. In: *Centrum pasivního domu* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/co-je-pasivni-dum/t2>
- [26] ŠUBRT, Roman. Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2017-03-20]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/2526-tepelne-mosty-ve-stavebnich-konstrukcich>
- [27] CHYBÍK, Josef. Hrubá stavba pasivních domů. *TZB-Info* [online]. Centrum pasivního domu, 2010 [cit. 2017-03-20]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/nizkoenergeticke-stavby/6859-hruba-stavba-pasivnich-domu>

- [28] ČSN 73 0540-1 *Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005, 68 s.
- [29] ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005, 60 s.
- [30] ČSN EN ISO 13789 *Tepelné chování budov - Měrné tepelné toky prostupem tepla a větráním - Výpočtová metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 20 s.
- [31] BROŽ, Karel. Využití obnovitelných zdrojů energie v české vědecké stanici v Antarktidě. *3T. Teplo - Technika - Teplárenství: Časopis podnikatelů v teplárenství*. Teplárenské sdružení České republiky, 2013, 13(1), 6. ISSN 1210 – 6003.
- [32] *THERM: LBNL Windows & Daylighting Software* [online]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2015 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>

Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Rozměr</i>	<i>Veličina</i>
a	(m)	Délka hrany šestiúhelníku
b	(m)	Délka tělesa v použitém detailu
d	(m)	Průměr
H_T	(W·K ⁻¹)	Měrná ztráta prostupem tepla
h	(m)	Výška
L^{2D}	(W·K ⁻¹)	Tepelná propustnost daného detailu
l	(m)	Délka
$\dot{Q}$	(W)	Tepelný tok
$\dot{Q}_o$	(W)	Tepelná ztráta prostupem tepla bez vlivu TM
$\dot{Q}_T$	(W)	Tepelná ztráta prostupem tepla s vlivem TM
R	(m ² ·K·W ⁻¹)	Tepelný odpor
S	(m ²)	Plocha
T	(K)	Termodynamická teplota
t	(°C)	Teplota
U	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	Součinitel prostupu tepla
U^{2D}	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	Součinitel prostupu tepla daného detailu
v	(m·s ⁻¹)	Rychlost větru
w	(m)	Šířka
α	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	Součinitel přestupu tepla
ΔT	(K)	Teplotní difference
δ	(m)	Tloušťka
ε	(–)	Emisivita
λ	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Tepelná vodivost
σ	(W·m ⁻² ·K ⁻⁴)	Stefan – Boltzmannova konstanta
χ	(W·K ⁻¹)	Bodový činitel prostupu tepla
Ψ	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Lineární činitel prostupu tepla

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
Al	Hliník
BEAM	Bigelow expendable activity module
ČSN	Česká technická norma
H DU	Habitat demonstration unit
ISS	International space station
OSB	Oriented stranded board
PE	Polyetylen
PUR	Polyuretan
plex	Plexisklo
SHEE	Self-deployable Habitat for Extreme Environments
TM	Tepelný most

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma dělení habitatů.....	16
Obr. 2: Spojení stěna-podlaha.....	18
Obr. 3: Spojení stěna-stěna.....	18
Obr. 4: Stavba polární stanice [10].....	18
Obr. 5: Ocelové žebro [15].....	19
Obr. 6: Prefabrikát stěny [15].....	19
Obr. 7: Monolit karavanové obálky [16].....	20
Obr. 8: Spojení stěna-strop [17].....	20
Obr. 9: BEAM v porovnání s výškou člověka [19].....	21
Obr. 10: složený BEAM [19].....	21
Obr. 11: Vertikální řez modulem [19].....	21
Obr. 12: SHEE v rozložené a složené konfiguraci [22].....	22
Obr. 13: Vizualizace habitatu.....	25
Obr. 14: Rozměry rozkládacího habitatu.....	28
Obr. 15: Vizualizace rozkládacího habitatu.....	28
Obr. 16: Vizualizace TM rozkládacího habitatu.....	32
Obr. 17: Složení detailu strop-světlovod.....	33
Obr. 18: Teplotní pole detailu strop-světlovod.....	33
Obr. 19: Složení detailu stěna-strop.....	33
Obr. 20: Teplotní pole detailu stěna-strop.....	33
Obr. 21: Složení detailu panel-panel.....	34
Obr. 22: Teplotní pole detailu panel-panel.....	34
Obr. 23: Složení detailu podlaha-stěna.....	34
Obr. 24: Teplotní pole detailu podlaha-stěna.....	34
Obr. 25: Složení detailu podlaha-podlaha.....	35
Obr. 26: Teplotní pole detailu podlaha-podlaha.....	35
Obr. 27: Složení detailu dveře-stěna.....	35
Obr. 28: Teplotní pole detailu dveře-stěna.....	35
Obr. 29: Složení detailu dveře-stěna.....	36
Obr. 30: Teplotní pole detailu dveře-stěna.....	36
Obr. 31: Porovnání teplotního pole s vnitřním obložením z Al a PE.....	37
Obr. 32: Teplotní pole detailu strop-strop s Al obkladem.....	37
Obr. 33: Teplotní pole detailu strop-strop s PE obkladem.....	37
Obr. 34: Legenda k obrázkům 32 a 33.....	37
Obr. 35: Porovnání teplotního pole s kompletním obložením z Al a PE.....	38